

纳米材料在喷射混凝土中的应用研究

张 兴 德， 雷 英 强， 丁 建 彤

(中国水利水电第七工程局有限公司,四川 成都 611730)

摘 要:在成都地铁 18 号线 5 标龙泉山隧道 C25 喷射混凝土中掺入了 10% 的 HB7-2W 型纳米材料以等量替代水泥,可将混凝土 1 d 强度由 5 MPa 提高至 10 MPa 以上,28 d 的抗压强度提高 30%,综合回弹率降低 60% 以上,施工工效提高 27.4%;喷射混凝土过程中的粉尘浓度降低幅度达到 47%;耐久性方面,抗冻等级达到 F200 以上,抗渗等级达到 W8,抗硫酸盐侵蚀等级达到 KS50,电通量仅为 400 C,为地铁洞挖隧道支护提供了一种高强、高效、节约成本的新型材料。

关键词: 强度;回弹率;工效;粉尘浓度;耐久性;成都地铁 18 号线;喷射混凝土;纳米材料

中图分类号: TV7;TV41;TV43

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2021)06-0005-04

Study on the Application of Nano Material in Shotcrete

ZHANG Xingde, LEI Yingqiang, DING Jiantong

(Sinohydro Bureau 7 Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 611730)

Abstract: When 10% HB7-2W nano material is added in C25 shotcrete used in Longquanshan Tunnel of Chengdu Metro Line 18, to replace an equivalent quantity of cement, 1-day strength of concrete is increased from 5MPa to more than 10 MPa, the 28-day compressive strength is increased by 30%, the comprehensive rebound rate of shotcrete is reduced by more than 60%, the construction efficiency is increased by 27.4%, and dust density during shotcreting is reduced by 47%. In terms of durability, the frost resistance grade is above F200, the impermeability grade is W8, the sulfate resistance grade is KS50, and the electric flux is only 400C. It provides a new material with high strength, high efficiency and cost saving for the support of subway tunnel.

Key words: strength; rebound rate; construction efficiency; dust density; durability; Chengdu Metro Line 18; shotcrete; nano material

1 概 述

常规 C20~C30 喷射混凝土施工作业存在综合回弹率高、一次喷射厚度薄、混凝土强度经常不合格、施工环境粉尘浓度高等问题。干(潮)喷混凝土的综合回弹率一般达到 20% 以上,甚至达到 40%~50%;湿喷混凝土回弹率亦经常超过 20%^[1]。

新建京张铁路 8 标草帽山隧道的 C25 湿喷混凝土回弹率最高达 30% 以上,锅浪跷水电站 1 号引水隧洞的 C20 干喷混凝土回弹率达到 25% 以上,严重增加了施工成本且增加了喷射支护的工期。在影响喷射混凝土回弹率的各种因素中,喷射设备、施工人员素质、围岩条件往往难以改变或根本改变不了,因此,通过掺加新材料以降低混凝土回弹率不失为一种便捷有效的方法。

2 掺加新型纳米材料在水电工程中的应用

技术人员在锦屏二级水电站引水隧洞混凝土施工中掺加了一种新型纳米材料,将 CF30 湿喷混凝土的综合回弹率降至 8%~10%,且其 1 d 强度达到 20 MPa^[2,3]。在水电七局正在施工的白鹤滩水电站地下厂房中掺加了一种纳米材料后,在一次喷射厚度达到 25 cm 的情况下其顶拱 CF30 湿喷混凝土的回弹率不到 15%^[4,5],其体积粒径为 100~300 nm,可显著降低普通喷射混凝土的回弹率、提高其初期和后期强度,其作用机理主要是增加混凝土拌合物的内聚性和黏结力以减少回弹,增加混凝土硬化后的密实度以提高强度,这一效果已经多个项目进行的现场工艺性试验验证,HB7-2 型纳米材料在多个项目中取得的应用成果(部分)见表 1。

收稿日期:2021-03-11

表 1 HB7-2 型纳米材料在多个项目中取得的应用成果(部分)表

项目	喷射混凝土类别	回弹率		28 d 强度	
		/%		/MPa	
		未掺	内掺 10%	未掺	内掺 10%
锅浪跷水电站	干喷 C20	19.1	9.1	20.7	29.9
杨房沟水电站	干喷 C25	22.3	8.7	34.3	41.4
新建京张铁路	湿喷 C25	30.7	8.7	28.6	39.1
白鹤滩水电站	湿喷 CF30	—	10.2	—	61.9

3 HB7-2 型纳米材料在成都地铁 18 号线中的应用研究

成都地铁 18 号线全长约 69.39 km,起于火车南站,沿天府大道东侧向南敷设,经环球中心、世纪城、麓山至天府新区博览城片区后穿越龙泉山向东经三岔湖片区至天府新机场。其中成都轨道交通 18 号线工程土建 5 标的龙泉山隧道为全线关键控制性工程,全隧区域为龙泉山油气田分布区域,是国内最长穿越高瓦斯地层的轨道交通线。该隧道采用钻爆法开挖方式,穿越岩层多为风化页岩,采用 C25 喷射混凝土作为初期支护,其钢拱架与钢筋网支护方式、地质情况与设计参数等见表 2(工作面相关信息表)。据了解,其现场喷射混凝土回弹率达到 30%左右,计划单个工作面月进度为 100~120 m,而实际上月进度只能达到 70~80 m,混凝土 28 d 强度亦刚好达到设计强度。为此,在隧道施工中采用了 HB7-2 型无机纳米材料进行喷射混凝土以改善其综合性能。

表 3 HB7-2W 型纳米材料性能测试结果表

粒径 /nm	氯离子 /%	总碱量 /%	需水量 /%	初凝凝结时间比 /%	终凝时间比 /%	1 d 活性指数 /%	28 d 活性指数 /%
168	0.02	0.54	92	45	60	134	125
≤300	≤0.1	≤0.6	≤105	≤80	≤80	≥125	≥120

(2)喷射混凝土的生产及运输工艺。混凝土采用拌合楼集中拌制,每次搅拌 1 m³,其搅拌工艺为砂石—胶材—水的投料顺序。掺纳米材料混凝土的投料顺序为将掺和料投入到砂石斗中,再进行胶材与水的投料。速凝剂均在现场通过机械添加。

每次运输混凝土的方量为 5 m³,从拌合站到工作面的距离为 600~1 000 m,运输时间为 5~

表 4 现场试验配合比参数表

种类	材 料					
	水/kg	水泥 /kg	纳米材料 /kg	豆石 /kg	砂 /kg	速凝剂 /kg
基准组	202	440	0	814	872	22
纳米组	202	396	44	814	872	22

表 2 工作面相关信息表

围岩类别	钢拱架型号	钢拱架间距	支护钢筋网	设计厚度
Ⅳ	I18	1 m	φ8 mm@200	25 cm

3.1 实施方案

项目部将现场工艺性试验与长期应用成果相结合,在 18 号线现场原材料、施工工艺不变的情况下,对比了现有喷射混凝土配合比(以下简称基准混凝土)与掺入 10%的 HB7-2 型纳米材料等量替代水泥后其混凝土配合比(以下简称掺纳米材料混凝土)的现场混凝土回弹率、一次喷射厚度、施工工效、粉尘浓度、1 d 抗压强度、28 d 抗压强度、28 d 抗冻抗渗性能、抗硫酸盐侵蚀性能等。其中回弹率在工艺性试验中采用回弹物收集方法测试;施工工效采用长期应用的通过喷射净时间与喷射进尺的方式进行测试;在施工过程中实时测试喷射过程中的粉尘浓度。

3.2 原材料及纳米材料应用的现场条件

(1)原材料。采用都江堰拉法基水泥有限公司生产的 P·O42.5 水泥;人工砂细度模数为 2.9,石粉含量为 6.6%;粒径为 5~10 mm 的人工碎石;碱性速凝剂掺量为 6%时,初凝时间为 5 min 45 s,终凝时间为 10 min 23 s。纳米材料采用成都东蓝星新材料有限公司生产的 HB7-2 型喷射混凝土纳米材料,HB7-2W 型纳米材料性能测试结果见表 3。

15 min。

4 工艺性试验成果及现场应用效果

4.1 现场试验配合比参数

基准混凝土采用成都地铁 18 号线目前使用的 C25 喷射混凝土,掺纳米材料混凝土以 10%纳米材料等量替代水泥,保持配合比与设计容重不变,设计水胶比为 0.46,砂率为 52%,现场试验配合比参数见表 4。

4.2 施工工艺参数

在成都地铁 18 号线纳米材料工艺性试验及现场应用对比过程中,并未针对纳米材料单独研究其施工工艺。考虑到对比的准确性,其施工工艺边界条件并未改变,故基准混凝土与纳米混凝土均采用同样的施工工艺。虽然《岩土锚杆与喷射混凝土支护技术规范》GB 50086—2015 对其施工工艺有推荐性要求,但在实际工程中,绝大部分喷射混凝土施工工艺是由喷浆手的操作习惯决定的,因此,在本次工艺性试验过程中并未针对施工工艺有强制性要求,而是以实际喷浆手的操作习惯进行测定。施工前,工人会简单用有压水清理工作面,然后进行混凝土喷射,现场施工工艺参数见表 5。

表 6 混凝土回弹率测试结果表

施工部位	配合比	拌和物总重量 /kg	回弹重量 /kg	回弹率 /%
矮边墙(左)YCK050+940	基准	7 700	1 040	13.5
矮边墙(右)YCK050+940	掺纳米材料	7 302	266	3.6
边墙(左)YCK050+900	基准	7 069	1 658	23.5
边墙(右)YCK050+900	掺纳米材料	7 111	731	10.3
顶拱(右)YCK050+880	基准	7 164	2 096	29.2
顶拱(右)YCK050+880	掺纳米材料	7 177	784	10.9



图 1 掺纳米(左)与基准混凝土(右)回弹率现场效果图

由于地质条件原因,开挖过程中均出现了较大面积的超挖现象,实际厚度为 25 ~55 cm。故在实际施工过程中,工人喷射基准混凝土与纳米材料混凝土均采用定点喷射。由于喷射基准混凝土的回弹率较大,通常需进行 2~3 次喷射才能喷满,而喷射纳米材料多为一次性喷满,一次喷射混凝土厚度对比情况见表 7。

由此可见:掺纳米材料混凝土一次喷射厚度较不掺纳米材料混凝土可提高约 1 倍。

表 5 现场施工工艺参数表

部位	喷射角度 /°	喷射距离 /m	喷射风压 /MPa	行走路线
边墙	70~90	1~1.5	0.4	定点喷射
顶拱	40~90	1~1.5	0.5	定点喷射

4.3 回弹率、一次喷射厚度与粉尘浓度

回弹率测试前,在地面铺一层彩条布,彩条布的面积应足以收集绝大部分回弹物,记录喷射混凝土方量,分别测试边墙及顶拱的回弹率。测试结果表明:掺纳米材料较基准混凝土矮边墙回弹率降低了 73.3%,上台阶边墙回弹率降低幅度达 56%,顶拱回弹率降低幅度达 62.6%,混凝土回弹率测试结果见表 6、掺纳米(左)与基准混凝土(右)回弹率现场效果见图 1。

表 7 一次喷射混凝土厚度对比表

序号	混凝土类别	喷射类型	一次喷射厚度 /cm
1	基准混凝土	定点喷射	15~20
2	掺纳米材料混凝土	定点喷射	25~55

与不掺纳米材料混凝土的基准组相比,喷枪手普遍反映掺纳米材料混凝土喷射上去后附着性好、粉尘少。经实测其粉尘浓度降低了 47%。

4.4 混凝土拌合物性能、硬化混凝土性能及混凝土耐久性能

在工艺性试验与现场应用过程中,针对所依托的成都地铁18号线5标,对普通喷射混凝土中的混凝土凝结时间、抗压强度、电通量、抗硫酸盐侵蚀能力、抗冻抗渗能力进行了测试,尤其针对混凝土的初期强度测试了其12 h及24 h强度。混凝土抗压强度均采用大板切钻心割法测试,抗冻试验测试芯样的重量损失及抗压强度损失;抗渗试验测试芯样的抗渗等级,抗硫酸盐侵蚀试验测试芯样在硫酸盐侵蚀下的质量损失及抗压强度损失。混凝土凝结时间测试采用手感法,以手指按感觉吃力为初凝时间点,手指按不动为终凝时间点,混凝土凝结时间见表8,硬化混凝土性能见表9,掺纳米材料混凝土耐久性见表10。由此可见:掺10%纳米材料的混凝土凝结时间缩短,初凝缩短了25%,终凝缩短了50%,24 h强度增幅达87.5%,28 d强度增幅达30.9%且达到8 MPa。

表 8 混凝土凝结时间表				
序号	混凝土类别	速凝剂掺量 /%	初凝时间 /min	终凝时间 /min
1	基准混凝土	7.5	4	14
2	掺纳米材料混凝土	5	3	7

注:速凝剂掺量根据实际使用计算得到。

表 9 硬化混凝土性能表					
序 号	混凝土 类别	12 h 抗压	24 h 抗压	7 d 抗压	28 d 抗压
		强度 /MPa	强度 /MPa	强度 /MPa	强度 /MPa
1	基准混凝土	2	5.6	20.1	25.6
2	纳米混凝土	5.7	10.5	24.3	33.5

表 10 掺纳米材料混凝土耐久性表			
抗冻等级	抗渗等级	抗硫酸盐侵蚀	电通量/C
>F200	>W8	>KS50	400
质量损失:0.1% 动弹模量损失:10%	未渗透	质量损失:2% 抗压强度几乎不损失	—

4.5 施工工效及经济效益分析

从2017年2月27日开始,在左右洞出口进行了纳米材料的应用,一共统计了62次喷护循环数据,共计喷射267.3 h、喷射进尺189.3 m、方量为1 682.9 m³的混凝土。其中掺纳米材料混凝土总共喷射111.3 m,用量为921.9 m³;基准组喷射78 m,用量为761 m³。

通过一个月时间的数理统计,以单位延米需要的喷射混凝土量表征其材料节约量,以单位延米净喷射时间表征其喷射工效,材料节约率分析情况见表11,喷射工效分析情况见表12。由此可见:掺纳

米材料喷射混凝土每延米少用材料15.2%,每延米净喷射时间节约0.4 h,工效提高了27.4%。

表 11 材料节约率分析表				
对比组合	方量 /m ³	喷射进尺 /m	每延米所需混凝土量 /m ³ ·m ⁻¹	回弹率绝对值 降低程度 /%
基准组	761	78	9.76	—
纳米组	921.9	111.3	8.28	15.2

表 12 喷射工效分析表				
对比组合	喷射时间 /h	施工进尺 /m	每延米喷射 时间 /h	喷护工效 提高 /%
基准组	131.3	78	1.68	—
纳米组	136.1	111.3	1.22	27.4

5 结 语

试验结果表明:在成都地铁18号线5标喷射混凝土中内掺10%HB7-2W型纳米材料,使混凝土直接回弹率降低15%以上,降幅达50%以上,一次喷射厚度达55 cm,施工工效提高27.4%;施工过程中的粉尘浓度降低幅度达47%,减少了对工人造成的粉尘危害;1 d强度超过10 MPa,增长率超过80%,增加了安全性能;28 d强度相当于增加了一个强度等级,增幅达30%;可以在普通水胶比情况下喷射出高耐久性混凝土,为喷射混凝土提供了一种高性能材料。

参考文献:

[1] 艾新春,藏志刚,宫旭. 喷射混凝土现场回弹率试验分析[J]. 东北水利水电,2016,34(8):56-58.

[2] 黄秋丽,武选正. XPM 纳米材料在锦屏水电站辅助洞工程喷混凝土中的应用[J]. 四川水力发电,2013,32(增1):117-119.

[3] 韩旭东,葛军. 纳米·增韧型粗纤维湿喷混凝土在锦屏二级水电站引水隧洞中的试验与应用[J]. 四川水力发电,2014,33(6):5-9.

[4] 郑路,陈世孝. 无机纳米材料在白鹤滩水电站地下工程喷护混凝土中的应用[J]. 中国水利,2019,56(18):71-73.

[5] 李凤玉,娄鑫. 无机纳米材料在喷射混凝土中的应用研究[J]. 低碳世界,2016,6(31):161-162.

作者简介:

张兴德(1970-),男,四川仁寿人,高级工程师,从事水利水电、铁路、市政、建筑行业建筑材料的试验检测、工程安全监测和勘察设计工作;

雷英强(1989-),男,四川仁寿人,工程师,从事新材料研发与检测工作;

丁建彤(1970-),男,江苏泰兴人,教授级高级工程师,从事高性能混凝土材料研究工作。

(责任编辑:李燕辉)