

ICS 91.100.50

Q 23

团 体 标 准

T/CECS ×××××—20××

铁路用高性能喷射混凝土

（铁路隧道工程用高性能喷射混凝土）

High performance shotcrete for railway tunnel

（征求意见稿）

20××-××-××发布

20××-××-××实施

中国工程建设标准化协会 发布

目 次

前 言.....	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 基本规定	3
5 技术要求	4
6 试验方法	8
7 配合比设计要求	9
8 质量控制	12
附录 A 铁路隧道工程用高性能喷射混凝土试件成型方法	14
附录 B 铁路隧道工程用高性能喷射混凝土耐热指数测试方法	15
附录 C 铁路隧道工程用高性能喷射混凝土导热系数测试方法	16
附录 D 铁路隧道工程用高性能喷射混凝土标准喷射回弹率测试方法	20

前 言

《铁路用高性能喷射混凝土》（以下简称“文件”）是按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》和 GB/T 20000.10—2014《标准编写规则 第10部分：产品标准》给出的规则起草。

本文件按中国工程建设标准化协会《关于印发〈2022年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2022〕13号）的要求制定。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工程建设标准化协会提出。

本文件由中国工程建设标准化协会铁道分会归口管理。

本文件负责起草单位：中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所。

本文件参加起草单位：北京交通大学、西南交通大学、中铁第一勘察设计院集团有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司、川藏铁路有限公司、川藏铁路技术创新中心有限公司、中铁二局集团有限公司、中交第二公路工程局有限公司、江苏苏博特新材料股份有限公司、中国建筑材料科学研究总院有限公司、中国铁路经济规划研究院有限公司、中铁西南科学研究院有限公司、铁正检测科技有限公司。

本文件主要起草人：谢永江、程冠之、安明喆、赵勇、谭盐宾、关文勋、刘大刚、王振地、王伟、王家赫、李 康、李大林、袁政成、林 晖、何财基、申玉生、苗国林、李享涛、韩 松、王 月、郑朝保、王凯林、李书明、葛 昕、李 宁、吴 林、方 兴、王 旭、王帅帅、李治庆、孙昌明、谢文强。

本文件主要审查人：××× ××× ××× ××× ××× ××× ×××

铁路用高性能喷射混凝土

(铁路隧道工程用高性能喷射混凝土)

1 范围

本文件规定了铁路隧道工程用高性能喷射混凝土的术语和定义、基本规定、技术要求、试验方法、配合比设计要求及质量控制。

本文件适用于高速铁路、普速铁路和重载铁路的隧道、涵洞等结构用的喷射混凝土。

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 175 通用硅酸盐水泥

GB 8076 混凝土外加剂

GB 50164 混凝土质量控制标准

GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰

GB/T 17431.1 轻集料及其试验方法 第一部分 轻集料

GB/T 23265 水泥混凝土和砂浆用短切玄武岩纤维

GB/T 35159 喷射混凝土用速凝剂

GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准

GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准

TB 10005 铁路混凝土结构耐久性设计规范

TB/T 3275 铁路混凝土

JGJ 55 普通混凝土配合比设计规程

JGJ/T 221 纤维混凝土应用技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.0.1 高性能喷射混凝土 high-performance shotcrete

以铁路工程设计、施工和使用对喷射混凝土性能的特定要求为总体目标，选用优质常规原材料，合理掺用外加剂和矿物掺合料，采用较低水胶比和胶凝材料用量，对配合比进行优化，通过喷射施工制成的具有规定性能的混凝土。

3.0.2 喷射回弹率 rebound ratio

喷射时，从喷嘴喷出后未粘结在受喷面上的溅落喷射混凝土拌合物与总喷出喷射混凝土拌合物的质量百分比。

3.0.3 标准喷射回弹率 standard rebound ratio

在标准的喷射设备、工艺参数及受喷面条件下，测试得到的喷射回弹率，用于评估喷射混凝土的喷射性能。

3.0.4 耐热指数 thermal endurance index

混凝土在高温条件下养护与标准条件下养护的长龄期抗压强度之比，用于评估喷射混凝土在高温环境下的强度稳定性和服役可靠性。

3.0.5 倒坍时间 evacuated time of inverted slump cone

倒置坍落度筒后，桶中混凝土拌合物的排空时间，用于评估喷射混凝土的工作性能。

3.0.6 高地温工况 high geothermal conditions

隧道岩壁温度或岩体流出水温度不低于 50℃ 的施工工况。

3.0.7 富水工况 water-rich conditions

岩石含水层的水或地下水通过松散岩的孔隙或基岩裂隙渗入隧道，造成出水量不低于 25L/(min·10m) 的施工工况。

3.0.8 软岩大变形工况 soft-rock large deformation conditions

高地应力和富水条件下，隧道产生的具有累进性和明显时间效应的塑性变形破坏，造成隧道内围岩强度应力比低于 0.5 的施工工况。

3.0.9 岩爆工况 rock burst conditions

高地应力条件下，地下工程开挖过程中，硬脆性围岩因开发卸荷导致洞壁应力分异，储存于岩体中的弹性应变能突然释放，而产生的岩石爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷等现象，造成隧道内岩石强度应

力比低于 7 的施工工况。

3.0.10 低温工况 low-temperature conditions

隧道所处地区气候环境的最冷月平均气温不高于 2.5℃ 的施工工况。

4 基本规定

4.1 设计使用年限

铁路隧道工程中高性能喷射混凝土结构的设计使用年限应符合现行行业标准《铁路混凝土结构耐久性设计规范》TB 10005 的规定。

4.2 工况类别和分级

4.2.1 高性能喷射混凝土的使用环境可根据使用工况分为一般工况和特殊工况，其中特殊工况可分为高地温工况、富水工况、软岩大变形工况、高地应力工况和低温工况等 5 类，并应同时考虑现行行业标准《铁路混凝土结构耐久性设计规范》TB 10005 中的环境作用等级。

4.2.2 高地温工况的作用等级应按表 4.2.1 确定。

表 4.2.1 高地温工况分级表

高地温工况等级	隧道岩壁温度或岩体流出水温度(℃)
I 级	$\geq 50, < 70$
II 级	$\geq 70, < 90$
III 级	≥ 90

4.2.3 富水工况的作用等级应按照表 4.2.2 确定。

表 4.2.2 地下水富水工况分级表

富水工况等级	地下水出水状态	渗水量[L/(min·10m)]
0 级	潮湿或点滴状出水	< 25
1 级	淋雨状或线流状出水	$\geq 25, < 125$
2 级	涌流状出水	≥ 125

4.2.4 软岩大变形工况的作用等级应按表 4.2.3 确定。

表 4.2.3 软岩大变形工况分级表

软岩大变形等级	围岩强度应力比 ($R_b/\sigma_{\max}$)	围岩变形特征
I 级	$\geq 0.25, < 0.5$	开挖后围岩位移较大, 持续时间较长; 若采用一般支护开裂或破损会较严重, 相对变形量 3%~5%, 围岩自稳时间短, 以塑流型、弯曲型、滑移型变形模式为主, 兼有剪切型变形
II 级	$\geq 0.15, < 0.25$	开挖后围岩位移大, 持续时间长; 若采用一般支护开裂或破损严重, 相对变形量 5%~8%, 洞底有隆起现象, 围岩自稳时间很短, 以塑流型、弯曲型变形模式为主
III 级	< 0.15	开挖后围岩位移很大, 持续时间很长; 若采用一般支护开裂或破损很严重, 相对变形量大于 8%, 洞底有明显隆起现象, 流变特征明显, 围岩自稳时间很短, 以塑流型为主

注: 1 R_b 为围岩强度 (MPa), $\sigma_{\max}$ 为最大地应力 (MPa);

2 相对变形量为变形量与隧道当量半径之比。

4.2.5 岩爆工况的作用等级应按表 4.2.4 确定。

表 4.2.4 岩爆工况分级表

岩爆等级	岩爆程度	岩石强度应力比 ($R_c/\sigma_{\max}$)	分级描述
I 级	轻微	$\geq 4, < 7$	围岩表层有爆裂、剥离现象, 内部有噼啪、撕裂声, 人耳偶然可听到, 无弹射; 主要表现为洞顶劈裂~松脱破坏和侧壁的劈裂~松脱、隆起等; 岩爆零星间隔发生, 影响深度小于 0.5m; 对施工影响小
II 级	中等	$\geq 2, < 4$	围岩爆裂、剥离现象较严重, 有少量弹射, 破坏范围明显; 有类似雷管爆破的清脆爆裂声, 人耳常可听到围岩内的岩石撕裂声; 有一定持续时间, 影响深度 0.5~1m; 对施工有一定影响
III 级	强烈	$\geq 1, < 2$	围岩大片爆裂脱离, 出现强烈弹射, 发生岩块的抛射及岩粉喷射现象; 有似爆破的爆裂声, 声响强烈; 持续时间长, 并向围岩深部发展, 破坏范围和块度大, 影响深度 1m~3m; 对施工影响大
IV 级	极强	< 1	围岩大片严重爆裂, 大块岩片出现剧烈弹射, 振动强烈, 有似炮弹, 闷雷声, 声响剧烈; 迅速向围岩深部发展, 破坏范围和块度大, 影响深度大于 3m; 严重影响工程施工

注: 1 岩爆判别适用于完整~较完整的中硬、坚硬岩体, 且无地下水活动的地段;

2 R_c 为岩石饱和单轴抗压强度 (MPa), $\sigma_{\max}$ 为最大地应力 (MPa)。

4.2.6 低温工况的作用等级应按照表 4.2.5 确定。

表 4.2.5 低温工况分级表

低温工况等级	最冷月平均气温 (°C)	环境描述
I 级	$\geq -3, < -2.5$	微冻地区
II 级	$\geq -8, < -3$	寒冷地区
III 级	< -8	严寒地区

5 技术要求

5.1 原材料

5.1.1 水泥

5.1.1.1 水泥应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，并应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的有关规定，水泥的比表面积、碱含量、游离氧化钙含量和熟料中的铝酸三钙含量尚应符合现行行业标准《铁路混凝土》TB/T 3275 的规定。

5.1.1.2 水泥强度等级不应低于 42.5 级。

5.1.2 矿物掺合料

5.1.2.1 配制高性能喷射混凝土的矿物掺合料应选用能改善混凝土性能且品质稳定的产品，可采用粉煤灰、矿渣粉、硅灰、石灰石粉、钢渣粉、粒化电炉磷渣粉、天然火山灰质材料、复合掺合料等矿物掺合料。

5.1.2.2 粉煤灰应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 中关于 F 类 II 级及以上产品的规定。

5.1.2.3 矿渣粉、硅灰和石灰石粉性能应符合现行行业标准《铁路混凝土》TB/T 3275 的规定，其中矿渣粉的等级不应低于 S95。

5.1.2.4 当采用其他矿物掺合料时，材料性能应符合相应国家现行标准的有关规定，且应满足本文件关于高性能喷射混凝土的其他性能要求。

5.1.3 骨料

5.1.3.1 细骨料

普通细骨料宜选用 II 区中砂，细度模数宜大于 2.5。宜选用天然河砂或机制砂，不得使用海砂。细骨料的性能和颗粒级配应符合现行行业标准《铁路混凝土》TB/T 3275 的有关规定。

对于有特殊工况要求的高性能喷射混凝土可选用轻细骨料，应符合现行国家标准《轻集料及其试验方法 第一部分 轻集料》GB/T 17431.1 的有关规定。

5.1.3.2 粗骨料

普通粗骨料宜选用满足现行行业标准《铁路混凝土》TB/T 3275 中 5~10mm 公称粒级要求的碎石骨料。不应使用具有碱-碳酸盐反应活性的粗骨料，其岩石柱膨胀率不应小于 0.10%。吸水率不应大于 1%。

对于有特殊工况要求的高性能喷射混凝土可选用轻粗骨料，应符合现行国家标准《轻集料及其试验方法 第一部分 轻集料》GB/T 17431.1 的有关规定。

5.1.4 外加剂

5.1.4.1 减水剂

高性能喷射混凝土用减水剂的性能应符合现行行业标准《铁路混凝土》TB/T 3275 中高性能减水剂的有关规定。

5.1.4.2 速凝剂

高性能喷射混凝土用速凝剂应符合现行国家标准《喷射混凝土用速凝剂》GB/T 35159 中无碱速凝剂的有关规定。

5.1.4.3 早强剂

高性能喷射混凝土用早强剂应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 中早强剂的有关规定。

5.1.4.4 增粘剂

高性能喷射混凝土用增粘剂的性能应符合现行行业标准《铁路混凝土》TB/T 3275 中增粘剂的有关规定。

5.1.5 其他

5.1.5.1 水

高性能喷射混凝土拌合用水和养护用水应符合现行行业标准《铁路混凝土》TB/T 3275 的有关规定。

5.1.5.2 纤维

高性能喷射混凝土用纤维可选用钢纤维、合成纤维或玄武岩纤维，相关性能应符合下列规定：

- 1 钢纤维的抗拉强度不应低于 600N/mm^2 ，直径宜为 $0.30\text{mm}\sim 0.80\text{mm}$ ，长度宜为 $20\text{mm}\sim 35\text{mm}$ ，且不得大于拌合物输送管内径的 0.7 倍，长径比宜为 40~80；不得有明显的锈蚀和油渍及其他妨碍钢纤维与混凝土粘结的杂质，钢纤维内的粘连片、钢屑及杂质的总重不应超过钢纤维重量的 1%，不应混有妨碍水泥硬化的化学物质；
- 2 合成纤维的抗拉强度不应低于 270N/mm^2 ，直径宜为 $0.01\text{mm}\sim 0.1\text{mm}$ ，长度宜为 $12\text{mm}\sim 25\text{mm}$ ；应具有良好的耐酸、碱性和化学稳定性，并具有良好的分散性，不结团，不应混有妨碍纤维与混凝土黏结的杂质和妨碍水泥硬化的化学物质；
- 3 玄武岩纤维的性能应符合现行行业标准《水泥混凝土和砂浆用短切玄武岩纤维》GB/T 23265 的规定；
- 4 纤维的其他性能应符合现行行业标准《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 的规定。

5.2 拌合物工作性能

高性能喷射混凝土拌合物应具有良好的黏聚性，并应满足工程设计与施工要求。高性能喷射混凝土拌合物工作性能应符合表 5.2 的规定。

表 5.2 拌合物工作性能要求

序号	项目	性能要求
1	坍落度	180mm~220mm
2	1h 坍落度损失	≤30mm
3	扩展度	400mm~500mm
4	含气量	4%~7%
5	1h 含气量损失	-1.5%~ + 1.5%
6	倒坍时间	6s~15s
7	拌合物出机温度	≥10℃

5.3 力学性能

不同工况条件下，高性能喷射混凝土的力学性能应符合表 5.3 的规定。

表 5.3 高性能喷射混凝土的力学性能最低限值要求

		一般 情况	高地温工况			富水工况		软岩大变形工 况			岩爆工况				低温工况		
			I 级	II 级	III 级	1 级	2 级	I 级	II 级	III 级	I 级	II 级	III 级	IV 级	I 级	II 级	III 级
抗压 强度 (MPa)	8h	5	5	5	5	5	5	8	10	12	8	10	12	15	10	12	15
	1d	15	15	15	15	15	15	18	20	25	18	20	25	25	20	25	25
	28d	30	30	35	35	30	30	30	35	35	30	35	35	40	30	35	35
粘结 强度 (MPa)	1d	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.8	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4	0.6
	28d	1.0	1.0	1.2	1.4	1.4	1.6	1.0	1.2	1.2	1.0	1.0	1.2	1.2	1.0	1.0	1.2
28d 抗折强度 (MPa)		/	/	/	/	/	/	3.5	3.8	4.0	3.5	3.8	4.0	4.3	/	/	/
28d 劈裂抗拉强度 (MPa)		/	/	/	/	/	/	3	3.5	4	3	3.5	3.8	4.0	/	/	/
弯曲 韧性	弯曲韧性指数 I20	/	/	/	/	/	/	8	12	15	6	8	12	15	/	/	/
	能量吸收等级	E500	E500			E500		E1000			E1000				E500		

5.4 耐久性能

高性能喷射混凝土的耐久性能应符合表 5.4 的规定。

表 5.4 高性能喷射混凝土的耐久性能限值要求

性能 指标	工况 类别	一般 情况	高地温工况			富水工况		软岩大变形工况			岩爆工况				低温工况		
			I 级	II 级	III 级	1 级	2 级	I 级	II 级	III 级	I 级	II 级	III 级	IV 级	I 级	II 级	III 级
抗冻性		≥F300	≥F300	≥F300	≥F350	≥F300	≥F350	≥F300	≥F300	≥F350	≥F300	≥F300	≥F300	≥F350	≥F350	≥F350	≥F400
抗渗等级		≥P10	≥P10	≥ P10	≥ P10	≥ P12	≥ P14	≥P10	≥P10	≥ P10	≥P10	≥ P10	≥ P10	≥ P10	≥P10	≥ P10	≥ P10
抗硫酸盐 结晶破坏 等级		≥ KS90	≥ KS90	≥ KS120	≥ KS150	≥ KS120	≥ KS150	≥ KS90	≥ KS90	≥ KS120	≥ KS90	≥ KS120	≥ KS120	≥ KS150	≥ KS90	≥ KS120	≥ KS150
耐热指数		/	≥0.9	≥0.95	≥1.0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
电通量		≤1200	≤1200	≤ 1200	≤1200	≤1000	≤ 800	≤1200	≤1200	≤1200	≤1200	≤1200	≤1200	≤ 1200	≤1200	≤1200	≤1200

5.5 其他性能

不同工况条件下，高性能喷射混凝土的干燥收缩率、导热系数、标准喷射回弹率等性能应符合表 5.5 的规定。

表 5.5 高性能喷射混凝土在不同工况下的其他性能要求

工况类别	一般 情况	高地温工况			富水工况		软岩大变形工况			岩爆工况				低温工况		
		I 级	II 级	III 级	1 级	2 级	I 级	II 级	III 级	I 级	II 级	III 级	IV 级	I 级	II 级	III 级
干燥收缩率	≤300	≤300	≤250	≤200	≤250	≤200	≤250	≤250	≤200	≤350	≤300	≤250	≤200	≤300	≤250	≤200
导热系数	/	≤1.5	≤1.5	≤1.5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
标准喷射回弹率	≤10	≤ 10	≤10	≤10	≤ 7	≤ 7	≤10	≤10	≤ 10	≤ 10	≤10	≤ 10	≤ 10	≤10	≤ 10	≤10

6 试验方法

6.1 拌合物的工作性能

高性能喷射混凝土拌合物的坍落度、1h 坍落度损失、扩展度、含气量、1h 含气量损失、倒坍时间、拌合物出机温度等工作性能应按现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 进行试验。

6.2 力学性能

6.2.1 高性能喷射混凝土力学性能试件的制作应采用大板喷射制样，试件制作方法应按本文件附录 A 执行。

6.2.2 高性能喷射混凝土的抗压强度、抗折强度、粘结强度、能量吸收等级和劈裂抗拉抗拉强度试验应按现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JGJ/T 372 与国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 执行。

6.3 耐久性能

6.3.1 抗冻试验、抗水渗透试验、抗硫酸盐侵蚀试验和电通量试验应按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 执行。

6.3.2 耐热指数试验应按本文件附录 B 执行。

6.4 其他性能

6.4.1 高性能喷射混凝土的干燥收缩率试验应按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 执行。

6.4.2 高性能喷射混凝土的导热系数和标准喷射回弹率试验应按本文件附录 C 和附录 D 执行。

7 配合比设计要求

7.1 一般规定

7.1.1 高性能喷射混凝土的配合比设计应根据现场原材料条件、设计使用年限、工程特点、环境作用等级和施工工艺因素，在综合考虑本文件第 5 章中关于混凝土拌合物工作性能、力学性能、耐久性能和其它性能要求的基础上，计算初始配合比。设计配合比应在初始配合比的基础上经过试验室试配、试喷、调整后得到。

7.1.2 高性能喷射混凝土的设计强度等级应不低于 C30，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。最小粘结强度应符合本文件第 5.3 条的规定。

7.1.3 高地温工况宜采用高强轻骨料配制隔热耐热型喷射混凝土；富水工况宜采用硅灰、增粘剂等配制抗渗型喷射混凝土；软岩大变形工况宜采用早强复合掺合料配制早高强喷射混凝土；岩爆工况宜采用纤维配制高韧性喷射混凝土；低温工况宜采用早强剂配制低温早强喷射混凝土。

7.1.4 当同时处于多种工况条件时，应综合采用相关功能材料及配制技术制备能同时满足各工况要求的高性能喷射混凝土。

7.2 配合比计算

7.2.1 高性能喷射混凝土应先进行试配，并根据试配结果进行试喷，试喷强度应满足其配制强度的要求。

高性能喷射混凝土的配制强度应按下列式计算：

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (7.1)$$

式中： $f_{cu,0}$ — 混凝土配制强度值（MPa）；

$f_{cu,k}$ — 混凝土立方体抗压强度标准值，取高性能喷射混凝土的设计强度等级值（MPa）；

σ — 混凝土强度标准差（MPa），可按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 确定。

7.2.2 喷射混凝土的水泥用量不应小于 300kg/m³，不同强度等级的高性能喷射混凝土的胶凝材料用量应符合表 7.2.1 的规定。

表 7.2.1 喷射混凝土的胶凝材料最大用量

混凝土强度等级	C30	C35	C40 及以上
胶凝材料最大用量 (kg/m ³)	480	500	520

7.2.3 不同工况下高性能喷射混凝土的矿物掺合料掺量应符合表 7.2.2 的规定。

表 7.2.2 喷射混凝土的矿物掺合料最大掺量，%

矿物掺合料种类	工况种类					
	一般情况	高地温工况	富水工况	软岩大变形工况	岩爆工况	低温工况
粉煤灰	20	20	20	15	15	20
粒化高炉矿渣粉	20	20	20	15	15	20
硅灰	10	15	10	10	10	10
复掺	40	40	40	40	40	40

注：在混合使用两种或两种以上矿物掺合料时，矿物掺合料的总掺量应符合表中复掺的规定，且各组分的掺量不宜超过单掺时的最大掺量。

7.2.4 高性能喷射混凝土试配的水胶比应考虑喷射工艺、速凝剂对强度的影响。无配制经验时，试配的水胶比应符合下列规定：

1 水胶比可按下列式计算：

$$W/B = \frac{\alpha_a f_b}{f_{cu,0} k_1 k_2 + \alpha_a \alpha_b f_b} \quad (7.2)$$

式中： W/B — 混凝土水胶比；

$\alpha_a \alpha_b$ — 回归系数，可按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55 确定；

k_1 — 混凝土密实度系数；

k_2 — 速凝剂强度影响系数；

f_b — 胶凝材料 28d 胶砂抗压强度（MPa），可按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 确定。

- 2 高性能喷射混凝土的水胶比不宜大于 0.45，并应满足结构暴露环境类别的水胶比限值要求。
- 3 高性能喷射混凝土密实度系数 k_1 可取 1.05~1.25。
- 4 高性能喷射混凝土速凝剂强度影响系数 k_2 可取 1.00~1.10。

7.2.5 高性能喷射混凝土设计应选择适宜的高性能减水剂。

7.2.6 高性能喷射混凝土砂率宜为 45%~60%。

7.2.7 钢纤维喷射混凝土中钢纤维掺量宜根据弯曲韧性指标确定，钢纤维的最小掺量可根据钢纤维的长径比按表 7.2.3 选取，并应经试配确定。

表 7.2.3 喷射钢纤维混凝土中钢纤维的最小掺量

钢纤维长径比	40	45	50	55	60	65	70	75	80
最小含量(kg/m³)	65	50	40	35	30	25	25	25	25
最小体积率（%）	0.83	0.64	0.51	0.45	0.38	0.32	0.25	0.25	0.25

7.2.8 高性能喷射混凝土的配合比计算除应符合本文件外，尚应符合现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55 的规定。

7.3 配合比试配、试喷、调整与确定

7.3.1 高性能喷射混凝土的试配应采用强制式搅拌机搅拌，宜采用与施工相同的搅拌方法。

7.3.2 试拌应在计算初始配合比的基础上进行，试拌的最小搅拌量每盘应不小于 20L。计算水胶比宜保持不变，并应通过调整配合比其他参数使混凝土拌合物性能符合设计和施工要求，然后修正计算配合比，提出试配配合比。

7.3.3 应采用 3 个不同的配合比，一个为本文件 7.3.2 条确定的试配水胶比，另外两个配合比的水胶比宜较试配配合比分别增加和减少 1%，3 个配合比均应满足喷射混凝土的施工要求。

7.3.4 应分别采用 3 个配合比进行试喷，不能满足施工要求的配合比应进行配合比优化，其水胶比应保持不变。喷射混凝土试喷的最小搅拌量每盘不应小于 300L。

7.3.5 对满足喷射施工要求的 3 个试配配合比应进行大板喷射取样和试件加工。

7.3.6 在配合比试喷的基础上，喷射混凝土配合比应按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定进行配合比调整和校正。

7.3.7 校正后的配合比在满足施工要求和试喷强度的基础上，对有耐久性设计要求的混凝土应进行相关耐

久性试验验证，符合要求的，可确定为设计配合比。

7.3.8 高性能喷射混凝土设计配合比确定后，应进行生产适应性验证。

8 质量控制

8.1 一般规定

8.1.1 高性能喷射混凝土的施工应配置专业技术人员和仪器设备。施工作业应由熟悉喷射设备性能的个人或其指导下进行。

8.1.2 高性能喷射混凝土原材料进场时，应按规定批次查验型式检验报告、出厂检验报告以及合格证等质量证明文件，外加剂产品和纤维产品还应提供产品说明书。材料进场后，应进行进场复检，合格后方可使用。检验项目与批次应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。

8.1.3 混凝土施工前，应根据粗、细骨料的实际含水率调整拌合物设计配合比的用水量，确定混凝土的施工配合比。

8.2 原材料的储存和运输

8.2.1 高性能喷射混凝土原材料的储存应满足如下要求：

- 1 不同原材料应有固定的储存地点并有明显的企业标识，分种类、分批存储，不同材料储存时应有堆放分界标识，不得混杂堆放，并应防止受潮和污染。
- 2 外加剂应储存于室内环境中，冬期应采取保温措施，避免受冻及低温结晶。液体外加剂存储罐宜配置自循环或搅拌装置。

8.2.2 喷射混凝土宜随拌随用。混凝土拌合物在运输、存放过程中不应淋雨、浸水及混入杂物。拌制完成后至喷射的最长时间间隔应根据环境温度确定：环境温度为 5℃~30℃ 时，不应超过 120min；环境温度为 30℃~35℃ 时，不应大于 60min；超过此时限时，应对拌合物性能进行验证，验证合格后方可使用。

8.2.3 运输过程中，应控制混凝土拌合物不离析、不分层，在寒冷气候条件下，应采取保温隔热措施保证混凝土质量。

8.3 质量控制要点

8.3.1 高性能喷射混凝土的质量检验应符合表 8.3.1 的规定，性能应符合本文件的规定并满足设计要求。

表 8.3.1 高性能喷射混凝土性能的质量检验

检验项	拌合物性能	抗压强度	早期强度	粘结强度	抗拉强度	抗弯强度	弯曲韧性	抗渗性	抗冻性	抗化学侵蚀
要求	●	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲

注●必检；▲可选。

8.3.2 高性能喷射混凝土施工过程中应采取有效措施对下列各项进行控制：

- 1 强度；
- 2 厚度；
- 3 密实度；
- 4 脱空或空洞；
- 5 平整度；
- 6 开裂；
- 7 回弹率；
- 8 掉块；
- 9 粘结强度；
- 10 可溶性碱含量。

附录 A 铁路隧道工程用高性能喷射混凝土试件成型方法

A.0.1 试件成型应使用下列仪器设备：

- 1 搅拌机
- 2 喷射设备
- 3 模具
- 4 切割设备或水钻
- 5 抹刀，铁铲及其他辅助工具

A.0.2 高性能喷射混凝土性能试件，除抗渗试件可直接喷模成型外，其余用于试验的试件应采用在施工现场喷射的混凝土大板上切割或钻芯制取。模具的最小尺寸不应小于 $450\text{mm} \times 350\text{mm} \times 120\text{mm}$ ，模具一侧边为敞开式。自制模具时，钢模具的厚度不宜小于 4mm ，胶合板模具的厚度不宜小于 18mm 。

A.0.3 高性能喷射混凝土试件制作应符合以下步骤：

- 1 将模具以水平 $60^\circ \sim 80^\circ$ 夹角置于墙角或固定于墙面。
- 2 喷嘴与模具面的距离宜控制在 $1.0\text{m} \sim 2.0\text{m}$ 。先在模具外的边墙上喷射，待喷射稳定后，将喷头移至模具位置，由下至上逐层将模具喷满混凝土。模具上方或周边需要进行喷射时，应进行遮盖，防止回弹物溅落在湿喷混凝土大板上。
3. 喷射完毕后，应在混凝土终凝前采用抹刀、铁铲等工具进行压实与抹平。
4. 混凝土早龄期性能测试时，宜采用钻芯法进行取样，试件宜在龄期前 2h 加工。
5. 除早龄期试件外，其余试件养护 1d 后进行脱模，将混凝土大板移至标准养护室，在运输过程中妥善保护试件，标准养护 7d 后，根据需要的试件尺寸进行切割或钻芯。制备混凝土试件时应避开大板的不密实区域。
- 6 加工后的试件应在标准条件下养护至所需龄期进行力学性能、耐久性能试验。

附录 B 铁路隧道工程用高性能喷射混凝土耐热指数测试方法

B.0.1 试验设备

- 1 搅拌机、振动台
- 2 电子天平
- 3 钢试模
- 4 恒温恒湿试验箱、压力试验机、拉力试验机、切割机、烘干箱

B.0.2 试验室温湿度

温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度大于 50%。

B.0.3 试验步骤

1 采用附录 A 的方法制备受检混凝土试件，尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ，共制备 3 组，每组 3 块。

2 一组试件在标准养护条件下养护至 56d 龄期，按 GB/T 50081 规定的方法测试标准养护条件下受检混凝土抗压强度 $f_{cc,20}$ 。

3 另两组试件分别置于干热养护箱（温度 $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $30\% \pm 5\%$ ）和湿热养护箱（温度 $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度大于 90%）中进行养护。养护至 56d 龄期时，拆模，将试件冷却至室温，并按 GB/T 50081 规定的方法分别测试受检混凝土在干热、湿热养护条件下的抗压强度 $f_{cc,80(\text{干})}$ 、 $f_{cc,80(\text{湿})}$ 。

3 混凝土耐热指数按式 (B.1) ~ (B.2) 计算：

$$k_1 = \frac{f_{cc,80(\text{干})}}{f_{cc,20}} \quad (\text{B.1})$$

$$k_2 = \frac{f_{cc,80(\text{湿})}}{f_{cc,20}} \quad (\text{B.2})$$

式中：

k_1 ——干热养护环境下受检混凝土的抗压强度耐热指数；

k_2 ——湿热养护环境下受检混凝土的抗压强度耐热指数；

$f_{cc,20}$ ——标准养护环境下受检混凝土的抗压强度，MPa；

$f_{cc,80(\text{干})}$ ——干热养护环境下受检混凝土的抗压强度，MPa；

$f_{cc,80(\text{湿})}$ ——湿热养护环境下受检混凝土的抗压强度，MPa。

取 k_1 和 k_2 中的较小值作为受检混凝土的抗压强度耐热指数，用 K_C 表示，结果精确至 0.01。

附录 C 铁路隧道工程用高性能喷射混凝土导热系数测试方法

C.0.1 本方法适用于高性能喷射混凝土导热系数的测定。

C.0.2 本方法采用瞬变平面热源法测试导热系数，瞬态平面热源法依据平面一维非稳态导热原理：无限大介质中平面热源在初始热平衡状态下受到瞬间加热脉冲后在介质内部产生动态温度场，利用热传导过程产生的温度数据，拟合函数曲线，计算得出样品的导热系数和热扩散系数。

C.0.3 测试应满足下列条件：

1. 试验装置应避免强光直射，室内风速小于 0.3 m/s，环境温度为 10℃~30℃，波动度不大于±2℃，相对湿度不超过 60%。
2. 试样制备样品测试面有效直径不应小于探头直径的 2 倍，且表面平整，不得进行表面材质、密度改性，可制备成圆柱体、正方体、长方体等，测试时需要两块样品，样品的表面需要相对平整。上下两片样品厚度宜一致。厚度宜大于所选探头直径，不得小于探头半径。
3. 探头半径为 6.4mm，测试总时间为 40s，输出功率为 0.5W。

C.0.4 操作步骤：

1. 将探头放置于两样品平面之间，使两样品表面与探头紧密接触形成类似三明治的结构，两块样品把探头夹在中间不应有光从缝隙中透过来，试验前调节样品与探头温度一致。
2. 测试系统电流不应大于 1mA，电桥平衡后电桥测试系统电压读数为零；测试过程中电位计滑动触点不应调整。
3. 根据测试总时间及输出功率，对探头施加恒定的直流电，在样品内产生热脉冲。通过瞬态加热时电压，除以电桥系统总电阻(即 $R_s+R_L+R_0$)，得到此时通过探头的初始电流 I_0 。
4. 在测试总时间内，以不小于 0.1s 的时间间隔扫描并记录不平衡电压，即电位变化量 U ，且采集次数应大于 100 次。
5. 在初次试验结束后，根据计算时间中的最大值 t 与探头半径，热扩散系数的关系和探测深度 ΔP_{prob} 判断测试结果有效性。计算时间中的最大值 t 与探头半径及热扩散系数的关系应满足 $0.3 < t_{\text{max}}/(r^2/a) \leq 1.0$ ； ΔP_{prob} 应在探头半径的 1.1~2.0 倍之间。否则应调整测试总时间或输出功率，重新试验。
6. 每次测试时应恢复至初始状态。相同试验条件下至少测试 3 次，每次间隔时间应不少于 5min。

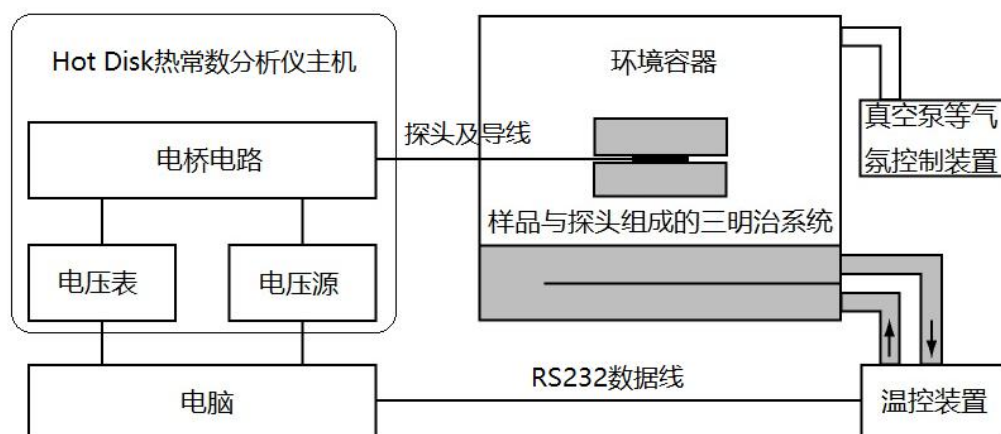


图 C.1 Hot disk 测试装置示意图

C.0.5 计算过程：

1. 探头电阻与温度增值存在式(1)关系：

$$R(t) = R_0[1 + \alpha \Delta T(t)] \quad (C.1)$$

2. 根据图电桥测试系统图得出电阻与电压比例关系见式(2)：

$$\frac{I_0(R_s + R_L + R_0) - [I_0 R_s - \Delta U(t)]}{I_0 R_s - \Delta U(t)} = \frac{R(t) + R_L}{R_s} \quad (C.2)$$

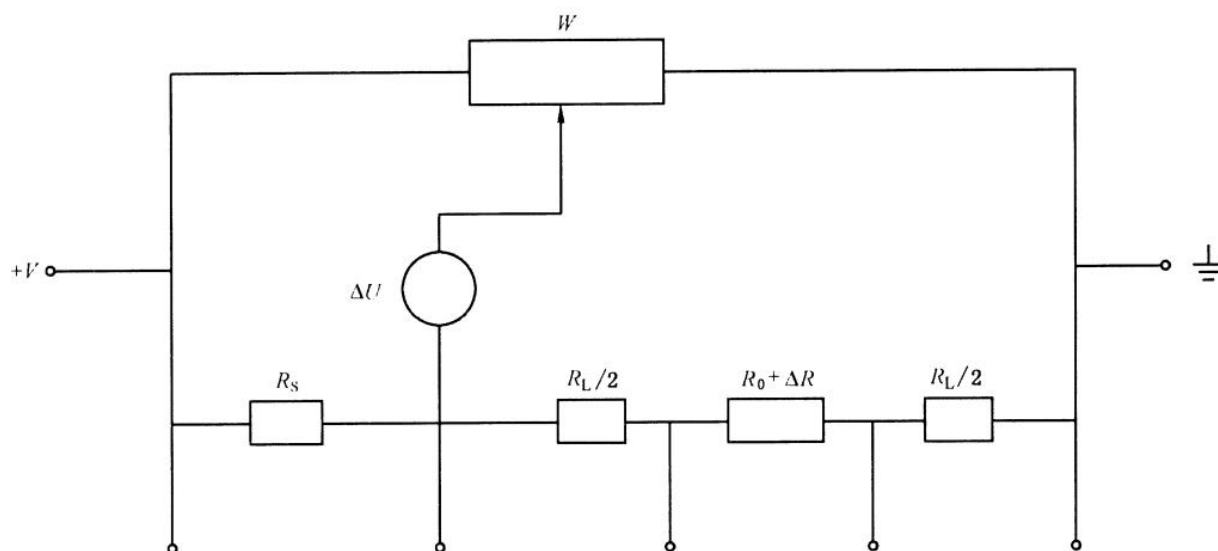


图 C.2 电桥测试系统图

3. 温度增值 $\Delta T(t)$ 应按式(3)计算：

$$\Delta T(t) = \frac{(R_s + R_L + R_0) \Delta U(t)}{[I_0 R_s - \Delta U(t)] \alpha R_0} \quad (\text{C.3})$$

式(1)~式(3)中:

$R(t)$ ——探头在时刻的电阻值, Ω ;

R_0 ——探头初始电阻值, Ω ;

α ——探头电阻率的温度系数, $1/\text{K}$;

$\Delta T(t)$ ——温度增值, K ;

I_0 ——瞬态加热初始时通过探头的电流, A ;

R_s ——串联电阻器电阻值, Ω ;

R_L ——探头引线电阻值, Ω ;

$\Delta U(t)$ ——电位在 t 时刻的变化量, V 。

4. 导热系数计算:

$$\Delta T_s(\tau) = \frac{P_0}{(\pi^{3/2} r \lambda)} D(\tau) \quad (\text{C.4})$$

T 应按式 (5) 计算:

$$\tau = \sqrt{\frac{t - t_c}{r^2/a}} \quad (\text{C.5})$$

$D(\tau)$ 应按式 (6) 计算:

$$D(\tau) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^\tau \frac{d\sigma}{\sigma^2} \left[\sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp\left(\frac{-(l^2 + k^2)}{4m^2 \sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2m^2 \sigma^2}\right) \right] \quad (\text{C.6})$$

式 (4) ~ 式 (6) 中:

$\Delta T_s(\tau)$ ——测试过程中样品表面温度增值随 τ 变化的函数, K ;

P_0 ——探头输出功率, W ;

R ——探头双螺旋结构最外层半径, mm ;

λ ——样品导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,

$D(\tau)$ ——无量纲的特征时间函数

t ——测试时刻, s ;

t_c ——校正时间, s ;

α ——样品的热扩散系数, mm^2/s ;

m ——探头双螺旋结构的总环数;

σ ——无量纲的特征时间函数的积分变量;

l_1 、 l_2 ——不大于双螺旋结构总环数的求和变量;

J_0 ——零阶修正贝塞尔函数。

附录 D 铁路隧道工程用高性能喷射混凝土标准喷射回弹率测试方法

D.0.1 喷射混凝土标准回弹率试验应使用下列仪器:

- 1. 搅拌机, 容积大于 1m³;
- 2. 喷射设备;
- 3. 塑料膜, 面积为 40m²~50m²;
- 4. 机械秤或电子秤, 量程 500kg~3000kg, 分度值 200g~1000g。

D.0.2 试验应按下列步骤进行:

- 1. 用塑料膜在待喷面下方地面覆盖 40m²~50m² 的区域;
- 2. 共设置三个受喷面, 受喷面 1 与水平方向平行, 受喷面 2 与水平方向呈 45°, 受喷面 3 垂直与水平地面, 每个受喷面的面积不小于 10m², 喷射时需保证受喷面平整, 干燥, 无污染。

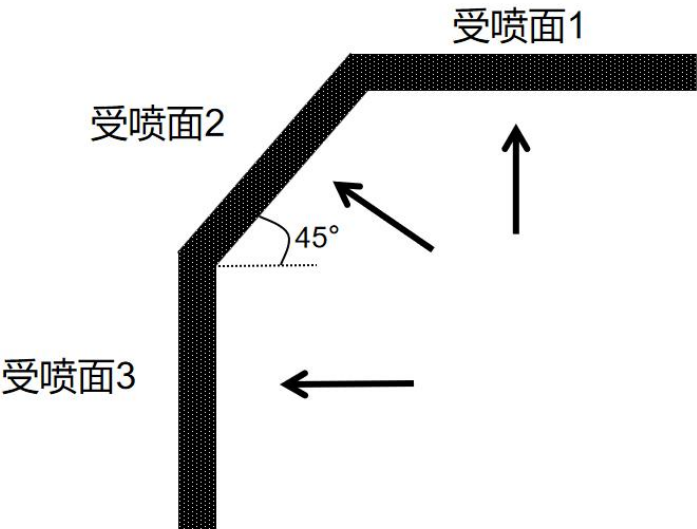


图 D.1 标准回弹率测试的受喷面

- 3. 拌制 600 L 混凝土拌合物, 送入喷射设备, 待喷射出料稳定后开始进行测试; 喷嘴应与受喷面保持 90°夹角, 喷嘴与喷射面的距离为 1.5m; 喷射总厚度为 20 cm, 分两层喷射, 每层厚度为 10 cm, 每个受喷面喷射 200L 混凝土; 喷射风压控制为 0.5MPa, 喷射过程需保证连续不中断, 料斗里混凝土在测试开始和结束时需保持均匀一致;
- 4. 喷射结束后, 从塑料膜上收集回弹料, 并进行称重;
- 5. 回弹料与总喷出拌合物的质量百分比即为标准喷射回弹率, 总喷出拌合物应扣除稳定前喷射量。