

钢渣对磷酸盐水泥基材料性能的影响机制

吴 凯^{1,2}, 叶钰燕², 施惠生^{1,2}, 居正慧²

(1. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 研究了利用钢渣制备磷酸镁水泥基材料的可行性, 分析了钢渣对磷酸盐水泥基材料的凝结时间、水化特性、力学性能及微结构的影响机制. 结果表明: 钢渣对磷酸盐水泥性能的作用规律与粉煤灰相似. 掺 10% 钢渣时, 因钢渣引入的 CaO 及水化生成的氢氧化钙, 使得磷酸盐水泥凝结硬化加快, 且钢渣自身硬度在一定程度上改善了硬化水泥浆体抗压强度; 随钢渣掺量增加, 起胶结作用的水化产物减少, 整个体系孔隙增加、结构疏松, 游离氧化钙还会使磷酸盐水泥基材料性能出现劣化. 钢渣掺入在浆体中并未观察到新的水化产物, 但较高掺量下体系微裂纹增多.

关键词: 磷酸盐水泥; 钢渣; 粉煤灰; 性能; 机制

中图分类号: TU525

文献标志码: A

Effect and Mechanism of Steel Slag on Performance of Magnesium Phosphate Cements

WU Kai^{1,2}, YE Yuyuan², SHI Huisheng^{1,2}, JU Zhenghui²

(1. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China)

Abstract: This work investigated the feasibility of reusing steel slag as raw materials in preparing magnesium phosphate cement (MPC). The effect of steel slag on the setting time, hydration process, mechanical properties and microstructure of prepared cements was determined. The results show that the influence of steel slag on the performance of magnesium phosphate cement exhibits a similar trend as that of fly ash. The addition of 10% steel slag would accelerate the hardening of prepared cement due to the presence of CaO and the formed calcium hydroxide. The hardness of steel slag would also increase the compressive strength. With increasing the steel slag substitutional level, the content of hydration products would decrease, while the porosity increases and microstructure become loose as a result. The hydration of f-

CaO would do a detrimental effect on the mechanical properties of MPC. The hydration products detected in X-ray diffraction (XRD) patterns of steel slag blended MPC is the same as those of reference. However, there is more microcrack present in the hardened paste containing 40% of steel slag.

Key words: magnesium phosphate cement; steel slag; fly ash; performance; mechanism

磷酸盐水泥 (magnesium phosphate cement, MPC) 基材料是一种快硬早强型胶凝材料^[1], 被广泛应用于机场跑道、桥梁、公路等民用建筑和军事工程的抢修和抢建, 以及固化有害重金属废料和工业废弃物等方面. 已有研究主要通过改变过烧氧化镁颗粒煅烧温度、粒径分布, 磷酸盐以及缓凝剂种类, 分析其对磷酸盐水泥基材料的凝结时间、强度、水化进程等影响规律^[2-5]. 在此基础上, 有研究者将粉煤灰用于磷酸水泥基材料的制备. 文献已证实粉煤灰可优化硬化磷酸盐水泥基材料浆体孔隙结构^[6-7], 进而可改善磷酸盐水泥基材料的粘结性、耐久性等宏观性能^[8-12].

钢渣作为一种炼钢过程中产生的工业固体废弃物, 钢渣的累计堆存近 10 亿 t, 而综合利用率仅为 10%. 其化学组成随炼钢原料和工艺的不同波动较大, 主要包括 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 和 FeO. 钢渣的矿物组成与硅酸盐水泥熟料相似, 其中的 C₂S、C₃S 等都会对磷酸盐水泥基材料的性能产生影响. 同时, 钢渣中含有磷酸盐水泥基材料主要组成之一的 MgO, 且含量远高于粉煤灰, 对磷酸盐水泥基材料的反应将产生一定的作用. 此外, 钢渣硬度较大, 将对磷酸盐水泥基材料的力学性能具有潜在改善作用. 目前仍缺乏钢渣对磷酸盐水泥基材料影响

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0700802), 国家自然科学基金(51608382, 51378390, 51402216), 污染控制与资源化研究国家重点实验室开放课题

第一作者: 吴 凯(1987—), 男, 工学博士, 助理教授. 主要研究方向为混凝土材料. E-mail: wukai@tongji.edu.cn

的研究. 基于此, 本文研究了利用钢渣制备的磷酸盐水泥基材料凝结时间、水化特性和力学性能, 分析了硬化浆体的物相组成和断面微观形貌, 探讨了钢渣对磷酸盐水泥基材料性能的影响机制.

1 试验

1.1 原材料

试验用过烧 MgO(M) 由菱镁矿(主要组成为 $MgCO_3$) 在 $1700^\circ C$ 的高温下煅烧分解后, 磨细所得

棕黄色粉末, 比表面积为 $410 m^2 \cdot kg^{-1}$, 均值粒径为 $31.7 \mu m$; 钢渣(SL) 主要矿物组成包括 $Ca_2Fe_2O_5$ 、 Ca_3SiO_4 、 $Mg_{1-x}FeO_2$ 等, 比表面积为 $400 m^2 \cdot kg^{-1}$, 均值粒径为 $17.3 \mu m$; 粉煤灰(FA) 比表面积为 $370 m^2 \cdot kg^{-1}$, 均值粒径为 $39.0 \mu m$; 过烧氧化镁、钢渣及粉煤灰的化学组成如表 1 所示, 颗粒粒径分布如图 1 所示. 磷酸二氢钾(P) 为工业级白色结晶粉末, 含 98% KH_2PO_4 . 硼砂(B) 为白色结晶粉末, 所用水为去离子水.

表 1 原材料化学组成

Tab.1 Chemical compositions of raw materials

	w_{MgO}	w_{SiO_2}	w_{CaO}	$w_{Fe_2O_3}$	$w_{Al_2O_3}$	w_{SO_3}	$w_{P_2O_5}$	$w_{T_2O_3}$	w_{Total}
过烧氧化镁	76.6	4.21	2.29	1.14	0.78	0.06	0.26	0.26	85.60
钢渣(SL)	10.3	21.9	37.4	14.9	9.78	0.61	1.32	0.14	96.35
粉煤灰(FA)	0.85	40.7	9.46	5.34	22.4	2.17	0.71	0.01	81.64

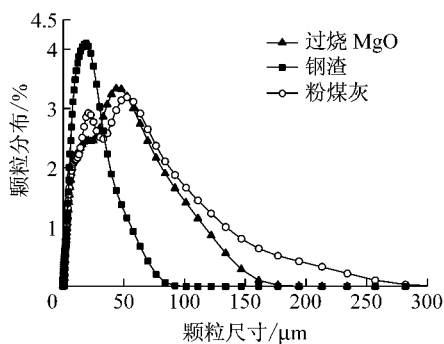


图 1 过烧 MgO、钢渣及粉煤灰的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of dead burned MgO, SL and FA

1.2 试验方法

1.2.1 试样制备

按表 2 配合比准确称量各原材料, 其中过烧氧化镁与磷酸二氢钾(M/P) 质量比(w_M/w_P) 为 3、水胶比 w/b 控制在 0.18, 硼砂掺量为 8%, 混合后倒入

表 2 磷酸盐水泥基材料配合比

Tab.2 Mix ratio of magnesium phosphate cement

编 号	$w_{SL}/(w_M+w_P+w_{SL})$	$w_{FA}/(w_M+w_P+w_{FA})$	w/b	$w_B/(w_M+w_P+w_B)$	w_M/w_P
O	0	0	0.18	8	3
SL-1	10	0	0.18	8	3
SL-2	20	0	0.18	8	3
SL-3	30	0	0.18	8	3
SL-4	40	0	0.18	8	3
FA-1	0	10	0.18	8	3
FA-2	0	20	0.18	8	3
FA-3	0	30	0.18	8	3
FA-4	0	40	0.18	8	3

搅拌容器内, 低速搅拌 20 s、高速搅拌 70 s, 将搅拌好的浆体迅速倒入试模中, 振动至表面无明显气泡成型. 试样成型 45 min 后脱模, 并置于温度 $20^\circ C \pm 2^\circ C$ 、相对湿度 95% 以上环境中继续养护至待测龄期.

1.2.2 测试与表征

物理力学性能参照普通硅酸盐水泥净浆标准《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011)^[13]、《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)^[14], 测定磷酸盐水泥基材料的凝结时间、流动度及力学性能. 在流动度测试中, 将模具改为 $\Phi 5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 的圆管, 以替代圆锥试模. 浸出液的 pH 值通过精密 pH 计测试. 将预养护 1 d 的试样拆模, 称取试样质量, 以液固比为 3:1 浸泡于蒸馏水中至设定龄期, 过滤浸出液并测定 pH 值.

磷酸盐水泥基材料在 24 h 内水化温度的变化, 利用实验室 V2.0 型绝热温升测定仪进行采集, 其主要部件为 YC-747UD 四通道测温仪. 一次测试可以记录 4 组样品的温度随龄期的变化情况. 该仪器可控制精度误差在 $\pm 0.1^\circ C$ 以内, 温度最小分辨率为 $0.1^\circ C$, 每隔 15 s 采集一次数据. 试验按照配合比称取粉末试样, 用电动搅拌器搅拌 1 min 后, 称取 (60 ± 0.5) g 浆体置于塑料试管中, 密封后开始测量, 测试时间为 24 h.

硬化水泥浆体中物相组成采用 DX-5A 型全自动 X 射线衍射仪(XRD) 进行分析. 将水化至设定龄期样品用无水乙醇浸泡终止水化, 粉磨、烘干后再通过 $80 \mu m$ 标准筛. 试验工作条件为铜靶, 波长为 0.154060 nm , 电压 40 kV , 电流 100 mA , 扫描速度

$10^{\circ} \cdot \text{min}^{-1}$,扫描角度 $5^{\circ} \sim 75^{\circ}$.采用 S-4800 环境扫描电镜观察试样的水化产物形貌特征.采用 3H-2000PS2 孔径分析仪测定硬化浆体的累积孔体积,将试样置入样品管内,以氮气作为吸附质进行测试.

2 结果与讨论

2.1 钢渣对 MPC 浆体新拌性能的影响

表 3 给出了钢渣及粉煤灰对磷酸盐水泥基材料凝结时间和流动度的影响.由于磷酸盐水泥基材料初凝和终凝的间隔较短,故仅用初凝时间表示.由表 3 可知,少量的粉煤灰掺入对磷酸盐水泥基材料的凝结有促进作用,随粉煤灰掺量增加,试样的凝结时间延长.掺入钢渣后,磷酸盐水泥基材料的凝结时间显著减小.钢渣为 10% 时,凝结时间减至 150 s,较基准样缩短了 25%.以硼砂作为缓凝剂时,硼砂水解出的 $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ 与 Mg^{2+} 反应,生成胶状结合物包裹在过烧 MgO 颗粒周围并形成保护膜^[15],从而延长凝结时间.钢渣的掺入引入了硅酸三钙和游离氧化钙等,同时 Ca^{2+} 与溶液中与 $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ 反应生成 CaB_4O_7 ,该反应消耗了部分 $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$,减弱了硼酸的缓凝效果,因此凝结时间缩短^[16-17].

表 3 钢渣和粉煤灰对磷酸盐水泥基材料凝结时间和流动度的影响

Tab.3 Effects of SL and FA on the setting time and fluidity for MPC

编号	凝结时间/s	流动度/mm	编号	凝结时间/s	流动度/mm
O	215	140	SL-1	150	100
FA-1	150	100	SL-2	165	90
FA-2	165	80	SL-3	195	
FA-3	225		SL-4	255	
FA-4	280				

通过对试样 pH 值的测定证实(表 4),掺 10% 的钢渣后试样 pH 值增大至 11.07,大于基准试样的 pH 值(10.71).同时因钢渣矿物中包含 MgO,可使浆体中 Mg^{2+} 含量增多,促进体系中过烧 MgO 与 KH_2PO_4 反应,进而凝结时间缩短.随着钢渣掺量继续增加,凝结时间反而有所延长,当钢渣掺量增加至 30% 时,凝结时间增加到 195 s,与基准样接近;当钢渣掺量增加到 40% 时,浆体凝结时间延长至 255 s.这是因为随钢渣掺量继续增加,过烧 MgO 和磷酸盐在体系中所占比重有所降低,磷酸盐水泥基材料的酸碱中和反应对凝结时间的影响被削弱,钢渣凝结硬化对浆体凝结时间的影响逐渐增加.对比掺粉煤灰和钢渣的试样可见,粉煤灰对磷酸盐水泥基材料

的凝结时间影响规律与钢渣相一致,这可能是因掺粉煤灰时浆体的 pH 值和掺钢渣时相近(表 4).

表 4 钢渣和粉煤灰对磷酸盐水泥基材料水化 1 d 时 pH 值的影响

Tab.4 Effects of SL and FA on the pH value of MPC at 1 d

编号	O	FA-1	FA-2	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4
pH 值	10.71	11.60	11.96	11.07	11.5	11.64	

磷酸盐水泥基材料的流动度随钢渣掺量的增加而下降,掺加粉煤灰时其规律相似.由表 1 可知,粉煤灰中氧化铝含量较高,而 Liu 等^[18]的研究表明磷酸盐水泥基材料随着铝含量的增大会导致需水量增多,使得其工作性降低.但掺钢渣的磷酸盐水泥基材料流动度变化主要受到钢渣颗粒的影响.由于钢渣颗粒形状不规则,随着其掺量的增大,比表面积增大,需水量提升;与此同时,钢渣掺量的增加也使得钢渣颗粒间的摩擦力增大,进一步导致浆体的流动度降低^[19].

2.2 钢渣对 MPC 水化放热的影响

图 2 为分别掺钢渣和粉煤灰的磷酸盐水泥基材料 24 h 内水化温升随时间的变化过程.由图 2 可知,磷酸盐水泥基材料的水化放热过程中温度变化趋势与普通硅酸盐水泥相似,存在两个峰值.掺加钢渣或粉煤灰对第一温升峰值时出现的时间 t_1 影响不大,均在 5~9 min 内达到第一峰值温度 T_1 .由图 2a 可知,随粉煤灰掺量的增加,掺粉煤灰试样第二峰值温度 T_2 值随之下降,且达到第二峰值的时间 t_2 随之延长.由图 2b 可知,掺 10% 钢渣时第二温升峰值 T_2 变化并不明显,略高于基准试样.这可能是由于钢渣自身所含游离氧化钙及 C_3S 等,及其水化生成的 CH 使得参与反应物增多,体系反应程度比基准试样更高,产生溶解热和沉淀热的总量有所增加^[19].在掺钢渣试样中,随钢渣掺量继续增加,试样第二温升峰值温度 T_2 开始下降,达到第二峰值温度 T_2 的时间 t_2 不断延迟,这与钢渣试样凝结时间测试结果相一致.此外,随钢渣掺量增大,从 t_1 到第二峰值温度出现过程中温升曲线斜率逐渐减小,这表明浆体的水化速率有所减慢.这是因为当钢渣掺量逐渐增加时,过烧 MgO 和磷酸盐体系中所占含量被稀释,而钢渣本身相对较慢的水化特性导致体系水化过程减缓,放热量降低;对比掺钢渣试样与掺粉煤灰试样可知,钢渣掺量对磷酸盐水泥基材料的水化温升规律与粉煤灰相似,随着钢渣掺量增加,温升峰值 T_1 和 T_2 呈下降趋势,且相应时间 t_2 推迟.但同掺量下掺钢渣的磷酸盐水泥基材料水化温升峰值 T_2 均大

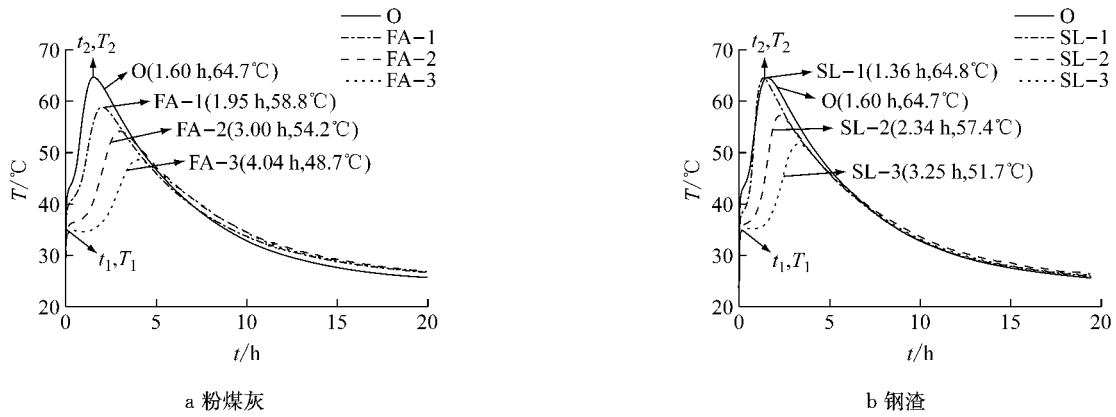


图 2 钢渣和粉煤灰对磷酸盐水泥基材料水化温升的影响

Fig. 2 Effects of SL and FA on the temperature evolution of hydrated MPC paste

于掺粉煤灰, 对应的时间 t_2 小于掺粉煤灰试样。

2.3 钢渣对 MPC 抗压强度的影响

图 3 为在保持水胶比不变的情况下, 钢渣和粉煤灰对磷酸盐水泥基材料抗压强度的影响。由图 3a 可知, 掺加 10% 粉煤灰的试样与基准试样强度较为接近, 随着粉煤灰掺量增加, 同龄期试样抗压强度逐渐降低。由图 3b 表明, 在 3 d 内, 掺 10% 钢渣试样与

基准试样间抗压强度相对接近。但当钢渣掺量不断提升至 40% 时, 3 d 短龄期内的抗压强度呈现下降趋势。这是由于磷酸盐水泥基材料中过烧 MgO 和磷酸盐所占含量逐渐减少, 生成的钾鸟粪石量也随之减少, 即体系中具有胶凝性的水化产物量相应减少^[20-22], 从而导致了试样抗压强度下降。

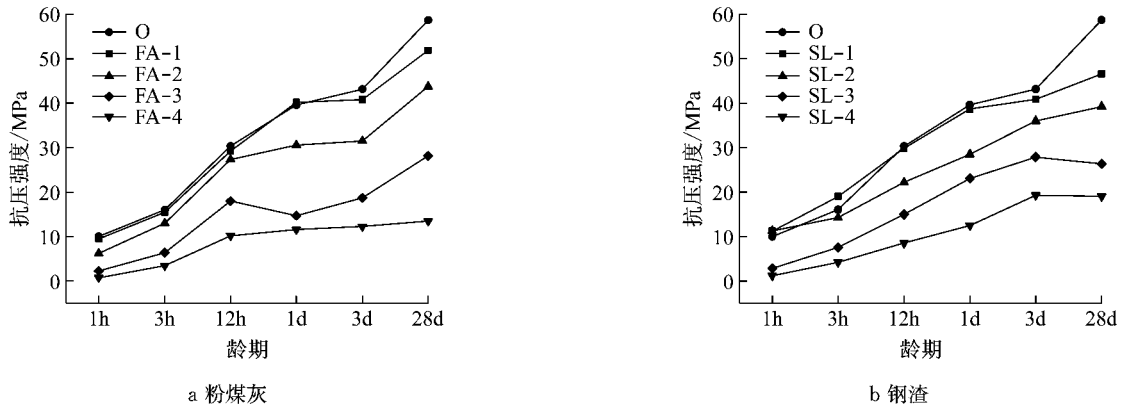


图 3 钢渣和粉煤灰对磷酸盐水泥基材料抗压强度的影响

Fig. 3 Effects of SL and FA on the compressive strength of MPC

随水化龄期延长, 磷酸盐水泥基材料的强度不断增长。但在掺 30% 和 40% 钢渣试样中, 28 d 强度反而有所下降。磷酸盐水泥基材料随水化进行, 水化产物晶核在其中不断生长、相互交错, 形成以 MgO 颗粒为框架的硬化浆体, 此时体系强度受水化产物、孔隙等影响较大。当 28 d 试样的水化程度较高, 水化产物量趋于稳定, 体系水化产物量主要与磷酸盐水泥基材料中过烧 MgO 和磷酸盐含量有关, 试样中过烧 MgO 和磷酸盐相对含量减少, 产生的钾鸟粪石含量降低。此外, 过烧 MgO 和磷酸盐反应较快, 在早期便已形成稳定硬化体系。而钢渣水化较慢, 在较高掺量条件下后期发生的水化会对已形成硬化浆体造成破坏。因此, 水化产物的含量减少、硬化体结构遭到

破坏, 试样孔隙体积增加, 使钢渣在较高掺量下对磷酸盐水泥基材料强度产生负面影响。

表 5 为掺钢渣对 28 d 磷酸盐水泥基材料累积孔体积的影响。从中可知, 试样累积孔体积随钢渣掺量的增加而增长, 40% 钢渣试样孔体积是基准试样的 3 倍, 这与抗压强度的降低幅度 (67%) 相对应。而粉煤灰与钢渣不同, 自身几乎不水化, 因此后期未见其对磷酸盐水泥基材料抗压强度产生负面影响。

图 4 为在相同龄期相同掺量下, 对比分析钢渣和粉煤灰对磷酸盐水泥基材料抗压强度的影响。由图可知, 在 1 h 和 3 h 的短龄期内, 钢渣掺合料为 20% 时, 所得试样的抗压强度为 11.3 MPa, 粉煤灰试样的抗压强度为 6.2 MPa。这说明钢渣硬度高, 对

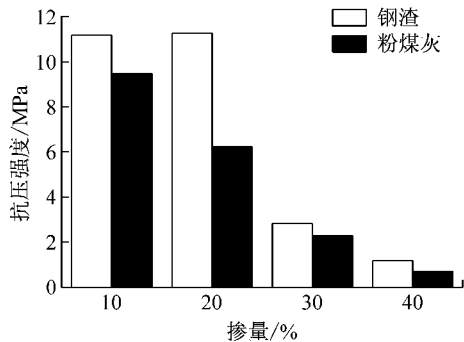
磷酸盐水泥基材料早期的力学性能具有改善作用。此外,同掺量条件下,含钢渣所得磷酸盐水泥基材料早期抗压强度均高于掺粉煤灰试样。这可能是因为钢渣颗粒较过烧 MgO 颗粒更小(图 1),且颗粒分布较为集中。通常认为粗颗粒间的孔隙会由细颗粒填充,而粉煤灰颗粒与过烧 MgO 颗粒的分布较为接近,使得原材料堆积情况不受粉煤灰掺入而影响。随着水化进程的加深,钢渣的水化会造成早期便已硬

化的浆体产生破坏,故 28 d 时同掺量的粉煤灰试样强度略大于钢渣试样。

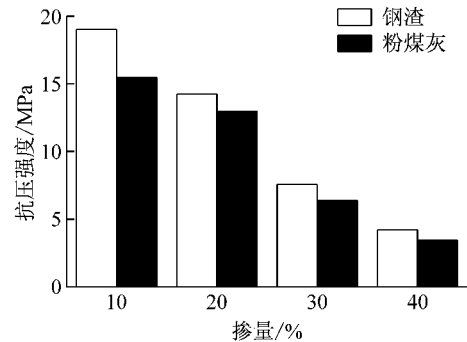
表 5 钢渣对水化 28 d 的磷酸盐水泥基材料累积孔体积的影响

Tab.5 Effect of SL on the cumulative pore volume of MPC

编 号	O	SL-1	SL-2	SL-3	SL-4
累积孔体积	0.010 6	0.010 8	0.015 9	0.022 9	0.045 7



a 1 h 龄期的钢渣和粉煤灰



b 3 h 龄期的钢渣和粉煤灰

图 4 1 h 和 3 h 时钢渣和粉煤灰对磷酸盐水泥基材料抗压强度的影响

Fig.4 Effects of SL and FA on the compressive strength of MCP after 1 h and 3 h of hydration

2.4 钢渣对 MPC 微观结构的影响

图 5 为水化 28 d 掺钢渣磷酸盐水泥基材料的物相组成分析结果。掺钢渣时水化产物的物相种类与基准样基本一致,主要为钾鸟粪石晶体,同时包含大量未水化的 MgO,无 KH_2PO_4 晶体。随钢渣掺量的增加,28 d 试样水化产物中钾鸟粪石的特征峰强度有所减小,这也是钢渣掺量增加导致抗压强度降低的重要原因。由于钢渣水化缓慢且程度较低,在 28 d 时仍未观测到氢氧化钙、水化硅酸钙凝胶等特征峰。

图 6 为基准样及掺 20% 钢渣的硬化水泥浆体试样微观形貌图。由图 6a 可见棱柱状钾鸟粪石,其晶体相对较小且排列混乱,大量晶体被絮凝状物质包裹,同时存在较多的未参与反应的 MgO。对比图 6a

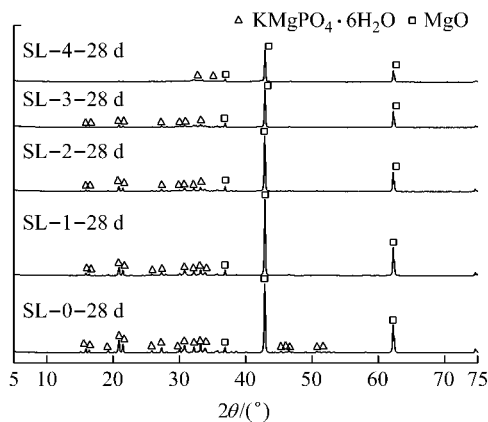
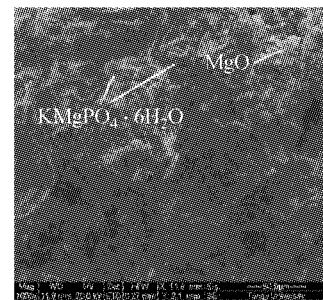
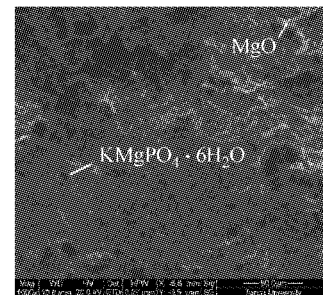


图 5 钢渣对磷酸盐水泥基材料水化 28 d 水化产物组成的影响

Fig.5 Effects of steel slag on the phase composition of hardened MCP at 28 days



a O



b SL-2

图 6 钢渣对磷酸盐水泥基材料水化 28 d 微观形貌的影响
Fig.6 Effects of steel slag on the microstructure of MCP at 28 days

和图 6b 可见:当钢渣掺量为 20%时,钾鸟粪石含量较少,晶体杂乱堆积,结构相对松散,出现大量微裂纹.这解释了为何在高掺量钢渣下磷酸盐水泥基材料的 28 d 强度降低.

3 结论

(1) 随钢渣掺量的增加,磷酸盐水泥基材料的流动度下降,凝结时间先减后增;

(2) 掺 10%钢渣所得磷酸盐水泥基材料的水化峰值温度与基准样接近.但随着钢渣掺量的增加,第二峰值温度逐渐降低,且放热速率变缓,这与粉煤灰影响规律相似;

(3) 水化 3 d 内,掺 10%钢渣的磷酸盐水泥基材料的抗压强度与基准试样相近.而随钢渣量的增加,抗压强度减小.且较高钢渣掺量下,28 d 抗压强度有所倒缩;

(4) 磷酸盐水泥基材料主要水化产物主要为钾鸟粪石晶体,同时包含大量未水化的 MgO , 无 KH_2PO_4 . 掺 20%钢渣硬化浆体中,钾鸟粪石含量较少,结构相对松散,出现大量微裂纹.

参考文献:

- [1] 林玮, 孙伟, 李宗津. 磷酸镁水泥砂浆的干燥收缩性能[J]. 工业建筑, 2011, 41(4): 75.
LIN Wei, SUN Wei, LI Zongjin. Study on the drying shrinkage of magnesium phosphate cement mortar [J]. Industrial Construction, 2011, 41(4): 75.
- [2] 常远, 史才军, 杨楠, 等. 不同细度 MgO 对磷酸钾镁水泥性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(4): 492.
CHANG Yuan, SHI Caijun, YANG Nan, *et al.* Effect of fineness of magnesium oxide on properties of magnesium potassium phosphate cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(4): 492.
- [3] 胡张莉, 史才军, 杨建明, 等. 运用 Bayes 网络研究不同因素对磷酸镁水泥凝结时间的影响[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(1): 38.
HU Zhangli, SHI Caijun, YANG Jianming, *et al.* Factors influencing setting time of magnesium phosphate cement by Bayesian Network [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(1): 38.
- [4] 焦宝祥, 周启兆, 阎晓波, 等. $MgO-(NH_4)_2HPO_4-K_2HPO_4-H_2O$ 新型磷酸镁水泥[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 131.
JIAO Baoxiang, ZHOU Qizhao, YAN Xiaobo, *et al.* New magnesia-phosphate cement based on $MgO-(NH_4)_2HPO_4-K_2HPO_4-H_2O$ [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1): 131.
- [5] 常远, 史才军, 杨楠, 等. 磷酸镁水泥基材料耐久性研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(4): 486.
CHANG Yuan, SHI Caijun, YANG Nan, *et al.* Research progresses on durability of magnesium phosphate cement based materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(4): 486.
- [6] DING Zhu, DONG Biqin, XING Feng. Magnesium phosphate cement with large volume of fly ash [J]. Advanced Building Materials and Sustainable Architecture, 2012, 174-177; 802.
- [7] DING Zhu, DONG Biqin, XING Feng, *et al.* Cementing mechanism of potassium phosphate based magnesium phosphate cement [J]. Ceramic International, 2012, 38(8): 6281.
- [8] ZHENG Dengdeng, JI Tao, WANG Canqiang, *et al.* Effect of the combination of fly ash and silica fume on water resistance of magnesium-potassium phosphate cement [J]. Construction and Building Materials, 2016, 106(3): 415.
- [9] 林玮, 孙伟, 李宗津. 磷酸镁水泥中的粉煤灰效应研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(6): 716.
LIN Wei, SUN Wei, LI Zongjin. Study on the effects of fly ash in magnesium phosphate cement [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6): 716.
- [10] LI Yue, SHI Tongfei, LI Jiaqi. Effects of fly ash and quartz sand on water-resistance and salt-resistance of magnesium phosphate cement [J]. Construction and Building Materials, 2016, 105(2): 384.
- [11] 范英儒, 秦继辉, 汪宏涛, 等. 磷酸盐对磷酸镁水泥粘结性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 218.
FAN Yingru, QIN Jihui, WANG Hongtao, *et al.* Effect of phosphates on bond performance of magnesium phosphate cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2): 218.
- [12] ROUZICA M L, CHAUSSADENTA T, STEFAN L, *et al.* On the influence of Mg/P ratio on the properties and durability of magnesium potassium phosphate cement pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 96(7): 27.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安全性检验方法:GB/T 1346—2011[S]. 北京:中国质检出版社, 2011.
Standardization administration of the People's Republic of China. Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the portland cement: GB/T 1346—2011 [S]. Beijing: China Zhijian Publishing house, 2011.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 水泥胶砂流动度测定方法:GB/T 2419—2005[S]. 北京:中国质检出版社, 2005.
Standardization administration of the People's Republic of China. Test method for fluidity of cement mortar: GB/T 2419—2005 [S]. Beijing: China Zhijian Publishing house, 2005.
- [15] 杨建明, 钱春香, 焦宝祥, 等. 缓凝剂硼砂对磷酸镁水泥水化硬化特性的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(1): 31.
YANG Jianming, QIAN Chunxiang, JIAO Baoxiang, *et al.* Effects of retardant borax on hydration and harden process of magnesia-phosphate cement pastes [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2010, 28(1): 31.
- [16] 汪宏涛, 丁建华, 张时豪, 等. 磷酸镁水泥水化热的影响因素研究[J]. 功能材料, 2015, 46(22): 22098.

- WANG Hongtao, DING Jianhua, ZHANG Shihao, *et al.* Study on the influent factors of magnesium phosphate cement hydration heat [J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46 (22): 22098.
- [17] 侯磊, 李金洪, 王浩林. 矿渣磷酸镁水泥的力学性能和水化机理[J]. *岩石矿物学*, 2011, 30(4): 721.
HOU Lei, LI Jinhong and WANG Haolin. Mechanical property and hydration mechanism of slag blended magnesium phosphate cement [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(4): 721.
- [18] LIU Ning, CHEN Bing. Experimental research on magnesium phosphate cements containing alumina [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121(9): 354.
- [19] 涂昆, 刘家祥, 邓侃. 钢渣粉和钢渣水泥的活性及水化机理研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2015, 42 (1): 62.
TU Kun, LIU Jiaxiang, DENG Kan. Study of the hydration behavior of steel slag and steel slag cement complex powders [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2015, 42(1): 62.
- [20] QIAN Chunxiang, YANG Jianming. Effect of disodium hydrogen phosphate on hydration and hardening of magnesium potassium phosphate cement [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23 (10): 1405.
- [21] ABDELRAZIG B E I, SHARP J H, EL-JAZAIRI B. The chemical composition of mortars made from magnesia-phosphate cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 1988, 18 (3): 415.
- [22] SARKAR A K. Investigation of reaction/bonding mechanisms in regular and retarded magnesium ammonium phosphate cement systems [J]. *Ceramic Transactions*, 1993, 40 (1): 281.
-
- (上接第 45 页)
- [5] 项福亭, 曲维功, 张益颖, 等. 庙岛海峡以东浅海养殖结构调整的研究[J]. *齐鲁渔业*, 1996, 13(2): 1.
XIANG Futing, QU Weigong, ZHANF Yi'e, *et al.* On aquaculture structure adjustment in shallow sea east to Miaodao Strait[J]. *Shandong Fisheries*, 1996, 13(2): 1.
- [6] O'Donncha F, Hartnett M, Nash S. Physical and numerical investigation of the hydrodynamic implications of aquaculture farms[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 52: 14.
- [7] 樊星, 魏皓, 原野, 等. 近岸典型养殖海区的潮流垂直结构特征[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(2): 181.
FAN Xing, WEI Hao, YUAN Ye, *et al.* The features of vertical structures of tidal current in a typical coastal mariculture area of China[J]. *Periodical of Ocean University of China(Natural Science)*, 2009, 39(2): 181.
- [8] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
ZU Dongqi. The theory and method of model experiment[M]. Beijing: Water & Power Press, 1984.
- [9] 王中起, 韩志远, 严冰. 秦皇岛海域水文泥沙特征分析[J]. *水道港口*, 2010, 31(4): 247.
WANG Zhongqi, HAN Zhiyuan, YAN Bing. Hydrographic and sediment characteristics in Qinhuangdao sea area[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2010, 31(4): 247.
- [10] Zhu C, Hao W, Chang X. Vertical velocity distribution in open-channel flow with rigid vegetation[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014(3): 146829.
- [11] Ma A, Lu Y, Cao M, *et al.* Velocity distribution and characteristics in unsteady open-channel flow over rough bed [M] // *Hydraulic Engineering III: Proceedings of the 3rd Technical Conference on Hydraulic Engineering (CHE 2014)*. Hongkong: [s. n.], 2015: 15-22.
- [12] Pal D, Ghoshal K. Vertical distribution of fluid velocity and suspended sediment in open channel turbulent flow[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2016, 48(3): 035501.
- [13] 严军, 王二平, 孙东坡, 等. 矩形断面明渠流速分布特性的试验研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2005, 38(5): 57.
YAN Jun, WANG Erping, SUN Dongpo, *et al.* Experimental study on distribution properties of velocity in rectangular open channel[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2005, 38(5): 57.
- [14] 胡春宏, 惠遇甲. 明渠挟沙水流运动的力学和统计规律[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
HU Chunhong, HUI Yujia. Mechanics and statistical law of sediment flow in open channel [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [15] 孙东坡, 王二平, 董志慧, 等. 矩形断面明渠流速分布的研究及应用[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2004, 19(2): 144.
SUN Dongpo, WANG Erping, DONG Zhihui, *et al.* Discussion and application of velocity profile in open channel with rectangular cross-section [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2004, 19(2): 144.