

ICS 91.100.30

CCS Q 13



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXX—202X

超高性能混凝土试验方法

Test methods for ultra-high performance concrete

(征求意见稿)

202×-××-××发布

202×-××-××实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。

本文件由中华人民共和国住房和城乡建设部提出。

本文件由全国混凝土标准化技术委员会 (SAC/TC458) 归口。

本文件负责起草单位：中国建筑科学研究院有限公司、

本文件参加起草单位：

本文件主要起草人：

目 次

前 言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 取样与试件制备	3
4.1 取样	3
4.2 试件制备	4
4.3 力学性能与耐久性能试件的尺寸测量与公差	4
5 拌合物性能试验方法	5
5.1 坍落度及坍落度经时损失	5
5.2 扩展度及扩展度经时损失	6
5.3 扩展时间试验	7
5.4 凝结时间	8
5.5 表观密度	9
5.6 含气量	10
5.7 纤维体积率	12
5.8 纤维分布均匀性	13
6 物理力学性能试验方法	16
6.1 抗压强度试验	16
6.2 轴心抗压强度试验	18
6.3 静力受压弹性模量试验	19
6.4 泊松比试验	22
6.5 抗折强度与弯曲韧性试验	25
6.6 抗拉性能试验	30
6.7 劈裂抗拉强度试验	35
6.8 粘结强度试验	37
6.9 超高性能混凝土与钢筋的握裹强度试验	38
6.10 线膨胀系数试验	41
6.11 耐磨性试验	44
6.12 硬化超高性能混凝土原样体积密度试验	46
6.13 抗冲磨性试验	48
6.14 动态压缩试验	51
7 长期性能和耐久性能试验方法	63
7.1 非接触法早期自收缩试验	63
7.2 波纹管法早期自收缩试验	65
7.3 接触法干燥收缩试验	67
7.4 受压徐变试验	71
7.5 快速氯离子迁移系数法 (RCM 法)	75
7.6 抗气体渗透性能试验	79
7.7 毛细吸水速率试验	82
附录 A (资料性附录) 超高性能混凝土动态压缩试验示例	87

超高性能混凝土试验方法

1 范围

本标准规定了超高性能混凝土的取样与试件制备、拌合物性能试验方法、物理力学性能试验方法、长期性能与耐久性能试验方法。

本标准适用于现场浇筑或工厂化预制的超高性能混凝土的性能试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 1499.1 钢筋混凝土用钢 第1部分：热轧光圆钢筋
- GB 1499.2 钢筋混凝土用钢第2部分：热轧带肋钢筋
- GB/T 2611 试验机通用技术要求
- GB/T 3159 液压式万能试验机
- GB 5099.4 钢质无缝气瓶 第4部分：不锈钢无缝气瓶
- GB 5749 生活饮用水卫生标准
- GB/T 6003.2 试验筛 技术要求和检验 第2部分：金属穿孔板试验筛
- GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定
- GB/T 9846 普通胶合板
- GB/T 12626 湿法硬质纤维板
- GB/T 21389 游标、带表和数显卡尺
- GB/T 22773 机械秒表
- GB/T 22778 液晶数字式石英秒表
- GB/T 22864 毛巾
- GB/T 26497 电子天平
- GB/T 30435 电热干燥箱及电热鼓风干燥箱

- GB/T 31387 活性粉末混凝土
- GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准
- GB/T 50081 混凝土物理力学性能试验方法标准
- GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
- GB/T 50728 工程结构加固材料应用安全性鉴定规范
- BB/T 0014 夹链自封袋
- HG/T 2765.4 蓝胶指示剂、变色硅胶和无钴变色硅胶
- HG/T 3949 美纹纸压敏胶粘带
- JB/T 7499 涂附磨具 耐水砂纸
- JC/T 827 石材圆盘切锯机
- JGJ/T 70 建筑砂浆基本性能试验方法标准
- JG/T 245 混凝土试验用振动台
- JG/T 248 混凝土坍落度仪
- JG/T 262 混凝土氯离子扩散系数测定仪
- JGJ/T 384 钻芯法检测混凝土强度技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 超高性能混凝土 ultra-high performance concrete

以水泥和矿物掺合料为胶凝材料，配合骨料、外加剂、高强度微细钢纤维和 / 或非金属纤维、水等生产的纤维增韧超高强高性能混凝土。

3.2 弹性拉伸应力 elastic tensile stress

超高性能混凝土轴心拉伸过程中，拉伸应变达到 0.02%时所对应的拉伸应力。

3.3 抗拉强度 tensile strength

超高性能混凝土轴心拉伸过程中可承受的最大拉伸应力。

3.4 抗拉应变 tensile strain

超高性能混凝土轴心拉伸过程中最大拉伸应力对应的应变。

3.5 残余抗拉强度 residual tension strength

超高性能混凝土轴心拉伸过程中，应变软化阶段拉伸应变达到 0.15%时所对应的拉伸应力。

3.6 气体渗透率 gas permeability

在一定压力梯度下，气体在混凝土中渗流时，气体透过混凝土的能力。

3.7 表观气体渗透率 apparent gas permeability

在特定进气压力下，通过测量气体在混凝土中稳定流动状态时的气体流量，由达西定律计算得到的混凝土气体渗透率。

3.8 固有气体渗透率 intrinsic gas permeability

考虑气体滑移效应，通过对不同压力梯度下测得的混凝土表观气体渗透率线性回归得到的反映混凝土固有特性的渗透率。

3.9 毛细吸水 capillary aasorption of water

非饱和多孔材料通过毛细作用吸收液态水分的过程。

3.10 毛细吸水率 cumulative water aasorption

超高性能混凝土试件吸水面单位面积累计毛细吸水的体积。

3.11 毛细吸水速率 water aasorption rate

超高性能混凝土试件每单位吸水时间算术平方根的毛细吸水率。

注：超高性能混凝土的毛细吸水速率以初始毛细吸水速率即以超高性能混凝土试件在毛细吸水试验初期的毛细吸水速率表示。

4 取样与试件制备

4.1 取样

4.1.1 超高性能混凝土工程施工中的取样应符合 GB 50204 的有关规定；

4.1.2 浇筑成型的超高性能混凝土施工现场拌合物取样应从同一次搅拌或同一车运送的超高性能混凝土中取出，取样量不应小于试样需要量的 1.5 倍，且不宜小于 20 L。

4.2 试件制备

4.2.1 超高性能混凝土试件制作时，宜从试模的一侧开始浇筑，将拌合物一次性装入试模，并略高出试模上口。

4.2.2 对于扩展度大于 650mm 的超高性能混凝土拌合物，浇筑后可用橡皮锤轻敲试模侧壁排除气泡。对于扩展度不大于 650mm 的超高性能混凝土拌合物，可根据需要将试模置于振动台上振动以排除气泡，振动时间宜为 10s~15s。成型过程中不得进行插捣。成型密实后刮去试模表面多余的拌合物并用抹刀抹平。棱柱体及小梁试件应采用卧式成型。

4.2.3 用以检验或控制工程质量的试件，其成型方法宜与实际施工采用的方法相同。

4.2.4 试模应符合 JG 237 的有关规定。应定期对试模进行核查，核查周期不宜超过三个月。

4.3 力学性能与耐久性能试件的尺寸测量与公差

4.3.1 试件尺寸测量应符合下列规定：

- 1 试件的边长和高度宜采用游标卡尺进行测量，应精确至 0.1mm；
- 2 圆柱形试件的直径应采用游标卡尺分别在试件的上部、中部和下部相互垂直的两个位置上共测量 6 次，取测量的算术平均值作为直径值，精确至 0.1mm；
- 3 试件承压面的平面度可采用钢板尺和塞尺进行测量。测量时，应将钢板尺立起横放在试件承压面上，然后慢慢旋转 360°，再用塞尺测量其最大间隙作为平面度值，也可采用其他专用设备测量，结果精确至 0.01mm；
- 4 试件相邻面间的夹角应采用游标量角器进行测量，应精确至 0.1°。

4.3.2 试件各边长、直径和高的尺寸公差不得超过 1mm。

4.3.3 试件承压面的平面度公差不得超过 0.0005d，d 为试件边长。

4.3.4 试件相邻面间的夹角应为 90°，其公差不得超过 0.5°。

4.3.5 试件制作时应采用符合标准要求的试模和精确安装试模，并应保证试件的尺寸公差满足要求。

5 拌合物性能试验方法

5.1 坍落度及坍落度经时损失

5.1.1 本方法适用于坍落度不小于 100mm、扩展度不大于 500mm 的超高性能混凝土拌合物的坍落度及坍落度经时损失的测定。

5.1.2 坍落度及坍落度经时损失试验的试验设备应符合下列规定：

- 1 坍落度仪应符合 JG/T 248 的有关规定。
- 2 应配备 2 把钢尺，钢尺的量程不应小于 300mm，分度值不应大于 1mm。
- 3 底板应采用平面尺寸不小于 1500mm×1500mm、厚度不小于 3mm 的钢板，其最大挠度不应大于 3mm。

5.1.3 坍落度试验应按下列步骤进行：

1 坍落度筒内壁和底板应润湿无明水；底板应放置在坚实水平面上，并把坍落度筒放在底板中心，然后用脚踩住两边的脚踏板，坍落度筒在装料时应保持在固定的位置。

2 超高性能混凝土拌合物应分二层均匀地装入坍落度筒内：每装一层超高性能混凝土拌合物，应用捣棒由边缘到中心按螺旋形均匀插捣 25 次，捣实后每层混凝土拌合物试样高度约为筒高的 1/3。

3 插捣底层时，捣棒应贯穿整个深度，插捣第二层和顶层时，捣棒应插透本层至下一层的表面。

4 顶层超高性能混凝土拌合物装料应高出筒口，插捣过程中，超高性能混凝土拌合物低于筒口时，应随时添加。

5 顶层插捣完后，取下装料漏斗，应将多余超高性能混凝土拌合物刮去，并沿筒口抹平。

6 清除筒边底板上多余的超高性能混凝土拌合物后，应垂直平稳地提起坍落度筒，并轻放于试样旁边。当试样不再继续坍落或坍落时间达 50s 时，用钢尺测量出筒高与坍落后超高性能混凝土试体最高点之间的高度差，作为该超高性能混凝土拌合物的坍落度值。

5.1.4 坍落度经时损失试验应按下列步骤进行：

1 测量出机时的超高性能混凝土拌合物的初始坍落度值 H_0 。

2 将全部超高性能混凝土拌合物试样装入塑料桶或不被水泥浆腐蚀的金属桶内，并用桶盖或塑料薄膜密封静置。

3 自搅拌加水开始计时，静置 1h 后将桶内超高性能混凝土拌合物试样全部倒入搅拌机内，搅拌 20s，即进行坍落度试验，得出 1h 坍落度值 H_1 。

4 计算初始坍落度值与 1h 坍落度值的差值，可得到 1h 超高性能混凝土坍落度经时损失试验结果。

5.1.5 坍落度筒的提离过程宜控制在 3s~7s；从开始装料到提起坍落度筒的整个过程应连续进行，并应

在 150s 内完成。

5.1.6 超高性能混凝土拌合物坍落度值测量应精确至 1mm，结果修约至 5mm。

5.1.7 当工程要求调整坍落度经时损失试验的静置时间时，则应按实际静置时间测定并计算超高性能混凝土坍落度经时损失。

5.2 扩展度及扩展度经时损失

5.2.1 本方法适用于扩展度不小于 500mm 的超高性能混凝土拌合物的扩展度及扩展度经时损失的测定。

5.2.2 扩展度及扩展度经时损失试验的试验设备应符合下列规定：

1 坍落度仪应符合 JG/T 248 的有关规定。

2 钢尺的量程不应小于 1000mm，分度值不应大于 1mm。

3 底板应采用平面尺寸不小于 1500mm×1500mm、厚度不小于 3mm 的钢板，其最大挠度不应大于 3mm。

5.2.3 扩展度试验应按下列步骤进行：

1 坍落度筒内壁和底板应润湿无明水；底板应放置在坚实水平面上，并把坍落度筒放在底板中心，然后用脚踩住两边的脚踏板，坍落度筒在装料时应保持在固定的位置。

2 用盛料容器一次性使超高性能混凝土拌合物均匀填满落度筒，加满后刮去多余拌合物，沿筒口抹平，不得进行插捣。

3 清除坍落度筒周围多余的超高性能混凝土拌合物，然后将坍落度筒垂直平稳地提起，提起时间宜控制在 3s~7s。当试样不再继续扩展或扩展时间已达 150s 时，用钢尺测量超高性能混凝土拌合物展开扩展面的最大直径以及与最大直径呈垂直方向的直径。

4 当两直径之差不大于 50mm 时，应取算数平均值作为扩展度试验结果；当两直径之差大于 50mm 时，应重新取样另行测定。

5.2.4 扩展度经时损失试验应按下列步骤进行：

1 测量出机时的超高性能混凝土拌合物的初始扩展度值 L_0 。

2 将全部超高性能混凝土拌合物试样装入塑料桶或不被水泥浆腐蚀的金属桶内，并用桶盖或塑料薄膜密封静置。

3 自搅拌加水开始计时，静置 1h 后应将桶内超高性能混凝土拌合物试样全部倒入搅拌机内，搅拌 20s，即进行扩展度试验，得出 1h 扩展度值 L_1 。

4 计算初始扩展度值与 1h 扩展度值的差值，可得到 1h 超高性能混凝土扩展度经时损失试验结果。

5.2.5 扩展度及扩展度经时损失试验过程中发现钢纤维在中央堆集时，应记录说明。

5.2.6 扩展度及扩展度经时损失试验从开始装料到测得超高性能混凝土扩展度值的整个过程应连续进行，并应在 5min 内完成。

5.2.7 超高性能混凝土拌合物扩展度值测量应精确至 1mm，结果修约至 5mm。

5.2.8 当工程要求调整扩展度经时损失试验的静置时间时，则应按实际静置时间测定并计算超高性能混凝土扩展度经时损失。

5.3 扩展时间试验

5.3.1 本试验方法可用于超高性能混凝土拌合物稠度和填充性的测定。

5.3.2 扩展时间试验的试验设备应符合下列规定：

- 1 混凝土坍落度仪应符合 JG/T 248 的规定；
- 2 底板应采用平面尺寸不小于 1000mm×1000mm、最大挠度不大于 3mm 的钢板，并应在平板表面标出坍落度筒的中心位置和直径分别为 200mm、300mm、500mm、600mm、700mm、800mm 及 900mm 的同心圆(图 5.3.2)；

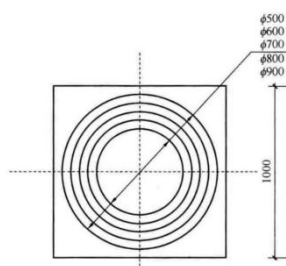


图 5.3.2 底板 (mm)

- 3 盛料容器不应小于 8L，并易于向坍落度筒装填混凝土拌合物；
- 4 秒表精度不应低于 0.1s。

5.3.3 扩展时间试验应按下列步骤进行：

- 1 底板应放置在坚实的水平面上，底板和坍落度筒内壁应润湿无明水，坍落度筒应放在底板中心，并在装料时应保持在固定的位置；
- 2 应用盛料容器一次性将超高性能混凝土拌合物均填满坍落度筒且不得捣实或振动；自开始入料至填充结束应控制在 40s 以内；
- 3 取下装料漏斗，应将超高性能混凝土拌合物沿坍落度筒口抹平；清除筒边底板上的混凝土拌合物后，应垂直平稳地提起坍落度筒至 250mm±50mm 高度，提起时间宜控制在 3s~7s；
- 4 测定扩展时间时，应自坍落度筒提离地面时开始，至扩展开的超高性能混凝土拌合物外缘初触平板上所绘直径 500mm 的圆周为止，结果精确至 0.1s。

5.4 凝结时间

5.4.1 本方法适用于超高性能混凝土用贯入阻力法测定坍落度值不为零的超高性能混凝土拌合物的初凝时间与终凝时间。

5.4.2 凝结时间试验的试验设备应符合下列规定：

1 贯入阻力仪的最大测量值不应小于 1000N，精度应为 $1 \pm 10\text{N}$ ；测针长 100mm，在距贯入端 25mm 处应有明显标记；测针的承压面积应为 100mm^2 、 50mm^2 和 20mm^2 三种；

2 砂浆试样筒应为上口内径 160mm，下口内径 150mm，净高 150mm 刚性不透水的金属圆筒，并配有盖子；

3 试验筛应为筛孔公称直径为 5.00mm 的方孔筛，并应符合 GB/T 6003.2 的规定；

4 振动台应符合 JG/T 245 的规定；

5 捣棒应符合 JG/T 248 的规定。

5.4.3 超高性能混凝土拌合物的凝结时间试验应按下列步骤进行：

1 应将超高性能混凝土拌合物一次分别装入三个试样筒中，用橡皮锤轻轻敲击容器外壁使拌合物密实，不得进行插捣。超高性能混凝土扩展度小于 650mm 时，宜用振动台振实。当超高性能混凝土拌合物中含有粗骨料时，应采用公称直径为 5mm 的方孔筛筛除粗骨料后装入试样筒。拌合物表面宜低于砂浆试样筒口 10mm，并应立即加盖。

2 试样制备完毕，应置于温度为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 的环境中待测，并在整个测试过程中，环境温度应始终保持 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 在整个测试过程中，除在吸取泌水或进行贯入试验外，试样筒应始终加盖。现场同条件测试时，试验环境应与现场一致。

3 凝结时间测定从搅拌加水开始计时。根据拌合物的性能，确定测针试验时间，以后每隔 0.5h 测试一次，在临近初凝和终凝时，应缩短测试间隔时间。

4 在每次测试前 2min，将一片 $20\text{mm} \pm 5\text{mm}$ 厚的垫块垫入筒底一侧使其倾斜，用吸液管吸去表面的泌水，吸水后应复原。

5 测试时，将试样筒置于贯入阻力仪上，测针端部与砂浆表面接触，应在 $10\text{s} \pm 2\text{s}$ 内均匀地使测针贯入砂浆 $25\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 深度，记录最大贯入阻力值，精确至 10N；记录测试时间精确至 1min。

6 每个筒每次测 1 个~2 个点，各测点的间距不应小于 15mm，测点与试样筒壁的距离不应小于 25mm。

7 每个试样的贯入阻力测试不应少于 6 次，直至单位面积贯入阻力大于 28MPa 为止。

8 根据凝结状况，在测试过程中应以测针承压面积从大到小顺序更换测针，更换测针应按表 5.4.3 的规定选用。

表 5.4.3 测针选用规定表

单位面积贯入阻力 (MPa)	0.2~3.5	3.5~20	20~28
测针面积 (mm ²)	100	50	20

5.4.4 单位面积贯入阻力的结果计算以及初凝时间和终凝时间的确定应按下列方法进行:

1 单位面积贯入阻力应按下列式计算:

$$f_{PR} = \frac{P}{A} \quad (5.4.4-1)$$

式中: f_{PR} ——单位面积贯入阻力 (MPa), 精确至 0.1MPa;

P ——贯入阻力 (N);

A ——测针面积 (mm²)。

2 凝结时间宜按式 (5.4.4-2) 通过线性回归方法确定; 根据式 (5.4.4-2) 可求得当单位面积贯入阻力为 3.5MPa 时对应的时间应为初凝时间, 单位面积贯入阻力为 28MPa 时对应的时间应为终凝时间。

$$\ln t = a + b \ln f_{PR} \quad (5.4.4-2)$$

式中: t ——单位面积贯入阻力对应的测试时间(min);

a 、 b ——线性回归系数。

3 凝结时间也可用绘图拟合方法确定, 应以单位面积贯入阻力为纵坐标, 测试时间为横坐标, 绘制出单位面积贯入阻力与测试时间之间的关系曲线; 分别以 3.5MPa 和 28MPa 绘制两条平行于横坐标的直线, 与曲线交点的横坐标应分别为初凝时间和终凝时间; 凝结时间结果应用 h : min 表示, 精确至 5min。

5.4.5 应以三个试样的初凝时间和终凝时间的算术平均值作为此次试验初凝时间和终凝时间的试验结果。三个测值的最大值或最小值中有一个与中间值之差超过中间值的 10% 时, 应以中间值作为试验结果; 最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 10% 时, 应重新试验。

5.5 表观密度

5.5.1 本方法适用于超高性能混凝土拌合物单位体积质量的测定。

5.5.2 表观密度试验的试验设备应符合下列规定:

1 容量筒应为金属制成的圆筒, 筒外壁应有提手。容量筒体积不应小于 5L, 筒壁厚不应小于 3mm。容量筒上沿及内壁应光滑平整, 顶面与底面应平行并应与圆柱体的轴垂直。

2 电子天平的最大量程应为 50kg, 感量不应大于 10g。

5.5.3 表观密度试验应按下列步骤进行:

1 应按下列步骤定容量筒的体积:

- 1) 将干净容量筒与玻璃板一起称重；
 - 2) 将容量筒装满水，缓慢将玻璃板从筒口一侧推到另一侧，容量筒内应满水且不应存在气泡，擦干容量筒外壁，再次称重；
 - 3) 两次称重结果之差除以该温度下水的密度应为容量筒容积 V ；常温下水的密度可取 1kg/L 。
- 2 容量筒内外壁应擦干净，称出容量筒质量 m ，应精确至 10g 。
- 3 超高性能混凝土拌合物试样应一次性装满，用橡皮锤轻轻敲击筒壁使拌合物密实，不得进行插捣。对于扩展度小于 650mm 的超高性能混凝土拌合物，可根据需要用振动台振实。
- 4 将筒口多余的超高性能混凝土拌合物刮去，并将容量筒外壁擦净，称出超高性能混凝土拌合物试样与容量筒总质量，应精确至 10g 。

5.5.4 超高性能混凝土拌合物的表观密度应按下列式计算：

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (5.5.4)$$

式中： ρ ——超高性能混凝土拌合物表观密度 (kg/m^3)，应精确至 10kg/m^3 ；

m_1 ——容量筒质量 (kg)；

m_2 ——容量筒和试样总质量 (kg)；

V ——容量筒体积 (L)。

5.6 含气量

5.6.1 本方法适用于超高性能混凝土拌合物含气量的测定。

5.6.2 含气量试验的试验设备应符合下列规定：

- 1 含气量测定仪应符合 JGJ/T 70 的有关规定。
- 2 电子天平的最大量程应为 50kg ，感量不应大于 10g 。
- 3 振动台应符合 JG/T 245 的有关规定。

5.6.3 含气量试验应按下列步骤进行：

- 1 用湿布擦净混凝土含气量测定仪容器内壁和盖的内表面，装入超高性能混凝土拌合物试样。
- 2 超高性能混凝土拌合物应一次性填满容器，用皮锤轻轻敲击容器外壁使拌合物密实，不得进行插捣。对于扩展度小于 650mm 的超高性能混凝土拌合物，可根据需要用振动台振实。
- 3 刮去表面多余的超高性能混凝土拌合物，用抹刀刮平。
- 4 擦净容器口及边缘，加盖并拧紧螺栓，应保持密封不透气。
- 5 关闭操作阀和排气阀，打开排水阀和加水阀，应通过加水阀向容器内注入水；当排水阀流出的水

流中不出现气泡时，应在注水状态下，关闭加水阀和排水阀。

6 关闭排气阀，向室内打气，应加压至大于 0.1MPa，且压力表显示值稳定；应打开排气阀调压至 0.1MPa，同时关闭排气阀。

7 开启操作阀，使气室里的压缩空气进入容器，待压力表显示值稳定后记录压力值，然后开启排气阀，压力表显示值应回零；应根据含气量与压力值之间的关系曲线确定压力值对应的拌合物的含气量 A_0 ，应精确至 0.1%。

8 超高性能混凝土拌合物的含气量 A_0 应以两次测量结果的平均值作为试验结果；两次测量结果的含气量相差大于 0.5% 时，应重新试验。

5.6.4 含气量测定仪的标定和率定应按下列步骤进行：

1 擦净容器，并将含气量测定仪全部安装好，测定含气量测定仪的总质量 m_{A1} ，应精确至 10g。

2 向容器内注入水至上沿，然后加盖并拧紧螺栓，保持密封不透气；关闭操作阀和排气阀，打开排水阀和加水阀，应通过加水阀向容器内注入水；当排水阀排出的水流中不出现气泡时应在注水的状态下，关闭加水阀和排水阀；应将含气量测定仪外表面擦净，再次测定总质量 m_{A2} ，应精确至 10g。

3 含气量测定仪的容积应按下式计算：

$$V = \frac{m_{A2} - m_{A1}}{\rho_w} \quad (5.6.4)$$

式中：V——含气量测定仪的容积（L），应精确至 0.01L；

m_{A1} ——含气量测定仪的总质量（kg）；

m_{A2} ——水、含气量测定仪的总质量（kg）；

ρ_w ——容器内水的密度（kg/m³），可取 1kg/L。

4 关闭排气阀，向气室内打气，应加压至大于 0.1MPa，且压力表显示值稳定；应打开排气阀调压至 0.1MPa，同时关闭排气阀。

5 开启操作阀，使气室里的压缩空气进入容器，压力表显示值稳定后测得压力值应为含气量为零时对应的压力值。

6 开启排气阀，压力表显示值应回零；关闭操作阀、排水阀和排气阀，开启加水阀，宜借助标定管在注水阀口用量筒接水；用气泵缓缓地向气室内打气，当排出的水是含气量测定仪容积的 1% 时，应按本条中第 4 款和第 5 款的操作步骤测定含气量为 1% 时的压力值。

7 应继续测取含气量分别为 2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10% 时的压力值。

8 含气量分别为 0、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10% 的试验均应进行两次，以两次压力值的平均值作为测量结果。

9 根据含气量 0、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10%的测量结果，绘制含气量与压力值之间的关系曲线。

5.6.5 含气量测定仪的标定和率定应保证测试结果准确。

5.7 纤维体积率

5.7.1 本方法适用于超高性能混凝土拌合物纤维体积率的测定。

5.7.2 纤维体积率试验所用设备应符合下列规定：

- a) 电子天平：用于称量钢纤维的电子天平量程应大于 1kg，感量不应大于 1g。用于称量合成纤维的电子天平量程应大于 100g，感量不应大于 0.02g。
- b) 容量筒：容积应为 5L。
- c) 不锈钢筛网：网孔尺寸应为 2.5mm×2.5mm。
- d) 工具：橡皮锤、铁铲、大容器、磁铁。

5.7.3 纤维体积率试验应按下列步骤进行：

1 将超高性能混凝土拌合物一次性灌至高出容量筒口，装完后用橡皮锤轻轻敲击筒壁使拌合物密实，不得进行插捣。对于扩展度小于 650mm 的超高性能混凝土拌合物，可根据需要用振动台振实。刮去多余拌合物，将表面抹平。

2 将拌合物倒入不小于 10 倍拌合物体积的大容器中，加水搅拌。对于加钢纤维的超高性能混凝土拌合物，可将稀浆慢慢倒出，应在所余的骨料及钢纤维残渣中用磁铁搜集钢纤维，并仔细洗净粘附在钢纤维上的异物。对于合成纤维可用筛网收集纤维，并仔细洗净粘附在纤维上的异物。

3 收集的纤维应在 105℃±5℃ 的温度下烘干至恒重，烘干时间不应少于 4h，每隔 1h 称量一次，直到连续两次称量之差小于较小值 0.5% 时为止。冷却至室温后应称其重量，钢纤维应精确至 1g，合成纤维应精确至 0.02g。

4 当纤维不易分离时，可先进行拌合物加水清洗，收集细骨料及纤维，烘干后再进行细骨料与纤维分离，收集纤维，再进行烘干称重。

5.7.4 结果计算

1 纤维体积率应按下式计算：

$$\rho_f = \frac{m_f}{\gamma_f V} \times 100\%$$

式中： ρ_f ——超高性能混凝土的纤维体积率(%)；

m_f ——容量筒中纤维质量 (g);

V ——容量筒容积 (L);

γ_f ——纤维的质量密度 (kg/m^3)。

2 纤维体积率的试验结果应为纤维体积率两次测定值的平均值。

5.8 纤维分布均匀性

5.8.1 圆筒法

1 本方法用于检验超高性能混凝土拌合物中的纤维在振动情况下的分布均匀性。

2 仪器设备应符合以下规定:

a) 纤维均匀性检测筒: 由硬质、光滑、平整的金属板制成, 检测筒内径为 150mm, 外径为 166mm, 分三节, 每节高度均为 150mm, 并用活动扣件固定, 如图 5.8.1。

b) 跳桌: 振幅为 $25\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 。

c) 电子天平: 用于称量钢纤维的电子天平量程应大于 1kg, 感量不应大于 1g。用于称量合成纤维的电子天平量程应大于 100g, 感量不应大于 0.02g。

d) 不锈钢筛网: 网孔尺寸应为 $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。

e) 工具: 秒表、橡皮锤、大容器、铁铲、磁铁。



图 5.8.1 纤维均匀性检测筒 (mm)

3 试验步骤

1 将超高性能混凝土拌合物一次性灌至高出纤维均匀性检测筒口，装完后用橡皮锤轻轻敲击筒壁使拌合物密实，不得进行插捣。对于扩展度小于 650mm 的超高性能混凝土拌合物，可根据需要用振动台振实。刮去多余拌合物，将表面抹平。

2 将稳定性检测筒放置在跳桌上，使跳桌跳动 25 次。

3 分节拆除均匀性检测筒，并将每节筒内拌合物倒入不小于 10 倍拌合物体积的大容器中，加水搅拌。对于掺钢纤维的超高性能混凝土拌合物，可将稀浆慢慢倒出，应在所余的细骨料及钢纤维残渣中用磁铁搜集钢纤维，并仔细洗净粘附在钢纤维上的异物。对于合成纤维可用筛网收集纤维，并仔细洗净粘附在纤维上的异物。

4 收集的纤维应在 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 的温度下烘干至恒重，烘干时间不应少于 4h，每隔 1h 称量一次，直到连续两次称量之差小于较小值 0.5% 时为止。冷却至室温后应称其重量，钢纤维应精确至 1g，合成纤维应精确至 0.02g。

5 当纤维不易分离时，可先进行拌合物加水清洗，收集细骨料及纤维，烘干后再进行细骨料与纤维分离，收集纤维，再进行烘干称重。

4 结果计算

1 纤维分布均匀性系数应按下列式计算：

$$K_f = \left(1 - \frac{m_{f3} - m_{f1}}{m_f}\right) \times 100\%$$

式中： K_f ——超高性能混凝土的纤维分布均匀性系数；

m_{f1} 、 m_{f2} 、 m_{f3} ——分别为上、中、下三段拌合物中纤维的质量 (g)；

$\overline{m_f}$ ——三段拌合物中纤维的平均质量 (g)；

2 纤维分布均匀性系数的试验结果应为纤维分布均匀性系数两次测定值的平均值。

5.8.2 L 型箱法

1 本方法用于检验超高性能混凝土拌合物中的纤维在水平流动情况下的分布均匀性。

2 试验采用的仪器设备应符合下列规定：

a L 形箱试验仪：L 形箱（图 5.8.2-1）应具有足够刚度且在混凝土填装和流动过程中应不发生变形，表面光滑、平坦且不易被水泥浆腐蚀或生锈。为便于清洁，垂直料斗应为可拆卸式。钢筋栅应为：

双筋型：两根直径为 $12\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$ 的光滑钢筋，且两根钢筋间的间隙为 $59\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ ；

三筋型：三根直径为 $12\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$ 的光滑钢筋，且三根钢筋间的间隙为 $41\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 。

应将钢筋固定在 L 形箱内，并沿箱体宽度方向等距分布（图 5.8.2-2）。

箱体中任何构件材料的表面均需满足抗水泥浆侵蚀和防锈蚀的要求。

b 工具:铲子、抹刀、秒表、钢板尺。

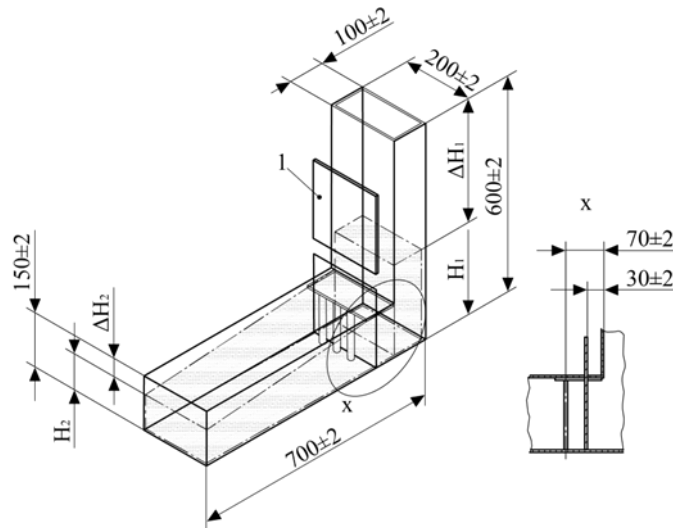
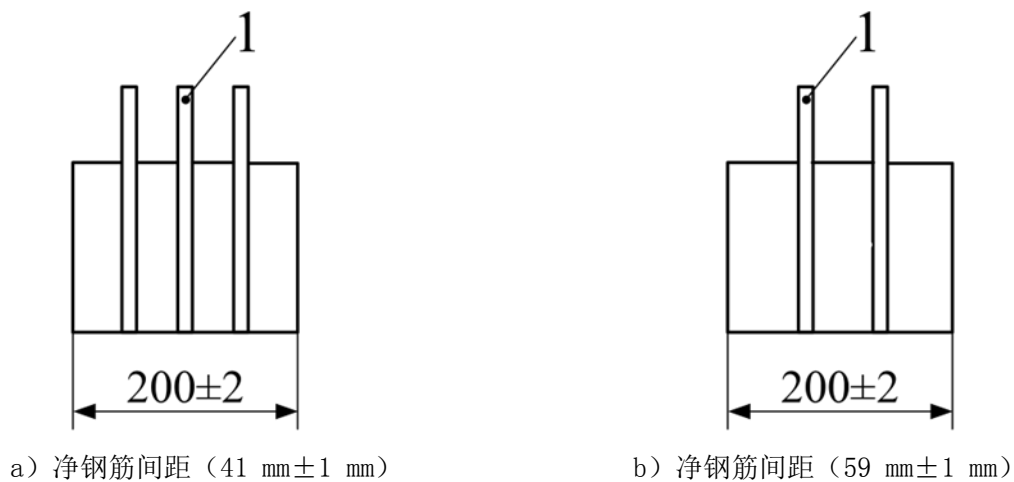


图 5.8.2-1 L 型箱 (mm)

1-闸门



a) 净钢筋间距 ($41\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$)

b) 净钢筋间距 ($59\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$)

图 5.8.2-2 L 型箱钢筋栅的布置 (mm)

1-直径为 $12\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$ 的光滑钢筋

3 将约 14L 超高性能混凝土拌合物一次装满立筒，用抹刀抹平筒口静止 1min。提起闸门，使超高性能混凝土拌合物通过钢筋流出，混凝土拌合物停止流动后立即在水平三分点处插入两块钢板，将三段超高

性能混凝土装入容器中，用水洗法分别吸出三部分的纤维，对比质量，评估水平方向分布的均匀性。

4 结果计算

1 纤维分布均匀性系数应按下列式计算：

$$K_L = \left(1 - \frac{m_{L3} - m_{L1}}{m_L}\right) \times 100\%$$

式中： K_L ——超高性能混凝土的纤维分布均匀性系数；

m_{L1} 、 m_{L2} 、 m_{L3} ——分别为右、中、左三段拌合物中纤维的质量 (g)；

$\overline{m_L}$ ——三段拌合物中纤维的平均质量 (g)；

2 纤维分布均匀性系数的试验结果应为纤维分布均匀性系数两次测定值的平均值。

6 物理力学性能试验方法

6.1 抗压强度试验

6.1.1 本方法适用于测定超高性能混凝土立方体试件的抗压强度。

6.1.2 测定超高性能混凝土立方体抗压强度试验的试件尺寸和数量应符合下列规定：

1 标准试件是边长为100mm的立方体试件；

2 每组试件应为3块。

6.1.3 试验仪器设备应符合下列规定。

1 压力试验机应符合下列规定：

1) 试件破坏荷载宜大于压力机全量程的20%且宜小于压力机全量程的80%；

2) 示值相对误差应为±1%；

3) 应具有加荷速度指示装置或加荷速度控制装置，并能均匀、连续地加荷；

4) 试验机上、下承压板的平面度公差不应大于0.04mm；平行度公差不应大于0.05mm；表面硬度不应小于55HRC；板面应光滑、平整，表面粗糙度 R_a 不应大于0.80μm；

5) 球座应转动灵活；球座宜置于试件顶面，并凸面朝上；

6) 其他要求应符合现行国家标准《液压式万能试验机》GB/T 3159和《试验机通用技术要求》GB/T 2611的有关规定。

2 当压力试验机的上、下承压板的平面度、表面硬度和粗糙度不符合本条第1款中第4)项要求时,上、下承压板与试件之间应各垫以钢垫板。钢垫板应符合下列规定:

- 1) 钢垫板的平面尺寸不应小于试件的承压面积,厚度不应小于25mm;
- 2) 钢垫板应机械加工,承压面的平面度、平行度、表面硬度和粗糙度应符合本条第1款要求。

3 试件周围应设防护网罩。

4 游标卡尺的量程不应小于200mm,分度值宜为0.02mm。

5 塞尺最小叶片厚度不应大于0.02mm,同时应配置直板尺。

6 游标量角器的分度值应为0.1°。

6.1.4 立方体抗压强度试验应按下列步骤进行:

1 试件到达试验龄期时,从养护地点取出后,应检查其尺寸及形状,尺寸公差应满足本标准第4.3节的规定,试件取出后应尽快进行试验。

2 试件放置试验机前,应将试件表面与上、下承压板面擦拭干净。

3 以试件成型时的侧面为承压面,应将试件安放在试验机的下压板或垫板上,试件的中心应与试验机下压板中心对准。

4 启动试验机,试件表面与上、下承压板或钢垫板应均匀接触。

5 试验过程中应连续均匀加荷,加荷速度应取加荷速度应取1.2MPa/s~1.4MPa/s。

6 手动控制压力机加荷速度时,当试件接近破坏开始急剧变形时,应停止调整试验机油门,直至破坏,并记录破坏荷载。

6.1.5 立方体试件抗压强度试验结果计算及确定应按下列方法进行。

1 超高性能混凝土立方体试件抗压强度应按下列式计算:

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \quad (6.1.5)$$

式中： f_{cc} ——超高性能混凝土立方体试件抗压强度（MPa），计算结果应精确至0.1MPa；

F ——试件破坏荷载（N）；

A ——试件承压面积（mm²）。

2 立方体试件抗压强度值的确定应符合下列规定：

- 1) 取3个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值，应精确至0.1MPa；
- 2) 当3个测值中的最大值或最小值中有一个与中间值的差值超过中间值的15%时，则应把最大及最小值剔除，取中间值作为该组试件的抗压强度值；
- 3) 当最大值和最小值与中间值的差值均超过中间值的15%时，该组试件的试验结果无效。

6.2 轴心抗压强度试验

6.2.1 测定超高性能混凝土轴心抗压强度试验的试件尺寸和数量应符合下列规定：

- 1 标准试件是边长为 100mm×100mm×300mm 的棱柱体试件；
- 2 每组试件应为 3 块。

6.2.2 试验仪器设备应符合本标准第 6.1.3 条的规定。

6.2.3 轴心抗压强度试验应按下列步骤进行：

- 1 试件到达试验龄期时，从养护地点取出后，应检查其尺寸及形状，尺寸公差应满足本标准第 4.3 节的规定，试件取出后应尽快进行试验。
- 2 试件放置试验机前，应将试件表面与上、下承压板面擦拭干净。
- 3 将试件直立放置在试验机的下压板或钢垫板上，并使试件轴心与下压板中心对准。
- 4 开动试验机，试件表面与上下承压板或钢垫板应均匀接触。
- 5 在试验过程中应连续均匀加荷，加荷速度应取 1.2MPa/s~1.4MPa/s。
- 6 手动控制压力机加荷速度时，当试件接近破坏开始急剧变形时，应停止调整试验机油门，直至破坏。然后记录破坏荷载。

6.2.4 试验结果计算及确定按下列方法进行：

1 超高性能混凝土试件轴心抗压强度应按下列式计算：

$$f_{cp} = \frac{F}{A} \quad (6.2.4)$$

式中： f_{cp} ——超高性能混凝土轴心抗压强度（MPa），计算结果应精确至 0.1MPa；

F ——试件破坏荷载（N）；

A ——试件承压面积（mm²）。

2 超高性能混凝土轴心抗压强度值的确定应符合本标准第 6.1.5 条中第 2 款的规定。

6.3 静力受压弹性模量试验

6.3.1 测定超高性能混凝土弹性模量试验的试件尺寸和数量应符合下列规定：

1 标准试件应是边长为 100mm×100mm×300mm 的棱柱体试件；

2 每次试验应制备 6 个试件，其中 3 个用于测定轴心抗压强度，另外 3 个用于测定静力受压弹性模量。

6.3.2 试验仪器设备应符合下列规定：

1 压力试验机应符合本标准第 6.1.3 条中第 1 款的规定。

2 用于微变形测量的仪器应符合下列规定：

1) 用于微变形测量的仪器应包括千分表、电阻应变片、激光测长仪、引伸仪或位移传感器等。采用千分表或位移传感器时应备有微变形测量固定架，试件的变形通过微变形测量固定架传递到千分表或位移传感器。采用电阻应变片或位移传感器测量试件变形时，应备有数据自动采集系统，条件许可时，可采用荷载和位移数据同步采集系统。

2) 当采用千分表和位移传感器时，其测量精度应为±0.001mm；当采用电阻应变片、激光测长仪或引伸仪时，其测量精度应为±0.001%。

3) 标距应为150mm。

6.3.3 弹性模量试验应按下列步骤进行：

1 试件到达试验龄期时，从养护地点取出后，应检查其尺寸及形状，尺寸公差应满足本标准第 4.3 节的规定，试件取出后应尽快进行试验。

2 取一组试件按照本标准第 6.2 节的规定测定超高性能混凝土的轴心抗压强度 (f_{cp})，另一组用于测定超高性能混凝土的弹性模量。

3 在测定超高性能混凝土弹性模量时，微变形测量仪应安装在试件两侧的中线上并对称于试件的两端。当采用千分表或位移传感器时，应将千分表或位移传感器固定在变形测量架上，试件的测量标距应为 150mm，由标距定位杆定位，然后将变形测量架通过紧固螺钉固定。

当采用电阻应变仪测量变形时，应变片的标距应为 150mm，试件从养护室取出后，应对贴应变片区域的试件表面缺陷进行处理，可采用电吹风吹干试件表面后，尽快在试件的两侧中部用 502 胶水粘贴应变片。

4 试件放置试验机前，应将试件表面与上、下承压板面擦拭干净。

5 将试件直立放置在试验机的下压板或钢垫板上，并使试件轴心与下压板中心对准。

6 开动试验机，试件表面与上下承压板或钢垫板应均匀接触。

7 加荷至基准应力为 0.5MPa 的初始荷载值 F_0 ，保持恒载 60s 并在以后的 30s 内记录每测点的变形读数 ε_0 。应立即连续均匀地加荷至应力为轴心抗压强度 f_{cp} 的 1/3 的荷载值 F_a ，保持恒载 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数 ε_a 。所用的加荷速度应符合本标准第 6.2.3 条中第 5 款的规定。

8 左右两侧的变形值之差与它们平均值之比大于 20% 时，应重新对中试件后重复本条第 6 款和第 7 款的规定。如果无法使其减少到小于 20% 时，则此次试验无效。

9 在确认试件对中符合本条第 8 款规定后，以与加荷速度相同的速度卸荷至基准应力 0.5MPa (F_0)，恒载 60s；然后用同样的加荷和卸荷速度以及 60s 的保持恒载 (F_0 及 F_a) 至少进行两次反复预压。在最后一次预压完成后，在基准应力 0.5MPa (F_0) 持荷 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数 ε_0 ；再用同样的加荷速度加荷至 F_a ，持荷 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数 ε_a ，如图 6.3.3 所示。

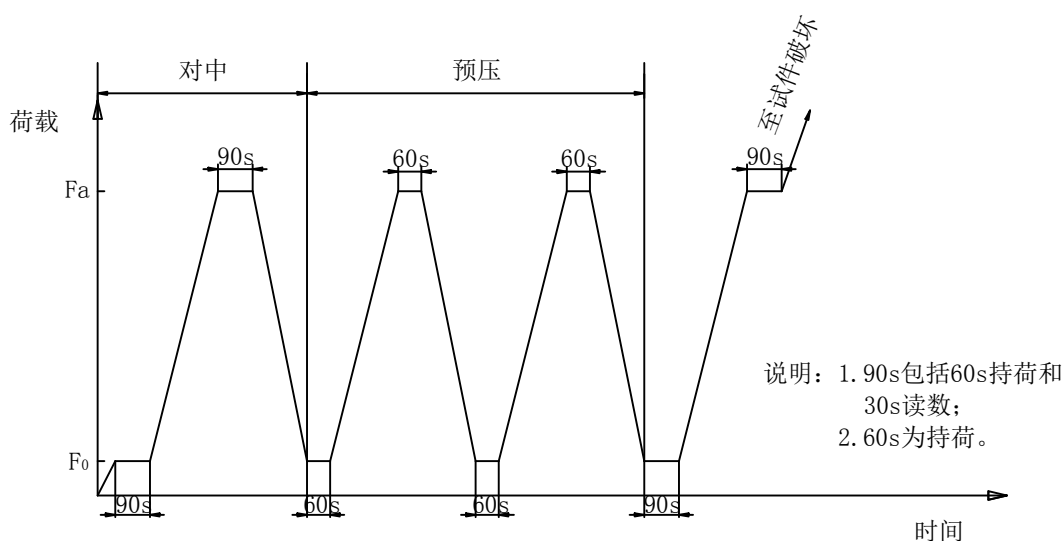


图 6.3.3 弹性模量试验加荷方法示意图

10 卸除变形测量仪，以同样的速度加荷至破坏，记录破坏荷载；如果测定弹性模量之后的试件抗压强度与 f_{cp} 之差超过 f_{cp} 的 20% 时，则应在报告中注明。

6.3.4 超高性能混凝土弹性模量试验结果计算及确定应按下列方法进行：

1 超高性能混凝土弹性模量值应按下式计算：

$$E_c = \frac{F_a - F_0}{A} \times \frac{L}{\Delta n} \quad (6.3.4-1)$$

$$\Delta n = \varepsilon_a - \varepsilon_0 \quad (6.3.4-2)$$

式中： E_c ——超高性能混凝土弹性模量（MPa），计算结果应精确至 100MPa；

F_a ——应力为 1/3 轴心抗压强度时的荷载（N）；

F_0 ——应力为 0.5MPa 时的初始荷载（N）；

A ——试件承压面积（ mm^2 ）；

L ——测量标距（mm）；

Δn ——最后一次从 F_0 加荷至 F_a 时试件两侧变形的平均值（mm）；

ε_a —— F_a 时试件两侧变形的平均值（mm）；

ε_0 —— F_0 时试件两侧变形的平均值（mm）；

2 应按 3 个试件测值的算术平均值作为该组试件的弹性模量值，应精确至 100MPa。如果其中有一个试件在测定弹性模量后的轴心抗压强度值与用以确定检验控制荷载的轴心抗压强度值相差超过后者

的 20%时，则弹性模量值应按另两个试件测值的算术平均值计算；如有两个试件超过上述规定时，则此次试验无效。

6.4 泊松比试验

6.4.1 进行超高性能混凝土泊松比试验的试件尺寸和数量应符合下列规定：

- 1 试件应采用边长为 100mm×100mm×300mm 的棱柱体试件；
- 2 每次试验应制备 6 个试件，其中 3 个用于测定轴心抗压强度，另外 3 个用于测定泊松比。

6.4.2 试验仪器设备应符合下列规定：

- 1 压力试验机应符合本标准第 6.1.3 条中第 1 款的规定。

- 2 用于微变形测量的仪器应符合下列规定：

1) 用于试件竖向微变形测量的仪器可包括千分表、电阻应变片、激光测长仪、引伸仪或位移传感器等，用于试件横向微变形测量的仪器宜为电阻应变片。采用千分表或位移传感器时应备有微变形测量固定架，试件的变形通过微变形测量固定架传递到千分表或位移传感器。采用电阻应变片或位移传感器测量试件变形时，应备有数据自动采集系统，条件许可时，可采用荷载和位移数据同步采集系统。

2) 当采用千分表和位移传感器时，其测量精度应为 $\pm 0.001\text{mm}$ ；当采用电阻应变片、激光测长仪或引伸仪时，其测量精度应为 $\pm 0.001\%$ 。

- 3) 竖向测量标距应为 150mm，横向测量标距应为 70mm。

6.4.3 泊松比试验应按下列步骤进行：

1 试件到达试验龄期时，从养护地点取出后，应检查其尺寸及形状，尺寸公差应满足本标准第 4.3 节的规定，试件取出后应尽快进行试验。

2 取一组试件按照本标准第 6.2 节的规定测定超高性能混凝土的轴心抗压强度 (f_{cp})，另一组用于测定超高性能混凝土的泊松比。

3 在测定超高性能混凝土泊松比时，用于测量试件竖向微变形的仪器应安装在试件两对侧面的竖向中线上并对称于试件的两端；用于测量试件横向微变形的应变计应粘贴在另外两对侧面的横向中线上，

并对称于相应侧面的竖向中线。

当用于测量试件竖向微变形的仪器采用千分表或位移传感器时，应将千分表或位移传感器固定在变形测量架上，试件的测量标距应为 150mm，由标距定位杆定位，然后将变形测量架通过紧固螺钉固定。

当采用电阻应变片测量竖向变形时，竖向测量标距应为 150mm；对于测量横向变形的电阻应变片，测量标距应为 70mm。试件从养护室取出后，应对贴应变片区域的试件表面缺陷进行处理，可采用电吹风吹干试件表面后，尽快在试件的两侧中部用 502 胶水粘贴应变片。

4 试件放置试验机前，应将试件表面与上、下承压板面擦拭干净。

5 将试件直立放置在试验机的下压板或钢垫板上，并使试件轴心与下压板中心对准。

6 开动试验机，试件表面与上下承压板或钢垫板应均匀接触。

7 加荷至基准应力为 0.5MPa 的初始荷载值 F_0 ，保持恒载 60s 并在以后的 30s 内记录每测点的变形读数 ϵ_0 和 ϵ_{t0} 。应立即连续均匀地加荷至应力为轴心抗压强度 f_{cp} 的 1/3 的荷载值 F_a ，保持恒载 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数 ϵ_a 和 ϵ_{ta} 。所用的加荷速度应符合本标准第 6.2.3 条中第 5 款的规定。

8 左右两侧的纵向或横向变形值之差分别与它们的平均值之比中，有一个比值大于 20% 时，应重新对中试件后重复本条第 7 款的规定。如果无法使其减少到小于 20% 时，则此次试验无效。

9 在确认试件对中符合本条第 8 款规定后，以与加荷速度相同的速度卸荷至基准应力 0.5MPa (F_0)，恒载 60s；然后用同样的加荷和卸荷速度以及 60s 的保持恒载 (F_0 及 F_a) 至少进行两次反复预压。在最后一次预压完成后，在基准应力 0.5MPa (F_0) 持荷 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数 ϵ_0 和 ϵ_{t0} ；再用同样的加荷速度加荷至 F_a ，持荷 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数 ϵ_a 和 ϵ_{ta} ，如图 6.4.3 所示。

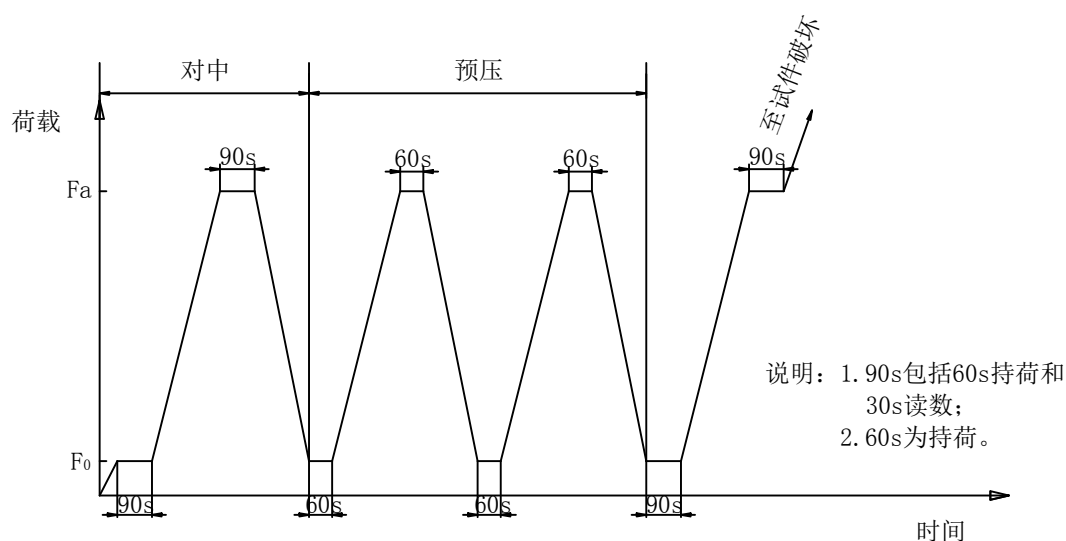


图 6.4.3 泊松比试验加荷方法示意图

10 卸除变形测量仪，以同样的速度加荷至破坏，记录破坏荷载；如果测定泊松比之后的试件轴心抗压强度与 f_{cp} 之差超过 f_{cp} 的 20% 时，则应在报告中注明。

6.4.4 超高性能混凝土泊松比试验结果计算及确定应按下列方法进行：

1 超高性能混凝土泊松比值应按下式计算：

$$\mu = \frac{\varepsilon_{ta} - \varepsilon_{t0}}{\varepsilon_a - \varepsilon_0} \quad (6.4.4)$$

式中： μ ——超高性能混凝土泊松比，计算结果应精确至 0.01；

ε_{ta} —— F_a 时试件两侧横向应变的平均值（ 10^{-6} ）；

ε_{t0} —— F_0 时试件两侧横向应变的平均值（ 10^{-6} ）；

ε_a —— F_a 时试件两侧竖向应变的平均值（ 10^{-6} ）；

ε_0 —— F_0 时试件两侧竖向应变的平均值（ 10^{-6} ）；

当变形测试结果单位为 mm 时，应通过标距换算为应变（ 10^{-6} ）；

2 应按 3 个试件测值的算术平均值作为该组试件的泊松比值，应精确至 0.01。如果其中有一个试件在测定泊松比后的轴心抗压强度值与用以确定检验控制荷载的轴心抗压强度值相差超过后者的 20% 时，则泊松比值应按另两个试件测值的算术平均值计算；如有两个试件超过上述规定时，则此次试验无效。

6.5 抗折强度与弯曲韧性试验

6.5.1 测定超高性能混凝土抗折强度及弯曲韧性试验的试件尺寸、数量及表面质量应符合下列规定：

- 1 标准试件应是边长为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件；
- 2 在试件长向中部 1/3 区段内表面不得有直径超过 5mm、深度超过 2mm 的孔洞；
- 3 每组试件应为 3 块。

6.5.2 试验采用的设备应符合下列规定：

1 压力试验机应符合本标准第 6.1.3 条中第 1 款的规定，试验机应能施加均匀、连续、速度可控的荷载。

2 抗折试验装置如图 6.5.2-1 所示，其应符合下列规定：

- 1) 双点加荷的钢制加荷头应使两个相等的荷载同时垂直作用在试件跨度的两个三分点处；
- 2) 与试件接触的两个支座头和两个加荷头应采用直径为 20mm~40mm、长度不小于 $b+10\text{mm}$ 的硬钢圆柱，支座立脚点固定铰支，其他 3 个应为滚动支点。

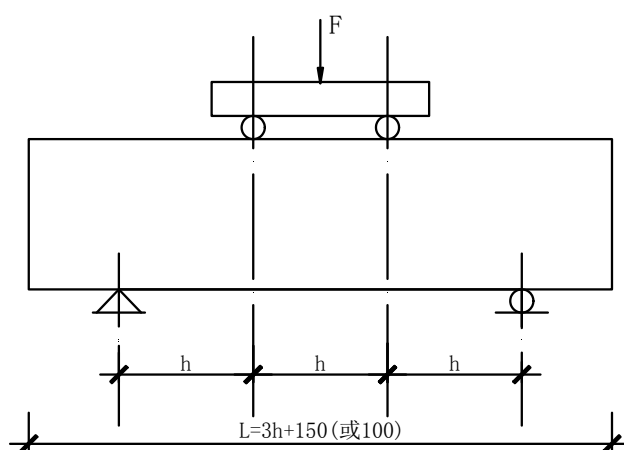


图 6.5.2-1 抗折试验装置

3 挠度测量装置（图 6.5.2-2）应包括型钢或铝材制作的横梁、固定横梁于试件侧面的螺栓、固定测量挠度仪表的螺栓以及粘贴于试件侧面中点的测量触点板。挠度测试系统应包括电阻位移计或 LVDT 位移计及配套的电测信号放大仪器，量程不应小于 5mm，精度不应低于 0.001mm。

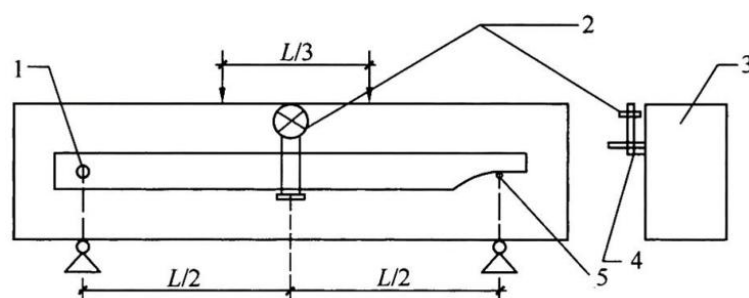


图 6.5.1-2 挠度测量装置示意

1—枢轴；2—千分表或位移计；3—试件；4—角状切片；5—滚动支座

6.5.3 抗折强度及弯曲韧性试验应按下列步骤进行：

1 试件到达试验龄期时，从养护地点取出后，应检查其尺寸及形状，尺寸公差应满足本标准第 4.3 节的规定，缺陷应满足本标准 6.5.1 条规定，试件取出后应尽快进行试验。应在试件中部测量其宽度和高度。

2 试件放置在试验装置前，应将试件表面擦拭干净，并在试件侧面划出加荷线位置。

3 试件安装时，可调整支座和加荷头位置，安装尺寸偏差不得大于 1mm（图 6.5.2-1）。试件的承压面应为试件成型时的侧面。支座及承压面与圆柱的接触面应平稳、均匀，否则应垫平。

4 按照图 6.5.1-2 的要求，安装挠度试验装置。仅测试抗折强度时，可不安装挠度测量装置。

5 试件安放好后，缓缓加荷至 1kN，停机检查试件与压头及支座的接触情况，确保试件不扭动，然后安装测量跨中挠度的仪表。安装完测量变形的仪表后，首先接通测试线路并做空载调试，然后做预加载调试，待测试系统工作正常后方可进行正式试验。

6 对试件进行连续、均匀加载，弯曲韧性试验加载速率宜为 0.1mm/min，抗折强度试验加载速率应为 0.08 MPa/s~0.10 MPa/s。

7 当满足下列条件之一时，应终止加载，停止试验：

- 1) 试件进入应变软化阶段后拉应力低于抗拉强度的 10%时；
- 2) 试件测试挠度满足试验计算需求；
- 3) 折断。

8 停止试验后，记录试件下边缘断裂位置，若试件在受拉面三分点以外断裂，则该试件为无效试件。

9 绘制荷载—挠度曲线。当只需测量抗折强度而无需测量弯曲韧性时，可不绘制荷载—挠度曲线。

10 手动控制压力机加荷速度时，当试件接近破坏时，应停止调整试验机油门，直至破坏，并按照本条 8 和 9 款记录试件下边缘断裂位置和绘制荷载—挠度曲线。

6.5.4 超高性能混凝土抗折强度试验结果计算及确定应按下列方法进行。

1 抗折强度试验结果计算及确定应按下列方法进行。

1) 若试件下边缘断裂位置处于二个集中荷载作用线之间，则试件的抗折强度 f_f (MPa) 按下式计算：

$$f_f = \frac{F_{\max} L}{bh^2} \quad (6.5.4-1)$$

式中： f_f ——超高性能混凝土抗折强度 (MPa)，计算结果应精确至 0.1MPa；

F_{\max} ——抗折试验过程中的最大荷载 (N)；

L ——试验梁支座间的跨距 (mm)；

b ——试件截面的宽度 (mm)；

h ——试件截面的高度 (mm)。

2) 抗折强度值的确定应符合下列规定：

①取 3 个试件测值的算术平均值作为该组试件的抗折强度值，应精确至 0.1MPa；

②3 个测值中的最大值或最小值中当有一个与中间值的差值超过中间值的 15% 时，应把最大值和最小值一并舍除，取中间值作为该组试件的抗折强度值；

③当最大值和最小值与中间值的差值均超过中间值的 15% 时，该组试件的试验结果无效。

3) 3 个试件中有一个折断面位于两个集中荷载之外时，或试件为无效试件时，超高性能混凝土抗折强度值应以另外两个试件的试验结果计算：当这两个测值的差值不大于这两个测值的较小值的 15% 时，该组试件的抗折强度值应按这两个测值的平均值计算，否则该组试件的试验结果无效。当有两个试件的下边缘断裂位置位于两个集中荷载作用线之外时，或两个以上试件为无效试件时，该组试件试验无效。

6.5.5 超高性能混凝土弯曲韧性试验结果计算及确定应按下列方法进行。

1 抗弯初裂强度试验结果计算及确定按下列方法进行：

1) 将直尺或使用科学绘图软件绘制的直线与荷载—挠度曲线的线性部分重叠放置确定初裂点 A (图 6.5.5-1)。 A 点的纵坐标为初裂荷载 F_{cr} (N)。如果初裂前荷载—挠度曲线凹面朝上, 则将直尺与跨中挠度轴线交点 O 作为新原点 (图 6.5.5-1), $O'B$ 的长度为初裂挠度 δ_{cr} (mm), 线段 $O'A$ 作为后续计算基础; 如果初裂前荷载—挠度曲线凸面朝上, A 点的纵坐标为初裂荷载 F_{cr} (N), 横坐标为初裂挠度 δ_{cr} (mm), 线段 $O'A$ 作为后续计算基础。

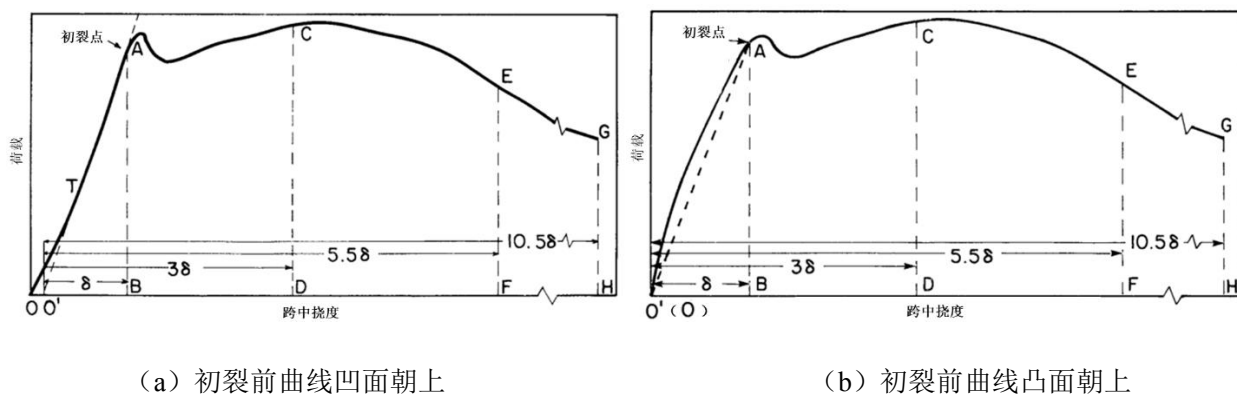


图 6.5.5-1 弯曲韧性指数计算简图

2) 根据初裂荷载按下式计算抗弯初裂强度:

$$f_{cr} = \frac{F_{cr} L}{bh^2} \quad (6.5.4-2)$$

式中: f_{cr} ——超高性能混凝土抗弯初裂强度 (MPa), 计算结果应精确至 0.1MPa;

F_{cr} ——试件初裂荷载 (N);

L ——试验梁支座间的跨距 (mm);

b ——试件截面的宽度 (mm);

h ——试件截面的高度 (mm)。

3) 抗弯初裂强度值的确定方法应符合本标准第 6.5.4 条第 1 款的要求。

2 弯曲韧性指数的计算及确定按下列方法进行:

1) 以 O' 为原点, 按 1.0、3.0、5.5 和 10.5 初裂挠度 δ_{cr} 的倍数, 在横轴上确定 B 、 D 、 F 和 H 点, 用数学工具求得 $\triangle O'AB$ 、 $O'ACD$ 、 $O'AEF$ 和 $O'AGH$ 的面积, 分别记为 Ω_{δ} 、 $\Omega_{3\delta}$ 、 $\Omega_{5.5\delta}$ 、 $\Omega_{10.5\delta}$ 。

2) 每个试件的弯曲韧性指数应按下列公式求得, 弯曲韧性指数应精确至 0.01:

$$I_5 = \frac{\Omega_{3\delta}}{\Omega_{\delta}} \quad (6.5.4-3)$$

$$I_{10} = \frac{\Omega_{5.5\delta}}{\Omega_{\delta}} \quad (6.5.4-4)$$

$$I_{20} = \frac{\Omega_{10.5\delta}}{\Omega_{\delta}} \quad (6.5.4-5)$$

3) 以三个试件的算术平均值作为该组试件的弯曲韧性指数。

3 等效弯曲强度和弯曲韧性比的计算及确定按下列方法进行：

1) 按下式计算试件的等效弯曲强度 f_e (图 6.5.5-2)：

$$f_e = \frac{\Omega_k L}{bh^2 \delta_k} \quad (6.5.4-6)$$

式中： f_e ——等效弯曲强度 (MPa)；

Ω_k ——跨中挠度为 $L/150$ 的荷载-挠度曲线下的面积 (N·mm)；

δ_k ——跨中挠度为 $L/150$ 时的挠度值 (mm)；

L ——试验梁支座间的跨距 (mm)；

b ——试件截面的宽度 (mm)；

h ——试件截面的高度 (mm)。

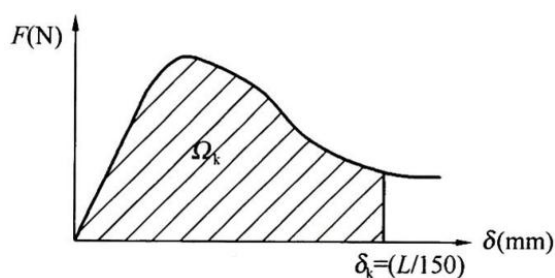


图 6.5.5-2 等效弯曲强度计算

2) 弯曲韧性比应按下式计算：

$$R_e = \frac{f_e}{f_{cr}} \quad (6.5.4-7)$$

式中： R_e ——超高性能混凝土弯曲韧性比；

f_e ——等效弯曲强度 (MPa)；

f_{cr} ——抗弯初裂强度 (MPa)。

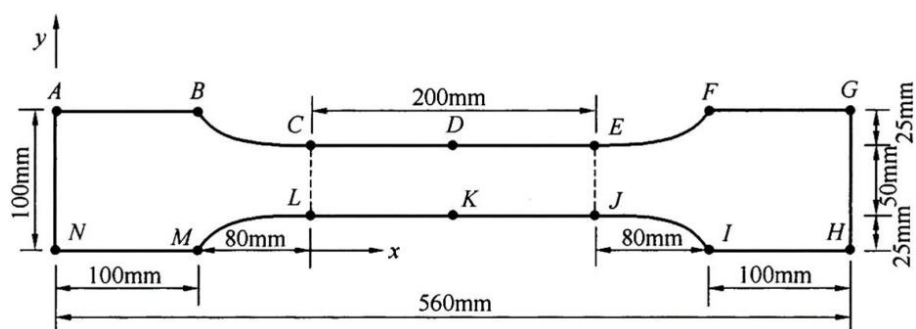
2) 以三个试件的算术平均值作为该组试件的等效弯曲强度和弯曲韧性比。

6.6 抗拉性能试验

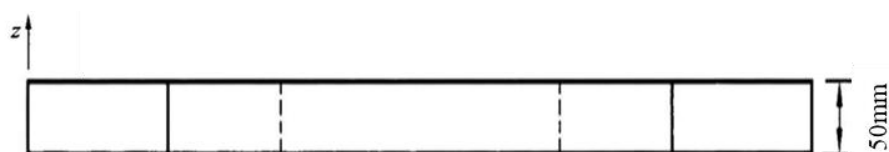
6.6.1 测定超高性能混凝土抗拉性能试验的试件尺寸、数量和加固应符合下列规定：

1 抗拉性能试验试件尺寸见图 6.6.1-1，其中 B-C 弧段由包括 B、C 点在内的 21 个点连接而成的 20 条线段组成，每个点的坐标应按表 6.6.1 确定。F-E、I-J、M-L 弧段构成同 B-C 弧段。

2 抗拉性能试验试件的厚度为 50mm。



(a) 试件俯视图



(b) 试件正视图

图 6.6.1-1 抗拉性能试验试件尺寸示意

表 6.6.1 B-C 弧段内各连接点坐标

点	1(B点)	2	3	4	5	6	7
x/mm	100.0	104.0	108.0	112.0	116.0	120.0	124.0
y/mm	100.0	94.4	90.0	86.6	84.0	81.9	80.4
点	8	9	10	11	12	13	14
x/mm	128.0	132.0	136.0	140.0	144.0	148.0	152.0
y/mm	79.1	78.2	77.4	76.8	76.4	76.0	75.8
点	15	16	17	18	19	20	21(C点)
x/mm	156.0	160.0	164.0	168.0	172.0	176.0	180.0
y/mm	75.6	75.4	75.3	75.2	75.1	75.0	75.0

3 抗拉性能试验前宜对试件进行加固处理，试件加固应符合以下规定：

- 1) 加固区域应包括试件两端夹持段的前-后面（图 6.6.1-2）；
- 2) 宜采用碳纤维布进行加固，碳纤维布经线方向与试件长度方向（直拉方向）一致；根据预计的 UHPC 抗拉性能等级加固层数宜为 1~2 层；碳纤维布单位质量面积不宜小于 $200g/m^2$ ，力学性能应符合 GB/T 50728 高强 I 级的要求；
- 3) 应采用与碳纤维布配套的粘贴用树脂材料，包括底层树脂、浸渍树脂等；浸渍树脂力学性能应符合 GB/T 50728 I 类 A 级胶的要求。

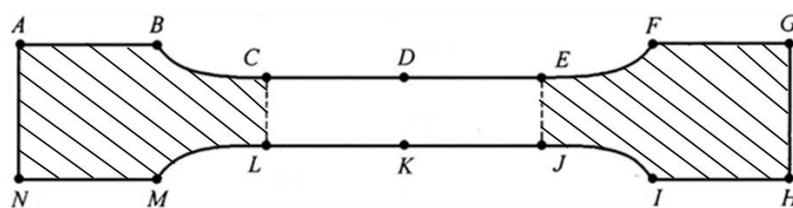


图 6.6.1-2 抗拉性能试验试件加固示意

4 每组试件数量应为 6 个。

6.6.2 试验采用的设备应符合下列规定。

1 拉力试验机应符合下列规定：

- 1) 试件破坏荷载宜大于拉力试验机全量程的 20%且宜小于拉力试验机全量程的 80%；
- 2) 示值相对误差应为 $\pm 1\%$ ；
- 3) 应具有加荷速度指示装置或加荷速度控制装置，并能均匀、连续地加荷；

- 4) 其拉伸间距不应小于 800mm;
- 5) 其他要求应符合现行国家标准《液压式万能试验机》GB/T 3159 和《试验机通用技术要求》GB/T 2611 的有关规定。

2 用于微变形测量的仪器装置应符合下列规定:

- 1) 用于微变形测量的仪器宜采用位移传感器,也可采用激光测长仪、引伸仪等。采用位移传感器时应备有微变形测量固定架,试件的变形通过微变形测量固定架传递到位移传感器。采用位移传感器测量试件变形时,应备有数据自动采集系统,条件许可时,可采用荷载和位移数据同步采集系统;
- 2) 当采用位移传感器时,其测量精度应为 $\pm 0.001\text{mm}$;当采用激光测长仪或引伸仪时,其测量精度应为 $\pm 0.001\%$;
- 3) 微变形测量仪的标距宜为 200mm;
- 4) 微变形测量仪数量宜为 4 个。

6.6.3 抗拉性能试验应按下列步骤进行:

1 每个试件在进行抗拉性能试验时,应同时测定弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变、弹性拉伸应力、拉伸弹性模量、抗拉强度、抗拉应变 5 个参数,对于抗拉应变小于 1000×10^{-6} 的试件尚应测定残余抗拉强度。

2 到达试验龄期前 7d 时,将试件从养护室取出,待表面水分干燥后,选用适当的打磨机具将试验试件粘贴表面打磨平整。按厂家说明配制粘贴用树脂材料,依次涂刷底层树脂和浸渍树脂,并采用专用的辊子顺纤维方向多次辊压并挤除气泡,压时不得损伤碳纤维布。待粘贴树脂固化后,转移至原养护室继续至规定试验龄期。

3 到达试验龄期后,将试件放置于试验机上下夹具中,保证上下夹具连接件与超高性能混凝土试件的中轴线一致并对中。在试件弧形段与夹具接触部位宜放置 0.5mm~1mm 厚的橡胶垫片。将试件上端与试验机上夹头固定,升降拉力试验机至合适高度,调整试件方向,将试件下端固定。

4 当采用位移传感器测量变形时,应将位移传感器固定在变形测量架,并由标距定位杆进行定位,然后将变形测量架通过紧固螺钉固定在试件中部。从试件取出至试验完毕,不宜超过 4h。应提前做好变形测量的准备工作。

5 启动试验机进行预拉,预拉荷载相当于破坏荷载的 15%~20%。预拉时,应测读 4 个侧面的应变值,分别计算对侧面的偏心率。当试件偏心率大于 15%时,应对试件重新进行对中调整。偏心率应按

下式计算：

$$e = \frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}{|\varepsilon_1 + \varepsilon_2|} \times 100\% \quad (6.6.3)$$

式中： e ——偏心率（%）；

ε_1 、 ε_2 ——分别为试件对侧面的应变值。

6 预拉完毕后，进行正式测试。拉伸试验时，对试件进行连续、均匀加荷，宜采用位移控制加荷，加荷速率宜控制在 0.2mm/min。当采用位移传感器测量变形时，试件测量标距内的变形应由数据采集系统自动记录，绘制荷载—变形曲线。

7 当满足下列条件之一时，应终止加载，停止试验：

- 1) 试件进入拉伸应变软化阶段后拉应力低于抗拉强度的 30%时；
- 2) 试件的抗拉应变达到 10000×10^{-6} 。
- 3) 拉断。

6.6.4 超高性能混凝土抗拉性能试验结果计算及确定应按下列方法进行：

1 确定抗拉弹性极限点。在位移传感器和数据采集系统绘制的荷载—变形曲线中，由线性段转为非线性段的点作为弹性极限点。

2 弹性极限抗拉强度应按下列公式计算：

$$f_{te} = \frac{F_{te}}{A} \quad (6.6.4-1)$$

式中： f_{te} ——弹性极限抗拉强度（MPa），计算结果应精确至 0.1MPa；

F_{te} ——弹性极限荷载（N），取弹性极限点处的荷载；

A ——抗拉试件中部截面积（mm²）。

3 弹性极限拉应变应按下列公式计算：

$$\mu_{te} = \frac{l_{te}}{L} \quad (6.6.4-2)$$

式中： μ_{te} ——弹性极限拉应变，计算结果应精确至 10×10^{-6} ；

l_{te} ——弹性极限点处变形（mm）；

L ——测试标距（mm）。

4 弹性拉伸应力应按下式计算：

$$f_{200} = \frac{F_{t200}}{A} \quad (6.6.4-3)$$

式中： f_{200} ——弹性拉伸应力（MPa），计算结果应精确至 0.1MPa；

F_{t200} ——拉应变为 200×10^{-6} 时的荷载（N）；

A ——抗拉试件中部截面积（ mm^2 ）。

5 拉伸弹性模量应按下式计算：

$$E_{te} = \frac{f_{te}}{\mu_{te}} \quad (6.6.4-4)$$

式中： E_{te} ——拉伸弹性模量（MPa），计算结果应精确至 100MPa；

f_{te} ——弹性极限抗拉强度（MPa）；

μ_{te} ——弹性极限拉应变。

6 抗拉强度应按下式计算：

$$f_t = \frac{F_{\max}}{A} \quad (6.6.4-5)$$

式中： f_t ——抗拉强度（MPa），计算结果应精确至 0.1MPa；

F_{\max} ——抗拉试验加荷过程中的最大荷载（N）；

A ——抗拉试件中部截面面积（ mm^2 ）。

7 抗拉应变应按下式计算：

$$\mu_t = \frac{l_t}{L} \quad (6.6.4-6)$$

式中： μ_t ——抗拉应变，计算结果应精确至 10×10^{-6} ；

l_t ——最大拉应力处变形（mm），取荷载—变形曲线中最大拉应力处的试件变形；

L ——测试标距（mm）。

8 残余抗拉强度应按下式计算：

$$f_{tr} = \frac{F_{tr}}{A} \quad (6.6.4-7)$$

式中： f_{tr} ——残余抗拉强度（MPa），计算结果应精确至 0.01MPa；

F_{tr} ——抗拉应变小于 1000×10^{-6} 的试件拉伸试验过程中拉应变为 1500×10^{-6} 时的荷载（N）；

A ——抗拉试件中部截面面积（ mm^2 ）。

9 试验结果应按下列要求确定：

- 1) 开裂位置位于标距内的试件为有效拉伸试件，有效拉伸试件数量不应小于 4 个。当有效拉伸试件数量小于 4 个时，该组试件无效；
- 2) 应以所有有效拉伸试件测值的平均值确定弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变、弹性拉伸应力、拉伸弹性模量、抗拉强度、抗拉应变的最终试验结果。
- 3) 当有试件抗拉应变小于 1000×10^{-6} 时，尚应给出单个试件的残余抗拉强度测值。

6.7 劈裂抗拉强度试验

6.7.1 测定超高性能混凝土劈裂抗拉强度试验的试件尺寸和数量应符合下列规定：

- 1 标准试件应是边长为 150mm 的立方体试件；
- 2 每组试件应为 3 块。

6.7.2 试验仪器设备应符合下列规定：

- 1 压力试验机应符合本标准第 6.1.3 条中第 1 款的规定。
- 2 垫块应采用半径为 75mm 的钢制弧形垫块，其横截面尺寸如图 6.7.2-1 所示，垫块的长度应与试件相同。

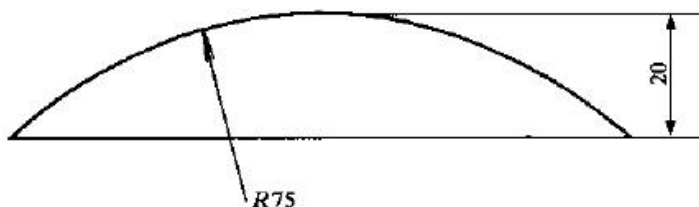


图 6.7.2-1 垫块（mm）

3 垫条应由普通胶合板或硬质纤维板制成，宽度应为 20mm，厚度应为 3mm~4mm，长度不应小于试件长度，垫条不得重复使用。普通胶合板应满足现行国家标准《普通胶合板》GB/T 9846 中一等品及

以上有关要求，硬质纤维板密度不应小于 900kg/m^3 ，表面应砂光，其他性能应满足现行国家标准《湿法硬质纤维板》GB/T 12626 的有关要求。

4 定位架应为钢支架，如图 6.7.2-2 所示。

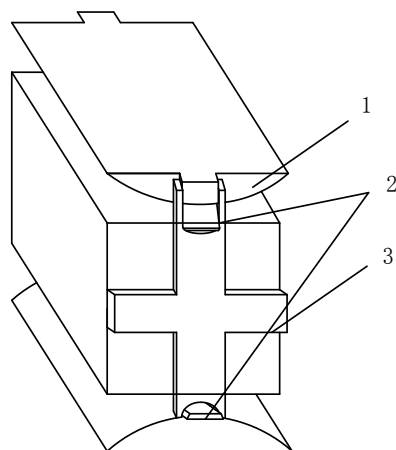


图 6.7.3-2 定位支架示意

1—垫块；2—垫条；3—支架

6.7.3 劈裂抗拉强度试验应按下列步骤进行：

1 试件到达试验龄期时，从养护地点取出后，应检查其尺寸及形状，尺寸公差应满足本标准第 4.3 节的规定，试件取出后应尽快进行试验。

2 试件放置试验机前，应将试件表面与上、下承压板面擦拭干净。在试件成型时的顶面和底面中部划出相互平行的直线，准确定出劈裂面的位置。

3 将试件放在试验机下承压板的中心位置，劈裂承压面和劈裂面应与试件成型时的顶面垂直；在上、下压板与试件之间垫以圆弧形垫块及垫条各一条，垫块与垫条应与试件上、下面的中心线对准并与成型时的顶面垂直。宜把垫条及试件安装在定位架上使用（如图 6.7.2-2 所示）。

4 开动试验机，试件表面与上下承压板或钢垫板应均匀接触。

5 在试验过程中应连续均匀地加荷，加载速度宜取 $0.08\text{ MPa/s}\sim 0.10\text{ MPa/s}$ 。

6 采用手动控制压力机加荷速度时，当试件接近破坏时，应停止调整试验机油门，直至破坏。然后记录破坏荷载。

7 断裂面应垂直于承压面：观察断裂面是否垂直于承压面，如不垂直即为不正常断裂，应做好试验

记录。

6.7.4 超高性能混凝土劈裂抗拉强度试验结果计算及确定应按下列方法进行：

1 超高性能混凝土劈裂抗拉强度应按下列公式计算：

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (6.7.4)$$

式中 f_{ts} ——超高性能混凝土劈裂抗拉强度（MPa），计算结果应精确至 0.01MPa；

F ——试件破坏荷载（N）；

A ——试件劈裂面面积（mm²）；

2 超高性能混凝土劈裂抗拉强度值的确定应符合下列规定：

- 1) 应以三个试件测值的算术平均值作为该组试件的劈裂抗拉强度值，应精确至0.01MPa；
- 2) 三个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的15%时，则应把最大及最小值一并舍除，取中间值作为该组试件的劈裂抗拉强度值；
- 3) 如最大值和最小值与中间值的差均超过中间值的15%，则该组试件的试验结果无效。

6.8 粘结强度试验

6.8.1 本方法适用于测定超高性能混凝土与既有普通混凝土之间的粘结强度。

6.8.2 试验仪器设备应符合本标准 6.7.2 条中的规定。

6.8.3 超高性能混凝土粘结强度试验应按下列步骤进行：

- 1 用与被粘结构物混凝土相近的原材料和配合比，成型 3 块 150mm×150mm×150mm 的试件，标准养护 14d 后取出，参照本标准第 6.7 条将试件劈成六块待用。
- 2 应将劈开混凝土试件的劈开面清洗干净并保持湿润状态，垂直放入 150mm 立方体试模一侧，试件光面紧贴试模壁，劈开面与试模之间形成尺寸约为 150mm×150mm×75mm 的空间。
- 3 拌制超高性能混凝土，一次性浇入已放置混凝土试块的试模中并按本标准第 4.2 条规定，成型密实。超高性能混凝土扩展度小于 650mm 时，宜用振动台振实。
- 4 试件达到养护龄期时，从养护地点取出后，按本标准第 6.7 条将粘结面作为劈裂面，进行粘结强

度测试。

6.8.4 超高性能混凝土粘结强度试验结果计算及确定应按下列方法进行

1 超高性能混凝土粘结强度应按下式计算：

$$f_b = \frac{2P}{\pi A} = 0.637 \frac{P}{A} \quad (6.8.4)$$

式中： f_b ——粘结强度（MPa），计算结果应精确至 0.01MPa；

P ——破坏荷载（N）；

A ——试件粘结面面积（ mm^2 ）；

2 在 6 块试件测值中，应剔除最大值和最小值，以其余 4 个测值的平均值，作为该组试件的粘结强度值，应精确至 0.01MPa。

6.9 超高性能混凝土与钢筋的握裹强度试验

6.9.1 试验仪器设备应符合下列规定：

1 试模的规格应为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ ，试模应能埋设一水平钢筋，水平钢筋轴线距离模底应为 75mm。埋入的一端应恰好嵌入模壁，予以固定，另一端由模壁伸出，作为加力之用（图 6.9.1-1）。

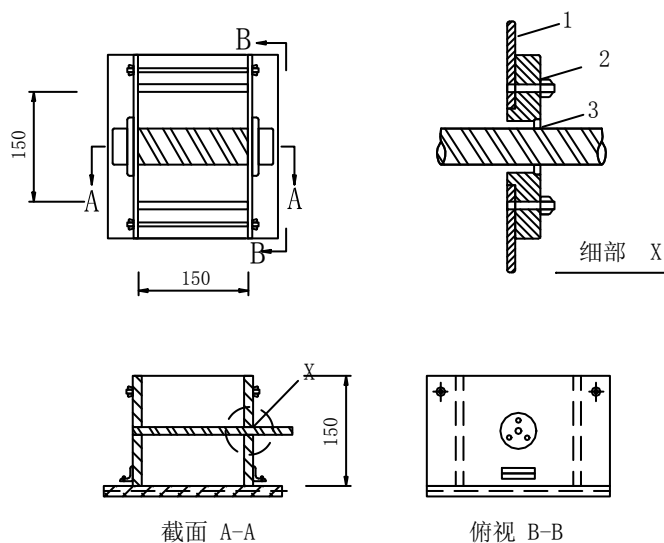


图 6.9.1-1 握裹强度试模装置（mm）

1-模板；2-固定圈；3-用橡皮圈堵塞

2 握裹强度试验装置如图 6.9.1-2 所示。试件夹具系两块面积为 250mm×150mm、厚度为 30mm 的钢板，钢板材质应为 45 号钢。应用 4 根直径 18mm 的 HRB400 钢筋穿入。上端钢板附有直径为 25mm 的拉杆，拉杆下端套入钢板并成球面相接，上端供万能机夹持。另应有 150mm×150mm×10mm 钢垫板一块，中心开有直径 40mm 的圆孔，垫于试件与夹头下端钢板之间。

3 位移测量仪器，可用千分表或 LVDT 位移计，精度应为±0.001mm；

4 仪表固定架应由金属制成，横跨试件表面，并可用止动螺丝固定在试件上。上部中央有孔，可夹持千分表，使之直立，量杆朝下。

5 拉力试验机应符合下列规定：

1) 试件破坏荷载宜大于拉力试验机全量程的20%且宜小于拉力试验机全量程的80%；

2) 示值相对误差应为±1%；

3) 应具有加荷速度指示装置或加荷速度控制装置，并应能均匀、连续地加荷；

4) 其他要求应符合现行国家标准《液压式万能试验机》GB/T 3159和《试验机通用技术要求》GB/T 2611中的有关规定。

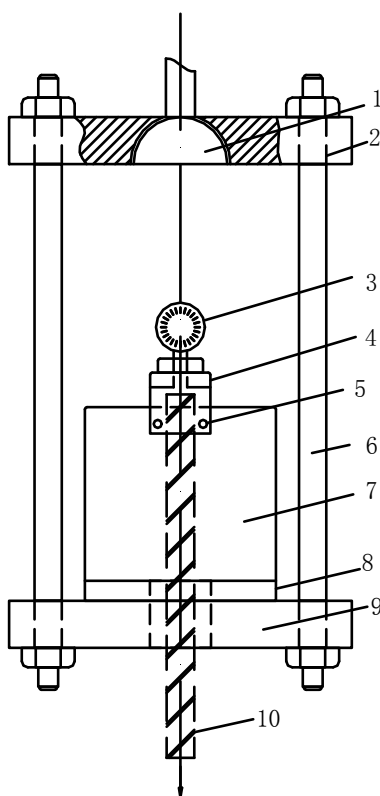


图 6.9.1-2 握裹强度试验装置示意图

1-带球座拉杆；2-上端钢板；3-千分表或LVDT 位移计；4-仪表固定架；5-止动螺丝；6-钢杆；

7-试件；8-垫板；9-下端钢板；10-埋入试件的钢筋

6.9.2 混凝土与钢筋的握裹强度试验应按下列步骤进行：

1 试验用带肋钢筋 HRB400，性能应符合 GB1499.2 的规定，其公称直径为 20mm。钢筋应具有足够的长度供万能机夹持和装置量表，长度宜取 500mm，试验中采用的钢筋尺寸和形状均应相同。成型前钢筋应用钢丝刷刷净，并用丙酮或乙醇擦试，不得有锈屑和油污存在。钢筋的自由端顶面应光滑平整，并与试模预留孔吻合。也可用符合 GB 1499.1 的公称直径为 20mm 的 HPB300 热轧光圆钢筋或工程中实际使用的其它钢筋，要求和处理方法同带肋钢筋。

2 应按本标准 4.2 节的有关规定制作试件，且应以六个试件为一组。安装钢筋时，钢筋自由端嵌入模壁，穿钢筋的模壁孔应用橡皮圈和固定圈填满固定钢筋，并不得漏浆、漏水。钢筋与试模应成直角，允许公差 0.5°。

3 试件成型后直至试验龄期，特别在拆模时，不得碰动钢筋，拆模时间以 2d 为宜。拆模时应先取下橡皮固定圈，再将套在钢筋上的试模小心取下。

4 到试验龄期时，应将试件从养护室取出，擦拭干净，检查外观，用卡尺测量钢筋埋入混凝土中的长度（精确到 0.1mm），据此计算埋入超高性能混凝土中的钢筋表面积（A）。试件不得有明显缺损或钢筋松动、歪斜，并应尽快试验。

5 将试件套上中心有孔的垫板，然后装入已安装在拉力试验机上的试验夹具中，使拉力试验机的下夹头将试件的钢筋夹牢。

6 在试件上安装仪表固定架和位移测量仪器，应使位移测量仪器测杆端垂直向下，与略伸出试件表面的钢筋顶面相接触。

7 加荷前应检查位移测量仪器量测杆与钢筋顶面接触是否良好、位移测量仪器是否灵活，并进行适当的调整。

8 记下位移测量仪器的初始读数后，开动拉力试验机，以不超过 400N/s 的加荷速度拉拔钢筋。试验过程中，如人工测读，记录每加荷 1000N~5000N 相应的位移测量仪器读数。

9 到达下列任何一种情况时应停止加荷：

1) 钢筋达到屈服点；

- 2) 超高性能混凝土发生破裂;
- 3) 钢筋的滑动变形超过0.1mm。

6.9.3 超高性能混凝土与钢筋的握裹强度试验结果计算及确定应按下列方法进行。

- 1 将各级荷载下的位移测量仪器读数减去初始读数，即得该荷载下的滑动变形。
- 2 当采用带肋钢筋时，以六个试件在各级荷载下滑动变形的算术平均值为横坐标，以荷载为纵坐标，绘出荷载-滑动变形关系曲线。取滑动变形 0.01mm、0.05mm、0.10mm，在曲线上查出相应的荷载。

混凝土与钢筋的握裹强度应按下列公式计算：

$$\tau = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3A} \quad (6.9.43-1)$$

$$A = \pi DL \quad (6.9.43-2)$$

式中： τ ——钢筋握裹强度（MPa），计算结果精确至 0.1MPa；

P_1 ——滑动变形为 0.01mm 时的荷载（N）；

P_2 ——滑动变形为 0.05mm 时的荷载（N）；

P_3 ——滑动变形为 0.10mm 时的荷载（N）；

A ——埋入混凝土的钢筋表面积（mm²）；

D ——钢筋的公称直径（mm）；

L ——钢筋埋入的长度（mm）；

3 当采用光面钢筋时，可取六个试件拔出试验时最大荷载的平均值除以埋入超高性能混凝土中的钢筋表面积即得钢筋握裹强度，应精确至 0.1MPa。

4 光面钢筋拔出试验可绘出荷载-滑动变形关系曲线供分析。

5 采用工程中实际使用的其它钢筋时，应注明钢筋的类型、直径及超高性能混凝土配合比等条件。

6.10 线膨胀系数试验

6.10.1 试验仪器设备应符合下列规定：

1 带有搅拌器的自动控制恒温水箱，大小应视一次试验试件的多少而定。要求箱内水面没过试件筒顶 50mm 左右，温度控制精度应在 0.5℃ 以内。

2 量测仪器：差动式电阻应变计，测距 250mm；数字电桥；长杆温度计，测温范围应为 0℃~100℃，精度应为 0.1℃。

3 试模应为直径 200mm，高 500mm 的带盖白铁皮筒。

4 另外应有 2mm~3mm 厚的橡皮板或 0.3mm~0.5mm 沥青隔离层、胶布等。

6.10.2 超高性能混凝土线膨胀系数试验应按下列步骤进行：

1 应检查和率定应变计。

2 密封试件桶应不渗水不透气。在密封桶内壁衬一层厚 2mm~3mm 橡皮板或涂抹一层厚 0.3mm~0.5mm 沥青隔离层。

3 将应变计垂直固定在试件桶中心，如图 6.10.2 所示，并注意在成型时不应使应变计损坏。

4 成型试件前、后，量测应变计的电阻及电阻比，作好记录。

5 将超高性能混凝土拌合物一次性装入密封桶内。超高性能混凝土扩展度小于 650mm 时，宜用振动台振实。每组试件应为 2 个。

6 试件成型后，应尽快将密封桶的盖板紧贴试件端部盖好，周边及应变计电缆出口处应密封，以防止试件水分散失，并应放置于温度为 20℃±2℃ 的室内。

7 将养护 7d 后的试件放入恒温水箱内，箱中水面应没过试件顶面 50mm 以上。水的起始温度可为 10℃~20℃。

8 应控制水温使其恒定，相隔 1h 温差不应超过 0.1℃。量测应变计的电阻和电阻比，并用温度计测读水温。当试件中心温度与水温一致时记下读数，即为试验初始温度的测值。为使箱中的水温均匀，应经常开动搅拌器。

9 调整恒温箱温度控制器，使水温上升到 60℃ 左右，恒温后记下试件中心温度与水温一致时的电阻、电阻比和水温，即为试验终止时的测值。

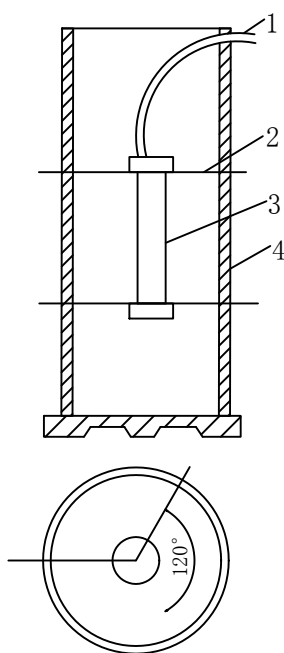


图 6.10.2 应变计安装示意图

1-电缆；2-24号铅丝；3-应变计；4-铁模

6.10.3 试验结果计算及确定应按下列方法进行：

1 试件的中心温度及应变值分别应按下列公式计算：

$$\theta = a'(R_t - R_0) \quad (6.10.3-1)$$

$$\varepsilon_m = f' \Delta Z + ba'(R_t - R_0) \quad (6.10.3-2)$$

式中： θ ——试件的中心温度（℃）；

ε_m ——混凝土试件的应变值（ 10^{-6} ）；

R_t ——试验终止时应变计的电阻（ Ω ）；

R_0 ——试验开始时应变计的电阻（ Ω ）；

a' ——应变计温度灵敏度系数（ $^{\circ}\text{C}/\Omega$ ）；

b ——应变计温度补偿系数（ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）；

f' ——应变计灵敏度（ $10^{-6}/0.01\%$ ）；

ΔZ ——电阻比变化量，即试验终止温度的电阻比与初始温度电阻比之差值。

2 超高性能混凝土的线膨胀系数应按下列公式计算：

$$\alpha = \frac{\varepsilon_m}{\Delta\theta} \quad (6.10.3-3)$$

式中： α ——超高性能混凝土线膨胀系数（ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ），计算结果应精确至 0.1×10^{-6} ；

$\Delta\theta$ ——试验终止温度与初始温度之差（ $^{\circ}\text{C}$ ）；

3 两个试件测值之差的绝对值不大于平均值的 10%时，取两个试件测值的平均值作为线膨胀系数的测定值，应精确至 1×10^{-6} ；当两个试件测值之差超过允许范围时，应重新进行试验。

6.11 耐磨性试验

6.11.1 本方法适用于测定超高性能混凝土试件磨损面上单位面积的磨耗量。

6.11.2 超高性能混凝土耐磨性试验应采用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 立方体试件，每组 3 个试件。

6.11.3 试验仪器设备应符合下列规定：

1 超高性能混凝土磨耗试验机由直立主轴、水平转盘、传动机构和控制系统组成。主轴和转盘不在同一轴线上，主轴和转盘同时按相反方向转动，主轴下端配有磨头连结装置，可以装卸磨头。同时应符合下列技术要求：

- 1) 主轴与水平转盘垂直度；测量长度 80mm 时偏离度不大于 0.04mm。
- 2) 水平转盘转速应为 $17.5\text{r}/\text{min} \pm 0.5\text{r}/\text{min}$ ，主轴与转盘转速比为 35:1。
- 3) 主轴与转盘的中心距应为 $40\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ 。
- 4) 负荷可分为 200N、300N、400N 三档，误差不应大于 $\pm 1\%$ 。
- 5) 主轴升降行程不应小于 80mm，磨头最低点距水平转盘工作面不应大于 25mm。

6) 水平转盘上应配有能夹紧试件的卡具，卡头单向行程应为 150_{-1}^{+4}mm 。卡夹宽度不应小于 50mm，应能卡进 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 立方体试件，夹紧试件后应保证试件不上浮或翘起。

7) 花轮磨头（图 6.11.3）由三组花轮组成，按星形排列成等分三角形，花轮与轴心最小距离应为 16mm，最大距离应为 25mm。每组花轮由两片花轮片装配而成，其间隔宜为 2.6mm~2.3mm。花轮片直径应为 $\Phi 25_{-0}^{+0.02}\text{mm}$ ，厚度应为 $3_{-0}^{+0.02}\text{mm}$ ，边缘上均匀分布 12 个矩形齿，齿宽应为 3.3mm，齿高应为 3mm，应由不小于 HRC 60 硬质钢制成。磨头与水平转盘间有效净空宜为 160mm~180mm。

- 8) 应具有 0~999 转盘数字自动控制显示装置，其转数误差应小于 1/4 转，并应装有电源电压监测

表及自动停车报警装置。

9) 吸尘器装置应随时将磨下的粉尘吸走。

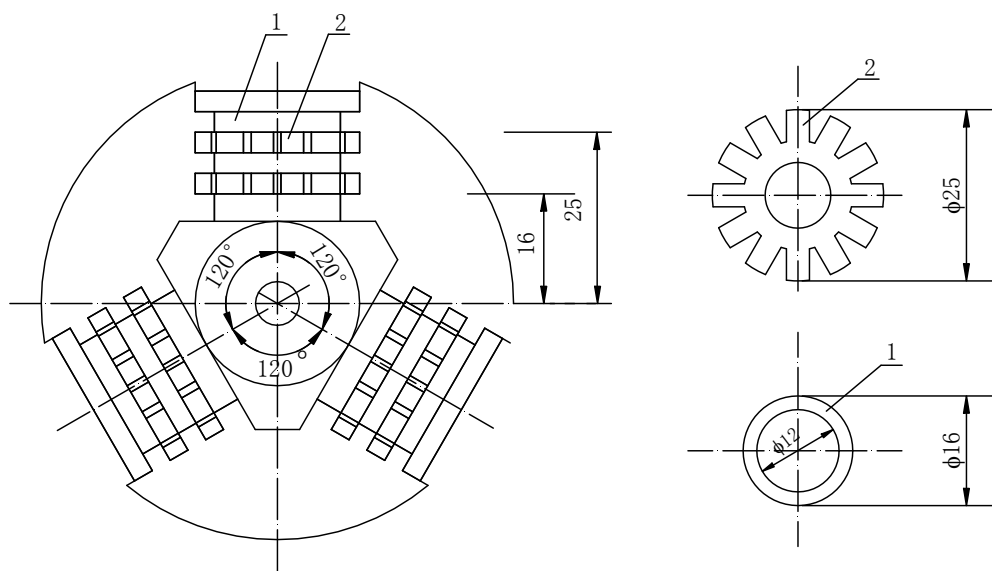


图 6.11.3 花轮磨头示意图 (mm)

1-垫片; 2-刀片

2 烘箱的调温范围应为 $50^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$, 控制温度允许偏差应为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

3 电子秤的量程应大于 10kg , 感量不应大于 1g 。

6.11.4 超高性能混凝土耐磨性试验应按下列步骤进行:

1 应将试件养护至 27d 龄期从养护地点取出, 擦干表面水分放在试验室内空气中自然干燥 12h, 再放入 $60^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘箱中, 烘干 12h, 磨耗面应朝上。

2 试件烘干处理后应放至室温, 刷净表面浮尘。

3 将试件放至耐磨试验机的水平转盘上, 磨耗面应选用试件侧面, 并用夹具将其轻轻紧固。在 200N 的负荷下磨 90 转, 然后取下试件刷净表面粉尘称重, 记下相应质量 m_1 , 该质量作为试件的初始质量。重新将试件放至耐磨试验机的水平转盘上, 在 200N 的负荷下磨 120 转, 然后取下试件刷净表面粉尘称重, 记下相应质量 m_2 。

整个磨耗过程应将吸尘器对准试件磨耗面, 使磨下的粉尘被及时吸走。如果超高性能混凝土具有高耐磨性, 可再增加旋转次数, 并应特别注明。

4 每组花轮刀片只进行一组试件的磨耗试验, 进行第二组磨耗试验时, 必须更换一组新的花轮刀片。

6.11.5 试验结果计算及确定应按下列方法进行：

1 应按下列式计算每一试件的磨耗量，以单位面积的磨耗量来表示。

$$G_c = \frac{m_1 - m_2}{2A} \quad (6.11.5)$$

式中： G_c ——单位面积的磨耗量（ kg/m^2 ），计算结果应精确至 $0.001\text{kg}/\text{m}^2$ ；

m_1 ——试件的初始质量（ kg ）；

m_2 ——试件磨耗后的质量（ kg ）；

A ——试件磨耗面积（ m^2 ）；

2 试件的磨耗量值确定应符合下列规定：

1) 应以三个试件测值的算术平均值作为该组试件的磨耗量值，应精确至 $0.001\text{kg}/\text{m}^2$ ；

2) 三个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的15%时，则把最大及最小值一并舍除，取中间值作为该组试件的磨耗量值；

3) 如最大值和最小值与中间值的差均超过中间值的15%，则该组试件的试验结果无效。

6.12 硬化超高性能混凝土原样体积密度试验

6.12.1 本方法适用于测定硬化超高性能混凝土的原样体积表观密度。

6.12.2 测定硬化超高性能混凝土原样体积密度试验的试件应符合下列规定：

1 当试件采用试模成型或切割制作时，试件应采用边长不小于 100mm 的立方体试件或棱柱体试件。

2 当采用钻芯试件时，试件直径不应小于 100mm ，高不应小于 100mm 。

3 每组试件应为 3 块。

6.12.3 试验仪器设备应符合下列规定：

1 游标卡尺或直尺的精度应为 0.5mm ；

2 电子天平的最大量程不应小于 5kg ，感量不应大于 0.1g ；

3 水槽尺寸应能保证浸没试件及水中称重，水温应保持在 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 。

6.12.4 硬化超高性能混凝土原样体积密度试验应按下列步骤进行：

1 称量原样试件质量。直接称量试件在原样状态下的质量，精确至 0.1g，用 m_r 表示。

2 称量饱水试件的表干质量。将试件浸没在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水中，水面至少高于试件顶面 25mm，浸泡 24h，将试件取出，用拧干的湿毛巾擦去表面水分，称量并记录试件质量；继续浸泡 24h，将试件取出，用拧干的湿毛巾擦去表面水分，称量并记录试件质量；试件浸泡时间不应小于 48h，直至两个连续的 24h 间隔的质量变化小于较大值的 0.2% 时，停止浸泡，记录最后一次试件质量，精确至 0.1g，用 m_s 表示。

3 不同规格尺寸的试件均可以通过水中称重法测定试件体积，具体应按下列方法进行：

1) 首先将试件完全浸泡在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水中充分饱水，待无气泡出现时，测定试件在水中的质量 m_w ，水中测试试件质量如图 6.12.4 所示。

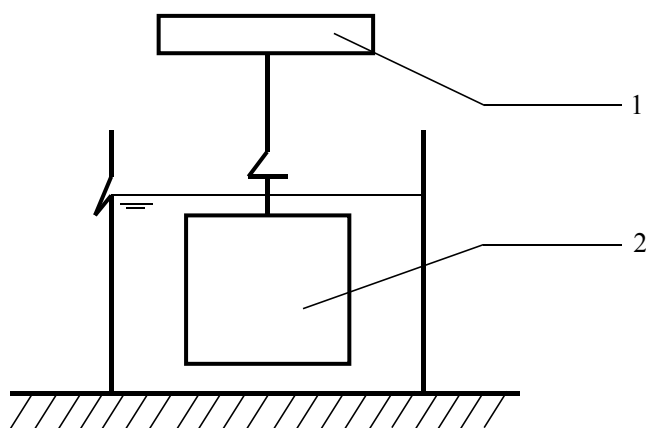


图 6.12.4 试件水中测试示意图

1-电子天平；2-试件

2) 试件的总体积应按下式计算：

$$V_t = \frac{m_s - m_w}{\rho_w} \quad (6.12.4)$$

式中： V_t ——试件的总体积 (m^3)，试件的总体积包括试件固体体积、试件内部闭口孔隙体积与试件开口孔隙体积三者之和；

m_s ——保水试件的表干质量 (kg)；

m_w ——试件在水中的质量 (kg)；

ρ_w ——水的密度，当水温为 20℃时，取值 998kg/m³；

4 对于形状规则的试件，可以按以下方法直接量取试件尺寸进行试件总体积计算。

1) 对于立方体或棱柱体试件，逐一量取试件长、宽、高三个方向的长度值，每一方向的长度值应在其两端和中间各测量1次，再在其相对的面上再各测1次，共测6次，并应精确至0.5mm，6次测量的平均值作为该方向的长度值。计算试件的体积，单位为m³，保留4位有效数字；

2) 对于钻芯试件，圆柱体上下两个底面的直径，各量取相互垂直方向长度2次，共4次，轴向方向高度在相互垂直的方向上分别量取4次，将4次测量结果取平均值作为直径和高度值。计算试件的体积，单位为m³，保留4位有效数字。

6.12.5 试验结果计算及确定应按下列方法进行：

1 硬化超高性能混凝土的原样体积密度应按下列式计算：

$$\rho_r = \frac{m_r}{V_t} \quad (6.12.5)$$

式中： ρ_r ——硬化超高性能混凝土的原样体积密度 (kg/m³)，计算结果应精确至 10kg/m³；

m_r ——试件原样状态下的质量 (kg)；

V_t ——试件的总体积 (m³)；

2 密度值的确定应符合下列规定：

1) 应以3个试件测值的算术平均值作为该组试件的密度值，应精确至10kg/m³；

2) 3个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的5%时，则把最大及最小值一并舍除，取中间值作为该组试件的密度值；

3) 如最大值和最小值与中间值的差均超过中间值的5%，则该组试件的试验结果无效。

6.12.6 测试试件的体积方法应在试验或检测报告中注明。

6.13 抗冲磨性试验

6.13.1 本方法适用于水下水砂冲磨法测定超高性能混凝土的抗冲磨性能。用超高性能混凝土抗冲磨性能与努氏硬度 500 的玻璃抗冲磨性能相对比的抗冲磨指数表示。

6.13.2 试件尺寸、数量和技术要求应符合下列规定：

1 超高性能混凝土采用边长 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、高度 $35 \pm 1\text{mm}$ 的板形试件，试件制作时的脱模面作为试件的冲磨试验面，可为立方体试件成型的侧面或底面。每组试件的数量为 3 块。

2 玻璃板宜采用边长 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、厚度 $25 \pm 0.5\text{mm}$ 的板形试件，应采用密度在 $2400\text{kg/m}^3 \sim 2600\text{kg/m}^3$ 之间、努氏硬度为 500 的玻璃。每组试件的数量为 2 块。

6.13.3 试验装置应符合下列规定

1 超高性能混凝土抗冲磨性能测试用试验装置如图 6.13.2 所示：

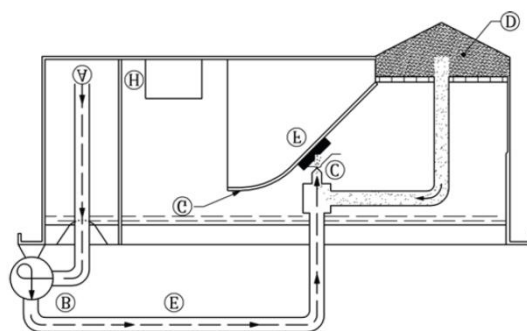


图 6.13.2 抗冲磨性能试验设备示意图

A—水箱；B—水泵；C—喷嘴；D—砂池；E—水管；F—试件；G—试件固定平台和导轨；H—滤网

2 水泵：能为喷嘴出口提供 0.3MPa 压力水的射流；

3 喷嘴：直径 $20\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 的中心喷管；

4 试件固定平台和导轨：能将试件冲磨面固定在与喷嘴成 $45^\circ \pm 0.5^\circ$ 、距离 $62\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 的位置；

5 冲磨用砂采用石英砂，石英砂的 SiO_2 含量不小于 97%，莫氏硬度为 7， $1\text{mm} \sim 4\text{mm}$ 的颗粒含量不低于 95%。当玻璃试件的磨耗体积减少到新砂初次使用时的磨耗体积的 $(60 \pm 5)\%$ 时，应更换石英砂；

6 砂池应设置在能保证 4mm 石英砂颗粒能吸入射流水砂混合物中参与冲磨的位置。

6.13.4 试件制作和准备应符合下列规定：

1 混凝土抗冲磨试件在100mm立方体试模中浇筑成100mm×100mm×35mm的试件，也可一次性浇筑成100mm立方体，混凝土硬化后，用金刚石锯切割成100mm×100mm×35mm的试件。

2 标准养护的试件在标准条件下养护28d。常规蒸汽养护的试件在蒸汽养护后在标准条件下继续养护至28d。改善性能的高温热养护试件在高温热养护结束后在标准条件下继续养护至7d。

6.13.5 试验步骤

1 将抗冲磨试件从标准养护室取出，擦除表面水分，对试样的质量和尺寸进行测量，其中前者的精度要求为±0.01g，后者的精度要求为±0.1mm，并计算得到试样的体积密度；

2 将抗冲磨试件安置固定试验平台，通过导轨调整试验平台，使试件的冲磨面与喷嘴成45°±0.5°角，喷嘴与冲磨试件表面的喷嘴投影中心的距离为62mm±2mm；

3 往水箱中注水淹没试件，至水位达到指定高度，开动抗冲磨试验机，冲磨75min±1min后，停机；

4 从试验平台上取下试样，擦除表面的水分，然后用电子秤对试样进行称量，并通过试样的体积密度数据，获得试样被冲磨后磨耗的体积；

5 当一组3个超高性能混凝土试件和2个对比玻璃试件单个测试时，应将对比的2个玻璃试件安排在首次和末次试验。

6.13.6 试验结果计算与处理

1 超高性能混凝土的磨耗体积应按式（6.13.6-1）计算：

$$V_U = \frac{\sum_{i=1}^3 V_{U_i}}{3} \quad (6.13.6-1)$$

式中： V_U ——超高性能混凝土的磨耗体积平均值（mm³），精确至1mm³；

V_{U_i} ——超高性能混凝土单个试件的磨耗体积（mm³），精确至1mm³；若最大值或最小值与中间值之差超过中间值的10%，应取中间值作为测定值；若最大值和最小值均超过中间值的10%，应重新制样进行试验。

2 对比玻璃的磨耗体积应按式（6.13.6-2）计算：

$$V_G = \frac{\sum_{i=1}^3 V_{Gi}}{3} \quad (6.13.6-2)$$

式中： V_G ——对比玻璃的磨耗体积平均值（ mm^3 ），精确至 1mm^3 ；

V_{Gi} ——对比玻璃单个试件的磨耗体积（ mm^3 ），精确至 1mm^3 ；最大值和最小值与平均值之差超过平均值的 20% 时，应重新制样进行试验。

3 超高性能混凝土的抗冲磨指数应按式（6.13.6-3）计算：

$$I = \frac{V_U}{V_G} \quad (6.13.6-3)$$

式中： I ——超高性能混凝土的抗冲磨指数，精确至 0.1；

V_U ——超高性能混凝土的磨耗体积平均值（ mm^3 ），精确至 1mm^3 ；

V_G ——对比玻璃的磨耗体积平均值（ mm^3 ），精确至 1mm^3 。

6.14 动态压缩试验

6.14.1 本方法适用于测定室温下超高性能混凝土在 $10^0 \sim 10^4 \text{s}^{-1}$ 应变速率范围内压缩应力—应变曲线、动态抗压强度、峰值应变和动态增强因子 DIF（Dynamic Increase Factor）等性能。

6.14.2 超高性能混凝土动态压缩试验原理和数据处理方法

1 测试原理

在室温条件下，基于一维应力波理论和应力均匀假定，采用分离式霍普金森压杆（图6.14.2）对试样进行加载，获得高应变速率下材料的压缩力学性能。

试样共轴安放于输入杆和输出杆之间，采用气枪等装置驱动撞击杆作用输入杆产生入射波；通过输入杆的传播对试样加载，并在输入杆和输出杆中形成反射波和透射波，其传播过程见图6.14.2。根据一维应力波理论和应力均匀假定，通过对测得的入射波、反射波和透射波信号进行计算，进而获得在特定应变速率下试样的压缩力学性能。

试验测试数据有效情况下，为减少波形起点确定误差和计算方便，宜采用二波法中反射波和透射波法进行处理。

在数据处理过程中，压缩应变速率和平均工程塑性应变速率的单位为 ms^{-1} ，应力波传播时间的单位为 ms ；在结果表述时，宜将压缩应变速率单位换算成为 s^{-1} ；应力波传播时间单位换算成 μs 。

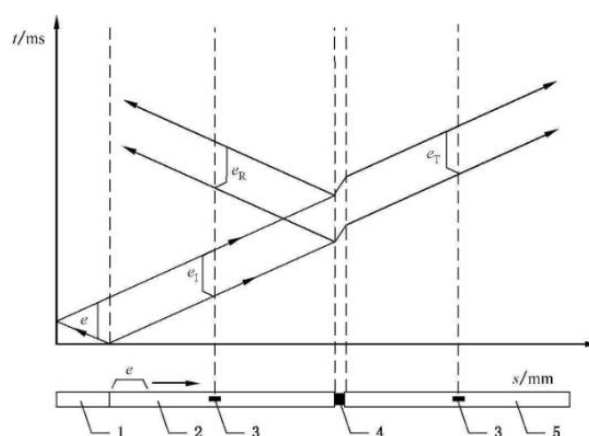


图6.14.2 分离式霍普金森压杆的测试原理示意图

1—撞击杆；2—输入杆；3—应变计；4—试样；5—输出杆。

2 数据处理方法

数据处理方法选择二波法（反射波和透射波法）。相关公式如下：

①根据分离式霍普金森压缩试验方法的均匀性假设，入射波、反射波和透射波满足式（6.14.2-1）：

$$e_I(t) = e_T(t) - e_R(t) \quad (6.14.2-1)$$

②工程压缩应变速率按式（6.14.2-2）计算：

$$\dot{e}_s(t) = -\frac{2c_b}{l_0} e_R(t) \quad (6.14.2-2)$$

③工程压缩应变按式（6.14.2-3）计算：

$$e_s(t) = -\frac{2c_b}{l_0} \int_0^t e_R(\tau) d\tau \quad (6.14.2-3)$$

④工程压缩应力按式（6.14.2-4）计算：

$$R_s(t) = \frac{r_b^2}{r_0^2} E_b e_T(t) \quad (6.14.2-4)$$

6.14.3 测定超高性能混凝土动态压缩试验的试件应符合下列规定:

- 1 标准试件是直径为50mm，高为25mm的圆柱体试件，且两个端面平行度不大于0.02mm；
- 2 标准试件端面应垂直于试样轴线，允许误差为 $\pm 0.25^\circ$ ，还应满足本标准4.3条试件的尺寸测量与公差要求；
- 3 一组标准试件应锯切自一根样坯，锯切加工后应采用磨床精密加工打磨，且锯切和打磨过程中应避免过热影响试样材料动态力学性能；
- 4 样坯直径宜为50mm，长度不宜小于300mm，试件锯切时，两端去除的长度宜大于钢纤维长度的1/2，样坯制备方式应参照本标准4.2条；
- 5 需测试饱水状态的试件动态压缩性能时，除锯切、打磨等工序外，其他时间内试件应处于保湿养护状态，置于温度为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度为95%以上的标准养护室中，或在温度为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 的不流动氢氧化钙饱和溶液中；
- 6 需测试其他状态的试件动态压缩性能时，应将试件置于相应环境内不少于48h，直至两个连续的24h间隔的质量变化小于0.2%；
- 7 每组试件不宜少于9块。

6.14.4 超高性能混凝土动态压缩试验仪器设备应符合下列规定。

1 设备组成

分离式霍普金森压杆主要由驱动装置、撞击杆、输杆、输出杆、吸收杆等部分组成（图6.14.4-1）；数据测试系统主要由测速装置：应变计、动态应变仪、数据采集与存储装置及其连接的导线等部分组成（图6.14.4-1），用于测试和记录试验过程中撞击杆速度、波导杆上的入射波、反射波和透射波信号。

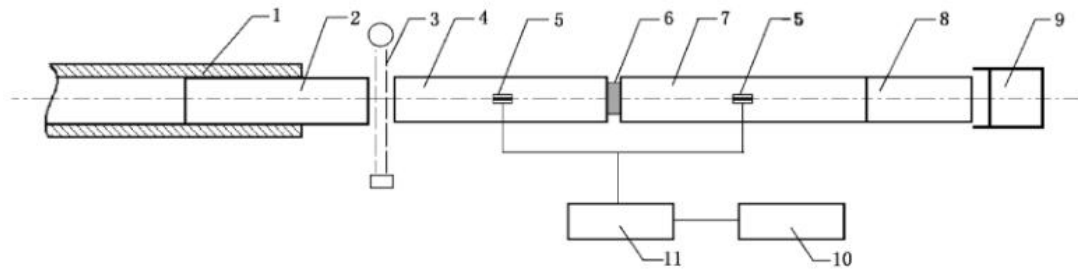


图6.14.4-1 分离式霍普金森压杆试验系统示意图

1—驱动装置；2—撞击杆；3—测速装置；4—输入杆；5—应变计；6—试样；7—输出杆；8—吸收杆；9—阻尼器；
10—数据采集与存储装置；11—动态应变仪。

2 分离式霍普金森压杆系统

1) 驱动装置

驱动装置对撞击杆施加初始速度，加载过程中应确保波导杆处于弹性状态，撞击杆的速度不超过式(6.14.4-1)的计算结果：

$$v_{\max} = \frac{1.7R_e}{\rho_b c_b} \quad (6.14.4-1)$$

注：撞击杆最小速度应保证试样产生塑性变形。

2) 波导杆与撞击杆

①波导杆

输入杆和输出杆应采用高强度材料，其直径应相同；波导杆直径宜略大于试件直径，以避免试验后试样直径超过波导杆直径导致测试异常；长度可不同，且波导杆的长径比不宜小于40。

波导杆应符合图6.14.4-2的要求。

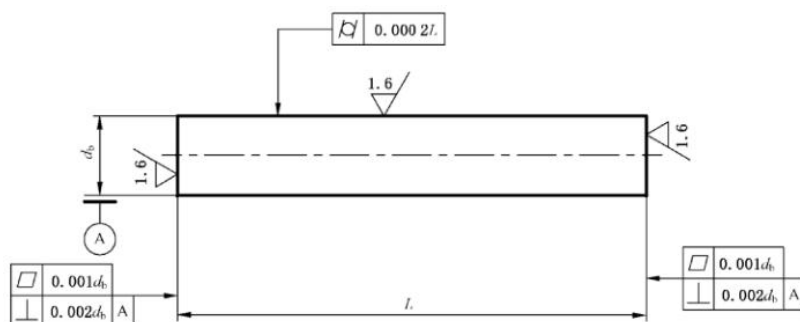


图6.14.4-2 波导杆的形状和加工要求

② 撞击杆

撞击杆材料、直径与波导杆相同，长度宜大于其10倍直径，并小于0.5倍波导杆长度，加工精度见图6.14.4-2。

3 数据测试系统

1) 数据测试系统的组建

数据测试系统宜采用惠更斯电路组成桥式数据测试系统（图6.14.4-3）。宜同时在与波导杆材料相同的金属块上粘贴相同的应变计作为温度补偿。

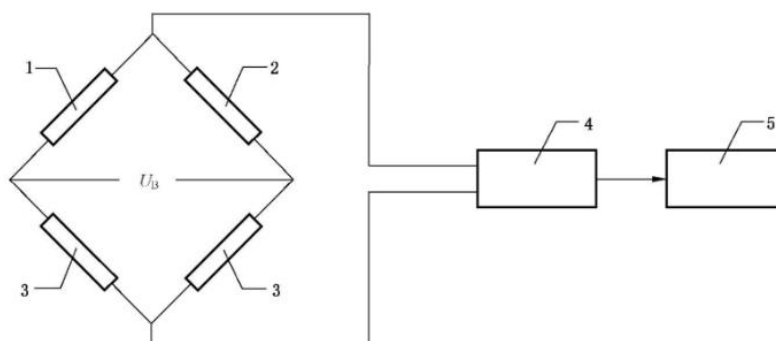


图6.14.4-3 桥式测试电路框图

1—工作应变计；2—温度补偿应变计；3—标准电阻；4—动态应变仪；5—数据采集与存储装置。

2) 应变计

应按GB/T 13992和下列要求选择和使用应变计：

① 应变计极限响应频率应不低于120kHz，推荐不低于300kHz；

② 根据波导杆直径确定应变计的栅长，栅长应不大于5mm；

③ 宜采用两个应变计在波导杆的同一轴向位置对称贴片；

④ 应变计的敏感栅方向与波导杆轴向平行；

⑤ 输入杆、输出杆上应变计应粘贴在靠试样一端，且大于1倍撞击杆长度处，推荐将应变计置于波导杆中部。

3) 动态应变仪

应按JJG 623的要求, 通道数应大于2, 信噪比应不小于40dB, 灵敏度(桥压2V)应不低于0.1V/100 $\mu\epsilon$, 动态应变仪的频响应高于120kHz, 推荐不低于500kHz。

4) 数据采集系统

通道数应大于2, 采样频率应不小于240kHz, 推荐采用1MHz。

5) 导线

推荐采用屏蔽导线组建测试系统, 且导线的长度宜小于5m。

6) 数据测试系统联试

根据图6.14.4-3组建测试系统, 设定应变的标定值, 并联试和检测数据测试系统的状态。

4 试验系统检验

1) 波导杆同轴度

波导杆的同轴度可通过无试样的压缩试验检测, 具体方法是: 将输入杆和输出杆直接同轴接触, 施加载荷, 检测入射波和透射波状态。当入射波、透射波的波形相同, 且两曲线平台值相差小于5%时, 则波导杆的同轴度满足试验要求。

2) 应变计

通过对粘贴应变计的波导杆施加已知静态力来标定应变计的输出信号; 在动态压缩试验中, 根据撞击杆速度、波导杆密度和纵波速度, 应用式(6.14.4-2)计算杆中应力理论值; 根据应变计测试信号 e_j , 应用式(6.14.4-3)计算杆中应力测试值。当理论计算与测试结果相差小于5%满足试验要求。

$$R_b = \frac{\rho_b c_b v}{2} \quad (6.14.4-2)$$

$$R_b = E_b e_j \quad (6.14.4-3)$$

3) 波速标定

在波导杆上选取一定距离的两点分别粘贴应变计，根据两应变计间的距离和应力波传播时间来计算波导杆中的弹性纵波传播速度；将测试结果与理论公式（6.14.4-4）计算值进行对比，当测试值与理论计算值相差小于2%满足试验要求。

$$c_b = \sqrt{\frac{E_b}{\rho_b}} \quad (6.14.4-4)$$

6.14.5 超高性能混凝土动态压缩试验应按下列步骤进行：

1 试验条件

试验环境相对湿度不宜小于50%，温度应保持在20℃±5℃。

2 测量系统建立

按6.14.4条要求在波导杆中部位置粘贴应变计，布置应变计引线连接数据采集与存储装置。

3 数据采集系统设置

开启测速装置、应变信号采集与存储装置预热至设备稳定。对数据采集系统进行参数设定，以保证记录信号的完整性。

4 撞击杆安装

将撞击杆置于驱动装置内。

5 试验系统检验

试验前应对试验系统进行检验。

6 试样安装

将待测试样两端均匀涂抹一层润滑剂，置于输入杆和输出杆中间，与波导杆同轴；同时宜在试样和输入杆中间加入波形整形器，与波导杆同轴。润滑剂推荐采用凡士林；波形整形器宜采用橡胶圆片，直径宜为20mm~30mm，厚度宜为1.0mm~2.0mm。

7 驱动撞击杆

将测速装置和应变信号采集系统置于待触发状态，根据设定的冲击速度，调整好冲击气压，驱动撞击杆，速度应符合6.14.4条规定。

8 数据采集

记录撞击杆速度、波导杆应变信号。

9 测量与记录

试验过程中应测量和记录以下信息：

- 1) 撞击杆与波导杆的尺寸、弹性模量和弹性纵波液速；
- 2) 应变计的型号、灵敏系数和电阻值等参数及其在波导杆中的粘贴位置；
- 3) 数据测试系统的参数（测试电路、应变的标定值等）；
- 4) 撞击杆速度；
- 5) 试样尺寸；
- 6) 输入杆和输出杆原始波形；
- 7) 试验后试样破坏情况。

6.14.6 试验数据处理

1 波导杆中的应变

波导杆中的应变按式（6.14.6-1）计算：

$$e_j(t) = U_j(t) / U_{0j}(t) \quad (6.14.6-1)$$

2 波形处理

1) 波形基线的确定

当采用对称贴片时，应分别取对称应变计测试信号的平均值作为数据处理时的入射波、反射波和透射波。

取入射波起点前平直段数据的平均值作为入射波和反射波的波形基线值；取透射波起点前平直段数据的平均值作为透射波的波形基线值。数据处理时，应使入射波、反射波和透射波的波形基线归零。

2) 波形起点的确定

根据入射波、反射波和透射波的波形，确定对应的波形起点。所确定的起点应在对应波形的基线上且靠近波形的起跳点，推荐采用的确定入射波、反射波和透射波起点的方法如下：

①根据入射波采集信号，选取入射波前一定量数据点（如采样频率为5MHz，取100个数据点）计算平均值，确定采集信号基线；

②根据入射波波形确定入射波最大值；

③确定入射波上升至其最大值十分之一的时刻及其所对的离散数据点；

④取入射波最大值十分之一对应时刻及向后取一定量数据点（如采样频率为5MHz，取50个数据点）拟合作直线，将该直线与基线交点对应时刻作为入射波的起点 n_1 。

在确定入射波的起点后，通过式（6.14.6-2）和式（6.14.6-3）确定反射波和透射波的起点：

$$n_2 = \text{int} \left[\frac{2a_1}{c_b t_i} \right] + n_1 \quad (6.14.6-2)$$

$$n_3 = \text{int} \left[\frac{a_1 + a_2}{c_b t_i} + \frac{l_0}{c_s t_i} \right] + n_1 \quad (6.14.6-3)$$

式中：int[]——取整函数。

3) 对齐波形起点

移动入射波、反射波和透射波，使其起点位于相同的时刻，并以此时刻作为数据处理中的起始时刻起点对齐后的入射波、反射波和透射波应满足均匀化假设，即满足式（6.14.6-4）：

$$e_1(t) + e_R(t) = e_T(t) \quad (6.14.6-4)$$

4) 应力波作用终点 t_w 和应力波作用时间的确定

由公式（6.14.2-2）计算得到冲击压缩试样的工程压缩应变速率，绘制工程压缩应变速率—时间曲线，如图6.14.6所示。

若工程压缩应变速率—时间曲线存在一个近似的平台阶段，宜平台阶段开始点为试样达到应力平衡状态的时刻（ t_0 ），宜以结束点为试样的破坏时刻，即应力波作用终点 t_w ，至此为应力波作用时间。

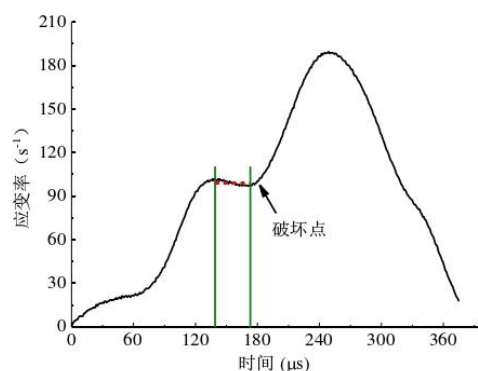


图6.14.6 应力波作用时间确定方法

若工程压缩应变速率—时间曲线不存在一个近似的平台阶段，宜以波形进入下降沿前的最后一个极大值点作为入射波的末点，至此为应力波作用时间。

3 力学性能的计算

基于入射波、反射波和透射波信号计算试样材料应变速率、应变、应力曲线，获得材料在高应变速率下压缩应力—应变曲线、动态抗压强度、峰值应变、动态增强因子 *DIF*。

1) 工程压缩应变速率

工程压缩应变速率的计算公式参见6.14.2条式(6.14.2-2)。

2) 工程压缩应变

工程压缩应变的计算公式参见6.14.2条采用式(6.14.2-3)。

3) 工程压缩应力

工程压缩应力的计算公式参见6.14.2条采用式(6.14.2-4)。

4) 工程压缩应力—应变曲线

利用工程压缩应力和工程压缩应变，获得工程压缩应力—应变曲线。

5) 平均工程压缩应变速率

根据6.14.6条应力波作用时间的确定过程：

当工程压缩应变速率—时间曲线存在一个近似的平台阶段，平台阶段开始点为试样达到应力平衡状态的时刻，结束点为试样的破坏时刻（图6.14.6），宜以该段平均值作为平均工程压缩应变速率。

当工程压缩应变速率—时间曲线不存在一个近似的平台阶段，按照式（6.14.6-5）对本条中的工程应变速率历程曲线确定平均工程塑性应变速率：

$$\bar{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{t_w - t_0} \int_0^{t_w} \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \quad (6.14.6-5)$$

6) 动态抗压强度

根据工程压缩应力—工程应变曲线，以曲线峰值处应力作为动态抗压强度 f_{cd} 。

7) 峰值应变

根据工程压缩应力—工程应变曲线，以曲线峰值处应变作为峰值应变 ϵ_{ud} 。

8) 动态增强因子 DIF

$$DIF = \frac{f_{cd}}{f_{cc}} \quad (6.14.6-6)$$

式中： DIF ——动态增强因子；

f_{cd} ——动态抗压强度，MPa；

f_{cc} ——超高性能混凝土立方体试件抗压强度，MPa。

4 试验结果有效性评估

出现下列任何一种情况，应视为试验无效，重新进行试验：

- 1) 试验波形记录不完整或试验数据溢出；
- 2) 试验波形的极大值小于记录量程的 20%；
- 3) 试样出现不均匀变形（如倾斜变形）、或试样未发生塑性变形；
- 4) 试验后试样完全破碎。

5 试验结果处理

- 1) 以试验目标平均压缩应变速率的 $\pm 10\%$ 作为上下阈值，对一组试件的试验结果进行筛选；
- 2) 当落在阈值区间内的试验数不少于 3 个时，动态抗压强度、峰值应变和动态增强因子 DIF 为几个试验计算结果的算术平均值，并给出几个试件的工程压缩应力—应变曲线；
- 3) 当落在阈值区间内的试验组少于 3 个时，则该组试件的试验结果无效。

6.14.7 超高性能混凝土动态压缩试验示例见附录 A。

7 长期性能和耐久性能试验方法

7.1 非接触法早期自收缩试验

7.1.1 本方法主要适用于测定早龄期超高性能混凝土的自由收缩变形,也可用于无约束状态下超高性能混凝土自收缩变形的测定。

7.1.2 本方法应采用尺寸为 100mm×100mm×515mm 的棱柱体试件。每组应为 3 个试件。

7.1.3 试验设备应符合下列规定:

1 非接触法超高性能混凝土收缩变形测定仪(图 7.1.3)应设计成整机一体化装置,并应具备自动采集和处理数据、设定采样时间间隔等功能。整个测试装置应固定于具有避震功能的固定式实验台面上。

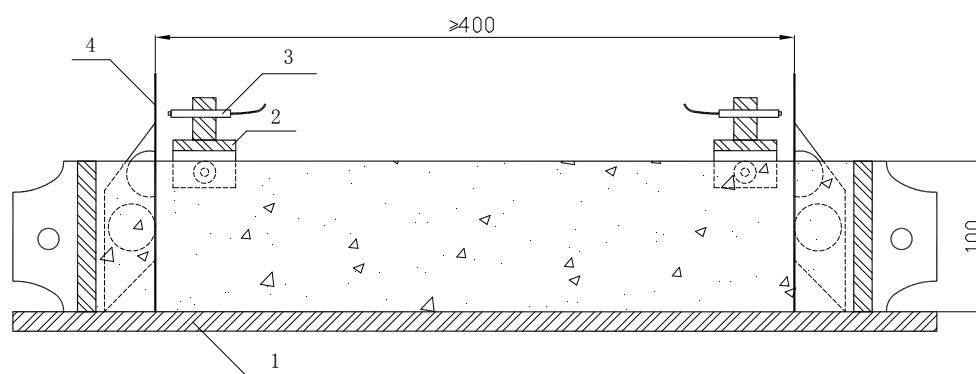


图 7.1.3 非接触法超高性能混凝土收缩变形测定仪原理示意图 (mm)

1-试模; 2-固定架; 3-传感器探头; 4-反射靶

2 应采用可靠方式将反射靶固定于试模上,使反射靶在试件成型浇筑振动过程中不会移位偏斜,成型完成后应能保证反射靶与试模之间摩擦力尽可能小。试模应采用具有足够刚度的钢模,试模的长度应能保证超高性能混凝土试件的测量标距不小于 400mm。

3 传感器的测试最大量程不应小于试件测量标距长度的 0.5%且不应小于 1mm,测试精度不应低于 0.002mm,且应采用可靠方式将传感器测头固定,使测头在测量整个过程中与试模相对位置保持固定不变。试验过程中应保证反射靶能够随着超高性能混凝土收缩而同步移动。

7.1.4 非接触法收缩试验应按下列步骤进行:

1 试验应在温度为 (20±2)℃、相对湿度为 (60±5)% 的恒温恒湿条件下进行。非接触法收缩试验应带模进行测试。

2 应在试模内涂刷润滑油,然后在试模内铺设两层塑料薄膜或者放置一片聚四氟乙烯片,并在薄膜或聚四氟乙烯片与试模接触的面上均匀涂抹一层润滑油,应将反射靶固定在试模两端。

3 将超高性能混凝土拌合物浇筑入试模后，应振动成型并抹平，然后立即带模移入恒温恒湿室。成型试件的同时，应测定超高性能混凝土的初凝时间。超高性能混凝土初凝试验和早龄期收缩试验的环境应相同。当超高性能混凝土初凝时，应开始测读试件左右两侧的初始读数，此后应每隔 1h 或按设定的时间间隔测定试件两侧的变形读数。

4 在整个测试过程中，试件在变形测定仪上放置的位置、方向均应始终保持固定不变。

5 需要测定超高性能混凝土自收缩值的试件，应在浇筑振捣后立即采用塑料薄膜作密封处理。

7.1.5 非接触法收缩试验结果计算处理应符合下列规定：

1 超高性能混凝土收缩率应按照下式计算：

$$\varepsilon_{st} = \frac{(L_{10} - L_{1t}) + (L_{20} - L_{2t})}{L_0} \quad (7.1.5)$$

式中： ε_{st} ——测试期为 t (h) 的超高性能混凝土收缩率， t 从初始读数时算起；

L_{10} ——左侧非接触法位移传感器初始读数 (mm)；

L_{1t} ——左侧非接触法位移传感器测试期为 t (h) 的读数 (mm)；

L_{20} ——右侧非接触法位移传感器初始读数 (mm)；

L_{2t} ——右侧非接触法位移传感器测试期为 t (h) 的读数 (mm)；

L_0 ——试件测量标距(mm)，等于试件长度减去试件中两个反射靶沿试件长度方向埋入试件中的长度之和。

2 每组应取 3 个试件测试结果的算术平均值作为该组超高性能混凝土试件的早龄期收缩测定值，计算应精确至 1.0×10^{-6} 。当最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15% 时，应剔除此值，再取其余两值的平均值作为测定值；当最大值和最小值均超过中间值的 15% 时，应取中间值作为测定值。作为对照的超高性能混凝土早龄期收缩值应以 3d 龄期收缩值为准。

7.2 波纹管法早期自收缩试验

7.2.1 本方法适用于测定无约束且与外界无介质交换条件下的超高性能混凝土早期自收缩性能。

7.2.2 试验设备应符合下列规定：

1 波纹管应采用低密度聚乙烯波纹管，波纹管长度应为 (420 ± 2) mm，外径应为 (80 ± 1) mm，内径应为 (60 ± 1) mm，管壁厚度应为 (0.5 ± 0.05) mm。波纹管的波纹端部应为尖角状（图 7.2.2-1），并应具有足够的刚度，试验过程中不应被管内超高性能混凝土自重压变形。

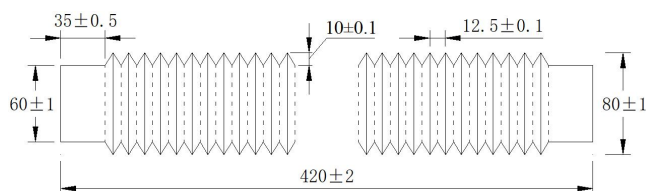


图 7.2.2-1 波纹管

2 密封端塞（图 7.2.2-2）宜采用塑料材质的锥形端塞。

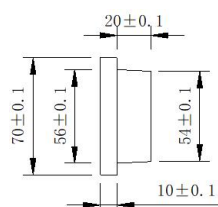


图 7.2.2-2 波纹管密封端塞

3 测试支架（图 7.2.2-3）应由三根表面光滑的金属材质的支撑杆和两块金属材质的支架端板组成。一端端板应采用可靠方式将波纹管一端固定，另一端端板应采用可靠方式固定千分表或传感器。测试支架整体应固定于具有减振功能的固定式实验台上。

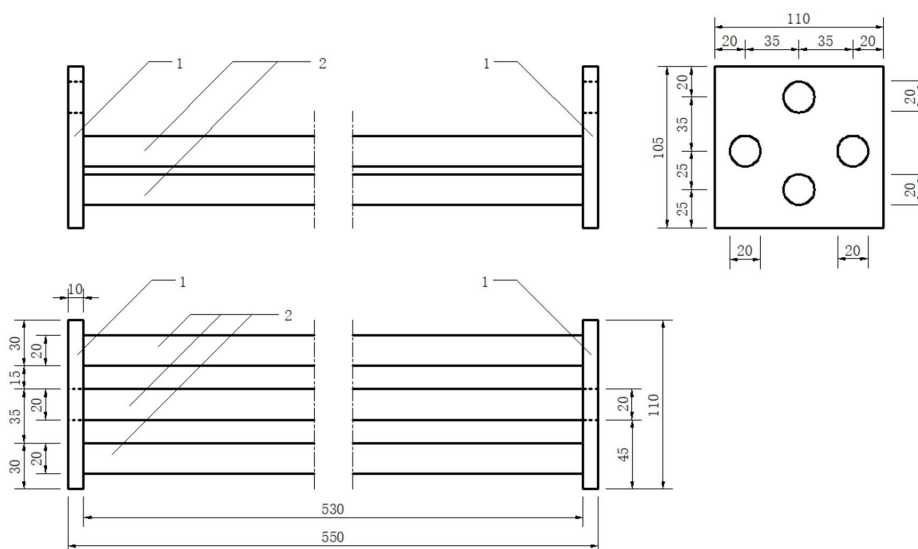


图 7.2.2-3 波纹管法测试支架

1—支架端板；2—支撑杆

4 测量装置可采用下列形式之一：

1) 采用千分表测量时，测量标距应为 440mm，并应配备硬钢或石英玻璃制作的标准杆。千分表的精度应为 0.001mm。

2) 采用非接触法超高性能混凝土收缩变形测定仪时，应符合本标准第 7.1.3 条的规定。

7.2.3 试件制作应符合下列规定：

1 应采用密封端塞完全密封波纹管的一端，并将波纹管竖直置于振动台上，密封端应朝下放置。

2 应将超高性能混凝土试样分四层缓慢、均匀地填入波纹管内，每层应用捣棒插捣 10 次，捣棒应插透本层至下一层的表面。填装时不应拉伸或压缩波纹管，应采用可靠方式保持波纹管试件初始长度为 (430 ± 5) mm（包含底端的密封端塞）。填装完成后，应开启振动台振动至波纹管内壁无气泡附着，不应过振。振动完成后，应填补超高性能混凝土试样至刚好预留顶端的密封端塞空间，并采用密封端塞完全密封波纹管顶端。

3 波纹管密封后应立即清理波纹管表面的浆体与水分。

4 每组应制作 3 个波纹管试件。

7.2.4 试验应按下列步骤进行：

1 试验应在 (20 ± 2) °C 的恒温环境中进行，并应同时在该环境下测定超高性能混凝土试样的初凝时间。

2 采用千分表测量时，测量前应先用标准杆校正仪表的零点。

3 测试支架的支撑杆表面应涂一薄层矿物油或其他润滑剂，试件制作完成后应立即水平放置于测试支架的支撑杆上。波纹管试件的一端应固定在测试支架上，另一端连接千分表或传感器。

4 当超高性能混凝土初凝时，应测读试件长度的初始读数，此后应每隔 1h 或按设定的时间间隔测定试件的变形读数。

5 在整个测试过程中，试件在测试支架上放置的位置、方向均应始终保持固定不变。

7.2.5 试验结果计算及处理应符合下列规定：

1 超高性能混凝土自收缩率应按照下式计算：

$$\varepsilon_{sst} = \frac{L_0 - L_t}{L_b} \quad (7.2.5)$$

式中： ε_{sst} ——测试期为 $t(h)$ 的超高性能混凝土自收缩率， t 从测定初始长度时算起；

L_b ——试件的有效长度（mm），为试件的测量标距减去两个密封端塞的长度；

L_0 ——初凝时试件长度的初始读数（mm）；

L_t ——试件在试验期为 $t(h)$ 时测得的长度读数（mm）。

2 每组应取 3 个波纹管试件测试结果的算术平均值作为该组试件的早龄期自收缩率测定值，计算应精确至 1.0×10^{-6} 。当最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 15% 时，应剔除此值，再取其余两值的平均值作为测定值；当最大值和最小值均超过中间值的 15% 时，应取中间值作为测定值。作为对照的超

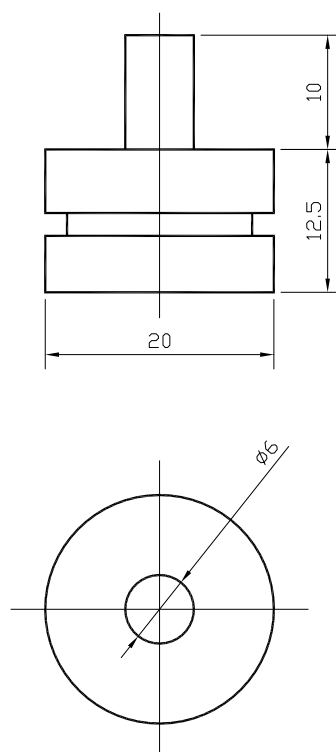


图 7.3.2-2 立式收缩试验用测头

4 采用接触式引伸仪时，所用试件的长度应比仪器的测量标距长出一个截面边长。测头应粘贴在试件两侧面的轴线上。

5 采用超高性能混凝土收缩仪时，制作试件的试模应固定测头或预留凹槽的端板。采用接触式引伸仪时，可用一般棱柱体试模制作试件。

6 收缩试件成型时不得使用机油等憎水性脱模剂。试件成型后应带模养护 1d~2d，并保证拆模时不损伤试件。对于事先没有埋设测头的试件，拆模后应立即粘贴或埋设测头。试件拆模后，应立即送至温度为 (20 ± 2) °C、相对湿度为 95% 以上的标准养护室养护。

7.3.3 试验设备应符合下列规定：

1 测量超高性能混凝土收缩变形的装置应配备硬钢或石英玻璃制作的标准杆，并应在测量前及测量过程中及时校核仪表的读数。

2 收缩测量装置可采用下列形式之一：

- 1) 卧式超高性能混凝土收缩仪的测量标距应为 540mm，并应装有精度为 ± 0.001 mm 的千分表或测微器；
- 2) 立式超高性能混凝土收缩仪的测量标距和测微器应卧式超高性能混凝土收缩仪相同。
- 3) 其他形式变形测量仪表的测量标距不应小于 100mm 及骨料最大粒径的 3 倍。并应达到 0.001mm 的测量精度。

7.3.4 超高性能混凝土收缩试验应按下列步骤进行：

1 收缩试验应在恒温恒湿环境中进行，室温应保持在 (20 ± 2) ℃，相对湿度应保持在 $(60\pm 5)\%$ 。试件应放置在不吸水的搁架上，底面应架空，试件之间的间隙应大于30mm。

2 试件应在自超高性能混凝土搅拌加水后的3d龄期时从标准养护室取出，并应立即移入恒温恒湿室测定其初始长度，此后应按下列规定的时间间隔测量其变形：1d、3d、7d、14d、28d、45d、60d、90d、120d、150d、180d、360d。

3 对非标准养护试件，当需要移入恒温恒湿室进行试验时，应先在该室内预置4h，再测其初始值。测量时应记下试件的初始干湿状态。

4 收缩测量前应先用标准杆校正仪表的零点，并应在测定过程中再复核1次~2次，其中一次应在全部试件测读完后进行。当复核发现零点与原值的偏差超过 ± 0.001 mm时，应调零后重新测量。

5 试件每次在卧式收缩仪上放置的位置和方向均应保持一致。试件上应标明相应的方向记号。试件在放置及取出时应轻稳仔细，不得碰撞表架及表杆。当发生碰撞时，应取下试件，并重新以标准杆复核零点。

6 采用立式超高性能混凝土收缩仪时，整套测试装置应放在不易受外部振动影响的部位。读数时宜轻敲仪表或上下轻轻滑动测头。安装立式超高性能混凝土收缩仪的测试台应有减振装置。

7 采用接触式引伸仪测量时，应使试件与仪表保持相对固定的位置和方向。

7.3.5 试验结果计算及处理应符合下列规定：

1 超高性能混凝土收缩率应按下式计算：

$$\varepsilon_{st} = \frac{L_0 - L_t}{L_b} \quad (7.3.5)$$

式中： ε_{st} ——试验期为 t （d）的超高性能混凝土收缩率， t 从测定初始长度时算起；

L_b ——试件的测量标距（mm），采用超高性能混凝土收缩仪测量时，为两测头内侧的距离，即超高性能混凝土试件长度（不计测头凸出部份）减去两个测头埋入深度；采用接触式引伸仪时，为仪器的测量标距；

L_0 ——试件长度的初始读数（mm）；

L_t ——试件在试验期为 t （d）时测得的长度读数（mm）。

2 每组应取3个试件收缩率的算术平均值作为该组超高性能混凝土试件的收缩率测定值，精确至 1.0×10^{-6} 。当最大值或最小值与中间值之差超过中间值的15%时，应剔除此值，再取其余两值的平均值作为测定值；当最大值和最小值均超过中间值的15%时，应取中间值作为测定值。

3 作为相互比较的超高性能混凝土收缩率应为不密封试件于28d所测得的收缩率。可将不密封试件于360d所测得的收缩率作为该超高性能混凝土的最终收缩率。

7.4 受压徐变试验

7.4.1 本方法适用于测定超高性能混凝土试件在长期恒定轴向压力作用下的变形性能。

7.4.2 试验仪器设备应符合下列规定：

1 徐变仪应符合下列规定：

- 1) 徐变仪应在要求时间范围内(至少 1 年)把所要求的压缩荷载加到试件上并保持该荷载不变。
- 2) 宜采用最大工作荷载为 1000kN 的液压式徐变仪；采用弹簧式徐变仪时，其工作荷载范围应满足超高性能混凝土试件的加荷要求。
- 3) 弹簧式压缩徐变仪应包括上下压板、球座或球铰及其配套垫板、弹簧持荷装置，以及 2 根~3 根承力丝杆（图 7.3.2）。压板与垫板应具有足够的刚度。压板受压面的平整度偏差不应大于 0.1 mm/100 mm，并应能对试件均匀加荷。弹簧及丝杆的尺寸应按徐变仪所要求的试验吨位而定。在试验荷载下，丝杆的拉应力不应大于材料屈服点的 30%，弹簧的工作压力不应超过允许极限荷载的 80%，且工作时弹簧的压缩变形不得小于 20 mm。
- 4) 当使用液压式持荷部件时，可通过一套中央液压调节单元同时加荷几个徐变架，该单元应由储液器、调节器、显示仪表和高压源等组成。
- 5) 有条件时可采用几个试件串叠受荷，上下压板之间的总距离不得超过 1600 mm。

2 加荷装置应符合下列规定：

- 1) 加荷架应由接长杆及顶板组成。加荷时加荷架应与徐变仪丝杆顶部相连。

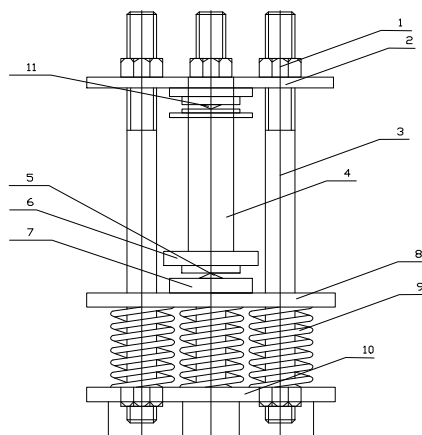


图 7.3.2 弹簧式压缩徐变仪

1—螺母；2—上压板；3—丝杆；4—试件；5—球铰；6—垫板
7—定心；8—下压板；9—弹簧；10—底盘；11—球铰

2) 油压千斤顶可采用一般的起重千斤顶，其吨位应大于所要求的试验荷载。

3) 测力装置可采用钢环测力计、荷载传感器或其他形式的压力测定装置。其测量精度应达到所加荷载 2%，试件破坏荷载不应小于测力装置全量程的 20%，且不应大于测力装置全量程的 80%。

3 变形测量装置应符合下列规定：

- 1) 变形测量装置可采用外装式、内埋式或便携式，其测量的应变值精度为 1.0×10^{-6} 。
- 2) 采用外装式变形测量装置时，应测量不少于两个均匀布置在试件周边的基线的应变。测点应布置在试件纵向表面的纵轴上，且应与试件端头等距，与相邻试件端头的距离不应小于一个截面边长。
- 3) 采用差动式应变计或钢弦式应变计等内埋式变形测量装置时，应在试件成型时可靠固定该装置，应使其测量基线位于试件中部并与试件纵轴重合。
- 4) 采用接触式引伸仪等便携式变形测量装置时，测头应牢固附置在试件上。
- 5) 测量标距不应小于 100 mm。

7.4.3 试件应符合下列规定：

1 试件的形状与尺寸应符合下列规定：

- 1) 徐变试验应采用尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的棱柱体试件。
- 2) 当试件叠放时，每叠试件端头的试件和压板之间应加装一个未安装应变测量仪表的辅助性超高性能混凝土垫块，垫块的截面边长尺寸应与被测试件相同，垫块的长度应不小于其截面边长尺寸的一半。

2 试件数量应符合下列规定：

1) 制作徐变试件时，应同时制作相应的棱柱体轴心抗压强度试件及收缩试件，轴心抗压强度试件的截面尺寸宜与徐变试件一致。

- 2) 收缩试件应与徐变试件相同，并应装有与徐变试件相同的变形测量装置。
- 3) 每组棱柱体抗压、收缩和徐变试件的数量宜各为 3 个，其中每个加荷龄期的每组徐变试件应为 2 个。

3 试件制备应符合下列规定：

- 1) 当叠放试件时，宜磨平其端头。
- 2) 徐变试件的受压面与相邻的纵向表面之间的角度与直角的偏差不应超过 $1\text{ mm}/100\text{ mm}$ 。
- 3) 采用外装式应变测量装置时，徐变试件两侧面应安装测头，测头宜采用埋入式，试模的侧壁应具有在成型时使测头定位的装置。在对粘结的工艺及材料确有把握时，可采用胶粘。

4 试件的养护与存放方式应符合下列规定：

- 1) 棱柱体轴心抗压强度试件及收缩试件应随徐变试件一并同条件养护。
- 2) 对于标准环境中的徐变，试件应在成型后不少于 24h 且不多于 48h 时拆模，且在拆模前应覆盖试件表面。随后应立即将试件送入标准养护室养护到 7d 龄期，其中 3d 加载的徐变试验应养护 3d。养护期间试件不应浸泡于水中。试件养护完成后应移入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(60 \pm 5)\%$ 的恒温恒湿室进行徐变试验，直至试验完成。
- 3) 对于适用于大体积超高性能混凝土内部情况的绝湿徐变，试件在制作或脱模后应密封在橡皮套或金属套筒等保湿外套中，且在整个试件存放和测试期间应保持密封。

- 4) 对于特定温度下的徐变, 应控制好试件存放的试验环境温度, 使其符合设计的温度历程。
- 5) 对于特定使用条件或存放条件下的徐变, 应根据具体情况确定试件的养护及试验制度。

7.4.4 徐变试验应符合下列规定:

1 对比或检验超高性能混凝土的徐变性能时, 试件应在 28d 龄期时加荷。当研究某一超高性能混凝土的徐变特性时, 应制备 5 组徐变试件并分别在龄期为 3d、7d、14d、28d、90d 时加荷。

2 徐变试验应按下列步骤进行:

- 1) 测头或测点应在试验前 1d 固定, 仪表安装好后应仔细检查, 不得有任何松动或异常现象。加荷装置、测力计等也应予以检查。
- 2) 在徐变试件即将加荷前, 应测试同条件养护试件的棱柱体抗压强度。
- 3) 测头和仪表准备完毕, 应将徐变试件放在徐变仪的下压板后, 使试件、加荷装置、测力计及徐变仪的轴线重合, 并应再次检查变形测量仪表的调零情况, 记下初始读数。当采用未密封的徐变试件时, 应在将其放在徐变仪上的同时, 覆盖对比用收缩试件的端部。
- 4) 试件放好后, 应及时开始加荷。当无特殊要求时, 应取徐变应力为所测得的棱柱体轴心抗压强度的 40%。当采用外装仪表或者接触法引申仪时, 应用千斤顶先加压至徐变应力的 20% 进行对中。两侧的变形差应小于其平均值的 10%, 当超出此值, 应松开千斤顶卸荷, 进行重新调整后, 再加荷至徐变应力的 20%, 并再次检查对中情况。对中完毕后, 应立即继续加荷直至徐变应力, 读出两侧的变形值, 应将此时两侧变形的平均值作为徐变荷载下的初始变形值。从对中完毕到测初始变形值之间的加荷及测量时间不得超过 1min。随后应拧紧承力丝杆上端的螺母, 松开千斤顶卸荷, 观察两侧变形值的变化情况。此时, 试件两侧的读数相差不应超过平均值的 10%, 否则应予以调整, 调整应在试件持荷的情况下进行, 调整过程中所产生的变形增值应计入徐变变形之中。然后应再加荷到徐变应力, 检查两侧变形读数, 其总和与加荷前读数相比, 误差不应超过 2%, 否则应予以补足。
- 5) 应在加荷后的 1d、3d、7d、14d、28d、45d、60d、90d、120d、150d、180d、270d 和 360d 测读试件的变形值。
- 6) 在测读徐变试件变形读数的同时, 应测量同条件放置对比用收缩试件的收缩值。
- 7) 试件应在加荷后 7d、28d、60d、90d 时, 校核检查荷载的保持情况, 如荷载变化大于 2%, 应予以补足。当使用弹簧式加载架时, 可通过施加正确的荷载并拧紧丝杆上的螺帽来进行调整。

7.4.5 试验结果计算及处理应符合下列规定:

1 徐变应变应按下列式计算:

$$\varepsilon_{ct} = \frac{\Delta L_t - \Delta L_0}{L_b} - \varepsilon_t \quad (7.3.5-1)$$

式中: ε_{ct} ——加荷 t (d) 后的徐变应变, 精确至 1.0×10^{-6} ;

ΔL_t ——加荷 t (d) 后的总变形值(mm), 精确至 0.001mm;

ΔL_0 ——加荷时测得的初始变形值(mm), 精确至 0.001mm;

L_b ——测量标距 (mm)，精确至 1mm；

ε_t ——同龄期的收缩应变，精确至 1.0×10^{-6} 。

2 徐变度应按下式计算：

$$C_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\delta} \quad (7.3.5-2)$$

式中： C_t ——加荷 t (d) 的超高性能混凝土徐变度 (1/MPa)，精确至 $1.0 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ ；

δ ——徐变应力 (MPa)。

3 徐变系数应按下列公式计算：

$$\varphi_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_0} \quad (7.3.5-3)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta L_0}{L_b} \quad (7.3.5-4)$$

式中： φ_t ——加荷 t (d) 的徐变系数，精确至 0.001；

ε_0 ——在加荷时测得的初始应变值，精确至 1.0×10^{-6} 。

4 每组应分别以 3 个试件徐变应变、徐变度或徐变系数的试验结果算术平均值作为该组超高性能混凝土试件徐变应变、徐变度或徐变系数的测定值。

5 作为供对比用的超高性能混凝土徐变值，应采用经过标准养护的超高性能混凝土试件，在 28d 龄期时经受 0.4 倍棱柱体轴心抗压强度恒定荷载持续作用 360d 的徐变值。可用测得的 3 年徐变值作为最终徐变值。

7.5 快速氯离子迁移系数法（RCM 法）

7.5.1 本方法适用于以测定氯离子在不含钢纤维超高性能混凝土中非稳态迁移的迁移系数来确定超高性能混凝土抗氯离子渗透性能。

7.5.2 试验所用试剂、仪器设备、溶液和指示剂应符合下列规定：

1 试剂应符合下列规定：

- 1) 溶剂应采用蒸馏水或去离子水。
- 2) 氢氧化钠应为化学纯。
- 3) 氯化钠应为化学纯。
- 4) 硝酸银应为化学纯。
- 5) 氢氧化钙应为化学纯。

2 仪器设备应符合下列规定：

- 1) 切割试件的设备应采用水冷式金刚石锯或碳化硅锯。
- 2) 真空容器应能容纳 3 个试件。
- 3) 真空泵应能保持容器内的气压处于（1~5）kPa。
- 4) RCM 试验装置（图 7.4.2）采用的有机硅橡胶套的内径和外径应分别为 100mm 和 115mm，长度应为 150mm。夹具应采用不锈钢环箍，其直径应为（105~115）mm、宽度应为 20mm。阴极试验槽可采用 3 个尺寸为 260mm×200mm×280mm 的塑料箱（盛放单个支架）或内有隔板的尺寸为 370mm×270mm×280mm 的塑料箱（分别盛放 3 个支架）。阴极板应采用厚度为（0.5±0.1）mm、直径不小于 100mm 的不锈钢板。阳极板应采用厚度为 0.5mm、直径为（98±1）mm 的不锈钢网或带孔的不锈钢板。支架应由硬塑料板制成。处于试件和阴极板之间的支架头高度应为（15~20）mm。RCM 试验装置所用材料还应符合现行行业标准《超高性能混凝土氯离子扩散系数测定仪》JG/T 262 的有关规定。
- 5) 电源应稳定提供（0~90）V 的可调直流电，精度应为±0.1V，电流应为（0~10）A。
- 6) 电流表的精度应为 0.1mA。
- 7) 温度计或热电偶的精度应为 0.2℃。
- 8) 喷雾器应适合喷洒硝酸银溶液。
- 9) 游标卡尺的精度应为 0.1mm。
- 10) 尺子的最小刻度应为 1mm。
- 11) 水砂纸的规格应为（200~600）#。
- 12) 细锉刀可为备用工具。
- 13) 扭矩扳手的扭矩范围应为（20~100）N·m，测量误差不应超过±5%。
- 14) 电吹风的功率应为（1000~2000）W。
- 15) 黄铜刷可为备用工具。

16) 真空表或压力计的精度应为 665Pa (5mmHg 柱)，量程应为 (0~13300) Pa (0~100mmHg 柱)。

17) 抽真空设备可由体积在 1000mL 以上的烧杯、真空干燥器、真空泵、分液装置、真空表等组合而成。

3 溶液和指示剂应符合下列规定：

1) 阴极溶液应为质量浓度 10% 的 NaCl 溶液，阳极溶液应为 0.3 mol/L 的 NaOH 溶液。溶液应提前 24h 配制，并应密封保存在温度为 (20~25) °C 的环境中。

2) 显色指示剂应为 0.1 mol/L 的 AgNO₃ 溶液。

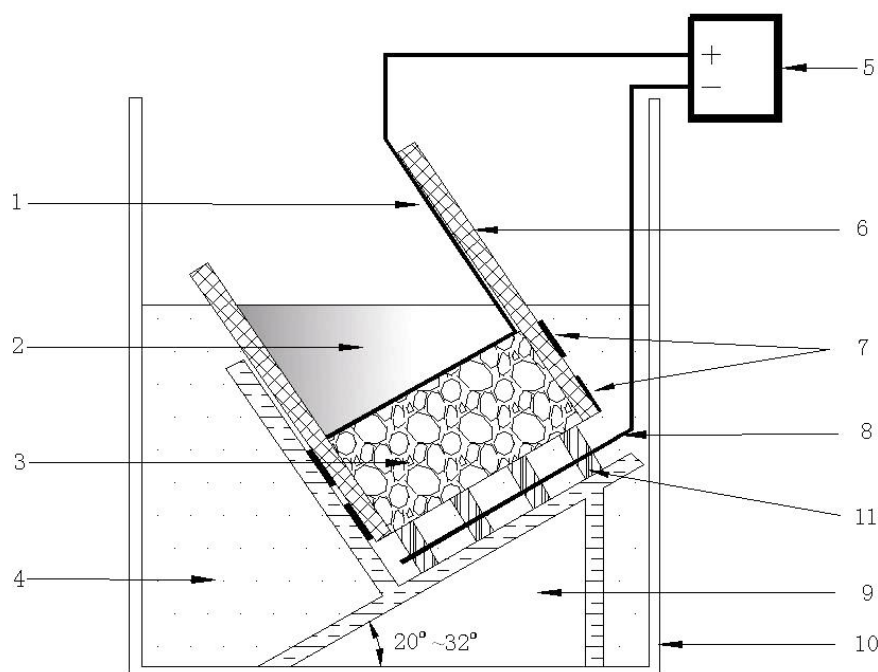


图 7.4.2 RCM 试验装置示意图

1—阳极板；2—阳极溶液；3—试件；4—阴极溶液；5—直流稳压电源；6—有机硅橡胶套；7—环箍；
8—阴极板；9—支架；10—阴极试验槽；11—支撑头

7.5.3 RCM 法试验所处的试验室温度应控制在 (20~25) °C。

7.5.4 试件制作应符合下列规定：

1 RCM 试验用试件应采用直径为 (100±1) mm、高度为 (30±1) mm 的圆柱体试件。

2 在试验室制作试件时，宜使用 $\Phi 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 或 $\Phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 试模。试件成型后应立即用塑料薄膜覆盖并移至标准养护室。试件应在 (24±2) h 内拆模，然后浸没于标准养护室的水池中。

3 试件的标准养护龄期应为 28d。热养护的超高性能混凝土应在标准蒸汽养护结束后放置于实验室环境中至 7d 龄期。

4 应在抗氯离子渗透试验前 7d 加工标准尺寸的试件。当使用 $\Phi 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 试件时，应从试件中部切取高度为 (30±1) mm 圆柱体作为试验用试件，并应将靠近浇筑面的试件端面作为暴露于氯离子溶液中的测试面。当使用 $\Phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 试件时，应先将试件从正中间切成相同尺寸的两部分

($\Phi 100\text{mm} \times 100\text{mm}$)，然后从两部分中各切取一个高度为 $(30 \pm 1)\text{mm}$ 的试件，并应将第一次的切口面作为暴露于氯离子溶液中的测试面。

5 试件加工后应采用水砂纸和细锉刀打磨光滑。

6 加工好的试件应继续浸没于水中养护至试验龄期。

7.5.5 试件准备和安装应按下列步骤进行：

1 首先应将试件从养护池中取出来，并将试件表面的碎屑刷洗干净，擦干试件表面多余的水分，然后采用游标卡尺测量试件的直径和高度，测量应精确至 0.1mm 。

2 试件安装在 RCM 试验装置前应采用电吹风冷风档吹干，表面应干净、无油污、灰砂和水珠。

3 RCM 试验装置的试验槽应在试验前用室温凉开水冲洗干净。

4 试件和 RCM 试验装置准备好后，应将试件装入橡胶套内的底部（图 7.4.2），并在与试件齐高的橡胶套外侧安装两个不锈钢环箍（图 7.4.5），每个箍高度应为 20mm ，并应拧紧环箍上的螺栓至扭矩为 $(30 \pm 2)\text{N} \cdot \text{m}$ ，使试件的圆柱侧面处于密封状态。当试件的圆柱曲面存在液体渗漏的缺陷时，应以密封剂保持其密封性。

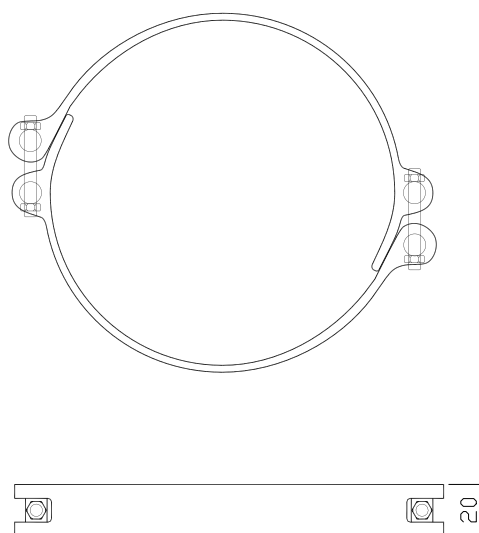


图 7.4.5 不锈钢环箍

5 应将装有试件的橡胶套安装到试验槽中，并安装好阳极板，然后在橡胶套中注入约 300mL 浓度为 0.3 mol/L 的 NaOH 溶液，并使阳极板和试件表面均浸没于溶液中。在阴极试验槽中注入适量的质量浓度为 10% 的 NaCl 溶液，并使其液面与橡胶套中的 NaOH 溶液的液面齐平。

6 试件安装完成后，应将电源的阳极（又称正极）用导线连至橡胶筒中阳极板，并将阴极（又称负极）用导线连至试验槽中的阴极板。

7.5.6 电迁移应按下列步骤进行：

1 首先应打开电源，将电压调整到 $(30 \pm 0.2)\text{V}$ ，记录通过每个试件的初始电流。

2 后续试验施加的电压（表 7.5.6 第二列）应根据施加 30V 电压时测量得到的初始电流值所处的范围（表 7.5.6 第一列）确定。应根据实际施加的电压，记录新的初始电流。应按照新的初始电流值所

处的范围（表 7.5.6 第三列），确定试验应持续的时间（表 7.5.6 第四列）。

3 应按照温度计或者电热偶的显示读数记录每一个试件的阳极溶液初始温度。

表 7.5.6 初始电流、电压与试验时间的关系

初始电流 I_0 (用 30V 电压) (mA)	施加的电压 U (调整后) (V)	可能的新初始电流 I_0 (mA)	试验持续时间 t (h)
$I_0 < 2.5$	90	$5 \leq I_0 < 10$	168
$2.5 \leq I_0 < 5$	60	$5 \leq I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$I_0 \geq 10$	60	$I_0 \geq 20$	24

4 试验结束时，应测定阳极溶液的最终温度和最终电流。

5 试验结束后应及时排出试验溶液。应用黄铜刷清除试验槽的结垢或沉淀物，并用饮用水和洗涤剂将试验槽和橡胶套冲洗干净，然后用电吹风的冷风档吹干。

7.5.7 氯离子渗透深度测定应按下列步骤进行：

1 试验结束后，应及时断开电源。

2 断开电源后，应将试件从橡胶套中取出，并立即用自来水将试件表面冲洗干净，然后擦去试件表面多余水分。

3 试件表面冲洗干净后，应在压力试验机上沿轴向劈成两个半圆柱体，并在劈开的试件表面立即喷涂浓度为 0.1 mol/L 的 AgNO_3 溶液显色指示剂。

4 指示剂喷洒约 15min 后，应沿试件直径断面将其分成 10 等分，并用防水笔描出渗透轮廓线。

5 应根据观察到的明显颜色变化，测量显色分界线（图 7.4.7）离试件底面的距离，精确至 0.1mm。

6 当某一测点被骨料阻挡时，可将此测点位置移动到最近一个未被骨料阻挡的位置进行测量，当某测点数据无法测得时，若总测点数大于 5 个，可忽略此测点。

7 当某测点位置有一个明显的缺陷，使该点测量值远大于各测点的平均值，可忽略此测点数据，但应在试验记录和报告中注明。

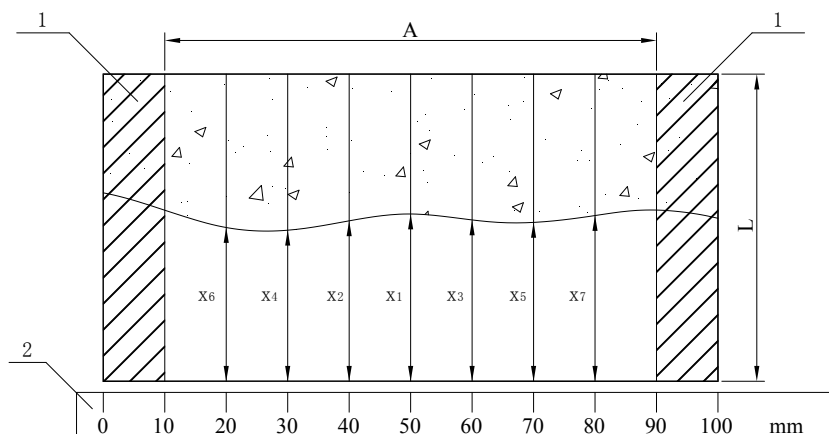


图 7.4.7 显色分界线位置编号

1—试件边缘部分；2—尺子；A—测量范围；L—试件高度

7.5.8 试验结果计算及处理应符合下列规定：

1 超高性能混凝土的非稳态氯离子迁移系数应按下列式计算：

$$D_{RCM} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} (X_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}}) \quad (7.4.8)$$

式中： D_{RCM} ——超高性能混凝土的非稳态氯离子迁移系数（ m^2/s ），精确至 $0.1 \times 10^{-12} m^2/s$ ；

U ——所用电压的绝对值（V）；

T ——阳极溶液的初始温度和结束温度的平均值（ $^{\circ}C$ ）；

L ——试件厚度（mm），精确至0.1mm；

X_d ——氯离子渗透深度的平均值（mm），精确至0.1mm；

t ——试验持续时间（h）。

2 每组应取3个试样的氯离子迁移系数的算术平均值作为该组试件的氯离子迁移系数测定值。当最大值或最小值与中间值之差超过中间值的15%时，应剔除此值，再取其余两值的平均值作为测定值；当最大值和最小值均超过中间值的15%时，应取中间值作为测定值。

7.6 抗气体渗透性能试验

7.6.1 本方法适用于以测定超高性能混凝土的气体渗透率来确定超高性能混凝土抗气体渗透性能。

7.6.2 试验设备应符合下列规定：

1 抗气体渗透试验设备（图7.6.2）应包括气路系统和气体渗透单元。

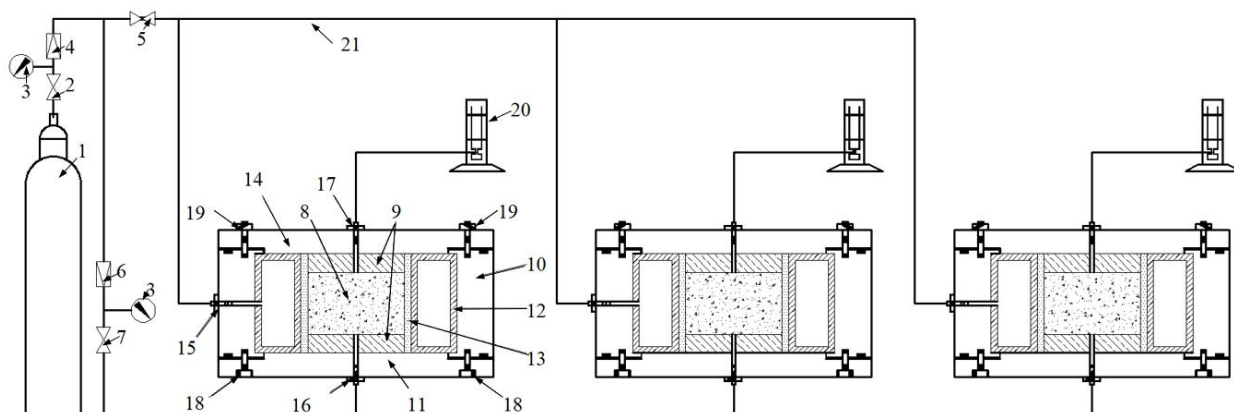


图 7.6.2 抗气体渗透试验设备

1—高压气瓶；2—气路总开关；3—高精度压力表；4—密封气路减压阀；5—密封气路开关；6—进气气路减压阀；7—进气气路开关；8—超高性能混凝土试件；9—PVC圆垫板；10—圆钢套；11—底板；12—充气橡胶囊；13—橡胶密封套；14—顶板；15—橡胶套进气嘴；16—渗透单元进气嘴；17—渗透单元出气嘴；18—底板螺栓；19—顶板螺栓；20—流量计；21—气路管

2 高压氮气瓶应符合 GB 5099.4 的规定，工作压力不应低于 2MPa。

3 高精度压力表密封气路处压力表的量程不应小于 2.5MPa，精度不应大于 $\pm 0.02MPa$ ；高精度压

力表进气气路处压力表的量程不应小于 1.5MPa，精度应为±0.01MPa。

4 皂膜流量计量程宜为（0.1~100）mL/min，精度不应小于±0.01mL/min。

7.6.3 试件制作和处理应符合下列规定：

1 抗气体渗透试验用试件应采用直径为（150±1）mm、高度为（30±1）mm 的圆柱体试件。每组试件应为 3 块。

2 宜使用Φ150mm×300mm 试模。试件成型后应立即用塑料薄膜覆盖并移至温度为 20℃±5℃、相对湿度大于 50%的室内静置 1d~2d。自然养护类超高性能混凝土，试件拆模后应立即放入标准养护室进行养护，标准养护室的温度和相对湿度应符合 GB/T 50081 的规定，试件的养护龄期为 28d。热养护类超高性能混凝土，试件拆模后放入蒸汽养护箱，以不大于 15℃/h 的速率升温至 90℃±1℃，恒温 48h，然后以不大于 15℃/h 的速率降温至室温，试件从蒸汽养护箱中取出后放置在自然环境中至 7d 龄期。

3 试件达到龄期后，应从试件中切取 3 个高度为（30±1）mm 的圆柱体作为试验用试件。试件应去除边角部位露出表面的纤维，试件两个端面应采用水砂纸和细锉刀打磨光滑。

4 应将加工密封好的试件放入烘箱中，在（60±5）℃下烘干 7d。烘干结束后应将试件移入温度为（20±2）℃、相对湿度为（60±5）%的恒温恒湿条件下静置 14d。

5 用环氧树脂涂覆圆柱体超高性能混凝土试件侧面进行密封。涂覆时应注意填补超高性能混凝土试件侧边的孔洞并应注意密封材料涂覆的表面平整度。涂完后将圆柱体混凝土试件放置在温度为（20±2）℃、相对湿度为（60±5）%的环境中不少于 24h 至密封材料固化。

7.6.4 抗气体渗透试验应按下列步骤进行：

1 将处理好的超高性能混凝土试件装入橡胶密封套和两片 PVC 圆垫板之间，两片 PVC 圆垫板与混凝土试件的总高度应与橡胶密封套的高度一致。

2 按图 1 组装气体渗透单元并连接气路系统，组装气体渗透单元时应注意拧紧顶板螺栓，使气体渗透单元处于密闭状态。

3 打开密封气路开关，应调节密封气路减压阀至橡胶囊气压恒定为（2.0±0.1）MPa，并关闭密封气路开关进行封压。

4 打开进气气路开关，应确保试验装置的气密性，并应调节进气气路减压阀至气路压力恒定为（0.70±0.01）MPa。应在气路压力恒定 120min 后开始测量，每隔 3min 读取渗透单元出气嘴处流量计显示的气体流量，应在 30min 内连续读取 10 次，并应以 10 次气体流量的平均值作为气体流量测量结果。

5 调节进气气路减压阀调整气路压力，并应按照步骤 4 的规定，依次测量进气气路压力为 0.80MPa、0.90MPa、1.00MPa 时渗透单元出气嘴的气体流量。

7.6.5 表观气体渗透率计算应符合下列规定：

混凝土试件在某个气路压力下的表观气体渗透率应按公式（1）进行计算：

$$k_p = \frac{2\mu L Q P_{atm}}{A(P_s^2 - P_{atm}^2)} \quad (7.6.5)$$

式中：

k_p ——混凝土表观气体渗透率，单位为平方米（ m^2 ）；结果采用科学计数法表示，保留三位有效数字，精确到小数点后两位；

Q ——在某个气路压力下渗透单元出气嘴的稳定气体流量，单位立方米每秒（ m^3/s ）；

P_{atm} ——渗透单元出气嘴的绝对压力，即测试条件下的大气压力，单位为帕（Pa）；

P_s ——渗透单元进气嘴的绝对压力，即进气气路压力，单位为帕（Pa）；

L ——试件厚度，单位为米（m）；

μ ——气体动力粘度系数，单位为帕秒（Pa·s），按表 1 取值；

A ——试件横截面积，单位为平方米（ m^2 ）。

7.6.6 固有气体渗透率回归应符合下列规定：

分别将四个气路压力下的 $1/P_m$ 与对应的表观气体渗透率 k_p 按公式（2）进行线性回归，得到混凝土的固有气体渗透率 k_v ：

$$k_p = b \times \frac{1}{P_m} + k_v \quad (7.6.6)$$

式中：

k_v ——混凝土固有气体渗透率，单位为平方米（ m^2 ）；结果采用科学计数法表示，保留两位有效数字，精确到小数点后一位；

P_m ——渗透单元进气嘴绝对压力和出气嘴绝对压力的平均值，单位为帕（Pa）；

b ——拟合系数。

7.6.7 结果的确定应符合下列规定：

混凝土气体渗透率的测试结果的确定应符合下列规定：

a) 取 3 个混凝土试件固有气体渗透率测值的算术平均值作为混凝土气体渗透率的测试结果，结果采用科学计数法表示，保留两位有效数字，精确到小数点后一位；

b) 当 3 个测值中的最大值或最小值中有一个与中间值的差值超过中间值的 30% 时，应把最大及最小值剔除，取中间值作为混凝土气体渗透率的测试结果；

c) 当最大值和最小值与中间值的差值均超过中间值的 30% 时，该组试件的试验结果无效。

7.7 毛细吸水速率试验

7.7.1 本方法适用于以测定超高性能混凝土的毛细吸水速率来确定超高性能混凝土吸水性能。

7.7.2 试验器材应符合下列规定：

1 设备应符合下列规定：

1) 电子天平应符合 GB/T 26497 的规定，最大称量应为待测超高性能混凝土试件质量的 1.25~5 倍且不小于 1500 g，分度值不大于 0.01 g。

2) 计时器应采用机械秒表或液晶数字式石英秒表，并分别符合 GB/T 22773 与 GB/T 22778 的规定。

3) 卡尺应符合 GB/T 21389 的规定，测量范围上限不小于 150 mm。

4) 干燥箱应符合 GB/T 30435 的规定，最高工作温度应不高于 200 °C，带鼓风功能时应配备鼓风开关，宜采用侧壁夹套加热形成自然空气对流的干燥方式。

5) 切锯机应满足 JC/T 827 的规定，并具备水冷降温功能。

6) 天平台应为三级减震天平台。

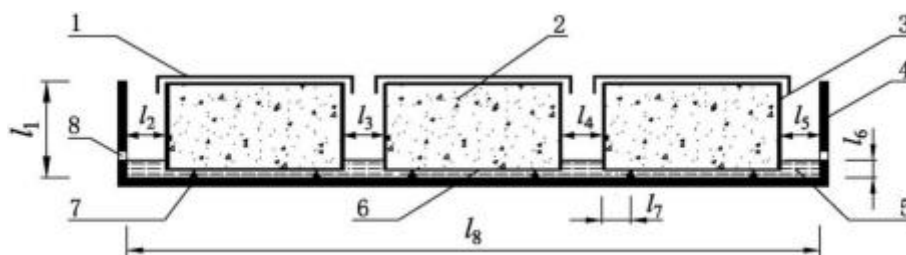
2 容器、配件及耗材应符合下列规定：

1) 平底盘宜采用不锈钢、陶瓷等材质，盘内长度不小于 500 mm，盘内宽度不小于 200 mm，盘内高度为 (50~100) mm；平底盘短边侧面对开直径为 (5±0.2) mm 的溢流孔，溢流孔下缘距离平底盆内底面 (10±0.2) mm，如图 7.6.2 所示。

2) 支撑件应采用不锈钢、聚四氟乙烯或其他耐强碱腐蚀、浸水不变形、不影响水溶液组成的高密度材质，断面宜为三角形、圆形或与试件吸水面呈非面接触的其他形状，高度为 (5±0.2) mm。

3) 夹链自封袋应符合 BB/T 0014 的规定，长度和宽度均应比超高性能混凝土试件的宽度（或直径）与高度之和的大 (20~30) mm，厚度不应小于 0.2 mm。

4) 耐水砂纸的磨料粒度应为 P180~P600。



l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8
50~100	≥50				10±0.2	10~20	≥500

1-铝箔胶带；2-超高性能混凝土试件；3-环氧树脂；4-平底盘；5-水；6-吸水面；7-支撑件；8-溢流孔

图 7.7.2 毛细吸水试验装置示意图

5) 环氧树脂在室温条件下的黏度宜为 (1 ~10) Pa·s, 凝胶时间宜为 (2~4) h, 固化时间宜为 (12~24) h, 软化点不应低于 80 °C。

6) 变色硅胶应满足 HG/T 2765.4 的规定。

7) 毛巾宜采用纯棉材质, 且吸水性满足 GB/T 22864 优等品的要求。

8) 美纹纸压敏胶粘带应满足 HG/T 3949 的规定, 且宽度宜不小于超高性能混凝土试件的宽度或直径。

9) 铝箔胶带的厚度不应小于 0.15 mm, 且宽度宜比超高性能混凝土试件的宽度或直径大 (10~20) mm。

7.7.3 试件制作应符合下列规定:

1 超高性能混凝土试件可采用浇筑成型法或钻芯法制作, 每组包含 3 个试件。钻芯法适用于从超高性能混凝土结构或构件中取样制作试件。

2 采用浇筑成型法制作试件时, 应按下列要求进行:

1) 将超高性能混凝土拌合均匀后, 浇筑在截面尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试模中, 充分振捣、抹平、覆膜后常温养护, 24 h 后拆模并立即放入标准养护室养护或进行热养护。标准养护试件的龄期宜为 28 d, 热养护的超高性能混凝土应在标准蒸汽养护结束后放置于实验室环境中至 7d 龄期。也可根据要求采用其他龄期;

2) 应在达到预定龄期前 7 d 进行试件切割。用切锯机沿与立方体成型面垂直方向, 避开端部至少 10 mm, 从中部切取高度为 (50±2) mm 的棱柱体试件, 试件应无缺棱掉角和裂缝等明显缺陷;

3) 选取任一锯切面作为吸水面, 利用耐水砂纸打磨平整并清理干净, 吸水面的不平整度不应大于 0.2 mm, 吸水面与轴线的不垂直度不应超过 1° ;

4) 锯切打磨后的试件应继续标准养护至规定龄期;

3 采用钻芯法制作试件时, 应按下列要求进行:

1) 参照 JGJ/T 384 的相关规定, 在超高性能混凝土结构或构件暴露面不同部位钻取直径为 (100±1) mm 的芯样;

2) 保留芯样的暴露面, 将芯样锯切成高度为 (50±2) mm 的圆柱体试件, 试件应不含钢筋或其他筋材, 且无缺棱掉角、裂缝和马蹄形等明显缺陷;

3) 选取暴露面作为吸水面, 必要时用耐水砂纸打磨平整并清理干净, 吸水面的不平整度不应大于 0.2 mm;

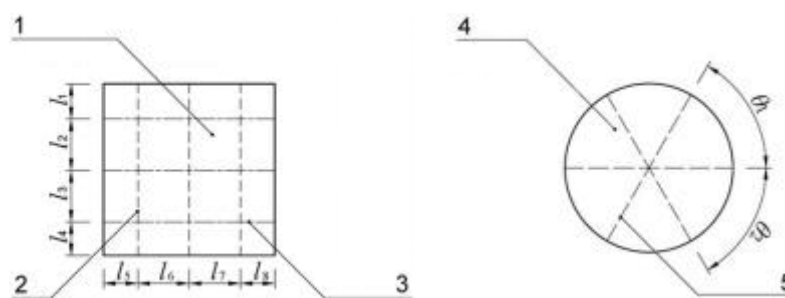
4) 圆柱体试件吸水面与轴线的不垂直度不应超过 1° , 沿试件高度方向的任一直径与平均直径的

偏差不应超过 1.5 mm；

4 试件吸水面的平整度、吸水面与轴线的垂直度、圆柱体试件沿高度方向的直径偏差应参照 JGJ/T 384 的相关规定进行检测；检测不合格时，可对试件进行适当磨平处理，若处理后仍不满足要求，应重新制作试件。

7.7.4 试件侧面密封应符合下列规定：

1 用卡尺间隔测量棱柱体试件吸水面的长度和宽度，或间隔测量圆柱体试件吸水面的直径，测量方法见图 7.6.3，取 3 次测量结果的算术平均值作为吸水面的代表性长度、宽度或直径，精确至 0.1 mm；利用代表性尺寸计算试件吸水面的面积 A ，精确至 0.1 mm^2 。



a) 棱柱体试件

b) 圆柱体试件

l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	θ_1	θ_2
$\geq 10 \text{ mm}$	$\geq 0 \text{ mm}$		$\geq 10 \text{ mm}$		$\geq 30 \text{ mm}$		$\geq 10 \text{ mm}$	$60^\circ \pm 10^\circ$	

1——棱柱体试件吸水面；2——宽度测试位置；3——长度测试位置；4——圆柱体试件吸水面；5——直径测试位置。

图 7.7.4 超高性能混凝土试件吸水面长度、宽度或直径的测量方法

2 采用美纹纸压敏胶粘带遮盖试件的吸水面及其对面，应完全遮盖且无间隙。将试件吸水面朝上放置，采用环氧树脂对试件侧面进行完全涂抹密封处理，待环氧树脂完全固化后，揭去美纹纸压敏胶粘带并清理干净残胶。

3 试件吸水面不应沾染环氧树脂。

7.7.5 试件干燥处理应符合下列规定：

1 取出超高性能混凝土试件，用拧干的湿毛巾擦干试件表面多余水分后，将试件放入工作温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的干燥箱，试件应居中摆放在干燥箱内的多孔隔板上，吸水面应垂直隔板平面；相邻试件端面间距不应小于 30 mm，试件与干燥箱内壁间距不应小于 50 mm，每层隔板仅允许摆放 1 层试件。干燥箱内部应放置盛满蓝色硅胶的托盘，托盘深度不应小于 15 mm，托盘面积不应小于隔板面积的 25%。干燥过程中，干燥箱不应开启鼓风，变色硅胶应始终保持蓝色，已变色部分应及时更换。

2 在干燥处理过程中，环氧树脂与超高性能混凝土试件的界面处不应产生脱空、鼓泡和开裂等缺

陷。

3 当干燥时间达到 (72 ± 0.5) h 时，将超高性能混凝土试件逐个取出并立即装入夹链自封袋内，排出夹链自封袋内部空气后封合夹链，检查并确认夹链封合完全后，保持夹链端向内装入另一个夹链自封袋，重复该操作直至每个试件被 3 个夹链自封袋包裹密封。

4 将装有试件的夹链自封袋放置在温度不低于 23°C 的室内，放置时间应为 $(14 \sim 16)$ d，期间应避免阳光直射、高温烘烤及机械碰撞等，确保夹链自封袋无破损。

7.7.6 测试应按下列步骤进行：

1 将装有同组超高性能混凝土试件的夹链自封袋、测试用水、平底盘和支撑件移入符合温度应保持为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度不宜低于 50%，无震动源的测试环境中，放置 12 h 以上。

2 将平底盘置于水平桌面上，向平底盘内部注水直至水从溢流孔持续流出后，将支撑件放置在平底盘底部，布置方式见图 7.7.2。

3 试验期间，平底盘内水面应始终保持高于支撑件顶部至少 2 mm，水面高度不足时应及时补水。

4 试验期间，应在下列规定的时间点测量试件质量 m_t ，并记录对应的吸水时间 t ：

1) 当 $t = 4 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$ 时，首次测量试件质量 m_t ，吸水时间 t 精确至 1 s；

2) 当 $t = (20 \pm 1) \text{ min}$ 时，再次测量试件质量 m_t ，吸水时间 t 精确至 1 s；

3) 当 $20 \text{ min} < t \leq 2 \text{ h}$ 时，间隔 $(20 \pm 1) \text{ min}$ 重复测量试件质量 m_t ，吸水时间 t 精确至 10 s；

4) 当 $2 \text{ h} < t \leq 6 \text{ h}$ 时，间隔 $(30 \pm 2) \text{ min}$ 重复测量试件质量 m_t ，吸水时间 t 精确至 10 s；

5) 当 $6 \text{ h} < t \leq 8 \text{ h}$ 时，间隔 $1 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ 重复测量试件质量 m_t ，吸水时间 t 精确至 1 min；

6) 当 $8 \text{ h} < t \leq 24 \text{ h}$ 时，间隔 $4 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$ 重复测量试件质量 m_t ，吸水时间 t 精确至 1 min；

5 在 7.7.6 条 4 段规定的时间点快速取出试件，保持吸水面朝下放置在拧干并摊平的湿毛巾上，吸干表面水分后，将试件吸水面朝上放置在电子天平上测量并记录试件质量 m_t 。测量完成后，立即将试件重新放回平底盘原来位置继续吸水。试件取放、表面吸干和质量测量的整个操作过程应在 15 s 内完成。

7.7.7 试验结果计算及处理应符合下列规定：

1 超高性能混凝土毛细吸水率应按照下式计算：

1) 超高性能混凝土试件在吸水时间 t 的毛细吸水率 $I_t(\text{mm})$ 应按式 (7.6.6-1) 计算。

$$I_t = \frac{m_t - m_0}{A\rho_w} \dots\dots\dots (7.7.7-1)$$

式中：

I_t ——试件在吸水时间 t 的毛细吸水率 (mm)，精确至 0.0001 mm；

m_t ——试件在吸水时间 t 的质量 (g)；

m_0 ——试件吸水前的初始质量 (g)；

A ——试件吸水面的面积 (mm^2) ;

ρ_w ——水的密度, 取值为 0.001 g/mm^3 。

2) 超高性能混凝土的毛细吸水速率应以初始毛细吸水速率表示。按式 (7.6.6-2) 对超高性能混凝土试件初期的毛细吸水率 I_t 与吸水时间算术平方根 $t^{0.5}$ 的关系进行最小二乘线性拟合, 所得斜率为初始毛细吸水速率 S_1 。

$$I_t = S_1\sqrt{t} + b_1 \dots\dots\dots (7.7.7-2)$$

式中:

S_1 ——试件的初始毛细吸水速率 ($\text{mm/min}^{0.5}$), 精确至 $0.0001 \text{ mm/min}^{0.5}$;

b_1 ——初始拟合参数 (mm)。

注: 初始拟合参数 b_1 主要反映试件吸水面处并非理想一维毛细吸水情形的影响程度。

3) 按式 (7.7.7-2) 进行拟合时, 应选用 $20 \text{ min} \leq t \leq 24 \text{ h}$ 时的所有毛细吸水率 I_t , 且相关系数 R^2 不应小于 0.98 。当相关系数 R^2 不满足要求时, 从后往前逐个删除毛细吸水率 I_t 数据点并重新拟合, 直至相关系数 R^2 满足要求。当拟合数据点的数量少于 5 个或初始拟合参数 $b_1 < 0$, 该试件初始毛细吸水速率的拟合结果无效。

4) 按式 (7.7.7-2) 进行拟合时, 对相关系数 R^2 的限制要求应采用 GB/T 8170 规定的全数值比较法。

5) 注: 当相关系数 R^2 为 0.9799 时, 不满足要求。

2 计算结果处理应符合下列规定:

1) 若同组三个超高性能混凝土试件的初始毛细吸水速率均有效, 应以三个试件测试结果的算术平均值作为该组试件的代价值。若只有一个试件的测试结果无效, 则取其余两个试件测试结果的较大值作为该组试件的代价值。若有两个试件的测试结果无效, 则该组试件的测试结果无效。

2) 在初始毛细吸水速率三个测试结果的最大值或最小值中, 若只有一个与其中间值的差值超过中间值的 20% 时, 则取中间值作为该组超高性能混凝土试件的代价值; 若最大值和最小值与中间值的差值均超过中间值的 20% 时, 则该组试件的测试结果无效。

附录 A（资料性附录） 超高性能混凝土动态压缩试验示例

A.1 试样描述

本试验为超高性能混凝土的动态压缩试验，试样为自制，超高性能混凝土配合比见表A.1.1。

表A.1.1 试验用超高性能混凝土配合比（kg/m³）

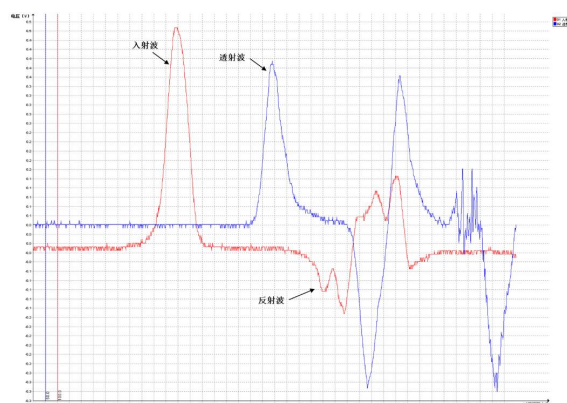
水泥	硅灰	降粘剂	矿渣粉	石英砂	石英粉	钢纤维	水
632	97	146	97	851	284	158	175

A.2 实验过程

- 1) 设定试验条件：温度21.3℃，相对湿度55%。
- 2) 按6.14.4条要求在波导杆中部位位置粘贴应变计，布置应变计引线连接数据采集与存储装置。
- 3) 开启测速装置、应变信号采集与存储装置预热至设备稳定。对数据采集系统进行参数设定。
- 4) 对系统校正，试验前检查系统对齐情况，将其调齐；之后空冲，确保无反射波产生。
- 5) 将试样两端均匀涂抹一层凡士林，置于输入杆和输出杆中间，与波导杆同轴。同时在试样和输入杆中间加入直径为20mm、厚度宜为1.0mm的橡胶圆片作为波形整形器，且与波导杆同轴。
- 6) 将测速装置和数据采集系统置于待触发状态，设定冲击速度，调整冲击气压，驱动撞击杆。
- 7) 试样在冲击荷载作用下发生破坏，记录撞击杆速度、波导杆应变信号。

A.3 原始波形

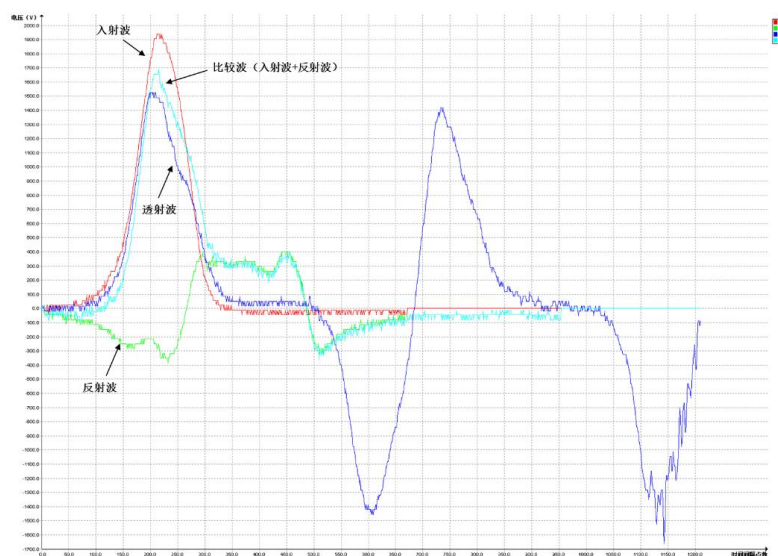
入射波、透射波、反射波原始信号如图A.1所示，反射波上有段平台，具有明显的恒应变率特征。



图A.1 数据采集系统获取的超高性能混凝土动态压缩试验原始信号

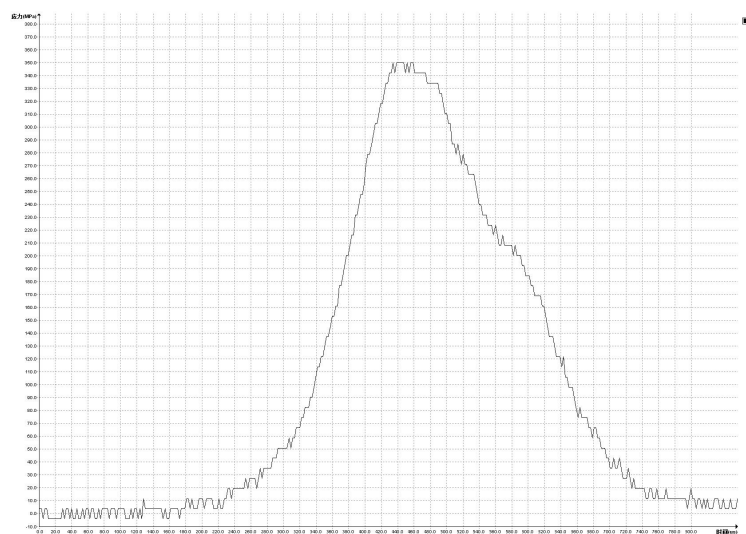
A.4 数据处理

将由零点漂移引起的应力偏差校零，计算入射端应力，并微调各波起点，使其达到应力平衡状态。利用波形拾取方法截取出有效的电压信号，计算出各弹性杆及试样内的初始应力波。对比透射波和比较波可见入射端应力与透射应力偏差较小，基本符合应力平衡条件。

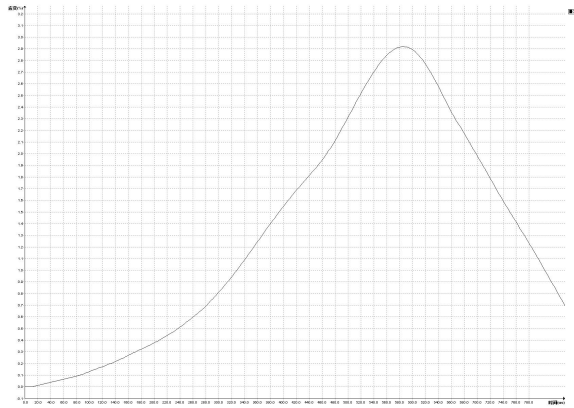


图A.2 动态压缩试验波形基线、波形起点的确定、对齐波形及应力平衡检验

确定试件破坏情况，确定完整试验结束点。计算出试样内部的应力、应变、应变率时程曲线和应力—应变曲线如图A.3所示。由应力-应变曲线可以得到动态抗压强度为349.7MPa，峰值应变为0.94%；计算应变率处于平台阶段的平均应变率为78.5s⁻¹。



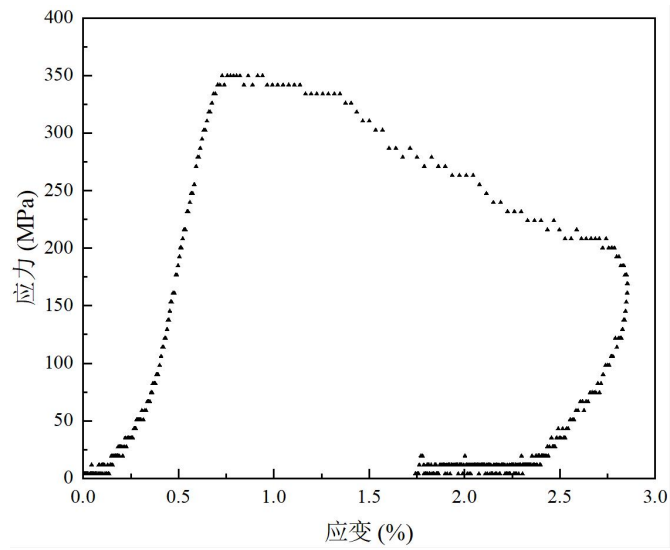
(a) 应力时程曲线



(b) 应变时程曲线



(c) 应变率时程曲线

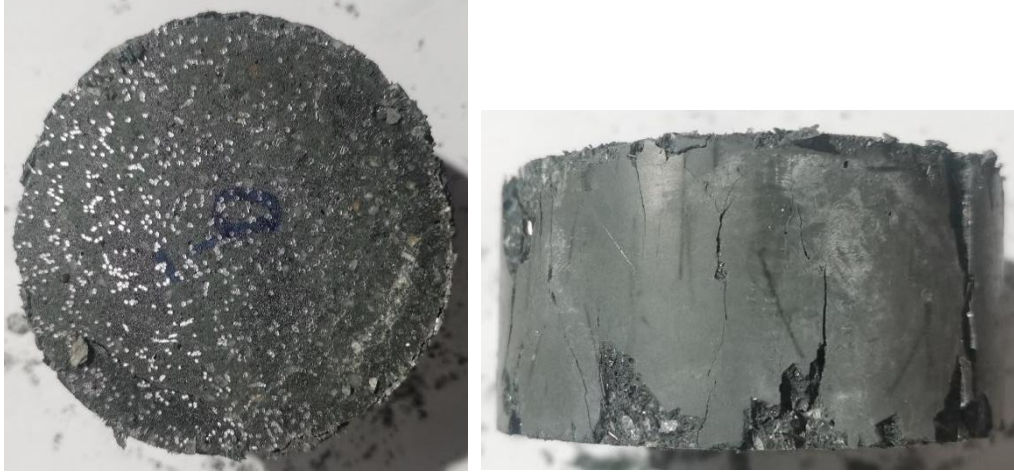


(d) 应力—应变曲线

图A.3 应力、应变、应变率时程曲线和应力—应变曲线

A.5 试样破坏模式

在冲击加载下，试样发生典型的轴向劈裂张拉破坏，试样表面产生多条平行于加载方向的宏观裂纹，如图A.4所示。钢纤维的抗拉拔作用能有效地抑制试件的横向变形，使超高性能混凝土表现出明显的塑性，试件呈现开裂但不破碎的状态。



图A.4 超高性能混凝土动态抗压试验典型破坏图