

文章编号: 1001-4632 (2004) 01-0141-04
成果简报 ·

高原多年冻土区隧道湿喷混凝土施工技术

杨安杰, 周德明

(中铁五局 技术开发部, 贵州 贵阳 550003)

摘 要: 在青藏铁路昆仑山隧道成功使用湿喷混凝土作为临时支护。通过试验和经济比选确定选用 A 类防冻剂、D 类速凝剂和聚丙烯纤维材料, 确定水泥与骨料的比为 1 3.4, 水泥用量在 $470 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \sim 480 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 砂率为 60%; 水灰比为 0.42~0.47。在高原缺氧环境下使用适用于低温环境的喷射机械, 采取温控措施, 确保喷射时拌和物温度不低于 10℃, 加强检查, 可以保证高原冻土隧道混凝土喷射质量。

关键词: 高原冻土; 湿喷混凝土; 配合比设计; 施工技术

中图分类号: U455.4 **文献标识码:** B

青藏铁路昆仑山隧道围岩破碎, 冻土因开挖暴露时间过长会产生融坍。采取何种支护结构形式及对冻土围岩进行封闭, 并确保足够的支护强度, 是事关昆仑山隧道施工安全、质量、工期的重要环节。经过大量的室内试验和现场试验研究, 复配了适宜的外加剂, 优选了适合的外掺料, 确定了合理的施工工艺, 证实了湿喷混凝土作为临时支护在高原多年冻土区隧道施工中的可行性。

1 喷射混凝土主要作用

喷射混凝土主要作用在于:

- (1) 填充出露的节理和裂隙, 提高围岩整体的强度和稳定性;
- (2) 通过接触面的附着力和剪力, 传递岩石松散带的荷载到相邻稳定岩体;
- (3) 当喷射混凝土与岩石间粘接力较低时, 连续的混凝土层可起到耐张拉、耐弯曲膜的作用;
- (4) 及时封闭冻土岩面, 减少冻土与空气的热交换, 从而防止因暴露时间过长引起的融坍。

2 在冻土隧道中采用湿喷混凝土对材料的要求

2.1 防冻剂

选择与水泥和速凝剂相容性好的防冻剂复合使用, 可以改善喷混凝土的工艺性能, 提高喷混凝土的早期强度, 并能保证在规定时间内获得足够的抗冻临界强度, 确保混凝土不受冻害。为此, 选用了 A, B, C, D 四个品种的防冻剂进行对比试验, 通过经济技术比较, 选用 A 品种防冻剂, 该防冻剂的基本性能指标见表 1。

表 1 A 防冻剂基本性能指标

试验项目	性能指标	
	标准要求	试验结果
减水率 (%) 不小于	8	10~20
泌水率 (%) 不大于	100	91
凝结时间差/min	初凝	-35~+40
	终凝	-30~+50
温度范围/℃	-5~-15	-5~-15
抗压强度比/%	R28	115~105
	R-7+28	115~110
	R-7+56	130~115
90 天收缩率比/% 不大于	120	73~92
渗水高度比/% 不大于	100	45~53
300 次冻融损失性能指标/% 不大于	100	60~85
耐 SO_4^{2-} 侵蚀能力/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	4 000	极限可达 5 000
对钢筋锈蚀作用	无	无
Cl^{-} 渗透性能不大于/库仑	1 000	790~1 000
抗裂性能, 不大于/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.5	0.09~0.22
与水泥及速凝剂的适应性	可与祁连山牌 32.5R 普硅水泥和 D 液体速凝剂匹配使用	

收稿日期: 2003-09-16

作者简介: 杨安杰 (1963—), 男, 贵州贵阳市人, 高级工程师。

基金项目: 中铁王合字 (2001) 17 号。



2.2 速凝剂

施工中必须解决速凝剂在低温下能有效使用的问题。选择了 A, B, C, D 四种液体速凝剂与 A, B, C, D 四种防冻剂进行复合使用试验, 经试验选择 D 液体速凝剂加热至 40 与 A 防冻剂复合使用能满足喷射混凝土对速凝剂的以下要求:

- (1) 混凝土混合物喷射至岩面上后其初凝时间在 3 min 以内, 终凝时间在 12 min 以内;
- (2) 碱性小, 粉尘小, 且对人体腐蚀性小;
- (3) 早期强度高, 后期强度与空白混凝土比, 损失不超过 30%, 8 h 后的强度不小于 0.3 MPa;
- (4) 一次喷射厚度较大, 回弹率小;
- (5) 在低温下使用不失效;
- (6) 混凝土硬化过程体积变化小;
- (7) 对钢筋无锈蚀作用。

D 液体速凝剂的主要性能指标见表 2。

表 2 D 液体速凝剂主要性能指标

主要指标	初凝时间 / min	终凝时间 / min	R_1 / MPa	28 d 抗压强度比 / %	细度筛余 / %	含水率 / %
标准要求	3	10	8	75	15	2
试验结果	2.5	10	11.5	91	9.8	1.1

2.3 复合材料

因为是在冻土围岩上进行喷射施工, 为增加喷射混凝土与围岩的粘接强度, 必要时考虑在喷射混凝土中掺加增强纤维材料, 通过试验和经济技术比较, 选用聚丙烯纤维网。

3 配合比试验

3.1 设计原则

喷射混凝土配合比设计必须满足下列要求:

- (1) 满足强度及其它物理性能的设计要求;
- (2) 与基材、钢筋等有良好的粘聚性, 混凝土密实性高;
- (3) 4 h ~ 8 h 后强度应具有能控制地层变形的能力;
- (4) 必须能向上喷射到指定的厚度, 且回弹损失小;
- (5) 有良好的耐久性;
- (6) 扬尘少;
- (7) 施工顺利, 不发生管道堵塞或喷射面流淌

坍落。

3.2 主要参数选择

(1) 胶骨比

常用胶骨比取水泥 骨料在 1 4.0 ~ 4.5 之间, 每立方米混凝土水泥用量通常以 375 kg ~ 400 kg 为宜。在高原多年冻土中进行喷射混凝土施工中水泥用量过少, 不能满足早期强度要求, 特别是难以达到抗冻临界强度的要求, 通过大量的室内和现场试验确定了胶骨比为水泥 骨料 = 1 3.4, 水泥用量在 $470 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \sim 480 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间。

(2) 砂率

较小的砂率使喷射混凝土的水泥用量少, 强度高, 收缩小。较大的砂率有利于吸收二次喷射时的冲击能, 回弹小, 但强度偏低, 收缩大。综合权衡砂率大小所带来的利弊, 经过试验确定砂率为 60%。

(3) 水灰比和用水量

水灰比是影响喷射混凝土强度的主要因素。当水灰比为 0.2 时, 水泥不能获得足够的水分与其水化, 硬化后有一部分未水化的水泥质点。当水灰比为 0.4 时, 水泥有适宜的水分与其水化, 硬化后形成致密的水泥石结构。当水灰比为 0.6 时, 过量多余的水蒸发后, 在水泥石中形成毛细孔, 如图 1 所示。当水灰比适宜时, 喷射混凝土表面平整, 呈水亮光泽, 粉尘和回弹均较少。试验表明, 在寒冷条件下, 适宜的水灰比值为 0.4 ~ 0.5, 如偏离这一范围, 不仅降低喷射混凝土强度 (如图 2 所示), 也要增加回弹损失 (如图 3 所示)。通过试验确定水灰比为 0.42 ~ 0.47。

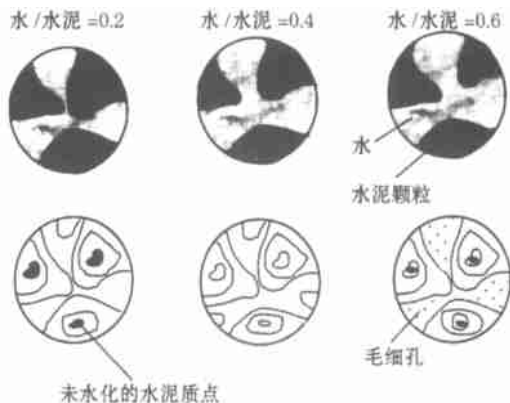


图 1 不同水灰比对水泥石结构的影响

3.3 配合比确定

根据以上基本参数, 采用正交设计初步配合比, 再对凝结时间、强度、耐久性等指标进行试验

确定其施工配合比为：

(1) C S G A D = 1 2.01 1.34 0.018 0.04，
W/C = 0.42；

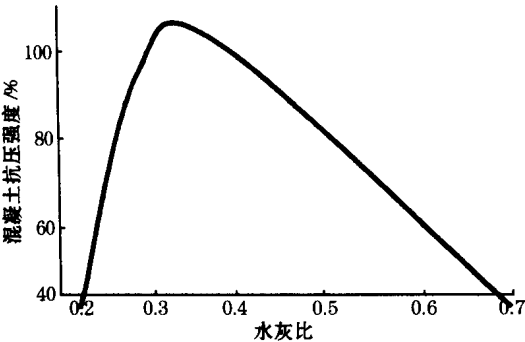


图 2 水灰比对强度的影响

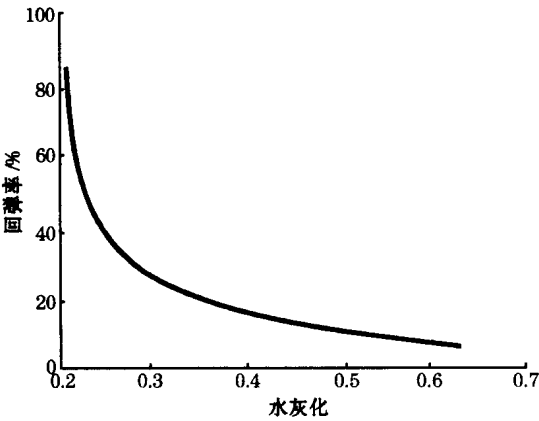


图 3 水灰比对回弹的影响

(2) C S G A D 聚丙烯纤维网 = 1 2.01 1.34
0.018 0.04 0.003 2，W/C = 0.47。

其试验结果见表 3。

表 3 配合比试验结果

配合比			
凝结时间	初凝 终凝	2 min 30 s 11 min 26 s	2 min 25 s 11 min 15 s
强度 / MPa	8 h	1.6	1.7
	1 d	3.3	3.8
	3 d	6.1	5.3
	7 d	8.9	10.6
	28 d	30.2	31.5
大板强度 / MPa	3 d	11.3	13.8
	7 d	19.3	21.2
	28 d	38.0	40.4
28 d 岩芯强度 / MPa		25.7	28.5
28 天粘结强度 / MPa		1.53	1.72
备注			
环境温度 - 13 ~ 0 ；水泥、防冻剂为正温；			
砂子加热温度 25 ；水温 50 ；			
速凝剂温度 40 ；			
最终拌合物温度 10 ；			
抗渗等级 S12			

4 喷射施工

4.1 喷射机械及喷射工艺

喷射机械选用适于高原地区缺氧、低压环境的改进型 TK-961 湿喷机。该机的主要特点是能在高寒缺氧情况下，实现低温启动，效率不下降，速凝剂计量添加系统能自动加热，并且健康、安全。主要技术性能指标见表 4。湿喷混凝土工艺流程见图 4。

表 4 TK-961 湿喷机主要技术性能指标

项目	指标
生产率/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	4~5
骨料最大粒径/mm	15
液体速凝剂掺量	0~7%
输料管内径/mm	51
适用混凝土	塑性混凝土，坍落度 80 mm~150 mm
工作压力/MPa	0.3~0.7
耗风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	10
最大输送距离/m	水平：30，垂直：20
机旁粉尘/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	<10
回弹	平均水平 <20%

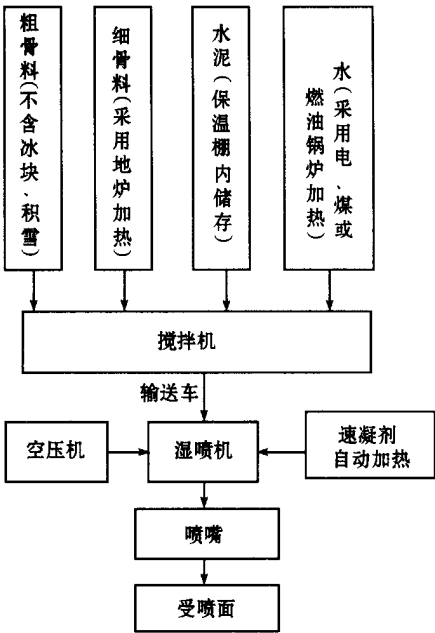


图 4 湿喷工艺流程图

4.2 喷射混凝土的拌制

由于气候寒冷，即使是在暖季施工，洞内气温均在 0 左右，要保证喷射混凝土的质量，就必须保证混凝土到达喷射机后有一定的温度，但过高的温度又可能引起冻土融坍。因此，喷射混凝土拌合物的温度必须严格控制，要求暖季施工出机温度控

制在 10 左右,而冬季施工的出机温度应控制在 13 ~ 17 。

(1) 原材料温度控制

暖季施工砂、石料不需加热,水温用锅炉加热到 35 即可,速凝剂加热到 40 ,防冻剂和水泥储存在保温库房内,保证正温使用,确保拌合物到达喷射机时的温度 10 。

冬季施工,砂、石料采用地炉加热,加热温度控制在 16 ~ 30 范围内,水采用锅炉加热,加热温度控制在 50 ~ 70 范围内,速凝剂加热到 45 ,这样可以确保拌合物到达喷射机后的温度 10 。

(2) 搅拌时间控制

搅拌时间比内地应适当延长,一般控制在 3 min。

(3) 坍落度控制

混凝土出机坍落度控制在 160 mm ~ 170 mm 之间。

5 施工质量检查与控制

5.1 原材料质量检查

每批材料进场后,必须进行质量检查,合格后方可使用。

5.2 配合比和拌合物的检查

每一工作班设专人检查配合比,严格按配合比

施工。检查拌合物的均匀性和坍落度及出机温度,严禁不合格的喷射混凝土拌合物运往喷射现场。

5.3 强度检查

每一工作班做检查试件一组,每喷射 20 m 制取喷射大板试件一组,同时钻取芯样试件一组,然后按《锚杆喷射混凝土施工支护技术规范》(CB50086-2001)进行检查、验收。

5.4 喷射厚度和回弹量检查

(1) 喷射厚度主要加强施工控制,一次喷射到预埋喷射厚度标识处。

(2) 回弹量主要通过加强喷射作业来控制,通过检查,回弹量边墙控制在 5 % ~ 15 % 内,拱部控制在 10 % ~ 20 % 以内。

6 结束语

在气温较低条件下,喷混凝土存在的主要困难:第一是成品速凝剂难以在低温下正常使用;第二是喷射管可能受冻、堵塞;第三是围岩面温度低,喷混凝土难以粘结牢固;第四,为获得较高的早期强度,混凝土到达喷射面后温度过高会引起冻土围岩融坍。通过对防冻剂、速凝剂的复配试验研究,现场试验制订出了合理的施工工艺,对原材料包括速凝剂进行加热使用,严格控制喷射混凝土拌合物到达喷射面的温度,取得了成功,为在高原多年冻土区隧道进行湿喷混凝土施工积累了经验。

Tunnel Wet Concrete-shot Technology in Permafrost Region

YANG An-jie, ZHOU De-ming

(Technical Development Department, Fifth Bureau of China Railway Construction Corporation, Guiyang Guizhou 550003, China)

Abstract: Through test and economic comparison, the wet concrete shot in tunnel which is used as a temporary support in Kunlunshan tunnel on Qinghai-Tibet Railway, uses class A anti-freeze agent, class D fast coagulator and polypropylene fiber material, and adopts the ratio of 1 3.4 for the cement and aggregates. The use of cement is between 470 kg m^{-3} - 480 kg m^{-3} , the rate of sand 60 %, and the ratio of water vs. sand and cement 0.42-0.47. Ejecting machines adaptable to low temperature and low oxygen content are used. Temperature control measures are taken to ensure that the temperature of the mixed material at ejection is not lower than 10 . With inspection strengthened, the quality of concrete-shot in permafrost tunnel can be guaranteed.

Key words: Plateau permafrost; Wet-shot concrete; Design of mixing rate; Construction technology

(责任编辑 刘卫华)