



T/CECS ××××—20××

中国工程建设标准化协会标准

铁路高性能喷射混凝土施工标准

Construction standard for railway high performance sprayed
concrete

（征求意见稿）

××××出版社

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2022 年第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2022〕40 号）有关要求，编制组经深入调查研究，开展验证性试验，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分 8 章，主要技术内容包括：总则、术语、基本规定、施工准备、施工机具、混凝土制备、喷射作业、质量检验、安全和环保。

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铁道分会归口管理，由中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所负责具体技术内容的解释。实施过程中如有意见或建议，请将意见和资料反馈至中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所（地址：北京市海淀区大柳树路 2 号；邮政编码：100081）。

主编单位：中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所

参编单位：中国建筑材料科学研究总院有限公司、北京交通大学、东南大学、江苏苏博特新材料股份有限公司、中铁一局集团有限公司、中铁二局集团有限公司、中交第二公路工程局有限公司、中交第二航务工程局有限公司、四川新筑智能工程装备制造有限公司、安徽奇明新材料有限公司、四川琪汇新材料有限责任公司、湖北木之君科技有限公司

主要起草人：谢永江、李 康、谭盐宾、李书明、程冠之、安明喆、蒋金洋、王 伟、李向阳、张超明、王帅帅、陈飞翔、杨凯理、刘光伟、何晓君、杜建群、郭 静、冯仲伟、周 游、林 晖、韩 松、王凤娟、雪宜宾、朱晓锬、贾志祥、魏 凯、周和勇、刘 竞、蒋 睿、王月华、王 希、胡建伟、翁智财、张 驰、关文勋、王家赫、何 龙、郁培云、成卫辉、胡家林。

主要审查人：

目 次

1 总 则	1
2 术 语	2
3 基本规定	3
4 施工准备	4
4.1 一般规定	4
4.2 现场准备	4
4.3 喷射混凝土拌制和运输	5
5 施工机具	6
5.1 一般规定	6
5.2 湿喷设备	6
5.3 其他机具	6
6 混凝土制备	8
6.1 原材料	8
6.2 配合比	11
6.3 拌合物性能	11
6.4 力学性能	12
6.5 耐久性能	12
7 喷射作业	15
7.1 一般规定	15
7.2 施工流程	15
7.3 喷射工艺参数	16
7.4 养护	18
7.5 质量控制要点	18
8 质量检验	21
8.1 喷射混凝土性能检验	21
8.2 实体质量评定和验收	21
9 安全与环保	23
9.1 安全技术	23
9.2 环保要求	23

附录 A	铁路高性能喷射混凝土试件的成型方法	25
附录 B	铁路高性能喷射混凝土抗压强度测试方法	27
附录 C	铁路高性能喷射混凝土粘结强度测试方法	28
附录 D	铁路高性能喷射混凝土抗弯强度测试方法	30
附录 E	铁路高性能喷射混凝土耐久性能测试方法	32
附录 F	铁路高性能喷射混凝土回弹率测试方法	33
本标准用词说明		34
引用标准名录		35
条文说明		36

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms	2
3	Basic requirements	3
4	Preparation of spray	4
4.1	General requirements	4
4.2	Preparation in site	4
4.3	Production and transportation of sprayed concrete	5
5	Construction equipments	6
5.1	General requirements	6
5.2	wet-mix shotcrete equipments	6
5.3	Other equipments	6
6	Production of concrete	8
6.1	Raw materials	8
6.2	Mix	11
6.3	Mixture properties	11
6.4	Mechanical properties	12
6.5	Durability properties	12
7	Execution of spraying	15
7.1	General requirements	15
7.2	Construction process	15
7.3	Process parameters of spraying	16
7.4	Curing	18
7.5	Key points of quality control	18
8	Quality inspection and acceptance	21
8.1	Performance inspection of sprayed concrete	21
8.2	Evaluation and acceptance of construction	21
9	Safety and environmental protection	23
9.1	Safety control technology	23

9.2 Requirements of environmental protection	23
Appendix A Fabrication methods of railway high performance sprayed concrete specimen	25
Appendix B Compressive strength test methods of railway high performance sprayed concrete	27
Appendix C Bond strength test methods of railway high performance sprayed concrete	28
Appendix D Flexural strength test methods of railway high performance sprayed concrete	30
Appendix E Durability properties test methods of railway high performance sprayed concrete	32
Appendix F Rebound ratio test methods of railway high performance sprayed concrete	33
Explanation of wording in this standard	34
List of quoted standards	35
Addition: Explanation of provision	36

1 总 则

1.0.1 为规范铁路高性能喷射混凝土施工，确保工程质量，做到安全适用、经济合理、技术先进，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于新建铁路隧道工程中高性能喷射混凝土的施工。

1.0.3 铁路高性能喷射混凝土的施工除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 高性能喷射混凝土 **high performance sprayed concrete**

以建设工程设计、施工和使用对喷射混凝土性能特定要求为总体目标,选用优质常规原材料,将按照低水胶比和低浆骨比原则进行配合比优化设计的混凝土拌合物送入湿喷设备,借助活塞泵或压缩空气进行输送,并在喷头处与速凝剂进行均匀混合后,高速喷至受喷面所形成的一种具有优异物理力学性能和耐久性能的混凝土。

2.0.2 回弹率 **rebound ratio**

喷射作业时,喷嘴处喷出未粘结在受喷面上溅落物的质量和总喷出拌合物与所消耗速凝剂质量之和的百分比。

2.0.3 硅灰浆 **silica fume slurry**

由硅灰、外加剂和水按一定比例均匀混合而成,具有提高混凝土拌合物稳定性和硬化体密实度作用的匀质浆料。

2.0.4 无碱粉状速凝剂 **alkali-free powder flash setting admixture**

以 Na_2O 当量计,总碱含量不大于 1.0% 的粉末状速凝剂。

3 基本规定

3.0.1 铁路高性能喷射混凝土施工应建立健全质量保证、安全生产、环境保护管理体系及职业健康管理制度。

3.0.2 铁路高性能喷射混凝土施工应结合工程特点、设计要求和材料性能，宜采用相匹配的喷射混凝土湿喷台车。

3.0.3 铁路高性能喷射混凝土施工前宜在代表性地段开展工艺性试验，以便合理确定施工作业参数。

3.0.4 铁路高性能喷射混凝土的强度等级应按抗压强度标准值划分为 C30、C35、C40、C45 和 C50。

3.0.5 铁路高性能喷射混凝土的 1 d 抗压强度不应低于 12 MPa。

4 施工准备

4.1 一般规定

- 4.1.1 铁路高性能喷射混凝土施工前应编制喷射专项施工方案。
- 4.1.2 铁路高性能喷射混凝土施工应由熟悉喷射设备性能的专业人员进行操作。
- 4.1.3 铁路高性能喷射混凝土施工作业前，应定期检查设备和电源线路是否正常，作业人员应穿戴安全帽、防尘用具等劳保用品。

4.2 现场准备

- 4.2.1 铁路高性能喷射混凝土设备操作人员岗前培训应包含下列内容：
 - 1 高性能喷射混凝土的施工配合比参数及性能要求。
 - 2 高性能喷射混凝土设备的组成及工作原理。
 - 3 高性能喷射混凝土设备的操作规范及安全注意事项。
 - 4 高性能喷射混凝土设备的维护保养及常见故障处理办法。
 - 5 高性能喷射混凝土设备的实操培训。
- 4.2.2 铁路高性能喷射混凝土作业现场，应做好下列准备工作：
 - 1 拆除作业面的障碍物、清除开挖面的浮石和墙脚的岩渣、堆积物。
 - 2 用高压风水冲洗受喷面，对遇水易潮解、泥化的岩层，则用风压扫清岩面。
 - 3 埋设控制高性能喷射混凝土厚度的标志（厚度控制钉，喷射线），其纵横间距宜为 1.0 m~1.5 m；当有锚杆时，可用锚杆露出岩面的长度作为控制喷层厚度的标志。
 - 4 喷射作业区应有良好的通风和足够的光线。
 - 5 作业前应对机械设备、风、水管管路和施工现场临时用电等进行全面检查及试运转。
- 4.2.3 受喷面有滴水、淋水时，喷射前应按下列方法做好治水工作：
 - 1 有明显出水点时，可埋设导管排水。
 - 2 导水效果不好的含水岩层，可设盲沟排水。
- 4.2.4 铁路高性能喷射混凝土施工前应检查开挖断面净空尺寸，清除松动岩块和虚渣。

4.3 喷射混凝土拌制和运输

4.3.1 铁路高性能喷射混凝土宜采用强制式搅拌机拌制，单台搅拌机公称容量不宜小于 1 m^3 。

4.3.2 铁路高性能喷射混凝土拌制前应测定粗、细骨料的含水率，并根据测试结果调整施工配合比，每工班应至少抽测一次。

4.3.3 铁路高性能喷射混凝土的拌制应符合下列规定：

1 搅拌时，宜先向搅拌机内投入粗、细骨料，水泥和矿物掺合料，搅拌均匀后，再加入水和外加剂，直至搅拌均匀为止。

2 冬期施工宜对水和骨料进行预加热处理，骨料的加热温度不宜高于 40°C ，水的加热温度不宜高于 60°C ；当骨料加热不具备条件时，可将水温加热至 80°C ，搅拌时应先投入骨料和已加热的水，搅拌均匀后再投入水泥和矿物掺合料。

3 高性能喷射混凝土的拌制时间不应少于 120 s ，掺加钢纤维或合成纤维的高性能喷射混凝土的搅拌时间可适当延长 $60\text{ s}\sim 120\text{ s}$ 。

4.3.4 铁路高性能喷射混凝土运输过程中应对运输容器采取遮盖或保温隔热措施，避免日晒、雨淋或寒冷气候对混凝土质量的影响，防止局部混凝土温度升高（夏期）或受冻（冬期）。

4.3.5 铁路高性能喷射混凝土运输过程中，应采取措施防止混凝土离析、分层，确保混凝土拌合物性能满足施工要求。

4.3.6 铁路高性能喷射混凝土运输过程中，不得加水。

5 施工机具

5.1 一般规定

5.1.1 铁路高性能喷射混凝土用施工机具应根据工程特点、围岩条件、开挖方法、喷射方量、循环节拍等条件进行合理选择。

5.1.2 铁路高性能喷射混凝土宜采用湿喷台车进行施工作业,也可采用转子式等小型湿喷机具进行施工作业。

5.1.3 铁路高性能喷射混凝土正式施工前应将施工机具联机进行试喷。

5.2 湿喷设备

5.2.1 铁路高性能喷射混凝土用湿喷台车的作业范围宜覆盖最大开挖作业进尺,且满足《铁路大型施工机械 隧道混凝土湿喷机》TB/T 3525 的要求。

5.2.2 对于单洞双线隧道,铁路高性能喷射混凝土用湿喷台车的最大理论喷射方量不宜小于 $30 \text{ m}^3/\text{h}$;对于单洞单线隧道和横洞等辅助坑道,铁路高性能喷射混凝土用湿喷台车的最大理论喷射方量不宜小于 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

5.2.3 当施工现场不具备外接气源条件时,铁路高性能喷射混凝土用湿喷台车应配备空压机,且空压机的额定压力不应低于 0.6 MPa ,供气量不应小于 $16 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

5.2.4 当采用液体无碱速凝剂进行施工时,铁路高性能喷射混凝土用湿喷台车的液体速凝剂蠕动泵应具备流量计量和自动调节功能,且蠕动泵的最大流量不宜小于 1000 L/h ,计量精度误差不应超过 2% 。

5.2.5 当采用粉状速凝剂进行施工时,铁路高性能喷射混凝土用湿喷台车的粉状速凝剂输送和计量系统应具备流量计量和自动调节功能,且粉状速凝剂的最大输送量不宜小于 700 kg/h ,计量精度误差不应超过 2% 。

5.2.6 铁路高性能喷射混凝土用湿喷台车应采用承压能力不小于 0.8 MPa 的混凝土输送软管,管径不宜小于 80 mm ,且具有良好的耐磨性能。

5.3 其他机具

5.3.1 铁路高性能喷射混凝土宜采用搅拌运输车进行运输,搅拌运输车的运输能力应与施工要求相匹配。

5.3.1 当铁路高性能喷射混凝土用湿喷台车未配备空压机时，施工现场应配备足够数量的空压机，确保外接气源的压力不低于 0.6 MPa，供气量不应小于 16 m³/min。

6 混凝土制备

6.1 原材料

6.1.1 铁路高性能喷射混凝土应采用性能满足《铁路混凝土》TB/T 3275 要求的水泥，并符合下列规定：

1 高性能喷射混凝土宜采用强度等级不低于 42.5，碱含量不超过 0.60% 的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。

2 氯盐侵蚀环境下，高性能喷射混凝土不宜采用抗硫酸盐硅酸盐水泥和氯离子含量超过 0.06% 的水泥。

3 硫酸盐类化学腐蚀环境下，高性能喷射混凝土不宜采用熟料中 C_3A 含量超过 5% 的水泥。

4 年平均环境温度低于 15℃ 的硫酸盐类化学腐蚀环境下，高性能喷射混凝土不应采用含石灰石粉的水泥。

6.1.2 铁路高性能喷射混凝土应采用性能满足《铁路混凝土》TB/T 3275 要求的矿物掺合料，并符合下列规定：

1 高性能喷射混凝土宜采用硅灰或硅灰浆，硅灰浆的匀质性和物理化学性能应满足表 6.1.2 的要求。

表 6.1.2 硅灰浆的匀质性和物理化学性能指标

序号	检验项目	技术要求	执行标准
1	含固量（烘干法）	$\geq 45\%$	GB/T 8077
2	细度（45 μm 方孔筛筛余）	$\leq 5\%$	GB/T 1345
3	需水量比	$\leq 120\%$	GB/T 27690
4	二氧化硅含量（折固后计算）	$\geq 40\%$	GB/T 176
5	氯离子含量（折固后计算）	$\leq 0.1\%$	GB/T 176
6	三氧化硫含量（折固后计算）	$\leq 3.5\%$	GB/T 176
7	碱含量（折固后计算）	*	GB/T 176
8	储存稳定性（5d，25℃）	$\leq 5\%$	JTG E20

2 年平均环境温度低于 15℃ 的硫酸盐类化学腐蚀环境下，高性能喷射混凝土不应采用石灰石粉掺合料。

3 当采用其他矿物掺合料时，其性能除应符合《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 外，尚应通过试验验证，确定高性能喷射混凝土性能满足设计要求后方可使用。

6.1.3 铁路高性能喷射混凝土应采用性能满足现行《铁路混凝土》TB/T 3275 要求的细骨料，并符合下列规定：

1 高性能喷射混凝土宜采用级配合理、质地坚固、吸水率低、孔隙率小的洁净天然河砂或机制砂，也可采用天然河砂和机制砂组成的混合砂，不得采用海砂。

2 高性能喷射混凝土用细骨料的细度模数宜为 2.6~3.0。

3 高性能喷射混凝土宜采用快速砂浆棒膨胀率小于 0.20% 的细骨料，当采用快速砂浆棒膨胀率为 0.20%~0.30%（不含）的细骨料时，应对混凝土采取有效的碱—骨料反应抑制措施。

4 高性能喷射混凝土用天然河砂的含泥量不宜大于 0.50%，泥块含量不宜大于 0.20%。

5 高性能喷射混凝土用机制砂的石粉含量宜符合表 6.1.3 的规定：

表 6.1.3 机制砂的石粉含量

项目		<C40	C40~C50
石粉含量	MB<1.4	≤7%	≤5%
	MB≥1.4	≤3%	≤2%

6.1.4 铁路高性能喷射混凝土应采用性能满足现行《铁路混凝土》TB/T 3275 要求的粗骨料，并符合下列规定：

1 高性能喷射混凝土应粒形良好、级配合理、质地坚固、吸水率低、线胀系数小的洁净碎石或碎卵石，最大公称粒径不应大于 10 mm。

2 冻融破坏环境下，高性能喷射混凝土用粗骨料应具有足够的坚固性。

3 高性能喷射混凝土宜采用快速砂浆棒膨胀率小于 0.20% 的粗骨料，当采用快速砂浆棒膨胀率为 0.20%~0.30%（不含）的粗骨料时，应对混凝土采取有效的碱—骨料反应抑制措施。

6.1.5 铁路高性能喷射混凝土应采用性能满足现行《铁路混凝土》TB/T 3275 要求的外加剂，并符合下列规定：

1 高性能喷射混凝土应采用品质稳定、与胶凝材料相容性好、能显著改善混

凝土性能的减水剂、保坍剂、防腐剂、引气剂和速凝剂。

2 高性能喷射混凝土应采用无碱液体速凝剂或无碱粉状速凝剂，无碱液体速凝剂和无碱粉状速凝剂的掺量应通过试验确定，其中无碱液体速凝剂的掺量不宜大于 9%，无碱粉状速凝剂的掺量不宜大于 6%。

3 高性能喷射混凝土用无碱液体速凝剂和无碱粉状速凝剂的性能应符合表 6.1.5 的规定。

表 6.1.5 无碱液体速凝剂和无碱粉状速凝剂的性能指标

序号	检验项目		技术要求	
			无碱液体速凝剂	无碱粉状速凝剂
1	密度		1.4g/cm ³ ~1.5g/cm ³	/
2	pH 值		2~4	/
3	含水率		/	≤2%
4	细度（80 μm 方孔筛筛余）		/	≤15%
5	含固量		≥50%	/
6	稳定性		≤2mL	/
7	氯离子含量		≤0.1%	≤0.1%
8	碱含量（按当量 Na ₂ O 含量计）		≤1.0%	≤1.0%
9	净浆凝结时间	初凝时间	≤3min	≤3min
10		终凝时间	≤8min	≤8min
11	砂浆强度	1d 抗压强度	≥8MPa	≥8MPa
12		28d 抗压强度比	≥95%	≥95%
13		90d 抗压强度保留率	≥100%	≥100%

6.1.6 铁路高性能喷射混凝土应采用性能满足现行《铁路混凝土》TB/T 3275 要求的拌合水。

6.1.7 铁路高性能喷射混凝土应采用性能满足现行《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 要求的纤维，并符合下列规定：

1 钢纤维的抗拉强度不宜低于 600 N/mm²，直径宜为 0.30 mm~0.80 mm，长度宜为 20 mm~35 mm，且不得大于高性能喷射混凝土输送管内径的 0.7 倍，长径比宜为 30~80。

2 钢纤维不得有明显的锈蚀、油渍及其他妨碍钢纤维与水泥粘结的杂质；钢纤维内含有的因加工不良造成的粘连片、铁屑及杂质的总重量不应超过钢纤维重量的 1%。

3 合成纤维的抗拉强度不应低于 270 N/mm^2 ，直径宜为 $10 \mu\text{m}\sim 100 \mu\text{m}$ ，长度宜为 $12 \text{ mm}\sim 25 \text{ mm}$ 。

6.2 配合比

6.2.1 铁路高性能喷射混凝土应根据工程特点、施工工艺及环境条件，综合考虑喷射混凝土拌合物性能、力学性能和耐久性能要求，计算初始配合比，经试验室试配、试喷、调整得出满足可喷性能、力学性能和耐久性能要求的配合比。

6.2.2 铁路高性能喷射混凝土的配合比参数应符合下列规定：

1 高性能喷射混凝土的水胶比不宜大于 0.40。

2 高性能喷射混凝土的胶凝材料用量不宜低于 400 kg/m^3 ，且不宜大于 500 kg/m^3 。

3 高性能喷射混凝土的砂率宜控制在 45%~55%。

4 高性能喷射混凝土中硅灰掺量不宜大于 10%，硅灰浆掺量不宜大于 20%。

5 高性能喷射混凝土的浆体比不应超过 0.39。

6 硫酸盐类化学腐蚀环境下，高性能喷射混凝土的胶凝材料抗侵蚀性能应按附录 A 规定的方法进行测试，胶凝材料的抗蚀系数应大于 0.80；酸性水、侵蚀性 CO_2 及镁盐类化学腐蚀环境下，高性能喷射混凝土的胶凝材料抗侵蚀性能要求应进行专门研究和论证。

7 高性能喷射混凝土的总碱含量、总氯离子含量和总三氧化硫含量应满足现行《铁路混凝土》TB/T 3275 的要求。

6.3 拌合物性能

6.3.1 铁路高性能喷射混凝土应具有良好的拌合物性能，并满足设计、生产和施工要求。

6.3.2 铁路高性能喷射混凝土拌合物的坍落度宜控制在 $220 \text{ mm}\pm 20 \text{ mm}$ ，扩展度不宜小于 550mm，含气量宜控制在 4%~8%。

6.3.3 铁路高性能喷射混凝土拌合物性能应按现行《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 规定的方法进行测试。

6.4 力学性能

6.4.1 铁路高性能喷射混凝土力学性能试件应按附录 A 规定的方法制作。

6.4.2 铁路高性能喷射混凝土的抗压强度、粘接强度和抗弯强度评定龄期应为 28 d，有早期强度要求时，应根据设计龄期要求开展早期强度评定试验。

6.4.3 铁路高性能喷射混凝土抗压强度应按附录 B 规定的方法进行测试。当设计的早期强度测试龄期小于 1 d 或强度低于 5 MPa 时，宜采用拉拔法或贯入法检测。

6.4.4 铁路高性能喷射混凝土的粘结强度试验应按附录 C 规定的方法进行测试，高性能喷射混凝土与岩石及混凝土基底的最小粘结强度应符合表 6.4.4 的规定。

表 6.4.4 高性能喷射混凝土与岩石及混凝土基底的最小粘结强度（MPa）

粘结类型	与岩石的最小粘结强度	与混凝土基底的最小粘结强度
非结构作用	0.5	1.0
结构作用	1.6	2.0

6.4.5 高地应力、软岩大变形等特殊条件下，铁路高性能喷射混凝土应进行抗弯强度试验。高性能喷射混凝土的抗弯强度按附录 D 规定的方法进行测试，且抗弯强度应符合表 6.4.5 的规定。

表 6.4.5 高性能喷射混凝土的抗弯强度（MPa）

抗压强度等级	C30	C35	C40	C45
抗弯强度	3.8	4.2	4.4	4.6

6.5 耐久性能

6.5.1 铁路高性能喷射混凝土的耐久性设计应符合现行《铁路混凝土结构耐久性设计规范》TB 10005 的规定，高性能喷射混凝土的耐久性能评定龄期应为 56 d。

6.5.2 碳化环境下，用于复合式衬砌结构中的铁路高性能喷射混凝土的抗渗等级不应小于 P16，用于单层衬砌结构中的高性能喷射混凝土的碳化深度不应超过 10 mm。

6.5.3 氯盐侵蚀环境下，铁路高性能喷射混凝土的耐久性能应满足表 4.5.3 的要求。

表 6.5.3 氯盐侵蚀环境下铁路高性能喷射混凝土的耐久性能

作用等级	耐久性指标	技术要求
L1	氯离子扩散系数	$\leq 7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
L2	氯离子扩散系数	$\leq 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
L3	氯离子扩散系数	$\leq 3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

6.5.4 硫酸盐类化学腐蚀环境下，铁路高性能喷射混凝土的耐久性能应满足表 4.5.4 的要求；酸性水、侵蚀性 CO_2 、镁盐类化学腐蚀环境下，混凝土的耐久性能要求应进行专门研究和论证。

表 6.5.4 硫酸盐类化学腐蚀环境下铁路高性能喷射混凝土的耐久性能

作用等级	耐久性指标	技术要求
H1	电通量	$< 1200 \text{ C}$
H2	电通量	$< 1000 \text{ C}$
H3	电通量	$< 800 \text{ C}$
H4	电通量	$< 600 \text{ C}$

6.5.5 盐类结晶破坏环境下，铁路高性能喷射混凝土的耐久性能应满足表 6.5.5 的要求。

表 6.5.5 盐类结晶破坏环境下铁路高性能喷射混凝土的耐久性能

作用等级	耐久性指标	技术要求
Y1	气泡间距系数	$< 300 \mu\text{m}$
	电通量	$< 1200 \text{ C}$
	抗硫酸盐结晶破坏等级	$\geq \text{KS90}$
Y2	气泡间距系数	$< 300 \mu\text{m}$
	电通量	$< 1000 \text{ C}$
	抗硫酸盐结晶破坏等级	$\geq \text{KS120}$
Y3	气泡间距系数	$< 300 \mu\text{m}$
	电通量	$< 800 \text{ C}$
	抗硫酸盐结晶破坏等级	$\geq \text{KS150}$

Y4	气泡间距系数	$<300\ \mu\text{m}$
	电通量	$<600\ \text{C}$
	抗硫酸盐结晶破坏等级	$\geq\text{KS150}$

6.5.6 冻融破坏环境下，铁路高性能喷射混凝土的耐久性能应满足表 6.5.6 的要求。

表 6.5.6 冻融破坏环境下铁路高性能喷射混凝土的耐久性能

作用等级	耐久性指标	技术要求
D1	气泡间距系数	$<300\ \mu\text{m}$
	抗冻等级	$\geq\text{F300}$
D2	气泡间距系数	$<300\ \mu\text{m}$
	抗冻等级	$\geq\text{F350}$
D3	气泡间距系数	$<300\ \mu\text{m}$
	抗冻等级	$\geq\text{F400}$
D4	气泡间距系数	$<300\ \mu\text{m}$
	抗冻等级	$\geq\text{F450}$

6.5.7 铁路高性能喷射混凝土的耐久性能应按附录 E 规定的方法进行测试。

7 喷射作业

7.1 一般规定

7.1.1 铁路高性能喷射混凝土冬期施工时应采取保温措施,不得在结冰的受喷面上直接喷射。

7.1.2 当环境温度低于 5℃时,应停止喷射作业,同时对已喷射混凝土进行保温保湿养护。

7.2 施工流程

7.2.1 铁路高性能喷射混凝土施工流程如图 7.2.1 所示。

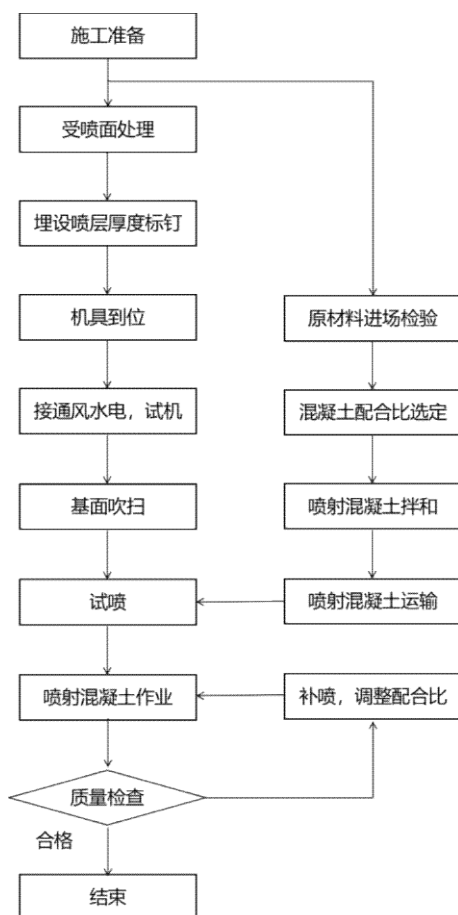


图 7.2.1 铁路高性能喷射混凝土施工流程图

7.2.2 铁路高性能喷射混凝土作业应按“先墙后拱、自下而上”的顺序进行,台阶法施工时,宜先进行上、中台阶喷射混凝土作业,最后进行下台阶喷射混凝土作业。

7.3 喷射工艺参数

7.3.1 铁路高性能喷射混凝土可利用既有钢架、锚杆头或埋钉法控制混凝土喷射厚度，在既有钢架、连接筋或埋钉上增设纵向连接筋控制喷射混凝土平整度。

7.3.2 铁路高性能喷射混凝土的喷射作业区环境温度宜为 5℃~35℃，拌合物温度宜为 10℃~30℃。

7.3.3 铁路高性能喷射混凝土施工作业应符合下列规定：

1 高性能喷射混凝土应遵循自下而上、先打底后扫面的顺序，按分区、分片、分层喷射。

2 高性能喷射混凝土分层喷射前，后一层喷射应在前一层混凝土终凝后进行，若超过上一层混凝土终凝时间 1 h 以上，应先用高压气水清洗喷层表面。

3 喷射作业时，喷嘴宜与受喷面保持 80°~90°夹角，边墙宜采用水平喷射，拱部宜采用垂直喷射。

7.3.4 有钢架段铁路高性能喷射混凝土的喷射顺序应按下列步骤进行：

1 反向喷射上循环钢架端头与岩面衔接部位。

2 喷射本循环钢架底部。

3 沿钢架前后两侧水平斜向喷射钢架与岩面间混凝土。

4 喷射钢架间混凝土。

7.3.5 隧道边墙部位的铁路高性能喷射混凝土施工作业宜按下列要点进行：

1 边墙打底：左右分区，对称喷射。2 m 以下一次喷射成型；2 m 以上分层喷射，分层厚度 120 mm~200 mm。

2 边墙喷射。喷嘴与受喷面间距应控制在 1.0 m~2.0 m，喷射角度宜控制在 90°，环向转动范围±15°，环向喷射采用喷头摆动，纵向喷射采用喷头摆动或臂架伸缩；喷嘴连续、缓慢移动。

3 表面刮平：采用刮铲清除拱架内弧面附着多余混凝土，拱腰以下区域宜采用人工刮铲方式，拱腰及以上区域宜采用机械刮铲方式。

4 边墙扫面：边墙喷射完成后，移动喷嘴距受喷面 1.5 m~2.0 m 进行扫面。

7.3.6 拱部范围铁路高性能喷射混凝土施工作业宜按下列要点执行：

1 拱部打底：喷嘴与受喷面间距 1.0 m~2.0 m；喷射角度宜控制在 90°，打底厚度宜覆盖钢筋网片。

2 拱部喷射：拱部采用分层喷射，分层厚度 80 mm~120 mm。喷嘴与受喷面间距应控制在 1.0 m~1.5 m；喷射角度宜控制在 90°，环向转动范围±15°，环向喷射采用喷头摆动，纵向喷射采用喷头摆动或臂架伸缩；喷嘴连续、缓慢移动。

3 表面刮平：采用机械刮铲方式清除拱架内弧面附着多余混凝土。

4 拱部扫面：拱部喷射完成后，移动喷嘴距受喷面 1.5 m~2.0 m 进行扫面。

7.3.7 采用铁路高性能喷射混凝土施工时，边墙部位的回弹率不宜大于 8%，拱部的回弹率不宜大于 15%，铁路高性能喷射混凝土的回弹率应按附录 F 规定的方法进行测试。

7.3.8 渗水围岩地段铁路高性能喷射混凝土施工作业宜按下列要点执行：

1 受喷面存在小股水或裂隙渗漏水时，宜采用岩面注浆或导管引排后再进行喷射混凝土作业。

2 受喷面存在大面积潮湿或渗漏水时，宜采用粉状速凝剂替代液体速凝剂进行喷射混凝土施工，也可采用增加外掺料（增稠剂）的喷射混凝土分层多次喷射。

3 受喷面存在大股涌水时，宜先注浆堵水后再进行喷射混凝土施工。

7.3.9 高地应力和软岩大变形地段铁路高性能喷射混凝土施工作业宜按下列要点执行：

1 掌子面开挖清渣结束后，应及时采用掺钢纤维的高性能喷射混凝土进行初喷，然后再进行立拱和打设锚杆。

2 立拱和打设锚杆结束后，高性能喷射混凝土宜先“全断面式”扫面 30mm~50mm，然后再按照“先墙后拱”的顺序喷射至设计厚度。

7.3.10 高地温地段铁路高性能喷射混凝土施工作业宜按下列要点执行：

1 对于高岩温干热隧道，可适当提高喷射混凝土的出机坍落度和扩展度，同时采用隔热型喷射混凝土进行施工作业。

2 对于高温涌水湿热隧道，应先进行注浆堵水作业防止施工人员受到热伤害，然后采用粉状速凝剂替代液体速凝剂进行喷射混凝土作业。

7.3.11 喷射结束前应检查混凝土表面平整度，并根据预埋控制厚度的钢筋头来检查喷射厚度，对检查出的喷射空洞、拱架外露、喷射不密实等情况，应当班处理。

7.3.12 铁路高性能喷射混凝土施工作业完成后宜按下列步骤进行：

1 基于液体速凝剂的高性能喷射混凝土湿喷台车宜按照关闭泵送系统、关闭速凝剂输送系统、清理输料管路、关闭压缩空气的顺序进行设备清洗。

2 基于粉状速凝剂的高性能喷射混凝土湿喷台车宜按照关闭速凝剂输送系统、关闭泵送系统、清理输料管路、关闭压缩空气的顺序进行设备清洗。

7.4 养护

7.4.1 铁路高性能喷射混凝土的养护时间不得少于 7 d。

7.4.2 铁路高性能喷射混凝土施工结束后，应在 24 h 内喷淋养护。

7.5 质量控制要点

7.5.1 铁路高性能喷射混凝土施工过程中出现局部掉块或超挖导致喷射厚度过大时，宜根据现场情况增设钢筋网片后再进行喷射作业。

7.5.2 铁路高性能喷射混凝土放料时应严格控制供料速度，料斗振动器开启后混凝土不宜超过筛网高度，同时应及时清除筛网上超径骨料和杂物；喷射作业中断时间较长时，应及时清理料斗内残余混凝土。

7.5.3 采用钻爆法施工的隧道，受喷面最后施工的铁路高性能喷射混凝土终凝至下一开挖循环爆破作业的时间间隔不应少于 2 h。

7.5.4 铁路高性能喷射混凝土的抗压强度控制应符合下列规定：

- 1 控制原材料质量，按设计好的配合比进行混凝土拌制。
- 2 精确控制速凝剂的掺量，宜采用无碱液体或粉状速凝剂。
- 3 合理控制喷射顺序、风压、角度、厚度和喷嘴与受喷面的距离。

7.5.5 铁路高性能喷射混凝土的粘结强度控制应符合下列规定：

- 1 湿喷混凝土拌合物可掺入适量的纤维。
- 2 喷射前对基岩面灰尘、渗水等影响粘结因素进行处理。
- 3 掺加合适的功能型外加剂，改善拌合物的工作性能。
- 4 适当提高胶凝材料用量和砂率。

7.5.6 铁路高性能喷射混凝土的喷层厚度控制应符合下列规定：

- 1 施工前后应对受喷面进行限界测量、断面扫描，不得侵入二衬限界。
- 2 施工中加强喷层厚度监控。

3 无钢架时，喷层厚度可采用埋钉法或锚杆头控制。

4 有钢架时，喷层厚度可采用拱架或锚杆头控制。

7.5.7 铁路高性能喷射混凝土的密实度控制应符合下列规定：

1 按照工艺性试验总结重点控制喷射顺序、风压、角度、厚度和喷嘴与受喷面的距离。

2 控制混凝土和速凝剂的输送流量和比例、拌合物和易性、骨料最大粒径。

3 利用钢架、锚杆或定位筋将钢筋网片固定牢靠，避免喷射过程中钢筋网片移位、变形或塌落。

4 相邻钢筋网片搭接部位应密贴，网片搭接处，网格孔应重合。

5 喷射时优先喷射钢筋网格间基面，待基面喷射至钢筋网片平齐时，可进行大面积喷射。

6 本循环喷射时，检查上循环端头密实性，不密实部位反向喷射密实。

7 台阶法施工下台阶混凝土前，应清除接茬范围 30 cm 内原混凝土堆积体，厚度不大于设计值的 1/2。

7.5.8 铁路高性能喷射混凝土施工后不应出现脱空或空洞现象，施工工艺应符合下列规定：

1 隧道开挖应采用光面爆破，控制超挖。

2 超挖量小于 50 cm 时，应采用喷射混凝土分层喷射回填。

3 拱部超挖量大于 50 cm 时，可预留注浆管，采用水泥砂浆或混凝土回填密实。

4 当设置钢架时，应优先沿钢架前后两侧水平斜向喷射钢架与基面混凝土。

7.5.9 铁路高性能喷射混凝土的平整度控制应符合下列规定：

1 喷射前应设置环向、纵向喷层轮廓标识，加强纵向平整度控制。

2 按照工艺性试验总结组织施工，加强刮铲控制。

3 加强断面扫描和观测，必要时应及时处理。

4 喷射作业应分区、分片、分层喷射，及时观察，清除凸起部分和补喷扫面。

7.5.10 铁路高性能喷射混凝土的抗裂性控制应符合下列规定：

1 开挖后及时初喷，减少岩面裸露时间。

2 一次喷射厚度不宜过大，避免混凝土因自重产生开裂。

- 3 控制分层喷射间隔时间。
- 4 控制机制砂石粉含量。
- 5 适当降低砂率。
- 6 及时加强养护。
- 7 适当掺入纤维。

7.5.11 铁路高性能喷射混凝土的回弹率控制应符合下列规定：

- 1 根据喷射设备及原材料特点进行喷射混凝土配合比设计，重点控制骨料粒径、速凝剂与水泥的适应性等。
- 2 喷射作业前应做好岩面渗水地段的“引、排、截、堵”等措施。
- 3 合理控制喷射作业参数，根据实际需要及时调整风压、喷射角度、喷射距离、喷层间隔时间和喷射厚度等。
- 4 喷射作业应先对岩面空洞、凹穴和张开裂隙进行喷射混凝土填充。
- 5 合理掺加功能型外加剂，改善喷射混凝土的工作性能。
- 6 根据不同喷射部位及时调整速凝剂的种类和掺量。

8 质量检验

8.1 喷射混凝土性能检验

8.1.1 铁路高性能喷射混凝土用原材料使用前应进行检验，检验合格后方可使用，检验项目与批次应符合现行国家有关标准的规定。

8.1.2 铁路高性能喷射混凝土性能的必检项目为喷层厚度、抗压强度、回弹率和平整度，可检项目为拌合物性能、粘结强度、抗弯强度、抗渗性、抗冻性、抗氯离子渗透、抗硫酸盐侵蚀。

8.1.3 铁路高性能喷射混凝土的性能检验频率应符合下列规定：

- 1 拌合物性能每台班应至少取样检验 1 次。
- 2 结构性喷层应每 100 m² 检验 1 次，隧道拱部喷层应每 50 m²~80 m² 检验 1 次。
- 3 抗压强度和抗渗性的检验频率应与现行国家标准《混凝土强度评定标准》GB/T 50107 中的有关规定保持一致。
- 4 有设计要求时，粘接强度、抗弯强度、抗冻性、抗氯离子渗透和抗硫酸盐侵蚀应在配合比选定阶段检验一次。

8.1.4 铁路高性能喷射混凝土的喷层厚度应采用钻孔法进行检验，且喷层厚度的平均值不应小于设计厚度。

8.2 实体质量验收

8.2.1 铁路高性能喷射混凝土的实体质量验收应符合表 8.2.1 的规定。

表 8.2.1 湿喷法喷射混凝土工程的质量验收

项目	检查项目	技术要求
主控项目	喷层厚度	满足本标准要求
	抗压强度	达到设计要求
	回弹率	满足本标准要求
	平整度	达到设计要求
一般项目	表面质量	密实、无裂缝、无脱落、无空鼓和无渗漏水
	拌合物性能	达到设计要求

	粘结强度	满足本标准要求
	抗弯强度	满足本标准要求
	抗渗性	满足本标准要求
	抗冻性	满足本标准要求
	抗氯离子渗透	满足本标准要求
	抗硫酸盐侵蚀	满足本标准要求

8.2.2 铁路高性能喷射混凝土的实体质量验收应按设计要求和质量合格条件进行分项工程验收。验收时应提交下列文件：

- 1 施工图设计文件及施工方案。
- 2 原材料的质量合格证明及进场复检报告。
- 3 高性能喷射混凝土性能及厚度检测记录与报告。
- 4 高性能喷射混凝土施工记录。
- 5 隐蔽工程验收记录。
- 6 其他按规定要求应提供的文件和记录。

9 安全与环保

9.1 安全技术

- 9.1.1** 铁路高性能喷射混凝土施工前，应辨识施工过程中存在的安全风险源。
- 9.1.2** 铁路高性能喷射混凝土施工前，应检查和处理作业区的危石和其他危险物件，确保施工环境安全。
- 9.1.3** 铁路高性能喷射混凝土的施工场地应平整稳定，台阶坡度设置合理，无设备倾覆风险，工作面应具备良好的照明效果。
- 9.1.4** 铁路高性能喷射混凝土施工作业前，应检查电源线路和设备的电器部件、安全装置、输料管路的密封性能和耐压性能，满足要求后方可使用。
- 9.1.5** 铁路高性能喷射混凝土施工过程中，喷嘴前方和机械臂下方严禁站人。
- 9.1.6** 铁路高性能喷射混凝土施工过程中，施工作业人员应佩戴安全防护用具。
- 9.1.7** 掺加钢纤维的铁路高性能喷射混凝土施工过程中，应采取针对性措施，防止在搅拌、上料、喷射及处理回弹物等环节造成人员伤害。
- 9.1.8** 铁路高性能喷射混凝土施工设备的喂料筛网，作业时不得随意打开，严禁将手或异物伸入喂料口。
- 9.1.9** 铁路高性能喷射混凝土施工过程中当输料管路发生堵塞时，为防止爆管应先反泵排空，再拆卸管路清理堵塞物，重新喷射作业前应确认管路通畅。
- 9.1.10** 铁路高性能喷射混凝土喷射间隙，应关闭高压风，喷嘴向下指向掌子面。
- 9.1.11** 铁路高性能喷射混凝土施工过程中，当发现支护体系变形、开裂等险情时，应及时采取补救措施；当可能出现溜坍等危危险情时，应立即将人员和设备撤离掌子面危险区。

9.2 环保要求

- 9.2.1** 铁路高性能喷射混凝土施工过程中，污染物的排放应符合国家和地方现行相关标准。
- 9.2.2** 铁路高性能喷射混凝土用原材料的运输和储存应使用密闭容器或采取遮盖措施，外加剂的运输、储存应使用专用容器。
- 9.2.3** 铁路高性能喷射混凝土应优先采用无碱速凝剂，且速凝剂原料中不得含有

氟离子等有害成分。

9.2.4 铁路高性能喷射混凝土施工过程中，应保证施工作业面的通风效果。

9.2.5 铁路高性能喷射混凝土施工作业时应采取有效措施降低粉尘浓度，使其达到卫生、安全标准要求。

附录 A 铁路高性能喷射混凝土试件的成型方法

A.0.1 本方法适用于铁路高性能喷射混凝土抗压强度和耐久性能试件的成型。

A.0.2 试验用仪器和设备应符合下列规定：

1 试模：上口大、底部小的正方形钢制棱台体，上口尺寸不应小于 500 mm×500 mm，底部尺寸不应小于 450 mm×450 mm，高度不应小于 120 mm（制作抗渗试件试模的高度不应小于 170 mm）。试模用钢板厚度不应小于 4 mm，试模的一侧敞开，试模示意如图 A.0.2 所示。

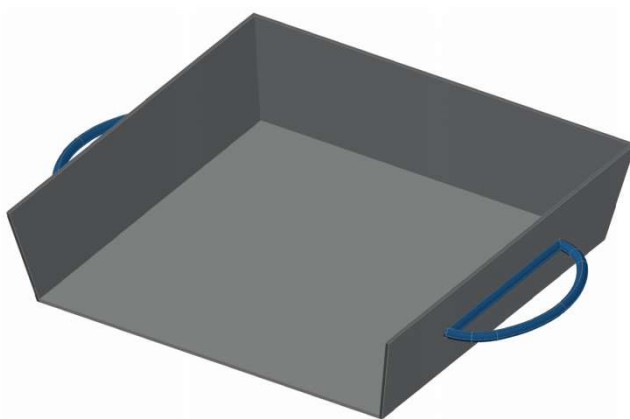


图 A.0.2 喷射混凝土试模

2 混凝土湿喷机：生产能力大于 5 m³/h，允许骨料最大粒径为 15 mm。

3 切割机：配备有冷却系统和夹紧装置，锯片应为水冷式金刚石锯或碳化硅锯。

4 钻芯机：配金刚石钻头。

A.0.3 试验环境应满足下列要求：

1 试验室温度应控制在 20℃±2℃，相对湿度应大于 50%。

2 标养室温度应控制在 20℃±1℃，相对湿度应大于 90%。

A.0.4 试验应按下列步骤进行：

1 将试模置于墙角或固定于墙面，敞开一侧朝下，使得试模与底面的夹角约为 80°。

2 启动混凝土湿喷机，调整喷射参数使混凝土喷射稳定，将喷头移至距试模 1.0 m～1.5 m 位置处，正对试模底部由下至上逐层将混凝土喷入钢试模内直至喷满为止。将喷满混凝土的试模水平放置，抹刀刮平混凝土表面，覆膜养护 24 h

后脱模。

3 将脱模后的试件移至温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度大于 90% 的标养室内养护 7 d。

4 养护结束后，切去试件四周 50 mm 范围内以及上表面凸出的混凝土后，将剩余试件加工成满足表 A.0.4 要求的混凝土试样。

5 加工制得的抗压强度、碳化深度、氯离子扩散系数、电通量、抗硫酸盐结晶破坏等级、抗冻等级和气泡间距系数试样即为喷射混凝土相应耐久性能测试用试块。

6 将加工好的 $\phi 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的抗渗等级试样居中放入上口内部直径为 175 mm、下口内部直径为 185 mm、高度为 150 mm 的圆台体试模中，采用聚合物水泥砂浆将试样与试模间的空隙充填密实成型，24 h 后脱模便可得到喷射混凝土抗渗等级测试用试块。

7 将加工好的混凝土试块移至标养室继续养护至规定龄期。

表 A.0.4 喷射混凝土力学性能和耐久性能试块尺寸

项目	试块尺寸 (mm)
抗压强度	100×100×100 或 $\phi 100 \times 100$
碳化深度	400×100×100
抗渗等级	$\phi 150 \times 150$
氯离子扩散系数	$\phi 100 \times 50$
电通量	$\phi 100 \times 50$
抗硫酸盐结晶破坏等级	100×100×100
抗冻等级	400×100×100
气泡间距系数	100×100×20

注：试块的尺寸公差应满足《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 的要求。

附录 B 铁路高性能喷射混凝土抗压强度测试方法

B.0.1 本方法适用于测试铁路高性能喷射混凝土的抗压强度。

B.0.2 抗压强度测试设备应满足现行《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 要求的压力试验机。

B.0.3 试件应在高性能喷射混凝土大板上切割或钻芯取得，试件的制作应按附录 A 规定的方法进行。

B.0.4 高性能喷射混凝土 1 d 早期强度试验，试件宜在到达龄期前 2 h 进行加工。28 d 抗压强度应在标准条件下养护 7 d 后进行试件加工。

B.0.5 抗压强度试验应符合下列规定：

1 立方体试件尺寸的允许偏差：边长不应超过 1 mm，直角不应超过 2°；圆柱体试件尺寸的允许偏差：端面不平整度为每 100 mm 长度不应超过 0.05 mm，垂直度不应超过 2°。

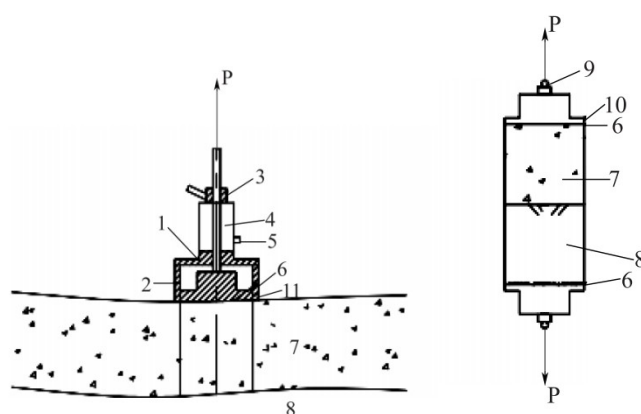
2 28 d 抗压强度试验方法应按现行《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081 中抗压强度试验执行，测得值即为高性能喷射混凝土试件的抗压强度。

附录 C 铁路高性能喷射混凝土粘结强度测试方法

C.0.1 本方法适用于测试铁路高性能喷射混凝土的粘结强度。

C.0.2 粘结强度测试设备应满足现行《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 要求的拉力试验机。

C.0.3 高性能喷射混凝土与岩石或硬化混凝土的粘结强度试验（图 C.0.3）应采用现场钻芯拉拔试验或对钻取的芯样进行直接轴拉试验。



1—基座；2—支撑装置；3—螺母；4—千斤顶；5—泵；6—胶黏剂；
7—高性能喷射混凝土；8—基层；9—接头；10—支架；11—夹具

表 C.0.3 高性能喷射混凝土粘结强度试验示意图

C.0.4 高性能喷射混凝土现场钻芯拉拔试验应符合下列规定：

1 钻芯拉拔法应在现场结构上直接钻芯拉拔，每个测区应钻芯 3 处，钻芯到结构边缘距离不应小于 150 mm。

2 钻芯试件的直径可取 50 mm~60 mm，钻芯深入基层的厚度不应小于 20 mm。

C.0.5 高性能喷射混凝土芯样直接轴拉试验应符合下列规定：

1 芯样直接轴拉试验试件应提前 3 d 进行钻芯，并同条件养护至规定龄期；

2 芯样的直径可取 50 mm~60 mm，试件的高度不应小于直径的 2 倍，任一试件表面至粘结面的距离不应小于直径的 0.5 倍。

C.0.6 进行钻芯拉拔试验和芯样直接轴拉试验的加荷速率应为 1.3 MPa/min~3.0 MPa/min，加荷时应确保试件轴向受拉。

C.0.7 试验中试件破坏面在高性能喷射混凝土与受喷面的结合处时，试验结果有效；破坏面在混凝土内部或为拉伸夹具与胶黏剂之间的界面等其他情况时，试

验结果无效。

C.0.8 高性能喷射混凝土粘结强度应符合下列规定：

1 高性能喷射混凝土粘结强度应按下列公式计算：

$$f_s = \frac{F_{\max}}{A} \quad (\text{式 C.0.8})$$

式中：

f_s ——高性能喷射混凝土粘结强度（MPa）；

$F_{\max}$ ——试验最大荷载（N）；

A ——粘结面的面积（mm²）。

2 高性能喷射混凝土粘结强度值应为三个试件测值的算术平均值，其中三个试件的最小值不应低于本标准中规定值的 75%。当三个计算值中的最大值或最小值与中间值之差大于中间值的 15%时，取中间值作为该组试件的试验值；二者与中间值之差均大于中间值的 15%时，该组试件的试验结果无效。

C.0.9 高性能喷射混凝土粘结强度试验报告应包含试件编号、试件尺寸、养护条件、试验龄期、加荷速率、最大荷载、计算的粘结强度以及对试件破坏形式的描述。

附录 D 铁路高性能喷射混凝土抗弯强度测试方法

- D.0.1** 本方法适用于测试铁路高性能喷射混凝土的抗弯强度。
- D.0.2** 抗弯强度测试设备应采用测量精度不低于 1.0%，并且能够等速位移控制的液压伺服万能试验机；测量精度不低于 0.01 mm 的挠度测量位移传感器（包括电阻位移计或 LVDT 位移计及配套的电测信号放大仪器）；测量精度不低于 0.1 kN，量程与试验要求相匹配的荷载测量传感器；以及数据采集系统。
- D.0.3** 高性能喷射混凝土抗弯强度测试试件应为从高性能喷射混凝土大板上切割成 75 mm×125 mm×600 mm 的混凝土梁，每组试件应至少制备 3 个试件。切割后的试件应立即放置于水中，养护时间不少于 3 d。
- D.0.4** 高性能喷射混凝土抗弯强度测试应在试件标准养护至 28d 进行，试件表面应保持湿润，加载方向应垂直于试件上表面，试验的跨度为 450 mm(图 D.0.4)。

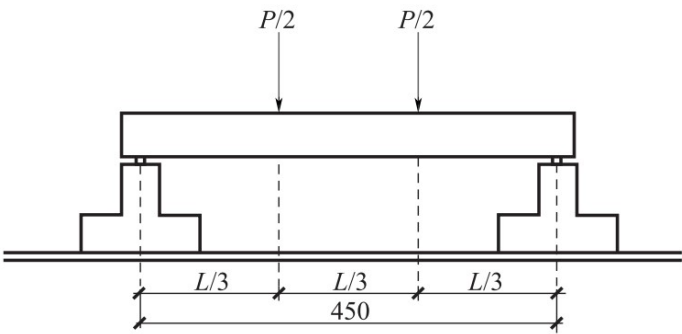


表 D.0.4 高性能喷射混凝土梁加载受力方式

- D.0.5** 试验加载过程中，应对高性能喷射混凝土梁的跨中挠度进行测定。梁的挠度达到 0.5 mm 前，跨中变形速度应控制在 (0.25 ± 0.05) mm/min。梁的挠度达到 0.5 mm 后，跨中变形速度可增至 1.0 mm/min。试验过程中应连续记录梁跨中的荷载-挠度曲线（图 D.0.5）。试件在受拉面跨度三分点以外断裂时，该试件试验结果无效。

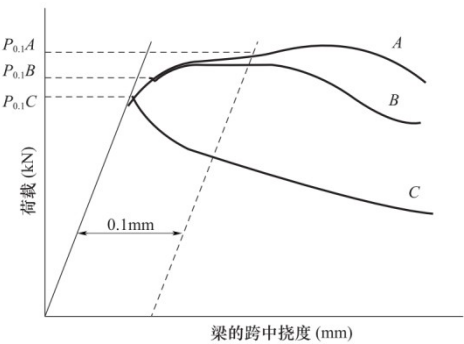


表 D.0.5 荷载-挠度曲线

D.0.6 试验装置的支座与加荷点处均应设置半径为 10 mm~20 mm 的圆棒，跨中挠度达 4.0 mm 时，试验即可结束。

D.0.7 高性能喷射混凝土试件的抗弯强度应按下列方法确定：

- 1 将荷载—挠度曲线的线性部分平行移动 0.1 mm 挠度值，平移 0.1 mm 挠度值范围内的荷载—挠度曲线上最初峰值点的纵坐标为试件峰值荷载（ $P_{0.1}$ ）。
- 2 据峰值荷载按下式计算高性能喷射混凝土抗弯强度：

$$f_c = \frac{P_{0.1}L}{bd^2} \quad (\text{式 D.0.7})$$

式中：

f_c ——高性能喷射混凝土抗弯强度值（MPa），精确至 0.1 MPa；

$P_{0.1}$ ——试件峰值荷载（kN）；

L ——梁试件支座间的跨距，取 450 mm；

b ——梁宽，取 125 mm；

d ——梁高，取 75 mm。

D.0.8 高性能喷射混凝土试件的抗弯强度应为三个试件计算值的算术平均值。三个计算值中的最大值或最小值与中间值之差大于中间值的 15% 时，取中间值作为该组试件的试验值；二者与中间值之差均大于中间值的 15% 时，该组试件的试验结果无效。

附录 E 铁路高性能喷射混凝土耐久性能测试方法

E.0.1 本方法适用于测试铁路高性能喷射混凝土的碳化深度、抗渗等级、氯离子扩散系数、电通量、抗盐类结晶破坏等级、抗冻等级和气泡间距系数。

E.0.2 试验用仪器和设备应符合下列规定：

1 碳化深度试验设备：满足现行《混凝土碳化试验箱》JG/T 247 要求的碳化箱。

2 抗渗等级试验设备：满足现行《混凝土抗渗仪》JG/T 249 要求的抗渗仪。

3 氯离子扩散系数试验设备：满足现行《混凝土氯离子扩散系数测定仪》JG/T 262 要求的氯离子扩散系数测定仪。

4 电通量试验设备：满足现行《混凝土氯离子电通量测定仪》JG/T 261 要求的氯离子电通量测定仪。

5 抗盐类结晶破坏等级试验设备：满足现行《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 要求的干湿循环试验箱。

6 抗冻等级试验设备：满足现行《混凝土抗冻试验设备》JG/T 243 要求的快速冻融试验箱。

E.0.3 试件应在高性能喷射混凝土大板上切割或钻芯取得，试件的制作应按附录 A 规定的方法进行。

E.0.4 将养护至规定龄期的混凝土试块取出，按照现行《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 和《铁路混凝土》TB/T 3275 规定的方法分别测试喷射混凝土的碳化深度、抗渗等级、氯离子扩散系数、电通量、抗盐类结晶破坏等级、抗冻等级和气泡间距系数。

附录 F 铁路高性能喷射混凝土回弹率测试方法

F.0.1 本方法适用于工程现场测试铁路高性能喷射混凝土的回弹率。

F.0.2 试验用设备和工具应符合下列规定：

1 湿喷设备：满足现行《铁路大型施工机械 隧道混凝土湿喷机》TB/T 3525 的湿喷机。

2 接收回弹料工具：满足现行《铁路货车篷布》TB/T 1941 的篷布，面积宜为隧道初支循环进尺喷射混凝土投影面积的 1.5~2 倍。

3 起吊设备：现场施工用挖机。

4 运输设备：现场施工用渣土车。

5 称重设备：现场拌合站或钢筋加工厂用机械秤，精度为 10 kg。

F.0.3 试验应按下列步骤进行：

1 爆破清渣完成后，应将掌子面下方进行快速平整处理。

2 用篷布覆盖拟喷射区域投影下方地面。

3 喷射施工前，记录湿喷机速凝剂桶中的液面高度并测试速凝剂的比重。

4 按照本标准相关规定要求进行喷射混凝土施工作业。

5 喷射施工结束后，记录湿喷机车载速凝剂桶中的液面高度。

6 利用挖机和运渣车将掉落在篷布上的回弹料进行收集和称重。

F.0.4 回弹料质量与总喷射拌合物和消耗速凝剂质量之和的百分比即为高性能喷射混凝土的回弹率，计算结果精确至 0.1%。

本标准用词说明

执行本标准条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行中区别对待。

1. 表示很严格，非这样做不可的用词：

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用词：

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. 表示允许有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

1. 《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086
2. 《喷射混凝土应用技术规程》JGJ/T 372

中国工程建设标准化协会标准

铁路高性能喷射混凝土施工标准

T/CECS×××:××××

条 文 说 明

制 订 说 明

《铁路高性能喷射混凝土施工标准》CECS×××: 20××, 经中国工程建设标准化协会××年××月××日以第××号公告批准发布。

本规程编制过程中, 编制组进行了广泛而深入的调查研究, 总结了我国铁路隧道高性能喷射混凝土应用的实践经验, 同时参考了国内外相关技术标准, 通过调研分析和现场试验取得了铁路高性能喷射混凝土应用的关键参数。

为便于扩大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定, 《铁路高性能喷射混凝土施工标准》编制组按章、节、条顺序编制了本规程中的条文说明, 对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是, 本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力, 仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

1 总 则

1.0.1 长期以来,喷射混凝土的耐久性劣化问题并未得到工程技术人员的足够重视,现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 和铁道行业标准《铁路混凝土结构耐久性设计规范》TB 10005 中未对喷射混凝土的耐久性能提出明确要求,因喷射混凝土后期强度倒缩、抗渗性、抗冻性和耐腐蚀性不足所导致的隧道病害问题时有发生,这与铁路隧道复合式衬砌设计理念中的喷射混凝土须承担施工阶段全部荷载和运营阶段主要荷载的功能定位极不相符。随着我国铁路建设重心逐步向西南地区转移,铁路线路隧道占比逐年攀升,为有效提高隧道支护结构的安全性和耐久性,铁科院、北京交大、东南大学等单位依托“十四五”国家重点研发计划、国铁集团科技研发计划课题系统开展了喷射混凝土高性能化研究工作,取得了一系列创新成果。因此,为提高铁路喷射混凝土耐久性,保证工程质量,推广铁路高性能喷射混凝土技术,特制定本标准。

1.0.3 本条规定了本标准与其他标准规范之间的关系。在实际工程应用中,本标准作出明确规定的,执行本标准要求,未作出明确规定的,执行国家、行业和国铁集团现行有关标准要求。

2 术 语

2.0.1 本条主要根据《高性能混凝土技术条件》GB/T 41054、《喷射混凝土应用技术规程》JGJ/T 372，以及喷射混凝土的施工特点对高性能喷射混凝土进行定义。简而言之，高性能喷射混凝土便是指采用喷射工艺的高性能混凝土。

2.0.2 本条是在《喷射混凝土应用技术规程》JGJ/T 372 的基础上，结合喷射混凝土实际情况，对回弹率的定义进一步的优化完善。值得注意的是，定义中所消耗速凝剂的质量可通过喷射混凝土回弹率测试前后速凝剂的质量之差算出，其中消耗的液体速凝剂的质量等于液体速凝剂的密度乘以测试前后吨桶体积之差。

2.0.3 众多研究人员发现，喷射混凝土中掺加一定量的硅灰能够提高拌合物稳定性、长期力学性能和密实度。然而，鉴于粉体硅灰密度较轻且比表面积较大，常规搅拌站筒仓式下料方式并不顺畅，且搅拌难以充分。为此，铁科院等有关单位提出将粉体硅灰通过一定的技术措施变成液体硅灰，即硅灰浆，有效解决了粉体硅灰下料困难和搅拌不充分的问题。本条给出了硅灰浆的定义。

2.0.4 随着大型湿喷机械在铁路、公路和水利工程的普及推广，喷射混凝土普遍采用液体速凝剂。然而，液体速凝剂自身存在稳定性不足、固含量偏低、运输成本高、凝结时间不够快、早期强度发展缓慢等问题，同时液体速凝剂中额外水分的加入还会对喷射混凝土凝结时间、力学性能和耐久性能产生不利影响。为解决超大埋深富水隧道喷射混凝土施工困难、回弹率高等系列问题，铁科院技术人员研发了基于无碱粉状速凝剂的新型湿喷混凝土技术。本条参照《喷射混凝土用速凝剂》GB/T 35159 给出了无碱粉状速凝剂的定义。

3 基本规定

3.0.3 为了保证喷射混凝土施工质量，有必要在正式施工前开展工艺性试验，其目的是检验施工机具和施工工艺能否满足设计使用要求。工艺性试验的主要内容包括：湿喷设备参数设定、喷射混凝土配合比与湿喷设备的匹配性、喷射步骤流程和喷射施工控制要点的确定等，通过工艺性试验评估和总结，及时修订完善作业指导书，为后续正式施工提供指导性建议，保证施工过程科学合理。

3.0.4 根据《铁路混凝土结构耐久性设计规范》TB 10005 修订版（2024 年）的规定，喷射混凝土的强度等级应根据所处环境类别和作用等级进行划分，具体包括 C30、C35、C40、C45 和 C50 这 5 个等级。

3.0.5 公路工程隧道喷射混凝土的 1 d 抗压强度要求不低于 7 MPa，铁路工程隧道喷射混凝土的 1 d 抗压强度要求不低于 10 MPa。编制组通过大量室内和现场试验，验证了铁路高性能喷射混凝土的 1d 抗压强度完全能够满足不低于 12 MPa 的技术要求，故规定此要求。

4 施工准备

4.1.1 为保障喷射混凝土施工质量，施工前需要编制喷射专项施工方案，内容包括：施工前准备工作、设备进场和安置、混凝土的制备和运输、专业技术人员的配备、现场喷射作业安排和养护等。

4.1.2 喷射混凝土的质量受喷射机械操作手的影响很大，喷射施工操作应选择具有丰富经验的操作手。在喷射混凝土施工前，应对施工人员进行培训，且操作手进行试喷混凝土性能合格后方可进行喷射混凝土施工。合格的操作手是保证喷射混凝土施工质量的前提。

4.2.2 喷射混凝土施工前的现场准备工作对于保证施工质量至关重要，本条给出了现场准备过程中需注意的具体事项要求。

4.2.3 隧道开挖后掌子面出水问题直接制约着喷射混凝土作业，因此对于出水点不甚密集的掌子面，喷射混凝土施工前务必做好治水专项工作。

4.3.1 采用集中强制式搅拌方式生产有利于控制喷射混凝土拌合物的稳定性。

4.3.2 粗细骨料中的含水率对喷射混凝土单方用水量和水胶比计算有直接影响，因此需要定期测试骨料的含水率，及时调整施工配合比中的用水量和骨料用量。

4.3.3 足够的搅拌时间可以保证喷射混凝土质量的均匀性，同时为确保纤维在喷射混凝土中的分散效果，搅拌时间还需要适当延长。

4.3.6 运输过程中加水将直接影响喷射混凝土的水胶比和拌合物状态，容易出现离析、泌水等问题，造成喷射机械堵管、堵泵等问题，同时影响喷射混凝土的凝结速度和强度发展。

5 施工机具

5.1.1 为了保证喷射混凝土质量，减少施工回弹率，提高作业效率，施工机具需要根据工程特点、围岩条件、开挖方法、喷射方量、循环节拍、技术经济性等条件进行合理选择。其中湿喷台车的理论喷射高度是指喷射臂举升至最高处喷嘴距离地面的垂直高度。按照经验来看，最大理论喷射高度一般为隧道实际高度的1.4~1.5倍，从而确保设备能够覆盖尽可能大的喷射范围，避免反复移动设备。

5.2.2 隧道轮廓尺寸越大，喷射混凝土设计方量越高，需要采用较大理论喷射方量的湿喷设备进行施工。通过走访调研，目前单洞双线隧道用湿喷台车的最大理论喷射方量一般不小于 30 m³/h，单洞单线隧道和横洞等辅助坑道用湿喷台车的最大理论方量一般不小于 20 m³/h。

5.2.3 稳定的气压和足够的供气量是保证喷射混凝土施工密实度的关键因素，因此本条规定了当施工现场不具备外接气源条件时，湿喷台车需要配备空压机。其中，自带空压机的湿喷台车的风压较隧道风管供风稳定，喷射效果较好。

5.2.4~5.2.5 速凝剂的掺量直接影响喷射混凝土的施工效果，因此无论是液体速凝剂还是粉状速凝剂，其计量和输送系统均应该具备流量计量和自动调节功能。

5.2.6 喷射混凝土施工过程中，混凝土输送软管经受骨料的反复磨损和压力，为确保施工可靠性和安全性，本条根据喷射混凝土泵送压力和骨料最大粒径，规定了输送软管的承压能力和管径尺寸。

6 混凝土制备

6.1.1 本条对喷射混凝土用水泥品种和强度进行了规定。硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥中含有较多的铝酸三钙和硅酸三钙，凝结时间较快，且与速凝剂的适应性较好。此外，由于喷射混凝土强度受到原材料性能的影响较大，为更好的保证喷射混凝土的质量，建议优先采用强度等级不低于 42.5 级的水泥。

水泥中的碱含量过高不仅容易引发碱—骨料反应，还会增大混凝土的开裂风险。美国某单位科研人员对此做过大量工程调查和试验研究，发现在有的采用碱活性骨料和高碱水泥并经长期使用后出现开裂的露天混凝土墙面板中，开裂处没有碱—骨料反应产物，混凝土也没有膨胀，这说明开裂是由于高含碱量引起的收缩而非碱—骨料反应。其他国家也有类似的研究和工程案例。国外有研究表明，水泥熟料中 Na_2O 和 K_2O 的存在会影响水泥矿物的水化，提高水泥早期强度，但不利于水泥后期强度的保持与增长；同时会改变水化产物的形貌，增大硬化水泥浆的干缩，从而增加其开裂敏感性。我国有学者通过试验研究证明，碱会增大水泥浆体的收缩，氢氧化钾比氢氧化钠更严重。此外，日本和加拿大的相关研究都认为碱是影响水泥与外加剂相容性的因素之一。因此，为防止混凝土开裂，即便骨料的碱活性较低，也最好不要采用碱含量（ Na_2O 当量）超过 0.60% 的水泥。

硫酸盐类化学腐蚀环境下，水泥熟料中的铝酸三钙含量越高，越容易反应生成钙矾石和石膏，造成的体积增大对硬化水泥浆产生破坏作用，因此需要进一步限制水泥熟料中的铝酸三钙含量。

6.1.2 为兼顾喷射混凝土的凝结速度、早期强度和后期耐久性能，喷射混凝土用矿物掺合料建议为硅灰或硅灰浆，当隧道围岩条件较为理想且无早强要求时，也可掺入粉煤灰或矿渣粉。此外，当混凝土结构处于温度低于 15℃ 的硫酸盐类化学腐蚀环境下时，石灰石粉极易与外界硫酸根离子反应发生碳硫硅钙石（TSA）破坏，因而在此条件下需要严格限制石灰石粉的使用。

6.1.3 喷射混凝土建议优先采用中砂。砂的细度模数过小容易导致喷射混凝土收缩过大，出现开裂渗漏问题，砂的细度模数过大则会影响喷射混凝土的拌合物性能和实际喷射效果。河砂的含泥量和泥块含量过大均会对喷射混凝土的拌合物性能和实体强度产生不利影响，因此本条根据《建设用砂》GB/T 14684 从严规定

含泥量和泥块含量的限值要求。

机制砂中的石粉一定程度上能够改善喷射混凝土的和易性,降低胶凝材料用量。但过量的石粉容易导致喷射混凝土发黏,工作性变差。因此,为降低石粉对喷射混凝土性能的不利影响,本条根据混凝土强度等级和亚甲蓝值结果对机制砂的石粉含量上限值进行规定。

6.1.4 粗骨料的最大粒径对喷射混凝土的拌合物性能和施工回弹率影响较大。为了防止混凝土输送管道堵塞和降低回弹,粗骨料的最大粒径一般为 10 mm~12 mm,考虑到《建设用卵石、碎石》GB/T 14685 中规定对于 5~10 mm 单粒粒级,允许小于等于 15%比例的粒径超过 10 mm,因此本条规定喷射混凝土的最大公称粒径为 10 mm。

6.1.5 为加速喷射混凝土的凝结、硬化,提高其早期强度和减少回弹率,喷射混凝土施工时普遍添加速凝剂。速凝剂掺量过高,会影响喷射混凝土的后期强度。因此本条对无碱液体速凝剂和无碱粉状速凝剂的掺量和性能均作出了明确规定。

为使喷射混凝土获得合适的拌合物性能、稳定的力学性能和良好的耐久性能,喷射混凝土中还可添加减水剂、保坍剂、防腐剂和引气剂等外加剂。上述外加剂的掺量应该通过试验确定,性能应符合现行有关标准规定,最重要的是与速凝剂之间具有良好的相容性。

6.1.7 本条分别对喷射混凝土用钢纤维和合成纤维的性能作出规定。纤维的长度、直径、长径比和抗拉强度直接决定了其在喷射混凝土中的增强、增韧效果。对于钢纤维而言,长度太短和直径太大导致增强作用不明显,长度太长容易影响喷射混凝土拌合物性能和喷射效果,直径太小则容易在搅拌过程中折断或结团。

6.2.2 喷射混凝土需要有足够的胶凝材料增加浆体体积来改善喷射混凝土的工作性。欧洲规范从耐久性出发,规定喷射混凝土的最大水灰比为 0.55,最小胶凝材料用量为 300 kg/m³。日本规范规定喷射混凝土的最大水胶比为 0.65,最小胶凝材料用量为 360 kg/m³。北欧挪威规范规定喷射混凝土的水胶比按环境侵蚀性的强弱进行划分,最大水胶比为 0.60,最小胶凝材料用量为 360 kg/m³。

本条是在《喷射混凝土应用技术规程》JGJ/T 372、《铁路隧道湿喷混凝土施工技术规程》Q/CR 9249 等规范的基础上,结合大量科研数据和工程实践经验,规定的高性能喷射混凝土的配合比参数限值。

6.4.1 为确保喷射混凝土试件的力学性能与喷射实体相接近,需在施工现场进行大板喷射,然后试件从大板试样中钻芯或切割得到。因此,本条给出了喷射混凝土力学性能试件的试件制作方法附录。

6.4.3 喷射混凝土抗压强度除应进行 28 d 强度测试,必要时应额外测试 7 d 强度。当喷射混凝土有早期(1 d 以前)强度要求时,1 d 早期强度试件可直接通过切割或钻芯取得,更早龄期(3 h 或 8 h)喷射混凝土无法进行钻芯或切割时,可采用拉拔法或贯入法进行强度测试,测强曲线需要提前标定。

6.4.4 粘结强度是保证喷射混凝土与受喷面共同承担和传递受力的基础。德国规定用于隧道、洞室等地下工程喷射混凝土粘结强度 6 个试件的平均值在 1.5 MPa 以上,日本要求最小值不得低于 1.0 MPa。本标准根据 EFNARC 《European Specification for Sprayed Concrete》以及现行《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB 50086 对喷射混凝土粘结强度测试方法,以及喷射混凝土与岩石和混凝土基底的粘结强度进行了规定。

6.4.5 抗弯强度决定了喷射混凝土横截面的首次发生断裂的负荷,韧性决定负荷重新分布和断裂发展期间能量吸收的特性。在较大的含黏土的剪切带、松动岩石区和易产生高应力的岩石区等特殊情况下,喷射混凝土的韧性和抗弯强度极为重要。目前,欧美国家对喷射混凝土的弯曲韧性测试方法可分为梁试件弯折试验和板试件弯曲试验。梁试件弯折试验常用来测定混凝土的极限强度、极限应变以及残余抗弯强度等级等。板试件弯曲试验需直接制作板试件来研究喷射混凝土的能量吸收等级。与梁试件相比,板弯曲试验更适合于网状强化钢筋的测试,平板测试时减少离散性,符合喷射混凝土的实际工作形式,能更客观、全面、确切地反映喷射混凝土的实际工作性能。本条给出了喷射混凝土抗弯强度试验方法和最小抗弯强度限值规定。

6.5.1~6.5.8 高性能喷射混凝土的耐久性能执行《铁路混凝土结构耐久性设计规范》TB 10005 修订稿(2024 版)有关规定。

7 喷射作业

7.2.2 按“先墙后拱、自下而上”的顺序进行喷射作业，有助于保证喷射混凝土施工质量，可避免松散的回弹料沾污尚未喷射的受喷面，同时能够起到下部喷层对上部喷层的支托作用，减少喷射混凝土回弹。

7.3.4 由于有钢架段落容易出现混凝土喷射不密实或空洞现象，因此在喷射过程中需要尤其注意喷射部位和喷射顺序的选择。

7.3.5~7.3.6 考虑到高性能喷射混凝土的凝结速度和强度发展明显优于普通喷射混凝土，因此边墙和拱部高性能喷射混凝土的一次喷射厚度均比《铁路隧道湿喷混凝土施工技术规程》Q/CR 9249 中的规定值要大一些。

7.3.8~7.3.10 根据“十四五”国家重点研发计划课题“川藏铁路复杂环境下隧道初支高性能喷射混凝土关键材料与应用”的研究成果，分别给出了渗水围岩地段、高地应力和软岩大变形地段、高地温地段高性能喷射混凝土的施工作业要点和技术方案。

7.3.12 由于液体速凝剂和粉状速凝剂的高性能喷射混凝土湿喷台车在操作方面略有差异，因此给出了 2 种湿喷台车在施工结束后的设备清洗顺序。

7.4.1~7.4.2 喷射混凝土由于胶凝材料用量较高、砂率偏高且掺加了速凝剂，收缩变形要比普通混凝土大。因此，喷射混凝土施工完毕后需要进行一定时间的保湿养护处理，养护设备可采用二衬拆模后的喷淋装置。

7.5.2 本条规定了湿喷台车料斗及输料管内混凝土在作业中断时的处理方法，可以根据中断时间以及混凝土当时的状态采取相应的处置措施。

7.5.3 工程实践表明，高性能喷射混凝土终凝 2h 后，喷射混凝土层与层之间的粘结强度以及喷射混凝土与围岩之间的粘结强度足以抵抗下一循环爆破作业产生的扰动力。

8 质量检验

8.1.2 目前国内对喷射混凝土的性能要求大多仅限定为强度,本标准结合高性能喷射混凝土的性能特点,在参照日本土木学会标准《喷射试验方法标准》JSCE-F565—2005、《喷射混凝土应用技术规程》JGJ/T 372—2016、《铁路隧道湿喷混凝土施工技术规程》Q/CR 9249—2020 等标准的基础上,本节对高性能喷射混凝土的性能检验项目和频次要求作出规定。

8.1.4 喷层厚度是评价喷射混凝土工程质量的重要项目之一。实际工程中,经常发生因厚度不足而引起混凝土开裂、空鼓和剥落的现象,或是喷层过后导致喷射混凝土超耗偏高以及初支侵限等问题。

8.2.1 喷射混凝土平整度也是评价喷射混凝土工程质量的重要项目之一。平整度不达标往往会影响到后续防水板铺设,进而引起二衬脱空或厚度不足,需要二次返工进行处理,必须高度重视。因此对于有钢架的掌子面,建议采用埋钉、钢架和连接筋、锚杆头作为参考点进行平整度控制;对于没有钢架的掌子面,建议采用埋钉和锚杆头作为参考点进行平整度控制。

9 安全与环保

9.1.2 喷射混凝土紧接开挖工作，隧道边墙以上及开挖面松动的危石需处理后方能保证后续工作的安全，防止危石掉落造成人员和机械伤害。

9.1.3 工作面的照明对施工安全来说非常重要，采用普通探照灯或 LED 照明灯时，亮度最好不小于 30lx，危险地段照明亮度也需要进一步提高。

9.1.4 喷射设备、水箱、风管和注浆罐等都属于承受压力的设备，使用前需做承压试验，防止发生崩裂事故。

9.1.7 钢纤维的两端容易扎伤人，因此在掺加钢纤维的高性能喷射混凝土制备、施工以及施工结束后下一工序施工时均需要做好防护措施。

9.2.3 有碱速凝剂不仅对喷射混凝土的强度和耐久性有不利影响，而且还会污染环境，在施工过程中对人体造成危害。同样，氟离子对人体和环境都会有不利影响，因此高性能喷射混凝土建议采用无氟的无碱速凝剂。

9.2.4 增加掌子面新鲜空气，稀释有毒有害气体及粉尘，对于保证工人职业健康具有重要意义。