

不同矿物掺合料对蒸养水泥水化产物 与力学性能的影响

李保亮^{1,2} 霍彬彬² 王 申² 张亚梅²

(1. 淮阴工学院建筑工程学院, 淮安 223001;

2. 东南大学材料科学与工程学院, 江苏省土木工程材料重点实验室, 南京 211189)

摘要: 为探讨矿物掺合料对预制装配式混凝土水化产物与力学性能的影响, 采用20%的镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉与矿渣粉分别取代水泥, 在早期80℃蒸养7h条件下制备了水泥净浆与砂浆, 对比研究了镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉与矿渣粉对7h和28d龄期蒸养水泥水化产物和力学性能的影响。结果表明: 除了C-S-H与Ca(OH)₂外, 7h蒸养水泥的水化产物主要为AFm与Ca₄Al₂O₆(CO₃)_{0.5}(OH)·11.5H₂O, 28d蒸养水泥的水化产物主要为Ca₄Al₂O₆(CO₃)_{0.5}(OH)·11.5H₂O和Ca₄Al₂O₆(CO₃)·11H₂O。矿物掺合料对蒸养水泥水化产物种类影响较小; 掺镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉、矿渣粉后, 7h蒸养水泥的化学结合水含量分别达到了纯水泥的93.27%、102.22%、90.24%、102.22%。28d蒸养水泥的化学结合水含量分别达到了纯水泥的93.76%、95.08%、86.27%、95.68%。掺锂渣粉与矿渣粉可以显著提高7h蒸养水泥的水化程度, 掺钢渣粉的效果最差; 此外, 掺锂渣粉、钢渣粉、矿渣粉改变了蒸养7h水泥浆体C-S-H的形貌, 除了纤维状C-S-H外, 掺锂渣粉水泥浆体中还有蜂窝状C-S-H形成, 掺钢渣粉水泥浆体与掺矿渣粉水泥浆体中还有球形与薄片状C-S-H形成; 掺锂渣粉可以提高早期80℃蒸养7h水泥胶砂的抗压与抗折强度, 但四种矿物掺合料均不能改善28d蒸养水泥胶砂的力学性能。

关键词: 镍铁渣粉; 锂渣粉; 钢渣粉; 矿渣粉; 蒸养水泥; 水化产物; 力学性能

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1001-1625(2020)08-2408-08

DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2020.08.007

Effects of Different Mineral Admixtures on Hydration Products and Mechanical Properties of Steam Cured Cement Paste

LI Baoliang^{1,2}, HUO Binbin², WANG Shen², ZHANG Yamei²

(1. Faculty of Architecture Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To investigate the effects of mineral admixtures on hydration products and mechanical properties of prefabricated concrete, 20% ferronickel slag powder (FNS), lithium slag powder (LS), steel slag powder (SS) and ground granulated blast furnace slag powder (GGBFS) were used to replace pure cement (PC) to prepare early age steam cured cement paste and cement mortar at 80℃ for 7h, and the hydration products and mechanical properties of 7h and 28d steam cured cement paste were compared. The results show that, in addition to C-S-H and Ca(OH)₂, the hydration products of 7h steam cured cement paste are mainly AFm and Ca₄Al₂O₆(CO₃)_{0.5}(OH)·11.5H₂O, the hydration products of 28d steam cured cement paste are mainly Ca₄Al₂O₆(CO₃)_{0.5}(OH)·11.5H₂O and Ca₄Al₂O₆(CO₃)·11H₂O. The effects of mineral admixtures on the hydration products of steam cured cement paste are small. After the addition of FNS, LS, SS and GGBFS, the non-evaporable water content of 7h steam cured cement paste reach 93.27%, 102.22%, 90.24% and 102.22% of PC paste, respectively. The non-evaporable water content of 28d steam cured cement paste reach 93.76%, 95.08%, 86.27% and 95.68% of PC paste, respectively. The addition of LS and GGBFS significantly improve the hydration degree of 7h steam cured cement paste, while the effect of SS is the worst. The addition of LS, SS and GGBFS change the morphology of C-S-H in 7h steam cured cement paste, in addition to fibrous C-S-H, there still are honeycomb-

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778132, 51972057); 2020年度江苏省第五期“333工程”科研资助项目(BRA2020221)

作者简介: 李保亮(1983—), 男, 博士, 高工。主要从事固体废弃物在水泥基材料中的应用研究。E-mail: lbljndx@126.com

通讯作者: 张亚梅, 博士, 教授。E-mail: ymzhang@seu.edu.cn

like C-S-H in the LS blended cement paste, spherical and flake C-S-H in SS blended cement paste and GGBFS blended cement paste. Adding LS improves the compressive strength and flexural strength of 7 h steam cured cement mortar, while adding the four mineral admixtures can not improve the mechanical property of 28 d steam cured cement mortar.

Key words: ferronickel slag powder; lithium slag powder; steel slag powder; ground granulated blast furnace slag powder; steam cured cement paste; hydration product; mechanical property

0 引言

近年来, 预制装配式建筑由于具有标准化设计、规范化生产、拼装式施工等优势, 提高了施工效率和施工质量, 在我国得到了快速发展和应用。然而作为预制装配式建筑重要组成部分的预制装配式混凝土在生产中大部分经历了高温蒸养, 其耐久性相对现浇混凝土较差^[1]。为改善早期蒸养给预制装配式混凝土带来的不利影响, 生产企业常采用矿物掺合料替代部分水泥制备预制装配式混凝土, 但是矿物掺合料对预制装配式混凝土水化产物与力学性能的影响如何报道较少。

对于不同的矿物掺合料, 其物理和化学性质差异较大。镍铁渣是冶炼镍铁过程中产生的固体废弃物, 每年排放量约 3 000 万吨, 其主要矿物组成为镁橄榄石与顽辉石, 化学组成主要以 SiO_2 、 Fe_2O_3 与 MgO 为主, 水化活性相对较低^[2]。锂渣是硫酸法生产碳酸锂过程中产生的工业废渣, 每年排放量为 80 万 ~ 120 万吨, 其主要矿物组成为锂辉石、石膏与石英, 同时含有少量碳酸盐与硫酸盐矿物, 其化学组成主要以 SiO_2 、 Al_2O_3 与 SO_3 为主, 而 CaO 含量较少, 早期水化活性较高^[3]。作为新型矿物掺合料的镍铁渣粉、锂渣粉与常规矿物掺合料钢渣粉、矿渣粉对预制装配式混凝土水化产物与力学性能影响有何异同, 目前还不清楚。

因此, 本文在掺量均为 20% 的条件下首先对比了镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉、矿渣粉对水泥需水量、凝结时间、安定性、水泥胶砂流动度以及水化放热量的影响, 然后对比研究了镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉、矿渣粉对早期蒸养(为激发矿物掺合料活性, 采用 80 °C 蒸养 7 h 的蒸养制度^[1]) 以及蒸养后继续标养 28 d 水泥水化产物与力学性能的影响, 以期对预制装配式混凝土的生产提供一定参考。

1 实验

1.1 原材料

水泥(PC) 选择 P · II 52.5 水泥, 镍铁渣粉(FNS)、锂渣粉(LS)、钢渣粉(SS) 与矿渣粉(GGBFS) 均来自于江苏融达新材料股份有限公司, 以上五种材料的化学组成见表 1, 可见, 镍铁渣粉与钢渣粉中的 Fe_2O_3 与 MgO 含量在五种材料中相对较高; 而锂渣粉中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 SO_3 含量较高, 三者之和达 91.23%, 在五种材料中最高; 矿渣粉中 Al_2O_3 与 SO_3 含量也相对较高; 相比钢渣粉与矿渣粉, 镍铁渣粉、锂渣粉中的 CaO 含量相对较低。

表 1 水泥、镍铁渣、锂渣、钢渣与矿渣的主要化学组成

Table 1 Main chemical composition of PC, FNS, LS, SS and GGBFS

/wt%

Oxide	CaO	SiO_2	Al_2O_3	SO_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	Cr
PC	64.47	20.87	4.87	2.52	3.59	2.13	0.11	0.65	0.04
FNS	11.49	47.61	6.56	0.52	13.24	15.94	0.80	0.18	0.70
LS	4.53	62.40	22.10	6.73	1.06	0.49	0.89	0.52	-
SS	38.62	18.46	7.12	1.08	22.50	6.60	0.21	0.15	-
GGBFS	36.05	34.67	16.52	2.53	0.29	3.90	-	0.33	-

材料的矿物组成、烧失量、密度、比表面积与强度活性指数等指标见表 2, 锂渣中由于少量碳酸盐以及石膏的存在, 其烧失量较高, 为 5.7%, 而钢渣中由于氢氧化钙、碳酸钙的存在, 其烧失量也较高, 为 6.2%。由于镍铁渣与钢渣中含有较多的 Fe_2O_3 与 MgO , 因此其密度也较其他矿物掺合料高, 而锂渣密度最低, 仅为 2.60 g/cm^3 。同时, 与钢渣粉、矿渣粉不同, 镍铁渣粉与锂渣粉均无潜在水硬性。

表 2 原材料的矿物组成、烧失量、密度、比表面积与 28 d 强度活性指数

Table 2 Mineral composition, loss on ignition, density, specific surface area and 28 d strength activity index of raw materials

Sample	Mineral composition	LOI/%	Density /(g/cm ³)	Specific surface area/(m ² /kg)	28 d strength activity index/%
PC	C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF, CaCO ₃ and CaSO ₄ · 2H ₂ O ^[1]	2.4	3.05	356	-
FNS	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄ , MgSiO ₃ ^[1]	1.4	2.99	420	70.6
LS	LiAlSi ₂ O ₆ , CaSO ₄ · 2H ₂ O, SiO ₂ ^[2]	5.7	2.60	432	92.0
SS	C ₂ S, C ₂ F, RO phase, Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ ^[5]	6.2	3.27	442	73.2
GGBFS	Amorphous phase ^[6]	2.0	2.90	522	103.5

根据标准 GB/T 12957—2005 测试的 28 d 强度活性指数可知,在标养 28 d 条件下,矿渣粉、锂渣粉、钢渣粉、镍铁渣粉的活性依次降低。

1.2 样品制备与测试方法

在水灰比为 0.5,不掺矿物掺合料以及镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉与矿渣粉掺量均为 20% 的条件下制备纯水泥净浆(Ref)、掺镍铁渣粉水泥净浆(F20)、掺锂渣粉水泥净浆(L20)、掺钢渣粉水泥净浆(S20)与掺矿渣粉水泥净浆(G20),在 80 °C 蒸养 7 h 的条件下,测试蒸养 7 h 以及蒸养后继续标养 28 d 水泥浆体的水化产物的组成与形貌。其中蒸养制度中的静养时间为 2 h,升温时间为 2 h,保温时间为 7 h。同时,在同条件下成型 40 mm × 40 mm × 160 mm 水泥胶砂用以测试相应龄期水泥浆体的力学性能,其中,胶凝材料与标准砂的质量比为 1:3。

采用标准 GB/T 1346—2011、GB/T 2419—2005、GB/T 208—2014、GB/T 17671—1999 测试水泥的需水量、凝结时间、安定性、原材料的密度、水泥胶砂的流动度与胶砂强度,采用水化量热仪分析水泥的水化热,采用 XRF 与 XRD 分析原材料的化学组成与矿物组成,采用 XRD、SEM 分析水化产物的组成与形貌,采用 TG 等分析水化产物的化学结合水量与 Ca(OH)₂、(CH) 含量,其中化学结合水含量采用水化产物在 60 ~ 600 °C 的失重计算^[4]。

2 结果与讨论

2.1 需水量、胶砂流动度、体积安定性与凝结时间

在掺量为 20% 的条件下,镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉与矿渣粉对水泥需水量、凝结时间、安定性以及胶砂流动度的影响见表 3。可见,锂渣粉和矿渣粉均会导致水泥浆体需水量增加,这主要与材料本身的比表面积大有关,此外,与矿渣粉不同的是,掺锂渣粉水泥需水量较大的原因还有以下两点:(1) 锂渣粉中含有层状锂辉石、石膏、硅藻土与炭黑等多孔材料;(2) 锂渣粉中的石膏、硫酸钠、碳酸钠和碳酸锂等可与水泥中铝酸盐矿物快速反应形成钙矾石,同时消耗大量的自由水^[3]。但是除锂渣粉外,掺镍铁渣粉、钢渣粉与矿渣粉对水泥胶砂流动度影响均较小。

表 3 水泥净浆与砂浆的物理性能

Table 3 Physical properties of cement pastes and mortars

Sample	Water demand/wt%	Setting time/(h: min)		Le Chatelier soundness/mm	Flow of mortar/mm
		Initial	Final		
Ref	27.4	2:52	3:57	0.5	210
F20	27.4	3:26	4:46	0.5	220
L20	28.7	3:23	4:03	0.5	200
S20	27.2	3:50	5:27	2.5	220
G20	28.0	3:34	4:52	0.5	220

尽管镍铁渣粉中含有较多的 MgO,但是其对水泥安定性的影响较小,这是由于镍铁渣中不存在游离态的 MgO。镍铁渣中 MgO 主要存在于镁橄榄石、顽辉石以及玻璃体中,其中镁橄榄石、顽辉石几乎不反应,而玻璃体中的 MgO 反应不会造成体积膨胀^[2]。但是,由于游离氧化钙的存在,钢渣粉对水泥安定性影响较大。

由于比表面积较大, 镍铁渣粉、矿渣粉对水泥凝结时间的延缓作用较小。尽管钢渣粉的比表面积较大, 但由于钢渣粉中熟料矿物相的活性较低等导致了掺钢渣粉水泥的凝结时间最长^[7-9]。由于锂渣粉中存在石膏、碳酸盐、硫酸盐等, 使得掺锂渣粉水泥的凝结时间与纯水泥凝结时间区别较小。

2.2 水化热

在 25 °C、水灰比为 0.3 以及掺量均为 20% 的条件下, 镍铁渣粉、锂渣粉、矿渣粉、钢渣粉等对水泥累计水化热的影响见图 1。可见, 在 70 h 内纯水泥、掺矿渣粉水泥、掺锂渣粉水泥、掺钢渣粉水泥、掺镍铁渣粉水泥的水化热依次降低, 说明在 70 h 内矿渣粉、锂渣粉、钢渣粉与镍铁渣粉活性依次降低。而在早期 16 h 内纯水泥、掺锂渣粉水泥、掺镍铁渣粉水泥、掺矿渣粉水泥、掺钢渣粉水泥的水化热依次降低, 说明在 16 h 内, 锂渣粉、镍铁渣粉、矿渣粉与钢渣粉对水泥水化的促进作用或者与水泥的复合作用依次降低。在较短龄期内 (小于 16 h), 矿物掺合料在水泥浆体中的作用仅仅为填料作用以及提高水泥浆体水灰比的作用, 与矿物掺合料本身的活性关系较小^[10]。但是, 由于锂渣粉中存在硫酸盐、碳酸盐等早强组分, 有助于水泥水化, 因此提高了其早期水化放热量。

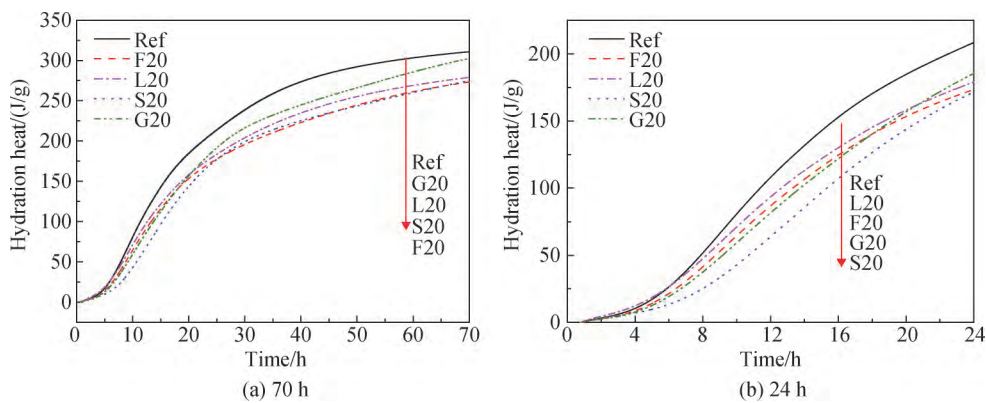


图 1 水泥浆体的水化热

Fig. 1 Hydration heat of cement pastes

2.3 水化产物 XRD 分析

图 2 为 80 °C 蒸养 7 h 以及蒸养后再继续标养 28 d 的水泥水化产物 XRD 谱。可见在早期蒸养 7 h 条件下, 硬化水泥浆体中的晶体水化产物除了氢氧化钙外, 主要为 AFm 与半碳化水化铝酸 ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CO}_3)_{0.5}(\text{OH}) \cdot 11.5\text{H}_2\text{O}$)^[2]。半碳化水化铝酸盐的形成与水泥 (石灰石粉做填料)、镍铁渣粉^[2]、锂渣粉 (碳酸钠等)、钢渣粉 (碳酸钙等) 和矿渣粉^[1] 等材料中含有碳酸盐有关。同时可见, 在早期 80 °C 蒸养条件下, AFt 不稳定并转换成了 AFm, 或者在高温条件下水泥中石膏、铝酸盐与氢氧化钙直接反应生成了 AFm。

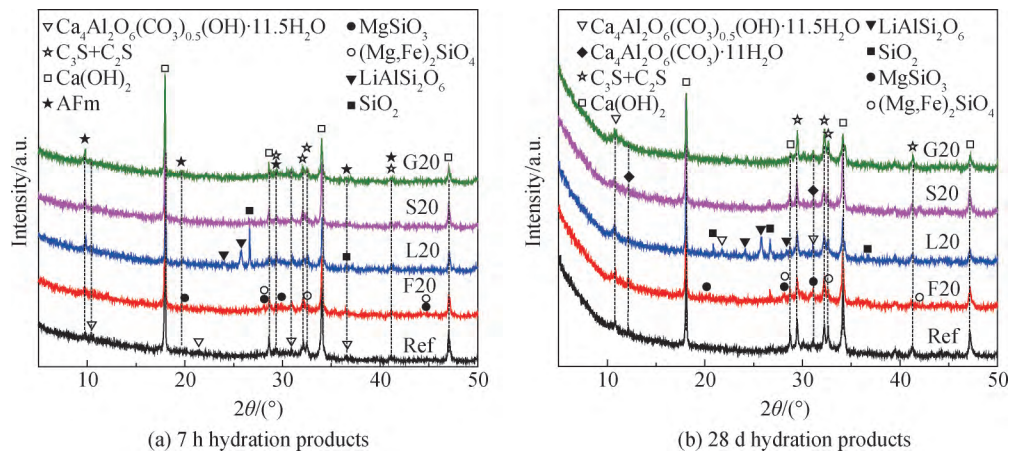


图 2 水泥水化产物 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of hydration products of cement paste

而蒸养 7 h 再标养 28 d 硬化水泥浆体中的晶体水化产物主要为氢氧化钙、半碳水化碳铝酸盐与单碳水化碳铝酸盐 ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CO}_3) \cdot 11\text{H}_2\text{O}$)。此时 80 °C 蒸养 7 h 水泥浆体中的 AFm 已经逐渐被半碳水化碳铝酸盐与单碳水化碳铝酸盐取代,这可能与水泥、镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉与矿渣粉中的 CO_3^{2-} 、 OH^- 等部分取代了 AFm 中的 SO_4^{2-} 有关,或者与 AFm 发生了碳化有关^[11]。另外可见,矿物掺合料种类对早期蒸养水泥水化产物的种类影响较小。

2.4 CH 含量与化学结合水

图 3 为早期蒸养 7 h 以及蒸养后再继续标养 28 d 水泥水化产物的 CH 含量与化学结合水含量。可见,早期蒸养 7 h 时,掺锂渣粉水泥、掺矿渣粉水泥、掺镍铁渣粉水泥、掺钢渣粉水泥的 CH 含量分别为纯水泥浆体中 CH 含量的 63.34%、69.29%、79.06%、88.57%,依次升高,说明此时锂渣粉的火山灰作用最强,而矿渣粉、镍铁渣粉次之,钢渣粉最差。锂渣粉火山灰作用最强,一方面与锂渣中含有碳酸盐与硫酸盐有关,在高温条件下,碳酸盐与硫酸盐等不仅可以促进水泥的水化,还能促进水泥与锂渣之间的相关反应;另一方面,还与锂渣中 CaO 含量较少有关^[12]。而掺钢渣粉水泥浆体中的 CH 含量最多与钢渣粉的水化并不消耗水泥的水化产物 CH,以及钢渣粉水化可以释放出 CH 有关。

而在 28 d 时,掺锂渣粉水泥、掺钢渣粉水泥、掺矿渣粉水泥、掺镍铁渣粉水泥、纯水泥的 CH 含量依次升高。这主要与矿物掺合料的活性有关,而此时掺钢渣粉水泥的 CH 含量较少,这可能与钢渣粉不利于蒸养水泥的水化有关^[11]。

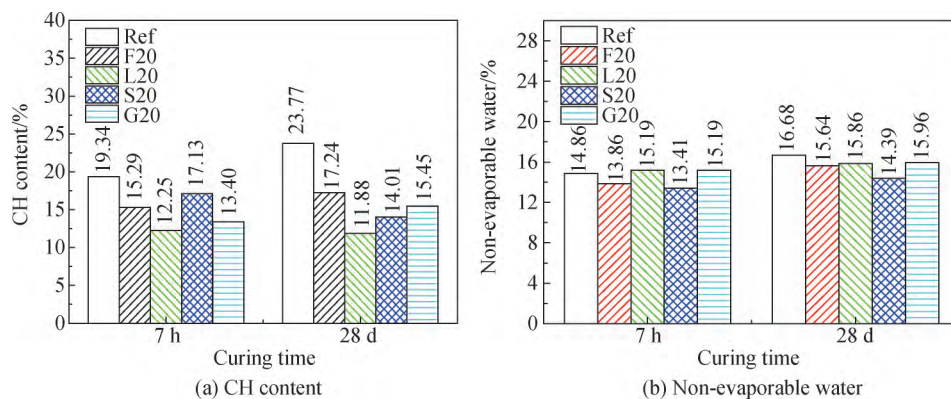


图 3 7 h 与 28 d 蒸养水泥的 CH 含量与化学结合水含量

Fig. 3 CH content and non-evaporable water of 7 h and 28 d steam cured cement paste

早期蒸养 7 h 时,掺锂渣粉水泥、掺矿渣粉水泥、掺镍铁渣粉水泥、掺钢渣粉水泥的化学结合水含量分别达到了纯水泥的 102.22%、102.22%、93.27%、90.24%,说明锂渣粉与矿渣粉对水泥水化的促进作用最为明显,而钢渣粉效果最差,这与掺钢渣会延缓水泥的水化有关,见表 3。

而 28 d 时,掺矿渣粉水泥、掺锂渣粉水泥、掺镍铁渣粉水泥、掺钢渣粉水泥的化学结合水含量分别达到了纯水泥的 95.68%、95.08%、93.76%、86.27%,依次降低。掺钢渣粉水泥的水化产物化学结合水含量最少,与其 CH 含量结果相一致。另外,与早期蒸养 7 h 比,掺矿渣粉、锂渣粉、镍铁渣粉、钢渣粉均不利于蒸养水泥的 28 d 水化。

但是,相比蒸养 7 h 28 d 龄期的掺镍铁渣粉水泥、纯水泥、掺钢渣粉水泥、掺矿渣粉水泥与掺锂渣粉水泥的化学结合水含量分别增长了 12.84%、12.25%、7.31%、5.07%、4.41%,掺镍铁渣粉水泥的增幅最高而掺锂渣粉水泥的增幅最低。

2.5 水化产物形貌

2.5.1 蒸养 7 h 水泥浆体产物形貌

早期蒸养 7 h 水泥浆体的产物照片见图 4。可见,纯水泥浆体在早期蒸养条件下,具有较多的裂缝,同时, C-S-H 主要以纤维状为主,见图 4(a)。镍铁渣粉作为一种惰性材料,水化活性较低,在水泥早期水化过程中主要起填充作用,对蒸养水泥水化产物形貌的影响较小,其 C-S-H 同样主要为纤维状,见图 4(b)。

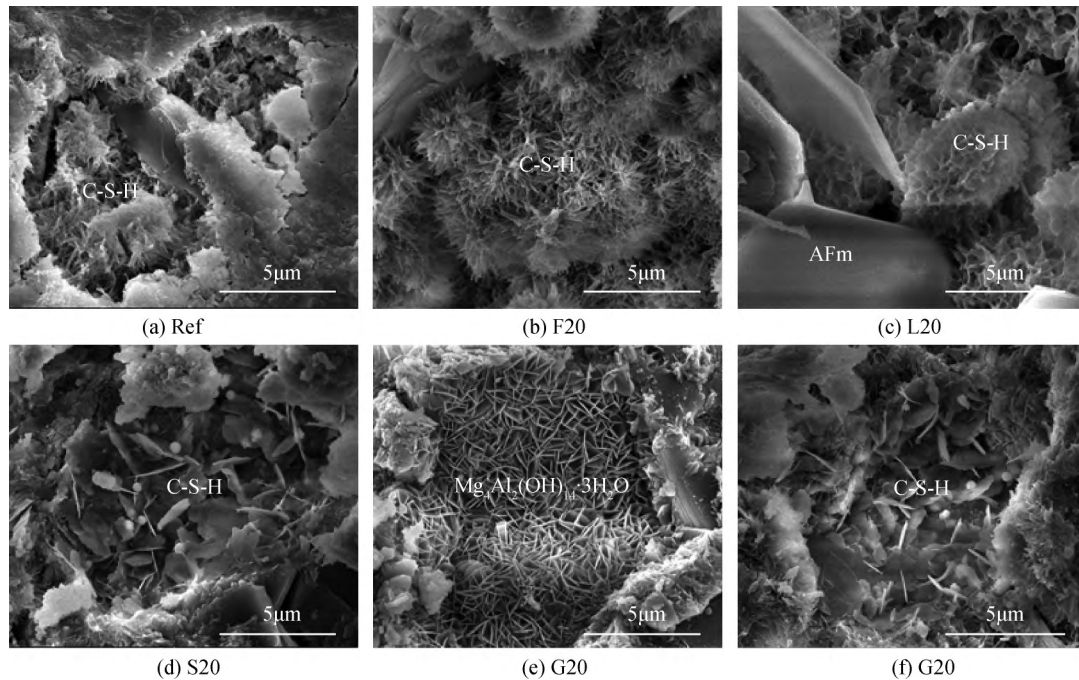


图 4 7 h 蒸养水泥浆体的 SEM 照片

Fig. 4 SEM images of 7 h steam cured cement pastes

而早期蒸养掺锂渣粉水泥浆体的水化产物 C-S-H 除了纤维状外, 主要以蜂窝状为主, 见图 4(c), 这主要是由于锂渣中存在碳酸盐与硫酸盐, 可以加速水泥的早期水化, 并提高了水泥的水化程度^[12]。同时由于锂渣中石膏含量较高, 在掺锂渣粉水泥浆体中还有较多的 AFm 形成, 见图 4(c)。

由于钢渣粉中存在活性矿物 C_2S 、 C_2F 、铝酸盐矿物等可以参与到水泥水化过程中并影响水化产物的组成, 因此掺钢渣粉水泥浆体中还有球形、薄片状的 C-S-H 形成, 见图 4(d)。

同样的, 掺矿渣也可以改变水泥浆体的水化产物形貌。由于矿渣主要以玻璃体相存在, 玻璃体中含有较多的 Al_2O_3 、 MgO , 活性较高, 可以参与到蒸养水泥的早期水化中, 并形成了片状水滑石(图 4(e)) 以及球形、薄片状 C-S-H(图 4(f))。

2.5.2 蒸养 7 h 再标养 28 d 水泥浆体产物形貌

图 5 为 28 d 蒸养水泥浆体的 SEM 照片, 可见掺镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉与矿渣粉对早期蒸养 7 h 再标养 28 d 水泥浆体水化产物的形貌影响较小。其中掺镍铁渣粉水泥浆体中仍有少量长棒状的 AFt, 见图 5(b), 而由于锂渣粉中石膏含量较多, 掺锂渣粉水泥浆体中有较多的 AFt, 但是其多呈短针状, 并多生长于孔洞中有助于减小掺锂渣粉水泥浆体的孔径尺寸, 见图 5(c)。同时, 可见锂渣粉中层状的锂辉石在水泥浆体碱性环境中发生了溶蚀, 说明锂辉石已经发生了反应。

另外, 各水泥浆体中均有较多的孔洞, 见图 5。尽管矿渣是目前预制混凝土中采用的主要矿物掺合料, 但是掺矿渣粉水泥浆体仍然有较多的小孔, 这是由于矿渣粉活性较高, 在掺量较少时(20%) 可以加快早期蒸养水泥的水化, 并提高其水化程度, 见图 3(b), 使水化产物紧密包裹在未水化水泥颗粒的周围, 限制了未水化水泥颗粒的进一步水化^[13-15], 因此掺矿渣粉蒸养水泥浆体在水化后期会存在较多的孔隙。

2.6 力学性能

图 6 为早期蒸养 7 h 与蒸养后再继续标养 28 d 水泥胶砂的抗压强度和抗折强度。早期蒸养 7 h 时, 掺钢渣粉水泥胶砂(S20)、掺镍铁渣粉水泥胶砂(F20)、掺矿渣粉水泥胶砂(G20)、纯水泥胶砂(Ref)、掺锂渣粉水泥胶砂(L20) 抗压强度依次升高, S20、F20、Ref、G20、L20 抗折强度依次升高, 说明掺锂渣粉有助于提高蒸养水泥胶砂的脱模抗压强度, 而掺钢渣粉最不利于蒸养水泥胶砂的脱模强度, 其抗压强度、抗折强度仅为纯水泥胶砂的 71.3% 与 78.1%, 这与掺钢渣粉水泥较低的水化程度有关, 见图 3(b)。

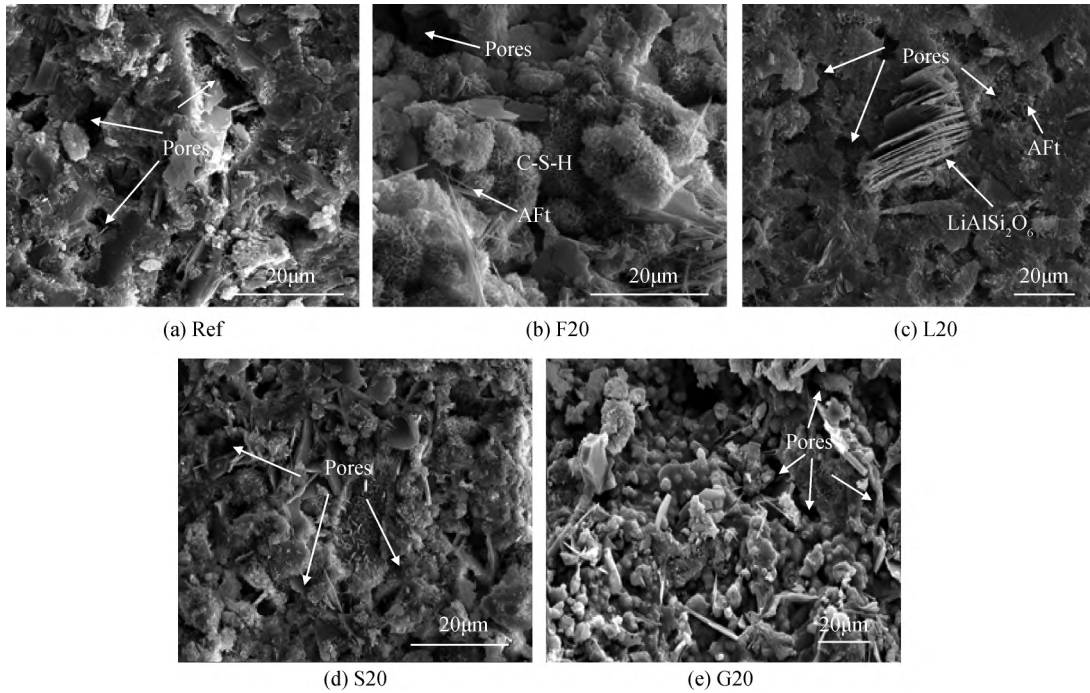


图 5 28 d 蒸养水泥浆体的 SEM 照片

Fig. 5 SEM images of 28 d steam cured cement pastes

蒸养后再继续标养 28 d 时,水泥胶砂的抗压强度为 S20、L20、F20、G20、Ref 依次升高,掺钢渣粉、锂渣粉、镍铁渣粉与矿渣粉均不利于蒸养水泥胶砂的 28 d 抗压强度,其中以钢渣效果最差。抗折强度 G20、F20、Ref、L20 组区别较小,以 S20 最低,说明相比镍铁渣粉、锂渣与矿渣粉,掺钢渣粉不利于蒸养水泥胶砂的强度发展。

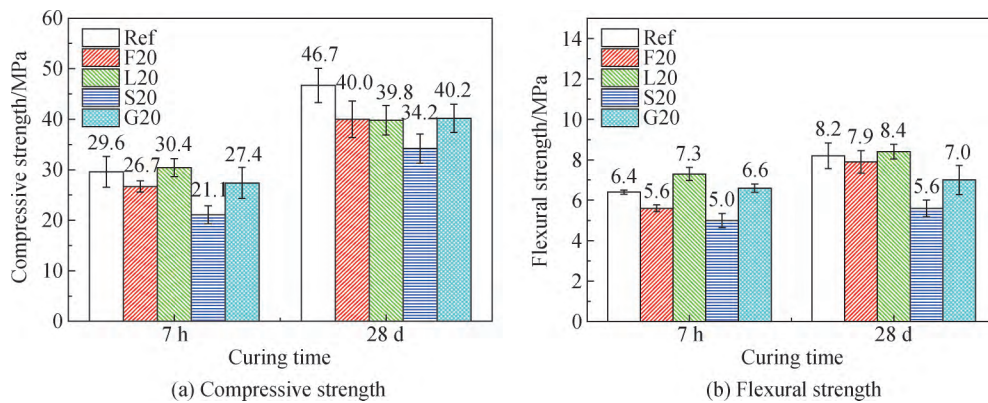


图 6 7 h 和 28 d 养护龄期蒸养水泥胶砂的强度

Fig. 6 Strength of 7 h and 28 d steam cured cement mortar

3 结 论

为探明镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉、矿渣粉对预制装配式混凝土水化产物与力学性能的影响,采用 20% 的镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉、矿渣粉在 80 °C 蒸养 7 h 条件下制备了水泥净浆与砂浆,对比研究了镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉与矿渣粉对 7 h 和 28 d 龄期蒸养水泥水化产物与力学性能的影响,主要结论如下:

(1) 在 25 °C、掺量均为 20% 的条件下,70 h 内矿渣粉、锂渣粉、钢渣粉与镍铁渣粉活性依次降低,而在 16 h 内锂渣粉活性最高。

(2) 早期 80 °C 蒸养 7 h 硬化水泥浆体的晶体水化产物主要为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、AFm 与 $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CO}_3)_{0.5}(\text{OH}) \cdot 11.5\text{H}_2\text{O}$; 蒸养再继续标养 28 d 硬化水泥浆体的晶体水化产物主要为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CO}_3)_{0.5}(\text{OH}) \cdot 11.5\text{H}_2\text{O}$ 与 $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CO}_3) \cdot 11\text{H}_2\text{O}$, 掺镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉与矿渣粉不会改变蒸养水泥的水化产物种类。

(3) 掺锂渣粉、矿渣粉早期蒸养 7 h 水泥浆体的水化程度高于纯水泥, 其 CH 含量分别为纯水泥浆体 CH 含量的 63.34%、69.29%。

(4) 掺镍铁渣粉不会改变蒸养 7 h 水泥 C-S-H 的形貌, 而掺锂渣粉、钢渣粉、矿渣粉会改变蒸养 7 h 水泥浆体 C-S-H 的形貌, 除了纤维状 C-S-H 外, 掺锂渣粉水泥浆体中还有蜂窝状 C-S-H, 掺钢渣粉水泥浆体与掺矿渣粉水泥浆体中还有球形与薄片状 C-S-H 形成。

(5) 掺锂渣粉可以提高早期 80 °C 蒸养 7 h 水泥胶砂的脱模强度; 而掺矿渣粉蒸养水泥胶砂、掺镍铁渣粉蒸养水泥胶砂的强度与纯水泥胶砂区别较小, 掺钢渣粉蒸养水泥胶砂的强度最低; 掺镍铁渣粉、锂渣粉、钢渣粉与矿渣粉均不能改善蒸养水泥胶砂的 28 d 强度; 在 80 °C 蒸养 7 h 的蒸养制度和 20% 的掺量条件下, 相对镍铁渣粉、锂渣粉与矿渣粉, 钢渣粉不适宜用作预制装配式混凝土的掺合料。

参 考 文 献

- [1] 李保亮, 霍彬彬, 尤南乔, 等. 不同养护条件下钢渣/矿渣复合水泥胶砂的耐硫酸盐侵蚀性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1144-1152.
- [2] 李保亮, 王申, 潘东, 等. 蒸养条件下镍渣水泥胶砂的水化产物与力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7): 891-899.
- [3] 李保亮, 尤南乔, 曹瑞林, 等. 锂渣粉的组成及在水泥浆体中的物理与化学反应特性[J]. 材料导报, 2020, 34(10): 10046-10051.
- [4] Vance K, Aguayo M, Oey T, et al. Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 39: 93-103.
- [5] Li B L, Wang Y H, Yang L, et al. Sulfate resistance of steam cured steel slag blended cement mortar[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2019, 8(6): 353-366.
- [6] You N, Li B L, Cao R, et al. The influence of steel slag and ferronickel slag on the properties of alkali-activated slag mortar[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116614.
- [7] Altun I A, Yilmaz I. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(8): 1247-1249.
- [8] Liu Z, Cui X H, Tang M S. Hydration and setting time of MgO-type expansive cement[J]. Cement and Concrete Research, 1992, 22(1): 1-5.
- [9] Péra J, Ambrose J, Chabannet M. Properties of blast-furnace slags containing high amounts of manganese[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(2): 171-177.
- [10] Scrivener K L, Juilland P, Monteiro P J M. Advances in understanding hydration of Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 78: 38-56.
- [11] Taylor H F W. Cement chemistry[M]. London: Thomas Telford, 1997.
- [12] 李保亮, 尤南乔, 朱国瑞, 等. 蒸养条件下锂渣复合水泥的水化产物与力学性能[J]. 材料导报, 2019, 33(24): 4072-4077.
- [13] Li B L, Cao R, You N, et al. Products and properties of steam cured cement mortar containing lithium slag under partial immersion in sulfate solution[J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 596-606.
- [14] Kjellsen K O, Detwiler R J. Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 1992, 22(1): 112-120.
- [15] Escalante-García J I, Sharp J H. Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in Portland cements: part I, neat cements[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(9): 1245-1257.