

中华人民共和国行业标准

《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》

JGJ/T23-2011 宣贯

主编单位： 陕西省建筑科学研究院

主 讲 人： 文恒武

二 0 一 一 年 六 月

# 第一章 编制工作简介

1985 年颁布的中华人民共和国行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T23, 经过 1992 年和 2001 年的两次修定。2001 年在修订回弹法标准时考虑了泵送混凝土的特点, 给出了泵送混凝土碳化深度小于 2mm, 抗压强度小于 55MPa 的修正值, 这对于提高泵送混凝土检测的精度, 具有积极的意义。但是, 当碳化深度大于 2mm 时, 只能用钻芯取样或同条件试块进行修正, 实际操作起来非常的不便, 在有些工程上无法实施。另外, 对于抗压强度大于 45MPa 混凝土的修正也明显偏低, 无法客观的反映混凝土的实际强度。

根据住房和城乡建设部建标[2008]102 号文件, 《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T23-2001 的修订被列入该计划, 编号: 161 号。

2008 年 8 月 5 日在西安成立了《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T23-2001 编制组, 编制工作大纲、修编工作计划安排和编制组的分工。2010 年 5 月在浙江的东阳通过了标准定额研究所组织的审查。2011 年 5 月 3 日住房和城乡建设部正式批准颁布, 将于 2011 年 12 月 1 日实施。

1. 本次修订的主要技术内容是: 1. 增加了数字式回弹仪的技术要求; 2. 增加了泵送混凝土测区强度换算表; 3. 对测区强度修正时将原来采用的修正系数改为修正量法。

## 1.1 数字式回弹仪的技术要求

数字式回弹仪应带有指针直读示值系统。数字显示的回弹值与指针直读示值相差不应超过 1。

## 1.2 泵送混凝土数学模型的建立及回归方程

通过对泵送混凝土 9843 个实验数据, 进行回归而得到  
幂函数曲线方程为:

$$f = 0.034488R^{1.9400}10^{(-0.0173d)}$$

其强度误差值为: 平均相对误差 (  $\delta$  )  $\pm 13.89\%$ ; 相对标准差 (  $e_r$  )  $17.24\%$ ; 相关系数(r): 0.878。

指数方程为:

$$f = 5.1392e^{(0.0535R-0.0444d)}$$

其强度误差值为: 平均相对误差 (  $\delta$  )  $\pm 14.31\%$ ; 相对标准差 (  $e_r$  )  $17.69\%$ ; 相关系数(r): 0.870。

通过分析比较, 最后采用幂函数曲线方程为泵送混凝土的测强曲线方程。

1.3. 高强混凝土的检测

高强混凝土密实度好，抗压强度高，表面硬度大，采用能量为 2.207J 的普通回弹仪已无法满足检测高强混凝土抗压强度的要求。我国的北京、陕西、浙江、温州、唐山、成都、广西、山东、江苏等地相继制定了回弹法检测泵送混凝土抗压强度的地方标准；贵州、山东、陕西、福建、云南等地制订了回弹法检测高强混凝土抗压强度的地方标准。

1.3.1. 高强回弹仪的选用

目前，高强回弹仪有 4.5J、5.5J 和 9.8J。本次高强混凝土试验选用标称能量为 5.5J 的回弹仪，主要是从一下几个问题考虑：一是贵州、福建、山东、陕西、云南、浙江、江苏等地都是采用该能量的回弹仪制定了或正在制定地方标准；二是 5.5J 的回弹仪相对能量较大，使得回弹区间容易拉开，能提高检测精度。

1.3.2. 高强混凝土数学模型的建立及回归方程

本次实验共取得高强混凝土实验数据 4313 个，按照最小二乘法的原理，通过对实验数据的回归而到

幂函数曲线方程为：

$$f = 2.51246R^{0.889}$$

其强度误差区间为：平均相对误差（ $\delta$ ） $\pm 5.398\%$ ；相对标准差（ $e_r$ ）6.665%；相关系数(r):0.833

指数方程为：

$$f = 27.1427e^{(0.0222R)}$$

其强度误差区间为：平均相对误差（ $\delta$ ） $\pm 6.096\%$ ；相对标准差（ $e_r$ ）8.026%；相关系数(r):0.733

抛物线方程为：

$$f = 18.97 + 0.9519R + 0.0059R^2$$

其强度误差区间为：平均相对误差（ $\delta$ ） $\pm 6.090\%$ ；相对标准差（ $e_r$ ）7.968%；相关系数(r):0.764

通过分析比较，幂函数的相惯性较好，误差较小，最后采用幂函数曲线方程为高强混凝土的测强曲线方程。

2. 测区曲线与全国部分地区曲线比较

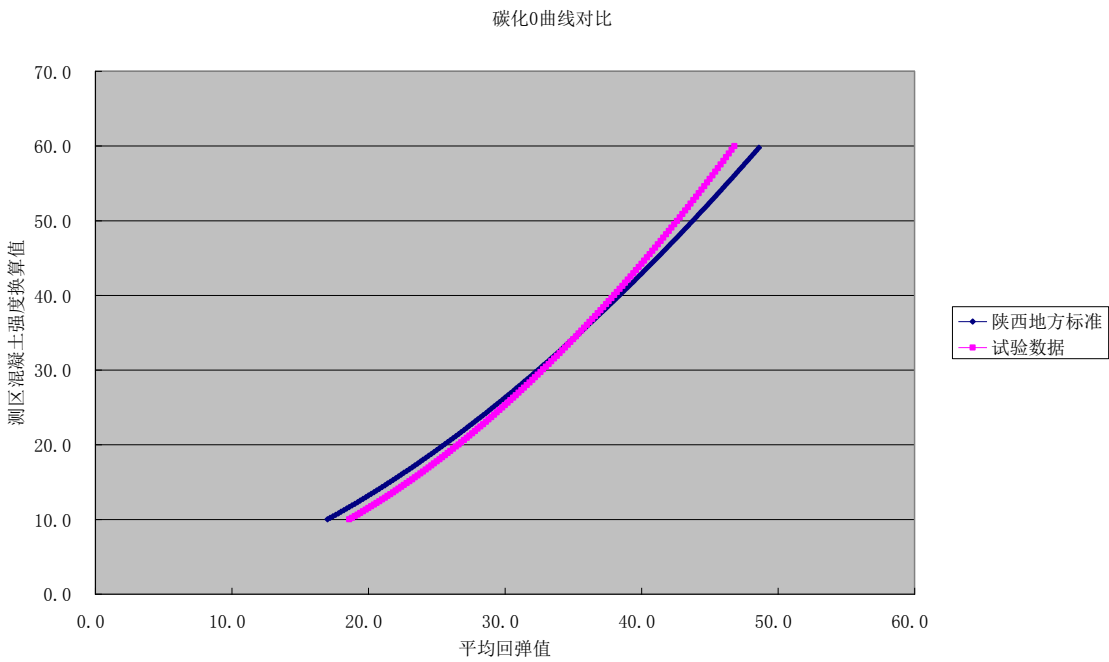
2.2 泵送混凝土曲线方程与全国部分地方曲线方程相比：

|         |                 |                     |
|---------|-----------------|---------------------|
| 陕西省     | 回弹区间 17.0~ 48.6 | 强度区间(MPa)10.0~ 59.8 |
| 山东省     | 回弹区间 20.6~ 45.8 | 强度区间(MPa)9.8~ 60.1  |
| 浙江省（碎石） | 回弹区间 18.2~ 47.6 | 强度区间(MPa)13.1~ 59.9 |
| 浙江省（卵石） | 回弹区间 20.0~ 48.0 | 强度区间(MPa)10.3~ 60.0 |

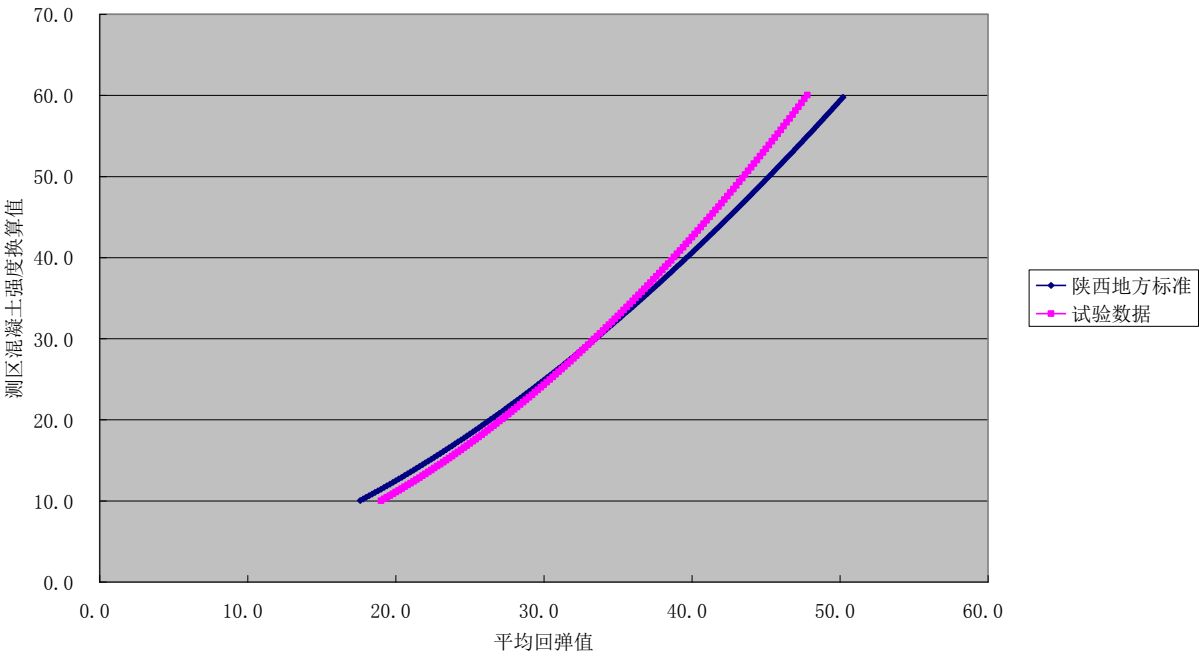
|       |                 |                      |
|-------|-----------------|----------------------|
| 辽宁省   | 回弹区间 20.0~ 54.8 | 强度区间(MPa)10.0~ 60.0  |
| 北京市   | 回弹区间 20.0~ 50.0 | 强度区间(MPa)10.9~ 60.1  |
| 唐山市   | 回弹区间 20.0~ 47.6 | 强度区间(MPa)14.5~ 60.0  |
| 成都市   | 回弹区间 35.0~ 43.6 | 强度区间(MPa) 31.9~ 60.2 |
| 温州市   | 回弹区间 27.0~ 47.2 | 强度区间(MPa) 17.4~ 60.2 |
| 焦作市   | 回弹区间 18.6~ 46.6 | 强度区间(MPa) 10.0~59.5  |
| 宁夏自治区 | 回弹区间 21.0~46.2  | 强度区间(MPa)11.2~60.3   |
| 本次的行标 | 回弹区间 18.6~ 46.8 | 强度区间(MPa)10.0~ 60.0  |

从以上全国部分地方混凝土的测强曲线我们可以看出：在混凝土抗压强度区间（10~60）MPa 范围内，各地的测强曲线中回弹区间既有一定的差异，同时又比较接近，这就充分说明了本次修订的泵送混凝土的测强曲线具有广泛的适应性和可靠性。

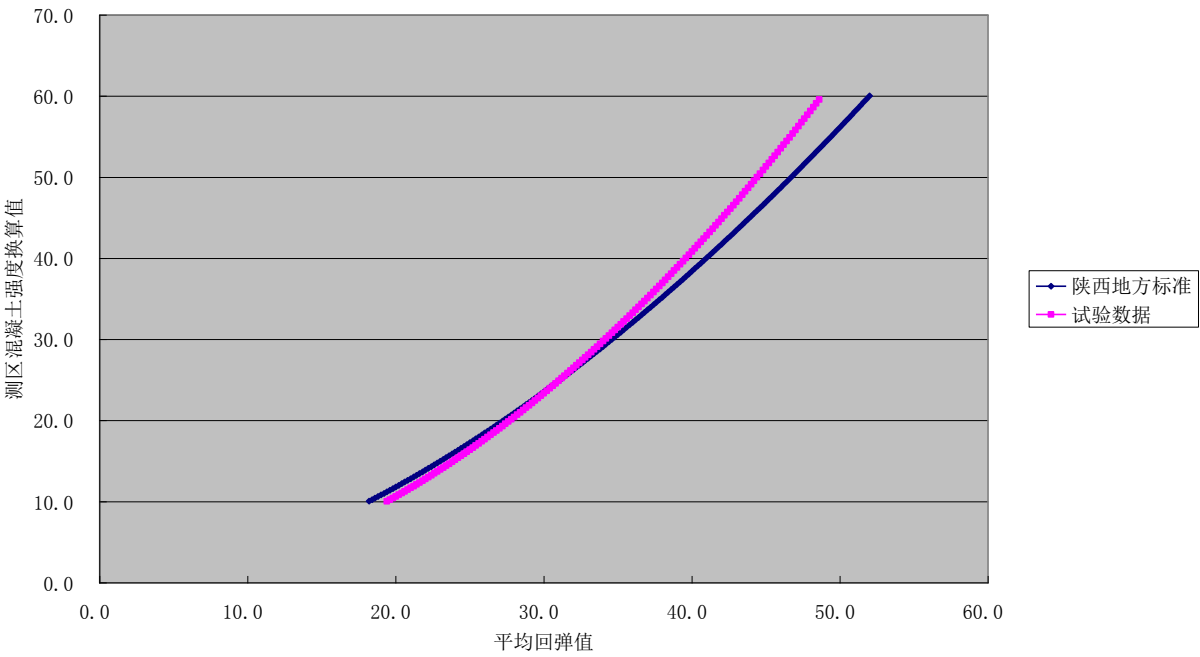
另外，该测强曲线与陕西省地方测强曲线在不同碳化深度时的比较如下图：



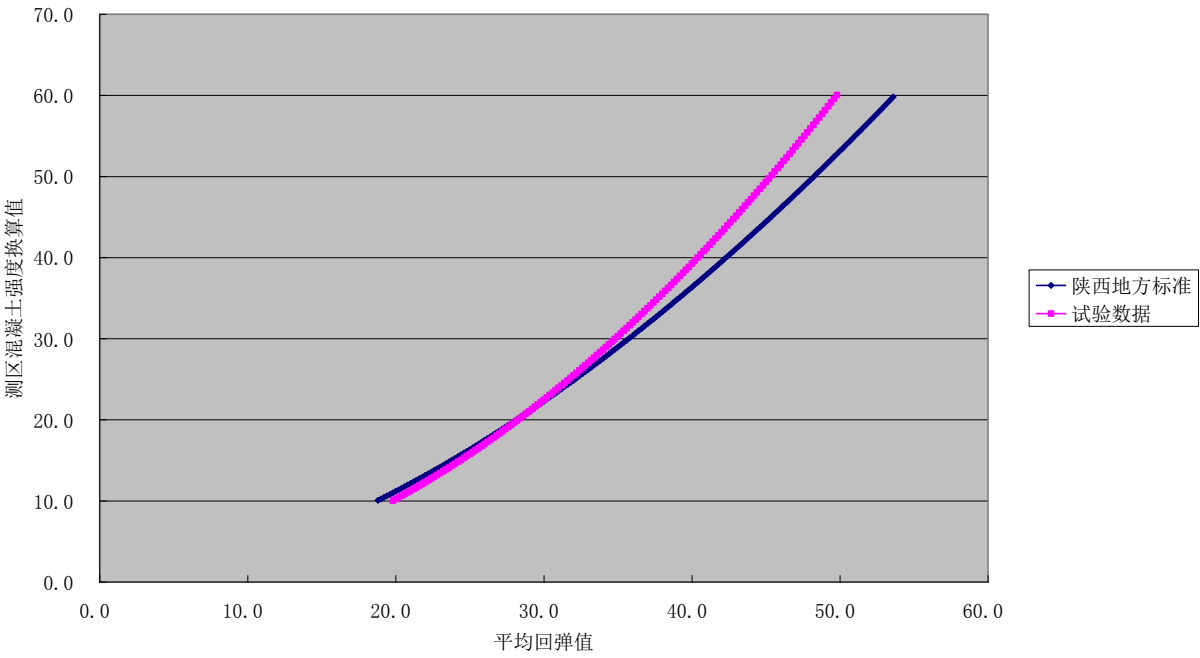
碳化1.0曲线对比



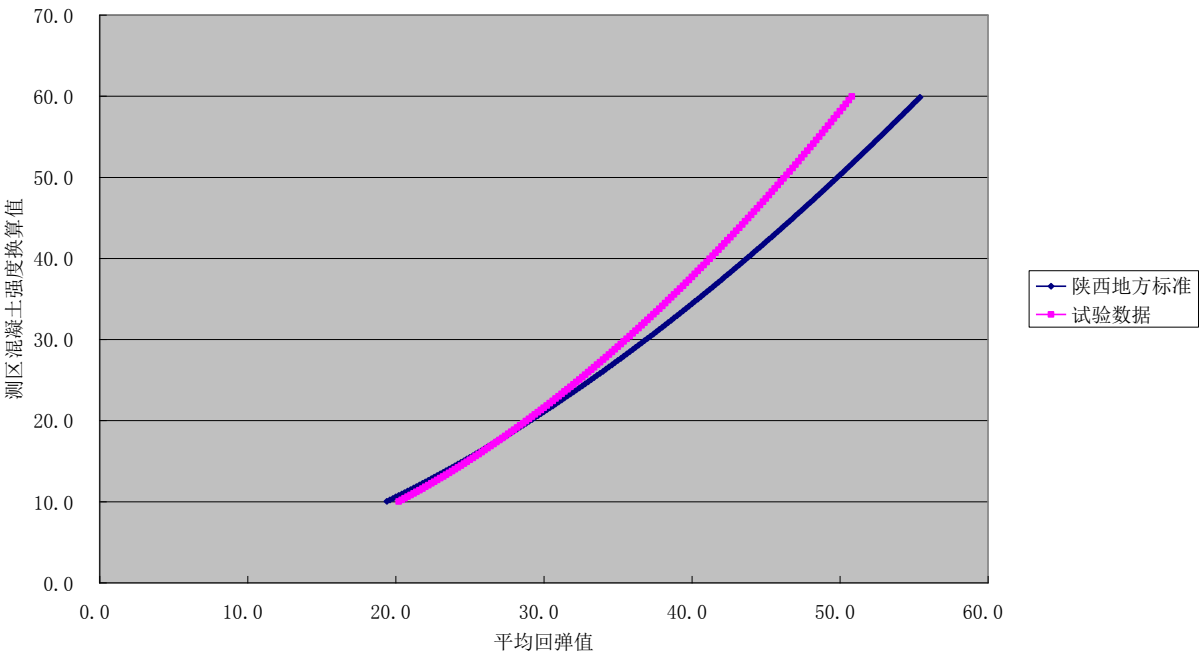
碳化2.0曲线对比

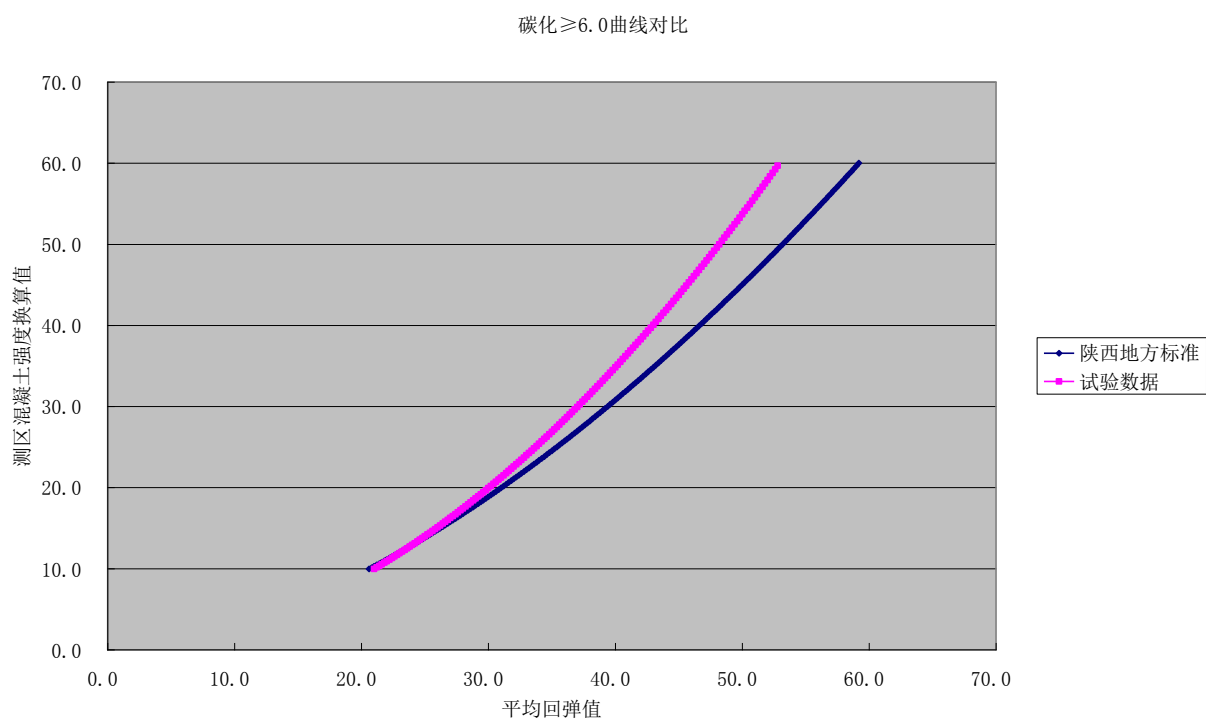
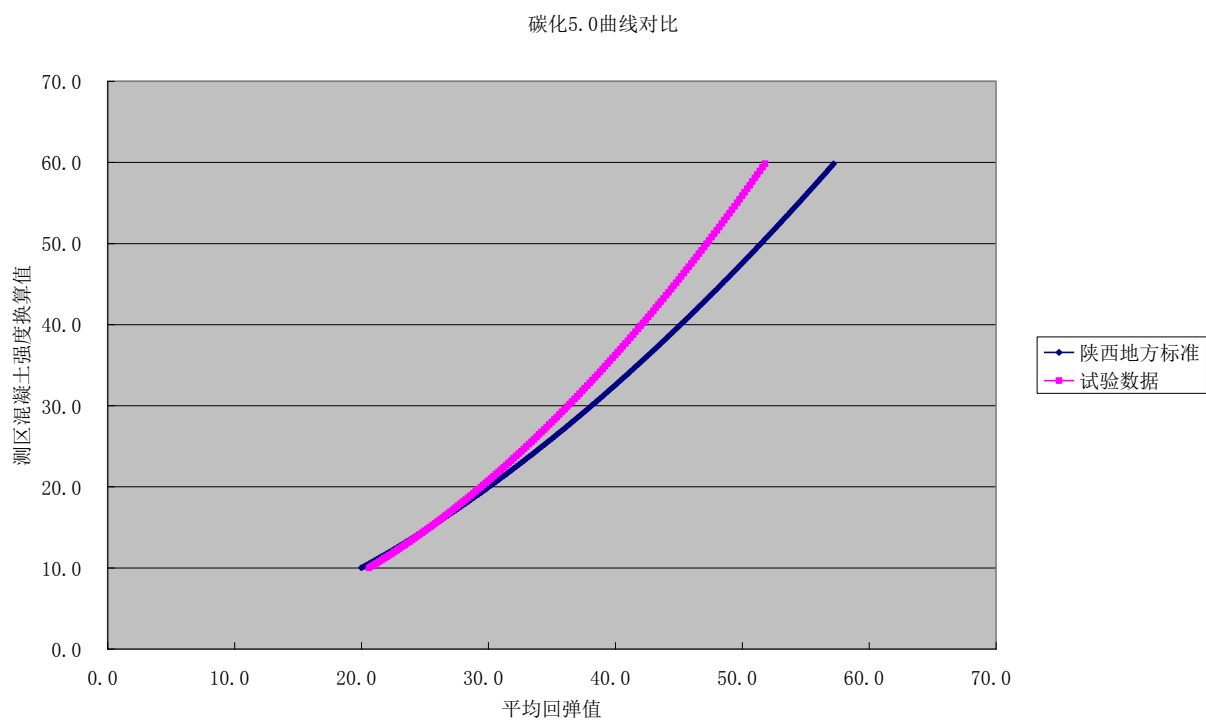


碳化3.0曲线对比



碳化4.0





从上图我们可以看出，当碳化深度等于或大于 2 mm 且混凝土的强度大于 25MPa 时，新的回归曲线的强度值要高于陕西省地方曲线的值，这和我们实际工程的检测的结果完全一致。

### 2.3. 高强混凝土测强曲线与部分地方测强曲线的比较

|          |                 |                     |
|----------|-----------------|---------------------|
| 陕西省（幂函数） | 回弹区间 34.9~ 48.5 | 强度区间(MPa)60.1~ 80.1 |
| 福建省（幂函数） | 回弹区间 35.2~ 48.5 | 强度区间(MPa)60.0~ 80.1 |

|             |                 |                      |
|-------------|-----------------|----------------------|
| 贵州省（指数函数山砂） | 回弹区间 35.0~ 41.0 | 强度区间(MPa) 60.0~ 80.0 |
| 山东省（幂函数）    | 回弹区间 36.0~ 52.4 | 强度区间(MPa)59.8~ 79.9  |
| 云南建科院（抛物线）  | 回弹区间 33.9~ 46.6 | 强度区间(Mpa)60.1~ 77.4  |
| 青 岛（幂函数）    | 回弹区间 35.4~ 49.2 | 强度区间(Mpa)59.5~ 80.0  |
| 上海 （指数函数）   | 回弹区间 35.5~ 44.0 | 强度区间(MPa)60.0~ 80.0  |
| 本次行标（幂函数）   | 回弹区间 35.5~ 48.8 | 强度区间(MPa)60.0~ 79.6  |

从以上全国部分地方混凝土的测强曲线我们可以看出：在混凝土抗压强度区间（60.1~80）MPa 范围内，各地的测强曲线中，回弹区间既有一定的差异，同时又比较接近，这就充分说明了本次修订的高强混凝土的测强曲线具有广泛的适应性和可靠性。

### 3 尚需继续研究的问题

#### 3.1. 碳化深度的测试方法及对检测混凝土抗压强度的影响

在回弹法检测混凝土抗压强度中，碳化深度对检测结果有一定的影响，有时也会引起争议，这其中的主要原因是用于测量碳化深度的方法有缺陷的缘故。目前用于测量混凝土碳化深度的方法是“酚酞法”，这是一个间接的测试混凝土碳化深度的方法，“酚酞法”测量的是混凝土的碱度，并不是碳化深度，而我们却把它当作混凝土的碳化深度（酚酞遇见碱变红），通常情况下，这种测试方法是没有问题的。但在实际的工程项目中，由于酸性脱模剂的使用、气候环境的影响、养护不当及外加剂和掺合料的大量加入等原因都可能会使混凝土表面“碱度”降低而出现“假性碳化”和“异常碳化”的现象，尤其在目前的泵送混凝土中表现的尤为突出。这正是回弹法要研究和解决的技术难点之一，这次编制组专门进行过讨论，但是现在还没有一个更好的解决办法，有待今后继续研究。

#### 3.2. 测试角度和测试面对检测混凝土抗压强度的影响

原规程规定：非水平方向检测混凝土非浇注面侧面时，可对回弹区间进行修正。修正的依据是通过数学计算和瑞士、罗马尼亚的有关资料而来的。经过几十年使用证明，这种修正得出的结果有时相差会很大，如现浇楼板、路面强度检测，在楼板底面和楼板表面所测强度推定结果相差较大特别是对于泵送混凝土。由于泵送混凝土和高强混凝土其原材料、配合比、拌合物性能及成型、振捣、养护、环境的温湿湿度会对其强度产生很大的影响，而这种影响将有很大的不确定性，就目前的技术水平和能力还难以掌握它们的规律。尽管国内有关单位进行过这方面的研究，但是，没有见到很有说服力的研究结果和研究报告。因此，对于泵送混凝土和高强混凝土，这次规定应水平检测浇注面的侧面，而不应进行测试角度和测试面的修正。

#### 3.3. 高强混凝土检测技术



高强混凝土检测应该采用能量较大的回弹仪，目前，我国高强混凝土回弹仪有三种型号，究竟采用何种回弹仪来制定全国统一曲线，还需要对各种类型的回弹仪进行全面系统的分析比较。

### 3. 4. 新型回弹仪的研究与应用

国外已有企业根据“能量系数”原理，采用光电子系统研制出的新型回弹仪。这种回弹仪的特点：其一是不受重力影响，与冲击方向无关，所以无需弹击角度的修正；其二是不受摩擦力的影响，指针摩擦力对传统回弹仪的测试精度产生重大影响，因此，要不断地进行保养和检定。新型回弹仪因为没有指针划块，不受摩擦力影响，所以测试结果的离散性与传统回弹仪相比要小得多，是未来回弹仪发展的方向。我院从 2009 年开始与瑞士博赛公司合作，在这方面进行了许多实验，取得了阶段性的实验成果。但要使其成为混凝土强度检测的标准，还需要进行大量的研究。

## 第二章 概 述

1945 年瑞士人史密特发明了回弹仪并获得了专利，所以，在世界上有些国家回弹仪也被称作“史密特锤”。它是借助于以获得一定能量的弹击拉簧所连接的弹击锤冲击弹击杆后，弹击锤向后弹回，并在回弹仪机壳的刻度尺上指示出回弹的位移值即回弹值，通过回弹值，人们借助于其它参数就可以得到被弹物体的抗压强度。

上世纪 50 年代中期，我国引进瑞士回弹仪进行回弹法检测混凝土抗压强度的研究。60 年代原天津建筑回弹仪厂引进中型回弹仪的生产技术，生产出我国第一代能量为 2.207J 用于检测混凝土抗压强度的回弹仪。经过不断改进，混凝土回弹仪的质量不断提高，随后各有关单位又相继开发出了用于检测粘土砖抗压强度、砌体砂浆抗压强度、高强混凝土抗压强度的回弹仪和人工智能化的数字式回弹仪。2002 年日本龟昌精机株式会社在天津投资成立贵昌精密机械（天津）有限公司，主要生产 混凝土回弹仪。

回弹仪在我国的应用已四十多年了，我国的广大科技工作者在回弹仪的生产制造、计量检定、应用规程等方面进行了大量系统的研究，形成了完整的技术体系。我国与之配套的标准有：中华人民共和国行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》 JGJ/T23，国家标准《回弹仪》 GB/T9138，国家计量检定规程《回弹仪》 JJG817。回弹法检测混凝土抗压强度，已经成为我国混凝土工程现场原位检测的最有效、最方便的检测方法。回弹仪已经成为

我国工程建设中的质量控制、质量监督、质量检测过程中必不可少的检测仪器，对提高我国工程质量无损检测水平、保证工程质量发挥着重要作用。我国已成为世界上最大的回弹仪生产国和使用国，年产、销回弹仪 40000 多台。产品出口朝鲜、伊朗、新加坡、韩国、美国等国家和地区。我国对回弹仪的生产、研究、使用、检定等方面的研究已经处于世界领先。

### 第三章 回弹法的基本原理

《回弹法》是利用混凝土的表面硬度（回弹值）与混凝土抗压强度之间的函数关系式来推定混凝土抗压强度的一种间接检测混凝土抗压强度的方法。

用于测定混凝土强度的回弹仪，是一种直射锤击式回弹仪。它借助于已获得一定能量的弹击拉簧所连接的弹击锤冲击弹击杆后，弹击锤向后弹回，在回弹仪机壳上的刻度尺指示出弹回的位移即回弹值。

回弹值的大小，取决于与冲击能量有关的回弹能量，而回弹能量主要取决于被测混凝土的弹塑性性能。弹回距离主要取决于混凝土的塑性变形。混凝土的强度愈低，则塑性变形愈大，塑性变形所吸收的能量也大，回弹能量愈小，从而回弹值就愈小，反之亦然。据此，可由实验方法建立“混凝土抗压强度—回弹值”的相关曲线，通过回弹仪对混凝土表面弹击后的回弹值来推算混凝土的强度值。

## 第四章 回弹仪

### 第一节 回弹仪的分类

回弹仪按照弹击能量和用途可分为重型、中型和轻型三种类型，六种规格。其中轻型回弹仪可用于水泥砂浆和普通烧结粘土砖的抗压强度检测，中型和重型（也叫高强回弹仪）用于混凝土抗压强度的检测。回弹仪的分类与代号由表4-1表示。

| 分 类 | 标称能量 (J) | 类 型 代 号 |
|-----|----------|---------|
| 重型  | 9. 800   | H980    |
|     | 5. 500   | H550    |
|     |          |         |
| 中型  | 2. 207   | M225    |
| 轻型  | 0. 735   | L75     |
|     | 0. 196   | L20     |

## 第二节 回弹仪的主要技术参数

- 1、回弹仪的弹击能量
- 2、弹击锤的质量与回弹仪的钢砧回弹值
- 3、弹击拉簧

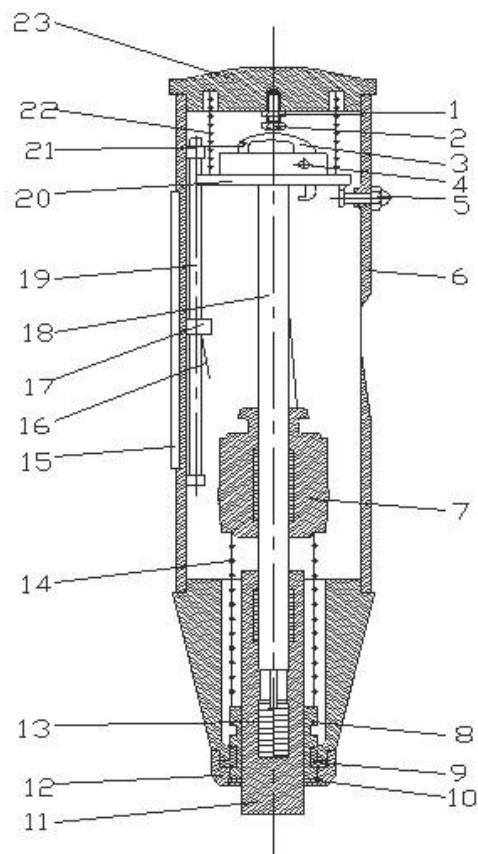
弹击锤与弹击杆碰撞瞬间，弹击拉簧处于自由状态。弹击拉簧的自由长度、冲击长度和刚度。

- 4、指针滑块摩擦力
- 5、弹击杆

## 第三节 回弹仪的构造及工作原理

现在应用的回弹仪主要是指针直读式和数字式回弹仪，它们是通过测定和读取回弹仪上的回弹值即位移值，通过对位移值及其它参数的计算和处理来推定被测混凝土的抗压强度值的。另外还有通过测定和计算回弹仪弹击前后的能量比，进而推定混凝土抗压强度的能量法。其中以指针直读的直射锤击式回弹仪应用最广。

。



1-紧固螺母；2-脱钩位置调整螺钉；3-挂钩；4-挂钩销子； 5-锁定按钮；6-机壳；  
7-弹击锤；8-拉簧座；9-卡环；10-密封毡圈；11-弹击杆；12-盖帽；13-缓冲压簧；  
14-弹击拉簧；15-标尺；16-指针片；17-指针块；18-中心导杆；19-指针轴；20-  
导向法兰；  
21-挂钩压簧；22-复位压簧；23-尾盖

图 4-1 回弹仪构造和主要零件名称

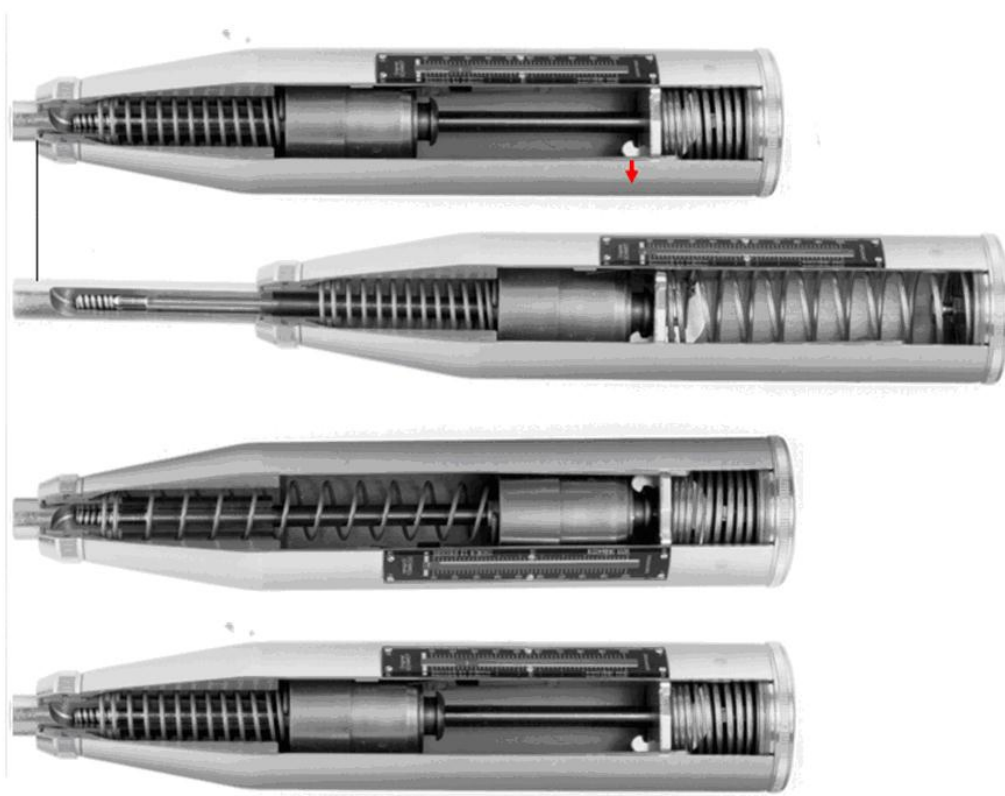


图 4-2 回弹仪内部结构

#### 第四节 影响回弹仪检测性能的主要因素

回弹仪的零部件、各个部件的相对位置、各个部件的工作状态，都直接或间接地影响回弹仪测试性能。

##### 1、机芯主要零件装配尺寸

回弹仪机芯主要零件的装配尺寸是指：弹击拉簧的工作长度 $L_0$ ，弹击锤的冲击长度 $L_p$ 以及弹击锤的起跳位置等。这三个装配尺寸工作时互相影响，严格控制这三个装配尺寸，是统一回弹仪性能的重要前提。

(1) 弹击拉簧的工作长度  $L_0$

如果  $L_0 > 61.5\text{mm}$ ，那么弹击锤冲击弹击杆的瞬间，拉簧受到了挤压，冲击后由于拉簧要恢复到自由状态亦即  $> 61.5\text{mm}$  的状态，就在两冲击面之间形成一间隙  $\Delta L$ ，使弹击锤比设计规定的位置向后挪了一段距离  $\Delta L$ ，造成实际的回弹能量增加，所测回弹值偏高。

如果  $L_0 < 61.5\text{mm}$ ，弹击锤冲击弹击杆的瞬间，拉簧不能恢复到自由状态，而被拉长了一个长度  $(-\Delta L)$ ，使弹击锤回弹时要克服一个反方向的拉力  $f$ ，造成实际的回弹能量减小，所测回弹值偏低。

由于改变  $L_0$  而引起的能量的变化对高回弹值影响较小，因此在钢砧上的率定往往难以发现，率定值基本不变。

(2) 弹击锤的冲击长度  $L_p$

弹击锤的冲击长度  $L_p$  是指弹击锤脱钩的瞬间，弹击锤与弹击杆两撞击面之间的距离。为保证弹击锤在脱钩的瞬间具有  $2.207\text{J}$  的冲击能量，根据功能原理，拉簧的拉伸长度应为  $75\text{ mm}$ 。

(3) 弹击锤的起跳位置

回弹仪是一种游标测读式回弹仪，因此它和其他计量仪器一样，工作前必须调零。回弹值读数是由回弹能量通过弹击锤带动指针移动，最后回弹能量消失，使指针停留在某一刻度上，即示值系统为指针直读式。所以，回弹仪的调零，实际上是使弹击锤回弹时的起跳位置处于相应于刻度尺上的“0”处（而实际上指针并非停留在“0”处），此时弹击拉簧应处于自由状态，其工作长度为  $61.5\text{mm}$ 。

试验表明，弹击锤起跳点的改变，直接影响回弹值的大小，但在试块上回弹值的变化较起跳点的变化值要小些。这种变化与砂浆试块（A、B、C、D）表面硬度的大小近似成正比。改变起跳点对不同砂浆试块和钢砧回弹值极差的影响

|         |     |     |     |     |     |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 被弹击的物体  | A   | B   | C   | D   | 钢 砧 |
| 回弹值的极差值 | 1.8 | 4.0 | 5.8 | 6.1 | 9.0 |

上述各项试验，是变化回弹仪机芯的三个装配尺寸中某一个参数所得结果。实际工作时，有可能同时存在其余参数的变化，而使影响互相抵消或叠加。

机芯三个装配尺寸对回弹值变化的定性关系

| 变化项 | 机 芯 装 配 尺 寸 |       |       | 仪 器 工 作 时 状 态 |    |       |     | 回弹值<br>综合<br>反映 |
|-----|-------------|-------|-------|---------------|----|-------|-----|-----------------|
|     | $L_0$       | $L_p$ | 脱钩点   | 弹击拉簧          | L  | $L_p$ | 起跳点 |                 |
| 标准  | 61.5        | 75    | “100” | 自由状态          | 75 | 75    | “0” | 标准              |

|                       |        |      |         |    |       |       |       |    |
|-----------------------|--------|------|---------|----|-------|-------|-------|----|
| 弹击拉簧工作长度<br>( $L_0$ ) | 小于61.5 | 75   | “100”   | 冲拉 | 大于 75 | 75    | “0”   | 偏低 |
|                       | 大于61.5 |      | “100”   | 冲压 | 小于 75 |       | 大于“0” | 偏高 |
| 弹击锤冲击长度<br>( $L_P$ )  | 61.5   | 小于75 |         | 冲拉 | 75    | 小于 75 | 小于“0” | 偏高 |
|                       |        | 大于75 |         | 冲压 |       | 大于 75 | 小于“0” | 偏低 |
| 弹击锤脱钩位置               | 61.5   | 75   | 小于“100” | 冲拉 | 小于 75 | 75    | 小于“0” | 偏低 |
|                       |        |      | 大于“100” | 冲压 | 大于 75 |       | 大于“0” | 偏高 |

## 2、主要零件的质量

### (1) 拉簧的刚度

由回弹仪的构造和冲击能量可推算出拉簧的刚度应为 785.0N/m, 刚度的变化直接影响回弹仪工作时的冲击能量, 同时影响测得的回弹值。表 4-9 的试验数据是刚度由 666.852~902.221N/m (0.68~0.92 kgf/cm) 的 6 只拉簧各装在三台正常回弹仪上, 分别在钢砧和四种不同硬度的均匀砂浆试块 (A、B、C、D) 上由同一操作者测试的平行试验结果。

表 4-9 不同拉簧刚度对砂浆试块及钢砧回弹值的影响

| 砂 浆 试 块 |       |         |         | 钢 砧  |
|---------|-------|---------|---------|------|
| A       | B     | C       | D       |      |
| 5.19*   | 5.02* | 11.96** | 12.62** | 1.03 |

试验数据表明, 不同刚度的拉簧在砂浆试块上所测得的回弹值有显著差异。其差异随刚度的增加而回弹值有所降低, 这是由于混凝土本身的性能所引起, 即当弹击拉簧的刚度增大时, 弹击锤的冲击动能也随之增大, 在混凝土上产生的塑性变形功相应增加, 而弹回动能随之减小, 使得回弹值略有降低。

强击拉簧刚度的变化对钢砧率定值无显著性差异, 说明在所变化的冲击动能范围内, 对弹性回弹动能无显著影响。但对回弹仪的率定无较大影响。

### (2) 弹击杆前端的球面半径

回弹仪弹击杆前端的球面半径  $r=25\text{mm}$ 。随着  $r$  值的增大, 在砂浆试块上测得的回弹值增高, 并随着砂浆表面硬度的增大而趋于明显。另外, 当变化  $r$  时, 高硬度试块的影响比低硬度大, 因此  $r$  愈大表面硬度高的试块测得的回弹值偏高的现象比低硬度试块明显。

些。

弹击杆  $r$  的差异，对钢砧率定值的影响不易反映，这是因为钢砧的硬度大，一弹性变形为主，在钢砧上产生的塑性变形很小。因此，当只变化  $r$  时，并不能对钢砧率定值产生明显的影响。

### (3) 指针长度和摩擦力

，指针滑块上的示值刻线应位于正中，示值刻线至指针片端部的水平投影距离称指针长度为 20mm，它直接影响回弹值的大小。

指针摩擦力是指在机壳刻度槽中指针块在导杆全长上推动时的摩擦力，按设计要求  $f=0.60\text{N}$ ，实测表明，指针摩擦力如果过小，回弹时指针出现滑动，使回弹值偏高；如果摩擦力过大，影响弹击锤的回弹力，使回弹值偏低。因此，指针摩擦力应控制在  $(0.5\sim 0.8)\text{N}$ 。回弹仪在使用一段时间后，指针滑块和指针轴之间的摩擦会使指针的摩擦力变大。由于回弹仪工作环境的因素，一些粉尘会进入回弹仪内，从而影响摩擦力，加大指针轴的磨损。指针摩擦力的变大，会对回弹法检测混凝土产生很大的影响，特别是对于低强度等级的混凝土影响更大。因为，低强度等级的混凝土本身表面硬度小，相对应的回弹值也小，而指针摩擦力对其反而影响很大。当回弹仪进行率定时，由于钢砧的硬度很大，弹击杆和钢砧的碰撞主要以弹性变形为主，弹击锤的回弹恢复力很大，指针的摩擦力相对于回弹力显得较小。这就是我们在进行回弹仪率定时，难以发现指针摩擦力对率定值影响的主要原因。

### (4) 影响弹击锤起跳位置的有关零件

前面在谈到装配尺寸对回弹仪性能的影响时，述及到当回弹仪其他条件正常时，弹击锤是否相应于刻度尺的“100”处脱钩和弹击锤的冲击长度是否等于 75 mm，它们是影响弹击锤是否相应于刻度尺上的“0”处起跳的因素。为了保证回弹仪工作时的冲击长度为 75mm，就必须使缓冲压簧的压缩长度为一定值。缓冲压簧的压缩长度取决于以下几个方面因素：

- ① 缓冲压簧的刚度；
- ② 压簧的刚度；
- ③ 弹击拉簧刚度；
- ④ 脱钩时挂钩与弹击锤挂钩处摩擦力。

回弹仪工作时，对回弹仪施加的作用力使弹击拉簧拉伸，压簧压缩，挂钩脱钩，这三部分的力通过中心导杆传递给缓冲压簧，从而使缓冲压簧压缩一长度。因此，为了保证弹击锤的冲击长度为 75mm，弹击拉簧、压簧、缓冲压簧的质量必须按设计要求加工，

以保证各台回弹仪质量的一致性。

另外、弹击锤脱钩时，挂钩尾部与导向法兰上平面之间孔隙的大小也影响弹击锤的起跳点。因此，要求各台回弹仪加工时应使脱钩尾部与法兰上表面的孔隙最小且保持一致。

### 3、机芯装配质量

机芯装配尺寸能否按照回弹仪的构造和工作原理进行装配，是使回弹仪达到标准状态的关键。关于机芯主要零件的装配尺寸及有关零部件的质量要求，已于前面提到，但为了确保回弹仪具有正常的测试性能，在机芯的装配质量方面尚须注意以下一些重要环节：

#### （1）调零螺钉

调节尾盖上调零螺钉的长度，使弹击锤脱钩瞬间，指针块上的示值线应停留在刻度尺的“100”处，调好后调零螺钉应始终处于坚固状态，不得有松动或位移现象。

#### （2）固定弹击拉簧

拉簧的一端固定于拉簧座上，另一端固定于弹击锤上，固定好后，三连件（拉簧座、弹击拉簧和弹击锤）装入中心导杆，此时弹击拉簧在中心导杆上不得有歪斜偏心现象，否则会影响弹击拉簧的工作性能，此处重要的是弹击拉簧要达到图纸要求的加工质量。

#### （3）机芯同轴度

机芯同轴度是指弹击杆和弹击锤与中心导杆工作时，是否在同一轴心线上。通过大量试验表明，机芯同轴度好的回弹仪，弹击杆和弹击锤的冲击面碰撞时，接触良好，声音清脆，在钢砧上能测得较高而稳定的率定值。反之声音沉闷，率定值不稳定且较低。因此，当率定值达不到要求时，应先检查各零件的加工质量或调换弹击杆，即调整机芯同轴度，使钢砧率定值符合标准。

## 第五节 数字式回弹仪

数字式回弹仪通常在机械式回弹仪的基础上增加数据采集系统和数据转换处理系统，使其具有回弹值数字显示和存储功能，并可兼备数据处理、打印、数据传输等功能。

### 1、数字回弹仪是回弹仪技术和应用的发展方向

机械式回弹仪具有使用可靠、易维护和低成本等特点，至今为止仍然是国内使用最多的回弹仪。然而检测混凝土抗压强度需要进行大数据量的检测采样，并涉及复杂的数学运算，检测、数据处理的工作量很大，得到最终检测结论需要花费较长的时间；并且由于机械回弹仪分别需要操作读数、数据记录两名工作人员的配合才能进行检测，因此不可避免地存在工作效率低下、从读数、记录到后续数据处理等各个环节易出错等缺点；更严重的是，由于检



测原始数据缺乏全程可溯性，可能因此导致检测的公正性、准确性的缺失。

数字回弹仪通过传感器技术实现检测数据自动采样，并自动存储检测数据、进行后续数据处理、计算及显示等；它还可以通过数据接口把所存储的检测数据传输到微电脑中，实现检测报告自动编制及检测数据信息化处理等。数字回弹仪有效地解决了机械式回弹仪所存在的上述问题，具有以下主要优点：

- 1) 提高工作效率；
- 2) 进一步保证检测数据的公正性、准确性和科学性；
- 3) 现场即时得到检测结论；
- 4) 符合信息化要求；
- 5) 提升检测单位的形象；

## 2、国内数字回弹仪发展简史

上世纪 80 年代中期，我国开始引进国外数字式回弹仪，到了 90 年代，国内有些企业开始引进、消化、吸收、研究开发国产化数显回弹仪。河北廊坊建筑科学研究所、北京康科瑞公司等厂商先后于 1999 年、2000 年研制成功数字式回弹仪并投入市场。

早期数字式回弹仪所采用基于电阻式位移传感器的机械接触式采样系统，这种电阻式的采集系统在使用的过程中，由于金属滑片在电阻上的不断滑动，会是滑动电阻式的位移传感器的线性化变差。另外，由于环境的温度、湿度的变化也会对传感器产生影响。所以，电阻位移式传感器的数字回弹仪存在着耐久性不足的致命性缺陷，使这种数字回弹仪精度变低，使用寿命短，无法满足国内检测单位大工作量的业务需求。另一方面，这种回弹仪去掉了指针系统，无法进行计量检定，制约了数字回弹仪的推广应用。中国建筑科学研究院和山东乐陵回弹仪厂开始研制采用光电原理的非机械接触式数字回弹仪，并于 2000 年生产出样机。

2002 年，舟山市博远科技开发有限公司研制成功了采用非机械接触式“光栅—光藕”回弹数据采样技术，彻底解决了长期困扰数字回弹仪的采样系统耐久性不足的关键技术难题，具有高可靠性和耐久性特点。使我国在数字回弹仪技术和应用在国际上占有领先地位，改变了进口数字回弹仪占据国内高端市场的局面，推动了国内数字回弹仪的应用与技术发展。

此后，非机械接触式回弹数据采样技术成为国内数字回弹仪技术的研究方向，申报或授予了不少相关专利。

由于数字化、信息化技术的发展和数字回弹仪技术上取得了重大突破，近年来国内数字回弹仪得到了越来越广泛的应用，国内数字回弹仪年销售量约在一千套以上。目前，上海、浙江、江苏、广东、山东、辽宁等发达地区的大多数建筑质量监督、检测机构都已用数字回弹仪替代机械回弹仪用于日常检测业务，极大地提高了回弹法的应用和检测工作效率。

## 第六节 数字回弹仪技术

### 1、数字回弹仪原理与组成

数字回弹仪通常是指具有回弹值显示、储存、混凝土强度计算等数据处理功能的回弹仪，其原理是在机械回弹仪的基础上运用数字电子技术对所测得的回弹值进行数字化采样，再根据技术规程进行数据处理、运算得出被测混凝土构件的抗压强度，显示输出或传输到电脑进行进一步处理。

目前国内市场的数字式回弹仪产品种类较多，使用功能大同小异，技术性能各有差异，主要分为一体式和分体式两种结构。其中分体式结构品牌有浙江舟山市博远科技开发有限公司的博远 BY 系列数字回弹仪、山东乐陵市回弹仪厂的 ZC3 系列数字回弹仪、北京智博联科技有限公司的 ZBL-S210 数显回弹仪、北京市康科瑞工程检测技术有限责任公司的 HT225W 全自动数字式回弹仪、北京大地华龙科技有限责任公司的 HT225W 系列数显回弹仪等。

### 2、现有主要数字回弹仪技术简介

#### 2.1 电阻式位移传感器回弹数据采样技术

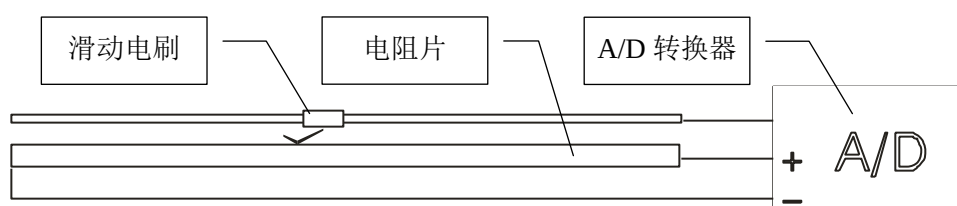


图 3-14 电阻式位移传感器回弹数据采样原理图

电阻式位移传感器回弹数据采样技术是最先应用于数字回弹仪的传统技术，其工作原理如图。

电阻式位移传感器由直线电阻片和滑动电刷组成，电阻片固定安装在回弹仪机械壳体上，滑动电刷固定在回弹仪指针上，随指针同步移动。回弹采样电子系统在电阻片的两端施加上固定的直流电压，当滑动跟随指针移动时，电刷端输出与位移成正比的模拟电压信号。这个模拟电压信号经模/数转换器转换成数字信号，经过校准、换算后从而得到指针当前所处位置的回弹值。

由于电阻式位移传感器的电刷与其电阻片始终处于接触状态，回弹仪弹击时指针处于高速运动状态，且弹击时指针还受到强烈的机械震动，电刷与电阻片极易产生发热和磨损，冲击和高速机械摩擦很难在技术上实现高可靠性、高稳定性和高耐久性，难以满足大弹击量检测机构的实际使用需要。

电阻式位移传感器回弹数据采集技术是应用最广的回弹数据采集技术，被现有大多数品牌的数字回弹仪所采用。

### 2.2 “光栅—光藕” 回弹数据采集技术

“光栅—光藕”回弹数据采集技术是舟山市博远科技开发有限公司研制的一种全新的非机械接触式回弹数据采集技术，并取得国家发明专利，其工作原理如图 3 所示。

附着在指针一侧的光藕包含有相对放置的发光器和感光器构成，由一系列透明与不透明相间均匀排列的条状体构成的光栅固定放置在光藕的发光器与感光器之间。通过工作时所需的电子连接，当弹击锤回弹带动指针移动时，光藕发光器所发出的光线因栅遮挡使感光器产生一组交替通断的电子脉冲信号。光藕发光通过对脉冲进行计数，从而换算出指针的移动距离或回弹值。

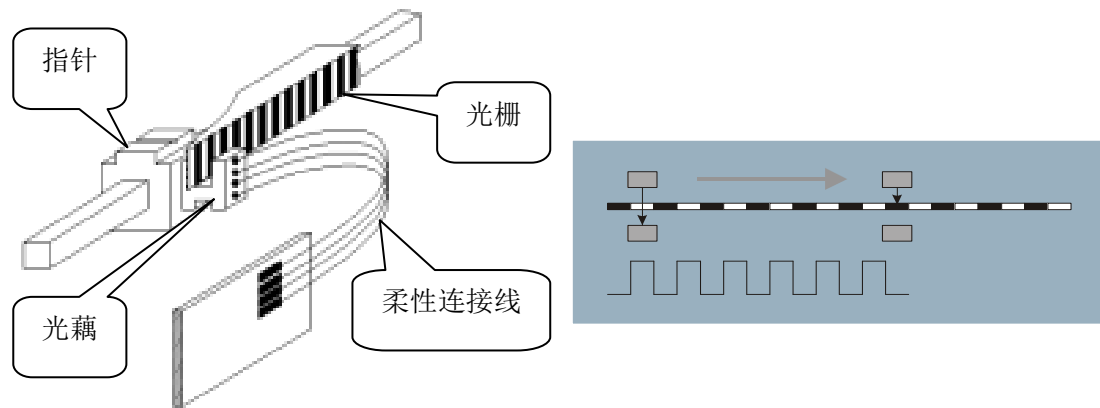


图 3-15 “光栅—光藕” 采样原理

“光栅—光藕”回弹数据采集技术，完全避免了数据采集系统因机械磨损、接触不良等对采样精度、可靠性和耐久性所带来的不利因素，彻底解决了长期困扰数字回弹仪的采样系统耐久性不足的关键技术难题，在数字回弹仪采样系统的可靠性、耐久性方面取得了重大技术突破，使我国数字回弹仪技术达到了国际先进水平。

### 2.3 电容式位移传感器

电容式位移传感器是利用振荡电路中，改变电容器极板间的相对位置，电容器的电容会发生变化从而引起回路中频率的变化，通过测得频率的变化规律，建立电容和频率之间的关系进而可以求得位移。

以上三种位移采集技术，早期一般使用电阻式位移传感器，其特点是：构造简单，加工方便，电子器件价格较低；缺点是：稳定性差，一方面，电阻的阻值对温度变化较为敏感，线性关系较差，随着温度的变化，电阻的阻值也会发生变化；另一方面，由于该种回弹仪的

指针和电阻片是接触式的，经常使用，指针在电阻板面的反复摩擦，指针会磨损，金属粉末会附着在电阻的表面，会使电阻的阻值变化。再此，使用环境的湿度、粉尘都会对阻值产生一定的影响。所以，电阻式回弹仪在使用一段时间后，误差较大，无法使用，维修很不方便，现已逐步退出市场，将被新一代数字式回弹仪所代替。

电容式位移传感器由于构造复杂，电子元件精度要求高，因而在回弹仪中应用较少。

光栅—光藕式数据采集器，采用光电转换的原理，实现非机械接触的回弹数据采集，在数据采集、传输、转换过程中影响因素少，抗干扰力强，在保证采集数据精度的基础上，其可靠性、稳定性、耐久性均优于电阻位移式传感，已被广泛应用于数字回弹仪中。

## 2.4 分体式指针示值系统

回弹仪机械部件需要经常做常规维护与保养，但数字回弹传感器的采样系统是附着在回弹仪的机械壳体和指针系统之上的，由于涉及到精密电子部件，如不能方便、安全地进行拆卸和组装，将使仪器使用者难以对回弹传感器进行常规维护，大大缩短了数字回弹传感器的使用寿命；此外，有些数字回弹仪产品很难或不能对机械回弹仪的指针摩擦力这一重要技术指标进行测定，严重影响了回弹仪计量检定，严重制约了数字回弹仪应用。

## 第七节 国内数字回弹仪相关专利简介

国内数字回弹仪技术的研究越来越得到重视，特别是近十年来有关数字回弹仪技术的专利申请和授予数量快速增加，以下简要介绍国家知识产权局所公开的已授予的与数字回弹仪技术相关的发明专利和实用新型专利，以供参考。

### 1. 发明专利：

#### 1.1 专利号或申请号：ZL03103652.X

**【名称】：**回弹法混凝土抗压强度检测仪及其制作方法

**【申请(专利权)人】：**舟山市博远科技开发有限公司

该发明完全避免了数据采集系统因机械磨损、接触不良等对采样精度、可靠性和耐久性所带来的不利因素，彻底解决了长期困扰数字回弹仪的采样系统耐久性不足的关键技术难题，在数字回弹仪采样系统的可靠性、耐久性方面取得了重大技术突破，使我国数字回弹仪的采样技术达到了国际先进水平。

该发明被简称为“光栅—光藕”回弹数据采集技术。

## 1.2 专利号或申请号：ZL200610112215.8

**【名称】：**一种测量回弹仪冲击动能的方法及装置

**【申请(专利权)人】：**中国建筑科学研究院

该发明涉及到用来测量回弹仪冲击动能的一种方法及装置，其原理是通过直接测量弹击锤撞击时弹击导杆传递的弹击锤冲量，利用冲量—动量守恒定律（或等价的牛顿第二定律的微分或积分形式），计算得到弹击锤在撞击弹击杆时的撞击速度，直接得到回弹仪的冲击动能，从而实现对回弹仪的冲击动能的测定。

该发明属回弹仪的计量检定、校准领域，并不用于数字回弹仪产品中。

## 1.3 专利号或申请号：ZL200810063597.9

**【名称】：**数字回弹仪

**【申请(专利权)人】：**舟山市博远科技开发有限公司

该发明提供了一种数字回弹仪，在回弹仪壳体与弹击拉簧座之间安装有力传感器，通过测量力传感器所测得的力值获得回弹值。该发明完全抛弃了传统回弹仪所必须具备的指针系统，与现有技术相比简化了回弹仪机械结构，省略了所述的回弹仪中机械构造最复杂的指针系统，完全消除了由指针系统引起的测量精度、稳定性、耐久性等问题，回弹仪的测量精度、稳定性、耐久性和使用寿命得到了实质性的提高。

## 2. 实用新型专利

### 2.1 专利号或申请号：ZL00264866.0

**【名称】：**数字式混凝土回弹仪

**【申请(专利权)人】：**贵昌精密机械(天津)有限公司

该实用新型提供了一种数字式混凝土回弹仪，在回弹体上设置有电器部分，电器部分包括带有 CPU 的电路板、打印机、液晶显示器，其电器部分是通过设置在机械回弹体壳体外的电位器和设置在壳体內的指针轴、滑块及电刷而工作的。

该专利采用传统的直线电位器位移传感器技术用于回弹值采样，其优点是把数据采样处理、显示和打印功能集中于回弹仪机械壳体上便于携带，缺点是没有人工直读标尺，且体积较大，用于贵昌精密机械(天津)有限公司的数字回弹仪产品中。

### 2.2 专利号或申请号：ZL03208209.6

**【名称】：**数字回弹仪

**【申请(专利权)人】：**舟山市博远科技开发有限公司

该实用新型提供了一种数字回弹仪技术，将指针系统与其相关的采样部件安装在独立的组件中，可使之整体拆装，因此也被称为“分体式指针示值系统”。该专利使得数字回弹仪的常规维护简单、方便、安全，彻底解决了现有数字回弹仪产品普遍存在的难以测定指针摩擦力指标和进行常规维护的难题。同时，该专利还把指针导杆设计成是有棱的柱体，大大改善了指针运动时的稳定性，从而减小了测量误差并延长了指针的使用寿命，因此该专利也可用于普通机械回弹仪上。

2.3 专利号或申请号：ZL200520001968.2

【名称】：指针、动栅式机械电子回弹仪

【申请(专利权)人】：秦璐

该实用新型提供了一种非机械接触式回弹采样方法，结构设计如图 3-23，在指针 1 上安装有条状的“动栅”3，弹击锤回弹时驱动指针与“动栅”同步运动，“动栅”的位移值通过固定在回弹仪壳体上的一组“定栅”检测到，从而实现了回弹值的采样。

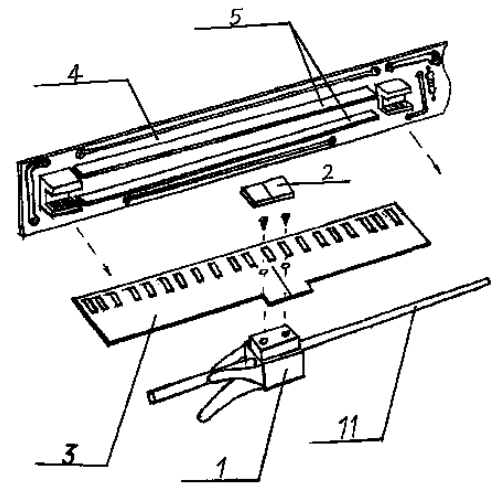


图 3-23 指针组件示意图

该专利实施时需处理好以下两个技术细节：

(1) 控制好“动栅”的质量：为使回弹仪能够采样到覆盖全量程的回弹值，其“动栅”必须有足够的长度；为减小“动栅”在运动时的晃动必须具有足够的机械刚度，因此“动栅”的质量可能较大。但若指针上所附带的质量过大将会出现影响弹击锤回弹行程或摩擦力不足以克服指针运动惯性的状况。

(2) 控制好“动栅”稳定性：由于指针轴是圆柱体的，指针运动时的旋转倾向将对稳定性产生不利影响，为了避免这一问题，该实用新型在标尺 4 上对应于“动栅”的两侧装有一组导规 5 以保证指针面方向的两维精度，但“动栅”的晃动将与导规之间产生不确定的机械摩擦而影响指针的运动状态。

2.4 专利号或申请号：ZL200620107051.5

【名称】：数字回弹仪

【申请(专利权)人】：舟山市博远科技开发有限公司

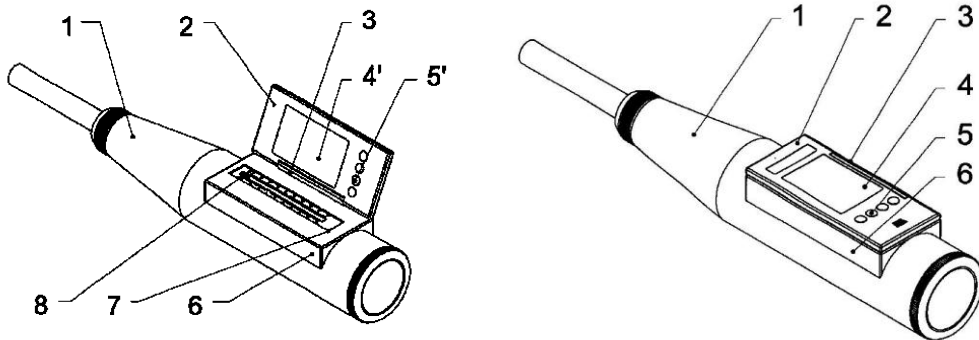


图 3-24 博远数字回弹仪实施个例

该实用新型提供的数字回弹仪，将回弹值传感器部分和控制、数据处理及输出的主机部分用连接机构组合成一体并保留传统机械回弹仪可人工直读回弹值的结构，使之成为既操作方便，又符合现行国家规范的检测混凝土抗压强度的数字回弹仪，还避免了连接线引起的故障。

图 3-24 为该专利说明书所公开的 2 个实施例的示意图。

2.5 专利号或申请号：ZL200720200886.X

【名称】：无线传输、机械电子式回弹仪

【申请(专利权)人】：秦璐

该专利的特点是把回弹传感器与主机的数据交换通过无线方式实现，方便使用。无线数字传输技术是广泛应用的成熟技术，目前市场已有采用无线传输技术的数字回弹仪产品，但未见声称应用了该专利技术的产品。

2.6 专利号或申请号：ZL200820237875.3

【名称】：深度可控式高精度回弹仪

【申请(专利权)人】：谢让明

该实用新型提供了深度可控式高精度回弹仪，其特征是回弹仪的弹击拉簧的拉伸长度在一定范围内是可调的，通过调节弹击拉簧的拉伸长度获得不同的冲击能量（其说明书描述为：弹击力），以适应检测不同抗压强度的混凝土。回弹仪的壳体上同时具有带刻度的施加弹力显示窗，以显示回弹仪当前的“弹击力”。

该专利本质上仅与回弹仪的机械结构相关，但其专利说明书述及了数字回弹仪相关的内容，且其设计思路比较独特，因此也简要予以介绍。



## 2.7 专利号或申请号：ZL200920098267.3

【名称】：语音数显回弹仪

【申请(专利权)人】：天津市津维电子仪表有限公司

该实用新型公开了一种语音数显回弹仪，其主要特征是回弹仪主机设置于机械回弹仪上方，同时设有扬声器与音频功率放大器相连接，主机增加了语音输出功能，实现以语音方式播报所测得的回弹值。

## 2.8 专利号或申请号：ZL200920103931.9

【名称】：超声测距数字回弹仪

【申请(专利权)人】：廊坊开发区大地工程检测技术开发有限公司

该实用新型公开了一种超声测距数字回弹仪，用于解决回弹值自动读数和提高使用寿命的问题。其原理是在机械回弹仪(1)的中部通过回弹锤指针上安装超声波反射板(2)，机械回弹仪尾部安装超声波换能器(3)，超声波发射与接收控制仪器(4)用连线(5)与超声波换能器(3)连接组成，从而实现非机械接触方式的回弹值采样。

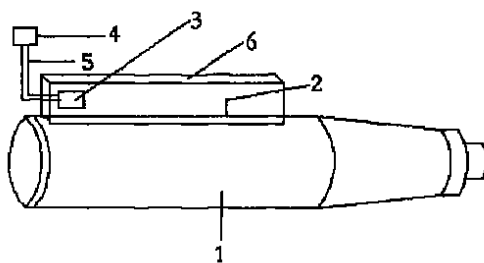


图 3-26 超声测距数字回弹仪示意图

## 2.9：专利号或申请号：02268353

【名称】：回弹仪数据采集装置

【申请(专利权)人】：潘宗岭 安徽

从以上介绍的专利内容与申报时间可以看出，非机械接触的回弹采样方式已成为数字回弹仪技术的主要研究方向和发展趋势，同时国内数字仪技术和产品的竞争也日趋激烈，必将推动我国数字回弹仪技术总体水平的进一步提高。

## 第八节 能量式回弹仪

目前的回弹仪是以指针的位移来表示被测物体的表面硬度，这种构造的回弹仪，由于指针的摩擦力会对检验结果产生一定的影响。因此，在使用时，指针滑块在指针轴上反复运动使其摩擦力发生变化，尤其在现场检测混凝土强度时，由于粉尘的影响，指针滑块的摩擦力会发生很大的变化，这样对检测结果会产生很大的影响，特别是在表面硬度较低即混凝土强度较低时，回弹值较小，其影响会更大。



现在瑞士博势公司发明了一种新型回弹仪，它是用来测定回弹系数，即 Q 值，其物理意义是弹击杆弹击被弹击物体前后瞬间的弹击能量的比值，它和弹击杆弹击后的位移变化无关。因此，指针中心导杆的摩擦力、牵引指针运动的反弹力以及装置和样本间的相对速度对 Q 值影响较小。Q 值及弹击和回弹的速度，均可以通过光电子技术测得，并可进行数字转换，便于数据的处理。图 3-27 是能量系数回弹仪内部结构，图 3-28 为弹击锤冲击时的波形图。对于 2.207J 的中型回弹仪，弹击锤的质量为 106g，弹击瞬间，弹击锤的冲击速度为 6.45m/s。

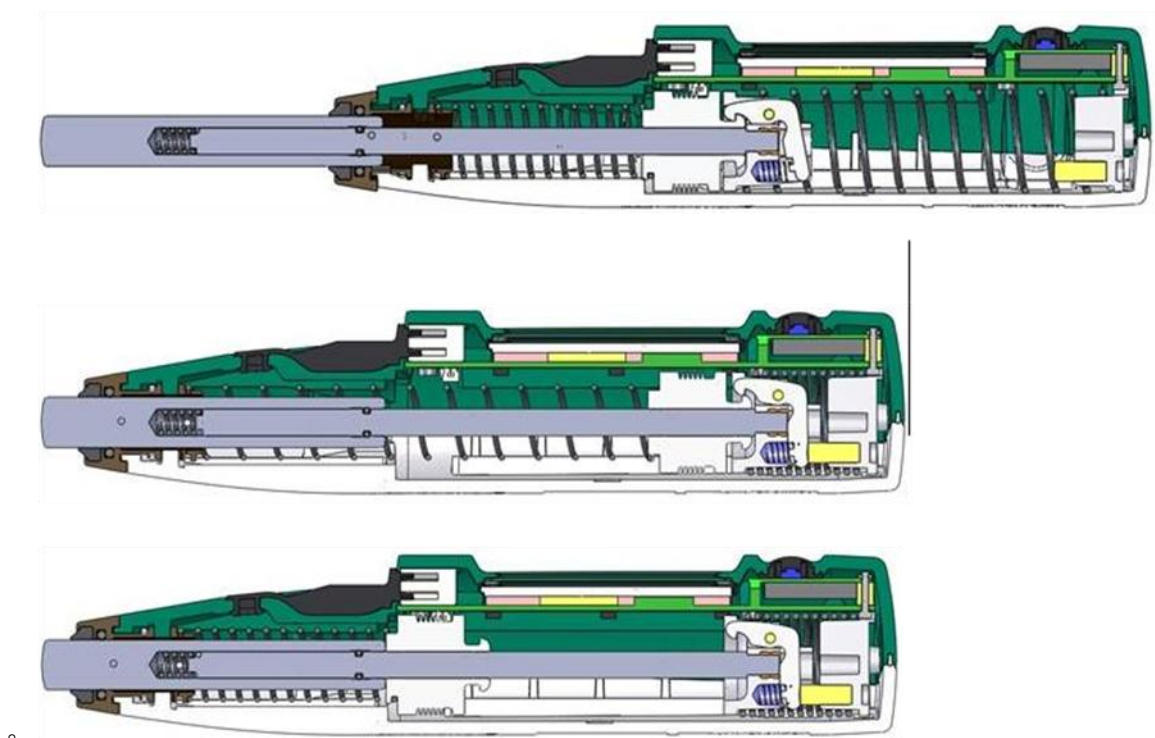


图 3-27 能量系数回弹仪内部结构

$$Q = 100 \cdot \sqrt{\frac{E_{\text{reflected}}}{E_{\text{forward}}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{2}mv_R^2}{\frac{1}{2}mv_0^2}} = 100 \cdot \frac{v_R}{v_0}$$

Q: 回弹值

m: 回弹锤质量

$E_{\text{forward}}$ : 冲击之前的动能

$E_{\text{reflected}}$ : 冲击之后的动能

$v_0$ : 冲击之前的即时速度

$v_R$ : 冲击之后的即时速度，回弹速度



图 3-28 弹击锤冲击时的波形图

回弹锤和计算速度发出的光信号。

Q 值回弹仪与传统 R 值回弹仪相比具有两大优势：

其一是不直接受重力影响，与冲击方向无关，所以无需弹击角度的修正。

其二是不受摩擦力的影响，此摩擦力对 R 值回弹仪的测试精度产生重大影响，即频繁的校准周期，Q 值回弹仪因为没有指针划块，不受摩擦力影响，所以测试结果的离散性与 R 值回弹仪相比要小得多。

Q 型回弹仪，去掉了普通回弹仪的指针系统，回弹仪的零部件减少了，使回弹仪的构造变得简单了，使用时外界对其影响的因素降低了，回弹仪的检定周期会大大的延长。方便了检测工作，提高了工作效率，降低使用成本。

由于回弹法检测混凝土抗压强度的方法是建立在通过大量实验建立的回弹值（碳化深度）与混凝土抗压强度之间的换算关系（即回弹曲线）的基础上的，而该技术所测得的“Q”值与传统的回弹值之间并不存在严格的数学对应关系，因此不适用于现行行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T23）。

陕西省建筑科学研究院对瑞士博势公司发明的回弹仪进行了一年多的应用实验研究，Q 型回弹仪经过了两万多次的实验弹击，弹击试块两千多个。回弹仪各个滑动部件移动自如，数据记录准确，钢砧率定值稳定，电池使用寿命长，充分的显示了该类回弹仪的优越性和技术特点。经对 2000 多个、强度范围（8~70）MPa、龄期（7~1000）天的边长 150\*150mm 的混凝土试块进行回弹-试压-碳化数据进行回归分析，其 Q-R 曲线误差较小。Q 型回弹仪使用方便、维护简单，是未来回弹仪的发展方向，是传统回弹仪的替代产品，是提高回弹法检测混凝土强度精度的有效手段；是未来推广数字回弹仪、降低劳动强度、提高工作效率的有效途径。

可以预期，随着技术进步、产品价格下降和相关标准的完善，数字回弹仪包括基于测量弹击锤回弹速度比的数字回弹仪产品都将会得到越来越广泛的应用。

## 第九节 回弹仪的率定

钢砧的率定值是回弹仪的主要性能指标，是统一回弹仪标准状态的必要条件。因此，回弹仪每次在使用前和使用后都必须进行率定，以便及时发现和解决回弹仪使用中出现的問題。以中型回弹仪为例，钢砧率定的作用，主要是：

1、检验回弹仪的冲击能量是否等于或接近于 2.207J，此时在钢砧上的率定值应为  $80 \pm 2$ ，此值作为检定回弹仪的标准之一；

2、能较灵活地反映出弹击杆、中心导杆和弹击锤的加工精度以及工作时，三者是否在同一轴线上。若不符合要求，则率定值低于 78，会影响测试值；

3、转动呈标准状态回弹仪的弹击杆在中心导杆内的位置，可检验回弹仪本身测试的稳定性。当各个方向在钢砧上的率定值均为  $80 \pm 2$  时，即表示该台回弹仪的测试性能是稳定的。

4、在回弹仪其他条件符合要求的情况下，用来检验回弹仪经使用后内部零部件有无损坏或出现某些障碍（包括传动部分及冲击面有无污物等），出现上述情况时率定值偏低且稳定性差。

回弹仪率定试验应在室温为  $(5 \sim 35)^\circ\text{C}$  的条件下进行，环境温度异常时，对回弹仪的性能有影响。率定回弹仪钢砧的洛氏硬度（HRC）为  $60 \pm 2$ ，钢砧表面应干燥、清洁并稳固地平放在刚度大的物体上。钢砧如果表面潮湿或者有异物，会在钢砧表面形成以隔离层，影响回弹仪的率定值。测定回弹值时，应取连续向下弹击三次的稳定回弹值的平均值。率定应分四个方向进行，弹击杆每次应旋转 90 度，弹击杆每旋转一次的率定平均值应为  $80 \pm 2$ 。

率定回弹仪的钢砧经常弹击时，其表面的硬度会随着弹击次数的增加而增加，因此，钢砧应每两年送有关单位进行检定或校准，以使钢砧有一个比较稳定的表面硬度。

当钢砧率定值达不到要求时，应该对回弹仪进行保养、维护或进行检定。不允许用混凝土试块上的回弹值予以修正；更不允许旋转调零螺丝人为地使其达到率定值。

## 第十节 回弹仪的操作、保养

### 1、操作

将弹击杆顶住混凝土的表面。轻压回弹仪，按钮松开，弹击杆徐徐伸出。使回弹仪对构件混凝土测试面缓慢均匀施压，待弹击锤脱钩冲击锤击杆后即回弹带动指针向后移并停留在某一位置上，即为回弹值。操作中应注意回弹仪的轴线应始终垂直于构件混凝土的测试面。做到缓慢施压，准确读数，快速复位。

回弹仪使用完毕应使弹击杆伸出机壳，并应清除弹击杆、杆前端球面以及刻度尺表面和

外壳上的污垢、尘土。回弹仪不使用时，应将弹击杆压入机壳内，经弹击后按下按钮，锁住机芯，装入回弹仪箱，平放在干燥阴凉处。此处应该特别强调弹击杆压入机壳内，弹击锤一定要弹击脱钩。不然的话，弹击拉簧会长期处于拉伸状态，容易使弹击拉簧疲劳变形。数字式回弹仪长期不用时，应取出电池，防止电池变质，腐蚀电子元件。

## 2、保养

回弹仪的使用环境比较恶劣，灰尘易进入回弹仪中，影响回弹仪的使用功能，应该按时进行保养，以保证检测结果的准确性。保养的目的是保证回弹仪处于良好的工作状态，一个合格的检测人员应该熟悉回弹仪的构造，熟练拆卸、装配回弹仪。应该经常、定期的对回弹仪进行保养。许多回弹仪测试数据误差较大，其主要原因就是不对回弹仪进行保养，不能使回弹仪处于良好的工作状态。当回弹仪存在下列情况之一时，应进行保养：

- 1) 回弹仪弹击超过 2000 次；
- 2) 在钢砧上的率定值不合格；
- 3) 对检测值有怀疑。

## 3、回弹仪的保养步骤

1) 使弹击锤脱钩后取出机芯，然后卸下弹击杆，取出里面的缓冲压簧，并取出弹击锤、弹击拉簧和拉簧座。

2) 清洁机芯各零部件，并重点清理中心导杆、弹击锤和弹击杆的内孔及冲击面。清理后应在中心导杆上薄薄涂抹钟表油，其他零部件均不得抹油。

3) 清理机壳内壁，卸下刻度尺，检查指针，其摩擦力应为  $(0.5 \sim 0.8) \text{ N}$ 。

4) 数字式回弹仪还应按照厂商提供的维护手册进行维护。

5) 保养时不得旋转尾盖上已定位紧固的调零螺丝，不得自制或更换零部件。保养后应按规定进行率定。

## 第十一节 回弹仪的常见故障及排除方法

回弹仪在使用中出现故障时，一般应送检定单位进行修理和检定，未经过专门培训的操作人员，不熟悉回弹仪的构造和工作原理，不能擅自拆卸回弹仪，以免损坏零部件。

现将回弹仪常见故障、原因分析和检修方法列于表 3-17，供操作人员参考

表 3-17

| 故 障 情 况              | 原 因 分 析                                                                                     | 检 修 方 法                                                                |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 回弹仪弹击时，指针块停在起始位置上不动。 | 1. 指针块上的指针片相对于指针轴上的张角太小；<br>2. 指针片折断                                                        | 1. 卸下指针块，将指针片的张角适当扳大些；<br>2. 更换指针片。                                    |
| 指针块在弹回过程中抖动          | 1. 指针块的指针片的张角略小；<br>2. 指针块与指针轴之间的配合太松；<br>3. 指针块与刻度尺的局部碰撞摩擦或与固定刻度尺的小螺钉相碰撞摩擦，或与机壳刻度槽局部摩擦阻太大。 | 1. 卸下指针块，适量地把指针片的张角扳大；<br>2. 将指针摩擦力调大一些；<br>3. 修锉指针块的上平面或截短小螺钉，或修锉刻度槽。 |
| 指针块在未弹击前就被带上来，无法计数。  | 指针块上的指针张角太大。                                                                                | 卸下指针块，将指针片的张角适当扳小。                                                     |
| 强击锤过早击发。             | 1. 挂钩的钩端已成小钝角；<br>2. 弹击锤的尾端局部破碎。                                                            | 1. 更换挂钩；<br>2 更换弹击锤                                                    |
| 不能弹击                 | 1. 挂钩弹簧已脱落；<br>2. 挂钩的钩端已折断或已磨成大钝角；<br>3. 弹击拉簧已拉断。                                           | 1. 装上挂钩弹簧；<br>2. 更换挂钩；<br>3. 更换弹击拉簧。                                   |
| 弹击杆伸不出来，无法使用。        | 按钮不起作用。                                                                                     | 用手握住尾盖并施一定压力，慢慢地将尾盖拧开（当心压簧将尾部冲开弹击伤人），使导向法兰往下运动，然后调整好按钮，如果按钮零件缺损，则应更换。  |
| 弹击杆易脱落。              | 中心导杆端部与弹击杆内孔配合不紧密。                                                                          | 取下弹击杆，若中心导杆部为花瓣则适当扩大，若为簧圈则调整簧圈，如无法调整（装卸弹击杆时切勿丢失缓冲压簧）则更换中心导杆。           |

|          |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                 |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 回弹仪率定值偏低 | <ol style="list-style-type: none"><li>1. 弹击锤与弹击杆的冲击平面有污物；</li><li>2. 弹击锤与中心导杆间有污物，摩擦力增大；</li><li>3. 弹击锤与弹击杆间的冲击面接触不均匀；</li><li>4. 中心导杆端部分爪瓣折断；</li><li>5. 机芯损坏。</li></ol> | <ol style="list-style-type: none"><li>1. 用汽油擦洗冲击面；</li><li>2. 用汽油擦洗弹击锤内孔及中心导杆，并薄薄地抹上一层 20 号机油；</li><li>3. 更换弹击杆；</li><li>4. 更换中心导杆；</li><li>5. 回弹仪报废。</li></ol> |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 第四章 回弹仪的计量检定

### 第一节 回弹仪检定的意义

回弹仪作为测量混凝土回弹值的计量仪器，回弹仪的状态如何，直接影响回弹值的大小，进而影响被测混凝土的抗压强度值，所以应按国家计量检定规程《回弹仪》JJG817-2011 按时进行计量检定。各个回弹仪厂家生产的回弹仪其计量性能是有一定的差别，回弹仪在使用一段时间后，其性能也会发生一些变化，各个部件的工作性能也可能改变。因此，回弹仪在开始使用之前和使用一定时间后就要对回弹仪进行计量检定。计量检定的目的就是通过检查和测量回弹仪各个部件的工作状态参数来判断回弹仪是否处于标准状态。通过计量检定合格的回弹仪，其工作状态参数都是基本一致，这样才能保证所有的回弹仪性能的统一性，才有利于回弹法的推广和应用。

在这里需要指出的是，回弹仪的率定值合格是保证处于标准状态的必有条件，而不是充分条件。我们说只有回弹仪的各种部件尺寸和整体工作状态参数符合检定规程的要求，才能使回弹仪处于标准状态。这里所讲的回弹仪的标准状态，其意义是回弹仪的部件参数和整体状态参数满足计量检定规程要求时的回弹仪。

国家计量检定规程《混凝土回弹仪》JJG817-1993 自颁布实施以来，在我国回弹仪的检定方面得到了广泛地应用，对提高回弹法检测混凝土的质量起到了非常重要的作用。原规程检定操作全部人工进行，并且部分检定项目的检测容易产生人为误差。另外，新型的数字式回弹仪也逐步得到了推广，这些新型技术和回弹仪的使用就使得原规程的应用受到了很大的制约，需要对原规程进行修订和完善，以适应回弹仪技术发展的需要。

根据国家质量技术监督检验检疫总局，国质检量函（2008）365 号文件《关于做好国家

计量技术法规制（修）定工作及计量器具比对工作有关事项的通知》的精神，《混凝土回弹仪》检定规程 JJG817-1993 被列入 2008 年国家计量技术法规制（修）定计划项目，编号 2008（7）-002 号。

2009 年，开始对原计量进行了修订。这次修订的重点是：实现尽可能多的检测项目的计算机自动检测，最大限度地减少可能引起的人为操作误差，提高整个检定过程的自动化程度，提高计量检定的工作效率。

这次修订的主要内容：

1.把原《混凝土回弹仪》计量检定规程更名为《回弹仪》计量检定规程。更名后的《回弹仪》JJG817 计量规程，中包含了混凝土回弹仪、砂浆回弹仪和砖回弹仪共五种型号的回弹仪的检定。解决了砂浆、砖和高强回弹仪无法检定的问题，使新的检定规程的适应性更加广泛和实用。

2.增加了数字式回弹仪示值一致性的的检定内容，随着光电子技术的发展，数字式回弹仪的应用也愈来愈广泛，需要增加该系列回弹仪的检定内容。去掉了弹击拉簧外观和弹击拉簧工作长度的检定项目，由于弹击拉簧拉伸长度（75mm）和“100”脱钩位置已经确定，则可以计算出拉簧的自由长度，弹击拉簧的外观不属于计量性能。把弹击杆尾部外观放入通用技术要求中，使回弹仪的计量性能要求有原来的 12 项减少到现在的 10 项。

3.M225 型回弹仪的弹簧刚度系数的允许误差从 $\pm 40$  调整到 $\pm 30$  是为了与《回弹仪》GB/T9138 相一致。

## 第二节 回弹仪的检定周期和检定项目

### 1、 回弹仪的检定周期

回弹仪的检定周期是根据回弹仪的使用状况和回弹仪的品质质量，经过长期的实践经验而定的。我国回弹仪检定规程规定，回弹仪具有下列情况之一时，应送计量检定机构检定：

- 1) 新回弹仪启用前。
- 2) 超过检定有效期限（回弹仪有效期为半年）。
- 3) 累计弹击次数超过 6000 次。
- 4) 数字式回弹仪数字显示的回弹值与指针直读示值相差大于 1。
- 5) 经保养后在钢砧上的率定值不合格。
- 6) 遭受严重撞击或其他损害。

2、回弹仪的检定内容

表 4-1 回弹仪检定项目

| 序号 | 项 目           | 技 术 要 求        |       | 允 许 误 差            |
|----|---------------|----------------|-------|--------------------|
| 1  | 标尺“100”刻度线位置  | 与检定器盖板定位缺口侧面重合 |       | 在刻线宽度范围内（刻线宽0.4mm） |
| 2  | 指针长度（mm）      | 20.0           |       | ±0.2               |
| 3  | 指针摩擦力（N）      | 回弹仪规格          |       |                    |
|    |               | H980           | 0.65  | ±0.15              |
|    |               | H550           |       |                    |
|    |               | H450           |       |                    |
|    |               | M225           |       |                    |
|    |               | L75            | 0.50  | ±0.10              |
|    |               | L20            |       |                    |
| 4  | 弹击杆端部球面半径（mm） | 回弹仪规格          |       |                    |
|    |               | H980           | 40.0  | ±1.0               |
|    |               | H550           | 18.0  |                    |
|    |               | H450           | 45.0  |                    |
|    |               | M225           | 25.0  |                    |
|    |               | L75            |       |                    |
|    |               | L20            |       |                    |
| 5  | 弹击锤脱钩位置       | 标尺“100”刻线处     |       | ±0.2mm             |
| 6  | 弹击拉簧刚度（N/m）   | 回弹仪规格          |       |                    |
|    |               | H980           | 1000  | ±45                |
|    |               | H550           | 1100  | ±50                |
|    |               | H450           | 900   | ±40                |
|    |               | M225           | 785   | ±30                |
|    |               | L75            | 261   | ±12                |
|    |               | L20            | 69    | ±4                 |
| 7  | 弹击拉簧工作长度（mm）  | 回弹仪规格          |       |                    |
|    |               | H980           | 134.4 | ±0.5               |



|    |              |                                                      |       |           |
|----|--------------|------------------------------------------------------|-------|-----------|
|    |              | H550                                                 | 86.0  | $\pm 0.5$ |
|    |              | H450                                                 | 106.0 | $\pm 0.5$ |
|    |              | M225                                                 | 61.5  | $\pm 0.3$ |
|    |              | L75                                                  |       |           |
|    |              | L20                                                  |       |           |
| 8  | 弹击拉簧拉伸长度（mm） | 回弹仪规格                                                |       |           |
|    |              | H980                                                 | 140.0 | $\pm 0.5$ |
|    |              | H550                                                 | 100.0 |           |
|    |              | H450                                                 |       |           |
|    |              | M225                                                 | 75.0  | $\pm 0.3$ |
|    |              | L75                                                  |       |           |
|    |              | L20                                                  |       |           |
| 9  | 弹击锤起跳位置      | 标尺“0”处                                               |       | 0~1       |
| 10 | 钢砧率定值        | 回弹仪规格                                                |       |           |
|    |              | H980                                                 | 83    | $\pm 2$   |
|    |              | H550                                                 |       |           |
|    |              | H450                                                 | 88    |           |
|    |              | M225                                                 | 80    |           |
|    |              | L75                                                  | 74    |           |
|    |              | L20                                                  |       |           |
| 11 | 示值系统一致性      | 指针滑块刻线对应的标尺数值与数字式回弹仪的显示值之差 $\leq 1$ ，且两者在钢砧率定值均满足要求。 |       |           |

上述技术要求是按照国家计量检定规程《回弹仪》(JJG817)规定的内容而定的，这些主要技术指标反映了各部件及其装配性能对回弹仪的影响程度。

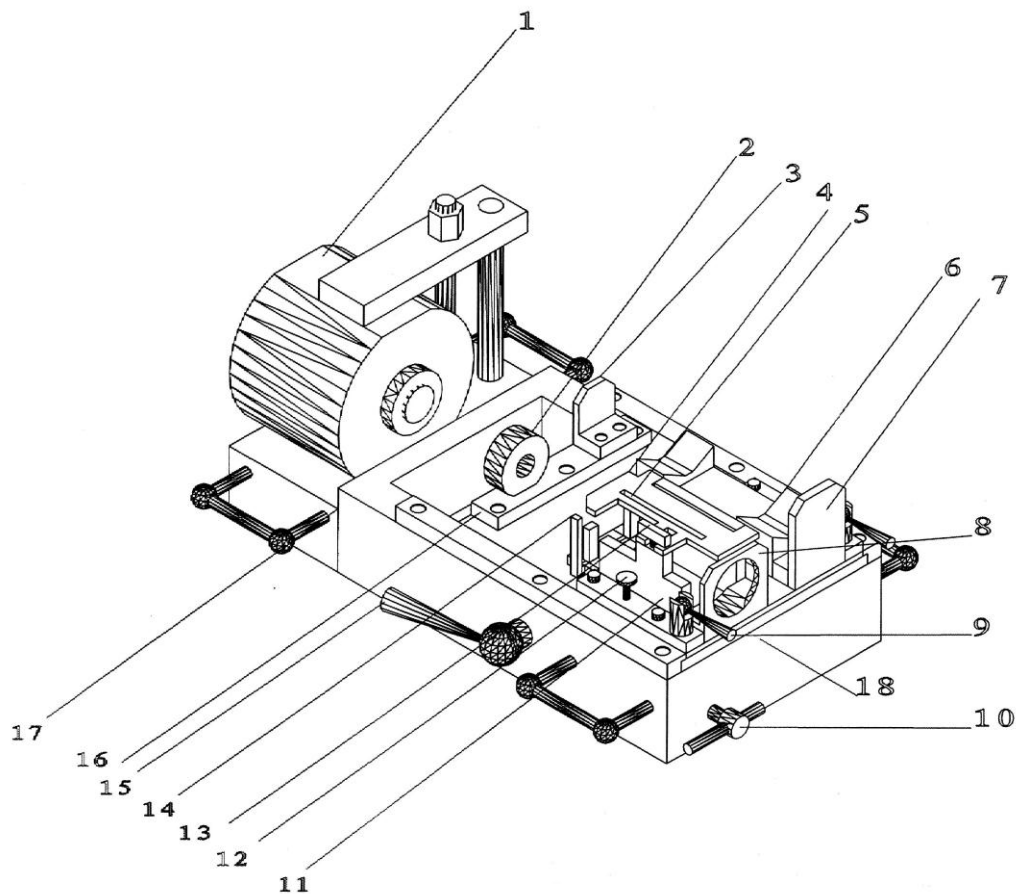
检定单位应由当地技术监督部门授权，并必须按照 JJG817 的规定，应备有回弹仪检定器、拉簧刚度测量仪等设备。

### 第三节 回弹仪检定器

回弹仪的检定必须有回弹仪检定器、拉簧刚度测定仪等设备。只有在回弹仪的检定器上才能比较方便、准确的检查和测定回弹仪的部件尺寸和工作状态。新修订的回弹仪检定规

程在保留了原规程合理易用特点的基础上，在回弹仪的检定器上安装了拉力传感器、位移传感器和计算机自动采样记录系统，就可以实现一次操作来完成对拉簧刚度、拉簧冲击长度、弹击锤脱钩位置等回弹仪主要技术指标的自动检测，可以减轻工作强度，提高检定效率。

回弹仪检定器示意图



1-钢砧；2-力传感器；3 定位板Ⅱ；4-盖板；5-加长指针；6-机壳定位槽；  
7-定位板Ⅰ； 8-尾盖支架；9-手柄Ⅱ；10-手柄Ⅰ； 11-机芯定位槽；12-定位按钮；13-压  
紧螺钉；14-弹击手柄；15-锤夹；16-锁紧按钮；17-底座；18-位移传感器。

图 4-1 回弹仪检定器

#### 第四节 回弹仪的检定方法

回弹仪的检定方法在检定规程中已有详细规定，这里简要介绍一下新检定器的原理：在

检定装置的适当位置安装拉力传感器、位移传感器和计算机自动采样记录系统，实现一次操作同时完成对拉簧刚度、拉簧冲击长度、弹击锤脱钩位置等回弹仪主要技术指标的自动检测，达到实现一次性测定检定项目。

#### 1. 拉簧刚度测定

检定器在检定时拉伸弹击拉簧的同时通过力传感器记录拉簧所受到的拉力和拉伸位移值，根据胡克定律，立可直接计算出被测拉簧的刚度。

这一方案省去了原规程的专用拉簧检定仪，避免了多个环节可能引起的操作误差，极大地提高了工作效率。

此外，由于计算机系统得到的是拉簧拉力与拉伸位移之间的连续关系，可进一步衡量拉簧刚度的线性度指标。

#### 2. 弹击锤脱钩位置测定

弹击锤脱钩时，拉簧拉力瞬间变零，计算机记录的拉簧拉力最大值所对应的位移位置即为弹击锤脱钩位置。

这一检测方法完全避免了原来该项目所存在的“将脱钩未脱钩”人工判别误差，既客观准确又快捷高效。

#### 3. 拉簧冲击长度测定

根据拉簧拉力与拉伸位移之间的对应关系。拉簧拉力为零的位置对应于拉簧自由状态，因此，拉簧冲击长度值等于弹击锤脱钩位置（拉簧最大拉力）和拉簧自由位置（拉簧拉力为零）所对应的位移值之差。

#### 4. 拉簧自由长度测定

如果回弹仪拉簧座的机械尺寸一致，由于拉簧冲击长度、和“100”脱钩位置已经确定，则可以计算出拉簧的自由长度。从而避免了人工测定拉簧自由长度所带来的误差。

### 第五节 回弹仪检定中回弹值不确定度评定报告

#### 5.1 被测量及测量方法

被测量：标称能量为 2.207J 的混凝土回弹仪在标准钢砧上的回弹值

测量方法：在回弹仪检定装置上检查回弹仪各项参数（见表 4-3），在保证回弹仪处于标准状态后，测量回弹仪率定值，每测量 3 次转动弹击杆  $90^{\circ}$ ，共测量 4 个方向。

## 5.2 数学模型

5.2.1 基本数学计算公式： $R = \frac{L'}{L} \times 100$  (1)

式中： $R$ ——率定值

$L'$ ——弹击锤弹回的距离

$L$ ——弹击拉簧拉伸长度

### 5.2.2 数学模型

$$R = \frac{L'}{L} \times 100 + \delta R_1$$
$$= \frac{L_0 + \delta L_1 + \delta L_2 + \delta L_3 + \delta L_4 + \delta L_5 + \delta L_6 + \delta L_7 + \delta L_8 + \delta L_9}{x_n - x_0 + \delta \Delta x_0 + \delta \Delta x_n + \delta x} \times 100 + \delta R_1 \quad (2)$$

式中： $R$ ——率定值

$L'$ ——弹击锤弹回的距离

$L$ ——弹击拉簧拉伸长度

$\delta R_1$ ——回弹仪分辨力

$L_0$ ——测量得到的弹击锤弹回距离

$\delta L_1$ ——机壳刻度槽上“100”刻线位置对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_2$ ——指针长度（mm）对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_3$ ——指针摩擦力（N）对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_4$ ——弹击杆端部球面半径（mm）对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_5$ ——弹击拉簧刚度（N/m）对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_6$ ——标准钢砧硬度对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_7$ ——弹击锤起跳位置对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_8$ ——弹击锤脱钩位置对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_9$ ——位移测量装置引入的不确定度

$x_n$ ——拉簧脱钩位置

$x_0$ ——拉簧拉伸起始位置

$\delta \Delta x_0$ ——判断拉簧拉伸起始位置的位移差

$\delta \Delta x_n$ ——判断拉簧脱钩位置的位移差

$\delta x$ ——位移测量装置引入的不确定度

### 5.3 各输入量的标准不确定度分量

#### 5.3.1 弹击拉簧拉伸长度 $L$ 的不确定度

检定规程中对弹击拉簧拉伸长度  $L$  测量方法如下：使回弹仪机芯复位，缓慢拉伸拉簧直至弹击锤脱钩。在此过程中连续测量拉力及对应的拉伸长度，查找弹击拉簧拉伸起始位置附近记录数据中最后一组拉力为  $(0.0 \pm 0.1)$  N 范围内的数据记录  $(f_0, x_0)$  和下一组数据记录  $(f_1, x_1)$ ，计算这两组数据的位移差：

$$\Delta x_0 = x_1 - x_0 \quad (3)$$

若  $0 < \Delta x_0 \leq 0.3\text{mm}$ ，则取  $x_0$  为拉簧拉伸起始位置。

查找弹击锤脱钩位置附近拉力锐减的两组相邻数据  $(f_n, x_n)$  和  $(f_{n+1}, x_{n+1})$ ，计算：

$$\Delta f_n = f_{n+1} - f_n \quad (4)$$

$$\Delta x_n = x_{n+1} - x_n \quad (5)$$

若  $\Delta f_n \geq 20\text{N}$  同时  $0 < \Delta x_n \leq 0.3\text{mm}$ ，则取  $x_n$  为拉簧脱钩位置。

本次测量的弹击拉簧拉伸长度为：

$$L = x_n - x_0 \quad (6)$$

重复测量四次，取平均值作为弹击锤的冲击长度：

$$\bar{L} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 L_i \quad (7)$$

由此可知弹击拉簧拉伸长度的基本计算公式为：

$$L = x_n - x_0 \quad (8)$$

数学模型为：

$$L = x_n - x_0 + \delta \Delta x_0 + \delta \Delta x_n + \delta x \quad (9)$$

式中：  $x_n$  ——拉簧脱钩位置

$x_0$  ——拉簧拉伸起始位置

$\delta \Delta x_0$  ——判断拉簧拉伸起始位置的位移差

$\delta \Delta x_n$  ——判断拉簧脱钩位置的位移差

$\delta x$  ——位移测量装置引入的不确定度

$$(1) \quad x = x_n - x_0$$

重复实验 16 次，实验数据如表 4-4 所示。

表 4-4 弹击拉簧拉伸长度实验数据

| 编号  | 零点位置 |         | 脱钩位置  |         | 冲击长度  |         |
|-----|------|---------|-------|---------|-------|---------|
|     | 光栅输出 | 距平 (mm) | 光栅输出  | 距平 (mm) | mm    | 距平 (mm) |
| 1   | 5532 | 0.18    | -9488 | -0.04   | 75.10 | 0.22    |
| 2   | 5489 | -0.04   | -9477 | 0.01    | 74.83 | -0.05   |
| 3   | 5504 | 0.04    | -9468 | 0.06    | 74.86 | -0.02   |
| 4   | 5495 | -0.01   | -9471 | 0.04    | 74.83 | -0.05   |
| 5   | 5483 | -0.07   | -9486 | -0.03   | 74.85 | -0.04   |
| 6   | 5504 | 0.04    | -9480 | 0.00    | 74.92 | 0.04    |
| 7   | 5491 | -0.03   | -9468 | 0.06    | 74.80 | -0.09   |
| 8   | 5482 | -0.07   | -9466 | 0.07    | 74.74 | -0.14   |
| 9   | 5491 | -0.03   | -9484 | -0.02   | 74.88 | -0.01   |
| 10  | 5521 | 0.12    | -9480 | 0.00    | 75.01 | 0.12    |
| 11  | 5506 | 0.05    | -9487 | -0.04   | 74.97 | 0.08    |
| 12  | 5461 | -0.18   | -9486 | -0.03   | 74.74 | -0.15   |
| 13  | 5496 | 0.00    | -9479 | 0.00    | 74.88 | -0.01   |
| 14  | 5471 | -0.13   | -9468 | 0.06    | 74.70 | -0.19   |
| 15  | 5505 | 0.04    | -9498 | -0.09   | 75.02 | 0.13    |
| 16  | 5515 | 0.09    | -9491 | -0.06   | 75.03 | 0.15    |
| 平均值 | 5497 |         | -9480 |         | 74.88 |         |

单次测量的实验室标准差：

$$u(x_k) = s(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{16} (x_k - \bar{x})^2}{15}} = 0.116(\text{mm}) \quad (10)$$

检定时进行了三次重复测量，满足正态分布，自由度为 2，四次测量平均值的实验室标准差  $s(\bar{x})$ ：

$$u_1 = s(\bar{x}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{3}} = 0.067(\text{mm}) \quad (11)$$

(2) 判断拉簧拉伸起始位置的位移差  $\delta\Delta x_0$

$0 < \Delta x_0 \leq 0.3\text{mm}$ ，假设其满足矩形分布：

$$u_2 = u(\delta\Delta x_0) = \frac{0.3\text{mm}}{2\sqrt{3}} = 0.087\text{mm} \quad (12)$$

(3) 判断拉簧脱钩位置的位移差  $\delta\Delta x_n$

$0 < \Delta x_n \leq 0.3\text{mm}$ ，假设其满足矩形分布：

$$u_3 = u(\delta\Delta x_n) = \frac{0.3\text{mm}}{2\sqrt{3}} = 0.087\text{mm} \quad (13)$$

(4)位移测量装置引入的不确定度

$u_4$  根据位移测量装置的校准证书得到，或者根据位移测量装置的最大允许误差 0.02mm，满足矩形分布：

$$u_4 = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.012mm \tag{14}$$

各输入量之间不存在值得考虑的相关性，合成标准不确定度：

$$u(L) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.141(mm) \tag{15}$$

$$u_{rel}(L) = \frac{u(L)}{\bar{L}} = \frac{0.141}{74.88} = 0.19\% \tag{16}$$

5.3.2 弹击锤弹回距离  $L'$  的不确定度

目前弹击锤弹回距离  $L'$  和各输入量间没有建立明确的数学计算公式，数学模型采用经验公式，经验公式的灵敏度系数为 1：

$$L' = L_0 + \delta L_1 + \delta L_2 + \delta L_3 + \delta L_4 + \delta L_5 + \delta L_6 + \delta L_7 + \delta L_8 + \delta L_9 \tag{17}$$

式中： $L_0$ ——测量得到的弹击锤弹回距离

$\delta L_1$ ——机壳刻度槽上“100”刻线位置对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_2$ ——指针长度（mm）对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_3$ ——指针摩擦力（N）对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_4$ ——弹击杆端部球面半径（mm）对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_5$ ——弹击拉簧刚度（N/m）对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_6$ ——标准钢砧硬度对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_7$ ——弹击锤起跳位置对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_8$ ——弹击锤脱钩位置对弹击锤弹回距离的影响

$\delta L_9$ ——位移测量装置引入的不确定度

(1) 测量得到的弹击锤弹回距离  $L_0$

重复实验 16 次，实验数据如表 4-5 所示。

表 4-5 回弹仪率定值实验数据

| 率定值 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 平均 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |    |
| 81  | 80 | 80 | 80 | 81 | 79 | 80 | 80 | 80 | 80 | 81 | 79 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |

弹回距离  $L_0 = \frac{\bar{L}R}{100}$ ， $\bar{L} = 74.88(\text{mm})$ ，计算得到弹回距离如表 4 所示。

表 4-6 弹击锤弹回距离实验数据

| 弹击锤弹回距离（mm） |       |       |       |       |       |       |       | 平均值<br><br>（mm） |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| 1           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |                 |
| 60.66       | 59.91 | 59.91 | 59.91 | 60.66 | 59.16 | 59.91 | 59.91 |                 |
| 弹击锤弹回距离（mm） |       |       |       |       |       |       |       |                 |
| 9           | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |                 |
| 59.91       | 59.91 | 60.66 | 59.16 | 59.91 | 59.91 | 59.91 | 59.91 | 59.96           |

单次测量的实验室标准差：

$$u_1 = s(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{16} (x_k - \bar{x})^2}{15}} = 0.43(\text{mm}) \tag{18}$$

(2) 机壳刻度槽上“100”刻线位置  $\delta L_1$

根据检定规程，机壳刻度槽上“100”刻线位置应与回弹仪检定器中盖板定位缺口侧面重合，当在刻线宽度范围内（刻线宽 0.4mm）即认为重合。由此引入的不确定度符合矩形分布：

$$u_2 = \frac{0.4}{2\sqrt{3}} = 0.116(\text{mm}) \tag{19}$$

(3) 指针长度（mm） $\delta L_2$

指针长度 20.0mm，允许误差  $\pm 0.2\text{mm}$ ，符合矩形分布：

$$u_3 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.116(\text{mm}) \tag{20}$$

(4) 指针摩擦力（N） $\delta L_3$

表 4-7 不同指针摩擦力下的率定值实验数据

| 指针摩擦<br>力                      | 率定值 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 平均    |
|--------------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|
|                                | 1   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |       |
| 0.50N                          | 82  | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 81 | 82 | 82 | 82 | 82 | 81 | 82 | 82 | 81.88 |
| 0.65N                          | 81  | 80 | 80 | 80 | 81 | 79 | 80 | 80 | 80 | 80 | 81 | 79 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80.06 |
| 0.80N                          | 79  | 79 | 79 | 80 | 80 | 80 | 80 | 79 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 79 | 79.69 |
| 回弹仪状态：拉簧刚度 788.0 N/m（误差不大于 1%） |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |       |

不同指针摩擦力下的率定值实验数据如表 4-7 所示。由此可知，指针摩擦力对率定值的影响最大约 1 个分度，转换为位移值约为 1.5mm。假设指针摩擦力的影响符合矩形分布：

$$u_4 = \frac{1.5}{2\sqrt{3}} = 0.433(\text{mm}) \tag{21}$$



(5) 弹击杆端部球面半径 (mm)  $\delta L_4$

$u_5$  通过实验和经验得到:

$$u_5 = 0.015\text{mm} \quad (\text{极少量}) \quad (22)$$

(6) 弹击拉簧刚度 (N/m)  $\delta L_5$

$u_6$  通过实验和经验得到:

$$u_6 = 0.004\text{mm} \quad (\text{极少量}) \quad (23)$$

(7) 标准钢砧硬度  $\delta L_6$

$u_7$  通过实验和经验得到:

$$u_7 = 0.1\text{mm} \quad (24)$$

(8) 弹击锤起跳位置  $\delta L_7$

弹击锤起跳位置允许误差  $\pm 0.1\text{mm}$ , 满足矩形分布:

$$u_8 = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.058(\text{mm}) \quad (25)$$

(9) 弹击锤脱钩位置  $\delta L_8$

规程要求弹击锤脱钩位置在刻度尺“100”刻线处, 在刻线宽度范围内 (刻线宽  $0.4\text{mm}$ ) 即可, 符合矩形分布:

$$u_9 = \frac{0.4\text{mm}}{2\sqrt{3}} = 0.116(\text{mm}) \quad (26)$$

(10) 位移测量装置引入的不确定度  $\delta L_9$

实验中测量弹击锤弹回距离的方法, 相当于用量程  $75\text{mm}$  (允差  $\pm 0.3\text{mm}$ ), 50 个分度, 每个分度  $1.5\text{mm}$ , 分辨力  $0.75\text{mm}$  的刻度尺进行测量。由此引入的不确定度:

$$u_{10} = 0.3(\text{mm}) \quad (27)$$

各输入量之间不存在值得考虑的相关性, 合成标准不确定度:

$$u(L) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2} = 0.718 \quad (\text{mm}) \quad (28)$$

$$u_{\text{rel}}(L') = \frac{u(L')}{L'} = \frac{0.718}{59.96} = 1.2\% \quad (29)$$

### 5.3.3 回弹仪分辨力 $\delta R_1$

回弹仪分辨力为 1, 符合矩形分布:

$$u(\delta R_1) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0.3 \quad (30)$$

5.4 相关性

由于实验中弹击锤弹回距离  $L'$  是根据率定值  $R$  和弹击拉簧拉伸长度  $L$  算出，因此  $L'$  与  $L$  具有较大的相关性，相关系数设为 1。其它输入量之间不存在值得考虑的相关性。

5.5 不确定度概算

表 4-8 不确定度分量汇总表

|   | 输入量<br>$X_i$        | 估计值<br>$x_i$ | 标准不确定度<br>$u(x_i)$ | 分布 | 灵敏系数<br>$c_i$ | 不确定度分量<br>$u_i(y)$ |
|---|---------------------|--------------|--------------------|----|---------------|--------------------|
| 1 | $\delta R_1$        | 0            | 0.289              | 矩形 | 1             | 0.3                |
| 2 | $L$                 |              | 0.141mm            |    |               |                    |
|   | $x_n - x_0$         | 75mm         | 0.067mm            | 正态 | 1             | 0.058mm            |
|   | $\delta \Delta x_0$ | 0.15 mm      | 0.087mm            | 矩形 | 1             | 0.087mm            |
|   | $\delta \Delta x_n$ | 0.15mm       | 0.087mm            | 矩形 | 1             | 0.087mm            |
|   | $\delta x$          | 0mm          | 0.012mm            | 矩形 | 1             | 0.012mm            |
| 3 | $L'$                |              | 0.718mm            |    |               |                    |
|   | $L_0$               | 60mm         | 0.43mm             | 正态 | 1             | 0.215mm            |
|   | $\delta L_1$        | 0mm          | 0.116mm            | 矩形 | 1             | 0.116mm            |
|   | $\delta L_2$        | 0mm          | 0.116mm            | 矩形 | 1             | 0.116mm            |
|   | $\delta L_3$        |              | 0.433mm            | 矩形 | 1             | 0.433mm            |
|   | $\delta L_4$        |              | 0.015mm            |    |               | 0.015mm            |
|   | $\delta L_5$        |              | 0.004mm            |    | 1             | 0.004mm            |
|   | $\delta L_6$        |              | 0.1mm              |    | 1             | 0.1mm              |
|   | $\delta L_7$        |              | 0.058mm            |    | 1             | 0.058mm            |
|   | $\delta L_8$        | 0mm          | 0.116mm            | 矩形 | 1             | 0.116mm            |
|   | $\delta L_9$        | 0mm          | 0.3mm              | 矩形 | 1             | 0.3mm              |

主要不确定度分量：回弹仪分辨力  $\delta R_1$ 、指针摩擦力  $\delta L_3$  和弹回距离位移测量装置  $\delta L_9$ 。

5.6 合成总的不确定度  $u(R)$

根据  $R = \frac{L'}{L} \times 100 + \delta R_1$ ， $u_{rel}(L') = 1.2\%$ ， $u_{rel}(L) = 0.19\%$ ，相关系数为 1，得到：

$$u_{rel}\left(\frac{L'}{L}\right) = u_{rel}(L') + u_{rel}(L) = 1.39\% \quad (31)$$

$$u\left(\frac{L'}{L}\right) = u_{rel}\left(\frac{L'}{L}\right) \times \frac{L'}{L} \times 100 = 1.39\% \times \frac{59.96}{74.89} \times 100 = 1.12 \quad (32)$$

总的 uncertainty:

$$u(R) = \sqrt{u^2\left(\frac{L'}{L}\right) + u^2(\delta R_1)} = \sqrt{1.12^2 + 0.3^2} = 1.16 \quad (33)$$

## 5.7 扩展 uncertainty

取包含因子  $k=2$ ，扩展 uncertainty:

$$U = k \times u(R) = 2u(R) = 2.32 \quad (34)$$

$$U_{rel} = \frac{U}{R} = \frac{2.32}{80} = 2.9\% \quad (35)$$

注:

- 1、为保险起见，本报告在评定一些影响量的 uncertainty 时进行了放大，例如将  $L'$  与  $L$  的相关系数设为 1。
- 2、合格的混凝土回弹仪钢砧率定值允许误差为  $80 \pm 2$ ，通过最大允差以 B 类 uncertainty 评定，符合矩形分布，

得到钢砧上的率定值由回弹仪本身带来的标准 uncertainty  $u(R) = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.2$ ，扩展 uncertainty

$U = k \times u(R) = 2u(R) = 2.4$ ，相对扩展 uncertainty  $U_{rel} = \frac{U}{R} = \frac{2.4}{80} = 3\%$ 。该结果与本报告的结果基本

一致。

## 第六节 有关回弹仪检定的讨论

我们现在对回弹仪的检定实行的分部检定法，即先把回弹仪拆开，放到检定架上，在检定架上我们可以很方便的测出回弹仪中各个部件间的相对位置和尺寸。采用光电子技术设计的新的检定架上，可以完成回弹仪检定的所有操作程序，可以实现在检定架上的一次性完成。

从技术原理上，现有检定器或数字化检定装置只相当于回弹仪的外壳，回弹仪机芯在检定过程中相当于在与原壳体相同的技术条件下进行，因此，回弹仪检定时的状态能够代表被检回弹仪整体时的技术状态。但是这种检定方法属于分部检定法。

对于分部法检定的方法，在我国一些专门从事计量检定的人员中还有不同的意见和看法。主要认为：作为一个回弹仪，应该检定它的整体性能，而不应把它拆分开来，拆分检定以后，再重新装配时会影响回弹仪的整体状态。

对此，我们认为：

(1) 如果能找到科学、严谨的整体检定方法当然是最理想的方案；但到目前为止，并没有比现有采用的分部法检定的方法更科学合理的检定方法的技术方案；

(2) 事实上，并非所有计量器具的检定规程都采用整体检定的，也有其他计量器因无法整体检定方式而采用分部检定的。

(3) 由于现有检定装置已经最大限度地实现了检测技术状态与被检回弹仪整体技术状态的一致性，尤其是采用了光电子技术的回弹仪检定器，可以实现回弹仪的主要性能的一次性检定。因此回弹仪检定时的状态能够完整、精确地代表被检回弹仪整体时的技术状态。

那么有没有更好的检定方法呢？国内有些学者提出采用测定回弹仪弹击能量的方法，可以定量的测出回弹仪的弹击能量，并以此实现对回弹仪的整体检定。这种方法可以测出回弹仪在硬度较大的物体上弹击时的能量，而无法测出回弹仪在使用的硬度区间范围的能量，其原因是：1. 被弹物体硬度较大时，它基本呈现的是弹性碰撞，表面无塑性变形，回弹仪的回弹值较高，回弹仪的各种摩擦阻力对回弹值影响较小。而当被弹击物体的硬度较小时，它呈现的是非弹性碰撞，被弹击物体表面会出现塑性变形，吸收了一部分能量，所以回弹值较小，此时，回弹仪的摩擦阻力对回弹值的影响很大，而我们正常使用的回弹区间恰好在相对较低的范围内。

一种设想，是在 20~60 洛氏硬度范围内，每隔一定的硬度值做成 8 到 10 个标准硬度块，分别标定每个试块的回弹值。检定时，分别在 8 个或 10 个标准硬度块上测定回弹值，就可以检定回弹仪在不同硬度条件下的状态。如果能实现这种设想，回弹仪的检定就方便的多了，也不需拆开回弹仪，能达到整体检定的目的。但是，这种方法在实施起来存在较大的困难，抛开标准硬度块制造成本不说，单是低硬度区间的硬度块每弹击一次，硬度块就会产生变形，由于金属材料冷作硬化的作用，硬度块的硬度会增加，硬度块无法反复多次使用。如果硬度块只能一次性使用，那么回弹仪的检定成本就很高。

综上所述，在当前的技术条件下，要实现不拆开回弹仪的壳体而实行回弹仪的整体检定，还有许多技术问题需要解决。但是人们通过各种设想和实验，可以为未来回弹仪的检定方法改进提供参考依据。

## 第六章 回弹法检测混凝土强度的影响因素

采用回弹仪测定混凝土表面硬度以确定混凝土抗压强度，是根据混凝土硬化后其表面硬

度与抗压强度之间有一定的相关关系，通常影响混凝土的抗压强度  $f_{cu}$  与回弹值  $R$  的因素并不都是一致的，某些因素只对其中一项有影响，而对另一项不产生影响或影响甚微。因此，弄清这些影响因素的作用及影响程度，对正确制订及选择“ $f_{cu}$ — $R$ ”关系曲线（或公式），提高测试精度是很重要的。

到目前为止，我国回弹法研究成果基本只适用于普通混凝土（干密度为  $2000 \sim 2800 \text{kg/m}^3$  的水泥混凝土），故下面介绍的各种影响是对普通混凝土而言。

## 第一节 原材料

普通混凝土是建筑构件生产中使用最普遍的一种，它是由水泥、外加剂、掺合料、水及粗、细骨料和外加剂的混合料制备而成的。

### 1. 水泥

国外资料介绍，水泥品种对回弹法有重要的影响，高铝水泥混凝土的强度要比普通水泥混凝土高，而用富硫酸盐水泥制备的混凝土强度偏低。罗马尼亚采用的影响系数法，普通水泥影响系数定为 1.0，而矿渣水泥则为 0.9。

我国适用于普通混凝土的主要水泥品种，如普通水泥、矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥及硅酸盐水泥等对回弹法测强的影响，国内看法不甚一致。我们认为只要考虑了碳化深度的影响就可以不考虑水泥品种的影响。

### 3. 粗骨料

粗骨料的影响，至今看法没有统一。国外一般认为粗骨料品种、粒径及产地均有影响。罗马尼亚方法规定，以石英质河卵石骨料作为标准，取影响系数为 1，其余骨料则通过试验确定影响系数。英国标准协会则认为“不同种类的骨料得出不同的相关关系，正常的骨料如卵石和多数碎石具有相似的相关关系”。另有一些国外资料介绍，即使粗骨料的种类相同，也必须根据不同产地得出不同的相关曲线。

浙江省建筑科学研究院就是按照碎石和卵石的不同，分别回归了碎石和卵石混凝土的回弹测强曲线。在混凝土强度（ $10 \sim 60$ ）MPa 之间，回弹值的区间为：

碎石混凝土：回弹值区间（ $18.2 \sim 47.6$ ），混凝土强度区间（ $13.1 \sim 59.9$ ）MPa

卵石混凝土：回弹值区间（ $20.0 \sim 48.0$ ），混凝土强度区间（ $10.3 \sim 60.0$ ）MPa

综上所述，石子品种的影响，在我国迄今看法尚不统一，作法也不一致。更何况，许多地方的混凝土应用的是碎卵石或碎石与卵石的混合石，要想把它们区分开来是很困难的。因此，各地区在制作自己的曲线时，可结合具体情况酌定。

第二节 外加剂

我国建筑工程的普通混凝土中，经常掺加外加剂。陕西省建筑科学研究院及浙江省建筑科学研究院对木钙减水剂或三乙醇胺复合早强剂的试验研究资料表明，正常的掺量下，上述外加剂对回弹法测强没有影响。

四川省建筑科学研究院对此进行了专题研究，他们采用在相同条件下，对配制的混凝土分别进行了掺与不掺外加剂的平行对比试验。外加剂种类及掺量见表 5-1。

外加剂种类及掺量 表 5-1

| 编号 | 混凝土种类  | 外加剂掺量（占水泥重量%） |     |      |
|----|--------|---------------|-----|------|
|    |        | 木钙            | 硫酸钠 | 三乙醇胺 |
| A  | 不掺外加剂  | ——            | ——  | ——   |
| B  | 掺复合早强剂 | ——            | 1.0 | 0.03 |
| C  | 掺减水剂   | 0.25          | ——  | ——   |

试验表明，普通混凝土中掺与不掺上述外加剂对回弹法测强影响并不显著。

第三节 成型方法

不同强度等级、不同用途的混凝土混合物，应有各自相应的最佳成型工艺。陕西省建筑科学研究院曾将水灰比变化幅度为 0.37~0.78，强度等级 C10~C40 的混凝土混合物，分别进行了手工插捣、适振（振动至混凝土表面出浆即停）、欠振（混凝土表面将要出浆停振）、过振（混凝土表面出浆后续振约 5 秒停）试验。试验表明，只要成型后的混凝土基本密实，上述两类成型方法对回弹法测强无显著影响。。但对一些采用离心法、真空法、压浆法、喷射法和混凝土表层经各种物理、化学方法处理成型的混凝土，应慎重使用回弹法的统一测强曲线，必须经试验验证后，若无影响方可直接使用。

第四节 养护方法及表面湿度

混凝土常用的养护方法，有养护标准养护、空气中自然养护及蒸汽养护等多种。蒸汽养护与自然养护对回弹法测强的影响，国内看法不一。一种看法是，两种养护方法对回弹法测强有明显影响，它们各自应有不同的相关曲线。另一种看法则认为，蒸养构件在空气中自然养护一段时间后，若表面呈干燥状态，那么它与自然养护试件相比，其 28 天、90 天龄期的强度、回弹值均无明显差异，可以看作没有影响。

陕西省建筑科学研究院对此进行了专题研究。他们将相同条件的混凝土试块分别进行了蒸养出池、蒸养后立即自然养护、自然养护等三种情况的对比。试验表明，蒸养出池的混凝土由于表面温度较高，与自然养护混凝土相比有较明显的影响。而蒸养后经自然养护七天以上的混凝土就看不出有显著影响。因此，主张蒸养池后七天以内的混凝土应另行建立专用测强曲线，而蒸养出池后再自然养护七天以上的混凝土可按自然养护混凝土看待。

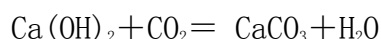
混凝土表面的潮湿状态对回弹法测强有较大的影响，这是国内外一致的看法。实验表明，潮湿状态对于低强度的混凝土影响较大，随着强度的增长，表面潮湿状态的影响逐渐减小，对于短龄期的较高强度的混凝土的影响已不明显。

混凝土表面的潮湿状态对回弹法测强有较大的影响，这是国内外一致的看法。潮湿状态对于低强度的混凝土影响较大，随着强度的增长，表面潮湿状态的影响逐渐减小，对于短龄期的较高强度（如 30MPa 以上）的混凝土的影响已不明显。

有的资料介绍，最好在混凝土表面为风干状态时试验，或事先取混凝土试样测定含水率，计算强度时予以修正。

## 第五节 碳化及龄期

水泥一经水化就伴随着氢氧化钙的生成，它对于混凝土的硬化和活性矿物掺合料的二次水化起了重大作用。已硬化的混凝土表面受到了空气中二氧化碳作用，使氢氧化钙逐渐变化，生成硬度较高的碳酸钙，这就是混凝土的碳化现象，其化学反应方程式如下：



通常情况下碳化可以是混凝土的强度有所增长，会使混凝土的表面硬度增加。混凝土碳化对回弹法测强有显著的影响，因为碳化使混凝土表面硬度增加，回弹值增大，但对混凝土强度影响相对较小。不同的碳化深度对其影响不一样，对不同强度等级的混凝土，同一碳化深度的影响也有差异。

影响混凝土表面碳化速度的主要因素是混凝土的密实度和碱度以及构件所处的环境条件。一般讲，密实度差的混凝土，孔隙率大，透气性好，易于碳化；碱度高的混凝土氢氧化钙含量多，硬化后与空气中的二氧化碳作用生成碳酸钙的时间就长，亦即碳化速度慢。

此外，混凝土所处环境的大气二氧化碳浓度及周围介质的相对湿度也会影响混凝土表面碳化的速度。一般在大气中存在水份的条件下，混凝土碳化速度随着二氧化碳浓度的增加而加快，当大气的相对湿度为 50%左右时，碳化速度较快。过高的湿度如 100%，将会使混凝土孔隙充满着水、二氧化碳不易扩散到水泥石中，或者水泥石中的钙离子通过水扩散到表面，碳化生成的碳酸钙把表面孔隙堵塞，所以碳化作用不易进行。过低的湿度如 25%，孔隙中没

有足够的水使二氧化碳生成碳酸，碳化作用也不易进行。随着硬化龄期的增长，混凝土表面一旦产生碳化现象后，其表面硬度逐渐增高，使回弹值与强度的增加速率不等，显著的影响了“ $f_{cu}$ —R”关系，国内外的研究资料都得出了共同结论。

消除碳化对回弹法检测混凝土强度的影响方法，国内外并不相同。国外通常采用磨去碳化层或不允许对龄期较长的混凝土进行测试。

对于三年内不同强度的混凝土，虽然回弹值随着碳化深度的增长而增大，但当碳化深度达到某一数值时，如大于等于 6mm，这种影响作用基本不再增长。当把碳化深度作为回弹测强公式的另一个参数时，对此应予考虑和处理。原《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ23-85 及修订后的规程中所列的统一测强曲线，规定对大于 6mm 的碳化深度值均按 6mm 处理。

## 第六节 混凝土的异常碳化

混凝土的碳化对回弹法检测混凝土强度有很大的影响，我们通过实验数据回归的测强曲线方程可以看出，当碳化深度由 0 增加到 6mm 时，因碳化而引起的混凝土强度折减系数最高可达 40%。

但是，在实际的工程检测过程中，我们往往会发现，有许多混凝土会出现异常的碳化现象。有的工程混凝土生产条件一致、强度等级相同、龄期相近，而碳化深度却相差很大。不同的构件如：混凝土的梁、板、柱、墙的碳化深度也相差很大。西北电力工程质量检测中心针对西安市某工程出现的混凝土表面异常碳化，进行了深入的研究。该工程由两栋高层组成，分别由两个施工企业承建，由同一家混凝土生产企业供应混凝土，而其中的一家施工企业是混凝土供应企业的母公司。该工程在采用回弹法进行检测时，由混凝土公司的母公司施工的混凝土表面碳化深度很大，比另一家公司明显增大，尤其是混凝土剪力墙。

那么由同一家混凝土企业供应的同一强度等级的混凝土、由两个企业在完全相同的温度、湿度条件下施工的混凝土，为什么它们的表面碳化相差的那么大呢？从混凝土供应企业的角度分析，绝对不会给自己的上级企业供应的混凝土会比别的企业差。那么是什么原因导致混凝土的表面出现非常大的碳化差异呢？西北电力工程质量检测中心经过大量的模拟实验得到的实验结果如下：



在相同水灰比下，掺加外加剂的大流态混凝土和普通混凝土相比，单位用水量下降约10%。掺加外加剂的大流态混凝土和不掺加外加剂的大流态混凝土相比，单位用水量下降约20%。其碳化值也是三组试件中最小的。这说明，在相同水灰比，相同施工条件和养护条件下，混凝土单位用水量愈大，其碳化值愈高。在不同养护条件下，混凝土表面碳化值差异很大。各龄期碳化值显示，自然养护条件下的混凝土表面碳化程度，几乎是标准养护条件下混凝土表面碳化值的四倍。

在相同水胶比、相同养护条件下，以不参加任何掺合料的混凝土各龄期碳化值为基准。在相同坍落度状况下，掺加粉煤灰的混凝土表面碳化值略高。同时也证明，只要在规范允许掺量内，掺加粉煤灰对混凝土表面碳化反映无过大影响。

通过以上实验和现场调查得出的结论如下：

1. 在相同水胶比约束下，大流态混凝土和普通混凝土表面碳化程度近似。一般大流态混凝土均掺入高效减水剂或高效泵送剂，在相同水胶比下，用水量应小于普通混凝土，故碳化概率不会大于普通混凝土。

2. 按规定范围内掺入适量的粉煤灰，对混凝土表面碳化没有明显影响，若加入适量的带有微膨性质的超细掺合料，对混凝土表面碳化还具有一定的抑制作用。

3. 使用酸性脱膜剂，随着脱膜剂酸值增大混凝土表面失碱亦加快加大，该性质在 90 天以前尤为明显。虽然其对混凝土强度发展没有影响，但会给回弹检测工作带来一定的困扰。

4. 养护水平对混凝土表面碳化影响很大，特别是前期养护，养护较差的混凝土和养护较好的混凝土相比，不但同期碳化值相差 3—4 倍，抗压强度亦相差 30%左右。

通过以上事例我们可以看出异常碳化对于混凝土法检测混凝土的强度的影响是非常大的。

混凝土表面为什么会出现异常碳化呢？其主要原因是我们测量碳化深度的方法存在缺陷所致。前面我们讲到了混凝土的碳化是混凝土中水泥水化后产生的氢氧化钙和空气中的二氧化碳所发生的化学反应。我们目前测量碳化深度的方法，其实是利用酚酞的酒精溶液遇“碱”变红的原理而测量混凝土表面碳化的间接方法，而不是直接测量混凝土的碳化。通常情况下，这种测量方法是没有什么问题的。但是，当使用了酸性脱模剂；当混凝土没有很好养护，水泥没有充分水化时，混凝土的表面就缺少氢氧化钙，而不显碱性时，这种采用酒精酚酞测量碳化的方法就会出现很大的误差，严重的影响回弹法检测混凝土强度的精度。

现在工程建设中都强调使用大流动性混凝土，而大流动性混凝土中粉煤灰、矿渣粉等掺合料是必不可少的，而且一般参量都比较大，相对于不掺粉煤灰的混凝土，其中的碱度就较

低。众所周知掺合料加入混凝土中是靠水泥水化产生的“碱”的激发而发生二次水化的。如果没有足够的“碱”粉煤灰等掺合料就不会发生水化反应，也就不会产生强度。现在的高层建筑，使用大模板施工。为了节约成本，加快模板的周转率，一般在混凝土浇筑后 8-20 小时，剪力墙和柱子就开始松动模板拉杆螺栓或拆模。拆模后，由于立面墙面和柱子不好覆盖养护，洒水养护又不易存水，往往会使墙面和柱子养护不好，表面的混凝土中的水泥因为失水而不能充分水化，尤其是在气温较高、湿度较低的季节，对混凝土的外墙面影响最大。由于混凝土表面的水泥不能充分水化，因而就不能产生“碱”，不能使酚酞的酒精溶液变红，无法为粉煤灰二次水化提供必要的条件。当采用回弹法检测时，由于混凝土表面水泥没有充分水化而使回弹值变小、碳化深度变大，这双重作用使得回弹法推定的混凝土强度比混凝土的实际强度要低得多。这就是目前国内有些检测人员提出的“回弹法检测掺粉煤灰的混凝土墙板强度偏低”的主要原因之一。

如何避免和判断混凝土的异常碳化呢，一是采用中性或偏碱性的脱模剂，不用酸性脱模剂；二是加强脱模后混凝土的养护。按照《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的要求：1. 混凝土应在浇注完毕后的 12 小时以内加以覆盖并保湿养护；2. 采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥拌制的混凝土浇水养护时间不得少于 7 天；对于掺缓凝型外加剂或有抗渗要求的混凝土，养护时间不得少于 14 天；3. 浇水次数应能保持混凝土处于潮湿状态，使混凝土中的胶凝材料能够充分水化。

由于现在混凝土原材料、配合比、养护条件及环境的温度湿度等因素影响的多变性，对于混凝土的异常碳化的判断使一个十分复杂的问题，而混凝土的碳化对其检测结果又有着较大的影响，往往是检测结果引起较大的争议。所以，检测过程应该按照一定的检测工作经验来针对具体的检测对象来判别。国内有些学者对此进行了多年的研究，有的学者认为，对于龄期较短，碳化较大的混凝土可以采用砂轮打磨掉表面碳化层再检测；有的甚至提出可以不考虑碳化深度的影响。这些学术观点有待我们进行不断的验证和研究。严格地说，异常碳化的混凝土，其表面和内部状态已经不一致了，和我们制定测强曲线的条件已经有较大的差异，回弹法已经不能直接用于异常碳化的混凝土的检测，可以采用钻取混凝土芯样或同条件的混凝土试块进行修正。也可以对墙面或柱子进行加强养护，以促使混凝土的表面充分水化而提高表面硬度，增加“碱性”，减少和消除异常碳化的影响。

我们曾经在某工程检测时，发现混凝土墙和柱子龄期不长，但碳化很大。经施工单位用电热毯包裹柱子，浇水后，通电养护 7 天。待表面干燥后，再进行回弹法检测，其回弹值提高，表面碳化明显减少，混凝土强度推定值可以提高（10~20）%。

## 第七节 模板

使用吸水性模板例如木模时，会改变混凝土表层的水灰比，使混凝土表面硬度增大，但对混凝土强度并无显著影响。

中建四局建研院进行了钢、木模板对回弹法测强影响的专题研究。认为钢模及涂了隔离剂的刨光木模对混凝土的回弹值没有显著影响，钢、木模的平均回弹值与变异系数是基本一致的。

## 第八节 泵送混凝土

泵送混凝土掺入了泵送剂、掺合料，砂率增加、粗骨料粒径减少、浆体含量高、坍落度明显增大，另外泵送混凝土在搅拌、运输、输送、振捣、拆模、养护等方面，与非泵送混凝土也有着很大的差别。

2000 年浙江省建筑科学研究院根据全国部分省提供的碳化深度为（0~2.0）mm，抗压强度为（10~60）MPa 间的 15cm 立方体试件强度的试验数据共 529 组，按规程附录测区混凝土强度换算表得出的强度与实际试件破坏强度的误差见表 5-8。

表 5-8 采用普通混凝土回弹曲线测定泵送混凝土的误差

| 换算强度值 $f_{cu,i}^c$<br>(MPa) | 试件<br>数量 | 平均相对误差 (%)     |            |            | 相对标准差<br>(%) |
|-----------------------------|----------|----------------|------------|------------|--------------|
|                             |          | 平均相对<br>误差 (%) | 正偏差<br>(个) | 负偏差<br>(个) |              |
| ≤25.0                       | 84       | ±34.27         | 84         | 0          | 36.65        |
| 25.1~30.0                   | 75       | ±28.19         | 72         | 3          | 36.99        |
| 30.1~35.0                   | 88       | ±20.15         | 82         | 6          | 22.15        |
| 35.1~40.0                   | 106      | ±17.59         | 99         | 7          | 19.88        |
| 40.1~45.0                   | 69       | ±12.54         | 63         | 6          | 15.01        |
| 45.1~50.0                   | 51       | ±12.23         | 41         | 10         | 14.84        |
| 50.1~55.0                   | 54       | ±5.68          | 25         | 9          | 6.87         |
| 55.1~60.0                   | 22       | ±5.69          | 9          | 13         | 7.85         |
| 总 计                         | 529      | ±19.73         | 475        | 54         | 24.85        |

由表 5-8 看出，换算强度值  $f_{cu}^c$  越低，误差越大，且正偏差据多，负偏差较少，实际抗

压强度值  $f_{cu}$  普遍高于换算强度值  $f_{cu}^c$  当  $f_{cu}^c$  在 50MP a 以上时，正负偏差差异减小，误差相对也较小，能满足《规程》测强曲线要求，因此要减小回弹测强误差，必须设立修正值。

表 5-9 泵送混凝土的强度修正值

| 碳化深度值（mm）           | 换 算 强 度 值（MPa）                     |       |      |           |           |
|---------------------|------------------------------------|-------|------|-----------|-----------|
| d <sub>m</sub> =0   | f <sub>cu</sub> <sup>c</sup> （MPa） | ≤40.0 | 45.0 | 50.0      | 55.0～60.0 |
| d <sub>m</sub> =0.5 | K（MPa）                             | +4.5  | +3.0 | +1.5      | 0.0       |
| d <sub>m</sub> =1.0 |                                    |       |      |           |           |
| d <sub>m</sub> =1.5 | f <sub>cu</sub> <sup>c</sup> （MPa） | ≤30.0 | 35.0 | 40.0～60.0 |           |
| d <sub>m</sub> =2.0 | K（MPa）                             | +3.0  | +1.5 | 0.0       |           |

2010 年对回弹规程进行第三次修订时，对泵送混凝土的实验数据进行了单独的回归分析，混凝土的龄期从 14 天到 1000 天，碳化深度从 0 到 6 毫米。通过对已取得的泵送混凝土全国各地 9843 个实验数据，分别进行了幂函数和指数函数的回归分析比较。

幂函数曲线方程为：

$$f = 0.034488R^{1.9400}10^{(-0.0173d)}$$

其强度误差值为：平均相对误差（ $\delta$ ）±13.89 %；相对标准差（ $e_r$ ）17.24 %；关系数(r)：0.878。

回归的指数方程为：

$$f = 5.1392e^{(0.0535R-0.0444d)}$$

其强度误差值为：平均相对误差（ $\delta$ ）±14.31 %；相对标准差（ $e_r$ ）17.69 %；相关系数(r)：0.870。

通过分析比较，幂函数曲线方程的误差较小，相关系数较好，也是大家常用的回归曲线方程，所以，采用幂函数曲线方程为泵送混凝土的测强曲线方程。该曲线方程与全国部分地方曲线方程相比：

|         |                |                     |
|---------|----------------|---------------------|
| 陕西省     | 回弹值 17.0～ 48.6 | 强度值(MPa) 10.0～ 59.8 |
| 山东省     | 回弹值 20.6～ 45.8 | 强度值(MPa) 9.8～ 60.1  |
| 浙江省（碎石） | 回弹值 18.2～ 47.6 | 强度值(MPa) 13.1～ 59.9 |
| 浙江省（卵石） | 回弹值 20.0～ 48.0 | 强度值(MPa) 10.3～ 60.0 |
| 辽宁省     | 回弹值 20.0～ 54.8 | 强度值(MPa) 10.0～ 60.0 |
| 北京市     | 回弹值 20.0～ 50.0 | 强度值(MPa) 10.9～ 60.1 |

|       |                |                      |
|-------|----------------|----------------------|
| 唐山市   | 回弹值 20.0~ 47.6 | 强度值 (MPa) 14.5~ 60.0 |
| 成都市   | 回弹值 35.0~43.6  | 强度值 (MPa) 31.9~ 60.2 |
| 温州市   | 回弹值 27.0~ 47.2 | 强度值 (MPa) 17.4~ 60.2 |
| 焦作市   | 回弹值 18.6~ 46.6 | 强度值 (MPa) 10.0~ 59.5 |
| 宁夏自治区 | 回弹区间 21.0~46.2 | 强度区间(MPa)11.2~60.3   |
| 本次的行标 | 回弹值 18.6~ 46.8 | 强度值 (MPa) 10.0~ 60.0 |

从以上全国部分地方混凝土的测强曲线我们可以看出：在混凝土抗压强度区间（10~60）MPa 范围内，各地的测强曲线中回弹值既有一定的差异，同时又比较接近，这就充分说明了本次修订的泵送混凝土的测强曲线具有广泛的适应性和可靠性。

## 第九节 高强混凝土的检测

随着建筑技术的发展，高强混凝土的应用也在不断地增加，通常把强度等级大于或等于 C60 的混凝土称为高强混凝土。已有文献资料表明和实验研究表明，大能量回弹仪的研制是解决检测高强混凝土的前提。当前国内已研制的大能量回弹仪主要有：山东乐陵回弹仪厂生产的 ZC1 型回弹仪、天津建筑回弹仪有限公司生产的 HT-1000 型回弹仪、中国圣艾斯研制的 GHT 450 型回弹仪，其基本原理完全一致，外观、内部结构等与中型回弹仪基本一致，主要性能参数对比如下表：

几种主要高强混凝土回弹仪参数对比

表 5-10 高强回弹仪主要参数

| 回弹仪型号        | ZC1 | GHT450 | HT1000 |
|--------------|-----|--------|--------|
| 标准能量(J)      | 5.5 | 4.5    | 9.8    |
| 弹击拉簧冲击长度(mm) | 100 | 100    | 140    |

在回弹仪的选择上，既要考虑其能量能满足检测精度的要求，又要考虑现场适用。若能量太小则不能反映高强混凝土的差别，若能量太大则现场操作困难，失去了回弹仪体积小、重量轻、方便灵活的特点。同时，为了便于检测技术的推广，还要考虑所有回弹仪在市场上的供应情况。

2010 年在修订回弹法规程时，对高强混凝土的回弹法检测进行了广泛的应用研究，取得了一定的实验成果。这次高强混凝土试验选用标称能量为 5.5J 的回弹仪，主要考虑：一是我国贵州、福建、山东、陕西、云南、浙江、江苏等地都是采用该能量的回弹仪制定或正

在制定地方标准，而编制组成员大多是这些标准的主要负责人，便于应用已有的实验数据；二是山东乐陵回弹仪厂是国内最大的回弹仪专业生产厂，又是编制组成员，5.5J 的回弹仪已取得国家计量器具生产许可证（CMC、编号鲁（制）24000001 号）并批量供应市场，性能相对稳定；三是 5.5J 的回弹仪相对能量较大，使得回弹值容易拉开，能提高检测精度。

标称能量为 9.8J 的回弹仪能量太大，回弹仪笨重，人们操作时太费力，很不方便，所以未采用，也未进行相关的实验研究。

标称能量为 4.5J 的回弹仪，因市场上应用的较少。本着节约资源，减少重复实验的原则，这次实验未考虑该种型号的回弹仪。

这次实验共取得全国各地高强混凝土实验数据 4313 个，按照最小二乘法的原理，通过对实验数据的回归而得到：

幂函数曲线方程为：

$$f = 2.51246R^{0.889}$$

其强度误差值为：平均相对误差（ $\delta$ ） $\pm 5.398\%$ ；相对标准差（ $e_r$ ） $6.665\%$ ；相关系数（ $r$ ）： $0.833$

指数函数方程为：

$$f = 27.1427e^{(0.0222R)}$$

其强度误差值为：平均相对误差（ $\delta$ ） $\pm 6.096\%$ ；相对标准差（ $e_r$ ） $8.026\%$ ；相关系数（ $r$ ）： $0.733$

二次抛物线方程为：

$$f = 18.97 + 0.9519R + 0.0059R^2$$

其强度误差值为：平均相对误差（ $\delta$ ） $\pm 6.090\%$ ；相对标准差（ $e_r$ ） $7.968\%$ ；相关系数（ $r$ ）： $0.764$

通过分析比较，幂函数的相惯性较好，误差较小。将其与全国部分地方高强混凝土测强曲线方程的比较：

|             |                |                    |
|-------------|----------------|--------------------|
| 陕西省（幂函数）    | 回弹值 34.9～ 48.5 | 强度值(MPa) 60.1～80.1 |
| 福建省（幂函数）    | 回弹值 35.2～ 48.5 | 强度值(MPa) 60.0～80.1 |
| 贵州省（指数函数山砂） | 回弹值 35.0～ 41.0 | 强度值(MPa) 60.0～80.0 |
| 山东省（幂函数）    | 回弹值 36.0～ 52.4 | 强度值(MPa) 59.8～79.9 |
| 云南建科院（抛物线）  | 回弹值 33.9～ 46.6 | 强度值(MPa) 60.1～77.4 |
| 青岛（幂函数）     | 回弹值 35.4～49.2  | 强度值(MPa) 59.5～80.0 |
| 上海（指数函数）    | 回弹值 35.5～44.0  | 强度值(MPa) 60.0～80.0 |
| 本次实验（幂函数）   | 回弹值 35.5～ 48.8 | 强度值(MPa) 60.0～79.6 |

从以上全国部分地方混凝土的测强曲线我们可以看出：在混凝土抗压强度区间（60.1～80）MPa 范围内，各地的测强曲线中回弹值既有一定的差异，同时又比较接近，这就充分说明了本次回归的高强混凝土的测强曲线具有广泛的适应性和可靠性。

原计划将高强混凝土的强度检测列入这次修订的回弹法规程，但由于该部分内容与 2002 年建设部计划编制的《高强混凝土强度检测技术规程》中的回弹法部分在选用回弹仪时不一致。因而在试验方案，回归曲线等内容上存在一定的差距。为此，住房和城乡建设部建筑工程标准技术归口管理单位于 2009 年召开了两个编制组的协调工作会议。会议经过各方的努力，达成了一致意见，形成了会议纪要。要求两个编制组共同组成工作组，开展两种不同回弹仪的精度比对实验研究，以期达到共识。但双方一直未能在比对方案上取得一致意见，故这次的回弹法规程未能将高强混凝土的测强曲线方程列入其中。高强混凝土的检测各地可以依据回弹法的基本原理，自行制定各地的地方测强曲线。

### 第十节 其它

混凝土的分层泌水现象，使一般构件底部石子较多，回弹值读数偏高；表层因泌水，水灰比略大，面层疏松，回弹值偏低。国外资料介绍，试件表面通常较两侧的回弹值低（5～10）%，而底部则较两侧高（10～20）%。因此，测试时要尽量选择构件浇筑的侧面，如不能满足，可根据不同的测试面和回弹值制成的相应表格进行修正。

钢筋对回弹值的影响视混凝土的保护层厚度、钢筋的直径及其密集程度而定。研究资料表明，当保护层厚度大于 20mm 时，可以认为没有影响；当钢筋直径为  $\phi$ （4～6）mm 时，可以不考虑它的影响。

粉煤灰参量的影响：浙江省金华市建筑材料试验所有限公司研究发现，当粉煤灰单掺量在 35%～50%时的测强误差明显大于掺量在 10%～15%时的误差，负误差个数也明显多于正误差，说明混凝土回弹换算强度高于试块混凝土抗压强度，致使混凝土回弹换算强度偏大，详见表 5-12。浙江省建筑科学设计研究院有限公司和杭州交工混凝土公司，对粉煤灰单掺量在 25%时的泵送混凝土试块进行验证试验，共试验 27 组数据，平均相对误差为±10.08%。因此本规程规定粉煤灰单掺量不大于 30%。

表 5-12 粉煤灰掺量对回弹测强的影响

| 粉煤灰掺量     | 粉煤灰掺量 35%～50%<br>强度在(13-60)MPa 之间 | 粉煤灰单掺量<br>25% | 粉煤灰掺量 10%～15%<br>强度在(13～60)MPa 之间 |
|-----------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| 平均相对误差（%） | ± 14.28                           | ± 10.17       | ± 10.82                           |

|          |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|
| 相对标准差（%） | 17.01 | 13.08 | 13.22 |
| 负误差（个）   | 59    | 19    | 229   |
| 正误差（个）   | 13    | 8     | 153   |

但在实际的工程检测中，往往由于混凝土浇水养护不充分，导致粉煤灰掺量较大的混凝土表面混凝土失水，使表面水化不充分。测量碳化深度时，“碳化”较大，从而导致回弹法检测粉煤灰掺量较大的混凝土时强度偏低。

此外，测试时的大气温度、构件的曲率半径、厚度和刚度以及测试技术等对回弹法测强均有程度不同的影响，在实际检测工作中应予以注意和考虑。

## 第七章 回弹法测强曲线的建立

回弹法测定混凝土的抗压强度，是建立在混凝土的抗压强度与回弹值之间的关系具有一定的规律性的基础上的，这种关系可用相关曲线来表示。以这种相关曲线的要求是在满足测定精度要求的前提下，应尽量简单方便实用。我国幅员广大，地域辽阔，各地的原材料、气候条件、混凝土的施工水平相差很大，而这些差异对回弹法检测混凝土强度是有很大的影响，尤其是对混凝土表面碳化深度的影响更大。因此，采用一条全国统一的测强曲线时很难满足不同地区的需要。各地在建立和选择相关曲线时应根据不同的条件及要求，选择适合自己实际工作需要的类型。

### 第一节 测强曲线的分类及型式

我国的回弹法测强相关曲线，根据曲线制定的条件及使用范围分为以下三类表 6-1 各类测强曲线的适应范围

| 名称 | 相 关 曲 线                                        |                                                |                                                        |
|----|------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|    | 统一曲线                                           | 地区曲线                                           | 专用曲线                                                   |
| 定义 | 由全国有代表性的材料、成型、养护工艺配制的混凝土试块，通过大量的破损与非破损试验所建立的曲线 | 由本地区常用的材料、成型、养护工艺配制的混凝土试块，通过较多的破损与非破损试验所建立的曲线。 | 由与结构或构件混凝土相同的材料、成型、养护工艺配制的混凝土试块，通过一定数量的破损与非破损试验所建立的曲线。 |



|      |                                                      |                                                      |                                                      |
|------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 适用范围 | 适用于无地区曲线或专用曲线时检测符合规定条件的构件或结构混凝土强度。                   | 适用于无专用曲线时检测符合规定条件的构件或结构混凝土强度。                        | 适用于检测与该结构或构件相同条件的混凝土强度。                              |
| 误差要求 | 测强曲线的平均相对误差 $\leq \pm 15\%$ ，相对标准差 $\leq \pm 18\%$ 。 | 测强曲线的平均相对误差 $\leq \pm 14\%$ ，相对标准差 $\leq \pm 17\%$ 。 | 测强曲线的平均相对误差 $\leq \pm 12\%$ ，相对标准差 $\leq \pm 14\%$ 。 |

回归方程可以是幂函数、指数函数、二次抛物线、直线方程等。回归时主要按照误差大小和相关系数确定回归方程的形式。实验数据可以采用微软的 Microsoft Excel 软件进行回归分析。

必须指出，在建立相关曲线时，混凝土试块的养护条件应与被测构件的养护条件相一致或基本相符，不能采用标准养护的试块。因为回弹法测强，往往是在缺乏标养试块或对标养试块强度有怀疑的情况下进行的，并且通过直接在构件上测定的回弹值、碳化深度值推定该构件在测试龄期时的实际抗压强度值，因此，作为制订回归议程式的混凝土试块，必须与施工现场或加工厂浇筑的构件在材料质量、成型、养护、龄期等条件基本相符的情况下制作。

## 第二节 专用测强曲线

### 1. 制订方法

#### (1) 试块成型

- ① 采用与被测结构或构件相同的原材料，若掺有外加剂，其外加剂的品种和用量也应相同。
- ② 根据最佳配合比原则，设计五个以上强度等级的混凝土配合比。
- ③ 采用与被测结构或构件相同的浇捣工艺，每一强度等级的混凝土成型  $150 \times 150 \times 150\text{mm}$  立方体试块 2 组（1 组供龄期的前限试压，另一组供龄期后限试压，每组 3 块）。一个龄期五个强度等级混凝土的试块共 10 组，全部试块宜在同一天内成型完毕。
- ④ 在成型后的第二天将试块移至与被测结构相同的硬化条件下养护至规定龄期；试块的拆模日期宜与构件的拆模日期相同。试块在自然养护过程中应按“品”字形

堆放，并使试块的底面向下，表面向上，四个侧面（与试模侧板相邻的一面）均能接触空气。堆放于室外的试块应避免暴晒或雨淋。

## （2）试块测试

采用专用测强曲线测试时，对龄期的要求并不十分严格。每一龄期的前、后限可根据被测结构或构件要求的可能变动范围和测定误差的要求来确定。一般前、后限规定为其龄期的 10% 左右，例如 28 天龄期的前、后限为 25 天～31 天，此外龄期的前限不宜早于结构或构件成型后 14 天。

① 将到达龄期前限或后限的每一强度等级 1 组，五个强度等级共 5 组的试块表面擦抹干净；以试块与试模侧板相接触的两个表面置于压力机上下两承压板之间，加压 30kN～80kN（低强度试块取低吨位加压）。

② 在试块保持（30～80）kN 的压力下，用符合标准状态的回弹仪按规定的操作程序，在试块两个相对侧面上选择均匀分布的 8 个点进行弹击，测读每点的回弹值至 1，点与点之间、点与试块边缘之间的距离不小于 30mm，并不得弹击在外露石子和气孔上。

③ 在每一试块的 16 个回弹值中分别剔除其中 3 个最大值和 3 个最小值，然后再求余下的 10 个回弹值的平均值，计算至 0.1，即得该试块的平均回弹值。

④ 将试块加荷直至破坏，然后计算试块的抗压强度  $f_{cu}$  (MPa) 准确至 0.1MPa。

## 2. 说明

（1）专用测强曲线仅适用于在它建立时用以统计试块的最大和最小回弹值区间，及强度区间、龄期区间、养护成型方式相同的范围内，不得外推，为方便起见，可制成表格使用。

（2）应定期取一定数量的同条件试块对专用测强曲线进行校核，发现有显著差异时，应查明原因措施，否则不得继续使用。

## 第三节 统一测强曲线

第一版的回弹法统一测强曲线采用了全国十二个地区、省、市共 2000 余组基本数据（每组数据为  $f_{ci}$ ， $m_R$ ， $m_d$ ），经计算了 300 多个回归方程后，按照既满足测定精度要求，又方便使用、适应性强的原则进行选定。

### 1、方程形式及误差

统一曲线的回归方程形式为

$$f_{cu,i} = Am_R^B \times 10^{cm_d} \quad (6-10)$$

公式中的  $m_\delta = \pm 14.0\%$ ， $e_r = 18.0\%$ 。

能满足一般建筑工程对混凝土强度质量非破损检测平均相对误差不大于  $\pm 15\%$  的要求。其相对误差基本呈正态分布。

## 2. 特点

统一测强曲线可以不按材料品种分别计算成多条曲线，同样能满足误差要求。这就说明这条测强曲线所包含的材料品种的差别对回弹测强影响不大。计算时，曾对同批数据用同一形式回归方程分别按材料品种（主要是卵石、碎石和不同水泥品种）分类及全部组合计算，结果是各类公式精度相差不大，并未发现因按材料品种分类而使用精度有较大幅度提高的情况，现将按骨料品种分类计算及合并计算的对比误差情况列表如下：

表 6-2 不同曲线方程的误差分析

| 公 式 形 式                                        | 碎 石        |       | 卵 石        |       | 全 部        |       |
|------------------------------------------------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|                                                | $m_\delta$ | $e_r$ | $m_\delta$ | $e_r$ | $m_\delta$ | $e_r$ |
| $f_{cu,i}^c = Am_R + B\sqrt{m_d} + C$          | 13.66      | 18.16 | 14.79      | 19.01 | 14.29      | 18.75 |
| $f_{cu,i}^c = Am_R^a \cdot m_d^b$              | 13.89      | 17.66 | 15.56      | 18.96 | 14.65      | 18.60 |
| $f_{cu,i}^c = Am_R + Bm_d + CH + D$            | 12.97      | 17.26 | 14.47      | 18.48 | 13.88      | 18.23 |
| $f_{cu,i}^c = Am_R + B\sqrt{m_d} + C\ln H + D$ | 13.60      | 18.30 | 14.68      | 18.75 | 14.29      | 18.77 |
| $f_{cu,i}^c = (Am_R + B) \times 10^{cm_d}$     | 13.21      | 17.98 | 15.23      | 18.64 | 13.61      | 17.28 |
| $f_{cu,i}^c = Am_R^B \times 10^{cm_d}$         | 13.50      | 17.18 | 14.88      | 18.21 | 14.00      | 18.00 |

式中  $f_{cu,i}^c$  ——由回归方程算出的混凝土强度值；

$m_R$  ——试块的平均回弹值；

$m_d$  ——试块的平均碳化深度值；

$H$  ——试块的龄期；

$m_{\delta}$ ——回归方程的混凝土强度平均相对误差；

$e_r$ ——回归方程的混凝土强度相对标准差；

我国地域辽阔，各地区气候环境差异较大，欲以一条统一测强曲线作为回弹法的测强曲线，采用  $m_R$ 、 $m_d$  两个自变量是较合适的。今后随着湿度影响研究的深入，也可考虑在公式中再增加湿度自变量，或作为修正系数加以修正，以进一步提高测试精度并扩大公式应用范围。

为了提高测试精度，我们认为凡有条件建立地区曲线或已建立地区曲线的，最好使用本地区曲线。

## 第八章 检测技术及数据处理

### 第一节 检测准备

检测前应全面的、正确的了解被测结构或构件的情况。检测前一般需要了解：

工程名称及设计、施工和建设单位名称；结构或构件名称、外形尺寸、数量及混凝土设计强度等级；水泥品种、安定性、强度等级；砂、石种类、粒径；外加剂；掺合料品种、掺量；施工时材料计量情况等；模板、浇筑及养护情况等；成型日期；配筋及予应力情况；结构所处环境条件及存在的问题。其中以了解水泥的安定性合格与否最为重要，若水泥的安定性不合格，则不能采用回弹法检测，有些原材料及施工资料是为了检测完毕，分析质量问题用的。

对于比较重要、比较复杂的混凝土结构工程还应该制定比较详细的抽样和检测方案。

一般检测混凝土结构或构件有两类方法，视测试要求而择之。一类是单个构件检测，另一类是按批量抽样检测。

单个构件检测方法主要用于对混凝土强度质量有怀疑的独立结构（如现浇整体的壳体、烟囱、水塔、隧道、连续墙等）、单独构件（如结构物中的柱、梁、屋架、板基础等）和有明显质量问题的某些构件。

批量抽样检测主要用于在相同的生产工艺条件下，强度等级相同、原材料和配合比基本一致且龄期相近（指同批构件浇筑龄期前后相差不超过 15%）的同类混凝土构件。需要强调的是：在一栋建筑物中，梁、板、柱、墙即就是强度等级相同也不能称为同类构件。梁应该是一类，板、柱和墙又属于另一类构件，不可把它们当做一类构件。被检测的构件应抽取不

少于同类结构件总数的 30%并且构件数量不得少于 10 件。这就是说抽取构件数的 30%如果少于 10 件时，也按 10 见抽取。抽检构件时，应随机抽样并使所选构件具有代表性。抽样时，这里给出的是最小抽样数量，有时为了防止低强度构件被漏抽，还可以增加抽样数量，增加测区数量。

## 第二节 检测方法

选择好了被检测的混凝土结构或构件情况后，需要在构件上选择及布置测区。所谓“测区”系指每一试样的测试区域，每一测区相当于该试样同条件混凝土的一组试块。《回弹法规程》规定，取一个结构或构件作为检测混凝土强度的最小单元。一般要取 10 个测区，但对某一方向尺寸小于 4.5m 且另一方向尺寸小于 0.3m 的小构件，其测区数量可适当减少，但不应少于 5 个。测区的面积宜为  $0.04\text{m}^2$ 。测区表面应清洁、平整、干燥，不应有接缝、疏松层、饰面层、粉刷层、浮浆、油垢、蜂窝麻面等。必要时可采用砂轮清除疏松层和杂物。

测区宜均匀布置在构件或结构的检测面上，相邻测区间距不宜过大，当混凝土浇筑质量比较均匀时可酌情增大间距，但不宜大于 2m；构件的受力部位及易产生缺陷部位（如梁与柱相接的节点处）须布置测区；测区优先考虑布置在混凝土浇注的侧面（与混凝土浇注方向相平行的贴模板的一面），这样和制定测强曲线时的实验法一致。另外混凝土的侧面强度可以代表混凝土的实际强度。

如果测区无法布置在浇注面的侧面时，也可以选在混凝土浇注的表面或底面。这时需要对不同的测试面进行修正，把它们修正到相当于浇注面的侧面。但是，我们必须清楚：检测过程每进行一次修正都会带来新的误差。因此，应该尽量减少测试面和测试角度的修正。

另外，测区还须避开位于混凝土内保护层附近的钢筋和埋入铁件，这样可以减少预埋件对回弹值的不利影响。对于体积小、刚度差的构件，应设置支撑加以固定，如果不进行支撑，刚度较小的构件就会产生颤动而影响回弹值。

按上述方法选取试样和布置测区后，先测量回弹值。测试时回弹仪应始终与测试面相垂直，不得倾斜，不得在气孔和石子上弹击。如果已弹击在气孔上，这时的回弹值明显偏低；若弹在石子上，回弹值会明显偏高，不能反映混凝土表面的实际硬度，则这些数据应该删除，不能计入每一测区的 16 点中。同一测点只能弹击一次，因为每弹击以后，被弹击处的混凝土已经产生了部分塑性变形或者表面已经破损，而在此弹击时就不是原来的混凝土表面了。回弹时测点尽可能在测区范围内均匀分布，测点和测点之间的距离一般不小于 20mm，测点距构件边缘或外露钢筋、预埋件的间距一般不小于 30mm。每一测点的回弹值估读至 1，数字

式回弹仪可以精读至 0.1。

美国材料试验协会《硬化混凝土回弹值检测方法》ASTM C805-08 规定，回弹值测定 10 点；英国标准《结构混凝土检测 第 2 部分—无损检测—回弹值的测定》BS EN 12504-2: 2001 和国际标准化组织《回弹值的测定》ISO 1920-7: 2004 (E) 规定，规定回弹值测定 9 个点。

我国个点回弹值测定取 16 个点，计算时，舍弃 3 个大值和 3 个小值，剩下 10 个值取算术平均值，作为该测强混凝土构件的回弹值。这与其他标准有所不同，陕西省建筑科学研究院曾分别在每个测区弹击 10 点，不舍弃大、小值，取其 10 点平均值；在测区弹击 14 点，舍弃 2 大值、2 小值后，取余下 10 点平均值；在测区弹击 16 点舍弃 3 大值、3 小值取余下 10 点平均值。把三次试验数据作一统计计算，它们的离散系数分别是：0.097、0.064、0.047，以 16 点弃 3 大、3 小值后取余下 10 点平均值为最好。所以我们国家的标准规定测强应该弹击 16 个点。

回弹值测量完毕后，应选择不少于构件测区数的 30%，在有代表性的测区位置上测量碳化深度值。需要提醒的是，碳化深度必须在回弹的测区内测取，可以取其平均值为该构件每测区的碳化深度值。

但是，当测取碳化深度的最大值和最小值的差大于 2.0mm 时，这时说明该构件的碳化不均匀，就应该在每个测区分别测量碳化深度值。测量构件的碳化深度值时，可用钢錾子或其它工具在测区表面凿成直径约为 15mm 的孔洞，孔洞的深度应该大于碳化深度值，可用橡皮球或其它工具清除孔洞中的粉末和碎屑，不能用液体冲洗孔洞，以避免造成孔洞中酸碱度的变化。接下来用 1%~2% 的酚酞酒精溶液滴在混凝土孔洞内壁的边缘处，当已碳化与未碳化界线清楚时，再用碳化深度测量仪，测量已碳化与未碳化混凝土交界面至混凝土表面的垂直距离，连续测量 3 次，每次可以读数精确至 0.25mm，把三个值计算平均值，精确至 0.5mm，该平均值即为该测区的碳化深度值。

需要进一步说明的是测量碳化深度的工具应该是碳化深度测量仪，该仪器是一个位移放大器，它把测得的碳化深度显示值放大了 10 倍，以便观察。不仅可以垂直测量碳化深度值，又可以在混凝土孔洞的斜面上准确测量碳化深度。相比于采用游标卡尺及其它测量工具，用碳化深度测量仪要方便、准确。

### 第三节 数据处理

现场测试完毕，即进入数据处理过程。

#### 一、回弹值的计算

当回弹仪水平方向测试混凝土浇筑侧面时，应从每一测区的 16 个回弹值中剔除其中 3 个最

大值，取一位小数。

## 二、非水平方向检测时回弹值的修正

由于回弹法测强曲线是根据回弹仪水平方向测试混凝土试件侧面的试验数据计算得出的，因此当测试中无法满足上述条件，需要倾斜一定角度进行检测，这时就需要对测得的回弹值进行测试角度的修正。

由于回弹仪弹击锤的作用，当回弹仪非水平方向测试时，它与水平方向测试的关系，可通过近似方法推导出的公式对回弹值予以修正。

由于弹击锤的重力作用，当回弹仪向上测试时，测得的回弹值偏高，向下测试时，测得的回弹值偏低，这两种情况均需乘一个小于或大于 1 的修正系数。

因此，当回弹仪非水平方向测试时，应将测得的回弹值  $R_a$  按角度  $\alpha$  修正至水平测试时的回弹值，其修正值可由表 7-1 查得。

首先将非水平方向测试混凝土浇筑侧面时的数据参照公式 (7-1) 计算测区平均回弹值  $m_{R_a}$ ，再根据回弹仪轴线与水平方向的角度  $\alpha$  (见图 7-1) 按表 (7-1) 查出其修正值，按下式换算为水平方向测试时的测区平均回弹值。

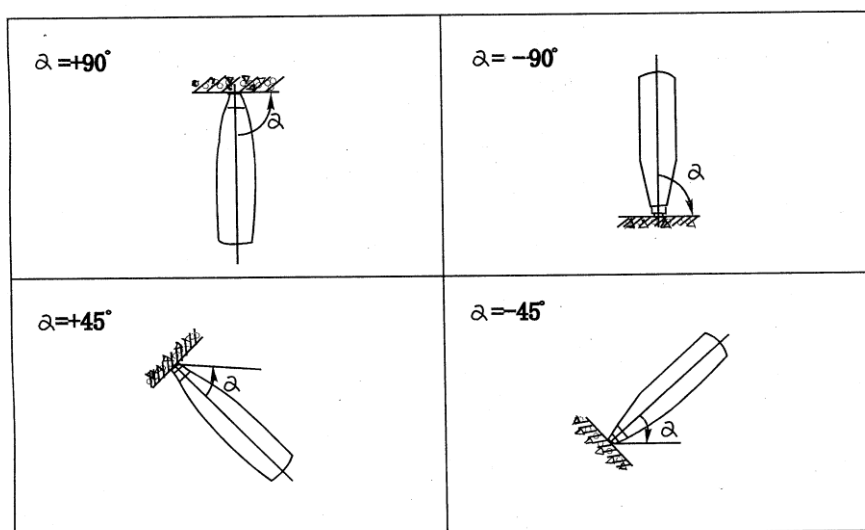


图 7-2 测试角度示意图

## 三、混凝土不同浇注面回弹值的修正

混凝土浇注面的底面、表面和侧面的力学性能都有一定的差异，往往表面的混凝土强度较低，硬度较小；底面由于石子下沉，水上浮，表面硬度较大，强度也较高。所以，当回弹仪无法水平方向测试混凝土浇筑的侧面时，例如，混凝土路面和混凝土框剪结构的楼板，已经无法检测混凝土浇筑面的侧面，只能检测浇筑面的底面或表面，这时应将测得的数据参数

进行修正。

(2) 表中有关混凝土浇筑表面的修正系数，是指一般原浆抹面的修正值；

(3) 表中有关混凝土浇筑底面的修正系数，是指构件底面与侧面采用同一类模板在正常浇筑情况下的修值；

#### 四、非水平方向检测混凝土非浇筑面的侧面回弹值的修正

在实际的工程质量检测中，我们经常会遇到非水平方向检测混凝土的非浇筑面的侧面，例如，混凝土楼板、预制屋架等构件。如果回弹仪向上检测混凝土板的底面或向下检测混凝土板的表面，这时都要对其同时进行测试角度和测试面的两次修正。

修正的顺序和方法是：先对回弹值进行测试角度修正，该值相当于水平检测混凝土的回弹值。然后得到混凝土不同浇筑面的修正值。经过两次修正就得到了相当于水平方向检测混凝土浇筑面的侧面的回弹值。需要特别强调的是，在进行两次修正时一定要注意修正的顺序，及先进行测试角度的修正然后再进行测试面的修正，两者的修正顺序不可颠倒。

#### 五、回弹值修正的探讨

众所周知，混凝土是由水泥、砂子、石子、水、外加剂和掺合料组成的一种非匀质的复合材料，即就是在标准试验条件下，其各向力学性能差异也较大，而混凝土在实际的施工过程中由于其原材料、配合比、搅拌、运输、浇注、振捣、收面、养护等方面的差异，会是混凝土各向力学性能产生更大的差异。混凝土浇注后，由于石子下沉，水和掺合料上浮，使得表面的水胶比大，强度低。对于大流动性的泵送混凝土来说，如果产生过震，这种现象表现的更加明显，混凝土的表面会泌水，混凝土的强度会更低。因此，现在的不同浇筑面的修正方法也很值得商榷和探讨。

我国回弹规程给出的不同的测试角度和不同浇筑面的修正值是在五六十年代根据瑞士和罗马尼亚等国家资料的基础上得到的。现在大流动性的泵送混凝土的大量应用，这些修正值已很难适应大流动性混凝土。例如，混凝土路面，如果混凝土塌落度过大，震动时间过长，即混凝土过震时，表面水胶比会更大，甚至会出现表面泌水。混凝土凝结后表面会疏松、起砂。此时，采用回弹法检测混凝土表面，几乎没有强度。说明这种混凝土已经不适应回弹法检测了，因为回弹法的原理是建立在混凝土表面硬度与其抗压强度之间的关系而建立的测强曲线，它不适应表面和内部有明显差异的混凝土。所以，这次修订的规程中关于泵送混凝土的检测就取消了测试面和测试角度的修订。

那么，现实的泵送混凝土检测中有需要进行测试角度和测试面的修正将如何进行呢？对于这个问题的回答，一方面，还应该进行大量的实验研究，通过实验得到相关的实验数据，然后通过验证，证明是满足误差要求的，再将其列为修正值或修正系数。我们知道回弹法检测



混凝土抗压强度的方法是建立在实验数据回归分析基础上的经验公式。当年的测试角度和测试面的修正也是建立在分析研究和国外实验数据基础上的。由于泵送混凝土拌合物性能的多样化和复杂性，要像低坍落度的混凝土那样通过实验测试面的修正值困难还是比较大的，尤其是浇筑面表面的修正值。

下面是一组有关单位研究不同浇注面和不同检测角度的实验的照片，可供参考。



图 7-3 检测角度修正实验图

## 第九章 构件混凝土强度的计算

### 第一节 测区混凝土强度值确定

根据每一测区的回弹平均值  $m_R$  及碳化深度  $m_d$ ，可由专用曲线或地区曲线，或统一曲线编制的“测区混凝土强度换算表”查出或通过测强曲线方程计算得出，所查出或算出的强度值即该测区混凝土的强度换算值。（当强度高于  $60MP_a$  或低于  $10MP_a$  时，表中已无法查出，可记为  $f_{cu}^c > 60MP_a$  或  $f_{cu}^c < 10MP_a$  不可利用测强曲线公式外推，任意扩大测强区间）表中未列入的测区强度值可用内插法求得。

## 第二节 构件混凝土强度的计算

1. 由各测区的混凝土强度换算值可计算得出构件混凝土强度平均值,当测区数等于或大于 10 时,还应计算标准差。平均值及标准差应按下列公式计算:

$$m_{f_{cu}^c} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^c}{n} \quad (8-1)$$

$$S_{f_{cu}^c} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^c)^2 - n(m_{f_{cu}^c})^2}{n-1}} \quad (8-2)$$

式中  $m_{f_{cu}^c}$  ——构件混凝土强度平均值 (MPa), 需要说明的是, 在计算标准差时, 强度平均值应精确至 0.01MPa, 否则会因二次数据修约而增大计算误差。

$n$ ——对于单个测定的构件, 取一个构件的测区数; 对于按批量抽样检测的构件, 取所抽检构件试样测区数之和。

$S_{f_{cu}^c}$  ——构件混凝土强度标准差 (MPa), 精确至 0.1MPa。

这里需要强调的是, 当按照批量检测时, 强度标准差应该是所有测区的标准值。例如: 某工程按批量检测需要抽取 12 个构件, 每个构件布置 12 测区。计算强度标准差时, 就应该计算  $12 \times 12 = 144$  个测区的标准差, 而不是 12 个构件的标准差。

### 2. 构件混凝土强度推定值

(1) 当该构件测区数小于 10 个或者  $f_{cu}^c > 60\text{MPa}$  时, 因测区数量较少或无法求出平均值和标准差 ( $f_{cu}^c > 60\text{MPa}$  不是具体值), 混凝土的推定值可以取最小值即:

$$f_{cu,e} = f_{cu,min}^c \quad (8-3)$$

式中  $f_{cu,min}^c$  ——构件中最小的测区混凝土强度换算值。

(2) 当该构件的测区强度值中出现小于 10.0MPa 时, 在混凝土强度换算表中已无法查出具体的强度值, 只能给出其推定值小于 10MPa 即:

$$f_{cu,e} < 10.0\text{MPa} \quad (8-4)$$

(3) 当该构件测区数不少于 10 个或按批量检测时, 应按下列公式计算:

$$f_{cu,e} = m_{f_{cu}^c} - 1.645S_{f_{cu}^c} \quad (8-5)$$

3. 对于按批量检测的构件, 当该批构件混凝土强度标准差出现下列情况时:

(1) 当该批构件混凝土强度平均值小于 25MPa 时, 且  $S_{f_{cu}}^c > 4.5\text{MPa}$ ;

(2) 当该批构件混凝土强度平均值等于或大于 25MPa 时, 且  $S_{f_{cu}}^c > 5.5\text{MPa}$ 。

说明该批构件的匀质性较差, 混凝土强度不均匀。为了安全起见, 防止有些部位强度过低而漏测, 这批构件就不能按照批量检测, 应该对所有构件进行全部检测。

### 第三节 混凝土强度推定值与试块强度分析

我国现行标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 中, 对结构构件的混凝土强度是以标准养护试件, 按照《混凝土强度检验评定标准》GB/T50107 进行评定的。对于结构实体混凝土强度的检验, 是以同条件试件强度为检验依据的。同条件试块强度是指和混凝土构件处于相同的温度、湿度条件下的等效养护龄期的混凝土试块的抗压强度。我们知道《混凝土强度检验评定标准》GB/T50107 中采用混凝土强度标准值, 混凝土抗压强度标准值系指按标准方法制作和养护的边长为 150mm 的立方体试件, 在 28d 龄期, 用标准试验方法测得的混凝土抗压强度, 其总体分布中的一个值, 强度低于该值的概率为 5% (对矿物掺合料不少于胶凝材料总量 30% 的混凝土, 可采用设计规定的大于 28d 的龄期)。

回弹法检测混凝土强度的推定值是指相应于强度换算值总体分布中保证率不低于 95% 的构件中混凝土抗压强度值, 混凝土的龄期为检测时混凝土构件的龄期。那么混凝土强度的推定值与混凝土抗压强度标准值及同条件养护的混凝土试块强度值它们之间又有什么关系呢? 它的实际用途是什么呢?

为了找到现场检测混凝土强度与标准养护试块和自然养护试块强度之间的关系, 江苏省建筑科学研究院结构所进行了自然养护混凝土板、混凝土墙、混凝土试块取芯强度与自然养护试块及标准养护试块强度的对比试验, 其试验结果归纳如下:

一  $\phi 100 \times 100$  构件芯样强度与同条件自然养护试块强度对比:

| ①批号      | 龄期       | 芯样数 | $\phi 100 \times 100$ /自然养护<br>同条件试块 (平均) | 芯样的来源 |
|----------|----------|-----|-------------------------------------------|-------|
| 1#—9#    | 28d      | 45  | 1.014                                     | 砼板、墙  |
| 1#—9#    | 60d      | 45  | 0.925                                     | 砼板、墙  |
| 1#—9#    | 90d      | 36  | 0.871                                     | 砼板、墙  |
| 1#—3#    | 180d     | 6   | 0.930                                     | 砼板、墙  |
| 合计 1#—9# | 28d—180d | 132 | 0.941                                     | 砼板、墙  |

二 150×150 试块中取芯样强度与同条件自然养护试块强度对比

| ②批号      | 龄期       | 芯样数 | Φ 100×100/自然养护<br>同条件试块（平均） | 芯样的来源      |
|----------|----------|-----|-----------------------------|------------|
| 1#—7#    | 28d      | 36  | 0.979                       | 150×150 试块 |
| 1#—7#    | 60d      | 36  | 0.910                       | 150×150 试块 |
| 1#—6#    | 90d      | 36  | 0.872                       | 150×150 试块 |
| 1#—2#    | 180d     | 12  | 0.803                       | 150×150 试块 |
| 合计 1#—7# | 28d—180d | 120 | 0.909                       | 150×150 试块 |
| 总汇       | 28d—180d | 252 | 0.926                       | 板墙+试块芯样    |

三 Φ 100×100 构件芯样及 150×150 试块中取芯样强度与标准养护同龄期试块强度对比：

| ①批号      | 龄期       | 芯样数 | Φ 100×100/标准养护<br>同龄期试块（平均） | 芯样的来源 |
|----------|----------|-----|-----------------------------|-------|
| 1#—9#    | 28d      | 45  | 0.831                       | 砼板、墙  |
| 1#—9#    | 60d      | 45  | 0.807                       | 砼板、墙  |
| 1#—8#    | 90d      | 36  | 0.778                       | 砼板、墙  |
| 1#—3#    | 180d     | 6   | 0.839                       | 砼板、墙  |
| 合计 1#—9# | 28d—180d | 132 | 0.809                       | 砼板、墙  |

四 150×150 试块中取芯样强度与标准养护同龄期试块强度对比

| ②批号      | 龄期       | 芯样数 | Φ 100×100/标准养护<br>同龄期试块（平均） | 芯样的来源        |
|----------|----------|-----|-----------------------------|--------------|
| 1#—6#    | 28d      | 36  | 0.857                       | 150×150 试块取芯 |
| 1#—6#    | 60d      | 36  | 0.793                       | 150×150 试块取芯 |
| 1#—6#    | 90d      | 36  | 0.782                       | 150×150 试块取芯 |
| 1#—3#    | 180d     | 12  | 0.724                       | 150×150 试块取芯 |
| 合计 1#—6# | 28d—180d | 120 | 0.802                       | 150×150 试块取芯 |
| 总汇       | 28d—180d | 252 | 0.806                       | 板墙+试块芯样      |

五 Φ 100×100 构件芯样及 150×150 试块中取芯样强度与标准养护 28d 试块强度对比：

| ①批号   | 龄期  | 芯样数 | Φ 100×100/标准养护<br>28d 试块 | 芯样的来源   |
|-------|-----|-----|--------------------------|---------|
| 1#—9# | 28d | 45  | 0.881                    | 砼板、墙中取样 |
| 1#—9# | 60d | 45  | 0.914                    | 砼板、墙中取样 |

|          |          |     |       |         |
|----------|----------|-----|-------|---------|
| 1#—8#    | 90d      | 36  | 0.964 | 砧板、墙中取样 |
| 1#—2#    | 180d     | 6   | 1.085 | 砧板、墙中取样 |
| 合计 1#—9# | 28d—180d | 132 | 0.924 | 砧板、墙中取样 |

#### 六 150×150 试块中取芯样强度与标准养护 28d 试块强度对比

| ②批号      | 龄期       | 芯样数 | Φ 100×100/标准养护<br>28d 试块（平均） | 芯样的来源        |
|----------|----------|-----|------------------------------|--------------|
| 1#—6#    | 28d      | 45  | 0.857                        | 150×150 试块取芯 |
| 1#—6#    | 60d      | 36  | 0.903                        | 150×150 试块取芯 |
| 1#—6#    | 90d      | 36  | 0.933                        | 150×150 试块取芯 |
| 1#—2#    | 180d     | 12  | 0.943                        | 150×150 试块取芯 |
| 合计 1#—6# | 28d—180d | 120 | 0.902                        | 150×150 试块取芯 |
| 总汇       | 28d—180d | 252 | 0.914                        | 板墙+试块芯样      |

通过对以上数据的分析，他们认为：

目前施工验收规范以标养 28d 强度为验收依据，回弹法对混凝土构件强度最后推定值计算应有一个 K 值系数（即规范称龄期修正）将构件混凝土强度推算至同条件试块强度值，系数值的采用建议以  $1/0.926=1.08$  为好，（龄期限 180d 以内的构件混凝土），如果与施工验收规范衔接则系数值取  $1/0.914=1.094$  为好。这样判断推算结果对施工单位来讲比较公正，对质量监督部门来讲也保证了质量，与施工验收规范评定值衔接上了，也符合目前国家整个经济实力切实符合目前国情。这样回弹法结果明确可以作为施工验收依据，对龄期超过 180d 以上的工程和构件混凝土目前 K 值暂时取 1.0。

陕西省建筑科学研究院根据多年检测经验，在编制陕西省地方标准《回弹法检测泵送混凝土抗压强度技术规程》时，规定构件混凝土强度推定值与标养试块强度比较时，可给其乘以 1.1 系数。

浙江省舟山市周岳年建议混凝土强度检测应引入“成熟度”参数，用“成熟度”取代当前普通引用的“自然龄期（d）”。

经过大量的试验研究，实验数据证明，实体混凝土强度与“成熟度”参数有良好的函数关系，在 600℃·d 内它们的关系式为：

$$f_{cu \cdot M0} = [0.1661 \cdot \ln(M0) - 0.1167] \cdot f_{cu, 28d \text{ 标}} + 5.36$$

（上式：LN 是自然对数函数，M0 是混凝土的成熟度）

（样本 n=204 组，相关系数 r=0.965，平均相对误差 δ（%）=7.16，平均相对标准差 e<sub>r</sub>（%）=10.68）

$$f_{\text{芯} \cdot M0} = [0.1252 \cdot \ln(M0) - 0.0928] \cdot f_{cu, 28d \text{ 标}} + 8.77$$

（样本 n=204 组，相关系数 r=0.959，平均相对误差 δ（%）=6.59，平均相对标准差 e<sub>r</sub>（%）=8.66）

$f_{cu,M0}$  为测得的同条件养护立方体试件抗压强度值;

$f_{芯,M0}$  为测得的  $\phi 100$  芯样试件的抗压强度代表值;

M0 为混凝土自浇筑日起到计算日止日平均气温  $\geq 0.0^{\circ}\text{C}$  的累计值,  $M0 = \sum T_i$

( $T_i$  为  $\geq 0.0^{\circ}\text{C}$  的日平均气温,  $< 0.0^{\circ}\text{C}$  均计为 0.0)

- a) 若在成熟度为 M0 时,测得某构件同条件养护立方体试件抗压强度  $f_{cu,M0}$ ,则我们可以推定被测混凝土构件在成熟度为 600  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  时的同条件养护立方体试件抗压强度为:

$$f_{cu,600^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}} = (0.94583 * f_{cu,M0} - 5.07) / (0.1661 * \ln(M0) - 0.1167) + 5.36 \quad (5-c)$$

- b) 若在成熟度为 M0 时,测得某构件  $\phi 100$  芯样试件的抗压强度代表值  $f_{芯,M0}$ ,则我们可以推定被测混凝土构件在成熟度为 600  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  时的  $\phi 100$  芯样试件的抗压强度代表值  $f_{芯,M0}$  为:

$$f_{芯,600^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}} = (0.7081 * f_{芯,M0} - 6.92) / (0.1252 * \ln(M0) - 0.0928) + 8.77$$

混凝土强度的增长是一个十分复杂的过程,它与混凝土的原材料、配合比,施工过程中的浇注、振捣,环境的温度、湿度有着密切的关系。标准混凝土试件是给定了一个最有利于混凝土强度发展的温度和湿度条件,规定了试件的成型方法,规定的龄期也是混凝土强度增长趋于稳定的时间。但在混凝土工程的实际施工过程中,其影响因素就十分复杂多样,即就是通常所说的同条件养护试件也很难达到真正的同条件。所以,要找出构件的推定强度和标准养护试块强度之间的关系是十分困难的,因为这其中的影响因素太多了。

对于同一工程的同一混凝土构件,采用不同的检测方法,其结果是不相同的。采用同一检测方法,不同的人去检测,其结果也不相同。即就是在同一试验室的同一种原材料、同样的配合比、在同一标准养护条件、采用同一台压力机、有同一熟练人员进行操作,其结果也有一定的差异。而这种差异往往无规律性,这就是混凝土这种材料的复杂性和特殊性。

但是我们可以取得的共识是,通常情况下,混凝土的实体强度往往低于标准养护的混凝土试件的强度。

国内有些学者对此进行了多年的研究,有的学者认为:对于混凝土工程质量的现场检测采用强度推定值的平均值就可以满足混凝土工程质量的安全性要求了。这些学术观点有待我们进行不断的验证和研究

## 第五节 混凝土强度的修正

当检测条件与混凝土的测强曲线的适应条件有较大差异时,如混凝土的龄期、湿度、成型工艺的差异,混凝土表面涂养护剂、异常碳化等,以致造成混凝土表面和内部有差异等,可采

用在构件上钻取的混凝土芯样或同条件试块对测区混凝土强度换算值进行修正。对同一强度等级混凝土进行芯样修正时，芯样数量不应少于 6 个，芯样数量太少代表性不够，且离散较大。如果数量过大，则钻取芯工作量太大，有些构件又不宜取过多芯样，否则影响其结构安全性，因此，规定芯样数量不少于 6 个较为合理。考虑到芯样强度计算时，不同尺寸规格的芯样修正会带来新的误差（不同的芯样直径、高度与标准尺寸要进行换算，作为基准试件，应尽量避免这种试件之间的尺寸换算），因此规定芯样的直径宜为 100 mm，高径比为 1。需要指出的是，钻取芯样的部位均应在回弹测区内，先测定测区回弹值、碳化深度值，然后再钻取芯样。每一个钻取的芯样只能加工成一个圆柱体抗压试件，不可以将较长芯样沿长度方向截取为几个芯样试件来计算修正值。芯样的钻取、加工、计算可参照《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS03 规定执行。同样，同条件试块修正时（同条件试块指的是与被测混凝土构件配合比相同、龄期相近、养护条件一致的混凝土试块），试块数量不少于 6 个，试块边长应为 150mm，以避免由于试块尺寸不同进行换算时带来新的误差。

为了更精确、合理的对测区混凝土强度进行修正，推荐采用修正量方法对测区混凝土强度进行修正，当然也可以采用修正系数进行修正。具体理由如下：

1. 国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T50344-2004 的 4.3.3 条文为“采用钻芯修正法时，宜选用总体修正量的方法。”中国工程建设标准化协会标准《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS03：2007 的 3.3.1 条文为“对间接测强方法进行钻芯修正时，宜采用修正量的方法”。

2. 修正量方法对测区强度进行修正后，只修正混凝土测区强度值，不会改变同一构件或同批构件的标准差。

3. 根据 CECS03：2007 的条文解释，修正量的概念与现行国家标准《数据的统计处理和解释在成对观测值情形下两个均值的比较》GB/T3361 的概念相符；欧洲标准《Assessment of concrete compressive structures or in structural elements》EN13791 也采取修正量的方法。

一 修正量法计算时，可按下列步骤进行：

1 修正量应按下列公式计算：

$$\begin{aligned}\Delta_{tot} &= f_{cor,m} - f_{cu,m0}^c \\ \Delta_{tot} &= f_{cu,m} - f_{cu,m0}^c \\ f_{cor,m} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cor,i} \\ f_{cu,m} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} \\ f_{cu,m0}^c &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i}^c\end{aligned}$$

式中：  $\Delta_{tot}$ ——测区混凝土强度修正量(MPa) 精确到 0.1MPa；

$f_{cor,m}$ ——芯样试件混凝土强度平均值(MPa)，精确到 0.1MPa；

$f_{cu,m}$ ——150 mm同条件立方体试块混凝土强度平均值(MPa)，精确到 0.1MPa；

$f_{cu,m0}^c$ ——对应于钻芯部位或同条件立方体试块回弹测区混凝土强度换算值的平均值(MPa)，精确到 0.1MPa；

$f_{cor,i}$ ——第  $i$  个混凝土芯样试件的抗压强度；

$f_{cu,i}$ ——第  $i$  个混凝土立方体试块的抗压强度；

$f_{cu,i}^c$ ——对应于第  $i$  个芯样部位或同条件立方体试块测区回弹值和碳化深度值的混凝土强度换算值；

$n$ ——芯样或试块数量。

2 测区混凝土强度换算值的修正应按下列公式计算：

$$f_{cu,i1}^c = f_{cu,i0}^c + \Delta_{tot}$$

式中：  $f_{cu,i0}^c$ ——第  $i$  个测区修正前的混凝土强度换算值 (MPa)，精确到 0.1MPa。

$f_{cu,i1}^c$ ——第  $i$  个测区修正后的混凝土强度换算值(MPa)，精确到 0.1MPa。

二 采用修正系数修正时，修正系数应按下列公式计算：

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} / f_{cu,i}^c$$

或

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cor,i} / f_{cu,i}^c$$

式中  $\eta$ ——修正系数，精确到 0.01；

$f_{cu,i}$ ——第  $i$  个混凝土立方体试块（边长为 150mm）的抗压强度值，精确到 0.1MPa；



$f_{\text{cor},i}$ ——第  $i$  个混凝土芯样试件的抗压强度，精确到 0.1MPa；

$f_{\text{cu},i}^c$ ——对应于第  $i$  个试块或芯样部位测区回弹值和碳化深度值的混凝土强度换算值；

$n$ ——试件数。

### 三 混凝土芯样修正的示例：

某工程的混凝土构件回弹法检测数据如表 8-3

表 8-3 混凝土强度计算表

| 测区             | 1        | 2    | 3        | 4    | 5        | 6    | 7        | 8    | 9    | 10   |
|----------------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|------|------|
| 平均回弹值          | 39.6     | 38.0 | 36.8     | 39.4 | 38.0     | 36.0 | 42.8     | 41.6 | 41.0 | 41.0 |
| 平均碳化值<br>(mm)  | 3.0      | 3.5  | 3.0      | 4.0  | 3.0      | 3.0  | 3.0      | 3.0  | 1.5  | 3.5  |
| 强度换算值<br>(MPa) | 38.5     | 34.8 | 33.4     | 36.6 | 35.5     | 32.0 | 44.7     | 42.3 | 43.7 | 43.7 |
| 强度计算<br>(MPa)  | 平均值=38.5 |      | 标准差=4.73 |      | 最小值=32.0 |      | 标准值=30.7 |      |      |      |

相对应于测区混凝土芯样强度为：

表 8-4 混凝土强度换算值和芯样强度值

| 测区            | 1    | 3    | 4    | 5    | 6    | 8    | 平均值  |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 换算强度<br>(MPa) | 38.5 | 33.4 | 36.6 | 35.5 | 32.0 | 42.3 | 36.4 |
| 芯样强度<br>(MPa) | 40.1 | 34.1 | 40.0 | 32.0 | 43.1 | 45.0 | 39.0 |

从上表可得修正量：

$$\Delta_{\text{tot}} = 39.0 - 36.4 = 2.6 \text{ (MPa)}$$

修正系数：

$$n = 39.0 \div 36.4 = 1.07$$

若按修正量得下表：

表 8-5 修正量表

| 测区  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 平均回 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

|                    |          |      |          |      |          |      |          |      |      |      |
|--------------------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|------|------|
| 弹值                 | 39.6     | 38.0 | 36.8     | 39.4 | 38.0     | 36.0 | 42.8     | 41.6 | 41.0 | 41.0 |
| 平均碳化值<br>(mm)      | 3.0      | 3.5  | 3.0      | 4.0  | 3.0      | 3.0  | 3.0      | 3.0  | 1.5  | 3.5  |
| 强度换算值<br>(MPa)     | 38.5     | 34.8 | 33.4     | 36.6 | 35.5     | 32.0 | 44.7     | 42.3 | 43.7 | 43.7 |
| 修正量<br>(MPa)       | 2.6      |      |          |      |          |      |          |      |      |      |
| 修正后的强度换算值<br>(MPa) | 41.1     | 37.4 | 36.0     | 39.2 | 38.1     | 34.6 | 47.3     | 44.9 | 46.3 | 46.3 |
| 修正后的强度计算<br>(MPa)  | 平均值=41.1 |      | 标准差=4.73 |      | 最小值=34.6 |      | 标准值=33.3 |      |      |      |

若按修正系数得下表：

表 8-6 修正系数表

|                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 测区                 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| 平均回弹值              | 39.6 | 38.0 | 36.8 | 39.4 | 38.0 | 36.0 | 42.8 | 41.6 | 41.0 | 41.0 |
| 平均碳化值<br>(mm)      | 3.0  | 3.5  | 3.0  | 4.0  | 3.0  | 3.0  | 3.0  | 3.0  | 1.5  | 3.5  |
| 强度换算值<br>(MPa)     | 38.5 | 34.8 | 33.4 | 36.6 | 35.5 | 32.0 | 44.7 | 42.3 | 43.7 | 43.7 |
| 修正系数               | 1.07 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 修正后的强度换算值<br>(MPa) | 41.2 | 37.2 | 35.7 | 39.2 | 38.0 | 34.2 | 47.8 | 45.3 | 46.8 | 46.8 |
| 修正后                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

|                     |          |          |          |          |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| 的强度<br>计 算<br>(MPa) | 平均值=41.2 | 标准差=5.08 | 最小值=34.2 | 标准值=32.8 |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|

从表 8-5 和表 8-6 可以看出, 采用修正量法计算强度时, 标准差是不变的。

#### 四 混凝土芯样修正的讨论

采用钻取混凝土芯样的直接检测混凝土抗压强度方法对回弹法推定的混凝土强度进行修正, 可以提高回弹法检测的可靠性和准确性。但是, 钻心法钻取的试件为圆柱体, 抛开芯样大小的尺寸效应, 而圆柱体与立方体混凝土试件之间还是会有差别的。浙江省舟山市的周岳年经过大量的多年研究认为, 标准的圆柱体试件与标准的立方体试件之间存在着尺寸效应, 它们之间的函数关系为:

$$Y=0.7455X+4.2 \quad (\text{样本个数: } 204 \text{ 组立方体试件, } 888 \text{ 个芯样})$$

相关系数  $R=0.958$

平均相对误差  $\delta$  (%)=5.91

平均相对标准差  $e_r$  (%)=7.49

$Y$ :  $\Phi 100 \text{ mm}$  芯样强度

$X$ :  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  试件强度。

## 第九章 结构或构件检测及计算举例

1、某研究所会议室大梁长 6 米, 混凝土强度等级 C25, 各种材料均符合国家标准, 自然养护, 龄期 4 个月。因试块缺乏代表性现采用回弹法检测混凝土强度。

(1) 测试: 按要求布置 10 个测区, 回弹仪水平方向测试构件侧面, 然后测量其碳化深度值。

(2) 记录: 见表 9-1。

(3) 计算:

① 计算出每一测区的平均回弹值  $m_R$  和平均数至 0.1。计算结果见表 9-1-1。

② 根据每一测区的平均回弹值  $m_R$  和平均碳化深度值  $m_d$ , 查行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T23-2001 附录 A, 求出该测区混凝土强度换算值  $f_{cu,i}$ 。

③ 计算平均值, 均方差, 最小强度值。计算过程见表 9-1-2。

④ 该梁强度推定值为 22.1MPa。

2、某住宅楼六层一构造柱，混凝土强度等级 C20，各种材料均符合国家标准，自然养护，龄期 6 个月。因试块遗失，现采用回弹法检测混凝土强度。

(1) 测试：由于该柱高度小于 3 米，截面尺寸不大，故布置 5 个测区。

(2) 记录：格式同例一，此处略，测区平均回弹值  $m_R$  和平均碳化深度值  $m_d$  见表 9-2。

(3) 计算：步聚同例一，因该构造柱只有 5 个测区，故构造柱的强度推定值取测区的最小值即为 18.0MPa。

3、某家属楼二层圈梁，混凝土强度等级为 C20，各种材料均符合国家标准，自然养护，龄期 3 个月。因试块遗失，现采用回弹法检测其中一段圈梁的混凝土强度。

(1) 测试：同例一，该段圈梁长 8m，高 0.2 m，布置 10 个测区。

(2) 记录：格式同例一，此处略，测区平均回弹值  $m_R$  和平均碳化深度值  $m_d$  见表 9-3

(3) 计算：格式同例一，因该段圈梁测区强度值中出现了小于 10.0MPa，故该段圈梁强度推定值为小于 10.0MPa。

4. 某框架楼一层柱，混凝土强度等级为 C45，泵送商品混凝土，各种材料均符合国家标准，自然养护，龄期 3 个月。因对试块强度有怀疑，现采用回弹法检测混凝土强度。

(1) 测试：按要求布置测区，回弹仪水平方向测试构件侧面，然后测量其碳化深度值。

(2) 记录：格式同例一，此处略，测区平均回弹值  $m_R$  和平均碳化深度值  $m_d$  见表 9-4。

(3) 计算：格式同例一，此处略，该柱强度推定值为 55.2MPa。

5. 某厂金工车间杯形基础，混凝土强度等级 C15，各种材料均符合国家标准，自然养护，龄期 4 个月，因对标准试块试压结果有怀疑，采用回弹法检测杯形基础混凝土强度。

(1) 测试：按要求选取测区，其布置见图 9-1。按工作面分别以水平方向及  $-45^\circ$  角度方向测试基础浇筑侧面。

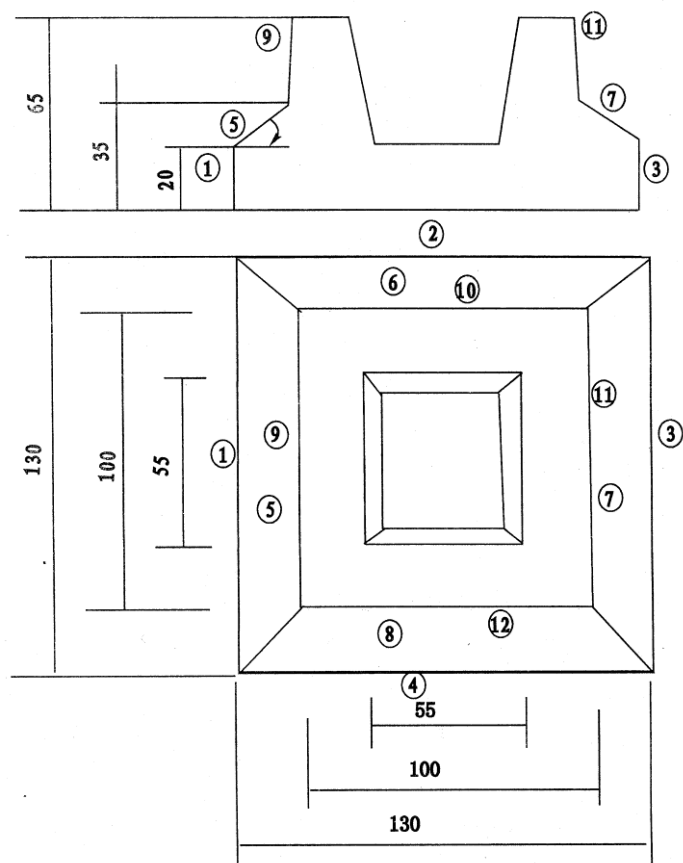


图 9-1 混凝土杯形基础测区布置图

注：⑤⑥⑦⑧四个测区为 $-45^\circ$ 角方向测试，其余均为水平测试。

(2) 记录：同例一格式，此处略。测区平均回弹值  $m_R$  和平均碳化深度值  $m_d$  见表 9-5。

(3) 计算：步骤同例一。但⑤⑥⑦⑧四个测区需进行角度修正后方可查强度表，该杯形基础混凝土强度推定值为 18.6 MPa。

6、某百货大厦二楼营业厅混凝土柱 40 根，强度等级为 C20。柱子采用相同原材料、同一配合比在相同的施工条件下于 5 日内浇筑完成，龄期 7 个月，材料均符合国家标准，自然养护，因对标准养护试块的代表性有怀疑，现采用回弹法检测该批柱混凝土强度。

(1) 测试：本批构件采用抽样法检测，随机抽样，按规程规定抽取 12 根混凝土柱，按要求布置测区，回弹仪水平测试构件侧面。

(2) 记录：格式同例一，此处略，各测区平均回弹值  $m_R$ ，平均碳化深度值见表 9-6-1。

(3) 计算：步骤同例一。需要分别按单个构件、同批构件予以计算强度。如按批量抽样检测中，因个别构件质量较差致使整批构件所有测区均方差过大导致整批构件强度偏低，则应灵活运用。可将已测构件逐个加以计算，处理时可只考虑个别质量差的构件。若有需要亦可将未测构件再逐个检测，计算过程及结果分别见表 9-6-1、9-6-2、9-6-3 到 9-6-12。

表 9-7 单个构件混凝土强度计算汇总表：

| 构件名称 | 构件编号 | 强 度 计 算 (MPa) |                |                |                 |             |
|------|------|---------------|----------------|----------------|-----------------|-------------|
|      |      | n             | $m_{f_{cu}^c}$ | $S_{f_{cu}^c}$ | $f_{cu, min}^c$ | $f_{cu, c}$ |
| 柱    | A/②  | 10            | 25.6           | 2.21           | 21.8            | 22.0        |
| 柱    | C/②  | 10            | 24.7           | 3.72           | 19.2            | 18.6        |
| 柱    | D/①  | 10            | 20.3           | 2.60           | 16.4            | 16.0        |
| 柱    | D/③  | 10            | 19.8           | 1.78           | 17.5            | 16.9        |
| 柱    | B/③  | 10            | 20.5           | 3.37           | 13.2            | 15.0        |
| 柱    | A/④  | 10            | 26.4           | 2.03           | 23.2            | 23.1        |
| 柱    | E/④  | 10            | 23.3           | 2.95           | 19.2            | 18.4        |
| 柱    | C/⑤  | 10            | 19.9           | 1.80           | 16.4            | 16.9        |
| 柱    | B/⑥  | 10            | 24.9           | 2.18           | 20.9            | 21.3        |
| 柱    | A/⑦  | 10            | 21.7           | 3.18           | 17.2            | 16.5        |
| 柱    | C/⑦  | 10            | 20.1           | 3.54           | 17.1            | 14.3        |
| 柱    | E/⑧  | 10            | 19.7           | 3.02           | 16.0            | 14.7        |

表 9—8 同批构件混凝土强度计算表：

| 构件名称 | 强 度 计 算 (MPa) |                |                |
|------|---------------|----------------|----------------|
|      | n             | $m_{f_{cu}^c}$ | $S_{f_{cu}^c}$ |
| 柱    | 120           | 22.2           | 3.62           |

本批构件平均强度为 22.2MPa,  $S_{f_{cu}^c} = 3.62\text{MPa} < 4.5\text{MPa}$ , 可作为一批构件, 其强度

推定值应按下列公式计算:

$$f_{cu, e} = m_{f_{cu}^c} - 1.645S_{f_{cu}^c} = 16.2(\text{MPa})$$

本批构件强度推定值为 16.2MPa。

计算过程特别需要指出的是：在计算该批构件的均方差时，应该是该批构件所有测区（及 120 个测区）的均方差，而不是 12 个构件的均方差。

计算均方差时，应该使用带有统计功能的计算器或电脑，而不可用手工计算。手工计算一来效率低，二来在有效数据的取舍上过分繁琐。如果取舍不当，计算结果相差很大。

