

大掺量矿渣微粉的碱激发机理研究

梅杨

(河南建筑职业技术学院 土木工程系,河南 郑州 450064)

摘要:为了揭示大掺量矿渣碱激发机理,该文立足于三因素三水平正交设计同时结合宏观性能测试和微结构分析,通过探究 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 Na_2SiO_3 、 Na_2SO_4 、 CaSO_4 以单掺、双掺形式得到不同类型的激发剂对混凝土初、终凝、孔溶液 pH 值、强度的影响,可得如下结论:① 对复合胶凝材料硬化浆体强度影响程度为:激发剂类型>掺量>双掺比例;② 双掺最佳掺量 4%,最佳组合为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 Na_2SiO_3 ,最佳比例为 5:1;③ 激发剂作用下复合胶凝材料的初、终凝时间均缩短,孔溶液 pH 值均大于空白组,宏观结果表明:龄期 28 d 时激发剂类型为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 Na_2SiO_3 、掺量为 4%、双掺比例为 5:1 时硬化浆体的水化结晶相紧密程度最高。

关键词:矿渣微粉;碱激发;正交设计;微观形貌

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

炼铁高炉排出的熔融态矿渣经粒化后进行干燥、磨细加工而得到的超细粉末^[1],主要以 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 等氧化物为主,其组成近似于水泥,但较水泥的水化速率慢,只有在一定的条件下激发才可获得良好的胶凝性能。中国钢铁产量逐步攀升,随之产生了 30% 的矿渣颗粒^[2],其近似水泥的胶凝特性可在制备胶凝材料方向发挥巨大的市场潜力。

随着矿渣微粉掺入量的增大,混凝土强度呈下降趋势,因此早期碱性激发剂的研究分析十分关键。相关研究^[3-5]指出:采用 NaOH 做矿渣胶凝材料活性激发剂时,其诱导激发期较短,1 d 的净浆抗压强度最高可达到 30 MPa 以上,但 1 d 后抗压强度的发展趋势逐渐放缓,后期强度略有倒缩;此时相关人员提出采用 Na_2SO_3 (水玻璃) 做矿渣胶凝材料活性激发剂,但其诱导期较长,随着养护龄期的增加抗压强度也随之提高,28 d 净浆的抗压强度最高可达 70 MPa;随着研究的深入,提出采用 Na_2O - Na_2SO_3 复合组分活性激发剂,其 28 d 抗压强度可达 58 MPa。

但是强碱激发矿渣活性的性能受到了一定的局限,就此,研究人员^[6-9]提出利用弱碱性激发剂作为激发矿渣胶凝材料,其中氧化钙(CaO)以其廉价易得、来源丰富等优点被广泛研究应用, CaO 溶于水后溶出游离的 Ca^{2+} 是水化结晶相 AFt 生成必备的离子,孔溶液中 Ca^{2+} 的增多势必会影响水泥水化生成的 Ca^{2+} ,因此提出采用硫酸盐类石膏激发矿渣活性^[10-12],游离的 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 以及活性 SiO_2 等的生成有利于强度发展的 AFt 水化结晶相,但矿渣在碱性较弱的环境下无法被激发出活性 SiO_2 ,采用 CaO - CaSO_4 复合胶凝激发剂,二者相互促进、相互发展,充分激发矿渣的活性从而提高复合胶凝体系的胶凝能力,提高强度^[9,13-14]。

上述研究表明,采用 NaOH 、水玻璃、 CaO 、氧化钙-石膏硫酸盐等激发剂,有效地激发了矿渣在复合胶凝材料体系中的矿渣活性,然而,目前关于碱激发矿渣胶凝材料的研究主要集中在宏观强度变化规律,且使用的激发剂分类不够系统,针对反应机理、水化产物种类以及水化产物微观结构的研究甚少。相较于钢渣的应用^[15-16],矿渣作为矿物掺合料水化或激发应用更为广泛,探究激发剂本身特性(掺量、种类、比例)对复合胶凝材料体系宏观强度、耐久性发

收稿日期:2022-03-03(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51178434);河南省自然科学基金资助项目(编号:182300410210)

作者简介:梅杨,男,硕士,副教授.E-mail:meiyang4321@163.com

展具有重要工程指导意义。基于此,就激发剂种类、掺量、比例开展三因素三水平试验,探究不同水平和因素下强度发展规律、pH值及初、终凝发展规律,综合微结构水化产物类型、形貌特征分析探究碱激发机理。

1 试验

1.1 试验原材料

普通硅酸盐水泥中掺加 5%~20% 活性矿物掺合料,为了减少活性矿物掺合料的影响,试验采用硅酸盐水泥,依据《混凝土外加剂》(GB 8076—2008)执行,矿渣微粉采用 S95 级矿粉,比表面积为 403 m²/kg,激发剂 Ca(OH)₂、Na₂SiO₃、Na₂SO₄、CaSO₄ 为分析纯化学试剂。

1.2 试验方法

1.2.1 开展正交试验

首先设计一个三因素三水平正交试验表见表 1。

表 1 试验考察的因素和水平

| 水平 | 因素 | | |
|----|---------|---|------|
| | 激发剂掺量/% | 激发剂类型 | 双掺比例 |
| 1 | 2 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄ | 1:1 |
| 2 | 4 | Ca(OH) ₂ +CaSO ₄ | 3:1 |
| 3 | 6 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SiO ₃ | 5:1 |

1.2.2 拌和物性能

依据表 2 将不同类型、掺量、比例的激发剂掺入矿渣-水泥复合胶凝材料净浆体中,净浆试模试件尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm,养护 24 h 后放入标准养护室至规定龄期,并与空白组试样做对比。按照《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2008)标准,采用水胶比为 0.5,矿渣掺量为 70% 等量取代水泥,制作净浆试块。激发剂 Ca(OH)₂、Na₂SiO₃、Na₂SO₄、CaSO₄ 双掺掺量分别为 2%、4%、6%,Ca(OH)₂ 与其他化学试剂之间的比例分别为 1:1、3:1 以及 5:1,以选出最佳组合。

1.2.3 微观试样制备

微观测试所用的硬化浆体试样均从强度试验后的断面试样中选取,先用无水乙醇中止水化,试验前将样品在 50 ℃ 的真空干燥箱中烘干至恒重,X-射线衍射(XRD)测试需要研磨成粉末,水化产物微观形貌分析选取颗粒状。

表 2 L₉(3⁴) 正交表试验安排

| 编号 | 激发剂掺量/% | 激发剂类型 | 双掺比例 |
|----|---------|---|------|
| 1 | 2 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄ | 1:1 |
| 2 | 2 | Ca(OH) ₂ +CaSO ₄ | 3:1 |
| 3 | 2 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SiO ₃ | 5:1 |
| 4 | 4 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄ | 3:1 |
| 5 | 4 | Ca(OH) ₂ +CaSO ₄ | 5:1 |
| 6 | 4 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SiO ₃ | 1:1 |
| 7 | 6 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄ | 5:1 |
| 8 | 6 | Ca(OH) ₂ +CaSO ₄ | 1:1 |
| 9 | 6 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SiO ₃ | 3:1 |

2 结果与分析

2.1 正交试验结果分析

对矿渣-水泥复合胶凝材料硬化强度中的激发剂因素和水平展开正交试验,以 7 d 的净浆抗压强度计算出极差和方差,结果见表 3。

表 3 L₉(3⁴) 正交分析的试验结果

| 编号 | 激发剂掺量/% | 激发剂类型 | 双掺比例 | 7 d 抗压强度 /MPa |
|--------------|---------|---|------|---------------|
| 1 | 2 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄ | 1:1 | 15.4 |
| 2 | 2 | Ca(OH) ₂ +CaSO ₄ | 3:1 | 16.7 |
| 3 | 2 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SiO ₃ | 5:1 | 17.2 |
| 4 | 4 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄ | 3:1 | 16.8 |
| 5 | 4 | Ca(OH) ₂ +CaSO ₄ | 5:1 | 17.0 |
| 6 | 4 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SiO ₃ | 1:1 | 18.2 |
| 7 | 6 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SO ₄ | 5:1 | 17.1 |
| 8 | 6 | Ca(OH) ₂ +CaSO ₄ | 1:1 | 16.3 |
| 9 | 6 | Ca(OH) ₂ +Na ₂ SiO ₃ | 3:1 | 16.8 |
| I / 1 水平总和 | 49.3 | 49.3 | 49.9 | — |
| II / 2 水平总和 | 52.0 | 50.0 | 50.3 | — |
| III / 3 水平总和 | 50.2 | 52.2 | 51.3 | — |
| I 平均值 | 16.4 | 16.4 | 16.6 | — |
| II 平均值 | 17.3 | 16.7 | 16.8 | — |
| III 平均值 | 16.7 | 17.4 | 17.1 | — |
| 极差 | 0.9 | 1.0 | 0.5 | — |

综合上述极差变化可得激发剂对复合胶凝材料硬化浆体强度的影响情况,激发剂类型对表 3 中复合胶凝材料硬化浆体强度的影响为 1.0,而激发剂双掺

比例的大小对复合胶凝材料硬化浆体强度的影响为0.5,可见激发剂类型水平比双掺比例水平更重要。由此可得:① 激发剂类型对复合胶凝材料硬化浆体强度影响最大,其次是掺量,再次是双掺比例;② 激发剂类型为 $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 时好,掺量为4%时好,双掺比例为5:1时7 d抗压强度最高;③ 碱激发下复合胶凝材料硬化浆体高强度的条件为激发剂类型为 $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、掺量为4%、双掺比例为5:1。这个条件在试验计划中没有出现,它是全部27种工艺里的一种。

2.2 强度分析

标准养护条件下矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体抗压强度随激发剂类型、掺量、双掺比例的变化如图1所示。

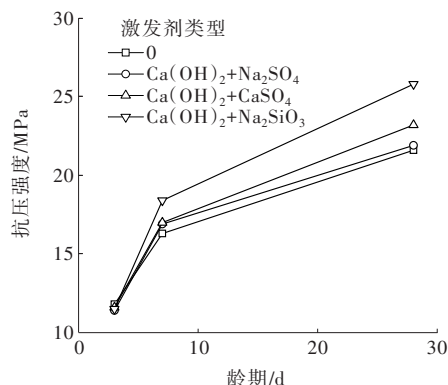
由图1可知:

(1) 龄期为3 d时,不同激发剂类型的矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度与空白组(矿渣掺量为70%,代号为0)相差甚微,7 d时不同激发剂类型 $[\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{CaSO}_4$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SiO}_3]$ 矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度均高于空白组,分别为空白组的103.68%、104.29%、112.88%,28 d时矿渣-水泥复合胶凝材料的发展趋势与7 d相同,分别为空白组强度的106.02%、107.41%、119.44%。

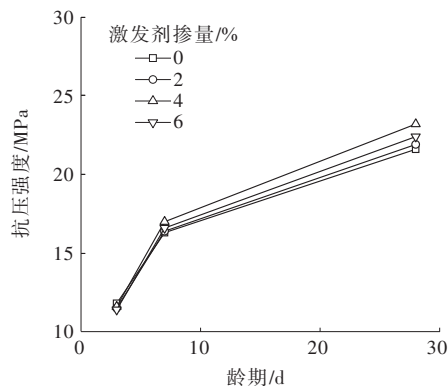
(2) 激发剂掺量为2%~4%时硬化浆体的强度随着掺量的增大而增高,当掺量超过4%时,硬化浆体强度随之下降,但仍高于空白组。龄期为3 d时不同掺量下矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度与空白组相差不大。当激发剂掺量为2%、4%、6%时,龄期为7 d时矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度分别为空白组的100.61%、104.29%、101.84%,龄期为28 d时分别为空白组的101.39%、107.41%、103.70%。

(3) 随着激发剂双掺比例的增加,硬化浆体强度随之增大,7 d后均高于空白组。当双掺比例为1:1、3:1、5:1时,龄期为7 d时矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度分别为空白组的101.23%、103.07%、104.29%;龄期为28 d时为空白组的101.85%、104.17%、107.41%。

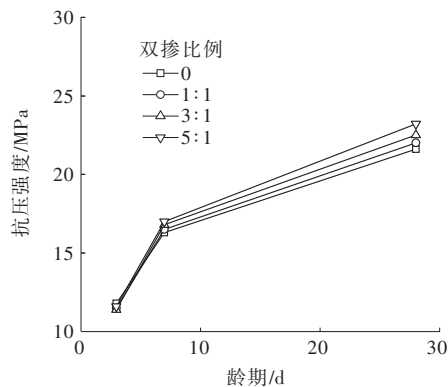
(4) 龄期为3 d时,矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度均与空白组相差不大,证明了早期激发剂



(a) 激发剂类型(激发剂掺量4%、双掺比例5:1)



(b) 激发剂掺量[激发剂 $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{CaSO}_4$, 双掺比例5:1]



(c) 双掺比例[激发剂 $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{CaSO}_4$, 掺量4%]

图1 矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体的抗压强度发展

的引入并未对矿渣-水泥复合胶凝材料中的矿渣起到激发作用,即矿渣并未生成水化产物。养护龄期为7 d时,在激发剂的作用下矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度均超过空白组,28 d强度发展与7 d相同。随养护龄期的增加,碱激发下矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度也逐渐增加,7 d后在碱激发的作用下活性较高的矿渣在复合组分中被激发生成大量的水化产物,龄期为28 d时水化结晶点(Aft)均高于空白组(见后文XRD分析图);其次,不同掺量的

激发剂对复合体系有较大的影响,激发剂掺量为2%~4%时硬化浆体的强度随着掺量的增大而增高,当掺量超过4%时,硬化浆体强度随之下降,但仍高于空白组,即生成的水化产物数量均高于空白组,28 d时碱激发剂作用下矿渣-水泥复合胶凝材料水化结晶点(AFt)明显高于空白组(见后文XRD分析图)。不同双掺比例下激发剂对矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度发展趋势均小于不同激发剂类型和不同掺量,微观形貌下其水化产物的网络状填充性较差,因此强度较低。

2.3 pH值与初凝、终凝分析

综合三因素三水平正交试验可得,激发剂类型对矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体的强度影响最大,因此开展激发剂类型对孔溶液pH值与浆体初、终凝影响的研究。激发剂掺量为4%、双掺比例为5:1时,不同激发剂类型下矿渣-水泥复合胶凝材料孔溶液pH值随龄期变化情况如图2所示。

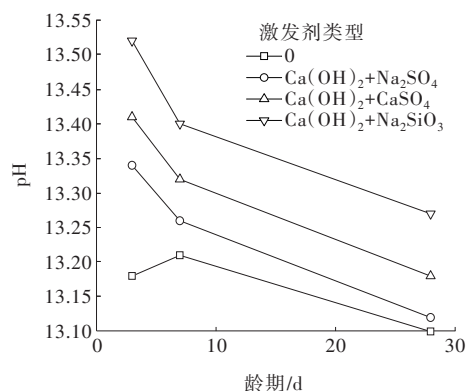


图2 不同激发剂类型下水泥-矿渣复合胶凝材料硬化浆体孔溶液pH值随龄期的变化

由图2可知:空白组28 d时孔溶液pH为13.10,同龄期下不同激发剂类型的复合胶凝材料体系孔溶液pH存在的关系为 $\text{pH}[\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SiO}_3] > \text{pH}[\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{CaSO}_4] > \text{pH}[\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SO}_4] > \text{pH}(0)$,龄期为28 d时复合胶凝材料孔溶液pH相差较小。龄期为3~7 d时掺加激发剂复合体系的pH发生了较大程度的衰减,即此时碱性较强的体系中矿渣的活性被激发,矿渣内部的玻璃体开始发生支解,水泥水化的主要产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 开始与支解后的水化产物发生反应,随着龄期的增长, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与矿渣支解的游离产物继续发生反应,孔溶液的pH值也随之下降,最终生成的水化产物数量均高于空白组(见XRD谱图)。

激发剂掺量为4%、双掺比例为5:1时不同类型激发剂作用下矿渣-水泥复合胶凝材料体系的初、终凝变化情况如表4所示。

表4 水泥-矿渣复合胶凝材料初、终凝时间

| 激发剂类型 | 初始时刻 | 初凝时刻 | 初凝时长/min | 终凝时刻 | 终凝时长/min |
|--|-------|-------|----------|-------|----------|
| 0 | 09:39 | 12:45 | 186 | 13:32 | 232 |
| $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SO}_4$ | 09:49 | 12:39 | 170 | 13:39 | 230 |
| $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{CaSO}_4$ | 10:00 | 12:43 | 163 | 13:45 | 225 |
| $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ | 10:15 | 12:54 | 159 | 13:55 | 220 |

由表4可知:激发剂的掺加缩短了复合体系浆体的初、终凝时间,结合上述孔溶液的pH值,孔溶液的pH值越高,缩短的时间越长, $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{CaSO}_4$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SO}_4$ 激发剂作用下复合胶凝材料浆体的初凝时长分别较空白组缩短了16 min、23 min、27 min,终凝时长分别缩短了2 min、7 min、12 min。激发剂对矿渣-水泥复合胶凝材料体系有良好的促凝效果,激发剂中含有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,补充了早期水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成量达到一定值时,复合浆体开始发生初、终凝。

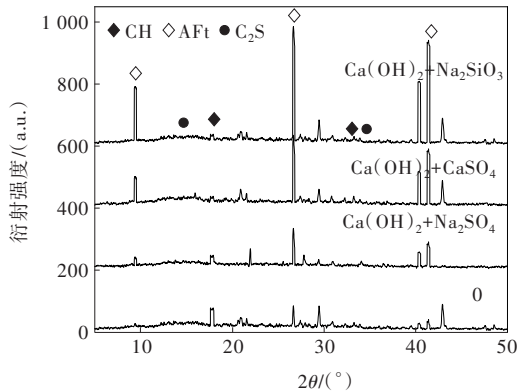
2.4 XRD分析

不同激发剂类型、掺量下矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体28 d XRD谱图变化如图3所示。

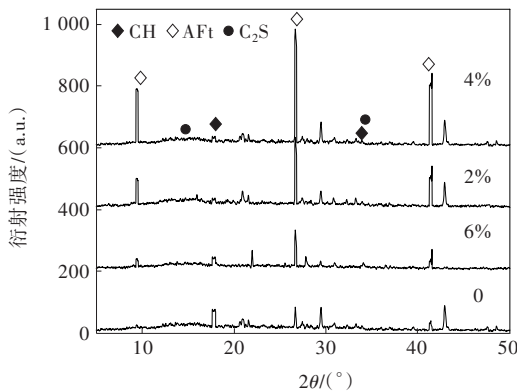
由图3可知:

(1) 不同类型激发剂下复合胶凝材料AFt水化结晶相差异较大,激发剂作用下复合胶凝材料AFt水化结晶相的变化趋势为: $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SiO}_3 > \text{Ca}(\text{OH})_2+\text{CaSO}_4 > \text{Ca}(\text{OH})_2+\text{Na}_2\text{SO}_4 > 0$,AFt水化结晶相与CH水化结晶相呈现此消彼长的趋势,空白组的CH结晶相衍射峰值最高,AFt水化结晶相的相对衍射峰值最低,激发剂组的AFt水化结晶相衍射峰值均高于空白组,即激发剂中AFt水化结晶相不只来自水泥水化,同时伴随矿渣微粉火山灰特性,水泥水化溶液呈碱性,矿渣微粉中活性 SiO_2 与 Al_2O_3 发生反应生成AFt水化结晶相。

(2) 不同激发剂掺量下,掺量为4%时复合胶凝材料硬化浆体AFt水化结晶相的数量最多,CH水化结晶相最少,水化结晶相来自水泥水化中CH结晶相与矿渣的火山灰效应,水泥水化孔溶液呈碱性,而火山灰效应的发生得益于碱性环境,但随着碱性环境的增加,当激发剂掺量为6%时,复合体系中孔溶



(a) 激发剂类型(激发剂掺量4%、双掺比例5:1)



(b) 激发剂掺量[激发剂 Ca(OH)₂+CaSO₄ 双掺比例5:1]

图3 28 d矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体XRD谱图

液的pH达到最大值,新生成的水化结晶相在此环境下不足以保持原有水化结晶相数量,水化结晶相发

生一定程度的解离,最后导致水化结晶减少。

2.5 SEM分析

龄期为28 d时空白组的微观形貌如图4所示。

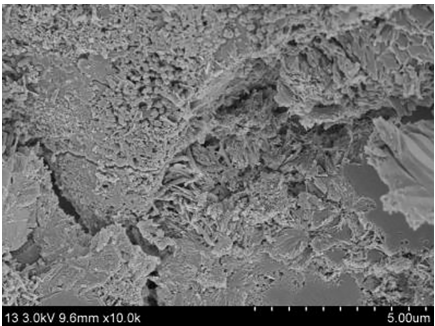
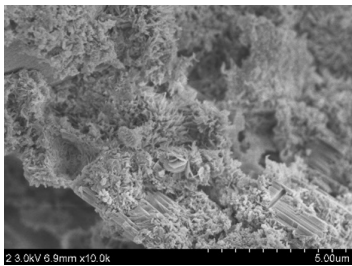


图4 空白组硬化浆体28 d微观形貌

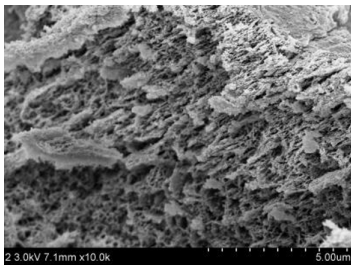
由图4可知:硬化浆体中水化产物的晶相尺寸较大且出现严重的沟壑,水化结晶相排布疏松。不同激发剂类型与掺量下矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体28 d微观形貌如图5、6所示。

由图5、6可知:

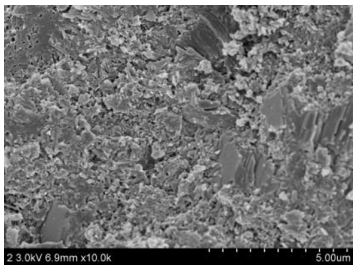
(1) 采用激发剂 Ca(OH)₂+Na₂SO₄时28 d硬化浆体的微结构断面分布较大尺寸的孔洞,整体密实程度较低;采用激发剂 Ca(OH)₂+CaSO₄时28 d硬化浆体的结晶相尺寸比采用激发剂 Ca(OH)₂+Na₂SO₄时小,晶相排布密实程度较高;而采用激发剂 Ca(OH)₂+Na₂SiO₃时,硬化浆体的微结构晶相尺寸更小,排布规律,密实程度最高。



(a) Ca(OH)₂+Na₂SO₄

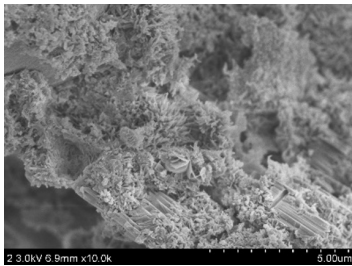


(b) Ca(OH)₂+CaSO₄

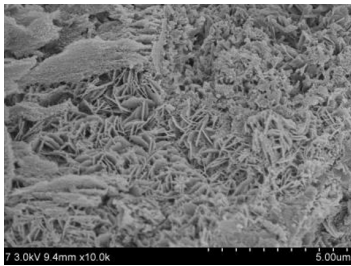


(c) Ca(OH)₂+Na₂SiO₃

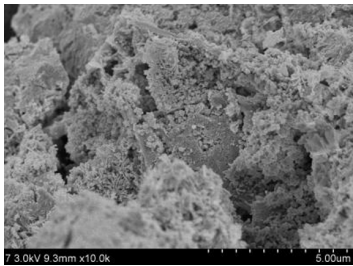
图5 不同激发剂类型下矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体28 d微观形貌(激发剂掺量4%、双掺比例5:1)



(a) 激发剂掺量2%



(b) 激发剂掺量4%



(c) 激发剂掺量6%

图6 不同激发剂掺量下矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体28 d微观形貌[激发剂 Ca(OH)₂+CaSO₄、双掺比例5:1]

(2) 激发剂掺量为 2% 时 28 d 硬化浆体的晶相尺寸相对较大,且排布疏松;掺量为 4% 时 28 d 硬化浆体的晶相尺寸较小,且呈有序紧密排布状态;掺量为 6% 时 28 d 硬化浆体的微结构断面中出现不同尺寸的“坑洞”“沟壑”,结晶相排布疏松。

综合上述微观结果,究其原因可归结为^[17]:激发剂作用于复合胶凝材料中,一方面引入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,结合水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 使复合胶凝材料浆体孔溶液的碱性提高,在较强的碱性环境下矿渣的玻璃体表面活性部位 $\text{Ca}-\text{O}$ 、 $\text{Mg}-\text{O}$ 键处发生反应,形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,使矿渣微粉表面被破坏形成通道, OH^- 随着通道进入玻璃体的内部,促进矿渣微粉水化,同时矿渣微粉-水泥基体中 Na^+ 、 K^+ 或者其他碱金属离子与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进行替换,形成强碱 NaOH ,在强碱 NaOH 作用下进一步破坏 $\text{Si}-\text{O}$ 和 $\text{Al}-\text{O}$ 键,随着反应的持续,通道越来越来也大,矿渣微粉内部玻璃体相逐渐被溶解;另一方面,增加了复合胶凝材料中游离的 SO_4^{2-} 、 SiO_3^{2-} ,孔溶液中较多的游离电子增加了离子间的相互碰撞,最终孔溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与游离的活性 $\text{Si}-\text{O}$ 和 SO_4^{2-} 反应生成有利于强度发展的 $\text{C}-\text{S}-\text{H}$ 凝胶、 AFt 。

3 结 论

(1) 激发剂类型对复合胶凝材料硬化浆体强度影响最大,其次是掺量,再次是双掺比例。

(2) 矿渣-水泥复合胶凝材料高强度的条件是激发剂类型为 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、掺量为 4%、双掺比例为 5:1。

(3) 宏观结果表明:龄期为 3 d 时,激发剂作用下矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体强度与空白组相差较小;随着龄期的增加,7 d 后激发剂作用下复合胶凝材料硬化浆体强度均超过空白组,此外,龄期为 28 d 时矿渣-水泥复合胶凝材料硬化浆体的水化结晶相较空白组增多,且排列紧密,结构整体较空白组更加致密。

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):739-742,767.
- [2] 杨记芳.矿渣粉对混凝土强度的影响[J].山西交通科技,2012(2):10-12,29.
- [3] GEBREGZIABIHER B S, THOMAS R, PEETHAMPARAN S. Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 55: 91-102.
- [4] RASHAD A M, ZEEDAN S R, HASSAN A A. Influence of the activator concentration of sodium silicate on the thermal properties of alkali-activated slag pastes[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 811-820.
- [5] 何晶,何建新.利用碱激发矿渣粉制备的土体固化剂的力学性能研究[J].新疆农业大学学报,2016,39(5):414-418.
- [6] 高会杰,侯吉瑞,岳湘安,等.氧化钙激活水淬高炉矿渣的实验研究[J].油田化学,2005,22(2):111-114,125.
- [7] 韩静云,宋旭艳,邵志海.锰渣- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - H_2O 体系火山灰反应程度研究[J].混凝土,2010(7):34-36.
- [8] 李浩,邢军,赵英良,等.高炉矿渣制备新型胶凝材料的试验研究[J].有色金属(矿山部分),2016,68(6):52-54,61.
- [9] 孔祥文,王丹,隋智通.矿渣胶凝材料的活化机理及高效激发剂[J].中国资源综合利用,2004,22(6):22-26.
- [10] 刘仁越,王珊,张同生,等.消石灰、无水石膏与石灰石粉对矿渣水泥性能的影响[J].水泥,2009(8):4-6.
- [11] 丁铸,王淑平,张鸣,等.硫酸盐对矿渣在硅酸盐水泥中水化活性的激发作用[J].中国科技信息,2008(18):69-71.
- [12] 王复生,尹研.弱碱激发矿渣胶凝材料的研究[J].中国水泥,2006(6):49-51.
- [13] 黎良元,石宗利,艾永平.石膏-矿渣胶凝材料的碱性激发作用[J].硅酸盐学报,2008,36(3):405-410.
- [14] 郝伟.钢渣-粉煤灰复合胶凝材料制备技术及其应用[D].青岛:中国海洋大学,2015.
- [15] 毛志刚,蓝天助,张红日,等.钢渣特性及在道路工程中的应用研究[J].中外公路,2019,39(5):233-236.
- [16] 徐晓云.钢渣稳定土的干缩性能研究[J].中外公路,2018,38(4):319-322.
- [17] 吴蓬,吕宪俊,胡术刚,等.粒化高炉矿渣胶凝性能活化研究进展[J].金属矿山,2012(10):157-161.