

陶瓷抛光渣与硅灰对碱-硅酸反应的抑制作用

高鹏^{1,2,3},倪庄^{1*},周浩然¹,王义猛¹,王珏¹

(1.内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古包头014010;2.内蒙古自治区建筑结构防灾减灾工程技术研究中心(内蒙古科技大学),内蒙古包头014010;3.内蒙古自治区土木工程安全与耐久性重点实验室(内蒙古科技大学),内蒙古包头014010)

摘要:为探究陶瓷抛光渣(ceramic polishing waste, CPW)和硅灰(silica fume, SF)对碱-硅酸反应(alkali-silica reaction, ASR)诱发有害膨胀的影响,采用不同质量的CPW和SF替代等质量水泥进行快速砂浆棒碱骨料反应试验,并制备与砂浆棒相同质量分数的混凝土试件进行强度测试。采用X射线衍射、扫描电镜和能谱分析等方法对砂浆棒中水化产物、微观结构和凝胶物质的元素组成进行分析,明确ASR抑制机理。结果表明,抛光渣的膨胀抑制效果随质量分数的增加而增强,30%的抛光渣可以有效抑制ASR膨胀。二元复掺可以提高ASR抑制作用,但当CPW和SF的质量分数和超过30%时可能会造成混凝土强度的损失;陶瓷抛光渣与硅灰之间存在良好的协同作用,抛光渣中的 Al_2O_3 消耗碱离子并促进多种非膨胀性架状铝硅酸盐矿物的形成,其与硅灰的火山灰效应可增强凝胶的缚碱能力,进一步降低碱离子对ASR膨胀的危害。

关键词:碱-硅酸反应;陶瓷抛光渣;硅灰;抑制机理;铝硅酸盐矿物

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

引用格式:高鹏,倪庄,周浩然,等.陶瓷抛光渣与硅灰对碱-硅酸反应的抑制作用[J].山东大学学报(工学版),2026,56(1):89-96.

GAO Peng, NI Zhuang, ZHOU Haoran, et al. The inhibition of alkali-silica reaction by ceramic polishing waste and silica fume[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1):89-96.

The inhibition of alkali-silica reaction by ceramic polishing waste and silica fume

GAO Peng^{1,2,3}, NI Zhuang^{1*}, ZHOU Haoran¹, WANG Yimeng¹, WANG Jue¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Building Structure Disaster Prevention and Mitigation Engineering Technology Research Center, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Safety and Durability for Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to investigate the effects of ceramic polishing waste (CPW) and silica fume (SF) on the expansion of alkali-silica reaction (ASR), accelerated mortar bar tests were carried out with different proportions of CPW and SF instead of cement, and the strength of concrete specimens with the same replacement rate was tested. The hydration product, microstructure, and elemental composition in the mortar bars were analyzed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM), and energy dispersive spectrometer (EDS) to elucidate the ASR inhibition mechanism. The results showed that the effect of CPW on inhibiting ASR swelling increased with the increase of content, and 30% CPW could inhibit ASR expansion. A binary blend of CPW and SF further enhanced the inhibition of ASR; However, total replacement levels exceeding 30% may reduce the strength of concrete. In addition, there was a synergistic effect between CPW and SF, in which Al_2O_3 in CPW consumed alkali ions and promotes the formation of non-expansive aluminosilicate minerals. The pozzolanic effects of CPW and SF increased the alkali-binding capacity of the gel, further mitigating ASR expansion.

Keywords: alkali-silica reaction; ceramic polishing waste; silica fume; inhibition mechanism; aluminosilicate minerals

收稿日期:2024-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52268044);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2021LHMS05019)

第一作者简介:高鹏(1979—),男,内蒙古包头人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为混凝土耐久性。E-mail:gaop182@163.com

*通信作者简介:倪庄(2000—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为固废混凝土的耐久性。E-mail:2484334468@qq.com

0 引言

碱-硅酸反应(alkali-silica reaction, ASR)是混凝土内的反应性骨料与孔隙溶液中碱离子发生的化学反应。该反应生成的一部分亲水性无定形凝胶会渗入裂缝中,在潮湿环境下吸水并产生膨胀应力;另一部分呈结晶相的碱硅产物会在形貌完善过程中产生结晶应力。二者均会导致混凝土的表面开裂和结构破坏^[1],在我国已建成的部分水利工程(如广西红水河岩滩水电站、陕西安康水电站)等建筑中均存在碱活性骨料问题,且已观测到结构的表面开裂,建筑使用安全和寿命受到严重威胁。

基于 ASR 发生的先决条件,虽然通过使用非碱活性骨料、控制温度湿度和控制碱含量^[2-3]等方法可以有效预防其发生,但仍存在较多局限性,如非碱活性骨料的使用受地区和资源限制、温度湿度在环境中具有相当大的不确定性、碱含量在实际工程中的计算和控制难度较大。研究表明,在混凝土中掺加矿渣和粉煤灰等矿物掺合料引发的二次火山灰反应降低 Ca^{2+} 浓度并减弱其对 ASR 的促进作用^[4],且能优化混凝土的内部结构^[5],提高力学性能和耐腐蚀性^[6-9]。

在工业建筑垃圾中,陶瓷类废弃物占较大比例,且常堆弃在垃圾填埋场。其中,陶瓷抛光渣(ceramic polishing waste, CPW)是瓷砖在研磨和抛光过程中产生的固体粉末^[10]。未规范处理的抛光渣中含有的重金属元素会对周边的土壤和水环境造成严重破坏;

抛光渣随水流入田地渗入土壤后,会改变土壤结构并影响微生物活动,妨碍植物根系生长^[11-12]。文献[13]对抛光渣的成分和反应性研究表明,它是一种高岭土类材料,具有火山灰活性和作为矿物掺合料的潜力;文献[14-16]对掺抛光渣混凝土的强度和耐久性的研究发现,陶瓷抛光渣可显著提高混凝土的力学性能、抗氯离子侵蚀和抗冻融能力。

鉴于陶瓷抛光渣与其他掺合料抑制 ASR 膨胀的研究较少,本研究针对陶瓷抛光渣与硅灰(silica fume, SF)对 ASR 膨胀和混凝土力学性能影响开展工作,通过 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和能谱分析(energy dispersive spectrometer, EDS)对在碱浸泡下砂浆试样中水化产物、内部微观结构和胶凝物质组成进行分析,从微观层面揭示抑制 ASR 膨胀的机理,旨在为实际工程应用和优化掺合料使用等方面提供理论依据。

1 试验

1.1 试验原材料

水泥采用 P·O42.5 级普通硅酸盐水泥,比表面积为 $468.0 \text{ m}^2/\text{kg}$;抛光渣由废弃瓷砖破碎后在球磨机中研磨 1 h 后过筛孔粒径为 $150 \mu\text{m}$ 的砂石筛所得,比表面积为 $322.3 \text{ m}^2/\text{kg}$;硅灰购于澳创建材有限公司,28 d 活性指数为 110,比表面积为 $665.5 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。原材料的化学组成见表 1,粒度分布如图 1 所示。陶瓷抛光渣的微观形貌如图 2 所示。

表 1 原材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of raw materials

原材料	原材料中各组分的质量分数/%							
	MgO	CaO	K ₂ O	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
水泥	2.48	51.99	0.72	26.56	3.34	9.35	3.80	0.70
硅灰	0.70	0.30	0.10	95.20	0.25	0.40	0.40	1.30
陶瓷抛光渣	4.37	9.08	1.45	58.43	0.28	21.85	2.52	0.69

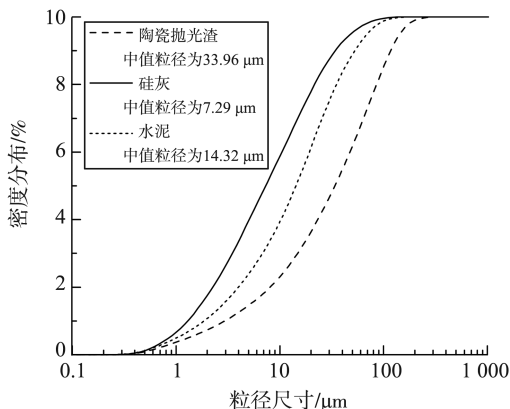


图 1 原材料的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of raw materials

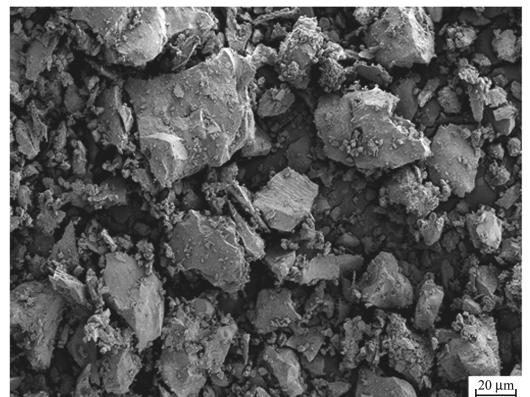


图 2 陶瓷抛光渣的 SEM 图像

Fig.2 SEM graph of CPW

砂浆棒中非活性骨料为天然河砂;活性骨料则采用熔融石英砂, SiO₂ 的质量分数为 99.91%。非活

性骨料和活性骨料的粒径级配见表 2。

表 2 非活性骨料和石英玻璃骨料的级配
Table 2 Gradation of non-reactive and quartz glass aggregate

细分粒径/mm	>2.500~5.000	>1.250~2.500	>0.630~1.250	>0.315~0.630	0.160~0.315
砂浆棒中骨料质量分数/%	10	25	25	25	15

1.2 试验设计

参考文献[17],设计水胶比为 0.47,水泥与骨料的质量比为 1:2.25,骨料质量为 900 g;为保证试件在长龄期的完整性,将熔融石英砂的用量定为骨料质量的 5%^[18];抛光渣用量参考粉煤灰质量分数^[19-20],以 5%、10%、15%、20%、25%和 30%的比例等质量替代水泥,分别记为 P5、P10、P15、P20、P25和 P30;硅灰以 5%和 10%等质量替代水泥,记为 S5和 S10;二元复掺的总质量分数分别为 20%和 30%,分别记为 P15S5、P10S10、P25S5 和 P20S10。基准组试件记为 Ref,砂浆棒试件记为 M,砂浆棒基准组配合比如表 3 所示。混凝土试件记为 C,设计每 m³混凝土质量为 2 500 kg,混凝土基准组配合比如表 4 所示。

表 3 砂浆棒试件配合比

Table 3 Mixing proportions of mortar bar specimens

组别	每组砂浆棒中各组分的质量/g					
	水泥	天然河砂	熔融石英砂	陶瓷抛光渣	硅灰	水
M-Ref	400	855	45	0	0	188

表 4 混凝土试件配合比

Table 4 Mixing proportions of concrete specimens

组别	每 m ³ 混凝土中各组分的质量/kg				
	水泥	天然河砂	粗骨料	减水剂	拌合水
C-Ref	420	752	1 127	4	197

1.3 试验方法

参考文献[17],每组制备 3 个尺寸为 25.4 mm×25.4 mm×285 mm 的砂浆棒试件。试件成型后,将其浸泡在 80 ℃、浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液中进行快速砂浆棒试验。为探究抛光渣和硅灰对 ASR 的长期抑制效果,将试验周期延长至 280 d,每组试件的膨胀率取 3 个试样测量的平均值。按照文献[21],为每组制备尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土立方体试件和 100 mm×100 mm×400 mm 的混凝土棱柱体试件,试件成型脱模后在标准条件下养护,在 7 d 和 28 d 时测试抗压和抗折强度。测试中要求连续加载,每个试样的强度为 3 次强度测试的算术平均值,精确控制在 0.1 MPa 以内。

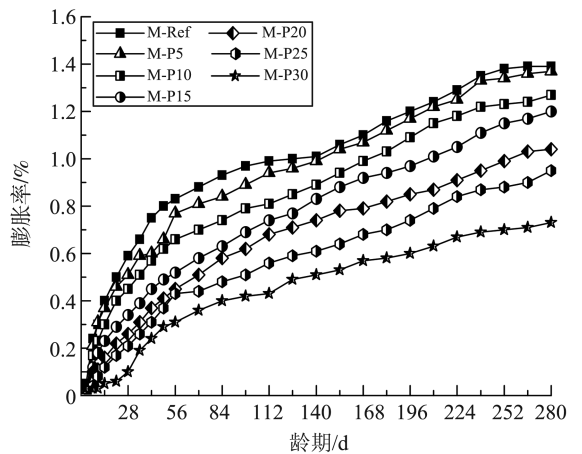
使用 GAIA 3 XMN 双离子束场发射扫描电镜

和能谱仪,对 ASR 初期(7 d)和特征期(56 d)的界面区和凝胶产物的形貌与元素组成进行分析,加速电压为 0.5~30.0 kV;采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪在 10°~90°(2θ)时以 5 °/min 的扫描速率进行衍射测量,步长为 0.02°。

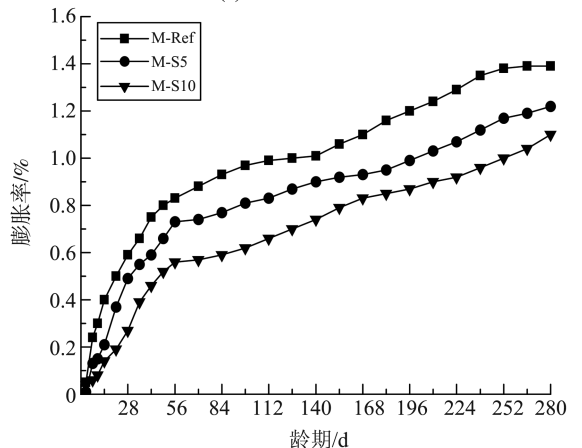
2 结果与分析

2.1 陶瓷抛光渣与硅灰对 ASR 膨胀率的影响

陶瓷抛光渣、硅灰单掺和二元复掺的砂浆棒试件在 280 d 内的膨胀率如图 3 所示。从图 3 中可见,M-Ref 在 14 d 的膨胀率已达 0.40%,28 d 时升至 0.59%,均远超文献[17]规定的阈值 0.10%和 0.20%^[17];至 280 d 时,膨胀率高达 1.39%。这表明研究所用的活性骨料有极高的碱活性,会对水泥基材料造成严重的损害。



(a) 单掺陶瓷抛光渣



(b) 单掺硅灰

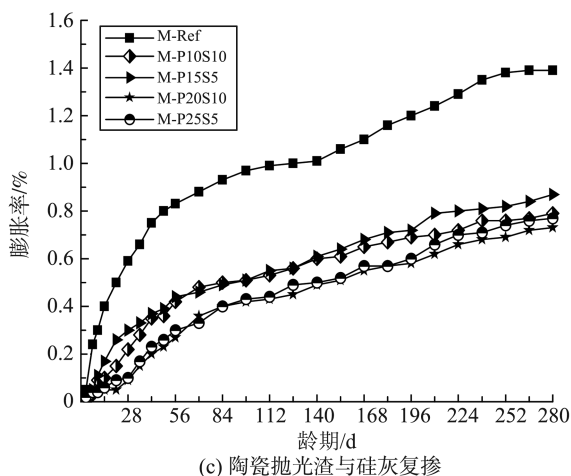


图3 掺陶瓷抛光渣、硅灰及二元混合物砂浆棒试件的膨胀率与龄期的关系

Fig.3 Expansion versus age of mortar bar specimens doped with CPW, SF and binary blends

从图3(a)中可见, M-P5~P30的膨胀率均低于M-Ref, 14 d的膨胀率分别为0.37%、0.30%、0.23%、0.16%、0.12%和0.05%, 280 d的膨胀率分别为1.37%、1.27%、1.20%、1.04%、0.95%和0.73%。结果表明, 陶瓷抛光渣具有抑制ASR的能力, 抑制效果随陶瓷抛光渣质量分数的增加而增强。陶瓷抛光渣质量分数增加后, 试件中 SiO_2 的质量分数上升, 酸性氧化物比例增大, 抑制了金属碱向活性骨料的迁移和ASR诱导的宏观膨胀。在各组试件中, M-P30抑制效果最佳, 14 d膨胀率仅为0.05%, 28 d膨胀率为0.10%, 符合文献[17]的要求。

抛光渣中的 SiO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应后可以降低水化硅酸钙(calcium silicate hydrate, C—S—H)凝胶的Ca/Si, 使凝胶表面电荷为负, 便于吸附孔隙中的游离态碱金属阳离子, 使其固化并失去参与ASR的能力^[22]。溶解于孔隙溶液中的 Al^{3+} 可与 OH^- 反应生成铝酸盐, 随后通过吸附多价金属碱离子形成带负电荷的铝硅酸盐, 并控制活性骨料 SiO_2 的溶解速率^[4]。另外, 抛光渣颗粒粒径大, 反应速率慢于水泥颗粒, 随着龄期增加, 其二次水化反应愈加剧烈^[23], $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 消耗量逐渐增多, 低Ca/Si凝胶持续形成并降低ASR的有效碱浓度。文献[24]指出, 高岭土材料可以促进沸石产物形成并抑制活性骨料中 SiO_2 的溶解速率, 后续试验中, 在M-P30和M-P20S10中均观测到沸石的生成。

从图3(b)可知, 硅灰抑制ASR膨胀的作用随质量分数的增加逐渐提升。其中, M-S10抑制效果较好, 14 d膨胀率为0.14%, 远低于M-Ref。但随着龄期增加, 硅灰逐渐耗竭, 并未能持续有效地抑制膨胀率增长。在相同质量分数下, M-S10的膨胀率

始终低于M-P10。这说明硅灰对ASR的抑制作用更为显著。

在图3(c)中, M-P25S5、M-P20S10、M-P15S5和M-P10S10在14 d的膨胀率分别为0.06%、0.05%、0.17%和0.10%, 28 d的膨胀率分别为0.10%、0.09%、0.30%和0.22%。其中, M-P25S5和M-P20S10组在14 d和28 d的膨胀率均在规范范围内, 表明该两组复掺试件具有良好的ASR抑制效果。抛光渣的加工方式为物理切割和机械磨损, 颗粒表面为锯齿状, 不具备减水和润滑的作用, 砂浆拌合过程中的微小气泡难以排出, 水泥和硅灰颗粒可以优化其粒径分布, 减少孔隙的形成; 硅灰颗粒比表面积大, 水化速率较抛光渣更快, 随着硅灰质量分数的增加, 用于基体黏结的凝胶生成增多, 密实度和抵抗碱溶液侵蚀的能力提高。此外, 陶瓷抛光渣和硅灰添加质量越高, 水泥用量越少, 降低了试件中的有效碱度, 延缓ASR膨胀。

20%和30%质量分数下抛光渣与二元复掺试件在不同龄期的膨胀率如图4所示。

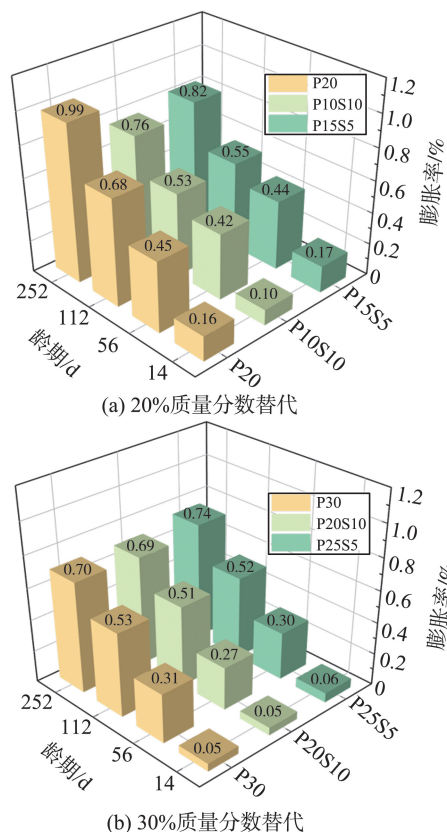


图4 相同质量分数下陶瓷抛光渣与二元混合物试件在不同龄期的膨胀率

Fig.4 Expansion of CPW and binary blend specimens with the same content at different ages

由图4可知, M-P10S10的膨胀率低于M-P20, M-P20S10的膨胀率低于M-P30。这表明抛光渣和硅灰复掺的ASR抑制效果优于单掺。在复掺比例

中,硅灰质量分数比例增高,膨胀抑制作用更显著。此外,抛光渣质量分数为 30% 与复掺试件在 112 d 后的膨胀率曲线趋于平缓。这表明矿物掺合料在高温高碱环境中可能已被消耗殆尽,其低 Ca/Si 凝胶碱离子结合过多,凝胶表面电荷逐渐转

正,无法固化更多的碱金属阳离子,不能有效抑制 ASR 膨胀。

2.2 陶瓷抛光渣与硅灰对混凝土强度的影响

掺抛光渣、硅灰和二元复掺混凝土试件在 7 d 和 28 d 的强度结果如图 5 所示。

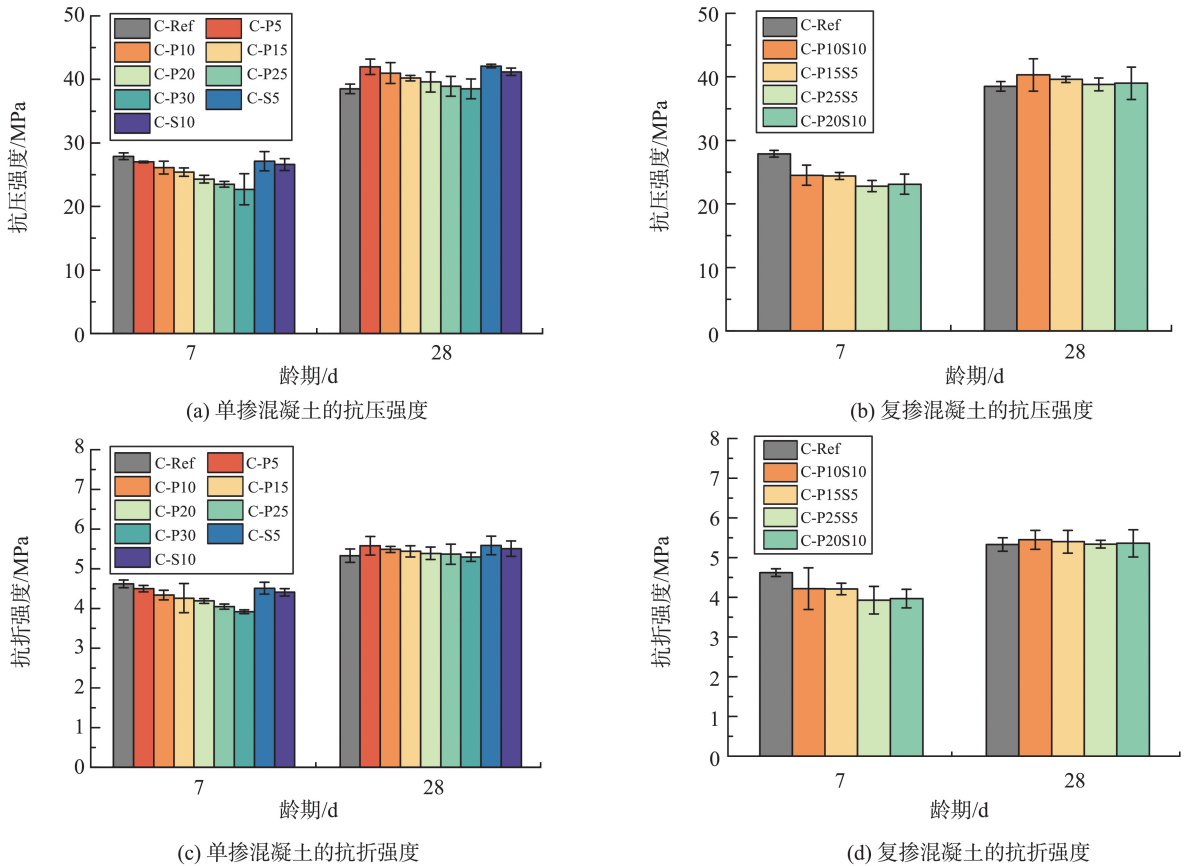


图 5 含陶瓷抛光渣、硅灰与二元混合物试件在不同龄期的强度变化
Fig.5 Strength changes of specimens containing CPW, SF and binary blends at different ages

从图 5(a)、(c) 可知,掺抛光渣混凝土的抗压强度均低于 C-Ref 和掺硅灰混凝土的抗压强度。抛光渣的质量分数每增加 5%,混凝土在 7 d 的抗压强度下降约 3.10%,抗折强度下降约 2.68%。这说明抛光渣会劣化混凝土早期的抗压和抗折强度,劣化幅度随质量分数的增加而增大。尽管 28 d 时混凝土的强度有所提高,但强度随质量分数下降的趋势并未改变。

粒径为 33.96 μm 的抛光渣颗粒远大于水泥颗粒和硅灰颗粒,单位时间内参与反应的颗粒更少,导致反应速率放慢,同时水泥用量因掺抛光渣减少,前期高强凝胶产物形成数量减少,混凝土初期强度降低。抛光渣的大粒径在拌合中会增加砂浆内颗粒间距并导致颗粒分布不均,致使孔洞孔隙出现。此外,抛光渣颗粒内部孔隙较多且具备较高的吸水性,拌合过程中会吸入水并降低水泥水化的有效水灰比,在其多孔结构和大粒径影响下,混凝土整体孔隙率

提高,基体密实度受影响并导致强度下降。

从图 5 (b)、(d) 可知, M-P10S10、M-P15S5、M-P25S5 和 M-P20S10 7 d 的抗压和抗折强度均低于 M-Ref。这表明掺加硅灰并不会改变抛光渣劣化早期强度的现象。随着抛光渣质量分数的增加,稀释作用致使高强凝胶数量减少和试件孔隙率增加占据主导地位,但硅灰的填充效应在一定程度上弥补了强度的损失。因此,20% 和 30% 质量分数的复掺混凝土试件强度均略高于单掺混凝土试件强度。尽管 28 d 时强度随质量分数下降的趋势依然存在,但整体强度已超过 M-Ref。当掺合料质量分数达到 30% (如 M-P30、M-P25S5、M-P20S10) 时,其混凝土强度与 M-Ref 基本持平。综上,当抛光渣单掺或复掺质量分数超过 30% 时,可能会对混凝土的基本强度造成损伤。

2.3 陶瓷抛光渣与硅灰抑制 ASR 膨胀机理

采用扫描电镜观察 M-Ref、M-P30 和 M-

P20S10 试样在 7 d(ASR 早期)和 56 d(ASR 特征期)时内部的微观形貌,并对凝胶产物进行能谱分析。基准试件 M-Ref 在 7 d 和 56 d 的微观形貌如图 6 所示。

由图 6 可知,M-Ref 基体在 7 d 时已出现明显的裂缝,表面出现大量松散絮状的 C—S—H 凝胶和析出的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,在裂缝交汇处分布有疏松多孔的无定形 ASR-P1 凝胶^[25]。56 d 的 M-Ref 基体表面贯通裂缝数量增多,裂缝宽度约 $3.14 \mu\text{m}$,贯通长度约 $61.3 \mu\text{m}$ 。在裂缝交汇处充斥 ASR 凝胶,C—S—H 凝胶由絮状转变为半晶体状晶格分布于基质表面。

表 5 反应产物化学组成

Table 5 Chemical composition of reaction products

组别	龄期/d	各化学成分的质量分数/%							Ca/Si
		Na	Al	Si	K	Ca	C	O	
M-Ref	7	1.18	3.00	20.89	0.36	40.09	0.82	33.66	1.92
	56	8.37	1.04	4.47	0.70	6.56	14.48	64.39	1.46
M-P30	7	0.28	3.76	7.07	0.10	10.18	11.33	62.37	1.43
	56	5.90	4.25	13.86	0.09	9.33	12.90	52.15	0.67
M-P20S10	7	1.56	2.70	8.34	0.34	12.51	14.71	58.59	1.50
	56	1.69	2.30	22.49	0.62	6.95	9.52	56.43	0.31

由表 5 可知,M-Ref 中凝胶的 Ca/Si 质量分数较大,基本不具备缚碱能力,无抑制的 ASR 膨胀和高温、高碱的相互作用导致其内部 ASR 产物肆意生长,宏观膨胀率极高。

M-P30 在 7 d 和 56 d 的微观形貌如图 7 所示。

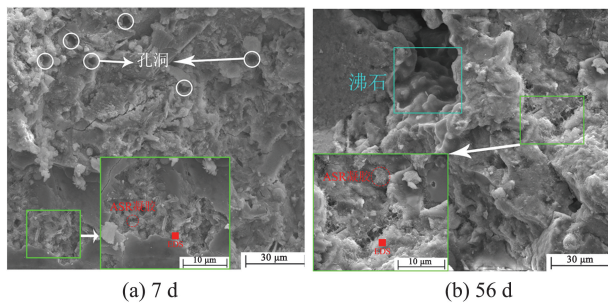


图 7 M-P30 在 7 d 和 56 d 的微观形貌

Fig.7 Microscopic morphology of M-P30 7 d and 56 d

由图 7 可知,7 d 的 M-P30 基质表面尚未形成致密结构,存在多处孔洞,应该为抛光渣的多孔结构在拌合中引入的微小气泡。56 d 时,在骨料周围及凝胶覆盖处,未出现明显裂纹,且在孔隙中还观察到呈多边形貌的沸石产物。与 M-Ref 相比,M-P30 在两个龄期的表面形貌相对更完整,并未出现贯通裂缝,多边形 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的数量也明显减少。掺入抛光渣后火山灰反应随龄期增加愈发剧烈^[23],形成大量凝胶产物对孔隙进行填充,阻断孔隙通道中的大部分游离水和游离碱。从表 5 可知,M-P30 中的

对两个龄期中的凝胶进行能谱分析,结果见表 5。

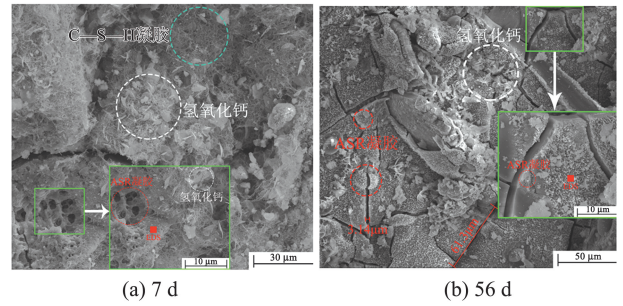
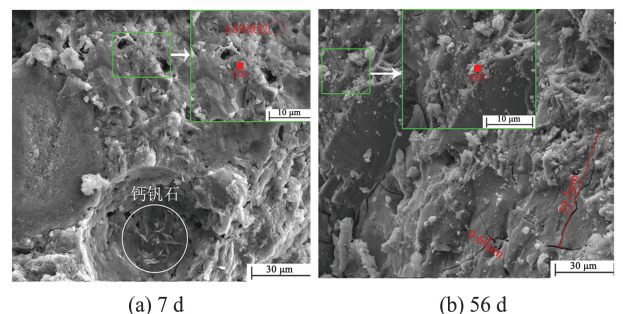


图 6 M-Ref 在 7 d 和 56 d 的微观形貌

Fig.6 Microscopic morphology of M-Ref at 7 d and 56 d

凝胶 Ca/Si 均明显低于 M-Ref 中的凝胶 Ca/Si,说明掺抛光渣后形成的低钙水化凝胶具有缚碱能力,可以降低孔隙溶液碱度并延缓 ASR 膨胀进程。

M-P20S10 在 7 d 和 56 d 的微观形貌如图 8 所示。得益于二元复掺的优秀粒径级配分布,M-P20S10 的界面密实度较高,并未观察到明显的 ASR 凝胶。56 d 的 M-P20S10 中虽有微裂缝分布,但未形成交汇贯通的裂缝,宽度和长度要远小于 M-Ref。一方面,这或许与发现的钙矾石有关,它虽对 ASR 没有直接的抑制作用,但可以在内部搭接成三维网状结构,承受膨胀带来的内部应力;另一方面,硅灰可以弥补水泥稀释作用导致的水化产物不足并填充孔隙,补充低 Ca/Si 凝胶数量,维持基体黏结的整体性并抑制 ASR 产物生长,延缓 ASR 进程,从而降低宏观膨胀率。



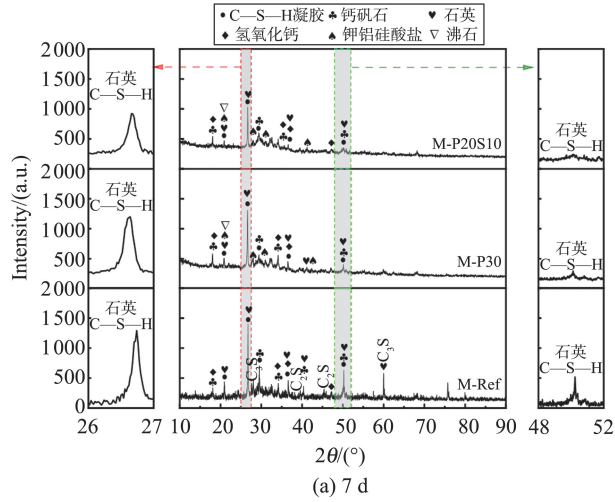
(a) 7 d

(b) 56 d

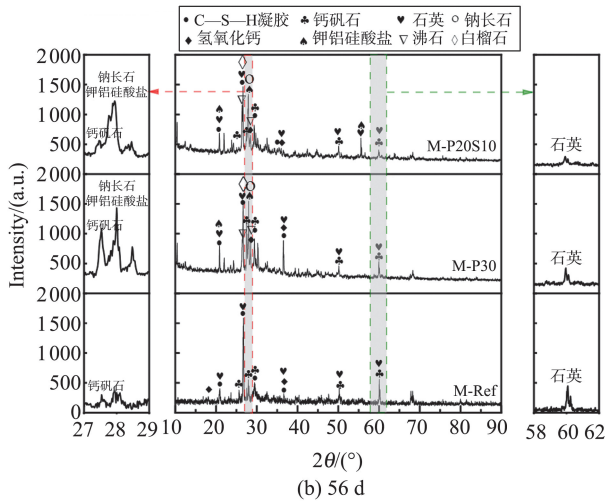
图 8 M-P20S10 在 7 d 和 56 d 的微观形貌

Fig.8 Microscopic morphology of M-P20S10 7 d and 56 d

将 7 d 和 56 d 的 M-Ref、M-P30 和 M-P20S10 砂浆棒试件进行 X 射线衍射分析,结果如图 9 所示。由图 9 可知,在 XRD 图谱中均观察到水泥典型物相(C₂S,C₃S)的存在。



(a) 7 d



(b) 56 d

图 9 砂浆棒试件在不同龄期的 XRD 图谱
Fig.9 XRD patterns of mortar bar specimens at different ages

从图 9(a)中可以发现,随着抛光渣和硅灰的掺入,Ca(OH)₂ 被大量消耗,Ca(OH)₂ 峰相逐渐弥散。在 2θ 为 26°~27°和 48°~52°处,M-Ref 中原本尖锐的晶体相峰随抛光渣和硅灰的掺入开始逐渐弥散,代表无定形凝胶相的驼峰逐渐隆起。这说明抛光渣和硅灰的火山灰反应增加了低 Ca/Si 无定形凝胶的形成数量,并抑制 ASR 膨胀。

在图 9(b)的 2θ 为 58°~62°处,M-P30 和 M-P20S10 中石英相的峰值强度逐渐下降。这是因为在高温高碱激发下,ASR 凝胶与火山灰反应的 C—S—H 凝胶不断生成,SiO₂ 消耗量增加。此外,在 M-P30和 M-P20S10 的 2θ 为 25°~29°处,均观察到钾铝硅酸盐相(KAlSiO₄)、钠长石相(NaAlSi₃O₈)和白榴石相(KAlSi₂O₆)的峰出现。抛光渣为试件中

引入大量 Al₂O₃,碱-硅凝胶体系更容易与之结合为碱-Al₂O₃-硅体系;K⁺和 Na⁺也更倾向与 Al₂O₃ 结合形成架状铝硅酸盐矿物^[26-27],其结晶相较于稳定,不因水分子的进出而影响体积形态。因此,在铝硅酸盐矿物形成过程中可以减少游离碱离子数量,形成后可填充在微孔中并阻隔离子迁移的通道。此外,在 M-P30 和 M-P20S10 的 XRD 图谱中均观测到沸石相。在加热条件下,水泥中的 C—S—H凝胶、钙矾石和钠长石在相互作用下,会导致孔隙中的高 Ca、低 Si 和低 Na 环境,促进沸石的生成^[28-29]。因此,在快速砂浆棒法和铝硅酸盐产物中钠长石的共同作用下,在 XRD 图谱和微观形貌中观察到了少量沸石。

3 结论

(1)陶瓷抛光渣对 ASR 的抑制机理为两种成分的共同作用。其一是 SiO₂ 与 Ca(OH)₂ 的火山灰反应可以降低 C—S—H 凝胶的 Ca/Si,增强其固碱能力,减少 ASR 所需的孔隙溶液碱浓度;其二是 Al₂O₃ 与碱离子结合生成非膨胀性的架状铝硅酸盐产物,消耗碱离子数量并促进沸石生成,抑制活性骨料的溶解速度。

(2)陶瓷抛光渣会劣化混凝土的早期强度。该现象可随龄期增加逐渐改善。复掺硅灰可以弥补陶瓷抛光渣导致的孔隙率提高和反应速率慢的缺点,增强混凝土的密实度,略微改善混凝土早期强度。

(3)陶瓷抛光渣有效抑制 ASR 的质量分数不应超过 30%,否则会对混凝土强度造成损伤;相同质量分数下,陶瓷抛光渣与硅灰二元复掺的 ASR 抑制效果优于单掺。针对处在西北地区的盐湖、盐渍土等高盐、高碱环境下的工程,建议使用 30%抛光渣单掺或将 20%抛光渣与 10%硅灰进行二元复掺替代水泥。

参考文献:

[1] GHOLIZADEH-VAYGHAN A, RAJABIPOUR F. The influence of alkali-silica reaction (ASR) gel composition on its hydrophilic properties and free swelling in contact with water vapor [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 94:49-58.
[2] GAO P, WANG Y B, WANG Y M, et al. Influence of waste tire rubber powder, polypropylene fiber and their binary blends on mitigating alkali-silica reaction [J].

- Journal of Building Engineering, 2023, 67: 105951.
- [3] WANG Y B, GAO P, SU H Z, et al. Failure criteria and microstructure evolution mechanism of the alkali-silica reaction of concrete[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2023, 62 : 20230102.
- [4] LEI J W, LAW W W, YANG E H. Effect of calcium hydroxide on the alkali-silica reaction of alkali-activated slag mortars activated by sodium hydroxide[J]. Construction and Building Materials, 2021, 272: 121868.
- [5] HAY R, OSTERTAG C P. New insights into the role of fly ash in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 144: 106440.
- [6] SHAFATIAN S M H, AKHAVAN A, MARAGHECHI H, et al. How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)? [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37: 143-153.
- [7] THOMAS M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction; a review[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(12): 1224-1231.
- [8] WANG W Q, ROBERTS J, RANGARAJU P. Pozzolanic reactivity of high-alkali supplementary cementitious materials and its impact on mitigation of alkali-silica reaction[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2024, 2678 (11): 2110-2126.
- [9] CHEN Y L, XIONG X F, SHI S, et al. Effect of glass powder on alkali-silica reaction mitigation for tunnel waste rock slag in concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98: 111024.
- [10] SONG Q, BAO J W, XUE S B, et al. Study on the recycling of ceramic polishing slag in autoclaved aerated foam concrete by response surface methodology [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56: 104827.
- [11] TIAN B, MA W N, LI X G, et al. Effect of ceramic polishing waste on the properties of alkali-activated slag pastes; shrinkage, hydration and mechanical property [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 63: 105448.
- [12] 孙晓玮, 邵佳慧, 王巧梭, 等. 浅谈废陶瓷的资源化再利用研究[J]. 佛山陶瓷, 2022, 32 (11): 45-47.
SUN Xiaowei, SHAO Jiahui, WANG Qiaosuo, et al. Talking about the research on the recycling of waste ceramics[J]. Foshan Ceramics, 2022, 32(11): 45-47.
- [13] LI L G, ZHUO Z Y, ZHU J, et al. Adding ceramic polishing waste as paste substitute to improve sulphate and shrinkage resistances of mortar[J]. Powder Technology, 2020, 362: 149-156.
- [14] PACHECO-TORGAL F, JALALI S. Retraction note: compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete [J]. Materials and Structures, 2021, 54(4): 153.
- [15] KANNAN D M, ABOUBAKR S H, EL-DIEB A S, et al. High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 35-41.
- [16] PATEL H, ARORA N K, VANIYA S R. Use of ceramic waste powder in cement concrete[J]. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 2015, 2(1): 91-97.
- [17] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程: GB/T SL352—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [18] 杨长辉, 蒲心诚, 吴芳. 碱矿渣水泥砂浆的碱集料反应膨胀研究[J]. 硅酸盐学报, 1999, 27(6): 651-657.
YANG Changhui, PU Xincheng, WU Fang. The studies on alkali-aggregate reaction of alkali-activated slag cement mortars [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1999, 27(6): 651-657.
- [19] TAPAS M J, THOMAS P, VESSALAS K, et al. Comparative study of the efficacy of fly ash and reactive aggregate powders in mitigating alkali-silica reaction[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 63: 105571.
- [20] SHI Z G, SHI C J, ZHANG J, et al. Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 108: 10-19.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [22] 魏风艳, 吕忆农, 兰祥辉, 等. 低Ca/Si比的C—S—H凝胶产物在抑制AAR中的作用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2004, 26(4): 98-102.
WEI Fengyan, LÜ Yinong, LAN Xianghui, et al. Effect of low Ca/Si ratio of C—S—H gels on restraining expansion due to alkali-aggregate reaction[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 26(4): 98-102.
- [23] CHENG Y H, HUANG F, LI G L, et al. Test research on effects of ceramic polishing powder on carbonation and sulphate-corrosion resistance of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 55: 440-446.