

文章编号:1007-9629(2024)11-1047-07

减缩剂对碱激发矿渣-铜渣砂浆的影响 及作用机理

许荣盛^{1,2,*}, 汪浩然^{1,2}, 杨仁和³, 孔凡辉^{1,2}, 洪通^{1,2}

(1.安徽建筑大学 建筑结构与地下工程安徽省重点实验室,安徽合肥 230601; 2.安徽建筑大学 土木工程学院,安徽合肥 230601; 3.北京建筑材料科学研究总院有限公司,北京 100041)

摘要:通过掺入聚醚型减缩剂(PSRA)改善碱激发矿渣-铜渣砂浆(CSM)的体积稳定性,研究了 PSRA 掺量对 CSM 凝结时间、抗压强度和干燥收缩率的影响,并采用等温量热仪、X 射线衍射仪、扫描电镜-能谱仪、核磁共振和热重-差示量热分析仪等分析了 PSRA 对 CSM 水化进程和微观结构影响,探讨了 PSRA 的减缩机理.结果表明:PSRA 的掺入延长了 CSM 净浆的凝结时间,延缓了体系的水化进程,且延缓作用随着 PSRA 掺量的增大而增强;PSRA 掺量为 0%~2.0% 时,CSM 的干燥收缩率和抗压强度均随着 PSRA 掺量的增大而逐渐减小;PSRA 降低了孔溶液的表面张力,改变了孔结构,使得毛细管压力下降,进而起到减小 CSM 干燥收缩的效果.

关键词:碱激发矿渣-铜渣砂浆;聚醚型减缩剂;干燥收缩;抗压强度;微观结构

中图分类号:TQ172

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.11.010

Effect and Mechanism of Shrinkage Reducing Admixture on Alkali-Activated Slag-Copper Slag Mortar

XU Rongsheng^{1,2,*}, WANG Haoran^{1,2}, YANG Renhe³, KONG Fanhui^{1,2}, HONG Tong^{1,2}

(1. Anhui Province Key Laboratory of Building Structure and Underground Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, 230601, China; 3. Beijing Building Materials Academy of Sciences Research Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: The volume stability of alkali-activated slag-copper slag mortar(CSM) was improved by incorporating polyether-type shrinkage reducing admixture(PSRA). The effects of PSRA content on the setting time, compressive strength and drying shrinkage of CSM were investigated. The hydration process and microstructure of CSM were studied by isothermal calorimetry, X-ray diffractometer, scanning electron microscopy-energy dispersive spectrometer, nuclear magnetic resonance and thermogravimetric-differential scanning calorimetry. The shrinkage reduction mechanism of SRA was explored. The results show that the incorporation of PSRA extends the setting time of CSM slurry, and delays the hydration process of the system, with the delaying effect increasing as the PSRA content increases. When the PSRA content ranges from 0% to 2.0%, both the drying shrinkage and compressive strength of CSM gradually decrease with the increase of PSRA content. PSRA reduces the surface tension of the pore solution and changes the pore structure, resulting in a decrease in capillary pressure and thus reducing drying shrinkage of CSM.

Key words: alkali-activated slag-copper slag mortar; polyether-type shrinkage reducing admixture; drying shrinkage; compressive strength; microstructure

收稿日期:2023-12-28;修订日期:2024-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52308227)

第一作者(通讯作者):许荣盛(1988—),男,安徽桐城人,安徽建筑大学讲师,硕士生导师.博士.E-mail:rongshengxu@ahjzu.edu.cn

铜渣是铜冶炼过程中的副产品^[1],2021年中国铜渣产量已超过2 000万t^[2]。目前,铜渣的综合利用率较低,占用大量土地资源的同时,还造成了土壤和地下水等污染。制备碱激发材料(AAM)是处理固废的有效手段^[3-4]。铜渣与矿渣等传统前驱体的化学成分相似^[5],均以SiO₂、CaO和Al₂O₃为主^[6],具有作为前驱体的潜力^[7]。因此,使用铜渣替代部分矿渣制备AAM,可以减少对矿渣的依赖,实现铜渣的资源化利用,降低其对环境的不利影响^[8]。

AAM存在收缩大、易开裂等问题^[9]。掺入减缩剂(SRA)是改善其体积稳定性的有效方法。作为一种非离子表面活性剂,SRA与孔溶液接触时,亲水头部会吸附在非极性液-气界面,而疏水尾部被极性分子排斥,使孔溶液表面张力下降,从而有效减小干燥收缩^[10-11]。此外,SRA会延缓水化反应进程,改变孔径分布^[12],降低毛细孔压力,进而减小干燥收缩。

目前,SRA对普通混凝土性能的影响研究已取得了巨大进展^[13-14],但有关SRA对碱激发二元材料性能的影响鲜有报道。因此,本文研究了聚醚型减缩剂(PSRA)掺量对碱激发矿渣-铜渣砂浆(CSM)凝结时间、抗压强度和干燥收缩率的影响,并采用等温量热仪、X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜-能谱分析(SEM-EDS)、核磁共振分析仪(NMR)和热重-差示量热分析仪(TG-DSC)等分析了PSRA对CSM水化进程和微观结构的影响,为探明PSRA对CSM的作用机理提供参考。

1 试验

1.1 原材料

铜渣(CS)来自安徽铜陵某有色金属冶炼厂,为高温水淬渣,经破碎后采用球磨机球磨,使其符合细度要求,所得铜渣粉密度为3.32 g/cm³,比表面积为544 m²/kg。高炉矿渣(GGBS)由华新湘钢水泥公司

提供,密度和表面积分别为2.86 g/m³和429 m²/kg。铜渣和高炉矿渣的化学组成(质量分数,文中涉及的掺量、水灰比等除特殊说明外均为质量分数或质量比)见表1,其粒度分布和XRD图谱分别见图1、2。低相对分子质量PSRA由广西恒庆建材有限公司提供,为淡黄色浑浊液体,主要成分为二乙二醇单丁醚(含量大于99.0%),密度为(0.98±0.02) g/cm³,pH值为10±1。NaOH来自国药化学试剂有限公司(中国北京),分析纯。水玻璃(WG)来自嘉善县优瑞耐火材料有限公司,使用NaOH调节其模数至1.5。

表1 铜渣和高炉矿渣的化学组成

Table 1 Chemical compositions (by mass) of CS and GGBS

Unit: %

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO
CS	24.01	6.77	41.24	10.72	3.08	2.61
GGBS	27.92	15.66	0.35	40.58	0.59	9.83

1.2 配合比

砂浆水灰比为0.4,CS、GGBS、水玻璃、砂的用量分别为135、315、142、1 350 g。砂浆的制备过程为:首先将铜渣和矿渣混合均匀后,再加入标准砂继续搅拌,最后加入水玻璃、PSRA和水,搅拌均匀后倒入模具中成型。设置PSRA的掺量为0%、0.5%、1.0%、1.5%和2.0%,制备的砂浆分别记为R0(对照组)、S1、S2、S3和S4。

1.3 测试方法

净浆的凝结时间参照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》进行测试。水化热采用瑞典雷特拉仪器公司的TAM Air等温量热仪进行测试,测试温度为20℃。砂浆抗压强度参照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行测试。

干燥收缩率参照JC/T 603—2004《水泥胶砂干湿试验方法》进行测试。将试件1 d的长度记为初始

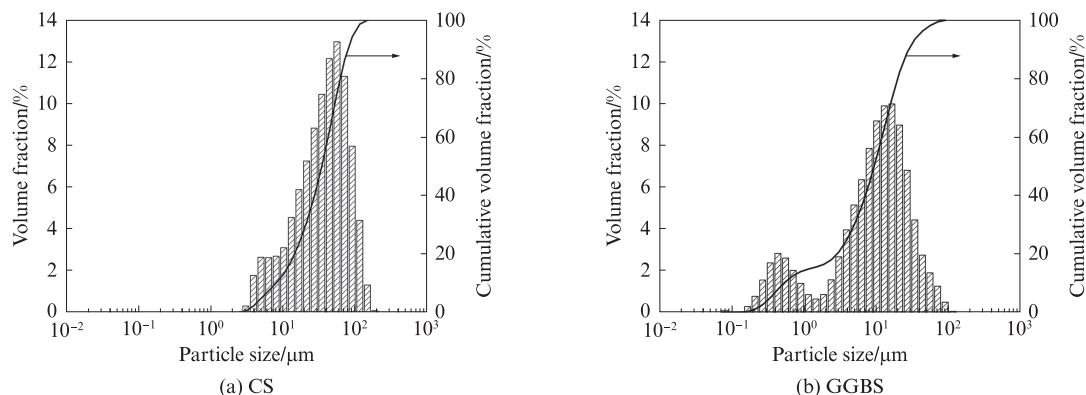


图1 铜渣和矿渣的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of CS and GGBS

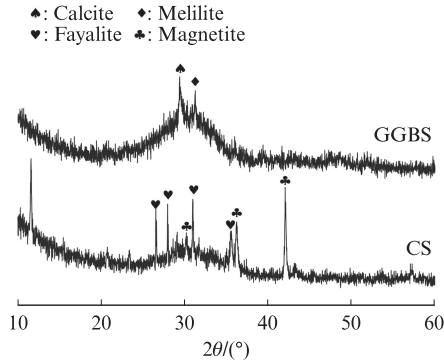


图 2 铜渣和矿渣的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of CS and GGBS

长度 L_0 , 养护龄期 t 时试件实测长度为 L_t . 试件的干燥收缩率 ϵ 计算式为:

$$\epsilon = \frac{L_t - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

用压孔溶液法获取不同 PSRA 掺量下净浆水化 3 h 的孔溶液, 过滤后使用 KINO A—601 型表面张力仪测试孔溶液表面张力. 用压孔溶液法获取不同 PSRA 掺量下净浆水化 3、12 和 24 h 的孔溶液, 并使用 ICP-OES 电感耦合等离子体发射光谱仪测试孔溶液的离子浓度. 用 MacroMR12-150H-I 型核磁共振分析仪进行孔径分布测试.

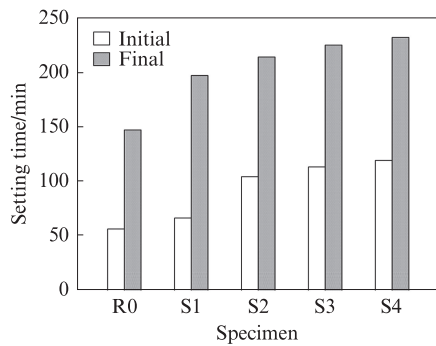
用 RIGAKU KG-3 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对试

件进行物相分析, 扫描速率为 $2(^{\circ})/\text{min}$. 采用 VEGA TS5130MM Tescan 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察试件的微观形貌. 使用 Netzsch STA 409C 型同步热重-差示量热仪进行热重分析 (TG-DSC), N_2 气氛, N_2 的流速为 $20 \text{ mL}/\text{min}$, 升温速率为 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 测试范围为 $20\sim 1\,000^{\circ}\text{C}$.

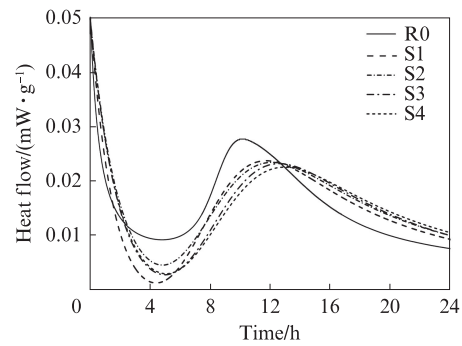
2 结果与讨论

2.1 水化进程

PSRA 对净浆凝结时间和水化热的影响见图 3. 由图 3 可见: 掺入 PSRA 会延缓浆体的凝结过程, 且凝结时间随着 PSRA 掺量的增加而增大; 与对照组试件 R0 相比, 试件 S4 的初凝与终凝时间分别增加了 63、85 min; 随着 PSRA 掺量的增大, CSM 浆体放热峰延迟, 且峰值逐渐下降; 与试件 R0 相比, 试件 S4 的放热峰延迟了 4.5 h, 表明 PSRA 会延长体系的诱导期, 降低水化放热速率. 目前针对 PSRA 延缓水泥基材料水化进程的原因已基本达成共识: (1) PSRA 的掺入会降低溶液的极性, 并结合部分碱性离子, 导致碱度下降, 延缓水化进程, 从而降低体系的水化放热速率和峰值; (2) PSRA 与孔隙中溶液相互作用会在前驱体表面形成分子膜, 阻碍其与水分子的进一步接触, 降低 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 和 SiO_4^{2-} 的溶出速率, 延缓体系的水化^[15-16].



(a) Setting time



(b) Hydration heat

图 3 PSRA 对净浆凝结时间和水化热的影响

Fig. 3 Effect of PSRA on setting time and hydration heat of pastes

2.2 抗压强度

PSRA 对 CSM 抗压强度的影响见图 4. 由图 4 可见: PSRA 的掺入降低了 CSM 的抗压强度, 且随着 PSRA 掺量的增大, 抗压强度逐渐下降; 试件 S4 的 28 d 抗压强度为 64.3 MPa, 比试件 R0 降低了 10.32%, 这是因为 PSRA 延缓了体系的水化进程, 抑制了早期的聚合反应, 导致水化产物生成量减少, 对强度的发展造成了不利影响^[17-18]; 试件 R0 的 3、7 d 抗压强度分别为 48.7、60.3 MPa, 而试件 S4 的 3、7 d 抗压强度分别为 41.7、52.6 MPa, 比试件 R0 分别降低

了 14.37%、12.77%, 大于其 28 d 时的下降幅度. 由此可知, PSRA 对 CSM 早期抗压强度影响较为显著, 而随着龄期的增长, 这种不利影响逐渐减小. 其主要原因是随着反应时间的推移, 水化产物提供的碱性环境会加速缩聚反应的进行, 从而降低 PSRA 对 CSM 强度的不利影响^[19].

2.3 干燥收缩率

PSRA 对 CSM 干燥收缩率的影响见图 5. 由图 5 可见: 所有试件的干燥收缩率均在 0~14 d 内迅速上升, 而后增长速率逐渐变缓, 最终趋于稳定; 掺入

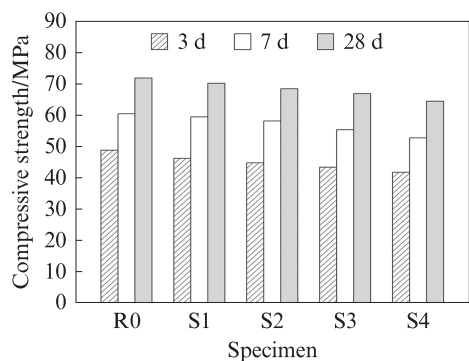


图4 PSRA对CSM抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of PSRA on compressive strength of CSM

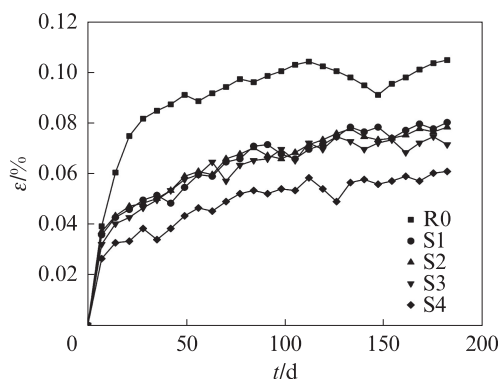
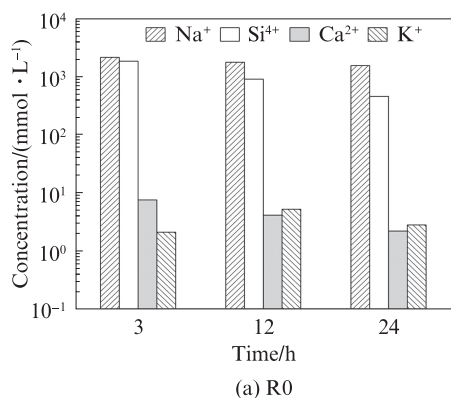


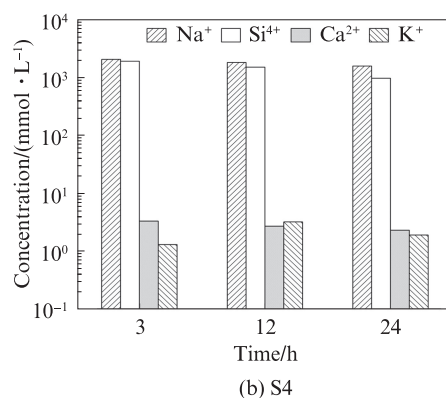
图5 PSRA对CSM干燥收缩率的影响

Fig. 5 Effect of PSRA on drying shrinkage rate of CSM

PSRA显著降低了试件的干燥收缩,随着PSRA掺量的增大,CSM的干燥收缩率逐渐减小;与试件R0相比,试件S1、S2、S3和S4的180 d干燥收缩率分别下降了23.6%、25.3%、31.9%、42.1%。目前,普遍认为



(a) R0



(b) S4

图6 孔溶液的离子浓度

Fig. 6 Ion concentrations of pore solution

2.6 孔径分布

PSRA对CSM孔径 D 分布的影响见图7。由图7可见:试件R0的孔径主要分布在10~100 nm;随着PSRA掺量的增大,CSM孔径分布曲线的峰值点逐渐右移,且峰宽增大,表明PSRA的掺入使基体孔径和孔隙率增大;随着PSRA掺量的增大,

PSRA对水泥基材料干燥收缩的抑制作用主要是由2个原因引起的,即掺入PSRA降低了孔溶液的表面张力和改变了基体的孔结构。表面张力的降低能够有效减小水分蒸发时的内应力,而孔隙率的增大和孔径分布的改变可以降低毛细管压力。此外,也有学者认为PSRA有助于维持水泥基材料内部的相对湿度,降低水分的蒸发速率,从而减缓干燥收缩的发生^[20]。

2.4 表面张力

PSRA对孔溶液表面张力的影响见表2。由表2可见,随着PSRA掺量的增加,孔溶液的表面张力逐渐下降。表面张力的下降不仅可以减缓孔隙负压的发展,还能够减小固相表面吸附的水层厚度,使得基体内部的相对湿度得以较好地维持。

表2 PSRA对孔溶液表面张力的影响

Table 2 Effect of PSRA on surface tension of pore solutions

Specimen	R0	S1	S2	S3	S4
Surface tension/(mN·m ⁻¹)	56	54	50	45	39

2.5 孔溶液离子浓度

孔溶液的离子浓度见图6。由图6可见:水玻璃激发剂引入了大量的Na⁺和Si⁴⁺,这2种离子的浓度始终明显高于其他离子;反应12 h后,试件R0的Si⁴⁺浓度下降了52.4%,而试件S4仅下降了21.1%,这说明PSRA延缓了体系的水化反应进程;PSRA显著降低了孔溶液中Ca²⁺和K⁺的初始浓度,碱性离子浓度的下降会降低体系的碱度,使前驱体的溶解变慢,进而延缓水化反应进程。

$D > 1000$ nm的大孔体积逐渐增加,这也是PSRA的掺入导致CSM抗压强度下降的主要原因。根据拉普拉斯方程^[21],平均孔径和孔隙率的增加有助于降低毛细管压力,水分蒸发时所产生的内应力较小,因此导致其干燥收缩率随着PSRA掺量的增大而逐渐降低(见图5)。同时,随着孔隙中水分的蒸发,PSRA浓

度逐渐增大使得孔溶液黏度增高, 导致水分蒸发速率下降, 因此随着龄期的增长, PSRA 的减缩效果更加明显.

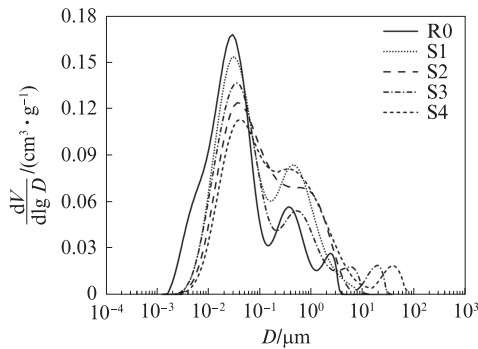


图 7 PSRA 对 CSM 孔径分布的影响

Fig. 7 Effect of PSRA on pore size distribution of CSM

2.7 XRD 分析

CSM 的 XRD 图谱见图 8. 由图 8 可见, 砂浆的 XRD 图谱中均能够观察到明显的石英、铁橄榄石、水化硅铝酸钙 (C-A-S-H)、 $\text{Fe}(\text{OH})_2/\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和方解石的衍射峰. 石英相和铁橄榄石是由原材料标准砂和铜渣引入的, C-A-S-H 为体系的主要水化产物, $\text{Fe}(\text{OH})_2/\text{Fe}(\text{OH})_3$ 源于铜渣中的铁相与溶液中的 OH^- 反应产物^[22], 方解石则是样品碳化所致. 由此可

见, PSRA 的掺入并未有新矿物相生成, 表明 PSRA 不会改变水化产物的种类. 但随着 PSRA 掺量的增大, C-A-S-H 峰强度逐渐减弱, 这是由于 PSRA 会延缓水化反应进程, 引起生成的 C-A-S-H 减少, 最终导致 CSM 抗压强度下降^[23].

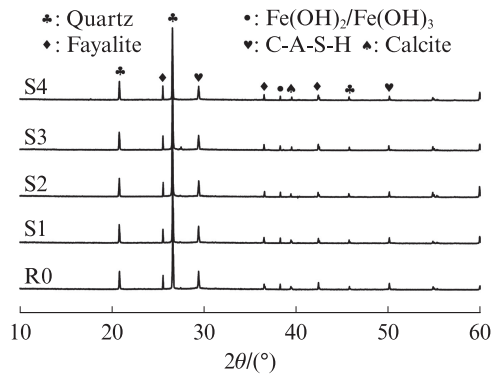


图 8 CSM 的 XRD 图谱

Fig. 8 XRD patterns of CSM

2.8 SEM-EDS 分析

CSM 的 SEM 照片和 EDS 能谱见图 9. 由图 9 可见: CSM 中均可观察到未完全反应的铜渣或矿渣被无定形的水化产物包裹; 根据 EDS 分析结果, 其主要元素为 Ca、Al、Si 和 O, 与 C-A-S-H 凝胶的组成一致; 随着 PSRA 掺量的增加, C-A-S-H 凝胶逐渐减少, 这

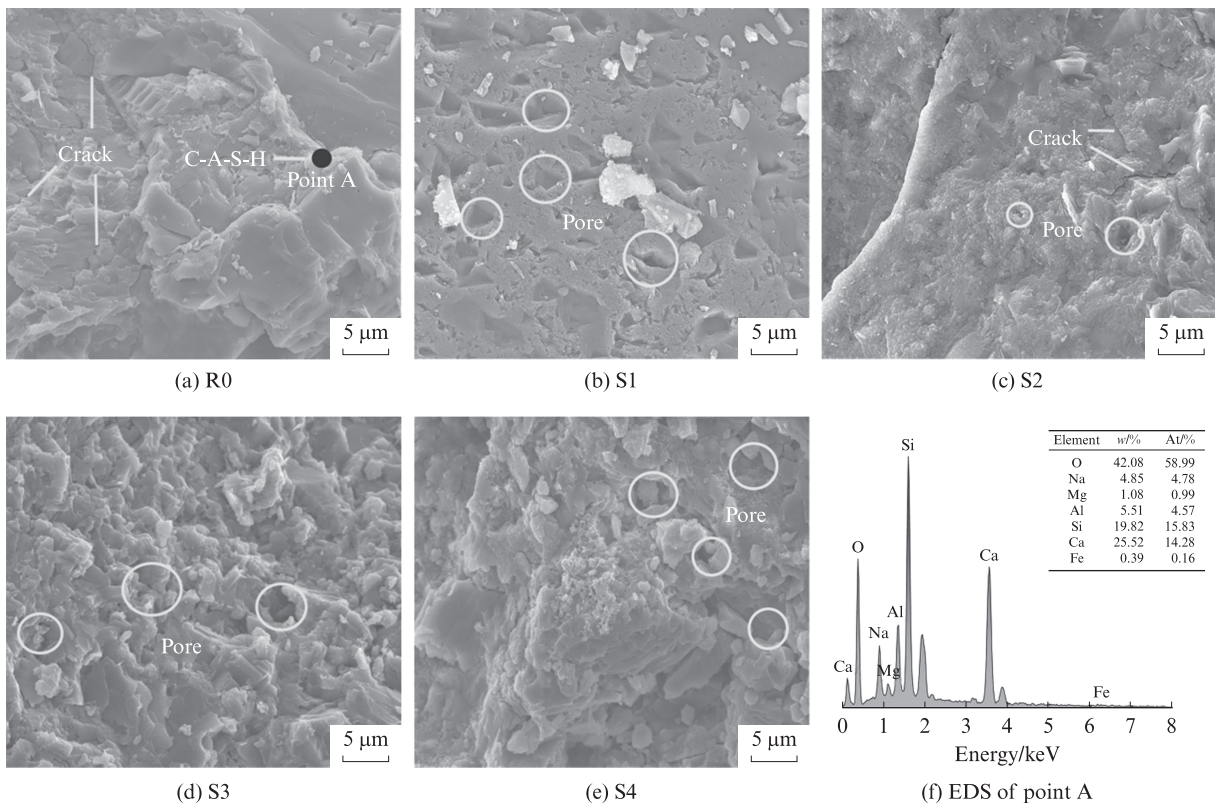


图 9 CSM 的 SEM 照片和 EDS 能谱

Fig. 9 SEM images and EDS spectrum of CSM

是由于PSRA延缓了水化反应的进程,降低了CSM体系的水化程度;砂浆的孔隙率和孔隙数量随着PSRA掺量的增加逐渐增加,这与抗压强度及孔径分布分析结果一致.这种孔结构的改变能够降低CSM基体内部的毛细管压力,可以有效减小试件的干燥收缩.

2.9 TG-DSC分析

试件R0和S4的TG-DSC曲线见图10.由图10可见:(1)试件R0和S4的相对残余质量均随着温度的升高而逐渐减少,最终相对残留质量分别为77.48%、78.79%,质量损失率分别为22.52%、21.21%,可见PSRA的掺入降低了体系的水化程度.(2)在DSC曲线中,105℃附近出现的吸热峰是由于结合水和结晶水的蒸发所致^[24];550℃附近出现的吸热峰则由C-A-S-H凝胶的脱水导致,且试件S4的吸热峰强度低于试件R0,说明PSRA的掺入减少了C-A-S-H凝胶的生成;750℃附近的吸热峰是因为CaCO₃分解所致;820℃附近的吸热峰并未引起质量的损失,可能与CaCO₃晶型转变有关^[25].

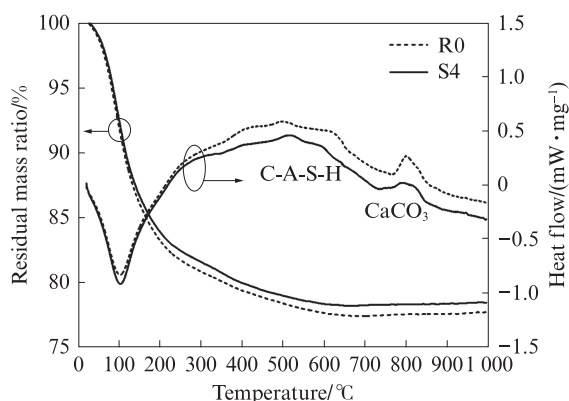


图10 试件R0和S4的TG-DSC曲线

Fig. 10 TG-DSC curves of specimen R0 and S4

3 结论

(1)聚醚型减缩剂(PSRA)的掺入导致矿渣-铜渣净浆的凝结时间延长,延缓了体系的水化进程,且延缓作用随着PSRA掺量的增大而增强.

(2)随着PSRA掺量的增大,矿渣-铜渣砂浆(CSM)抗压强度逐渐下降,PSRA掺量为2%的试件28d抗压强度仅为64.3MPa,与对照组试件相比下降了10.32%,主要原因是PSRA的掺入延缓了体系的水化进程,减少了C-A-S-H凝胶生成,导致基体孔隙率升高和孔径增大.

(3)随着PSRA掺量的增加,CSM的180d干燥收缩率逐渐减小.当掺入2%的PSRA时,CSM的180d干燥收缩率较对照组降低了42.1%.PSRA的

掺入降低了孔溶液的表面张力,并改变了基体孔结构,进而减小了毛细管压力,有效降低了CSM的干燥收缩.

参考文献:

- [1] 朱街禄,宋军伟,王露,等.铜渣粉-水泥复合胶凝体系的水化热及动力学研究[J].建筑材料学报,2020,23(6):1282-1288. ZHU Jiulu, SONG Junwei, WANG Lu, et al. Hydration heat and kinetics of copper slag powder-cement composite cementitious system [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1282-1288. (in Chinese)
- [2] 蒋周,李鹏,闫炳基,等.基于铜渣制备 γ -Fe₂O₃及其光催化-降解性能研究[J].中国有色冶金,2023,52(4):88-96. JIANG Zhou, LI Peng, YAN Bingji, et al. Preparation and photocatalytic-degradation property of γ -Fe₂O₃ based on copper slag [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(4): 88-96. (in Chinese)
- [3] 高术杰,倪文,李克庆,等.用水淬二次镍渣制备矿山充填材料及其水化机理[J].硅酸盐学报,2013,41(5):612-619. GAO Shujie, NI Wen, LI Keqing, et al. Preparation and hydrated mechanism of mine filling material of water-granulated secondary nickel slag [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(5): 612-619. (in Chinese)
- [4] 南雪丽,杨旭,张宇,等.钢渣-矿渣基胶凝材料协同水化机理研究[J].建筑材料学报,2024,27(4):366-374. NAN Xueli, YANG Xu, ZHANG Yu, et al. Synergistic hydration mechanism of steel slag-slag based cementitious material [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(4): 366-374. (in Chinese)
- [5] 王林松,高志勇,杨越,等.铜渣综合利用研究进展[J].化工进展,2021,40(10):5237-5250. WANG Linsong, GAO Zhiyong, YANG Yue, et al. Research progress on comprehensive recovery and utilization of copper slag [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(10): 5237-5250. (in Chinese)
- [6] SINGH J, SINGH S P. Synthesis of alkali-activated binder at ambient temperature using copper slag as precursor [J]. Materials Letters, 2020, 262: 127169.
- [7] SINGH J, SINGH S P. Development of alkali-activated cementitious material using copper slag [J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 73-79.
- [8] XU R S, WANG H R, YANG R H, et al. The potential of copper slag as a precursor for partially substituting blast furnace slag to prepare alkali-activated materials [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434: 140283.
- [9] 彭晖,李一聪,罗冬,等.碱激发偏高岭土/矿渣复合胶凝体系反应水平及影响因素分析[J].建筑材料学报,2020,23(6):1390-1397. PENG Hui, LI Yicong, LUO Dong, et al. Analysis of reaction level and factors of alkali activated metakaolin/GGBFS [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1390-1397. (in Chinese)

- [10] 林学智, 赖俊英, 周益帆, 等. 聚醚型两亲分子对水泥净浆收缩的影响及机理[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(1):1-8, 29.
LIN Xuezhi, LAI Junying, ZHOU Yifan, et al. Effects and mechanism of amphiphilic polyether on shrinkage of cement paste [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(1):1-8, 29. (in Chinese)
- [11] 杨进, 王发洲, 黄劲, 等. 不同类型减缩剂减缩效果比较分析[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1):53-58.
YANG Jin, WANG Fazhou, HUANG Jin, et al. Comparative analysis of reduction effects of different shrinkage reducing agents in concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1):53-58. (in Chinese)
- [12] ZUO W Q, FENG P, ZHONG P H, et al. Effects of novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age autogenous deformation of cement pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100:413-422.
- [13] PALACIOS M, PUERTAS F. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5):691-702.
- [14] HU X, SHI C J, ZHANG Z H, et al. Autogenous and drying shrinkage of alkali-activated slag mortars [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(8):4963-4975.
- [15] 张文艳, 林华夏, 王帅, 等. 减缩剂对碱激发煤矸石-矿渣胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2):526-535.
ZHANG Wenyan, LIN Huaxia, WANG Shuai, et al. Effect of shrinkage reducing agent on properties of alkali-activated coal gangue-slag cementitious material [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(2):526-535. (in Chinese)
- [16] 王俊颜, 庄云芳, 刘非凡, 等. 减缩剂和PVA纤维对超轻水泥复合材料收缩开裂行为的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(7):744-750.
WANG Junyan, ZHONG Yunfang, LIU Feifan, et al. Effect of shrinkage reduce admixture and pva fiber on shrinkage cracking behaviors of ultra lightweight cement composite [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):744-750. (in Chinese)
- [17] AL MAKHADMEH W, SOLIMAN A. On the mechanisms of shrinkage reducing admixture in alkali activated slag binders [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56:104812.
- [18] SOLIMAN A, NEHDI M. Effects of shrinkage reducing admixture and wollastonite microfiber on early-age behavior of ultra-high performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 46:81-89.
- [19] MA H Q, ZHU H G, WU C, et al. Effect of shrinkage reducing admixture on drying shrinkage and durability of alkali-activated coal gangue-slag material [J]. Construction and Building Materials, 2021, 270:121372.
- [20] 龚建清, 罗鸿魁, 张阳, 等. 减缩剂和HCSA膨胀剂对UHPC力学性能和收缩性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(8):8042-8048, 8063.
GONG Jianqing, LUO Hongkui, ZHANG Yang, et al. Effect of shrinkage reducing agent and HCSA expansion agent on mechanical properties and shrinkage properties of UHPC [J]. Materials Reports, 2021, 35(8):8042-8048, 8063. (in Chinese)
- [21] LIU J H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. Effects of pretreated fine lightweight aggregate on shrinkage and pore structure of ultra-high strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204:276-287.
- [22] ZHANG T T, JIN H L, GUO L J, et al. Mechanism of alkali-activated copper-nickel slag material [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020:7615848.
- [23] QU Z Y, YU Q L, JI Y D, et al. Mitigating shrinkage of alkali activated slag with biofilm [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 138:106234.
- [24] LOPEZ T, BOSCH P, ASOMOZA M, et al. DTA-TGA and FTIR spectroscopies of sol-gel hydrotalcites: Aluminum source effect on physicochemical properties [J]. Materials Letters, 1997, 31(3-6):311-316.
- [25] LUO S Q, ZHAO M H, JIANG Z Z, et al. Microwave preparation and carbonation properties of low-carbon cement [J]. Construction and Building Materials, 2022, 320:126239.