



T/CECS_{xxx}-2020

中国工程建设标准化协会标准

超高性能混凝土试验方法标准

Standard test methods for Ultra-High Performance Concrete

（征求意见稿）

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

超高性能混凝土试验方法标准

Standard test methods for Ultra-High Performance Concrete

T/CECS xxx—2020

主编单位：上海市建筑科学研究院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2020 年 XX 月 XX 日

中国计划出版社

2020 年 北京

前 言

本标准根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2018 年第二批协会标准制定、修订计划>的通知》（建标协字〔2018〕030 号）文件的要求，编制组在深入调研、认真总结实践经验、参考国内外先进标准和广泛征求意见的基础上，编制本标准。

本标准共分 6 章。主要内容包括总则、术语、基本规定、超高性能混凝土拌合物性能试验、超高性能混凝土物理力学性能试验、超高性能混凝土长期性能和耐久性能试验。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会归口管理，由上海市建筑科学研究院有限公司负责具体技术内容的解释。本标准在执行过程中如有意见或建议，请寄送至上海市建筑科学研究院有限公司（地址：上海市闵行区申富路 568 号，邮编：201108，邮箱：fanjunjiang68@126.com）。

主 编 单 位：上海市建筑科学研究院有限公司

参 编 单 位：

主要起草人：

主要审查人：

目次

1	总 则	1
2	术 语	2
3	基本规定	3
3.1	一般规定	3
3.2	拌合物取样与制备	3
3.3	试件的成型及养护	3
3.4	试验或检测报告	4
4	超高性能混凝土拌合物性能试验	6
4.1	一般规定	6
4.2	扩展度及扩展度经时损失试验	6
4.3	扩展时间试验	7
4.4	凝结时间试验	7
4.5	表观密度试验	8
4.6	含气量试验	9
4.7	纤维含量试验	10
5	超高性能混凝土物理力学性能试验	12
5.1	一般规定	12
5.2	抗压强度试验	12
5.3	轴心抗压强度与静力受压弹性模量试验	13
5.4	抗弯强度与弯曲韧性试验	16
5.5	轴心抗拉性能试验	19
5.6	劈裂抗拉强度试验	22
5.7	粘结强度试验	24
5.8	泊松比试验	24
5.9	线膨胀系数试验	26
5.10	耐磨性试验	27
5.11	抗冲磨性试验	29
5.12	硬化超高性能混凝土密度试验	31
5.13	钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度试验	33
6	超高性能混凝土长期性能和耐久性能试验	37
6.1	一般规定	37
6.2	自收缩试验	37
6.3	干燥收缩试验	38
6.4	受压徐变试验	40
6.5	抗冻试验	44
6.6	抗氯离子渗透性能试验	46
6.7	抗气体渗透性能试验	50
	本规程用词说明	53
	引用标准名录	54
	附：条文说明	54

Contents

1	General Provisions.....	1
2	Terms	2
3	Basic Requirements	3
	3.1 General Requirements.....	3
	3.2 Mixture Sampling and Preparation	3
	3.3 Forming And Curing of Specimen.....	3
	3.4 Test Or Test Report.....	4
4	Test of Mixture Performance of UHPC.....	6
	4.1 General Requirements.....	6
	4.2 Test of Slump-flow and Slump-flow Loses through Time.....	6
	4.3 Test of Slump-flow Time.....	7
	4.4 Test of Setting Time.....	7
	4.5 Test of Apparent Density	8
	4.6 Test of Air Content	9
	4.7 Test of Fiber Content	10
5	Test of Physical and Mechanical Properties of UHPC.....	12
	5.1 General Requirements.....	12
	5.2 Test of Compressive Strength	12
	5.3 Test of Axial Compressive Strength and Elastic Modulus Under Static Pressure	13
	5.4 Test of Bending Strength And Bending Toughness	16
	5.5 Test of Axial Tensile Performance.....	19
	5.6 Test of Splitting Tensile Strength	22
	5.7 Test of Concrete Bond Strength.....	24
	5.8 Test of Poisson's Ratio.....	24
	5.9 Test of Linear Expansion Coefficient	26
	5.10 Test of Abrasion Resistance.....	27
	5.11 Test of Hydraulic Abrasion Resistance.....	29
	5.12 Test of Hardened Ultra-High Performance Concrete	31
	5.13 Test of Bond Strength between Fiber and Ultra-High Performance Concrete Matrix	33
6	Test of Long-Term Performance and Durability of UHPC	37
	6.1 General Requirements.....	37
	6.2 Test of Autogenous Shrinkage	37
	6.3 Test of Drying Shrinkage.....	38
	6.4 Test of Creep of Ultra-High Performance Concrete in Compression	40
	6.5 Test of Resistance of Ultra-High Performance Concrete to Freezing and Thawing	44
	6.6 Test of Resistance of Ultra-High Performance Concrete to Chloride Penetration.....	46
	6.7 Test of Resistance of Ultra-High Performance Concrete to Gas Penetration.....	50
	Explanation of Wordings in This Specification.....	53
	List of Quoted Standards.....	54
	Explanation of Provisions	55

1 总 则

1.0.1 为进一步规范和统一超高性能混凝土的试验方法,提高超高性能混凝土试验精度和试验技术水平,制定本标准。

1.0.2 本标准适用于各类工程中现浇和预制成型的超高性能混凝土的拌合物性能、物理力学性能、长期性能和耐久性能试验。

1.0.3 超高性能混凝土试验方法,除应符合本标准的规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

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

由水泥、掺合料、骨料、增强纤维、减水剂和水等原材料制成的具有超高力学性能、超高抗侵蚀性介质渗性能兼具改善脆性特征的水泥基复合材料。

2.0.2 轴心抗拉性能 axial tensile performance

超高性能混凝土在单轴拉伸荷载作用下表现出的力学特征。

2.0.3 抗气体渗透性能 resistance to gas penetration

通过测定透过超高性能混凝土的气体流量,计算得到气体渗透率来反映混凝土对气体渗透的抵抗能力。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 试验环境相对湿度不宜小于 50%，温度应保持在 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ；所用材料、试验设备、容器和辅助设备的温度宜与试验室温度保持一致。

3.1.2 试验仪器设备应具有有效期内的计量检定或校准证书。

3.1.3 试件的尺寸测量与公差应符合《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 和《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 的有关规定。

3.1.4 现场试验时，应避免超高性能混凝土拌合物试样受到风、雨雪及阳光直射的影响。

3.2 拌合物取样与制备

3.2.1 超高性能混凝土拌合物的现场取样应符合下列规定：

1 同一组超高性能混凝土拌合物的取样，应在同一盘或同一车超高性能混凝土中取样。取样量应多于试验所需量的 1.5 倍，且不宜小于 20L。

2 超高性能混凝土拌合物的取样应具有代表性，宜采用多次采样的方法。宜在同一盘或同一车超高性能混凝土中的 1/4 处、1/2 处和 3/4 处分别取样，并搅拌均匀；第一次取样和最后一次取样的时间间隔不宜超过 15min。

3 宜在取样后 5min 内开始各项性能试验。

3.2.2 试验室制备超高性能混凝土拌合物的称量与搅拌应符合下列规定：

1 原材料用量应以质量计，骨料的称量精度应为 $\pm 0.5\%$ ，水泥、掺合料、纤维、水、外加剂等其他原材料的称量精度应为 $\pm 0.2\%$ 。

2 超高性能混凝土拌合物宜采用强制式搅拌机搅拌，搅拌前应将搅拌机冲洗干净，并预拌少量不含钢纤维的超高性能混凝土拌合物，搅拌机内壁挂浆后将剩余料卸出；

3 超高性能混凝土搅拌时宜将骨料、水泥、掺合料、粉剂外加剂等干料预先干拌 1min~2min，然后加入水和其他液体原材料湿拌，搅拌时间不宜低于 5min，直至拌合物接近目标流动性；然后缓慢加入纤维，待纤维全部加完后继续搅拌不少于 2min，至纤维在拌合物中分散均匀。

4 超高性能混凝土拌合物的搅拌方式可根据产品特点和实际情况进行调整，采用预混料制备超高性能混凝土时，应根据使用说明书中的要求进行搅拌。

5 制取拌合物试样后到开始进行各项性能试验不宜超过 5min。

3.3 试件的成型及养护

3.3.1 超高性能混凝土试件的成型应符合下列规定：

1 成型前，应检查试模尺寸并符合《混凝土试模》JG 3019 中有关规定：试模内表面应涂一薄层矿物油或其他不与超高性能混凝土发生反应的脱模剂。

2 取样或试验室拌制的超高性能混凝土应在拌制后尽短的时间内成型，一般不宜超过 10min。

3 超高性能混凝土拌合物浇筑时,宜根据拌合物扩展度的不同,采用不同的浇筑方式。当拌合物扩展度大于 650mm 时,宜从试模的一侧开始浇筑,一次浇筑完毕。当拌合物扩展度小于 650mm 时,宜进行分层浇筑,每层厚度不宜大于 50mm,每层浇筑后,宜采用橡皮锤轻敲侧模。浇筑完成后,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。

4 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。

3.3.2 超高性能混凝土的标准养护应符合下列规定:

1 试件成型抹面后应立即用不透水的塑料薄膜覆盖表面,或采取其他保持试件表面湿度的方法。

2 试件成型后应在温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度大于 50%的室内静置 1d~2d,试件静置期间应避免受到振动和冲击,静置后编号标记、拆模,当试件有严重缺陷时,或产生收缩裂缝时应按废弃处理。

3 试件拆模后应立即放入温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 95%以上的标准养护室中养护,或在温度为 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的不流动的氢氧化钙饱和溶液中养护。标准养护的试件应按 10mm~20mm 的间距放在支架上,试件表面应保持潮湿,但不得用水直接冲淋试件。

4 无特殊条件的情况下试件的养护龄期应为 28d,也可根据设计龄期或实际需求对养护龄期进行调整,龄期应从搅拌加水开始计时。

3.3.3 超高性能混凝土的热养护应符合下列规定:

1 超高性能混凝土试件的热养护应优先采用与实际生产或施工相一致的热养护方式。当热养护条件无法与实际保持一致时,应进行标准蒸汽养护。

2 用于标准蒸汽养护的试件,成型后应在温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度大于 50%的室内静置 1d~2d 后脱模,试件静置期间应避免受到振动和冲击,静置后编号标记、拆模,当试件有严重缺陷时,或产生收缩裂缝时应按废弃处理。

3 用于标准蒸汽养护的试件,脱模后应立即放入蒸养箱,以不超过 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率升温至 $90^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,恒温 48h,然后以不大于 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率降温至室温。然后放置在自然环境中至 7d 龄期。龄期应从搅拌加水开始计时。

3.4 试验或检测报告

3.4.1 超高性能混凝土拌合物性能的试验或检测报告应包括以下内容:

1 委托单位名称;

2 工程名称及施工部位;

3 检测项目名称;

4 现场取样的超高性能混凝土拌合物,应记录取样方式、取样日期、取样地点及取样的环境温度和天气情况;试验室制备的超高性能混凝土拌合物,应记录制样日期、试验室的温度和湿度。

5 超高性能混凝土拌合物加水时间、搅拌方式和搅拌时间;

6 超高性能混凝土基本配合比;

7 试样数量及试样编号;

- 8 仪器设备的名称、型号及编号；
- 9 试验编号；
- 10 检测试验结果；
- 11 要说明的其他内容。

3.4.2 超高性能混凝土物理力学性能、长期性能和耐久性能的试验或检测报告应包括以下内容：

- 1 委托单位名称；
- 2 工程名称及施工部位；
- 3 检测项目名称；
- 4 采样方式，如系送试件应写明试件的制作单位及试件收到的日期。
- 5 试件编号及对应的超高性能混凝土基本配合比；
- 6 试件制作日期；
- 7 试件的形状与尺寸；
- 8 养护条件及试验龄期；
- 9 试验编号及试验日期；
- 10 仪器设备的名称、型号及编号；
- 11 试验室温度和湿度；
- 12 超高性能混凝土实际强度；
- 13 检测试验结果；
- 14 要说明的其他内容。

4 超高性能混凝土拌合物性能试验

4.1 一般规定

4.1.1 本章规定了超高性能混凝土扩展度及经时损失、扩展时间、凝结时间、表观密度、含气量、纤维含量的试验方法。

4.1.2 本标准未规定的拌合物性能指标的试验方法可按现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 或其他国家现行有关标准执行。

4.2 扩展度及扩展度经时损失试验

4.2.1 本方法适用于扩展度不低于 500mm 的超高性能混凝土拌合物的扩展度及扩展度随静置时间变化的测定。

4.2.2 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 坍落度仪应符合现行行业标准《混凝土坍落度仪》JG/T 248 的规定；
- 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。

4.2.3 超高性能混凝土的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坍落度筒，加满后刮去多余拌合物，沿筒口抹平，不得插捣和振动；
- 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~5s。当试样不再继续扩展或扩展时间已达 90s 时，应使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。

4.2.4 超高性能混凝土的扩展度经时损失试验应按以下步骤进行：

- 1 应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 60min 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 60min 扩展度值 L_{60} ；
- 4 计算初始扩展度值与 60min 扩展度值的差值，可得到 60min 超高性能混凝土扩展度经时损失试验结果。

4.2.5 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。

4.2.6 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。

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

4.2.8 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。

4.3 扩展时间试验

4.3.1 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。

4.3.2 扩展时间试验的试验设备应符合下列规定：

1 坍落度仪应符合现行行业标准《混凝土坍落度仪》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、400mm、500mm、600mm、700mm、800mm、900mm 的同心圆；

3 盛料容器不应小于 8L，并易于向坍落度筒装填超高性能混凝土拌合物；

4 秒表精度不应低于 0.1s。

4.3.3 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匀填满坍落度筒，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；清除筒边底板上的超高性能混凝土拌合物后，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，应自坍落度筒离开地面时开始，至扩展开的超高性能混凝土拌合物边缘初触平板所绘直径 500mm 的圆周为止，结果精确至 0.1s。

4.4 凝结时间试验

4.4.1 本试验方法适用于不加纤维的超高性能混凝土用贯入阻力法测定超高性能混凝土拌合物的初凝时间与终凝时间。

4.4.2 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±10N；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 100mm²、50mm² 和 20mm² 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。

4.4.3 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 应采用不加纤维的超高性能混凝土拌合物，将拌合物一次分别装入三个试样筒中。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±2℃ 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℃±2℃。在整个测试过程中，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。根据超高性能混凝土拌合物的性能，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 测试时，将砂浆试样筒置于贯入阻力仪上，测针端部与拌合物表面接触，应在 10s±2s 内均匀地使测针贯入拌合物 25mm±2mm 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。

5 每个砂浆筒每次测 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。

6 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。

7 根据超高性能混凝土拌合物凝结状况，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 4.4.3 的规定选用。

表 4.4.3 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

4.4.4 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公式计算：

$$f_{PR} = \frac{P}{A} \quad (4.4.4-1)$$

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 (4.4.4-2) 通过线性回归方法确定；根据式 (4.4.4-2) 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。

$$\ln t = a + b \ln f_{PR} \quad (4.4.4-2)$$

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。

4.4.5 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。

4.5 表观密度试验

4.5.1 本试验方法可用于超高性能混凝土拌合物单位体积质量的测定。

4.5.2 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。容量筒体积应不小于 5L，筒壁厚不应小于 3mm。容量筒上沿及内壁应光滑平整，顶面与地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。

4.5.3 超高性能混凝土拌合物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) 应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，容量筒内应满水并且不应存在气泡，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_1 ，精确至 10g。

3 超高性能混凝土拌合物试样应一次性装满，且不应进行振动和插捣。

4 将筒口多余的超高性能混凝土拌合物刮去，表面有凹陷应填平；应将容量筒外壁擦净，称出混凝土拌合物试样与容量筒总质量 m_2 ，精确至 10g。

4.5.4 超高性能混凝土拌合物的表观密度应按下列式计算：

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.5.4)$$

式中： ρ ——混凝土拌合物表观密度（kg/m³），精确至 10kg/m³；

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）。

4.6 含气量试验

4.6.1 本方法适用于超高性能混凝土拌合物含气量的测定。

4.6.2 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现行行业标准《混凝土含气量测定仪》JG/T 246 的规定；

2 电子天平的最大量程应为 50kg，感量不应大于 10g。

4.6.3 超高性能混凝土拌合物含气量试验应按下列步骤进行：

1 应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，且不应进行振动或插捣。

3 刮去多余的超高性能混凝土拌合物，用抹刀刮平，表面有凹陷应填平抹光。

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 ，精确至 0.1%。

8 超高性能混凝土拌合物的含气量 A_0 应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。

4.6.4 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} ，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，管壁加水阀和排水阀；应将含气量测定仪外表面擦净，再次测定总质量 m_{A2} ，精确至 10g。

3 含气量测定仪的容积应按下式计算：

$$V = \frac{m_{A2} - m_{A1}}{\rho_w} \quad (4.6.4)$$

式中： V ——气量仪的容积（L），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 0 时对应的压力值。

6 开启排气阀，压力表显示值应为零；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，应按本标准第 4.6.4 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。

4.6.5 混凝土含气量测定仪的标定和率定应保证测试结果准确。

4.7 纤维含量试验

4.7.1 本方法适用于新拌超高性能混凝土拌合物单位体积中纤维含量的测定。

4.7.2 纤维含量所用设备应符合下列规定：

1 电子天平：称量 1kg，感量 1g（用于称量钢纤维）；称量 100g，感量 0.02g（用于称量合成纤维）；

2 容量筒：容积 5L；

3 不锈钢筛网：网孔尺寸 2.5mm×2.5mm；

4 其他：振槌、铁铲、容器、磁铁。

4.7.3 纤维含量应测定两次，应按下列步骤进行：

1 把容量筒内外擦净；

2 应一次性将超高性能混凝土拌合物灌至高出容量筒口，装完后稍加敲振；

3 刮去多余拌合物，并填平表面凹陷部分；

4 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。对于钢纤维，可将稀浆慢慢倒出，在所余的砂石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。

5 必要时将收集到的纤维倒入另外容器中二次加水搅拌，重新收集。

4.7.4 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，钢纤维精确至 1g，合成纤维精确至 0.02g。

4.7.5 纤维含量应按下列式计算：

$$W_f = m_f / V \quad (4.7.5)$$

式中： W_f ——超高性能混凝土中的纤维含量 (kg/m^3)；

m_f ——容量筒中纤维质量 (g)；

V ——容量筒容积 (L)。

4.7.6 纤维的体积率应按下列式计算：

$$\rho_f = \frac{W_f}{\gamma_f} \times 100\% \quad (4.7.6)$$

式中： ρ_f ——超高性能混凝土中的纤维体积率 (%)；

γ_f ——纤维的质量密度 (kg/m^3)。

4.7.7 纤维含量的测定值应为纤维含量两次测定值的平均值，测定值应符合下列条件：

$$|W_{f1} - W_{f2}| \leq 0.15W_{fm} \quad (4.7.7)$$

式中： W_{f1} ， W_{f2} ——分别为两次测得的纤维含量 (kg/m^3)；

W_{fm} ——两次测定纤维含量的平均值 (kg/m^3)。

5 超高性能混凝土物理力学性能试验

5.1 一般规定

5.1.1 本章规定了超高性能混凝土抗压强度、轴心抗压强度、受压弹性模量试验、抗弯强度及弯曲韧性、轴心抗拉性能、劈裂抗拉强度、粘结强度、泊松比、线膨胀系数、耐磨性、抗冲磨性、硬化超高性能混凝土密度、钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度的试验方法。

5.1.2 本标准未规定的物理力学性能指标的试验方法可按现行国家标准《普通混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 或其他国家现行有关标准执行。

5.2 抗压强度试验

5.2.1 本方法适用于测定超高性能混凝土试件的抗压强度。

5.2.2 超高性能混凝土抗压强度试验的试件尺寸应为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体试件，每组试件应为 6 块。

5.2.3 抗压强度试验的试验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 $\pm 1\%$ ；
- 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) 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 ；表面硬度不应大于 55HRC；板面光滑、平整，表面粗糙度 R_a 不应大于 $0.80\mu\text{m}$ ；
- 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 游标卡尺的量程不应小于 200mm ，分度值宜为 0.02mm 。

4 塞尺最小叶片厚度不应大于 0.02mm ，同时应配置直板尺。

5 游标量角器的分度值应为 0.1° 。

5.2.4 超高性能混凝土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 3.1.3 条的规定，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 1.20 MPa/s~1.40MPa/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。

5.2.5 超高性能混凝土抗压强度试验结果计算及确定按下列方法进行：

- 1 超高性能混凝土立方体抗压强度应按下列公式计算：

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \quad (5.2.5)$$

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 超高性能混凝土抗压强度值的确定应符合下列规定：
 - 1) 取 6 个试件测值的算术平均值作为该组试件的抗压强度值，应精确至 0.1MPa；
 - 2) 当 6 个测值中的如有一个或两个与平均值的差值超过平均值的 10%时，则把超出平均值 10%的测值舍除，取剩余测值的平均值作为该组试件的抗压强度值；
 - 3) 如有三个或三个以上测值与平均值的差值均超过平均值的 10%，则该组试件的试验结果无效。
 - 4) 测得的强度值无需乘以任何尺寸换算系数。

5.3 轴心抗压强度与静力受压弹性模量试验

5.3.1 本方法适用于测定超高性能混凝土试件的轴心抗压强度和静力受压弹性模量。

5.3.2 超高性能混凝土轴心抗压强度与静力受压弹性模量试验的试件尺寸和数量应符合下列规定：

- 1 应采用尺寸为 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，3 个用于测定静力受压弹性模量。
- 3 当只需测定轴心抗压强度时，每次试验制备 3 个试件。

5.3.3 轴心抗压强度与静力受压弹性模量试验的试验设备应符合下列规定：

- 1 压力试验机、钢垫板、游标卡尺、游标量角器应符合本标准第 5.2.3 条规定；
- 2 用于微变形测量的仪器应符合下列规定：
 - 1) 微变形测量仪器可采用千分表、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。

5.3.4 超高性能混凝土轴心抗压强度与静力受压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 3.1.3 条的规定,试件取出后应尽快进行试验,其中 3 个试件用于测定轴心抗压强度,剩余 3 个试件用于测定静力受压弹性模量。

2 按下列步骤测定轴心抗压强度:

- 1) 将试件表面与上、下承压板面擦拭干净后,将试件直立放置在试验机的下压板或钢垫板上,并应使试件轴心与下压板中心对准。
- 2) 启动试验机,当上压板与试件快接触时,调整球座,使试件表面与上下承压板或钢垫板均匀接触。
- 3) 以 $1.20\text{ MPa/s}\sim 1.40\text{ MPa/s}$ 的速度连续而均匀加荷。
- 4) 当手动控制压力机加荷速度时,在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,计算并确定轴心抗压强度 f_{cp} 。

3 按下列步骤测定静力受压弹性模量:

- 1) 将微变形测量仪应安装在试件两侧中线上并对称于试件两端。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 150 mm ,由标距定位杆定位,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 150 mm ,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,并在试件的两侧中部用 502 胶水粘贴应变片。
- 2) 将试件表面与上、下承压板面擦拭干净后,将试件直立放置在试验机的下压板或钢垫板上,并应使试件轴心与下压板中心对准。
- 3) 启动试验机,当上压板与试件快接触时,调整球座,使试件表面与上下承压板或钢垫板均匀接触。
- 4) 应加荷至基准应力为 0.5 MPa 的初始荷载值 F_0 ,保持恒载 60 s 并在以后的 30 s 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 $1/3$ 时的荷载值 F_a ,保持恒载 60 s 并在以后的 30 s 内记录每一测点的变形读数 ε_a 。加荷速度应取 $1.20\text{ MPa/s}\sim 1.40\text{ MPa/s}$ 。
- 5) 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 3 款步骤 4) 的规定。当无法使其减小到小于 20% 时,此次试验无效。
- 6) 在确认试件对中符合本条第 3 款步骤 5) 的要求后,以与加荷速度相同的速度卸荷至基准应力 0.5 MPa (F_0),恒载 60 s ;应用同样的加荷和卸荷速度以及 60 s 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,应在基准应力为 0.5 MPa (F_0) 持荷 60 s 并在以后的 30 s 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 60 s 并在以后的 30 s 内记录每一测点的变形读数 ε_a 。

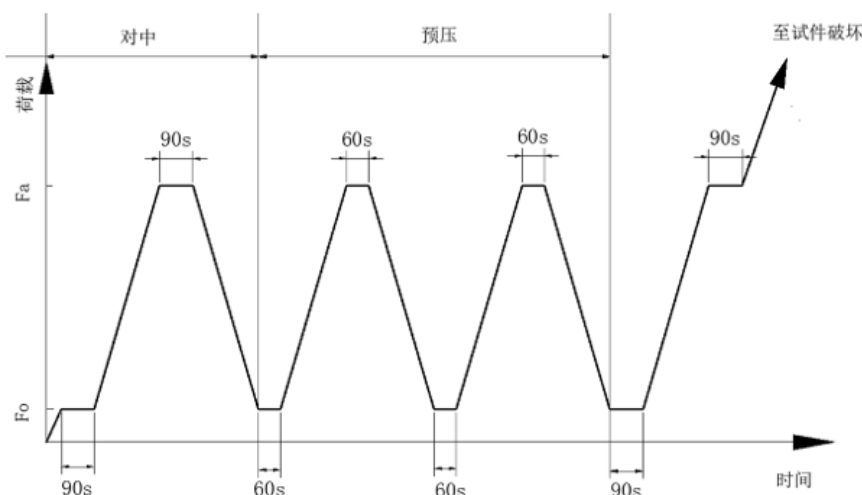


图 5.3.4 弹性模量试验加荷方法示意

注：1. 90s 包括 60s 持荷试件和 30s 读数时间；2. 60s 为持荷时间

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

5.3.5 超高性能混凝土轴心抗压强度和静力受压弹性模量试验结果计算及确定按下列方法进行：

- 1 超高性能混凝土轴心抗压强度应按下列公式计算：

$$f_{cp} = \frac{F}{A} \quad (5.3.5-1)$$

式中： f_{cp} ——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 (mm^2)。

- 2 超高性能混凝土轴心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轴心抗压强度值，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 15% 时，则应把最大及最小值剔除，取中间值作为该组试件的轴心抗压强度值；
- 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。
- 4) 测得的轴心抗压强度值无需乘以任何尺寸换算系数。

- 3 超高性能混凝土静力受压弹性模量值应按下列公式计算：

$$E_c = \frac{F_a - F_0}{A} \times \frac{L}{\Delta n} \quad (5.3.5-2)$$

$$\Delta n = \varepsilon_n - \varepsilon_0 \quad (5.3.5-3)$$

式中： E_c ——超高性能混凝土静力受压弹性模量 (GPa)，计算结果应精确至 0.1GPa；

F_a ——应力为 1/3 轴心抗压强度时的荷载 (kN)；

F_0 ——应力为 0.5MPa 时的初始荷载 (kN)；

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_n —— 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)。

4 超高性能混凝土静力受压弹性模量值的确定应符合下列规定：

- 1) 取 3 个试件测值的算数平均值作为该组试件的弹性模量值，应精确到 0.1GPa。
- 2) 当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，弹性模量值应按另两个试件测值的算数平均值计算；如有两个试件超过上述规定时，则此次试验无效。

5.4 抗弯强度与弯曲韧性试验

5.4.1 本方法适用于测定超高性能混凝土的抗弯强度、弯曲韧性指数和弯曲韧度比。

5.4.2 超高性能混凝土抗弯强度及弯曲韧性试验应采用尺寸为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件，每次试验应制备 3 个试件。

5.4.3 抗弯强度及弯曲韧性试验的试验设备应符合下列规定：

1 应采用伺服式万能试验机或带有弯曲试验台的伺服式压力试验机，量程为 200kN，示值相对误差不大于 1%，试验时的最大荷载应在量程的 20%~80%范围内。

2 试验机应自带或后配加载分配梁，分配梁中点设有辊轴，在试件标距三分点处设有两个加压万向辊轴，辊轴可以滚动或前后（垂直于试件轴线方向）自由倾斜，滚轴直径 30mm~50mm。

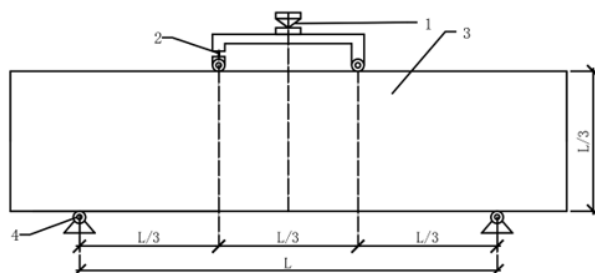


图 5.4.3-1 抗弯试验加载装置

3 与试件接触的两个辊轴铰支座，辊轴弧形直径 30mm~50mm，支座长度比试件宽度长 10mm，其中一个支座为固定铰，另一个支座为万向滚动铰，该支座能够滚动并前后（垂直与试件轴线方向）自由倾斜。

4 挠度测量装置应符合图 5.4.3 的要求，并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重点的测量触点板。挠度测试系统包括电阻位移计或 LVDT 位移计及配套的电测信号放大仪器，量程不小于 5mm，精度不低于 0.001mm。

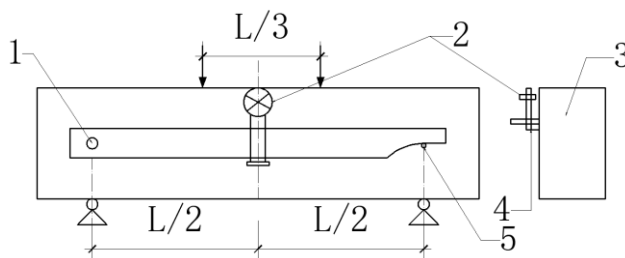


图 5.4.3 挠度测量装置

1—枢轴；2—千分表或位移计；3—试块；4—角状切片；5—滚动支座

5 荷载测试仪器可采用试验的荷载测试系统或附加的荷载测试系统，包括荷载传感器及配套的电测信号放大仪器，荷载测试系统的量程应与试验要求的量程相匹配，精度不低于 1%。

6 测试数据采集应连续自动完成，可通过模数转换器与计算机连接，由程序控制，采用频率不宜低于 10kHz。

5.4.4 超高性能混凝土的抗弯强度及弯曲韧性试验应按下列步骤进行：

1 从养护地取出试件，擦净后检查外观，不得有明显的缺损，在跨中 $L/3$ 的受拉区内不得有直径大于 5mm、深度大于 2mm 的表面缺陷。在试件中部测量其宽度和高度。

2 将试件成型时的侧面作为承荷面，安放在支座上。按图 5.4.1 规定的尺寸和三分点加荷的规定，检查支座及压头位置，所有间距尺寸偏差均不得大于 $\pm 1\text{mm}$ 。试件放稳对中后开动试验机，当压头与试件接近时，调整压头和支座，使接触均衡。若压头及支座不能前后倾斜，各接触不良处应垫平。

3 试件安装好后，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。

4 对试件进行连续、均匀加载。加载方式应采取位移控制荷载监控的方式，加载速率取 $0.02\text{mm/min} \sim 0.05\text{mm/min}$ 。若试件在受拉面跨度三分点以外断裂，则该试件试验结果无效。

5 绘制荷载-挠度曲线。

6 当只需测试抗弯强度而无需测试弯曲韧性时，可不安装测量变形的仪表或绘制荷载-挠度曲线。

5.4.5 超高性能混凝土试件的弯曲初裂强度应按下列方法确定：

1 将直尺与荷载-挠度曲线的线性部分重叠放置确定初裂点 A。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)。

2 根据初裂荷载按下式计算抗弯初裂强度，精确至 0.1MPa。

$$f_{\text{cr}} = \frac{F_{\text{cr}} L}{bh^2} \quad (5.4.5)$$

式中： f_{cr} ——超高性能混凝土的抗弯初裂强度 (MPa)；

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；

h ——试件截面的高度。

3 该组试件的初裂强度应为三个试件计算值的算术平均值。三个测值中的最大值或最小值与中间测值之差大于中间值的 15%，则取中间值作为该组试件的试验值。如果二者与中

间值之差均大于中间值的 15%，则该组试件的试验结果无效。

5.4.6 超高性能混凝土试件的抗弯强度应按下列方法确定：

- 1 根据抗弯试验中的最大荷载按下式计算抗弯强度，精确至 0.1MPa。

$$f_w = \frac{F_{\max} L}{bh^2} \quad (5.4.6)$$

式中： f_w ——超高性能混凝土的抗弯强度（MPa）；

$F_{\max}$ ——试件抗弯试验过程中的最大荷载（N）；

L ——试验梁支座间的跨距（mm）；

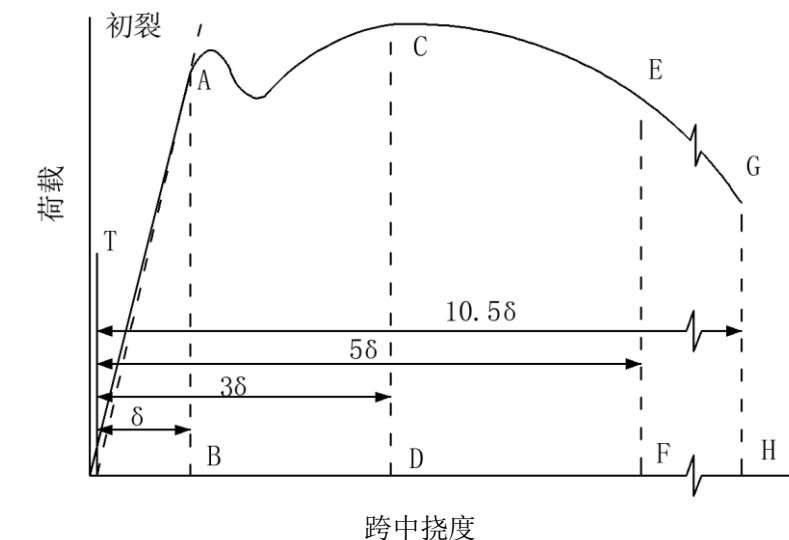
b ——试件截面的宽度；

h ——试件截面的高度。

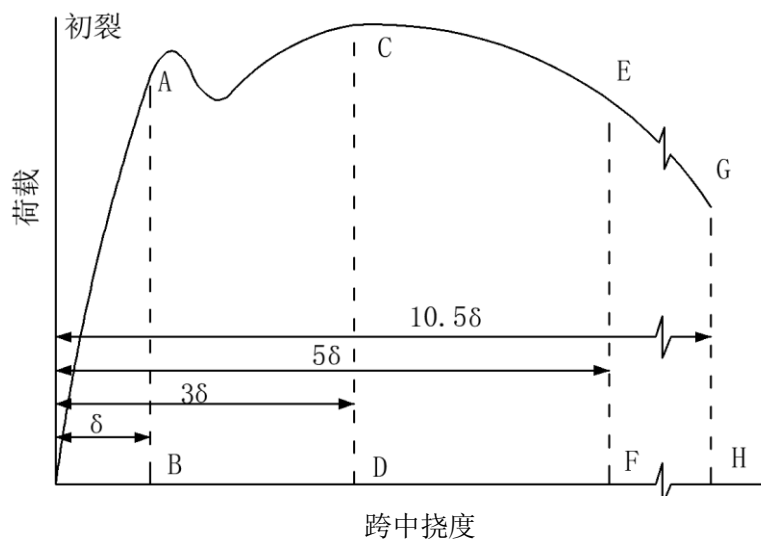
- 2 超高性能混凝土抗弯强度的确定参照 4.6.5 条第 3 款要求。

5.4.7 超高性能混凝土的弯曲韧性指数应按下述方法计算：

- 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 OAB、OACD、OAEF 和 OAGH 的面积，分别记为 Ω_{δ} 、 $\Omega_{3\delta}$ 、 $\Omega_{5.5\delta}$ 、 $\Omega_{10.5\delta}$ 。



(a) 初裂前曲线凹面朝上



(a) 初裂前曲线凸面朝上

图 5.5.7 弯曲韧性指数计算简图

2 按下列公式求得每个试件的弯曲韧性指数，精确至 0.01：

$$I_5 = \frac{\Omega_{3\delta}}{\Omega\delta} \quad (5.4.7-1)$$

$$I_{10} = \frac{\Omega_{5.5\delta}}{\Omega\delta} \quad (5.4.7-2)$$

$$I_{20} = \frac{\Omega_{10.5\delta}}{\Omega\delta} \quad (5.4.7-3)$$

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。

5.4.8 超高性能混凝土试件的弯曲韧性比可按下列方法计算：

1 按下式计算试件的等效弯曲强度 f_e ：

$$f_e = \frac{\Omega_k L}{bh^2 \delta_k} \quad (5.4.8-1)$$

式中： f_e ——等效弯曲强度（MPa）；

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

δ_{cr} ——跨中挠度为 $L/150$ 时的挠度值（mm）。

2 试件的弯曲韧性比 R_e 可按下列式计算：

$$R_e = \frac{f_e}{f_{cr}} \quad (5.4.8-2)$$

式中： R_e ——等效弯曲强度（MPa）；

f_e ——等效弯曲强度（MPa）；

f_{cr} ——超高性能混凝土的抗弯初裂强度（MPa）；

5.5 轴心抗拉性能试验

5.5.1 本试验方法适用于测定单轴拉伸条件下超高性能混凝土试件的弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变、抗拉弹性模量、抗拉强度和抗拉应变。

5.5.2 超高性能混凝土轴心抗拉性能试验的试件尺寸和数量应符合下列规定：

1 轴心抗拉性能试验试件尺寸如图 5.6.2 所示，厚度分为 30mm 和 100mm 两种，厚度为 30mm 的试件为标准试件，厚度为 100mm 的试件为非标准试件。

2 不同厚度轴心抗拉性能试验试件的测试结果不考虑尺寸效应。

3 每组试件数量为 6 个。

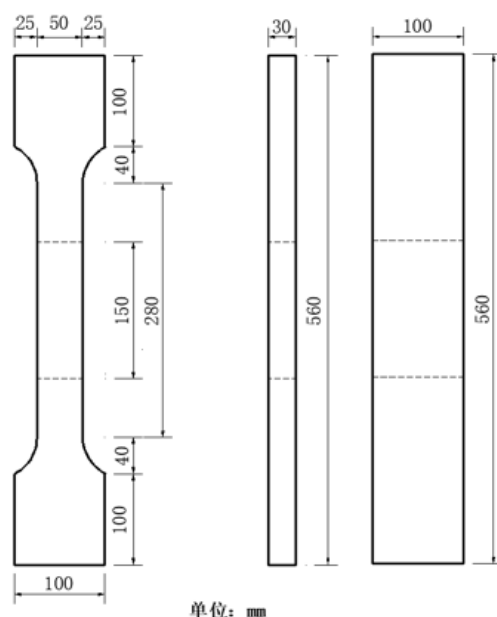


图 5.5.2 轴心抗拉性能试件尺寸示意图

5.5.3 轴心抗拉性能试验的试验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~1000mm；
- 5) 其他要求应符合现行国家标准《液压式万能试验机》GB/T3159 和《试验机通用技术要求》GB/T2611 中的有关规定。

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电阻应变片测长仪或位移传感器，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) 微变形测量仪的标距宜为 150mm。

5.5.4 超高性能混凝土的抗拉性能试验应按下述步骤进行：

1 到达试验龄期前，将试件从养护室取出，待表面水分干燥后，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。

2 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。当采用电阻应变片测量变形时，在试件从养护室取出后，应尽快在试件的两侧中间部位用电风吹干表面，然后用 502

胶粘贴电阻应变片。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。

3 开动试验机进行预拉，预拉荷载相当于破坏荷载的 15%~20%。预拉时，应测读应变值，计算偏心率，计算方法参考 GB/T 50081 的轴向拉伸试验方法。当试块偏心率大于 15% 时，应对试块重新进行对中调整。

4 预拉完毕后，应重新调整测量仪器，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~位移曲线。

5 当满足下述条件之一时，应终止加载，停止试验：

- 1) 残余抗拉强度低于极限抗拉强度的 30%时；
- 2) 试件的拉应变大于 10000 $\mu\epsilon$ 时；
- 3) 拉断。

5.5.5 超高性能混凝土抗拉性能试验结果应按下列方法确定：

1 弹性极限点

在结果计算前，首先应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-位移曲线或应变片记录的荷载-应变曲线中，由线性段转为非线性段的点作为弹性极限点。当弹性极限点不明显时，取 200 微应变对应的曲线上的点作为弹性极限点。

2 弹性极限抗拉强度应按下列式计算：

$$f_{te} = \frac{F_{te}}{A} \quad (5.5.5-1)$$

式中： f_{te} ——弹性极限抗拉强度（MPa）； 计算精确至 0.01MPa。

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式计算：

$$\mu_{te} = \frac{l_{tu}}{L} \quad (5.5.5-2)$$

式中： μ_{te} ——弹性极限拉应变，计算结果精确至 1×10^{-6} ；

l_{tu} ——弹性极限点处变形（mm）；

L ——测试标距（mm）；

当采用应变片测量时，弹性极限拉应变可由应变片记录的荷载-应变曲线直接获取。

4 抗拉弹性模量应按下列式计算：

$$E_{te} = \frac{f_{te}}{\mu_{te}} \quad (5.5.5-3)$$

式中： E_{te} ——抗拉弹性模量（MPa），计算结果精确至 100MPa；

f_{te} ——弹性极限抗拉强度（MPa）；

μ_{te} ——弹性极限拉应变（ $\times 10^{-6}$ ）。

5 抗拉强度应按下列式计算：

$$f_{tu} = \frac{F_{max}}{A} \quad (5.5.5-4)$$

式中： f_{tu} ——抗拉强度（MPa）；

$F_{\max}$ ——抗拉试验加荷过程中的最大荷载 (N)；

A ——抗拉试件中部截面积 (mm^2)。

6 抗拉应变应按下式计算：

$$\mu_{tu} = \frac{l_{tu}}{L} \quad (5.5.5-5)$$

式中： μ_{tu} ——抗拉应变，计算结果精确至 1×10^{-6} ；

l_{tu} ——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)；

当采用应变片测量时，抗拉应变可由应变片记录的荷载-应变曲线直接获取。

7 试验结果的处理

试件开裂位置位于标距内试件为有效拉伸试件。弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变、抗拉弹性模量、抗拉强度、抗拉应变以有效拉伸试件测试值的平均值作为试验结果。当有效拉伸试件数量少于 3 个时，该组试件无效。

5.6 劈裂抗拉强度试验

5.6.1 本试验方法适用于测定超高性能混凝土立方体试件的劈裂抗拉强度。

5.6.2 超高性能混凝土抗压强度试验的试件尺寸应为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的立方体试件，每组试件应为 3 块；

5.6.3 劈裂抗拉强度试验的试验设备应符合下列规定：

1 压力试验机应符合本标准第 5.2.3 条的规定；

2 垫块应采用横截面为半径 75mm 的钢制弧形垫块 (图 5.6.3-1)，垫块的长度应与试件相同；

3 垫条应由普通胶合板或硬质纤维板支撑，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 定位支架应为钢支架 (图 5.6.3-2)。

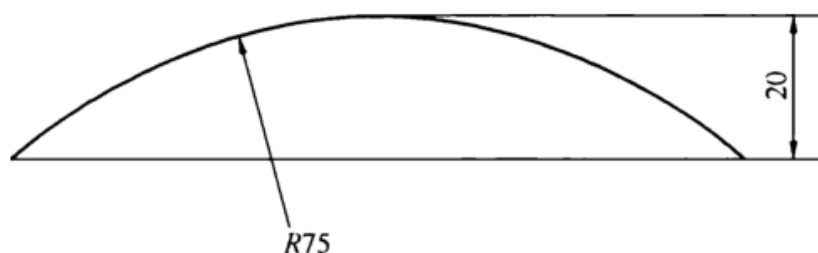


图 5.6.3-1 垫块 (mm)

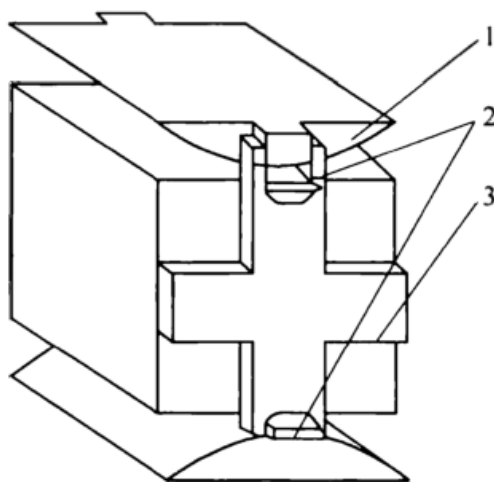


图 5.6.3-2 定位支架示意

1—垫块；2—垫条；3—支架

5.6.4 超高性能混凝土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 3.1.3 条的规定，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画出相互平行的直线，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。
- 4 开启试验机，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 0.10MPa/s~0.12MPa/s。
- 6 宜采用自动控制压力机加荷，当采用手动控制压力机加荷时，当试件接近破坏，应停止调整试验机油门，直至破坏，然后记录破坏荷载。
- 7 试件断裂面应垂直与承压面，当断裂面不垂直于承压面时，应做好记录。

5.6.5 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式计算：

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (5.6.4)$$

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 3 个试件测值的算数平均值作为该组试件的劈裂抗拉强度值，应精确至 0.01MPa；
- 2) 3 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，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) 当最大值与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。

5.7 粘结强度试验

5.7.1 本试验方法适用于测定超高性能混凝土与既有混凝土之间的粘结强度。

5.7.2 劈裂抗拉强度试验的试验设备应符合本标准第 5.6.2 条规定。

5.7.3 超高性能混凝土粘结强度试验应按下列步骤进行：

1 用与被粘混凝土相近的原材料和配合比，成型 3 块 150mm×150mm×150mm 的立方体试件，标准养护 14d 后取出，应按本标准 5.6 节规定将试件劈成 6 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，试件光面紧贴模壁，劈开面与试模之间形成尺寸约 150mm×150mm×75mm 的空间。

3 拌制超高性能混凝土，应浇入已放置混凝土试块的试模中，用橡皮锤轻轻敲击试模侧边使拌合物密实。

4 试件达到 28d 龄期时，从养护地点取出后，按本标准 5.6 节将粘结面作为劈裂面，进行超高性能混凝土与既有混凝土的粘结强度测试。

5.7.4 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列公式计算：

$$f_b = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (5.7.4)$$

式中： f_b ——超高性能混凝土粘结强度（MPa），计算结果应精确至 0.01MPa；

F ——试件破坏荷载（N）；

A ——试件粘结面面积（mm²）。

2 在 6 个试件测值中，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。

5.8 泊松比试验

5.8.1 本试验方法用于测定超高性能混凝土的泊松比。

5.8.2 超高性能混凝土泊松比试验应采用尺寸为 150mm×150mm×300mm 的棱柱体试件，每组试件数量为 6 个，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。

5.8.3 泊松比试验的试验设备应符合下列规定：

1 压力试验机应符合本标准第 5.2.3 条规定；

2 用于微变形测量的仪器应符合下列规定：

1) 试件竖向微变形测量仪器可采用千分表、电阻应变片、激光测长仪、引伸仪或位移传感器等，用于试件竖向微变形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±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) 竖向测量标距应为 150mm, 横向测量标距应为 100mm。

5.8.4 超高性能混凝土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, 检查其尺寸和形状, 并尽快进行试验。

2 取 3 个试件按照本标准 5.3 节的规定测定超高性能混凝土的轴心抗压强度, 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, 并对称与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, 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 100mm。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, 并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 开启试验机, 试件表面与上、下承压板或钢垫板应均匀接触。

7 应加荷至基准应力为 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 时的荷载值 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} 。加荷速度应取 1.20 MPa/s~1.40MPa/s。

8 左右两侧的纵向和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。当无法使其减小到小于 20% 时, 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; 应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, 应在基准应力为 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} 。

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

5.8.5 超高性能混凝土泊松比试验结果计算及确定按下列方法进行:

1 超高性能混凝土泊松比值应按下列公式计算:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{ta} - \varepsilon_{t0}}{\varepsilon_a - \varepsilon_0} \quad (5.8.5)$$

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} ——最后一次 F_a 时试件两侧横向应变的平均值 (10^{-6});

ε_{t0} ——最后一次 F_0 时试件两侧横向应变的平均值 (10^{-6});

ε_a ——最后一次 F_a 时试件两侧竖向应变的平均值 (10^{-6});

ε_0 ——最后一次 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 个试件测值的算数平均值作为该组试件的泊松比，应精确到 0.01。当其中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，泊松比应按另两个试件测值的算数平均值计算；如有两个试件超过上述规定时，则此次试验无效。

5.9 线膨胀系数试验

5.9.1 本试验方法适用于测定超高性能混凝土的线膨胀系数。

5.9.2 线膨胀系数试验的试验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。要求箱内水面应没过试件筒顶 50mm 左右，温度控制精度应在 0.5℃ 以内。

2 量测试器：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 厚的橡胶板或 0.3mm~0.5mm 沥青隔离层、胶布等。

5.9.3 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。应在密封桶内壁衬一层厚 2mm~3mm 的橡皮板或涂抹一层厚 0.3mm~0.5mm 沥青隔离层。

3 应将应变计垂直固定在试件桶中心（图 5.9.3），并注意在成型时不应使应变计损坏。

4 成型试件前、后，应量测应变计的电阻及电阻比，并应做好记录。

5 将超高性能混凝土拌合物装入密封桶内，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 应将养护 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，应使水温上升到 60℃ 左右，恒温后应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。

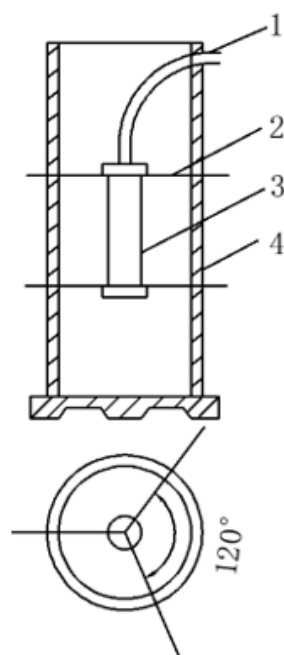


图 5.9.3 应变计安装示意

1—电缆；2—24 号铅丝；3—应变计；4—铁模

5.9.4 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：

$$\theta = a'(R_t - R_0) \quad (5.9.4-1)$$

$$\varepsilon_m = f' \Delta Z + ba'(R_t - R_0) \quad (5.9.4-2)$$

式中： θ ——试件的中心的温度（℃）；

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：

$$\alpha = \frac{\varepsilon_m}{\Delta\theta} \quad (5.9.4-3)$$

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 当两个试件测值之差的绝对值不大于平均值的 10% 时，应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出允许范围时，应重新进行试验。

5.10 耐磨性试验

5.10.1 本试验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。

5.10.2 超高性能混凝土磨耗量法试验应采用尺寸为150mm×150mm×150mm的立方体试件，每组试件数量为3个。

5.10.3 耐磨性试验的试验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，主轴和转盘应同时向相反方向转动，主轴下端配有磨头连接装置，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时偏离度不应大于0.04mm。
- 2) 水平转盘转速应为 $17.5\text{r/min} \pm 0.5\text{r/min}$ ，主轴与转盘转速比应为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三挡，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加紧试件的卡具，卡头单向行程应为 $150\text{mm}^{+4}_{-4}\text{mm}$ 。卡夹宽度不应小于50mm，应能卡进150mm×150mm×150mm立方体试件，夹紧试件后应保证试件不上浮或翘起。
- 7) 花轮磨头由3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 $\Phi 25\text{mm}_0^{+0.02}\text{mm}$ ，厚度应为 $3\text{mm}_0^{+0.02}\text{mm}$ ，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HRC60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。

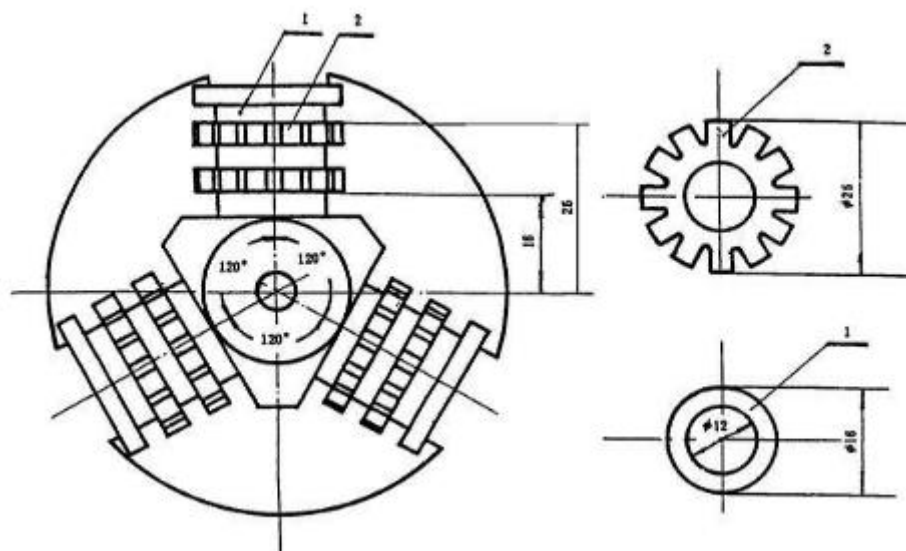


图 5.10.3 花轮磨头示意 (mm)

1—垫片；2—刀片

2 烘箱的调温范围应为50℃~200℃，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。

5.10.4 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，擦干表面水分放在实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 负荷下磨 30 转，取下试件刷净表面粉尘称重，并应记下相应质量 m_1 ，该质量作为试件的初始质量。在 200N 的负荷下磨 60 转，取下试件刷净表面粉尘称重，并应记下相应质量 m_2 。

整个磨耗过程应将吸尘器对准试件磨耗面，及时吸走磨下的粉尘。当超高性能混凝土具有高耐磨性时，可再增加旋转次数，并应特备注明。

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

5.10.5 超高性能混凝土耐磨性试验结果计算及确定按下列方法进行：

1 应按下式计算每一试件的磨耗量，以单位面积的磨耗量来表示。

$$G_c = \frac{m_1 - m_2}{A} \quad (5.10.5)$$

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 ——试件的磨耗面积 (m^2)。

2 试件磨耗值的确定应符合下列规定：

- 1) 应以 3 个试件测值的算数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) 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，应同时剔除最大值和最小值，取中间值作为该组试件的磨耗量值；
- 3) 当最大值和最小值与中间值的差均超过中间值的 15% 时，则该组试件的试验结果无效。

5.11 抗冲磨性试验

5.11.1 本方法适用于测定超高性能混凝土表面受水下高速流动介质磨损的相对抗力，用于评价混凝土表面的相对抗磨性能。

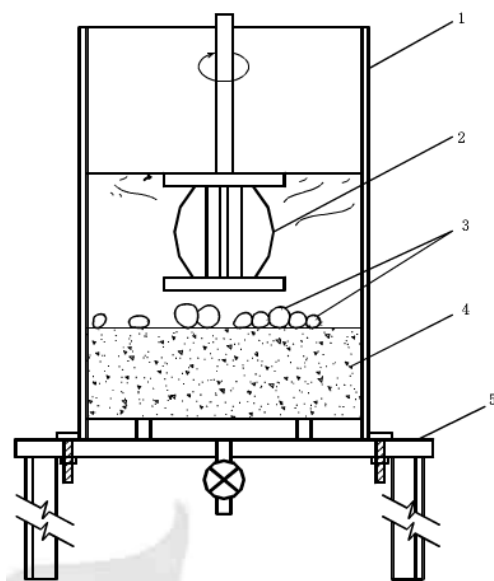
5.11.2 抗冲磨性试验的试验设备应符合以下规定：

1 钢球冲磨仪，主要部件包括：

- 1) 驱动装置，能使搅拌桨以 $1200\text{r}/\text{min}$ 速度旋转的电机装置；
- 2) 钢筒，内径为 $305\text{mm} \pm 6\text{mm}$ ，高 $450\text{mm} \pm 25\text{mm}$ ，下边四周有螺孔；
- 3) 钢底座；
- 4) 搅拌桨；
- 5) 研磨料，70 个按表 7.5.2 规定的研磨钢球；

2 试模：金属圆模，内径 $300\text{mm} \pm 2\text{mm}$ ，高 $100\text{mm} \pm 1\text{mm}$ ；

3 天平：称量 20kg ，感量不大于 0.5g 。



1—钢容器；2—搅拌桨；3—不同直径研磨钢球；4—混凝土试件；5—底座

图 5.11.2 钢球冲磨仪示意图

表 5.11.2 研磨钢球数量与直径

钢球数量（个）	10	35	25
直径（mm）	25.4 ± 0.1	19.1 ± 0.1	12.7 ± 0.1

5.11.3 超高性能混凝土抗冲磨性试验应按下列步骤进行：

- 1 按规定制备冲磨试验试件，试验以 3 个试件为 1 组。
- 2 试验前，试件需在水中至少浸泡 48h。
- 3 试验时，取出试件，擦去表面水份，称量。
- 4 钢筒与底座间放上橡皮垫圈，在地板上垫上两根 $\Phi 6\text{mm}$ 的钢筋，把已称量过的超高性能混凝土试件放在钢筋上并对中，且使试件表面垂直于转轴，套上钢筒，旋紧固定钢筒与底座的螺栓，使其密封。
- 5 将搅拌桨安装在转轴上，搅拌桨底部距试件表面约 38mm，调整钢筒和底座的位置使转轴对中。
- 6 在钢筒内放入研磨钢球于试件表面，并加水至水面高出试件表面 165mm。
- 7 确认转轴转速在 1200r/min 后，开机。
- 8 每隔 24h，在钢筒内加 1~2 次水至原水位高度。
- 9 累计冲磨 72h，取出试件，清洗干净，擦去表面水分，称量。

5.11.4 试验结果处理应符合下列规定：

- 1 超高性能混凝土抗冲磨指标以抗冲磨强度表示，按下式计算：

$$R_a = \frac{TA}{M_T} \quad (7.5.4)$$

式中： R_a ——抗冲磨强度，即单位面积上被冲磨单位质量所需的时间（h/（kg/m²））；

T ——试验累计时间（h）；

A ——试件受冲磨面积（m²）；

M_T ——经 T 时段冲磨后，试件损失的累计质量（kg）。

2 以 3 个试件测值的平均值作为试验结果。单个测值与平均值允许差值为 $\pm 15\%$ 。超过时此值应剔除,以余下 2 个测值的平均值作为试验结果。若 1 组中可用的测值少于 2 个,该组试验结果无效。

5.12 硬化超高性能混凝土密度试验

5.12.1 本方法适用于测定硬化超高性能混凝土的表观密度、原样体积密度、饱水体积密度和烘干体积密度。

5.12.2 硬化超高性能混凝土表观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 试件最小体积应不小于 $50D^3$, D 为粗骨料的最大粒径;

4 每组试件应为 3 块。

5.12.3 硬化超高性能混凝土表观密度试验的试验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 水槽尺寸应能满足浸没试件及水中称重的要求,水温应保持在 $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$;

4 鼓风干燥箱应能控制温度不低于 110°C ,最小分度值不应大于 2°C ;

5 干燥器的尺寸应为 $\Phi 300\text{mm}\sim\Phi 500\text{mm}$ 。

5.12.4 硬化超高性能混凝土表观密度试验应按下列步骤进行:

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

2 应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,水面应至少高于试件顶面 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,应精确至 0.1g,用 m_s 表示。

3 应称量烘干试件质量。将试件置于温度控制在 $(105\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 的鼓风干燥箱中,烘干 24h,将试件取出,置于干燥器中冷却至室温,当试件表面有油污时,可采用丙酮擦拭试件表面,除去油污,称量并记录试件质量;试件烘干时间不应小于 48h,直至两个连续的 24h 间隔的质量变化小于较小值的 0.2%,停止烘干,记录最后一次试件质量,应精确至 0.1g,用 m_d 表示。

4 不同规格尺寸的试件可通过水中称重法测定试件体积,具体应按下列方法进行:

1) 应将试件完全浸泡在 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 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 (图 5.12.4),并应按本条第 3 款测定烘干试件质量 m_d 。

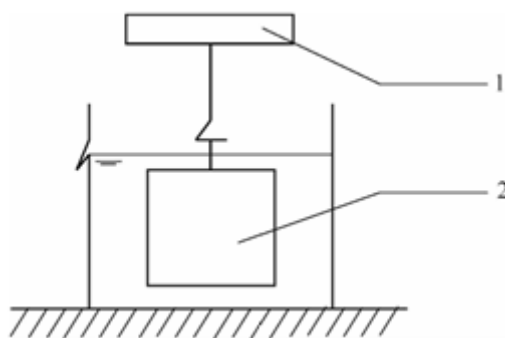


图 5.12.4 试件水中测试示意

1—电子天平；2—试件

2) 试件的表观体积应按下式计算：

$$V_a = \frac{m_d - m_w}{\rho_w} \quad (5.12.4-1)$$

式中： V_a ——试件的表观体积 (m^3)，包括试件固体体积和试件内部闭口孔隙体积；

m_d ——烘干试件质量 (kg)；

m_w ——试件在水中的质量 (kg)；

ρ_w ——水的密度，当水温为 20°C 时，取值为 $998\text{kg}/\text{m}^3$ 。

3) 试件的总体积应按下式计算：

$$V_t = \frac{m_s - m_w}{\rho_w} \quad (5.12.4-2)$$

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

m_d ——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°C 时，取值为 $998\text{kg}/\text{m}^3$ 。

5 对于形状规则的试件，可以按下列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，每个方向的长度值应在其两端和中间各测量一次，再在其相对的面上再各测量一次，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 m^3 ，应保留 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，应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方向上分别量取 4 次，应将 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 m^3 ，应保留 4 位有效数字。

5.12.5 试验结果计算及确定应按下列方法进行。

1 硬化混凝土的表观密度应按下式计算：

$$\rho_a = \frac{m_d}{V_a} \quad (5.12.5)$$

式中： ρ_a ——硬化混凝土的表观密度 (kg/m^3)，计算结果应精确至 $10\text{kg}/\text{m}^3$ ；

m_d ——烘干试件质量 (kg)；

m_w ——试件在水中的质量 (kg)；

V_a ——试件的表观体积 (m^3)。

2 硬化混凝土的原样体积密度应按下式计算：

$$\rho_r = \frac{m_r}{V_t} \quad (5.12.4)$$

式中： ρ_r ——硬化混凝土的原样体积密度（ kg/m^3 ），计算结果应精确至 $10\text{kg}/\text{m}^3$ ；

m_r ——试件原样状态下的质量（ kg ）；

V_t ——试件的总体积（ m^3 ）。

3 硬化混凝土的烘干体积密度应按下式计算：

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_t} \quad (5.12.5)$$

式中： ρ_d ——硬化混凝土的烘干体积密度（ kg/m^3 ），计算结果应精确至 $10\text{kg}/\text{m}^3$ ；

m_d ——试件烘干质量（ kg ）；

V_t ——试件的总体积（ m^3 ）。

4 硬化超高性能混凝土的饱水体积密度应按下式计算：

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_t} \quad (5.12.6)$$

式中： ρ_s ——硬化超高性能混凝土的保水体积密度（ kg/m^3 ），计算结果应精确至 $10\text{kg}/\text{m}^3$ ；

M_s ——饱水试件的表干质量（ kg ）；

V_t ——试件的总体积（ m^3 ）。

5 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 $10\text{kg}/\text{m}^3$ ；
- 2) 3 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 5% 时，应剔除最大值和最小值，取中间值作为该组试件的密度值；
- 3) 当最大值和最小值与中间值的差值均超过中间值的 5% 时，该组试件的试验结果无效。

5.12.6 测试试件体积的方法应在试验或检测报告中注明。

5.13 钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度试验

5.13.1 本方法适用于直接拉拔法测定超高性能混凝土中钢纤维与浆体的粘结强度，粗合成纤维与超高性能混凝土基体的粘结强度可参照本方法进行。

5.13.2 钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度试验采用“8”字形试件，其尺寸应符合图 5.13.2 的规定，每组试件应为 5 块。

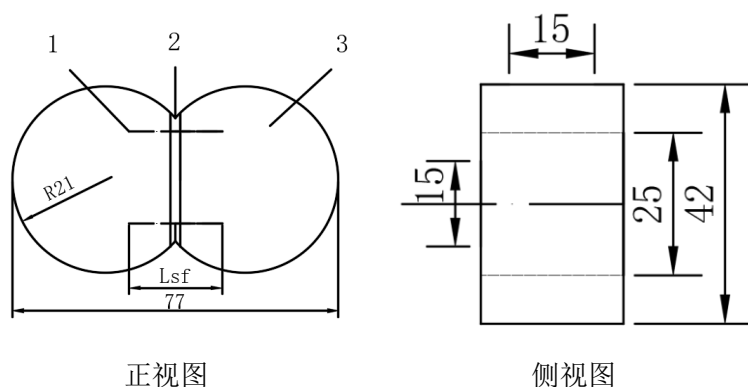
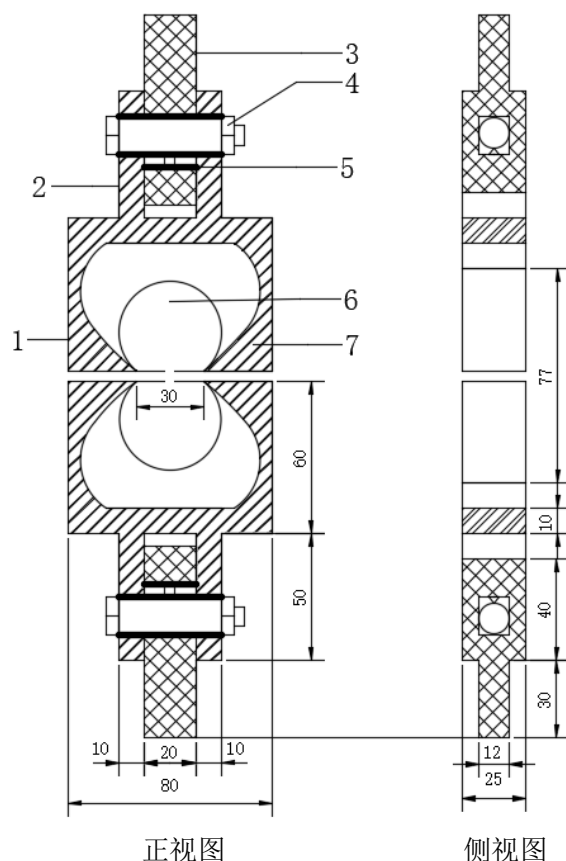


图 5.13.2 钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度试件形状

1—钢纤维；2—隔板；3—超高性能混凝土基体

5.13.3 钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度试验的试验设备应符合下列规定：

- 1 宜采用能控制变形的液压伺服试验机，试件预期破坏荷载应处于全量程的 20%~80% 之间，精度不低于 1%，并能自动记录荷载-位移曲线。
- 2 加荷装置应符合图 5.13.3 的规定，两端应设有球铰以保证试件受力时不产生偏心。



1—卡头；2—万向连接器；3—连杆；
4—螺栓；5—套圈；6—试件；7—接触滚轴

图 5.13.3 加载装置

5.13.4 钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度试验的试件制作应符合下列规定：

- 1 试件用模制法成型，制作试件的试模（图 5.13.4-1）应不变形、不漏水。
- 2 在试件中部最小截面处放置厚度为 0.5mm~1.0mm 的塑料隔板，隔板应垂直于试模底板及侧壁。隔板上开有四个放置钢纤维的圆孔，钢纤维穿过圆孔后使其在隔板两侧等长，钢纤维间距为 15mm。
- 3 浇筑去除钢纤维后的超高性能混凝土拌合物，应一次浇筑完成，不得插捣振动。浇筑过程中应保证钢纤维不得歪斜或错位。
- 4 拆模时应在试件上安装保护夹具（图 5.13.4-2），其中护板为 1mm~2mm 厚的钢板。
- 5 试件的养护应符合本标准第 3.3 节的规定。

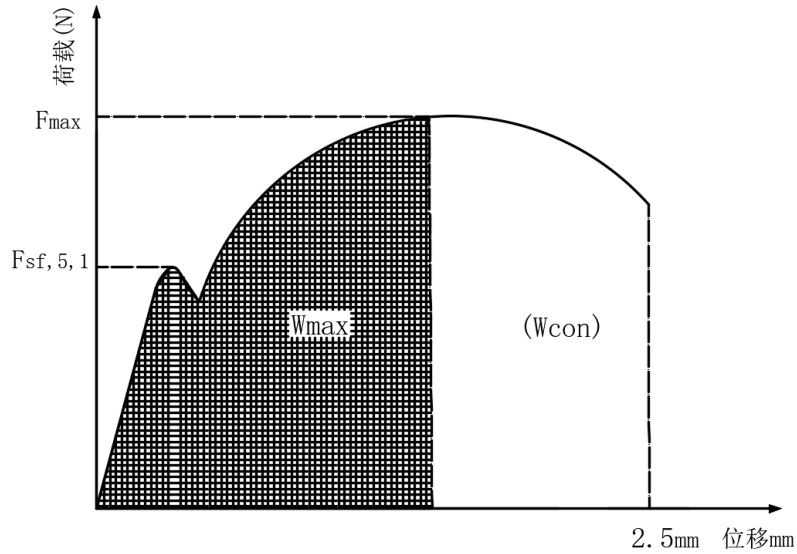


图 5.13.5 拉拔试验得到的荷载-位移曲线

5.13.6 试验结果处理应符合下列规定：

1 钢纤维与超高性能混凝土基体的粘结强度应按下列公式计算：

$$f_{fb} = \frac{F_{max}}{4u_f l_{cm}} \quad (5.13.6-1)$$

$$f_{fbi} = \frac{F_i}{4u_f l_{cm}} \quad (5.13.6-2)$$

式中： f_{fb} ——钢纤维与超高性能混凝土基体的极限粘结强度（MPa）；

f_{fbi} ——钢纤维开始滑移时的粘结强度（MPa）；

F_{max} ——钢纤维拔出时的最大荷载（N）；

u_f ——钢纤维横截面的周长（mm）；

l_{cm} ——钢纤维拔埋入端长度（mm）。

当试件竖向受荷时，应将试件自重的一半计入荷载中。

2 根据需要，可由荷载-位移曲线求得最大荷载时的功 W_{Fmax} （N•mm），或位移控制量为 2.5mm 时的功 W_{con} （N•mm）。

3 钢纤维与超高性能混凝土基体的粘结强度值应为五个试件测值的算术平均值。若其中的最大值、最小值或最大值和最小值两者之间与中间三个测值的平均值之差大于中间平均值的 15%，则以其中间三个测量值的平均值作为该组试件的粘结强度值。

6 超高性能混凝土长期性能和耐久性能试验

6.1 一般规定

6.1.1 本章规定了超高性能混凝土自收缩、干燥收缩、受压徐变、抗冻性、抗氯离子渗透性能的试验方法。

6.1.2 本标准未规定的长期性能及耐久性能指标的试验方法可按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 或其他国家现行有关标准执行。

6.2 自收缩试验

6.2.1 本方法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。

6.2.2 超高性能混凝土自收缩试验应采用尺寸为 100mm×100mm×515mm 的棱柱体试件,每组试件数量为 3 块。

6.2.3 自收缩试验的试验设备应符合下列规定:

1 混凝土自收缩变形测定仪(图 6.2.3)应设计成整机一体化装置,并应具备自动采集和处理数据、能设定采样时间间隔等功能。整个测试装置(含试件、传感器等)应固定于具有避振功能的固定式实验台面上。

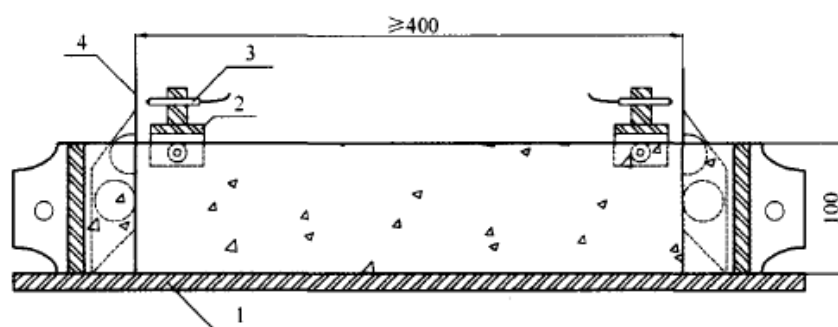


图 6.2.3 混凝土自收缩变形测定仪原理示意图

1-试模; 2-固定架; 3-传感器探头; 4-反射靶

2 应有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,且在成型完成后应能保证反射靶与试模之间的摩擦力尽可能小。试模应采用具有足够刚度的钢模,且本身的收缩变形应小。试模的长度应能保证混凝土试件的测量标距不小于 400mm。

3 传感器的测试量程不应小于试件测量标距长度的 0.5%或量程不应小于 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,并应能使测头在测量整个过程中与试模相对位置保持固定不变。试验过程中应能保证反射靶能够随着混凝土收缩而同步移动。

6.2.4 超高性能混凝土自收缩试验步骤应符合下列规定:

1 试验应在温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(60 \pm 5)\%$ 的恒温恒湿条件下进行。自收缩试验应带模进行测试。

2 试模准备后,应在试模内涂刷润滑油,然后应在试模内铺设两层塑料薄膜或者放置一片聚四氟乙烯(PTFE)片,且应在薄膜或者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,然后应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。超过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,此后应至少每隔 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,应在浇筑后立即采用塑料薄膜作密封处理。

6.2.5 超高性能混凝土自收缩试验结果和处理应符合下列规定:

1 混凝土收缩率应按照下式计算:

$$\varepsilon_{st} = \frac{(L_{10} - L_{1t}) + (L_{20} - L_{2t})}{L_0} \quad (6.2.5)$$

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

L_{10} ——左侧非接触法唯一传感器初始读数 (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,计算应精确到 1.0×10^{-6} 。作为相对比较的超高新性能混凝土早龄期收缩值应以 3d 龄期测试得到的混凝土收缩值为准。

6.3 干燥收缩试验

6.3.1 本方法适用于测定在无约束和规定的温湿度条件下硬化超高性能混凝土试件的干燥收缩变形。

6.3.2 超高性能混凝土的干燥收缩试验应采用尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 515\text{mm}$ 的棱柱体试件,每组为 3 个试件。

6.3.3 干燥收缩试验的试验设备应符合下列规定:

1 测量混凝土收缩变形的装置应具有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) 卧式混凝土收缩仪的测量标距应为 540mm ,并应装有精度为 $\pm 0.001\text{mm}$ 的千分表或测微器。

2) 立式混凝土收缩仪的测量标距和测微器同卧式混凝土收缩仪。

3) 其他形式的变形测量仪表的测量标距不应小于 100mm 并至少能达到 $\pm 0.001\text{mm}$ 的测量精度。

6.3.4 试件和测头应符合下列规定：

1 采用卧式混凝土收缩仪时，试件两端应预埋测头或留有埋设测头的凹槽。卧式收缩试验用测头（图 6.3.4-1）应由不锈钢或其他不锈的材料制成。

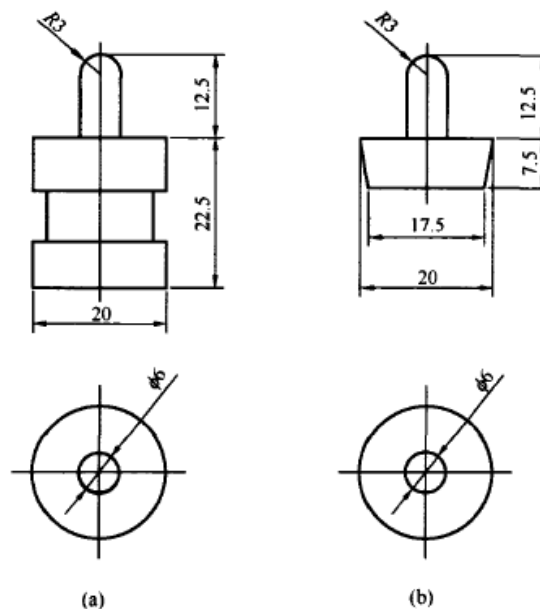


图 6.3.4-1 卧式收缩试验用侧头
(a) 预埋侧头； (b) 后埋侧头

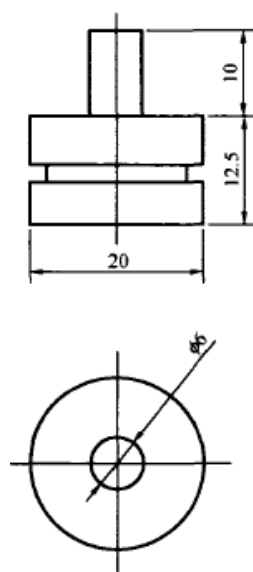


图 6.3.4-2 立式收缩试验用侧头

2 采用立式混凝土收缩仪时，试件一端中心应预埋测头（图 6.3.4-2）。立式收缩试验用测头的另外一端宜采用 M20mm×35mm 的螺栓（螺纹通长），并应与立式混凝土收缩仪底座固定。螺栓和测头都应预埋进去。

3 采用接触法引伸仪时，所用试件的长度应至少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。

4 使用混凝土收缩仪时，制作试件的试模应具有能固定测头或预留凹槽的端板。使用接触法引伸仪时，可用一般棱柱体试模制作试件。

5 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（1~2）d，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）℃、相对湿度为95%以上的标准养护室养护。

6.3.5 超高性能混凝土干燥收缩试验应按下列步骤进行：

1 干燥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±5）%。试件应放置在不吸水的搁架上，底面应架空，每个试件之间的间隙应大于30mm。

2 测定代表某一超高性能混凝土干燥收缩特征值时，试件应在3d龄期时（从混凝土搅拌加水时算起）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，此后应至少按下列规定的时间间隔测量其变形读数：1d、3d、7d、14d、28d、45d、60d、90d、120d、150d、180d、360d（从移入恒温恒湿室内计时）。

3 测定超高性能混凝土在某一具体条件下的相对收缩值时（包括在徐变试验时的超高性能混凝土收缩变形测定）应按要求的条件进行试验。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，并应在测定过程中至少再复核1-2次，其中一次应在全部试件测读完后进行。当复核时发现零点与原值的偏差超过±0.001mm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，并应重新以标准杆复核零点。

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

7 用接触法引伸仪测量时，应使每次测量时试件与仪表保持相对固定的位置和方向。每次读数应重复3次。

6.3.6 超高性能混凝土干燥收缩试验结果计算和处理应符合以下规定：

1 超高性能混凝土干燥收缩应按式（6.3.6）计算：

$$\varepsilon_{st} = \frac{L_0 - L_t}{L_b} \quad (6.3.6)$$

式中： ε_{st} ——测试期为t（d）的超高性能混凝土干燥收缩，t从测定初始长度时算起；

L_b ——试件的测量标距，用混凝土收缩仪测量时应等于两测头内侧的距离，即等于混凝土试件长度（不计测头凸出部分）减去两个测头埋入深度之和（mm）。采用接触法引伸仪时，即为仪器的测量标距；

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个试件干燥收缩的算术平均值作为该组混凝土试件的干燥收缩测定值，计算应精确到 1.0×10^{-6} 。

3 作为相互比较的超高性能混凝土干燥收缩值应为不密封试件于180d所测得的收缩率值。可将不密封试件于360d所测得的收缩率值作为该超高性能混凝土的终极干燥收缩。

6.4 受压徐变试验

6.4.1 本方法适用于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。

6.4.2 受压徐变试验的试验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（一般至少一年）把所要求的压缩荷载加到试件上并应保持该荷载不变；
- 2) 常用徐变仪可分为弹簧式或液压式，其工作荷载范围一般为 180~500kN，由以下组件构成：压在受荷试件端头上的压板；持荷部件——弹簧或者与一个高压氮气瓶和一套液压调节单元相连的液压膜片或油缸；以及承受加荷系统反力的丝杆。
- 3) 弹簧式徐变仪的基本形式如图 6.4.1 所示。它包括上下压板、球座或球铰及其配套垫板、弹簧持荷装置、以及 2~3 根承力丝杆。压板与垫板应具有足够的刚度，且压板的受压面的平整度偏差不应大于 0.1mm/100mm，以保证对试件均匀加荷。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，丝杆的拉应力一般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%，但工作时弹簧的压缩变形也不得小于 20mm，以使它具有足够的调整能力。
- 4) 当使用液压式持荷部件时，可以通过一套中央液压调节单元同时加荷几个徐变架，该单元由以下组件构成：储液器、调节器、显示仪表和一个高压源（如高压氮气瓶或高压泵）。
- 5) 有条件时也可采用几个试件串叠受荷，以提高设备的利用率，但上下压板之间的总距离不得超过 1600mm。

2 加荷装置包括加荷架、油压千斤顶及测力装置。

- 1) 加荷架：由接长杆及顶板组成，用以承受加荷时的反力。加荷时加荷架与徐变仪丝杆顶部相连（见图 6.4.1）。

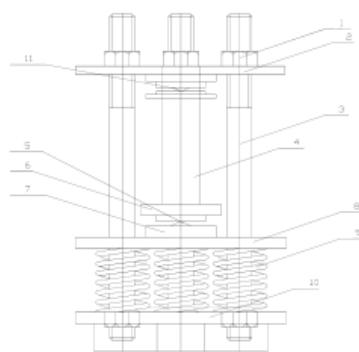


图 6.4.1 弹簧式压缩徐变仪

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：一般起重千斤顶，其吨位应大于所要求的试验荷载。
- 3) 测力装置：钢环测力计、荷载传感器或其它形式的压力测定装置，其测量精度应达到所加荷载的 2%，试件破坏荷载应大于测力装置全量程的 20%且小于测力装置全量程的 80%。

3 变形量测装置应满足以下规定：

- 1) 变形量测装置可采用外装式、内埋式或便携式，其测量的应变值精确度应为

0.1mm/m。

- 2) 采用外装式变形量测装置时（如带接长杆的千分表），应至少测量不少于两个均匀地布置在试件周边的基线的应变。测点应精确地布置在试件的纵向表面的纵轴上，且应与试件端头等距，与相邻试件端头的距离不小于一个截面边长。
- 3) 采用内埋式变形量测装置时（如差动式应变计或钢弦式应变计），应注意在试件成型时以适当方式固定该装置，使其量测基线位于试件中部并与试件纵轴重合。
- 4) 采用便携式变形量测装置时（如接触式引伸仪），测头应以恰当方式牢固附置在试件上。
- 5) 量测标距应至少为混凝土骨料最大粒径的 3 倍，且不少于 100mm。

6.4.2 超高性能混凝土受压徐变试验的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) 应采用尺寸为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件。
- 2) 当试件叠放时，应在每叠试件端头的试件和压板之间加装一个未安装应变测量仪表的辅助性混凝土垫块，其截面边长尺寸应与被测试件的相同，且长度应至少等于其截面尺寸的一半。

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抗压强度试件及收缩试件。
- 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至少为 2 个。

3 试件制备应符合下列规定：

- 1) 当要叠放试件时，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 1mm/100mm。
- 3) 采用外装式应变测量装置时，徐变试件两侧面应有安装测量装置的侧头，侧头宜采用埋入式，试模的侧壁应具有能在成型时使侧头定位的装置。在对粘结的工艺及材料确有把握时，可采用胶粘。

6.4.4 超高性能混凝土试件的养护与存放方式应符合下列规定：

1 抗压试件及收缩试件应随徐变试件一并同条件养护。

2 在拆模之前，应覆盖试件表面，以防止水份蒸发。试件应在成型后不少于 24h 且不多于 48h 时拆模，随后立即送入标准养护室养护到 7d 龄期（自混凝土搅拌加水开始起算），养护期间试件不应置于水中养护。养护完成后移入温度为 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $60\pm 5\%$ 的恒温恒湿室进行测试，直至测试完成。

3 对于需确定在具体使用条件下的超高性能混凝土徐变值等其他存放条件，应根据具体情况确定试件的养护及试验制度。

6.4.5 对比或检验超高性能混凝土徐变性能时，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，应至少制备 5 组徐变试件并应分别在龄期为 3d、7d、14d、28d 和 90d 时加荷。

6.4.6 徐变试验应按下列步骤进行：

1 测头或测点应在试验前 1d 粘好, 仪表安装好后应仔细检查, 不得有任何松动或异常现场。加荷装置、测力计等也应予以检查。

2 在即将加荷徐变试件前, 应测试同条件养护时间的棱柱体抗压强度。

3 测头和仪表准备好以后, 应将徐变试件放在徐变仪的下压板后, 应使试件、加荷装置、测力计及徐变仪的轴线重合。并应在此检查变形测量仪的调零情况, 且应记下初始读数。当采用未密封的徐变试件时, 应将其放在徐变仪上的同时, 覆盖参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抗压强度的 40%。当采用外装仪表或者接触法引伸仪时, 应用千斤顶先加压至徐变应力的 20% 进行对中。两侧的变形相差小于其平均值的 10%, 当超出此值, 应松开千斤顶卸荷, 进行重新调整后, 应再加荷到徐变应力的 20%, 并再次检查对中的情况。对中完毕后, 应立即继续加荷直到徐变应力, 应及时读出两边的变形值, 并将此时两边变形的平均值作为在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, 并应松开千斤顶卸荷, 且应观察两边变形值的变化情况。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, 并应检查两侧变形读数, 其总和与加荷前数相比, 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 在测读徐变试件的变形读数的同时, 应测量同条件放置参比用收缩试件的收缩值。

7 试件加荷后应定期检查荷载的保持情况, 应在加荷后 7d、28d、60d、90d 各校核一次, 如荷载变化大于 2%, 应予以补足。在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母, 来进行调整。

6.4.7 试验结果计算及其处理应符合下列规定:

1 徐变应变应按下式计算:

$$\varepsilon_{ct} = \frac{\Delta L_t - \Delta L_0}{L_b} - \varepsilon_t \quad (6.4.7-1)$$

式中: ε_{ct} ——加荷 t(d) 后的徐变应变 (mm/m), 精确至 0.001 mm/m;

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), 精确到 1mm;

ε_t ——同龄期的收缩值 (mm/m), 精确至 0.001mm/m。

2 徐变度应按下式计算:

$$C_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\delta} \quad (6.4.7-2)$$

式中: C_t ——加荷 t(d) 的混凝土徐变度 (1/MPa), 计算精确至 1.0×10^{-6} / (MPa);

δ ——徐变应力 (MPa)。

3 徐变系数应按下式计算:

$$\varphi_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_0} \quad (6.4.7-3)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta L_0}{L_b} \quad (6.4.7-4)$$

式中： φ_t ——加荷 t (d) 的徐变系数；

ε_0 ——在加荷时测得的初始应变值 (mm/m)，精确至 0.001mm/m。

4 每组应分别以 3 个试件徐变应变 (徐变度或徐变系数) 试验结果的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 年徐变值作为终极徐变值。

6.5 抗冻试验

6.5.1 本方法适用于测定超高性能混凝土试件在水冻水融条件下，以经受的快速冻融循环次数来表示的超高性能混凝土抗冻性能。

6.5.2 试验设备应符合下列规定：

1 试件盒 (图 6.5.2) 宜采用具有弹性的橡胶材料制作，其内表面底部应有半径为 3mm 橡胶凸起部分。盒内加水后水面应至少高出试件顶面 5mm。试件盒横截面尺寸宜为 115mm×115mm，试件盒长度宜为 500mm。

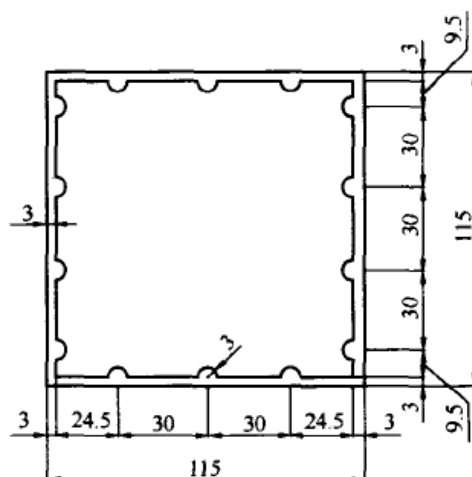


图 6.5.2 橡胶试件盒横截面示意图 (mm)

2 快速冻融装置应符合现行行业标准《混凝土抗冻试验设备》JG/T 243 的规定。除应在测温试件中埋设温度传感器外，尚应在冻融箱内防冻液中心、中心与任何一个对角线的两端分别设有温度传感器。运转时冻融箱内防冻液各点温度的极差不得超过 2℃。

3 称量设备的最大量程应为 20kg，感量不应超过 5g。

4 混凝土动弹性模量测定仪应符合《普通混凝土长期性能和耐久性能测试方法标准》GB/T 50081 第 5 章的规定。

5 温度传感器 (包括热电偶、电位差计等) 应在 (-20~20)℃ 范围内测定试件中心温度，且测量精度应为 ±0.5℃。

6.5.3 快冻法抗冻试验所采用的试件应符合如下规定：

1 快冻法抗冻试验应采用尺寸为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件，每组试件数量应为 3 块。

2 成型试件时，不得采用憎水性脱模剂。

3 除制作冻融试验的试件外,尚应制作同形状、尺寸,且中心埋有温度传感器的测温试件,测温试件应采用防冻液作为冻融介质。测温试件所用混凝土的抗冻性能应高于冻融试件。测温试件的温度传感器应埋设在试件中心。温度传感器不应采用钻孔后插入的方式埋设。

6.5.4 超高性能混凝土的抗冻性试验应按照下列步骤进行:

1 在标准养护室内或同条件养护的试件应在养护龄期为 24d 时提前将冻融试验的试件从养护地点取出,随后将冻融试件放在 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 水中浸泡,浸泡时水面应高出试件顶面 $(20\sim 30)\text{mm}$ 。在水中浸泡应为 4d,试件应在 28d 龄期时开始进行冻融试验。始终在水中养护的试件,当试件龄期达到 28d 时,可直接进行后续试验。对此种情况,应在试验报告中予以说明。

2 当试件养护龄期达到 28d 时应及时取出试件,用湿布擦除表面水分后应对外观尺寸进行测量,并应编号、称量试件初始质量 W_{0i} ;然后按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 中第 5 章的规定测定其横向基频的初始值 f_{0i} 。

3 将试件放入试件盒内,试件应位于试件盒中心,然后将试件盒放入冻融箱内的试件架中,并向试件盒中注入清水。在整个试验过程中,盒内水位高度应始终保持至少高出试件顶面 5mm。

4 测温试件盒应放在冻融箱的中心位置。

5 冻融循环过程应符合下列规定:

1) 每次冻融循环应在 $(2\sim 4)\text{h}$ 内完成,且用于融化的时间不得少于整个冻融循环时间的 $1/4$;

2) 在冷冻和融化过程中,试件中心最低和最高温度应分别控制在 $(-18\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 和 $(5\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 。在任意时刻,试件中心温度不得高于 7°C ,且不得低于 -20°C 。

3) 每块试件从 3°C 降至 -16°C 所用的时间不得少于冷冻时间的 $1/2$;每块试件从 -16°C 升至 3°C 所用的时间不得少于整个融化时间的 $1/2$,试件内外温差不得超过 28°C 。

4) 冷冻和融化之间的转换时间不宜超过 10min。

6 每隔 25 次冻融循环宜测量试件的横向基频 f_{ni} 。测量前应先将试件表面浮渣清洗干净并擦干表面水分,然后应检查其外部损伤并称量试件的净质量 W_{ni} 。测完横向基频后,应迅速将试件掉头重新装入试件盒内并加清水,继续试验。试件的测量、称量及外观检查应迅速,待测试件应用湿布覆盖。

7 当有试件停止试验被取出时,应另用其他试件填充空位。当试件冷冻状态下因故中断时,试件应保持在冷冻状态,直至恢复冻融试验为止,并应将故障原因及暂停时间在试验结果中注明。试件在非冷冻状态下发生故障的时间不宜超过两个冻融循环的时间。在整个试验过程中,超过两个冻融循环时间的中断故障不得超过两次。

8 当冻融循环出现下列情况之一时,可停止试验:

1) 达到规定的冻融循环次数;

2) 试件的相对动弹性模量下降到 60%。

3) 试件的质量损失率达 5%。

6.5.5 试验结果计算及处理应符合下列规定:

1 相对动弹性模量应按下列公式计算:

$$P_i = \frac{f_{ni}^2}{f_{0i}^2} \times 100 \quad (6.5.5-1)$$

式中： P_i ——经 N 次冻融循环后第 i 个超高性能混凝土试件的相对动弹性模量（%），精确至 0.1；

f_{ni} ——经 N 次冻融循环后第 i 个超高性能混凝土试件的横向基频（Hz）；

f_{n0} ——冻融循环试验前第 i 个超高性能混凝土试件横向基频初始值（Hz）；

$$P = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_i \quad (6.5.5-2)$$

式中： P ——经 N 次冻融循环后知足混凝土的相对动弹性模量（%），精确至 0.1。相对动弹性模量 P 应以三个试件试验结果的算术平均值作为测定值。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，并应取其两值的算术平均值作为测定值；当最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15% 时，应取中间值作为测定值。

2 单个试件的质量损失率应按下列式计算：

$$\Delta W_{ni} = \frac{W_{0i} - W_{ni}}{W_{0i}} \times 100 \quad (6.5.5-3)$$

式中： ΔW_{ni} —— N 次冻融循环后第 i 个超高性能混凝土试件的质量损失率（%），精确至 0.01；

W_{0i} ——冻融循环试验前第 i 个超高性能混凝土试件的质量（g）；

W_{ni} —— N 次冻融循环试验后第 i 个超高性能混凝土试件的质量（g）。

3 一组试件的平均质量损失率应按下列式计算：

$$\Delta W_n = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta W_{ni}}{3} \times 100 \quad (6.5.5-4)$$

式中： ΔW_n —— N 次冻融循环后一组混凝土试件的平均质量损失率（%），精确至 0.1。

4 每组试件的平均质量损失率应以三个试件的质量损失率试验结果的算术平均值作为测定值。当某个试验结果出现负值，应取 0，再取三个试件的平均值。当三个值中最大值或最小值与中间值之差超过 1% 时，应剔除此值，并应取剩余两值的算术平均值作为测定值；当最大值和最小值与中间值之差均超过 1% 时，应取中间值作为测定值。

5 超高性能混凝土抗冻等级应以相对动弹性模量下降至不低于 60% 或者质量损失不超过 5% 时的最大冻融循环次数来确定，并用符号 F 表示。

6.6 抗氯离子渗透性能试验

6.6.1 本方法适用于以快速氯离子迁移系数法（或称 RCM 法）测定氯离子在不含钢纤维的超高性能混凝土基体中非稳态迁移的迁移系数来确定超高性能混凝土的抗渗性能。

6.6.2 超高性能混凝土快速法迁移法测抗氯离子渗透性试验应采用直径为 (100 ± 1) mm，高度为 (50 ± 2) mm 的圆柱体试件，每组试件数量应为 3 块。

6.6.3 试验所用仪器设备、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、氯化钠、硝酸银、氢氧化钙均应为化学纯。

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) 真空容器应至少能够容纳 3 个试件。
- 3) 真空泵应至少能容纳 3 个试件。

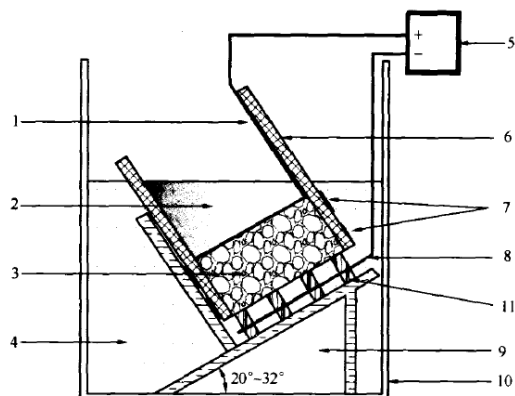


图 6.6.3 RCM 试验装置示意图

1—阳极板；2—阳极溶液；3—试件；4—阴极溶液；5—可调直流电源；

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

- 4) RCM 试验装置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，其直径范围应为 (105~115) mm、跨度应为 20mm。阴极试验槽可采用尺寸为 370mm×370mm×280mm 的塑料箱。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 试验装置还应复合现行行业标准《混凝土氯离子扩散系数测定仪》JG/T 262 的有关规定。
- 5) 电源应能稳定提供 (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) 号。
- 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，测量允许误差为 ±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、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 10%质量浓度的 NaCl 溶液，阳极溶液应为 0.3mol/L 摩尔浓度的 NaOH 溶液。溶液应至少提前 24h 配制，并应密封保存在温度为 (20~25)℃ 的环境中。
- 2) 显色指示剂应为 0.1mol/L 浓度的 AgNO₃ 溶液。

6.6.4 试件制作应符合下列规定：

1 在试验室制作试件时，宜采用 Φ100mm×200mm 试模。成型时应使用不含钢纤维的超高性能混凝土拌合物。

2 试件应在 (24±2) h 内拆模，然后浸没于标准养护室的水池中，试件的养护龄期宜为 28d。

3 应在抗氯离子渗透试验前 7d 加工成标准尺寸的试件。应先将试件从正中间切成相同尺寸的两部分 (Φ100mm×100mm)，然后从两部分中各切取一个高度为 (50±2) 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。

4 试件加工后应采用水砂纸和细锉刀打磨光滑，加工好的试件应继续浸没于水中养护至试验龄期。

6.6.5 RCM 法试验应按下列步骤进行：

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，擦干时间表面多余的水分。然后应采用游标卡尺测量试件的直径和高度，测量应精确到 0.1mm。应将试件在饱和和面干状态下置于真空容器中进行真空处理。应到 5min 内将真空容器中的气压减少至 (1~5) kPa，并保持该真空度 3h，然后在真空泵仍然运转的情况下，将用蒸馏水皮遏制的饱和氢氧化钙溶液注入容器，溶液高度应保证将试件浸没。在试件浸没 1h 后恢复常压，并应继续浸泡 (18±2) h。

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 试验装置的试验槽在试验前应用室温凉开水冲洗干净。

4 试件和RCM试验装置准备好以后，应将试件装入橡胶套内的底部，应在与试件齐高的橡胶套外侧安装两个不锈钢环箍（图6.6.5），每个箍高度应为20mm，并应拧紧环箍上的螺栓至扭矩 (30±2) N•m，使试件的圆柱侧面处于密封状态。

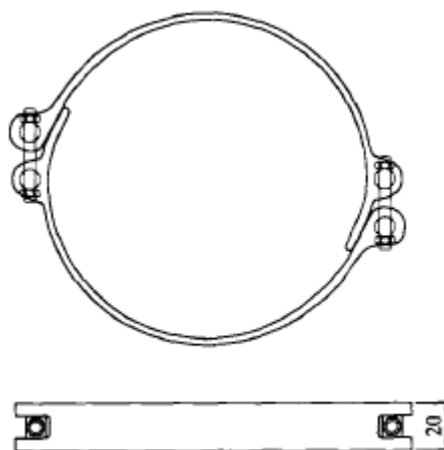


图 6.6.5 不锈钢环箍

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。然后应在橡胶套中注入约300mL浓度为0.3mol/L的NaOH溶液，并使阳极板和试件表面均浸没于溶液中。应在阴极试验槽中注入12L质量浓度为10%的NaCl溶液，并应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。

6.6.6 电迁移试验应按下列步骤进行：

- 1 首先应打开电源，将电压调整到 (30 ± 2) V，并应记录通过每个试件的初始电流。
- 2 后续试验应施加的电压（表6.6.6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6.6.6第一列）决定。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6.6.6第三列），确定试验应持续的时间（表6.6.6第四列）。

表6.6.6 初始电流、电压与试验时间的关系

初始电流 I_{30V} (用30V电压) (mA)	施加的电压 U (调整后) (V)	可能的新的初始电流 I_n (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

- 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的初始温度。
- 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除试验溶液。应用黄铜刷清除试验槽的结垢或沉淀物，并应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。

6.6.7 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，并应立即用自来水将试件表面冲洗干净，然后应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，并应在劈开的试件断面立即喷涂浓度为0.1mol/L的AgNO₃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等份，并应用防水笔描出渗透轮廓线。
- 5 然后应根据观察到的明显的颜色变化，测量显色分界线(图5.5.7)离试件底面的距离，精确至0.1mm。
- 6 当某一测点被骨料阻挡，可将此测点位置移动到最近未被骨料阻挡的位置进行测量，当某测点数据不能得到，只要总测点数多于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，但应将这种情况在试验记录和报告中注明。

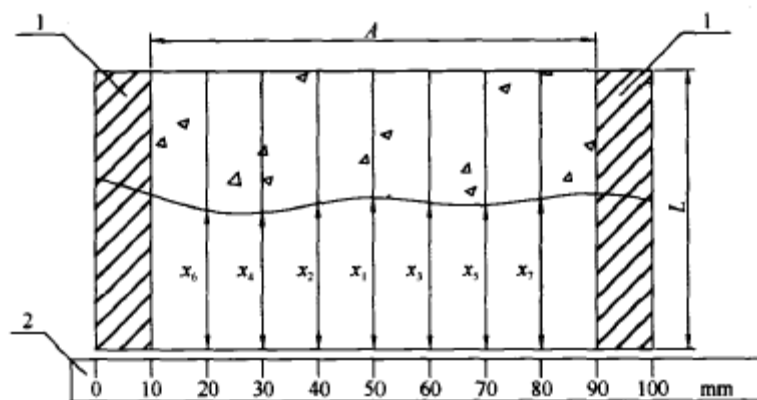


图6.6.7 显色分界线位置编号

1—试件边缘部分；2—尺子；A—测量范围；L—试件高度

6.6.8 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式进行计算：

$$D_{RCM} = \frac{0.0239 \times (273 + T)L}{(U - 2)t} \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U - 2}} \right) \quad (6.6.8)$$

式中： D_{RCM} ——超高性能混凝土的非稳态氯离子迁移系数，精确到 $0.01 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ；

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（℃）；

L ——试件厚度（mm），精确到0.1mm；

X_d ——氯离子渗透深度的平均值（mm），精确到0.1mm；

t ——试验持续时间（h）。

2 超高性能混凝土的非稳态氯离子迁移系数应按下式进行计算：

- 1) 计算 3 个试样氯离子扩散系数的算术平均值；
- 2) 当氯离子扩散系数的计算平均值小于 $0.10 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 时，直接取 3 个试样氯离子扩散系数的中间值作为该组试件的氯离子扩散系数测定值。
- 3) 当氯离子扩散系数的计算平均值在 $0.10 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s} \sim 0.30 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 之间时，若最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 40%，应剔除此值，再取其余两值的平均值作为测定值；若最大值和最小值均超过中间值的 40%，应取中间值作为测定值。
- 4) 当氯离子扩散系数的计算平均值大于 $0.30 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 时，若最大值或最小值与中间值之差超过中间值的 20%，应剔除此值，再取其余两值的平均值作为测定值；若最大值和最小值均超过中间值的 20%，应重新制样进行试验，或取其中最大值作为测定值。

6.7 抗气体渗透性能试验

6.7.1 本方法适用于测定超高性能混凝土的气体渗透率来确定其抗气体渗透性能。

6.7.2 超高性能混凝土抗气体渗透性能试验应采用尺寸为直径为 150mm，高度为 50mm 的圆饼状试件，每组试件数量为 3 块。

6.7.3 抗气体渗透性能试验的试验仪器设备应符合以下规定：

1 本测试方法的气体渗透装置如图 6.7.3 所示，由整体装置和气体渗透单元组成。

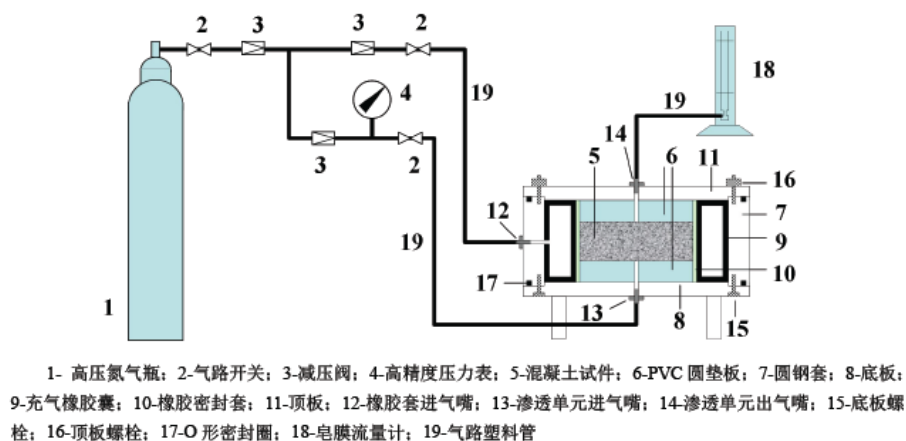


图 6.7.3 气体渗透装置图

2 高压氮气瓶应符合现行国家标准《钢质无缝气瓶》GB5099 的规定，最低工作压力 2MPa；

3 高精度压力表的量程不小于 1MPa，精度不低于 1kPa；

4 渗透单元顶板和底板宜采用钢质材料；

5 皂膜流量计的量程宜为 0.1~100mL/min。

6.7.4 试件预处理应符合以下要求：

1 拌合后的超高性能混凝土浇筑在内径为 150mm、高度至少为 200mm 的钢模中，充分振捣成型。在 3 天龄期拆模，并置于标准养护条件下直至 28d 龄期。

2 使用岩石切割机从混凝土柱体中部切出厚度为 50mm 的圆饼试件，厚度切割误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ ，每个圆柱至少切割出 3 个圆饼试件。

3 将圆饼试件置入 60℃ 烘箱干燥 7d，然后再将圆饼试件置于温度为 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度为 $60\pm 5\%$ 环境中 14 天。在干燥前后分别称取试件的质量，精确到 0.1g。

6.7.5 超高性能混凝土气体渗透率测试应按以下步骤进行：

1 将圆饼试件侧面涂环氧树脂，并在室温干燥。

2 组装气体渗透单元，并分别置入充气橡胶囊、橡胶密封套、PVC 圆垫板和处理好的试件，盖上渗透单元顶板并紧固螺栓。

3 组装气路，连接高压气瓶、气体渗透单元和皂膜流量计。

4 利用减压阀将钢瓶高压氮气调压至 1.2MPa 左右，再打开连接充气橡胶囊的调压阀并调整压力至 1.0MPa，打开其后的气路开关给充气橡胶囊充气。

5 打开连接渗透单元底板进气嘴的调压阀，将压力稳定在 0.30MPa，然后打开其后的气路开关；每隔 1h 使用皂膜流量计测量一次渗透单元出气嘴的气体流量，待前后两次测量流量误差小于 5%时记录此时的气体流量。

6 调整连接渗透单元进气口的调压阀的气体压力，按步骤 5 的方法分别测试进气口气体压力在 0.40MPa、0.60MPa 和 0.80MPa 下的出气嘴流量。

7 关闭高压气瓶开关，给充气橡胶囊放气；打开渗透单元顶板，取出试件，按步骤 2~6 进行下一个试件的测量，直至所有试件测试完毕。

6.7.6 超高性能混凝土气体渗透率的测试结果应符合以下规定：

1 表观渗透率计算

根据每个进气嘴压力水平下的稳定气体流量，按照下式计算表观气体渗透率：

$$k_a = \frac{\mu L Q P_{atm}}{A(P - P_{atm})P_m} \quad (6.7.6-1)$$

式中： k_a ——超高性能混凝土混凝土表观气体渗透率(m^2)；

P_{atm} ——测试条件下的大气压力(Pa)；

P ——渗透单元进气嘴的绝对压力 (Pa)， 150,000-400,000 (Pa)；

P_m ——渗透单元进气嘴和出气嘴的平均压力(Pa)， 等于 $(P + P_{atm})/2$ ；

Q ——渗透单元出气嘴的稳定气体流量(m^3/s)；

L ——试件厚度 (m)；

μ ——气体的动粘度系数(Pa·s)， 1.76×10^{-5} Pa·s；

A ——超高性能混凝土试件横截面积 (m^2)， $0.01766 m^2$ 。

2 固有渗透率回归

计算超高性能混凝土试件在 4 个压力水平下的表观渗透率，然后对不同压力下的 $1/P_m$ 与对应的表观渗透率 k_a 按照式下式进行线性回归：

$$k_a = b \times \frac{1}{P_m} + k_v \quad (6.7.6-2)$$

所得回归参数 k_v 即为超高性能混凝土试件的固有渗透率，精确到 $0.1 \times 10^{-18} m^2$ 。

3 试验结果的确定

以 3 个圆饼试件固有渗透率的平均值作为超高性能混凝土抗气体渗透性能的试验结果。

本规程用词说明

- 1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用：“必须”，反面词采用“严禁”
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用：“应”，反面词采用：“不应”或“不得”。
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时，首先应这样做的用词：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指定应按照其他有关标准执行的写法为“应按照……执行”或“应符合……规定”。

引用标准名录

- 《试验机通用技术要求》GB/T 2611
- 《液压式万能试验机》GB/T 3159
- 《钢质无缝气瓶》GB 5099
- 《湿法硬质纤维板》GB/T 12626
- 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080
- 《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081
- 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082
- 《混凝土试模》JG 237
- 《混凝土抗冻试验设备》JG/T 243
- 《混凝土含气量测定仪》JG/T 246
- 《混凝土坍落度仪》JG/T 248
- 《混凝土氯离子扩散系数测定仪》JG/T 262

中国工程建设标准化协会标准

超高性能混凝土试验方法标准

T/CECS xxx—2020

条文说明

目次

1	总 则	57
2	术 语	58
3	基本规定	59
3.1	一般规定	59
3.2	拌合物取样与制备	59
3.3	试件的成型及养护	59
3.4	试验或检测报告	60
4	超高性能混凝土拌合物性能试验	61
4.1	一般规定	61
4.2	扩展度及扩展度经时损失试验	61
4.3	扩展时间试验	61
4.4	凝结时间试验	61
4.5	表观密度试验	62
4.6	含气量试验	62
4.7	纤维含量试验	62
5	超高性能混凝土物理力学性能试验	63
5.1	一般规定	63
5.2	抗压强度试验	63
5.3	轴心抗压强度与静力受压弹性模量试验	66
5.4	抗弯强度与弯曲韧性试验	66
5.5	轴心抗拉性能试验	66
5.6	劈裂抗拉强度试验	70
5.7	粘结强度试验	70
5.8	泊松比试验	70
5.9	线膨胀系数试验	70
5.10	耐磨性试验	70
5.11	抗冲磨性试验	70
5.12	硬化超高性能混凝土密度试验	71
5.13	钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度试验	71
6	超高性能混凝土长期性能和耐久性能试验	72
6.1	一般规定	72
6.2	自收缩试验	72
6.3	干燥收缩试验	72
6.4	受压徐变试验	73
6.5	抗冻试验	73
6.6	抗氯离子渗透性能试验	73
6.7	抗气体渗透性能试验	75

1 总 则

1.0.1 我国自从 21 世纪初开始研究并推广超高性能混凝土以来，一直没有统一的试验方法，许多超高性能混凝土性能参数的试验方法通常参照砂浆或普通混凝土的试验方法。但超高性能混凝土的原材料组成体系及性能特点均与砂浆或普通混凝土存在一定的差异，现有的试验方法存在不适用或者需要调整的问题。

编制本标准的目的在于为设计、施工、监理、质检和科研等单位的有关人员提供一个统一和规范的超高性能混凝土试验准则，使超高性能混凝土各项性能的试验方法和试验结果具有一致性和可比性，有助于超高性能混凝土的产品性能评价，从而促进超高性能混凝土的推广应用，并有利于使用超高性能混凝土的工程质量控制。

1.0.2 规定本标准的适用范围为各类建设工程（如桥梁工程、建筑外墙工程、市政工程等）中用到的超高性能混凝土的拌合物性能、物理力学性能、长期性能和耐久性能试验。其中多数试验方法借鉴了现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法》（GB/T 50080-2016）、《混凝土物理力学性能试验方法标准》（GB/T 50081-2019）、《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082-2009）中的相关试验方法，部分试验方法借鉴了中国工程建设协会标准《纤维混凝土试验方法标准》（CECS 13-2009）中的试验方法，并针对超高性能混凝土性能特点对各试验方法进行了调整和改进。对于轴心抗拉性能试验方法借鉴了瑞士标准中的抗拉试验方法，并进行了调整和改进。

1.0.3 超高性能混凝土虽然与普通混凝土在性能特点上有一定的差异，但其应用范围和性能测试的原则与普通混凝土试验的一般原则具有较大的相似性。因此，除超高性能混凝土试验的特殊内容以及为保持连贯性而编入本标准的试验内容外，凡涉及现行国家有关标准等内容，均应按有关的规定执行。

2 术 语

2.0.1 本标准的超高性能混凝土是按照其原材料组成和性能特点进行定义。超高性能混凝土的主要原材料包括水泥、掺合料、骨料、增强纤维、减水剂和水。超高性能混凝土制备过程中通过采用超低水胶比（通常小于 0.20），并根据最紧密堆积原理构建，最大程度降低了材料内部缺陷从而具有超高力学性能和抗侵蚀性介质渗透性能（水、气体、离子），并由于加入了大量微细钢纤维对其脆性特征有了极大的改善。

2.0.2 本标准定义的抗拉性能是指单轴拉伸荷载作用下表现出的力学特征，分为抗拉强度和拉伸变形行为两个方面。抗拉强度用来衡量超高性能混凝土单轴拉伸条件下的承载能力，拉伸变形行为用来衡量超高性能混凝土是具有应变-软化特性或是应变-硬化特性。抗拉性能是衡量超高性能混凝土产品性能的重要技术指标。

2.0.3 本标准定义的抗气体渗透性能是指超高性能混凝土对气体渗透的抵抗能力。混凝土的抗渗性能试验方法包括水渗法、离子渗透法、气体渗透法。对于超高性能混凝土，以水为渗透介质，渗水高度极低；以氯离子为渗透介质，会受到钢纤维的影响。以气体为渗透介质，气体分子能够更加容易穿过水泥基材料基体结构，且不受钢纤维影响，更加适用于表征超高性能混凝土的抗渗性能。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 试验室的温湿度试验条件会对超高性能混凝土的各项性能试验结果产生影响，因此本条对实验室温湿度条件以及原材料、试验设备、试验容器和试验辅助设备的温度要求进行了规定；需要模拟施工条件下所用的超高性能混凝土时，所用原材料的温度宜与施工现场保持一致。

3.1.2 试件的尺寸测量与公差应按照现行国家标准执行。

3.1.3 为了保证试验的客观科学，以及试验结果准确，试验设备使用前应经过校准，处于正常工作状态，确保满足试验要求。

3.1.4 超高性能混凝土的拌合物性能很容易受风、雨雪和阳光直射的影响，尤其是在大风和阳光直射条件下易出现表面起皮现象。因此，本条规定了现场试验应避免超高性能混凝土拌合物试样受到户外气候的影响。

3.2 取样与试样的制备

3.2.1 超高性能混凝土拌合物的现场取样要求参照了普通混凝土拌合物现场取样的相关规定。

3.2.2 本条规定了试验室超高性能混凝土拌合物的称量精度与搅拌要求。

超高性能混凝土拌合物水胶比极低，宜采用强制式搅拌机或其他更加先进的有利于超高性能混凝土拌合物拌制均匀的搅拌机。另一方面，超高性能混凝土拌合物粘性较大，易粘在搅拌机上，会造成浆料的损失。因此，需要预拌少量不含钢纤维的超高性能混凝土拌合物使搅拌机内壁均匀不满超高性能混凝土浆体。

研究表明，超高性能混凝土需要搅拌一定的时间才能将初期搅拌过程中包裹在胶凝材料中的水分释放出来，通常需要 3min~5min 甚至更长的时间拌合物才初步具有流动性。建议在浆体具有较好的流动性后再加入钢纤维，以利于钢纤维分散。如将钢纤维直接与粉料干拌后再加入液体原材料，则会大大增加搅拌难度和搅拌时间。

不同的超高性能混凝土产品，其搅拌方式有具体的要求。本标准只是给出了推荐的搅拌方式，在实际搅拌时，根据产品特点对搅拌方式做相应的调整。

3.3 试件的成型及养护

3.3.1 本条规定了超高性能混凝土成型过程中的相关要求。超高性能混凝土通常具有较好地流动性，扩展度一般在 650mm 以上，可实现自密实浇筑，因此对于扩展度大于 650mm 的超高性能混凝土，宜一次浇筑完成，浇筑时从单侧浇筑，保持单侧流动，减小纤维取向性的影响。当然也有部分超高性能混凝土由于特殊工况要求，不需要太高的流动性，因此对于扩展度小于 650mm 的超高性能混凝土建议分层浇筑，浇筑完后适当敲击试模以提高成型密实度。对于浇筑完成后是否需要振动台振动密实，排除内部微小气泡，可根据产品需求决定。但由于钢纤维的存在，超高性能混凝土成型过程中不得进行插捣，以防破坏体系的均匀性。

3.3.2 超高性能混凝土标准养护方法可参考普通混凝土标准养护方法。超高性能混凝土的养护龄期无特殊情况下应定为 28d，研究表明超高性能混凝土的 7d 抗压强度可到 28d 抗压强度的 85%以上，28d 后强度增长极为缓慢，国内外研究与工程应用对于超高性能混凝土强度高也通常采用 28d 龄期进行衡量。对于确实有特殊要求的，可根据设计龄期或实际需求进行调整。

3.3.3 超高性能混凝土热养护应优先采用与实际生产或施工相一致的热养护方式，主要考虑到热养护温度、时间对超高性能混凝土的诸多性能，尤其是力学性能的发展有较大的影响。如不具备条件，可采用标准蒸汽养护方式。目前相对采用较多的蒸汽养护温度为 90℃，养护时间为 48h，升温降温速率根据现行标准要求应不大于 15℃/h。本标准将其作为标准蒸汽养护方式，可用于不同超高性能混凝土产品在同一热养护条件下的性能对比。

3.4 试验或检测报告

3.4.1 本条规定了超高性能混凝土拌合物性能的试验或检测报告应包括的内容。

3.4.2 本条规定了超高性能混凝土物理力学性能、长期性能和耐久性能的试验或检测报告应包括的内容。

4 超高性能混凝土拌合物性能试验

4.1 一般规定

4.1.1 本条给出了超高性能混凝土较为关注或可能需要测试的拌合物性能参数的试验方法，包括扩展度及经时损失、扩展时间、凝结时间、表观密度、含气量、拌合物中纤维含量。其中扩展度及经时损失用于表征超高性能混凝土的流动性，扩展时间一定程度上可以表征超高性能混凝土的粘性、凝结时间用于表征超高性能混凝土凝结硬化快慢，表观密度、含气量、纤维含量是超高性能混凝土拌合物的基本参数，实际工程中可能会需要检测这三个参数。

4.1.2 现行国家标准中给出的普通混凝土拌合物性能试验方法还包括坍落度及坍落度损失、维勃稠度、倒置坍落度筒排空、间隙通过性、泌水、压力泌水、均匀性、抗离析性、温度试验、绝热温升试验。超高性能混凝土用水量极低、较大，基本不存在泌水和离析问题（钢纤维离析可采用拌合物中纤维含量表征），一般不用进行泌水、压力泌水、抗离析性试验。维勃稠度试验适用于坍落度小于 50mm 或干硬性混凝土，对于超高性能混凝土并不适用。其他性能参数确实需要测试时，试验方法可按现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 或其他国家现行有关标准执行。

4.2 扩展度及扩展度经时损失试验

4.2.1~4.2.7 超高性能混凝土扩展度及扩展度经时损失的试验方法参照了《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080-2016，并根据超高性能混凝土流动性好、自密实、粘性大等特性对该方法进行了适当的调整：1）调整了装料方式。超高性能混凝土应采用盛料容器一次性填坍落度筒，无需分层装填，不得进行插捣，以防纤维团聚。2）调整了试样的扩展时间。超高性能混凝土由于拌合物粘性较大，达到最终扩展度所需的时间要大于普通混凝土。试验表明，以 90s 的扩展时间来评判粘性较大的超高性能混凝土的扩展度具有一定的合理性。

4.3 扩展时间试验

4.3.1~4.3.3 超高性能混凝土扩展时间的试验方法参照了《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》，该方法适用于超高性能混凝土。

4.4 凝结时间试验

4.4.1~4.4.5 超高性能混凝土扩展时间的试验方法参照了《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080-2016，并根据超高性能混凝土特点对该方法进行了适当的调整。

超高性能混凝土中的钢纤维形成的纤维网状结构对将浆体的贯入阻力测试会产生影响，因此超高性能混凝土凝结时间测试对象应为去除纤维的超高性能混凝土拌合物，即在试样的搅拌制备过程中，去除加入纤维的工序，可免除筛析步骤。由于超高性能混凝土的填充性较好，装料时可一次性装料完毕，无需插捣或振动。

4.5 表观密度试验

4.5.1~4.5.4 超高性能混凝土表观密度的试验方法参照了《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080-2016，并根据超高性能混凝土特点对该方法中的装料过程进行了调整。

4.6 含气量试验

4.6.1~4.6.4 超高性能混凝土表观密度的试验方法参照了《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080-2016，并根据超高性能混凝土特点对该方法进行了适当调整。

超高性能混凝土在制备过程中为了提高的体系均匀性和强度，通常去除粗骨料而采用粒径 1mm 以下的细骨料，如此细小的骨料含气量可忽略不计。即使特殊情况下为了减小收缩而在超高性能混凝土中加入少量粗骨料，为了保证强度，所选的粗骨料也是质地坚硬、致密性好的岩石，含气量也可忽略。因此，本标准的超高性能混凝土含气量试验方法在原试验方法基础上，删除了骨料的含气量测试步骤，可提高试验的可操作性和试验效率。

4.7 纤维含量试验

4.7.1~4.7.7 超高性能混凝土纤维含量的试验方法参照了《纤维混凝土试验方法标准》CECS13: 2009，该方法适用于超高性能混凝土。

5 超高性能混凝土物理力学性能试验

5.1 一般规定

5.1.1 本条给出了超高性能混凝土较为关注或可能需要测试的物理力学性能和力学性能的试验方法,包括抗压强度、轴心抗压强度与静力受压弹性模量、抗弯强度及弯曲韧性、轴心抗拉性能、劈裂抗拉强度、粘结强度、泊松比、线膨胀系数、耐磨性、抗冲磨性、硬化超高性能混凝土密度、钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度。其中抗压强度、静力受压弹性模量、抗弯强度、轴心抗拉性能是超高性能混凝土最为关注的物理力学性能指标,根据超高性能混凝土在桥梁、建筑、市政、军事、水工等领域的应用经验,可能需要测量的物理力学性能参数包括硬化超高性能混凝土密度、弯曲韧性、劈裂抗拉强度、粘结强度、泊松比、线膨胀系数、耐磨性、抗冲磨性。钢纤维与超高性能混凝土浆体粘结强度可作为钢纤维在超高性能混凝土中的作用效果提供重要的参考指标。

5.1.2 现行国家标准中给出的混凝土物理力学性能试验方法还包括混凝土与钢筋的握裹强度、导温系数、导热系数、比热容、吸水率试验。上述性能参数确实需要测试时,试验方法可按现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2019 或其他国家现行有关标准执行。

5.2 抗压强度试验

5.2.1 本方法适用于超高性能混凝土立方体抗压强度试验。

5.2.2 本条规定了超高性能混凝土抗压强度试验的试件尺寸和数量。

超高性能混凝土的抗压强度试块尺寸一直是大家关注的焦点。在国内早期的超高性能研究中,抗压强度主要采用 40mm×40mm×160mm 的胶砂试块,由于试件的尺寸较小,试块中纤维的取向性较为明显,导致其抗压强度测试值比 100mm×100mm×100mm 的立方体试块高出约 40%。因此有必要在标准编制过程中对抗压强度的试件尺寸进行规定,以便有一个统一的标准对不同超高性能混凝土产品的抗压强度进行衡量比较。表 5.2.2 给出了目前国内外标准中超高性能混凝土的抗压强度试件尺寸。

表 5.2.2 国内外标准中超高性能混凝土抗压强度试件尺寸

国别	年份	最低抗压强/MPa	试件类型	标准试件尺寸
中国	2015	100	立方体	100mm
法国	2016	130	圆柱体	Φ110×220mm
日本	2004	150	圆柱体	Φ100×200mm
瑞士	2015	120	立方体	100mm
韩国	2008	180	圆柱体	Φ3×6inch (约 Φ75×150mm)
美国 ASTM	2017	120	圆柱体	Φ3×6inch (或 Φ75×150mm)
澳大利亚	2000	150	圆柱体	Φ70×140mm

国外的标准中通常采用圆柱体试件作为标准试件,试件底面直径在 70~110mm 范围内。国内标准中对于混凝土抗压强度的检测则更倾向于采用立方体试件,虽然《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2019)中规定边长为 150mm 的立方体试件是标准试件,但实际检测过程经常采用边长为 100mm 的立方体试件。该标准中规定当混凝土强度等级 $\geq$ C60 时,使用非标试件时,尺寸换算系数应由试验确定。

从超高性能混凝土的抗压强度试验来看,国内外专家学者更倾向于用边长为 100mm 的立方体试块。现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 和混凝土与水泥制品协会标准《超高性能混凝土:基本性能及试验方法》T/CCPA 7-2018 中也采用边长为 100mm 的立方体试块作为标准试块。

本标准参考现有国内外标准的规定,将边长为 100mm 的立方体试块作为标准试件,不再推荐其他尺寸的试块,试验结果不需乘以任何尺寸换算系数。

5.2.3 本条规定了超高性能混凝土抗压强度试验所需的仪器设备及应满足的要求。

5.2.4 本条规定了超高性能混凝土抗压强度试验步骤,总体上与普通混凝土抗压强度相同,由于抗压强度值较高,加载速率也相应提高至 1.20MPa/s~1.40MPa/s。

5.2.5 本条规定了超高性能混凝土抗压强度试验结果计算及确定。抗压强度的确定以 6 个试件的测试结果为依据,取偏差超过 10%时进行测值的舍除。

(1) 关于 10%偏差的设定。

这里通过试验给出了 10 组不同厂家超高性能混凝土试块的 28d 抗压强度测试结果,每组试块 6 个,并给出了每组单个试块强度值与平均值分别相差 5%、10%、15%的试块个数。

表 5.2.5-1 超高性能混凝土单个试块强度值与平均值的偏差情况

试件 组别	28d 抗压强度单块试块测值/MPa						平均值 /MPa	超过平均值目标偏差 的试件个数		
	I	II	III	IV	V	VI		5%	10%	15%
1	130	140.4	120.4	107.6	122.4	116.4	122.9	4	2	0
2	137.2	142	131.2	123.2	130.8	124	131.4	3	0	0
3	131.2	128	118.8	127.6	120.8	114	123.4	2	0	0
4	111.6	139.2	148.8	118	128.4	130.8	129.5	4	2	0
5	102	96.8	108	98	103.2	100.8	101.5	1	0	0
6	92.8	106	100.8	110	108.4	100	103.0	3	0	0
7	105.6	128	127.6	123.6	130	128.4	123.9	1	1	0
8	130.8	118	126.4	121.6	118	116.4	121.9	1	0	0
9	149.2	149.2	138.8	147.2	156.8	144.8	147.7	2	0	0
10	123.2	119.2	117.2	116.4	108.8	128.4	118.9	2	0	0
11	138.8	128.8	138.4	122	137.2	138	133.9	1	0	0
12	135.6	152	152.4	163.2	166	160	154.9	1	1	0
13	132.1	123.3	131.5	118.3	123.7	125.7	125.8	1	0	0
14	142.5	135.9	140.6	138.7	145.1	137	140.0	0	0	0
15	108.4	129.2	126.2	113.2	127.6	124	121.4	4	1	0
16	129.6	122.4	137.2	138.4	133	131.2	132.0	1	0	0

从表 5.2.5-1 的试验结果来看:

16 组 UHPC 中，有 5 组 UHPC 单块强度值与平均值偏差超过 5%的试件个数达到 3 个或 3 个以上，所有组别 UHPC 单块强度值与平均值偏差超过 10%的试件个数均在 2 个或 2 个以下，没有一组 UPHC 的单块强度值与平均值偏差会超过 15%。

因此对于 UHPC，5%的偏差要求过于严格，15%的偏差要求过于宽松，取 10%的偏差要求较为合适。

(2) 关于试件数量

这里对比了两种试件数量的强度确定方案，分别为 3 个试件方案和 6 个试件方案，并给出了按两种方案计算的抗压强度确定结果，如表 5.2.5-2 所示。

三个试件方案抗压强度确定步骤：

- ① 取三个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值；
- 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 10%时，则把最大及最小值一并舍除，取中间值作为该组试件的抗压强度值；
- 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。

六个试块方案抗压强度确定步骤：

- ① 取六个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值；
- ② 六个测值中的如有一个或两个与平均值相差超高 10%时，则把偏差超高 10%的试块测值去除，取剩余试块测值的平均值作为该组试件的强度值；
- ③ 六个测值中的如有三个或三个以上与平均值相差超高 10%时，则该组试件的试验结果无效。

表 5.2.5-2 三个试件方案和六个试件方案抗压强度确定结果对比表

试件组别	三个试件方案测试结果/MPa	六个试件方案测试结果/MPa	差值/MPa
1	130.3	122.3	-8.0
2	136.8	131.4	-5.4
3	126.0	123.4	-2.6
4	139.2	129.1	-10.1
5	102.3	101.5	-0.8
6	99.9	103.0	+3.1
7	127.6	127.5	-0.1
8	125.1	121.9	-3.2
9	145.7	147.7	+2.0
10	119.9	118.9	-1.0
11	135.3	133.9	-1.4
12	146.7	158.7	+12.0
13	129.0	125.8	-3.2
14	139.7	140.0	+0.3
15	121.3	124.0	+2.7
16	129.7	132.0	+2.3

注：三个试件方案强度确定时，以表 1 中左侧三个强度值为依据计算。

从表 5.2.5-2 的对比结果来看，三个试件方案与六个试件方案确定的抗压强度结果在极端情况下可相差 10MPa 以上。由于抗压强度是超高性能混凝土的重要力学性能指标。本标准编制时更倾向于采用六个试件的抗压强度确定方法，提高抗压强度测试结果的准确性。

5.3 轴心抗压强度与静力受压弹性模量试验

5.3.1~5.3.5 超高性能混凝土轴心抗压强度与静力受压弹性模量的试验方法参照了《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081。

超高性能混凝土中不存在大粒径粗骨料，体系较为均匀，因此本标准规定超高性能混凝土的轴心抗压强度和静力受压弹性模量试验统一采用尺寸较小的100mm×100mm×300mm的棱柱体试件。

5.4 抗弯强度与弯曲韧性试验

5.4.1 超高性能混凝土抗弯强度与弯曲韧性的试验方法参照了《纤维混凝土试验方法标准》CECS 13。

超高性能混凝土由于本身基体强度较高并加入了大量增强纤维，其抗弯强度及弯曲韧性都要远优于普通混凝土。单独测试抗弯强度无法全面反映超高性能混凝土抗弯性能优越性，因此建议抗弯强度与弯曲韧性试验同时进行。

本标准采用弯曲韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 表征超高性能混凝土的弯曲韧性，弯曲韧性指数与其他弯曲韧性表征参数相比具有如下优点：

- 1 具有明确的物理意义，能反映超高性能混凝土的实际工作状态。由实测荷载-挠度曲线求得的 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 值表示超高性能混凝土与理想弹塑性材料的偏离程度。
- 2 便于在设计中应用。以初裂挠度的倍数确定的给定点指标体系，同工程上使用的延性比类同；采用3倍和5.5倍初裂挠度，也与设计中常用的延性比相近。
- 3 能够反映纤维种类、尺寸和掺量对超高性能混凝土基体韧性的改善程度。
- 4 由于给定挠度为初裂挠度的倍数，因此确定初裂点偏离、挠度测量位置不准以及支座变形对 I_5 、 I_{10} 和 I_{20} 的影响不大，一般不超过10%。

5.4.5 初裂强度的确定总结下来可以采用以下几种方法：①试件上出现可见裂缝对应的荷载；②在试件地面纯弯段贴应变片，应变测值出现突变对应的荷载；③根据荷载-挠度曲线上升段出现拐点对应的荷载；④比较法，以不掺纤维的超高性能混凝土基体的抗折强度等效于超高性能混凝土的弯曲初裂强度。目前几种方法都无法完全准确地确定初裂强度。

本标准确定初裂点的方法采用荷载-挠度曲线上升段拐点观测法，和 ASTM C1018 的规定相同，有一定人为因素影响，但对初裂强度和韧性指数的影响一般不超过10%。不同纤维体积率试件的初裂荷载很接近，一般与纤维体积率为零的试件的初裂荷载相差不超过10%。

5.4.8 目前在工业地坪和喷射混凝土衬砌中，常用到“弯曲韧性比”这一指标，考虑到超高性能喷射混凝土的不断推广应用，保留了这项指标的试验方法。

5.5 轴心抗拉性能试验

5.5.1 超高性能混凝土的轴心抗拉性能是其区别于普通水泥基材料的一个关键性能指标，也是超高性能混凝土应用方非常关心的技术指标。

抗拉性能分为抗拉强度和拉伸变形行为两个方面。抗拉强度用来衡量超高性能混凝土单轴拉伸条件下的承载能力，很大程度上取决于弹性极限抗拉强度，即与基体的抗压强度高低

有较大相关性，具体指标包括弹性极限抗拉强度和抗拉强度。拉伸变形行为主要用来衡量超高性能混凝土是否具有应变-硬化特性，即开裂后塑性阶段纤维对超高性能混凝土基体的作用，与纤维种类、纤维形状、纤维与基体的粘结力、纤维掺量等有较强的相关性，具体指标包括抗拉强度/弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变、抗拉应变。

本标准中通过抗拉性能试验给出了弹性极限抗拉强度、弹性极限拉应变、抗拉弹性模量、抗拉强度和抗拉应变几个参数的测试、计算和确定方法。

5.5.2 本条规定了超高性能混凝土轴心抗拉性能的试件尺寸和试件数量。

国内外超高性能混凝土轴心抗拉性能试验尚未有一个统一的试件尺寸和试验方法。现行国家标准中的轴向拉伸试验试件分为外夹式、内埋式和粘贴式三类。其中外夹式试件通过优化夹头形式，粘贴铝片或放置衬垫等形式，大大降低了夹具与试件表面接触产生的应力集中带来的影响，成为较为主流的抗拉试件形式。然而国标中外夹式试件体积大，增大了断裂在端部的概率，用于测试抗拉强度尚可，但无法有效表征超高性能混凝土的拉伸变形行为。

目前国内外各类超高性能混凝土轴心抗拉性能试验方法中影响力较大的是瑞士工程师与建筑师协会（SIA）标准《超高性能混凝土纤维增强混凝土 UHPFRC-材料、设计与应用》SIA 2052-2016，本标准的轴向抗拉性能试验试件尺寸借鉴了该标准。但考虑到该标准中的试件尺寸厚度仅为 30mm，也有专家质疑可能对纤维取向造成影响，从而与实际情况有较大的差异。因此本标准在编制过程中增加了厚度为 100mm 的同尺寸试件，并进行了对比试验。

表 5.5.2 不同厚度超高性能混凝土抗拉试件的抗拉强度测试结果

超高性能混凝土 产品编号	28d 抗拉强度/MPa		
	厚度 30mm 试件	厚度 100mm 试件	抗拉强度差值/MPa
产品 A	11.5	10.3	+1.2
产品 B	7.6	5.9	+1.7
产品 C	6.6	7.4	-0.8
产品 D	8.5	9.2	-0.7
产品 E	7.6	7.1	+0.5
产品 F	9.1	8.2	+0.9
产品 G	10.5	9.1	+1.4
产品 H	9.4	8.9	+0.5
产品 I	9.3	8.7	+0.6
产品 J	5.1	5.2	-0.1
产品 K	10.1	9.9	+0.2
产品 L	5.2	4.0	+1.2
产品 M	6.6	8.5	-1.7
产品 N	5.3	5.9	-0.6

从不同厚度 UHPC 抗拉强度试验结果来看：
厚度 30mm 小试件的抗拉强度并未像如预期那样一定比厚度 100mm 大试件高，但确实小试件抗拉强度大于大试件抗拉强度的概率更高，两者的偏值基本在 1.5MPa 以内。
虽然两种尺寸试件在抗拉强度没有显著区别，但在拉伸变形行为（抗拉应力-应变曲线）方面还是有一定的区别。小试件的开裂位置更容易落在标距范围内，且更容易获得应变硬化特征，而大试件在试验过程中拉出应变软化特征的可能性更高。

本标准规定 30mm 厚试件为标准试件，100mm 厚试件为非标准试件。委托单位根据自

己的理解和需要选用标准试件或非标准试件,但两种尺寸试件在进行产品合格性判断时不考虑尺寸效应。

5.5.3 本条规定了超高性能混凝土轴心抗拉性能试验的试验设备要求。

5.5.4 超高性能混凝土试件在轴心抗拉试验过程中应注意对中调整,对中的好坏直接影响测试结果。试验过程中宜采用统一的加载方式和加载速率,试验研究表明采用位移控制,加荷速率在 0.2mm/min 可获得较好的拉伸应力-应变曲线。

本标准设置了 3 个终止加载的条件,主要出于以下考虑:

终止条件一:试件的拉应变大于 10000 $\mu\epsilon$ 。

对于具有应变-硬化的超高性能混凝土试件,在过了弹性极限段开裂进入塑性阶段后,承载能力随着应变的增加可能有小幅的下降,但由于纤维的作用,随着应变的进一步增加,承载能力又重新增加,直至超高弹性极限荷载。因此,抗拉性能试验中试件达到最大荷载对应的抗拉应变可能较大,不得中途盲目终止试验。表 5.5.4 给出了具有应变硬化特性的超高性能混凝土试件达到最大荷载时的抗拉应变。

表 5.5.4 具有应变硬化特性的超高性能混凝土试件的抗拉应变

试件编号	弹性极限拉应变/ $\mu\epsilon$	抗拉应/ $\mu\epsilon$	试件编号	弹性极限拉应变/ $\mu\epsilon$	抗拉应/ $\mu\epsilon$
A-1	175	3482	F-3	140	560
A-2	71	3331	F-4	280	3130
B-1	200	1370	F-5	203	3000
B-2	200	2920	G-1	290	5030
B-3	200	2900	G-2	107	1770
C-1	310	1190	G-3	187	1463
C-2	270	2490	I-1	210	1350
C-3	160	1560	J-1	210	1590
D-1	750	1820	J-2	250	2110
D-2	230	1270	M-1	83	1030
D-3	180	2430	N-1	220	1230
E-1	270	1840	N-2	280	5070
E-1	190	1900	N-3	220	590
F-1	160	1800	N-4	260	2410
F-2	330	1620	N-5	270	5680

从不同超高性能混凝土产品具有拉伸应变-硬化特性试件的拉伸应变测试结果来看,超高性能混凝土的弹性极限拉应变平均值在 230 $\mu\epsilon$ 左右,而抗拉强度达到峰值时的抗拉应变最大可达到 5000 $\mu\epsilon$ 以上(如图 5.5.4 所示)。根据市场调研结果,有些抗拉性能好的超高性能混凝土产品抗拉应变甚至可以达到 8000 $\mu\epsilon$ 。因此,本标准规定轴心抗拉性能试验终止的条件之一为试件拉应变达到 10000 $\mu\epsilon$,以保证获得完整的拉伸应力-应变曲线,准确反映出超高性能混凝土的应变-硬化特性。

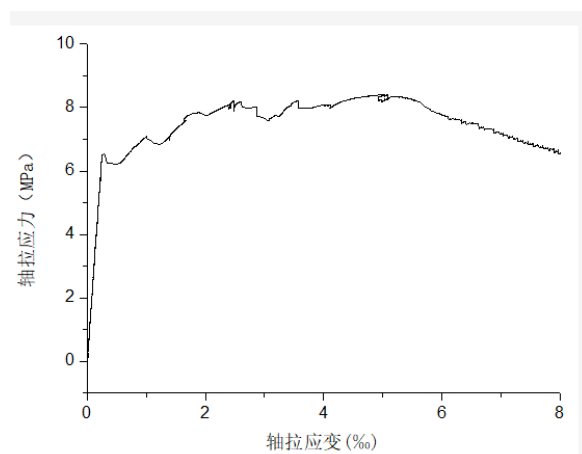


图 5.5.4-1 具有应变硬化特性超高性能混凝土试件应力—应变曲线

终止条件二：残余抗拉强度低于极限抗拉强度的 30%。

有些超高性能混凝土试件在过了弹性段开裂后，承载能力随着应变的增加而快速下降，应变软化现象明显，这种情况下当残余抗拉强度低于极限抗拉强度的 30%时，可以终止试验，而无需拉伸至 $10000\mu\epsilon$ ，以节省试验时间。

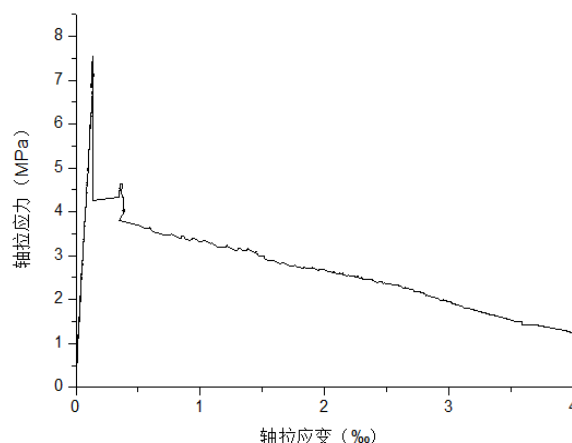


图 5.5.4 具有显著应变软化特性的超高性能混凝土试件应力—应变曲线

终止条件三：试件拉断。

试件如果脆性较大，直接拉断则可终止试验。

5.5.5 轴向拉伸试验时，超高性能混凝土试件应受力均匀，其断裂处应在变形测量标距内，方能保证测定值准确可靠。由于拉伸试验试件的对中操作要求较高，可能会出现多个试件在标距外断裂的情况。因此，本标准规定一组轴向抗拉性能试验试件个数为 6 个，有效拉伸试件数量不得少于 3 个。

关于弹性极限点的判断，从表 5.5.4 的试验结果来看，超高性能混凝土的弹性极限拉应变平均值在 $230\mu\epsilon$ 左右。当弹性极限点不明显时，建议取 $200\mu\epsilon$ 对应的拉伸应力-应变曲线上的点作为弹性极限点。

5.6 劈裂抗拉强度试验

5.6.1~5.6.5 超高性能混凝土劈裂抗拉强度试验方法参照了《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2019，该方法适用于超高性能混凝土。

5.7 粘结强度试验

5.7.1~5.7.4 超高性能混凝土用作衬砌、罩面或用于修补加固时，超高性能混凝土与基岩或旧混凝土之间的粘结强度是关系到工程质量的重要指标。

超高性能混凝土粘结强度试验方法参照了《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081，该方法适用于超高性能混凝土。

5.8 泊松比试验

5.8.1~5.8.4 超高性能混凝土泊松比试验方法参照了《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2019，该方法适用于超高性能混凝土。

虽然本标准中规定轴心抗压强度的标准试件为 100mm×100mm×300mm 的棱柱体试件，在进行泊松比试验时，轴心抗压强度试件尺寸调整为 150mm×150mm×300mm 的棱柱体试件，以跟现行国家标准保持一致。

5.9 线膨胀系数试验

5.9.1~5.9.4 超高性能混凝土线膨胀系数是重要物理性能参数，其试验方法参照了《水工混凝土试验规程》SL352-2006，该方法适用于超高性能混凝土。

5.10 耐磨性试验

5.10.1~5.10.2 超高性能混凝土耐磨性试验方法参照了《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2016 和《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》JTG E30-2005 中的磨耗量法，该方法适用于超高性能混凝土。

5.11 抗冲磨性试验

5.11.1~5.11.4 近年来超高性能混凝土以其较好的抗冲磨性及优越的综合性能在水工混凝土中得到了应用。本标准选择了《水工混凝土试验规程》SL352-2006 中的水下钢球法作为超高性能混凝土抗冲磨性的试验方法，该方法是目前在超高性能混凝土中较常用的评价抗冲磨性的方法。当需要采用其他抗冲磨性试验方法时，可参照水工混凝土行业标准中的有关方法。

5.12 硬化超高性能混凝土密度试验

5.12.1~5.12.6 硬化超高性能混凝土密度试验方法参照了《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2019, 该方法适用于超高性能混凝土。

5.13 钢纤维与超高性能混凝土基体粘结强度试验

5.13.1~5.13.4 钢纤维与超高性能混凝土基体的粘结强度是评价钢纤维对超高性能混凝土增韧作用的重要指标, 也可以作为超高性能混凝土产品研发阶段不同钢纤维比选和基体配合比优化的参考指标。

钢纤维与超高性能混凝土基体的粘结强度试验方法参照了《纤维混凝土试验方法标准》CECS13:2009 中的直接拔出法, 并根据超高性能混凝土特性对试件制作方法做了适当调整: 隔板两侧不再区分埋入端和固定端, 钢纤维穿过隔板后等长分布在隔板两侧, 两侧同时浇筑不含钢纤维的超高性能混凝土拌合物后按本标准第 3.3 节要求养护。

6 超高性能混凝土长期性能和耐久性能试验

6.1 一般规定

6.1.1 本条给出了超高性能混凝土较为关注或可能需要测试的长期性能和耐久性能的试验方法，包括自收缩、干燥收缩、受压徐变、抗冻、抗氯离子渗透性能、抗气体渗透性能。

收缩大是超高性能混凝土的先天缺陷，也是应用过程中较为关注的指标。受压徐变试验可超高性能混凝土重要性能参数徐变系数，徐变系数在瑞士标准 SIA-2052-2016 中被列为标准参数之一。超高性能混凝土的抗冻性远优于普通混凝土，抗冻等级一般达到 F400 以上，但在应用过程中也有可能需要通过试验了解超高性能混凝土的抗冻性能究竟有多好。抗氯离子渗透性能和抗气体渗透性能是评价超高性能混凝土抗渗耐久性的两个重要指标，抗氯离子渗透性能较为常用，而抗气体渗透性能具有不受超高性能混凝土中钢纤维影响的优点。法国标准《超高性能纤维增强混凝土——规范、性能、制备和一致性》NF P18-470 中同时采用氯离子渗透系数（RCM 法）和气体渗透系数对超高性能混凝土的耐久性要求进行规定。

6.1.2 现行国家标准中给出的普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法还包括动弹性模量、抗水渗透、早期抗裂、碳化、混凝土中钢筋锈蚀、抗压疲劳变形、抗硫酸盐侵蚀、碱-骨料反应。其中抗水渗透对于高强混凝土的适用性就较差，对于超高性能混凝土即使在较高的压力下，渗水高度也极低，通常不采用抗水渗透的抗渗试验方法；碳化和抗硫酸盐性能试验对于超高性能混凝土通常也无需开展，超高性能混凝土密实度极高，基本不存在碳化和硫酸盐侵蚀劣化问题，试验经验表明当混凝土强度等级达到 C80 以上时已无碳化现象，而高强高性能混凝土的抗硫酸盐性能试验往往出现强度不损失反而增加的现象。此外，超高性能混凝土的水胶比极低且掺加了大量硅灰，可不用考虑碱-骨料反应的问题。其他性能参数确实需要测试时，试验方法可按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 或其他国家现行有关标准执行。

6.2 自收缩试验

6.2.1~6.2.5 超高性能混凝土自收缩试验方法参照了《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009 中的收缩试验非接触法，该方法适用于超高性能混凝土。

采用该方法对 15 组超高性能混凝土的 3d 自收缩进行测试，结果在 700×10^{-6} ~ 1100×10^{-6} 范围内，平均值为 836×10^{-6} ，与国内外研究结果相契合。在此基础上采用该方法研究了膨胀剂掺量对超高性能混凝土自收缩的影响：不掺膨胀剂时，超高性能混凝土的自收缩达到 964×10^{-6} ，掺加 25kg/m^3 膨胀剂时可降低自收缩至 679×10^{-6} ，增加膨胀剂掺量至 50kg/m^3 时可进一步降低自收缩值 287×10^{-6} ，该试验方法可反映出膨胀剂对超高性能混凝土自收缩的改善作用。

6.3 干燥收缩试验

6.3.1~6.3.6 超高性能混凝土干燥收缩试验方法参照了《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009 中的收缩试验接触法，该方法适用于超高性能混凝土。

采用该方法对 15 组超高性能混凝土的 28d 干缩值进行测试, 结果在 $160 \times 10^{-6} \sim 340 \times 10^{-6}$ 范围内, 平均值 241×10^{-6} , 与普通混凝土和高强混凝土无显著差异。这主要是由于硬化超高性能混凝土的抗拉强度较大, 对收缩变形有较强的抵抗能力, 测试结果具有合理性。

6.4 受压徐变试验

6.2.1 超高性能混凝土受压徐变试验方法参照了《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009, 该方法适用于超高性能混凝土, 通过试验可获取超高性能混凝土的徐变系数。

6.5 抗冻试验

6.5.1~6.5.5 超高性能混凝土抗冻试验方法参照了《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009 中的快冻法, 该方法适用于超高性能混凝土。

6.6 抗氯离子渗透性能试验

6.6.1 超高性能混凝土抗氯离子渗透性能试验方法参照了《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009 中的 RCM 法, 该方法适用于不含钢纤维的超高性能混凝土基体。

RCM 法通过测定氯离子在混凝土中非稳态迁移的迁移系数来确定混凝土的抗氯离子渗透性能。通常采用直径 (100 ± 1) mm, 厚度为 (50 ± 2) mm 的圆柱体试件。试件两侧与阴极溶液 (10% 的 NaCl 溶液) 和阳极溶液 (0.3mol/L NaOH 溶液) 接触, 在一定电压和一定通电时间后测试氯离子在混凝土中的渗透深度, 并通过式 6.6.1-1 计算氯离子渗透系数:

$$D_{RCM} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{X_d - \alpha \sqrt{X_d}}{t}$$

$$E = \frac{U-2}{L} \quad (6.6.1-1)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

式中: D_{RCM} ——非稳态迁移系数, m^2/s ;

z ——离子化合价的绝对值, $z=1$;

F ——法拉第常数, $F=9.648 \times 10^4 J/(V \cdot mol)$;

U ——所用电压的绝对值, V;

R ——气体常数, $R=8.314 J/(K \cdot mol)$;

T ——阳极溶液的初始温度和结束温度的平均值, K;

L ——试件厚度, m;

X_d ——氯离子渗透深度的平均值, m;

t ——试验持续时间, s;

erf^{-1} ——误差函数的逆函数;

c_d ——氯离子颜色改变的浓度, 普通混凝土 $c_d=0.07 \text{ mol/L}$

c_0 ——阴极溶液中氯离子浓度， $c_0=2\text{mol/L}$ ；

由于 $\text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2 \times 0.07}{2}\right) = 1.28$ ，可得以下简化式。

$$D_{RCM} = \frac{0.0239 \times (273 + T)L}{(U - 2)t} \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U - 2}} \right) \quad (6.6.1-2)$$

关于 RCM 法是否适用于超高性能混凝土，之前是一直存在争议的，这里首先分析了 RCM 法的测试精度。

按照 GB/T 50082《混凝土长期性能和力学性能试验方法标准》中的方法，在测试超高性能混凝土时通常采用 60V 电压、通电时间为 96 小时，氯离子渗透深度值精确到 0.1mm。则对于渗透深度为 5mm、5.1mm、5.2mm、5.3mm 的混凝土试块，氯离子扩散系数计算结果表 6.6.1-1 所示：

表 6.6.1-1 不同氯离子渗透深度混凝土试块氯离子扩散系数计算结果

U	T	L	X_d	t	D_{RCM} ($10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$)
60	21.3	50	5.0	96	0.262
60	21.3	50	5.1	96	0.268
60	21.3	50	5.2	96	0.274
60	21.3	50	5.3	96	0.280

从表 6.6.1-1 可以看出：

混凝土氯离子渗透厚度每变动 0.1mm， D_{RCM} 的变化幅度为 $0.006 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ ，即该方法的测试精度达到了 $0.6 \times 10^{-14}\text{m}^2/\text{s}$ ，可近似认为精确到 $0.01 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 。

参考法国标准《超高性能纤维增强混凝土——规范、性能、制备和一致性》NF P18-470 的规定（如表 6.6.1-2 所示），抗渗性较好的超高性能混凝土氯离子渗透系数在 $0.1 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 左右。表明 RCM 法的测试精度比超高性能混凝土实际氯离子渗透系数低一个数量级，符合测试要求。

表 6.6.1-2 法国标准中关于 UHPFRC 的耐久性要求

耐久性指标	基本要求	提升的要求
90d 氯离子扩散系数 ($10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$)	≤ 0.5	≤ 0.1 (0.1~0.2)

6.6.6 按照国标中电压 60V、通电时间为 96 小时的试验参数对 10 种超高性能混凝土氯离子渗透系数测试，测试结果表明超高性能混凝土的氯离子扩散系数在 $0.1 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s} \sim 0.7 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 范围内。当氯离子扩散系数小于 $0.2 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 时，氯离子渗透深度偏小，在 4mm 以下（如表 6.6.1-2 所示），会增加渗透深度度量时候的误差，从而影响计算结果。需要通过调整试验参数获得更大的渗透深度。

表 6.6.1-2 不同氯离子扩散系数混凝土试块氯离子渗透深度反推计算结果

U/V	T/°C	L/mm	X_d/mm	t/h	$D_{RCM}/10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$
60	21.3	50	17.4	96	1.00
60	21.3	50	9.1	96	0.50
60	21.3	50	5.7	96	0.30
60	21.3	50	3.9	96	0.20
60	21.3	50	2.2	96	0.10

60	21.3	50	1.2	96	0.05
----	------	----	-----	----	------

混凝土材料的氯离子扩散系数 D_{RCM} 是材料的固有参数，在 D_{RCM} 不变的情况下，从式 6.6.1-2 可以看出，影响测试精度的参数 X_d 取决于施加的电压、试验持续时间以及试件厚度。渗透深度与电压、通电时间正相关，与试块厚度负相关。因此对于同一种材料，施加更高的电压、持续更长的试验时间以及减小试件厚度都可以得到更大的渗透深度。表 6.6.1-2 给出了调整试验参数对渗透深度和氯离子扩散系数测试结果的影响。

表 6.6.1-2 调整试验参数对测试结果的影响

产品类型	U/V	T/°C	L/mm	t/h	X_d /mm	$D_{RCM}/10^{-12}m^2/s$
产品 a	120	23.1	30.0	168	6.4	0.08
	60	23.1	30.9	96	2.1	0.07
产品 b	120	22.1	51.5	168	5.5	0.09
	60	22.1	31.2	96	3.3	0.11
产品 c	120	22.0	31.7	168	17.0	0.18
	60	22.0	50.6	96	4.2	0.21
产品 d	60	22.1	31.3	168	18.2	0.38
	60	22.1	51.5	48	3.2	0.33
产品 e	90	22.0	31.6	168	11.5	0.16
	60	22.0	51.5	96	4.2	0.22

从表 6.6.1-2 可以看出：

对通电电压 U 、持续时间 t 、试件厚度 L 中的一个或多个试验参数进行优化调整后，实测氯离子渗透深度增加，可有效减小测量误差，计算得到的氯离子扩散系数与调整参数前基本一致，偏差在误差范围内。

综合各方面的因素考虑，本标准对初始电流 $I_0 < 2.5mA$ 的情况，建议将施加的电压调整至 90V，试验持续时间增加到 168h，试件厚度保持不变。

6.6.8 超高性能混凝土的氯离子渗透系数较低，三个结果中的最大值或最小值很容易很容易与中间值偏差超高中间值的 15%，这里根据氯离子渗透系数平均值的范围，对最终测定值的确定方法进行了调整。

6.7 抗气体渗透性能试验

6.7.1 超高性能混凝土抗气体渗透性能试验方法参照了法国标准《硬化混凝土气体渗透性试验》XP P 18-463:2011，该方法属于混凝土气体渗透性能测试方法中的压差变化法。气体渗透法测科学、简单、时间短，以气体为渗透介质，气体分子能够更加容易穿过超高性能混凝土孔结构，且不受钢纤维影响，更加适用于表征超高性能混凝土的抗渗性能。

法国超高性能混凝土标准《超高性能纤维增强混凝土——规范、性能、制备和一致性》NF P18-470 中采用该方法对超高性能混凝土的气体渗透率进行了规定，如表 6.7.1 所示。

该方法总体上适用于超高性能混凝土，但由于超高性能混凝土较为致密，需对部分参数进行调整。

表 6.7.1 法国标准中关于 UHPFRC 的耐久性要求

耐久性指标	基本要求	提升的要求
90d 气体渗透系数/ 10^{-19}m^2	≤ 9.0	≤ 1.0

6.7.5 超高性能混凝土由于水胶比大幅降低,加上硅灰等超细掺合料的使用,其密实性极高,现有的试验参数下,透过超高性能混凝土的气体流量极小,检测效率降低,甚至超出皂膜流量计测试量程。因此将该试验方法用于超高性能混凝土时应对试验参数进行调整,主要是将进气嘴的压力调大,初始值由 0.15MPa 增加到 0.30MPa,后续压力由 0.20MPa、0.30MPa、0.40MPa 分别增加到 0.40MPa、0.60MPa、0.80MPa。同时由于气体流量的减小,从进气嘴一个压力调整到另一个压力时所需的时间也增大,皂膜流量计测试的时间也边长。因此规定每隔 1h 使用皂膜流量计测量一次渗透单元出气嘴的气体流量,待前后两次测量流量误差小于 5%时记录此时的气体流量。