

矿渣微粉在水泥基材料中的作用时效及其微结构演变规律

张 洁, 张 建 建, 孙 国 文, 曹 彤 宁

(石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为探究矿渣在水泥基材料中作用时效及其微结构演变规律,采用宏观性能测试和微观结构分析相结合的方法,通过对比方法研究了掺入不同掺量的矿渣以及与矿渣粉粒径相近的石英粉后对复合硬化浆体的强度、物相组成以及微观形貌的影响规律。结果表明:3 d 时矿渣微粉在复合浆体中仅起微集料的物理填充作用,7 d 时矿渣粉的火山灰效应显现,硬化浆体密实度逐渐提高,28 d 时矿渣-水泥复合组分(掺量分别为10%、20%、30%、50%)的硬化浆体强度分别为纯水泥试样的113.87%、120.94%、124.10%、115.18%;宏微观结果表明:矿渣的最佳掺量为30%且不超过该临界值时,其复合胶凝材料总的水化产物数量变化不大,此外,养护7 d 和28 d 时矿渣-水泥复合组分的水化产物结晶点较对比组增多且晶体尺寸小,排列紧密,结构整体较纯水泥组分和石英粉-水泥复合组分致密。

关键词:矿渣微粉;水泥基复合材料;作用时效;微观结构

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2019)04-0109-07

0 引言

随着我国近几年节能环保力度的加大,节能减排已然成为国家一项重大课题,工业废渣的回收利用是节能减排工作最有效途径。磨细矿渣是由炼铁高炉排出的熔融态矿渣经粒化后再进行干燥、磨细加工而得到的超细粉^[1]。矿渣作为水泥混合材料已普遍使用,除降低企业成本和调节强度等级外,还可改善水泥颗粒级配和某些物理性能^[2-4],因此已成为水泥混凝土技术的重要发展方向之一,并在国内外大量工程中得到了广泛的应用^[5-6]。为了充分利用和开发矿渣在实际工程中的应用,近年来国内外学者关于矿渣在水泥基材料中的作用进行了大量研究^[7-15],主要将其归结于矿渣的掺入,使复合基体硬化浆体孔溶液碱度的变化,发生水化的起因,玻璃态是主要因素,大部分学者侧重于探究矿渣的化学作用及其化学活性的激发,而对于矿渣在复合胶凝材料中究竟何时起作用,起化学作用所占的比例如何,研究较少,或者对于何时起化学作用,不同的研究人员所得的结论差别较大。

王强等^[16]指出随着复合胶凝材料中矿渣的掺入量增大,硬化浆体中孔溶液的碱度降低,矿渣含量为10%~40%时,孔溶液的pH值为12.6~13.3;矿渣在后期的反应程度提高明显,尤其矿渣所起的化学作用显著。韩方晖等^[17]在不同掺量矿渣复合胶凝材料的水化动力学中指出水化过程均可划分为结晶成核与晶体生长、相边界反应和扩散3个阶段。陈琳等^[18]指出在复合胶凝材料中,适当提高原材料矿渣的细度,有利于充分发挥矿渣的活性,制备高强度等级复合水泥。王冲等^[19]提出矿渣对水泥水化有促进作用,自加水开始即表现出一定的火山灰效应。矿渣掺入后有助于水泥水化产物中钙矾石的稳定,钙矾石抑制了水泥水化,Ca(OH)₂生成量减少,因而矿渣的火山灰反应也受到影响。郑克仁等^[20]提出在一定范围内,随着矿渣

收稿日期:2018-06-23 网络出版日期:- 责任编辑:翟晓玲 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20180623002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1402.N.20191120.1415.019.html>

基金项目:国家自然科学基金(51778378),河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2016065),石家庄铁道大学校级创新项目(YC2018085)

作者简介:张洁(1992—),女,硕士研究生,主要从事磷酸钾镁水泥改性研究。E-mail:1946170835@qq.com

张洁,张建设,曹彤宁,等.矿渣微粉在水泥基材料中的作用时效及其微结构演变规律[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2019,32(4):109-115.

掺入量的变化,非蒸发水量、空隙率也相应发生变化,最佳掺量为 30%;比较纯水泥浆体和掺矿渣浆体的非蒸发水量和孔隙率的基础上提出了矿渣最大有益掺量,矿渣的掺量低于此值时,可使材料的性能得到改善。刘仍光等^[21]提出在水泥-矿渣复合胶凝材料中,矿渣掺量 $\leq 70\%$ 时,随着矿渣掺量的越大反应程度逐渐降低。矿渣早期水化生成外部水化产物时消耗一定的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,使硬化浆体中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量降低,矿渣水化吸收 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中的 Ca^{2+} ,使生成的 C-S-H 凝胶的 Ca/Si 比降低较少;在水化后期,矿渣生成内部水化产物不再消耗较多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,使 C-S-H 凝胶的 Ca/Si 比降低相对较多,硬化浆体中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量有增加的趋势,保证硬化浆体的长期稳定性。

为探明矿渣在水泥基复合材料中作用机理和微观结构演变规律,参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》,通过对比方法,研究矿渣以及与矿渣粒径相近的石英粉复合胶凝材料胶砂试件的抗压强度发展规律,来探明不同龄期下的矿渣何时起物理作用,何时起化学作用,并通过 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)表征其微结构演变规律。这对于矿渣的大掺量推广应用以及激发时效研究有重要的理论和现实意义。

1 实验部分

1.1 原材料

为消除实验误差,本实验采用的水泥为混凝土外加剂性能检测专用基准水泥,砂为福建厦门艾思欧有限公司生产的 ISO 标准砂,矿渣采用金隅混凝土搅拌站的 I 级矿渣粉,其比面积为 $410\text{ m}^2/\text{kg}$,石英粉由纯石英砂磨制而成,并且细度与矿渣、基准水泥基本相同,水选用洁净的自来水。基准水泥的性能指标见表 1,矿渣的成分见表 2。

3 种原材料的粒度分布由 LS908(A)激光粒度分析仪测定,实验结果如图 1 所示,从图中可以得出 3 种原材料的大体粒径均在 $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,粒径分布也基本一致。

表 1 P.O 42.5 级水泥物理性能

检验项目	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	标准稠度 用水量/%	烧失量/%	熟料中 C_3A 含量/%	凝结时间/ min		比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa	
					初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
数值	2 970	27.5	3.8	7.04	122	180	4 090	20.3	52.1	6.0	8.9

表 2 矿渣中氧化物含量 %

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
37.89	29.50	12.28	6.739	2.19	1.16	0.397	0.366

1.2 实验方法

(1)水泥胶砂力学性能实验参照 GB/T17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》进行,胶砂比都为 1:3,水胶比(w/b)为 0.46;矿渣和石英粉的掺量分别为 0%、10%、20%、30%、50%、70%,成型试件尺寸为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 160\text{ mm}$,抗压强度测试龄期分别为 3 d、7 d 和 28 d。胶砂抗压强度实验中复合胶凝材料的组成见表 3,其中 S、Q 和 C 分别表示掺加的矿渣、磨细石英粉和基准水泥。

(2)微观分析制备与分析:微观测试所用的硬化体试样均从强度实验后的破碎试样中选取,先用无水乙醇中止水化,实验前将样品在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 的真空干燥箱中烘干至恒重。XRD 测试选用德国 D8 AVANCE 型衍射仪,扫描速度为 $6^\circ/\text{min}$;原材料成分由德国 S4 EXPLORER 型 X 射线荧光光谱分析仪测得;观察硬化浆体水化产物形貌由日本的 S-4800-1 型扫描电镜测得,分辨率为 $1.0\text{ nm}(15\text{ kV})$,放大倍数 $\times 20-\times$

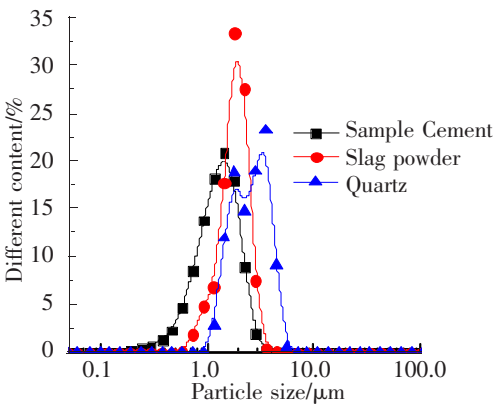


图 1 基准水泥、矿渣和石英粉的粒度分布

800 000。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度发展

在标准养护条件下砂浆试件的抗压强度随矿渣和石英粉不同掺量下的变化如图 2 所示,其中图 2(a)为掺矿渣试件的强度发展图,从图中可以看出在养护 3 d 时,随矿渣掺量增加,强度越来越低,如 3 d 时矿渣-水泥组分胶凝材料(掺量为 10%、20%、30%、50%、70%)的强度分别为对比组(C 组未掺试样)强度的 84.00%、69.06%、65.51%、52.18%、32.55%;3 d 后随着养护龄期的增加,复合胶凝材料的强度呈先增加后降低趋势,如 7 d 时不同掺量的矿渣-水泥组分较对比组为 105.96%、107.89%、115.59%、101.98%、79.09%,128 d 时较对比组强度分别为 113.87%、120.94%、124.10%、115.18%、93.22%。图 2(b)为不同石英粉掺量下强度发展图,从图中可以看出随石英粉掺量增加,砂浆试件强度在不同龄期下均呈降低趋势,如 3 d 时石英粉-水泥组分胶凝材料(掺量为 10%、20%、30%、50%)的强度较对比组分别为 84.41%、68.66%、64.70%、51.78%;28 d 时较对比组为 87.53%、81.22%、74.67%、70.073%。

对比图 2(a)、2(b),养护 3 d 时,就矿渣和石英粉在掺量相同、胶凝材料总量也相同条件下,复合胶材试件的强度基本相等,因石英粉是惰性的,这表明矿渣早期也是惰性的,仅仅起到了物理填充作用。相较于石英粉-水泥组分胶凝材料,7 d 时矿渣-水泥组分胶凝材料的强度逐渐增加,掺量≤50%时强度均略高于对比组,表明此时矿渣玻璃相中局部活化点开始被水泥的强碱环境激发,开始发生化学效应,即火山灰效应。养护龄期 28 d 时,掺矿渣复合胶材的强度在矿渣掺量≤50%条件下,高于同掺量掺石英粉砂浆试件强度,进一步证实 7 d 后矿渣已开始发生化学反应;当矿渣掺量为 70%时强度低于对比组,主要是因为矿渣掺量过高,复合胶材中水泥组分含量的降低,水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量在复合浆体的孔溶液中还不足以解离矿渣的玻璃体,形成新的水化产物的数量少,所形成的网状结构填充性差,强度降低。与同掺量的矿渣相比,7 d、28 d 石英粉-水泥组分胶凝材料的强度均低于对比组,说明石英粉在基体中没有参与反应,仅仅起物理填充作用。这里需要说明的是矿渣和石英粉自身颗粒都是多棱角的,与水化产物之间也存在一定的机械咬合力,对整个硬化复合浆体的强度也有一定的贡献。

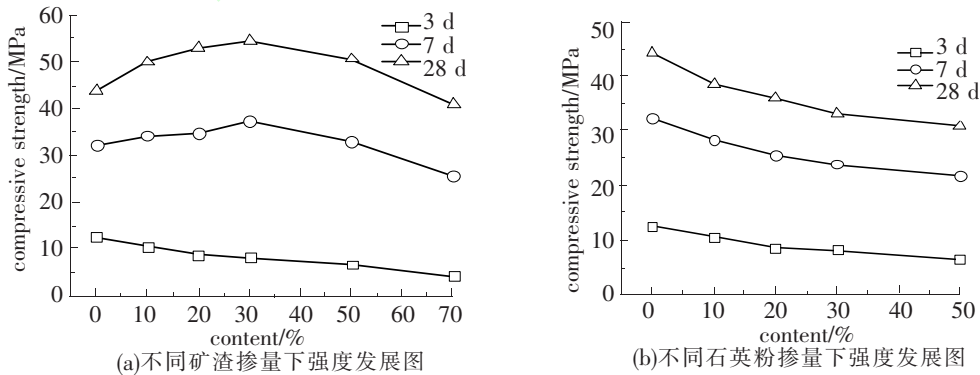


图 2 标准养护下抗压强度发展

2.2 XRD 分析

图 3 为硬化浆体在早龄期养护的下 XRD 图谱,通过其图谱可分析水泥基复合材料所形成的晶体相水化产物的演变规律,其中图 3(a)和图 3(b)分别为不同龄期下未掺、典型掺量为 50%矿渣和石英粉的对

表 3 复合胶凝材料的组成

样品	组成/%		
	水泥	灰渣	石英粉
C	100	—	—
S1	90	10	—
S2	80	20	—
S3	70	30	—
S4	50	50	—
S5	30	70	—
Q1	90	—	10
Q2	80	—	20
Q3	70	—	30
Q4	50	—	50

比图谱,可以看出在相同龄期下,胶凝材料水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的相对含量的试样由高到低依次是:未掺(纯基准水泥硬化体) $>$ 掺矿渣 $>$ 掺石英粉;生成 AFt 相对含量由高到低的试样依次是:掺矿渣 $>$ 未掺 $>$ 石英粉;而随龄期增加如水化到 7 d 时,CH 和 AFt 含量仍在增加,说明水泥水化仍在进行。理论上讲对于掺入矿粉的试样,水化时矿粉中活性 SiO_2 与 Al_2O_3 会与水泥水化时产生的 CH 发生反应,生成水化硅酸钙、铝酸钙以及钙矾石等,这样消耗 CH 后含量降低,其对应的峰值也略有降低,当水泥水化形成量仍大于矿渣的消耗量,也说明矿渣发生火山灰效应的量少;另外从 AFt 峰值的变化来看,无论水化 3 d 或 7 d 均有 AFt 峰值出现,证明掺入矿渣微粉后,3 d 以后就开始发生火山灰反应。对于掺入石英粉的基体,在水化 3 d 或 7 d SiO_2 的相对含量没有发生任何变化,也证明掺入石英粉是惰性的,在基体中仅仅起到了填充的作用;当然,石英粉的掺入使胶材中水泥掺入量相对降低,因此主要的晶体水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 相对含量与纯水泥浆体相比其含量降低。

相同龄期下,在矿渣掺量低于 30% 时,随矿渣微粉掺入量增加,CH 峰值降低,但 AFt 峰值略有提高,超过 30% 后,CH 和 AFt 的峰值均降低,说明矿渣的最佳掺量为 30% 且不超过该临界值时,其复合胶凝材料总的水化产物数量变化不大,这也证明了掺矿渣试件强度的发展规律,在水化 3 d 掺矿渣的复合浆体强度有所降低,但超过 3 d 后强度略有提高,强度之间差异性变化不大且 30% 是临界点,超过该值强度开始降低。此外,在矿渣同掺量下,对比 3 d 和 7 d 不同龄期下的图谱可以看出,随着龄期的延长,CH,AFt 的含量有所增加,矿物熟料 C_2S 的含量有所下降,正如前面所提到的,虽然矿渣-水泥组份胶凝材料中的矿渣水化会消耗了 CH,生成的新的水化硅酸钙凝胶、铝酸钙和 AFt,但水泥水化生成的 CH 大于矿粉消耗的量。

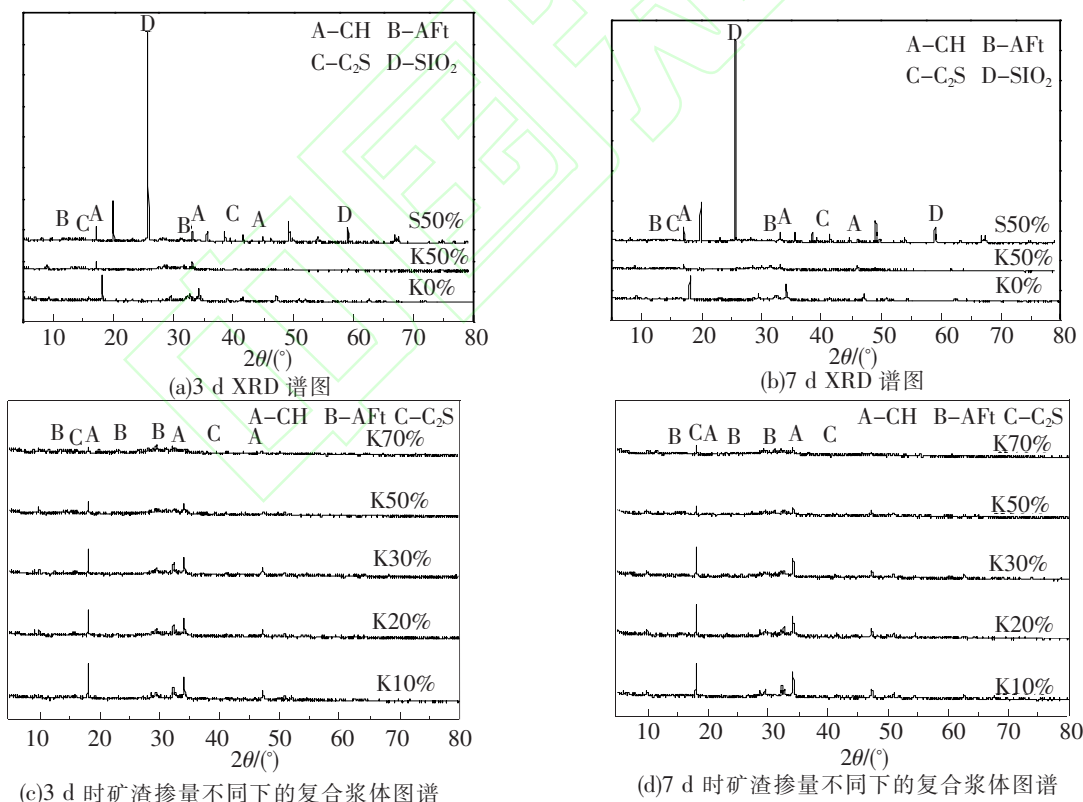


图 3 标准养护条件下水泥基材料硬化浆体 XRD 谱图

2.3 SEM 分析

当矿渣掺量不超过 30% 时,水泥水化形成的产物和矿粉在水化 3 d 后发生火山灰反应,再加上矿粉的微集料效应,使复合浆体的微结构差异不大,故本节选用工程上典型矿渣掺量为 50% 浆体进行 SEM 分析,如图 4 所示。由图 4(a)可知,龄期 3 d 时复合胶凝材料浆体中未反应的光滑片状矿渣颗粒与水泥的水化产物之间的界面过渡区相对明显,在矿渣颗粒表面局部有白色附着物存在,表明其发生了火山灰反应;

龄期 7 d 时(见图 4(b)),片状矿渣颗粒表面出现了大量针棒状产物,而且矿渣与周围水泥水化产物之间的界面链接明显增加,界面过渡区界限已不明显;随着反应龄期的增加,硬化断面的水化产物也相应增多,硬化浆体的自然断面结构趋于密实(见图 4(c))28 d 自然断面),表现为宏观强度增大(见图 2(a))。究其原因随着硬化浆体龄期的增加,水泥水化形成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量增多,基体孔溶液的碱性也相对升高。在碱激发的作用下,矿渣玻璃体表面活化点部位的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 首先生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,使玻璃体表面裂解,局部形成通道, OH^- 随着通道进入玻璃体的内部,先破坏键能较小的 Ca-O 、 Mg-O 键,形成更多 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$;此外,水泥-矿渣的基体中 Na^+ 、 K^+ 或者其它碱金属离子与游离的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进行替换,形成强碱 NaOH ,更有利于破坏键能较大的 Si-O 键,随着反应的持续,通道越来越大,矿渣内部玻璃体相逐渐被溶解, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与体系中溶出的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 和 MgO 发生反应。

图 5 是纯水泥净浆硬化浆体 SEM 图,其中图 5(a)图为 3 d 时硬化浆体自然断面图,硬化浆体的自然断面较为粗糙,出现大量蜂窝状水化产物;7 d 时水化产物的尺寸逐渐增大,且相互胶结呈网络状结构(图 5(b));28 d 时硬化浆体中水化产物的网络状结构密实度(图 5(c))增强。

图 6 是石英-水泥组分胶凝材料硬化浆体 SEM 图,其中图 6(a)图为 3 d 时硬化浆体自然断面图,可明显观测到多棱角的石英粉颗粒与水泥水化产物之间链接相对酥松,这也是早龄期时随石英粉掺量增加,砂浆试件强度降低(图 2(b)所示)的主要原因,随着水化龄期增加,水泥水化产物增多,而且出现大量簇状水化产物(如图 6(b)和图 6(c)所示),这样与多棱角的石英颗粒相互搭接,与界面之间的机械咬合力增强,使整个复合硬化浆体的致密性得到强化,对比图 4(a)、图 5(a)和图 6(a),纯水泥净浆硬化浆体的自然断面水化产物呈现蜂窝状分布(图 5(a)),而矿渣-水泥组分胶凝材料的水化产物呈现毛刺形状(见图 4(a)),即 3 d 时纯水泥组分的胶凝材料水化产物较矿渣-水泥组分胶凝材料更为致密;养护 7 d 时矿渣粉开始在浆体水化过程中起化学效应,且生成的水化产物数量高于水泥净浆,表现为宏观强度高于水泥净浆硬化体强度(见图 2(a));28 d 时,矿渣-水泥组分胶凝材料硬化浆体自然断面(见图 4(c))的密实度均高于水泥净浆硬化浆体和石英粉-水泥组分胶凝材料硬化浆体的自然断面,矿渣-水泥组分胶凝材料硬化浆体强度达到最大值(见图 2(a)),故矿渣微粉的掺入因其自身的微胶料效应和活性组分可改善水泥石的微观结构。对比石英粉-水泥组分胶凝材料 3 d、7 d、28 d 微观形貌,发现石英粉颗粒表面光滑且无水化产物附着,说明石英粉颗粒在石英粉-水泥组分胶凝材料硬化仅仅起到了填充作用,均未参与水化过程中的化学反应。

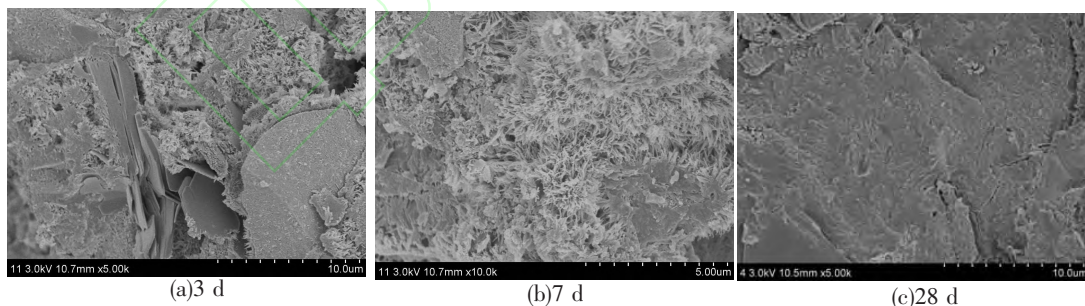


图 4 矿渣-水泥组分胶凝材料硬化浆体微观形貌

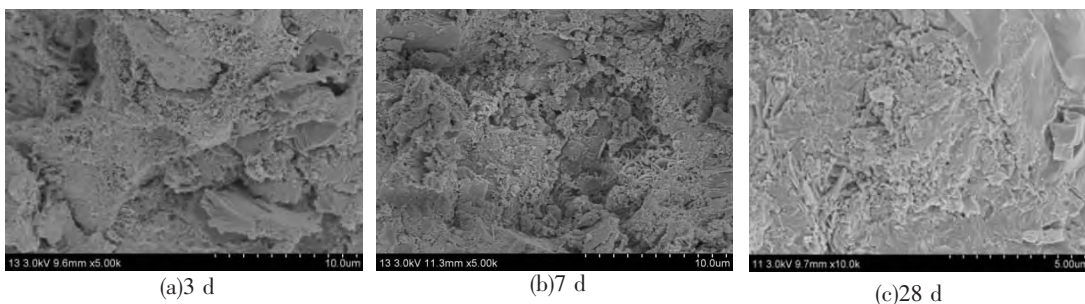


图 5 水泥净浆硬化浆体微观形貌

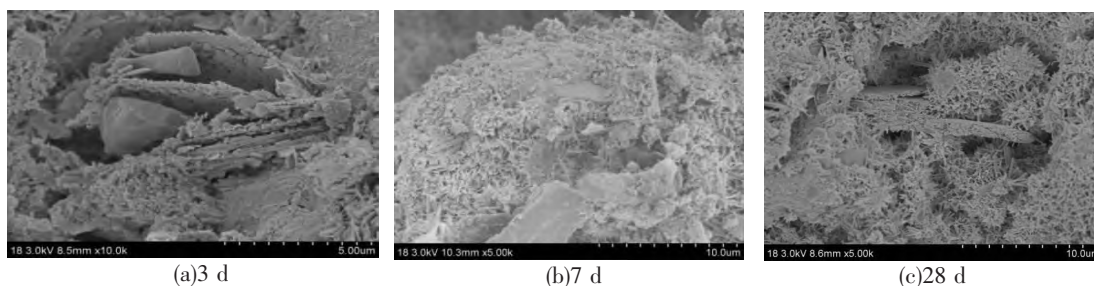


图 6 石英粉-水泥组分胶凝材料硬化浆体微观形貌

3 结论

(1)通过强度对比得出,3 d 时相同掺量下石英粉-水泥组分胶凝材料与矿渣-水泥组分胶凝材料相差不多,证明此时矿渣仅仅起填充作用,随着龄期的增加,7 d 以后,石英粉-水泥强度<水泥组分胶凝材料<矿渣-水泥组分胶凝材料,表明矿渣的活性被激发。

(2)通过 XRD 图谱得出,在矿渣掺量低于 30% 时,随矿渣微粉掺入量增加,CH 峰值降低,但 AFt 峰值略有提高,超过 30% 后,CH 和 AFt 的峰值均降低,表明矿渣的最佳掺量为 30% 且不超过该临界值时,其复合胶凝材料总的水化产物数量变化不大,这一点与掺矿渣复合浆体强度规律一致。

(3)通过 SEM 可知在水化 3 d 时,矿渣-水泥组分的胶凝材料断面密实度与石英粉-水泥断面的密实度相近均小于纯水泥组分胶凝材料;7 d 后片状矿渣颗粒表面出现了大量针棒状产物,而且矿渣与周围水泥水化产物之间的界面链接明显增加,整个复合浆体对比发现矿渣-水泥组分的胶凝材料密实度>纯水泥组分胶凝材料>石英粉-水泥组分的胶凝材料。

参 考 文 献

- [1]高丹盈,王勤学,李翔宇. 龄期和尺寸对纤维矿渣微粉混凝土抗压强度的影响[J]. 工业建筑,2011, 41(S1):739-742.
- [2]Robeyst G, De B L. Study of the hydration of portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry[J]. Thermal Analysis and Calorimetry,2010,102(3) : 941-951.
- [3]Gruyaert,Robeyst, De B. Influence of substitution of ordinary portland cement by silica fume on the hydration of slag-portland cement pastes[J]. Ceramics-Silikaty, 2011, 55(2) : 147-152.
- [4]Sagawa T, Nawa T. Hydration-microstructural evolution and drying shrinkage of Portland cement-blast furnace slag system[J]. Structural and Construction Engineering, 2010, 75 (652) : 1029-1037.
- [5]Li K L. Ocean engineering concrete using high-volume GGBS[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012,238 : 71-74.
- [6]Ortega J M, Albaladejo A, Pastor J L. Influence of using slag cement on the microstructure and durability related properties of cement grouts for micropiles[J]. Construction and Building Materials, 2013,38: 84-93.
- [7]Özbay E, Erdemir M, Durmuş H İ. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties a review[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105(15): 423-434.
- [8]Han B, Wang P, Ke C, et al. Hydration behavior of spinel containing high alumina cement from high titania blast furnace slag[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 79: 257-264.
- [9]Huang X, Jiang M, Zhao X, et al. Mechanical properties and hydration mechanisms of high-strength fluorogypsum-blast furnace slag-based hydraulic cementitious binder[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127(30): 137-143.
- [10]Jeong Y, Oh J E, Jun Y, et al. Influence of four additional activators on hydrated-lime $[Ca(OH)_2]$ activated ground granulated blast-furnace slag[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 65: 1-10.
- [11]Zhao J, Wang D, Yan P, et al. Particle characteristics and hydration activity of ground granulated blast furnace slag powder containing industrial crude glycerol-based grinding aids[J]. Construction and Building Materials, 2016, 104(1): 134-141.
- [12]Castellano C C, Bonavetti V L, Donza H A, et al. The effect of w/b and temperature on the hydration and strength of

- blastfurnace slag cements[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111(15): 679-688.
- [13] Darquennes A, Olivier K, Benboudjema F, et al. Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113(15): 1017-1028.
- [14] Khan M S H, Kayali O, Troitzsch U. Chloride binding capacity of hydrotalcite and the competition with carbonates in ground granulated blast furnace slag concrete[J]. Materials and Structures, 2016, 49(11): 4609-4619.
- [15] Zhang Y J, Zhang L, Kang L, et al. A new CaWO₄/alkali-activated blast furnace slag-based cementitious composite for production of hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 42(6): 3690-3697.
- [16] 王强, 黎梦圆, 石梦晓. 水泥—钢渣—矿渣复合胶凝材料的水化特性[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(5): 629-634.
- [17] 韩方晖, 王栋民, 阎培渝. 含不同掺量矿渣或粉煤灰的复合胶凝材料的水化动力学[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(5): 613-620.
- [18] 陈琳, 潘如意, 沈晓冬, 等. 粉煤灰-矿渣-水泥复合胶凝材料强度和水化性能[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3): 380-384.
- [19] 王冲, 杨长辉, 钱觉时, 等. 粉煤灰与矿渣的早期火山灰反应放热行为及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(7): 1050-1058.
- [20] 郑克仁, 孙伟, 贾艳涛, 等. 矿渣掺量对高水胶比水泥净浆水化产物及孔结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(4): 520-524.
- [21] 刘仍光, 阎培渝. 水泥-矿渣复合胶凝材料中矿渣的水化特性[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1112-1118.

Action Ages and Microstructure Evolution of Slag Powder in Cement-based Composites

Zhang Jie, Zhang Jianjian, Sun Guowen, Cao Tongning

(School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: To explore the action ages and the evolution of microstructure of slag powder in cement-based composites, a combination of macro performance testing and microstructural analysis were used to study the strength, phase composition, and micro-morphology of the composite cement hardened paste phase adding different dosage of slag powder and quartz powder with similar particle size by comparison methods. The results show that the slag powder is only used as the physical filling of the micro-aggregate in the composite group at curing 3 d; the pozzolanic effect of slag powder appears after 7d, and the density of hardened paste gradually increases. The strength of hardened paste of slag-cement composite components (with dosage of 10%, 20%, 30%, and 50%, respectively) at 28 d is 113.87%, 120.94%, 124.10%, and 115.18% of that of control cement pastes, respectively. The macroscopic and microscopic results indicate that the optimum dosage of slag is 30%, and the total amount of hydration products of the composite cementitious material does not change much within the critical value. In addition, the crystallization point of hydrated slag-cement composite component is more than that of the control group at 7 d and 28 d, and the crystal size is large and closely arranged. The overall structure of the slag-cement composite is significantly denser than the pure cement component and quartz powder-cement composite component.

Key words: slag powder; cement-based composites; action ages; microstructure