

基于胶凝材料颗粒匹配的隧道喷射 混凝土配合比优化设计

阎王虎¹, 赵翔¹, 潘慧敏^{2*}, 汤建华¹, 贾飞¹, 朱葛¹

(1. 中交路桥华北工程有限公司, 北京市 101100; 2. 燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:胶凝材料颗粒匹配所造成的差异会影响胶凝材料间的空隙,进而影响混凝土的力学性能和耐久性。依托实体工程,采用激光粒度分析仪分析水泥、粉煤灰和矿渣的粒径分布情况,以净浆流动度、坍落度和扩展度表征净浆和混凝土的工作性,对粉煤灰和矿渣的颗粒匹配进行评价。对硬化浆体水化产物的微观形貌和化学组成进行分析,对混凝土强度进行测试,基于胶凝材料颗粒匹配对喷射混凝土性能影响的结果,对喷射混凝土配合比进行优选。结果表明:在其他条件一定的情况下,粉煤灰:矿渣为1:3时,其流动性能最好,表现出良好的力学性能。粉煤灰:矿渣为3:1时净浆流动性能最差,试件的强度最低,同颗粒匹配的混凝土试件强度也得出了相似的试验结果。微观形貌测试佐证了净浆流动度和强度的试验结果。综合考虑流动度和强度试验结果,粉煤灰:矿渣为1:1时,胶凝材料的颗粒匹配度好,可视为最优配合比。

关键词:喷射混凝土;隧道;胶凝材料;配合比;优化设计

1 前言

锚喷体系是当前公路隧道施工中的主要支护结构,可以减小围岩松弛、充分发挥围岩的自稳能力^[1]。作为锚喷支护体系的核心组成部分,喷射混凝土具有施工作业灵活、早期硬化速度快及围岩黏结附着力高等优点,在控制围岩稳定、确保施工安全等方面发挥了重要作用,在公路隧道支护体系中得到了广泛的应用^[2-3]。在施工工艺和受力机理方面,喷射混凝土与普通模筑混凝土存在较大差异^[4],基于此,为获得高性能的湿拌喷射混凝土,国内外学者通过优化原材料参数、加强配合比设计和改善施工工艺等措施,对喷射混凝土性能进行了多方面研究。

王志杰^[5]、焦华喆^[6]等发现适量玄武岩纤维的加入可以提升喷射混凝土的力学性能,降低混凝土的脆性;Wolsiefer^[7]研究了硅灰对塑性和硬化喷射混凝土性能的影响,并与普通硅酸盐水泥喷射混凝土的性能

进行了比较,结果表明:硅灰能有效地改善喷射混凝土的性能;针对隧洞涌水严重的工程,程伟峰等^[8]通过在湿拌喷射混凝土中同时加入硅灰和纤维,可提高喷射混凝土的抗折强度。针对喷射混凝土施工回弹较大的问题,学者们也采取了各种针对性的措施以改善混凝土的性能。Ouchi^[9]利用高速成像系统研究了喷射混凝土的应用设备对喷射速度分布的影响;文献[10-11]研究表明:细颗粒的加入和较低的骨料密度可以有效地降低骨料回弹;曾宪桃等^[12]研究发现,将磁化水掺入预拌混凝土中可以提高抗压强度,降低喷射混凝土的回弹率;曾鲁平^[13]、仇影^[14]则关注了液体速凝剂种类对喷射钢纤维混凝土性能的影响,通过设计同配合比钢纤维砂浆体系,探究了液体速凝剂对钢纤维增韧作用的影响机理。结果表明:相对于有碱速凝剂,无碱速凝剂的掺入对混凝土基体后期强度影响较小,提高了钢纤维喷射混凝土的早期初期支护能力。

喷射混凝土作为永久性衬砌结构,除了关注服役状态下的受力性能,其在环境作用下的耐久性也尤为

收稿日期:2021-09-12(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51608469);交通部平安百年品质工程示范项目(京秦高速公路遵化至秦皇岛段)(编号:交办安监函932号)

作者简介:阎王虎,男,教授级高工, E-mail:2674793601@qq.com

* 通信作者:潘慧敏,女,教授, E-mail:hmpmpan2005@163.com

重要^[15-16]。孔隙结构特征是混凝土微观结构研究的重要部分,混凝土的宏观特性往往受到其微观结构的影响^[17]。近年来,粉煤灰、矿渣、硅灰等由于其良好的火山灰活性而对混凝土耐久性的有益贡献,已被广泛用于喷射混凝土中。研究表明^[18-19]:粉煤灰和矿渣间的颗粒粒径匹配所造成流动性的差异会影响胶凝材料间的空隙,进而影响混凝土的力学性能和耐久性。但目前基于胶凝材料颗粒匹配所开展的研究多针对普通混凝土^[20-21],对喷射混凝土中矿物掺合料颗粒匹配的相关问题研究尚未见报道。

鉴于以上分析,该文依托北京—秦皇岛高速公路遵化—秦皇岛段隧道施工技术需求,采用激光粒度分析仪分析水泥、粉煤灰和矿渣的粒径分布情况,以净浆流动度、坍落度和扩展度表征净浆和混凝土的工作性,对粉煤灰和矿渣的颗粒匹配进行评价。对硬化浆体水化产物的微观形貌和化学组成进行分析,对混凝土强度进行测试,基于胶凝材料颗粒匹配对喷射混凝土性能影响的结果,对喷射混凝土配合比进行优选。

2 依托工程概况

该文依托项目为北京—秦皇岛高速公路遵化—秦皇岛 B9 标段孤石峪隧道,隧道设计为上、下行分离的

独立双洞形式,左洞起止桩号 ZK139+478~ZK141+398,右洞起止桩号 K139+483~K141+403,左右洞长度均为 1 920 m。隧道左、右洞纵坡均为-2.5%单向坡,最大埋深 125.1 m。隧道区地层为:第四系覆盖层(主要为全新统残坡积成因含碎石粉质黏土、碎石),下伏基岩为青白口系长龙山组石英砂岩及五台期侵入混合花岗岩。围岩分级统计分别为:左幅:Ⅴ级=530 m,Ⅳ级=450 m,Ⅲ级=940 m;右幅:Ⅴ级=430 m,Ⅳ级=500 m,Ⅲ级=990 m。隧道初期支护喷射混凝土强度等级为 C25,设计坍落度为 80~120 mm。喷射混凝土 1 m³ 各材料的用量为:胶凝材料 433 kg,砂 839 kg,碎石 839 kg,水胶比为 0.39。

3 原材料和试验方法

3.1 原材料

试验原材料均由隧道喷射混凝土施工现场提供。水泥:P.O.42.5 级普通硅酸盐水泥(代号 C)。细集料:中砂,细度模数 2.6,表观密度 2 668 kg/m³。粗集料:5~10 mm 单级配碎石。外加剂:缓凝型减水剂 TL-AH-1,减水率 18.5%。速凝剂:固含量 40%。矿物掺合料:二级粉煤灰(代号 F.Ⅱ)和 S95 级矿渣粉(代号 S95)。水泥和矿物掺合料主要化学组成和技术指标见表 1。

表 1 水泥和矿物掺合料化学组成及主要技术指标

原材料	质量分数 $w/\%$						烧失量/	比表面积/
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	%	(m ² ·kg ⁻¹)
C	52.4	25.20	4.95	2.17	3.32	0.94	2.17	570.3
F.Ⅱ	5.24	48.50	41.00	0.38	2.91	0.65	5.88	408.3
S95	33.60	33.80	18.69	0.42	1.45	0.49	1.21	574.8

3.2 试验方法

3.2.1 胶凝材料颗粒粒度分析

该试验采用 BT9300H 型激光粒度分析仪对水泥、粉煤灰和矿渣颗粒进行粒径分析,胶凝材料粒径分布对比见图 1。

3.2.2 净浆流动度测试方法

参考 GB/T 8077—2012《混凝土外加剂均质性试验方法》测试净浆流动度,模具采用上口直径为 36 mm、下口直径 60 mm、高 60 mm 的截锥圆模。为更符合隧道实际工程情况,试验中保持水泥用量不变,胶凝材料总量为 300 g。参考隧道喷射混凝土配合比,水胶比为 0.39,用水量为 117 g。由图 1 可知:矿渣和粉煤灰粒径分布差别较大,为了解不同掺量比例对净

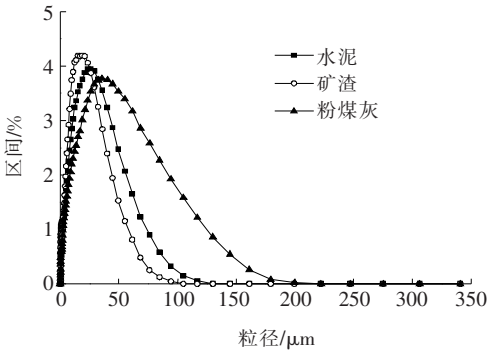


图 1 水泥、矿渣、粉煤灰粒径分布

浆流动度的影响进而对喷射混凝土胶凝材料颗粒粒径的匹配度进行判断,该试验设计 5 种比例梯度,粉煤灰:矿渣分别为 1:1(A 组)、1:3(B 组)、3:1(C

组)、2:1(D组)、1:2(E组),试验各组胶凝材料用量见表2。将搅拌好的净浆注入截锥圆模中,注满后将圆模沿竖直方向提起,待净浆在玻璃板上流动30s后,测量两个互相垂直方向的边缘长度,并取平均值作为净浆流动度测试值。

表2 净浆流动度试验配合比

组别	材料用量/g				
	水泥	粉煤灰	矿渣	水	减水剂
A	240	30	30	117	2.4
B	240	15	45	117	2.4
C	240	45	15	117	2.4
D	240	20	40	117	2.4
E	240	40	20	117	2.4

3.2.3 试件成型和力学性能测试

净浆试件和混凝土试件均采用搅拌机搅拌,净浆试件成型参照GB1717671—1999《水泥胶砂强度检验方法》,试件尺寸为40mm×40mm×160mm,每组3个。置于振动台上振动30s后成型,立即放入标准养护室[温度(20±2)℃,相对湿度95%以上]进行养护,1d后拆模并继续养护至预定龄期。混凝土试件尺寸为100mm×100mm×100mm和100mm×100mm×400mm,每组3个,养护至预定龄期后,依据GB150081—2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》对其进行抗压和抗折强度测试。

3.2.4 SEM微观形貌观察

混凝土宏观性能的改变与其微观结构直接相关,扫描电子显微镜(SEM)目前已经成为水泥基材料研究领域中常用的分析微观形貌的工具。试验采用VEGA3型扫描电镜对净浆试件微观结构进行观测,深入剖析胶凝材料颗粒匹配对其宏观性能的影响。

4 试验结果与分析

4.1 净浆流动度

该试验研究不同胶凝材料颗粒匹配作用下净浆的工作性,同时考虑到减水剂的影响,设置了掺入减水剂和不掺减水剂两种情况,净浆流动度测试结果如图2所示。

由图2可知:同样是水泥、粉煤灰和矿渣的组合,在聚羧酸高性能减水剂的作用下,各组净浆所表现出的流动性存在较大差别。在其他条件一定的情况下,掺减水剂的各组净浆流动度由高到低依次为:B、D、

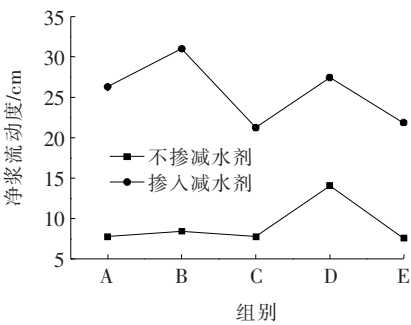


图2 净浆流动度测试结果

A、E、C,说明随着矿渣掺量的提高,其浆体的流动度也随之增大。粉煤灰和矿渣比例为1:3时(B组),其流动性能最好,矿渣与粉煤灰比例为3:1时(C组)的净浆流动性能最差。分析其原因,结合图1可知:矿渣颗粒粒径小于25μm的细颗粒含量要明显高于Ⅱ级粉煤灰,这种微细颗粒可均匀分布在浆体内并填充空隙和毛细孔,改善硬化浆体的孔结构,增加密实度。与此同时,胶凝材料颗粒和孔隙间的水分得以释放,成为自由水,从而提高浆体流动度。因此,在该试验中掺入减水剂的情况下,提高矿渣的掺量可以改善净浆的工作性,使净浆流动度增大。

由图2还可以看出:随着粉煤灰掺量比例的提高,净浆流动度有所降低,其原因是该试验所用粉煤灰为Ⅱ级灰,其颗粒粒径大于25μm的粗颗粒含量较高,导致其“形态效应”和“微集料效应”发挥不够充分。因此从改善净浆流动度这一角度来看,矿渣与粉煤灰的比值不宜过低,即Ⅱ级粉煤灰掺量不宜过高。

4.2 硬化净浆强度

对养护至3、7、28d的净浆试件进行抗压和抗折强度测试,结果如图3所示。

由图3可以看出:A组净浆试件表现出良好的力学性能,抗压强度和抗折强度均高于其他组。B组、D组和E组的强度也较高,而C组净浆试件的强度最低,这与上述净浆流动度的试验结果是一致的。

4.3 微观结构

净浆试件微观形貌特征见图4。

由图4可以观察到:水化28d的水泥石主要由不规则的水化凝胶产物、矿物颗粒和微孔洞等构成。其中,A组和B组试件水泥浆体中生成了较多针棒状晶体,与凝胶产物相互连接,这种类似网状的致密结构有利于提高混凝土的力学性能;D组和E组试件有少量针棒状晶体,存在孔洞和微裂纹,结构也比较致密;而在C组试件内部则观察到大量无定形凝胶,孔洞较

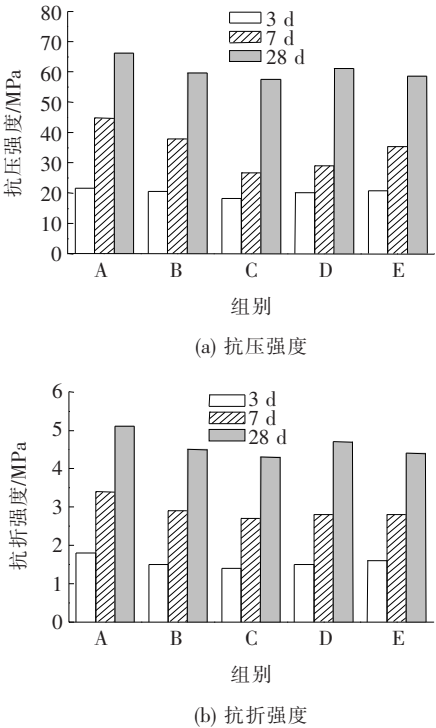


图 3 净浆试件强度

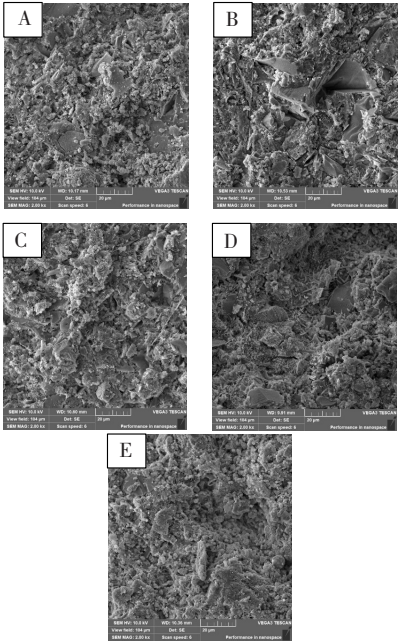


图 4 净浆试件 SEM 微观形貌图

多,不利于后期强度增长。微观形貌观测也佐证了上述净浆流动度和强度的试验结果。

4.4 混凝土强度

根据净浆流动度评价配合比和胶凝材料颗粒级配的合理性,由上述净浆流动度和净浆强度测试结果可知,粉煤灰与矿渣的比例为 1 : 1 (A 组) 时,流动性较

好,抗压和抗折强度发展最为稳定;粉煤灰与矿渣的比例为 3 : 1 (C 组) 时,净浆流动性差,强度低。

为了验证混凝土强度,该试验仅选取这两种颗粒级配,参照依托工程隧道喷射混凝土部位的配合比,成型两组混凝土试件进行抗压强度检测,结果见图 5。

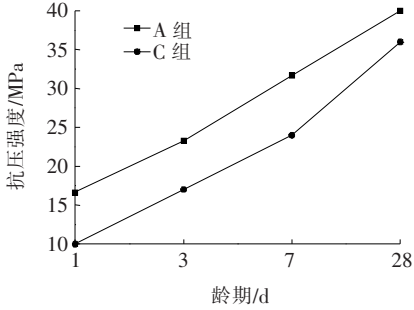


图 5 混凝土抗压强度

由图 5 可见:两组胶凝材料颗粒匹配下混凝土的 28 d 强度均达到了 35 MPa,但粉煤灰与矿渣的比例为 3 : 1 时,混凝土强度略低,尤其是 7 d 以前的强度发展较慢,说明此组胶凝材料颗粒匹配较差。

4.5 最优配合比确定

矿物掺合料的掺量和细度都是决定颗粒级配优劣的重要因素,细颗粒掺量低往往无法填充并“挤出”胶凝材料中的自由水,流动性不佳;细颗粒掺量高则体现出整体细度偏低,粗颗粒不足,产生泌水现象并且浆体部分黏稠。因此颗粒匹配度越好,颗粒间含水量也相对减少,会挤出来更多的自由水,使胶凝材料流动度增加,从而增加混凝土的工作性,降低空隙率和有害离子渗透性,增加其耐久性。该试验研究可以得出:矿物掺合料对胶凝材料的颗粒级配改善作用存在一个最佳值,比较该文 5 种组别搭配的净浆流动度测试结果,可以发现粉煤灰 : 矿渣为 1 : 3 时,流动性最好。

综合考虑流动度和净浆强度试验结果可知,当粉煤灰和矿渣掺量比例为 1 : 3 (B 组) 时,强度较大,流动度最大。但是矿渣掺量过多会导致保水性下降,且在试件成型时出现了泌水现象。粉煤灰和矿渣掺量比例为 3 : 1 (C 组) 时,由于 II 级粉煤灰细颗粒较少,流动度大幅度下降,强度也最低。当粉煤灰和矿渣掺量比例为 1 : 1 (A 组) 时,净浆流动性适中,既满足喷射混凝土对流动性的要求,也不会因为较大的流动度引起回弹率的升高,这恰好兼顾了喷射混凝土施工对回弹率的控制。同时,粉煤灰和矿渣掺量比例为 1 : 1 时,硬化初期抗折强度明显高于其他两组,抗压强度随着龄期增长也有所提升,因此在此试验中,粉煤灰与矿渣掺量比例在 1 : 1 时可视为最优配合比。

5 结论

该文以净浆流动度、坍落度和扩展度表征净浆和混凝土的工作性,对粉煤灰和矿渣的颗粒匹配进行了评价。基于胶凝材料颗粒匹配对喷射混凝土性能影响结果,对喷射混凝土配合比进行了优选,主要结论如下:

(1) 在减水剂的作用下,随着矿渣掺量的提高,其浆体的流动度也随之增大。在其他条件一定的情况下,粉煤灰和矿渣比例为1:3时(B组),其流动性能最好,矿渣与粉煤灰为3:1时(C组)的净浆流动性能最差。

(2) A组净浆试件表现出良好的力学性能,抗压强度和抗折强度均高于其他组。B组、D组和E组的强度也较高,而C组净浆试件的强度最低,与净浆流动度的试验结果一致。同颗粒匹配的混凝土试件强度试验结果与净浆试件强度结果也是一致的。

(3) 微观形貌测试结果表明:粉煤灰与矿渣比例为1:1(A组)时,水泥浆体中形成了网状的致密结构,有利于提高混凝土的力学性能;粉煤灰与矿渣比例为3:1时,浆体内部存在孔洞和微裂纹,不利于后期强度增长,佐证了净浆流动度和强度的试验结果。

(4) 综合考虑流动度和强度试验结果,当粉煤灰和矿渣掺量比例为1:1(A组)时,既满足喷射混凝土对流动性的要求,也兼顾了喷射混凝土施工对回弹率的控制。因此A组胶凝材料的颗粒匹配度最优,可视作为最优配合比。

参考文献:

- [1] 吴旦,皮圣,荆永波,等.超前小导管支护快速进洞技术在软弱围岩隧道工程中的应用[J].中外公路,2021,41(1):186—189.
- [2] 曾鲁平,赵爽,王伟,等.硬化喷射混凝土的气泡结构特性、抗水渗透及抗冻性能[J].硅酸盐学报,2020,48(11):1781—1790.
- [3] 王家滨,牛获涛.弯曲荷载下喷射混凝土衬砌碳化耐久性研究[J].硅酸盐通报,2018,36(7):1818—1824.
- [4] 周平,王志杰,雷飞亚,等.考虑层间效应的钢纤维混凝土隧道单层衬砌受力特征模型试验研究[J].土木工程学报,2019,52(5):116—128.
- [5] 王志杰,徐成,王嘉伟,等.玄武岩纤维长度对喷射混凝土力学性能影响规律研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(S1):9—16.

- [6] 焦华喆,韩振宇,陈新明,等.玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能及微观结构的影响机制[J].复合材料学报,2019,36(8):1926—1934.
- [7] Wolsiefer J, Morgan D R. Silica Fume in Shotcrete[J]. Concrete International, 1993, 15(4): 34—39.
- [8] 程伟峰,林星平,丁一宁,等.掺硅粉、钢纤维湿喷混凝土的工程应用研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(11):2321—2329.
- [9] Ouchi M. Effect of Superplasticizer on Self-Compactability of Fresh Concrete[C]. 76th Transportation Research Board(TRB) Annual Meeting, 1997.
- [10] V. Bindiganavile, N. Banthia. Effect of Particle Density on its Rebound in Drymix Shotcrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(2): 58—64.
- [11] V. Bindiganavile, N. Banthia. Fiber Reinforced Dry-Mix Shotcrete with Metakaolin[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(6): 503—514.
- [12] 曾宪桃,任振华,王兴国.磁化水降低喷射混凝土粉尘浓度与减少回弹的试验研究[J].煤炭学报,2014,39(4):705—712.
- [13] 曾鲁平,乔敏,王伟,等.速凝剂种类对钢纤维喷射混凝土力学及界面性能影响[J].硅酸盐学报,2020,48(5):659—664.
- [14] 仇影,倪锐.喷射混凝土用无碱液体速凝剂的制备及其机理研究[J].硅酸盐通报,2020,39(7):2113—2119.
- [15] 王家滨,张凯峰,侯泽宇,等.西北复合盐侵蚀环境衬砌喷射混凝土离子扩散研究[J].土木工程学报,2020,53(11):21—35.
- [16] 王家滨,李恒,郭庆军,等.冻融损伤喷射混凝土永久支护结构碳化耐久性分析[J].土木与环境工程学报,2020,42(2):179—187.
- [17] 张俊儒,闻毓民,欧小强.粉煤灰喷射混凝土孔隙结构的演变特征[J].西南交通大学学报,2018,53(2):297—302.
- [18] Jin S, Zhou J K, Zhao X Y, et al. Quantitative Relationship Between Pore Size Distribution and Compressive Strength of Cementitious Materials[J]. Construction and Building Materials, 2020, 273: 121727.
- [19] Nadelman E I, Kurtis K E. Durability of Portland-Limestone Cement-Based Materials to Physical Salt Attack[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 125: 105859.
- [20] 李滢,杨静.胶凝材料颗粒级配水泥凝胶体结构及强度的影响[J].新型建筑材料,2004(3):1—4.
- [21] O. Sevim, M. Baran, S. Demir. Durability of Portland-Limestone Cement-Based Materials to Physical Salt Attack[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 51(1): 67—77.