

doi: 10.3969/j.issn.1671-7775.2018.01.019

高寒山区 C40 机制砂混凝土耐久性能

申爱琴, 张敬, 樊莉, 阮诚皓

(长安大学公路学院, 陕西西安710064)

摘要: 针对高寒山区环境下,用于工程建筑的机制砂混凝土极易发生冻融破坏和腐蚀破坏的现象,引入高性能矿物掺合料对其耐久性能进行改性,分别研究了粉煤灰和矿渣微粉两种矿物掺合料在单掺和复掺条件下对C40机制砂混凝土抗冻及抗渗性能的影响,并结合其界面区形貌和孔结构进行了微观机理分析.研究表明:粉煤灰与矿渣微粉复掺能够显著提升C40机制砂混凝土的耐久性能,两者复掺对C40机制砂混凝土耐久性能的改善提升作用要优于两者单掺;以质量分数为21%粉煤灰与质量分数为9%矿渣微粉复掺时,C40机制砂混凝土的早期抗冻、抗渗性能显著提高,后期抗冻、抗渗性能得到了大幅度提升,界面区形貌和孔结构得到显著改善.

关键词: 机制砂混凝土;高寒山区;粉煤灰;矿渣微粉;耐久性能

中图分类号: U449 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-7775(2018)01-0115-05

引文格式: 申爱琴,张敬,樊莉,等.高寒山区C40机制砂混凝土耐久性能[J].江苏大学学报(自然科学版),2018,39(1):115-119.

Durability of C40 machine-made sand concrete for highway culvert in alpine areas

SHEN Aiqin, ZHANG Jing, FAN Li, RUAN Chenghao

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: To solve the serious freeze-thaw and corrosion damage of machine-made sand concrete for engineering construction in alpine areas, the mineral admixture with high performance was used to modify the durability. The incorporation effects of fly ash, slag powder and the mixtures on frost resistance and impermeability of C40 grade machine-made sand concrete were analyzed. The micro-mechanism was discussed based on the interfacial zone morphology and pore structure. The results show that the mixing of fly ash and slag powder can significantly improve the durability of C40 grade machine-made sand concrete better than the single one. Mixing with 21% fly ash and 9% slag powder, the frost resistance and the impermeability of C40 grade machine-made sand concrete are greatly improved in both early and late stages, and the interfacial zone morphology and pore structure are significantly improved.

Key words: machine-made sand concrete; alpine areas; fly ash; slag powder; durability

在我国西部的高海拔高寒山区,天然砂十分匮乏,机制砂资源比较丰富.随着我国高原公路建设的发展,机制砂正逐步取代天然砂成为西部高寒山区公路建设中主要的细集料.高寒山区气候环境十分

恶劣,最低气温往往低于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,最冷月份的平均气温常在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,冻融循环和离子侵蚀作用突出.机制砂由于表面粗糙、棱角多、内部微裂纹较多,且石粉含量高,导致混凝土的需水量增加,加之机制

收稿日期: 2016-09-01

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2013318J16490); 四川省交通科技项目(2011A74-1)

作者简介: 申爱琴(1957—),女,陕西宝鸡人,教授,博士生导师(saq6305@163.com),主要从事道路工程材料与结构的研究.
张敬(1992—),男,安徽宿州人,硕士研究生(1719862079@qq.com),主要从事机制砂混凝土的研究.

砂混凝土长期暴露于高寒、复杂多变的环境,极易发生冻融和腐蚀破坏.因此,针对高寒环境下机制砂混凝土的抗冻及抗渗性能研究具有重要意义.文献[1-3]对高强机制砂混凝土和高寒地区机场道面机制砂混凝土进行了研究,认为使用高性能的矿物掺合料和引气剂、减水剂能够大大提高机制砂混凝土的抗冻性能.文献[4-7]研究了机制砂的颗粒特性、石粉含量对混凝土性能的影响,认为机制砂的颗粒粗糙性降低了混凝土的工作性能,而机制砂中所含的适量石粉能够提高混凝土的工作性能、抗压强度和抗硫酸盐侵蚀性能,但对混凝土抗氯离子渗透性及早期抗裂性能都有不利影响.文献[8-9]研究了机制砂混凝土及其石粉含量对混凝土性能的影响,认为石粉含量增加使得机制砂混凝土坍落度下降,其抗压强度和抗断裂性能都要优于天然砂混凝土.

上述研究多集中于机制砂的颗粒特性、岩性、石粉含量,以及外加剂、单一类矿料对混凝土工作、力学性能的影响等方面,研究对象多为机场道面机制

砂混凝土或 C50 以上高强度机制砂混凝土,缺乏采用矿物掺合料单掺及复掺对高寒环境下 C40 机制砂混凝土耐久性能进行改性的研究.本研究以国道 317 甘孜段高原公路改扩建工程作为研究背景,分别研究单掺粉煤灰、矿渣微粉及两者复掺对 C40 机制砂混凝土抗冻、抗渗性能的影响,旨在为提高高寒山区机制砂混凝土的耐久性能提供有效的技术手段.

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

试验所用水泥为四川洪雅西南 42.5R 型普通硅酸盐水泥,密度 $3.10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,比表面积 $370 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$;粉煤灰和矿渣微粉为四川乐山宁辉有限公司生产的东电 I 级粉煤灰和 S95 级矿渣微粉,其各项技术指标分别见表 1 和表 2;粗集料为 5.0~31.5 mm 花岗岩连续级配碎石;机制砂细度模数 2.9,其技术指标见表 3;所用减水剂为 AL-A2 型粉体减水剂,减水率 14%~22%.

表 1 粉煤灰技术指标

项目	SO ₃ 质量分数/%	烧失量/%	细度/%	需水量比/%	含水量/%	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)
技术指标	≤3.0	≤5.0	≤12.0	≤95	≤1.0	
实测值	1.0	3.6	9.9	94	0.1	500

表 2 矿渣微粉技术指标

项目	SO ₃ 质量分数/%	烧失量/%	氯离子质量分数/%	流动度比/%	密度/(g·cm ⁻³)	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)
技术指标	≤4.00	≤3.0	≤0.06	≥95	≥2.80	≥400
实测值	0.96	1.5	0.03	99	2.89	466

表 3 机制砂技术指标

项目	表观密度/(g·cm ⁻³)	含泥量/%	石粉质量分数/%	云母质量分数/%	轻物质质量分数/%
技术要求	>2.50	<1.0	<10.0	<2.0	<1.0
实测值	2.64	0.6	2.2	1.0	0.2

1.2 试验方法

1.2.1 试验方案

机制砂混凝土强度等级为 C40,其配合比已通过正交试验确定,在耐久性研究方案中分别设置了单掺粉煤灰试验组 HS1-HS3、单掺矿渣微粉试验组 HS7-HS9 和粉煤灰-矿渣微粉复合矿料试验组 HS4-HS6,各试验组都设有 3 种掺量,即 10%、20% 和 30%.其中粉煤灰-矿渣微粉复合矿料中粉煤灰和矿渣微粉的质量比例为 7:3,矿渣微粉采用等量取代,粉煤灰采用超量取代,超量取代系数为 1.1. C40 机制砂混凝土单位体积用量见表 4,其中 HS0 为基准对照试验组.

表 4 C40 机制砂混凝土单位体积用量 kg·m⁻³

组号	胶凝材料			水	机制砂	碎石	减水剂
	水泥	粉煤灰	矿渣微粉				
HS0	452	0	0	190	648	1 103	4.52
HS1	407	50	0	190	643	1 103	4.52
HS2	362	100	0	190	639	1 103	4.52
HS3	316	149	0	190	635	1 103	4.52
HS4	407	35	14	190	645	1 103	4.52
HS5	362	70	27	190	642	1 103	4.52
HS6	316	104	41	190	639	1 103	4.52
HS7	407	0	45	190	648	1 103	4.52
HS8	362	0	90	190	648	1 103	4.52
HS9	316	0	136	190	648	1 103	4.52

1.2.2 试验方法与条件

采用快速冻融法对 C40 机制砂混凝土的抗冻性能进行研究. 仪器为 KDR-V3 混凝土快速冻融试验机, 每组成型 6 个 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 小梁试件, 分别用于 28 d 和 90 d 龄期的冻融循环试验. 冻融试验的温度上限为 $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$, 下限为 $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$. 冻融溶液为质量分数 1.0% NaCl 溶液. 采用 RCM 氯离子快速迁移法对表 4 中不同方案进行抗渗性能研究, 试验仪器为氯离子扩散系数测定仪, 每组成型 2 个 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 小梁试件, 分别在 28 d 和 60 d 龄期时通过钻芯取样制备 3 组直径 100 mm、高度 50 mm 的圆柱体试件, 测定其氯离子迁移系数. 采用 Hitachi S-4800 场发射扫描电镜和 Auto Pore IV 9510 全自动压汞仪对 C40 机制砂混凝土的界面区形貌和孔结构进行观测, 电镜和压汞试样龄期为 90 d, 通过成型 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 立方体试件, 标准养护条件下达到 90 d 后, 在其中心位置取样, 切割破碎后经由砂纸打磨和无水乙醇清洗后制得.

2 结果及分析

2.1 抗冻性能分析

图 1 为最大冻融次数与矿物掺合料掺量的关系曲线.

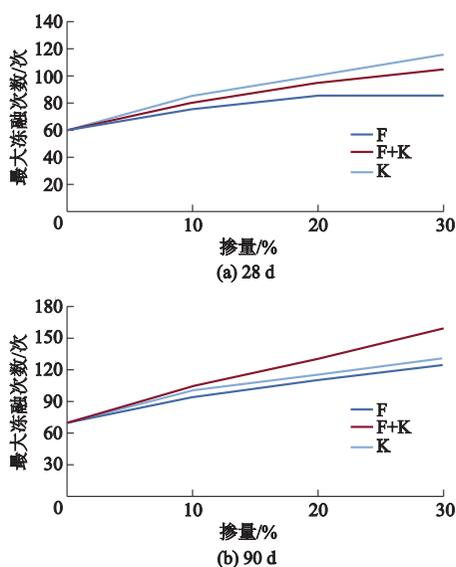


图 1 最大冻融次数与矿物掺合料掺量的关系曲线

由图 1 可知: C40 机制砂混凝土的 28 d 及 90 d 抗冻强度随着单掺粉煤灰 (F)、单掺矿渣微粉 (K) 及粉煤灰-矿渣微粉复合矿料 (F+K) 掺量的增加而

不断提高; 在相同掺量的条件下, 粉煤灰与矿渣微粉复掺时, C40 机制砂混凝土的 28 d 抗冻强度高于单掺粉煤灰, 低于单掺矿渣微粉, 但 90 d 抗冻强度则同时高于两者; 当 3 种矿料掺量增至 30% 时, C40 机制砂混凝土的 28 d 抗冻强度分别提高了 41.67%、91.67% 和 75.00%, 其 90 d 抗冻强度分别提高了 78.57%、85.71% 和 128.57%. 这表明相同掺量的条件下, 矿渣微粉对提高 C40 机制砂混凝土早期抗冻性能的作用较为突出, 粉煤灰相对较弱, 但掺粉煤灰混凝土后期抗冻性能与矿渣微粉相当, 而两者的复合不仅能够使得 C40 机制砂混凝土具备足够的早期抗冻性能, 而且后期抗冻性能十分突出. 此外, 当单掺粉煤灰的掺量由 20% 增加到 30% 时, C40 机制砂混凝土的 28 d 抗冻强度并未增长, 这表明当单掺粉煤灰的掺量达到一定程度, C40 机制砂混凝土的早期抗冻强度不会随其掺量的增加而增加.

2.2 抗渗性能分析

图 2 为氯离子迁移系数与矿物掺合料掺量的关系曲线.

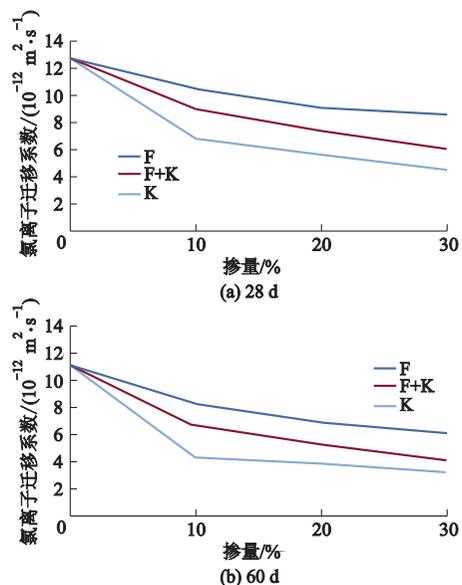


图 2 氯离子迁移系数与矿物掺合料掺量关系曲线

由图 2 可知, 随着单掺粉煤灰、单掺矿渣微粉及粉煤灰-矿渣微粉复合矿料掺量的增加, C40 机制砂混凝土的 28 d 和 60 d 氯离子迁移系数都在不断减小, 表明其抗氯离子渗透性能在不断提高. 在相同掺量条件下, 掺粉煤灰-矿渣微粉复合矿料时 C40 机制砂混凝土的 28 d 和 60 d 氯离子迁移系数均要小于单掺粉煤灰时的氯离子迁移系数, 且大于单掺矿渣微粉时的氯离子迁移系数; 当 3 种矿料掺量为 30% 时, C40 机制砂混凝土的 28 d 抗渗性能分别提

高了32.81%、51.56%和64.84%，60 d抗渗性能分别提高了44.14%、70.27%和62.16%。这表明在相同掺量条件下，粉煤灰对氯离子迁移的抑制作用弱于矿渣微粉，两者复掺时，C40 机制砂混凝土可以获得较高的早期抗渗性能，且后期抗渗性能已十分接近单掺矿渣微粉。

3 C40 机制砂混凝土微观结构及机理

3.1 界面区形貌

图3和图4分别为基准和掺矿物掺合料C40 机制砂混凝土的界面区形貌图。

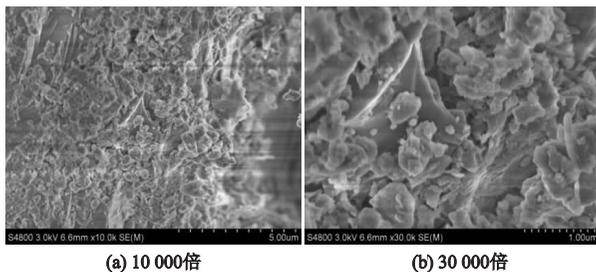


图3 未掺加矿物掺合料C40 机制砂混凝土的界面区形貌

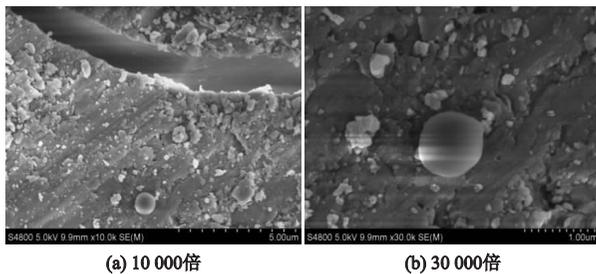


图4 21%粉煤灰与9%矿渣微粉复掺后C40 机制砂混凝土的界面区形貌

由图3可知：基准C40 机制砂混凝土界面区结构裂缝区域的水化产物分布较为疏松，分布有较多的针絮状钙矾石、片状的氢氧化钙晶体和疏松的水化硅酸钙凝胶，针絮状产物较多，裂缝宽度较大，这些疏松的结构及裂缝是有害离子的主要渗入通道和孔隙溶液的主要活动区，容易诱发混凝土出现强度下降、渗透性增加和冻融损伤加深等性能衰变的现象。由图4可知：掺加粉煤灰-矿渣微粉复合矿料后，C40 机制砂混凝土水化产物分布相对较为致密，表面分布有少量未参与水化反应的粉煤灰、矿渣微粉颗粒和一些水化硅酸钙凝胶，裂缝区域的断面较为平整，原本疏松结构明显变得致密化，界面区裂缝宽度明显缩小，有效抑制了有害离子的渗入和孔隙溶液的活动，从而使得C40 机制砂混凝土的抗冻、

抗渗性能明显提高。

3.2 孔结构特征参数

机制砂混凝土是一类复杂的多相多孔材料，其内部分布有大量多尺度异形态的孔隙，这些孔隙结构与机制砂混凝土的强度及抗冻、抗渗性能都有十分密切的关系，试验对21%粉煤灰与9%矿渣微粉复掺下C40 机制砂混凝土的孔结构特征参数进行了测定。测试结果见表5和表6，其中，HD和HD0分别表示掺加和未掺加粉煤灰-矿渣微粉复合矿料的C40 机制砂混凝土。图5为21%粉煤灰与9%矿渣微粉复掺前后C40 机制砂混凝土的孔径分布微分曲线，其中 V 为孔含量， r 为孔径。

从表5、表6和图5中可以看出：在掺加了粉煤灰-矿渣微粉复合矿料后，C40 机制砂混凝土的孔总表面积、有效孔隙率、平均孔径、面积中值孔径及最可几孔径都在减小，其中平均孔径和最可几孔径的减幅达到7.78%和35.52%；无害孔(<20 nm)的比例提高，少害孔($20 \sim 50$ nm)和有害孔($50 \sim 200$ nm)及多害孔(>200 nm)的比例下降。这表明在掺加了复合矿料后，C40 机制砂混凝土内部孔结构得到了明显的改善，从而使得其抗冻性能和抗渗性能得到显著提升。

表5 C40 机制砂混凝土孔隙参数

编号	孔总表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	有效孔隙率/%	平均孔径/ nm	面积中值孔径/nm	最可几孔径/nm
HD	8.66	17.71	39.1	13.7	40.3
HD0	11.58	19.80	42.4	16.7	62.5

表6 C40 机制砂混凝土孔径分布 %

编号	孔径/nm			
	<20	$20 \sim 50$	$50 \sim 200$	>200
HD	31.52	21.15	25.96	21.37
HD0	24.26	23.08	28.76	23.89

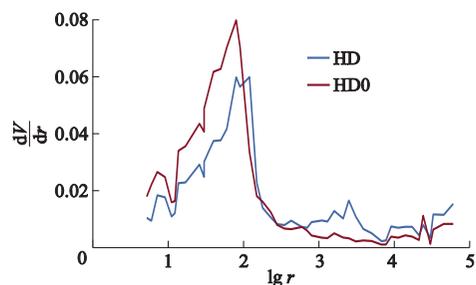


图5 复掺前后C40 机制砂混凝土的孔径分布微分曲线

3.3 复掺C40 机制砂混凝土界面及孔结构改善机理
粉煤灰是一种具有较为稳定玻璃体形态的球形

颗粒矿料,其表面十分致密.早期基本不发生水化反应,后期在 OH^- , SO_4^{2-} 激发下生成水化硅酸钙和水化铝酸钙,大部分水化产物开始以凝胶结构出现,随着龄期增长,逐步转化成纤维状晶体,数量不断增加,相互交叉,形成连锁结构.而矿渣微粉中含有较多的玻璃体,其结构处在不稳定的高能量状态,早期在氢氧化钙及硫酸盐的激发作用下,会水化生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硫铝酸钙、水化硫铁酸钙或水化铝硅酸钙等水化产物,在矿渣微粉参与下形成水泥石早期内部结构的过程中,钙矾石以矿渣微粉颗粒为核心,围绕其表面生长,同时形成较为致密的水化硅酸钙凝胶结构.粉煤灰及矿渣微粉在水化反应过程中消耗了大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,生成较为致密的 C—S—H 凝胶和 C—A—H 晶体等水化产物,使得混凝土微观结构变得更加紧密,同时限制了钙矾石的生长空间,使得钙矾石含量减少,从而改善 C40 机制砂混凝土的界面区结构,增强了其强度和抗冻、抗渗性能.而且由于两者在不同时期的水化作用,使得两者在复掺时能够起到优势互补的作用,在显著提高 C40 机制砂混凝土早期抗冻性能的同时,使得其后期抗冻性能和抗渗性能也有了大幅的提升.

此外,矿渣微粉和粉煤灰颗粒具有较大的比表面积,其本身作为填充物不仅能够有效填充 C40 机制砂混凝土内部的孔隙,并且在早期和后期的水化反应中生成更为致密水化产物,进一步填充其内部孔隙.粉煤灰与矿渣微粉的复掺不仅使得 C40 机制砂混凝土在早期水化成形阶段的孔结构得以改善,而且在后期通过粉煤灰的水化使其孔结构得到持续改善,内部大孔细化,孔隙减少,无害孔增加,有害孔减少,孔径分布得到显著改善.因此,C40 机制砂混凝土的抗冻性能和抗渗性能得到了显著提升.

4 结 论

1) 高寒山区环境下,粉煤灰、矿渣微粉的单掺及两者的复掺均能有效提高 C40 机制砂混凝土的抗冻性能和抗渗性能,其中以粉煤灰与矿渣微粉复掺的作用最为突出.

2) 21% 粉煤灰与 9% 矿渣微粉复掺时,C40 机制砂混凝土不仅具有较高的抗渗性能和早期抗冻性能,同时后期抗冻性能大大提高,界面区形貌和孔结构参数显著改善.

3) 高寒环境下,C40 公路中 C40 机制砂混凝土宜使用 21% 粉煤灰与 9% 矿渣微粉复掺.此外,单掺

粉煤灰的掺量不宜超过 30%.

参考文献 (References)

- [1] 孙龙声.山区高寒环境下机制砂高强与高性能混凝土施工成套技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [2] 王晓龙,樊森,武迪,等.青藏高原地区高性能道面混凝土应用研究[J].混凝土,2013(2):127-129.
WANG X L, FAN M, WU D, et al. Research on the application of high performance pavement concrete in the Qinghai-Tibet Plateau zone[J]. Concrete,2013(2):127-129. (in Chinese)
- [3] 赵红昌,孙中军,于冰,等.严寒地区高性能道面混凝土应用研究[J].新型建筑材料,2013(12):20-22.
ZHAO H C, SUN Z J, YU B, et al. Research and application of high performance pavement concrete in cold area[J]. New Building Materials,2013(12):20-22. (in Chinese)
- [4] 徐大祯,李国华,魏群,等.粉体体积对机制砂低强度混凝土和易性的影响[J].铁道科学与工程学报,2013,10(6):69-73.
XU D Z, LI G H, WEI Q, et al. Research on the effect of powder volume on the workability of low strength manufactured sand concrete[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2013,10(6):69-73. (in Chinese)
- [5] WANG J L, YANG Z F, LIU Y H. Effects of the lithologic character of manufactured sand on properties of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Mater Sci Ed), 2014, 29(6):1213-1218.
- [6] 颜从进.机制砂特性对混凝土性能的影响研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [7] 刘战鳌,周明凯,李北星.石粉对机制砂混凝土性能影响的研究进展[J].材料导报 A(综述篇),2014,28(10):100-103.
LIU Z A, ZHOU M K, LI B X. Research progress on influence of microfines on manufactured sand concrete' performance[J]. Materials Review,2014,28(10):100-103. (in Chinese)
- [8] CELIK T, MARAR K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete[J]. Cement and Concrete Research,1996,26(7):1121-1130.
- [9] KIM J K, LEE C S, PARK C K, et al. The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(11):1719-1729.

(责任编辑 赵 鸥)