

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.03.021

# 石膏与硅灰对钢渣水泥基胶凝材料复合改性效应

杜君, 刘家祥

(北京化工大学 化工资源有效利用国家重点实验室; 材料科学与工程学院 北京 100029)

**摘要:**以钢渣和水泥为主要原料,加入少量石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )与硅灰,制备钢渣水泥基胶凝材料。探讨了  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  与硅灰掺量对钢渣水泥基胶凝材料强度的影响,并通过 XRD、SEM 表征,研究钢渣水泥基胶凝材料的水化性能。结果表明:复掺 1%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和 4% 硅灰的钢渣水泥基胶凝材料 3 d 抗压强度较未掺  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  与硅灰提高了 59.0%, 28 d 抗压强度提高了 32.4%;  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  与硅灰的加入不会影响钢渣水泥基胶凝材料水化产物种类; 相同龄期内,加入  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  与硅灰的钢渣水泥基胶凝材料中水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和钙矾石(Aft)含量增多,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体含量、晶体尺寸有所减小。

**关键词:**钢渣; 钢渣胶凝材料; 石膏; 硅灰; 水化反应

**中图分类号:** TU528      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2013)03-0131-06

## Compound Effect of Dihydrate Gypsum and Silica Fume on Strength of Steel Slag-Cement Binding Materials

Du Jun, Liu Jiexiang

(The State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering; College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, P. R. China)

**Abstract:** By adding small amount of dihydrate gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and silica fume in steel slag-cement system, steel slag-cement binding materials were prepared. And the dosage of  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and silica fume on the properties of steel slag-cement binding materials was studied. Hydration properties and paste structure were investigated by SEM and XRD. The results show that both  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and silica fume can improve the strength of steel slag-cement binding materials. Compared with single-doped, compound of  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and silica fume has much better effect on strength of steel slag-cement binding materials. The optimum proportion of  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and silica fume are 1% and 4%, respectively. The 3 d compressive strength is increased by 59.0%, and the 28 d compressive strength is increased by 36.5%. No matter adding  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and silica fume or not, the steel slag-cement binding materials have the same hydration products. However, the content of C-S-H gel and Aft crystals is higher, and the content of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  crystals is lower in steel slag-cement binding materials containing  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and silica fume than those in steel slag-cement binding materials without  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and silica fume.

**Key words:** steel slag; steel slag binding materials; dihydrate gypsum; silica fume; hydration

钢渣是炼钢时生成的副产物,为钢产量的 15%~20%(质量分数,本文涉及化学组成,掺量等均为质量分数);2010 年中国粗钢产量超过 6 亿 t,约占全球产量 1/2,因此副产物钢渣的产量约有 1 亿 t<sup>[1-2]</sup>。钢渣

收稿日期:2012-11-25

基金项目:国家自然科学基金(51174011)

作者简介:杜君(1986-),男,博士生,主要从事钢渣利用研究,(E-mail)dujun268268@163.com。

刘家祥(通信作者),男,教授,博士生导师,主要从事固废利用、粉体分级等研究,(E-mail)ljxpost@263.net。

不仅占用土地,对渣场周围环境造成严重污染,同时还会造成资源的浪费。

钢渣作水泥活性掺和料是实现这一工业废渣资源化的途径之一。钢渣替代 10% 左右水泥时,对混凝土工作性能和强度有改善作用<sup>[3-4]</sup>,但是当钢渣替代 30% 水泥时,混凝土各龄期强度会有大幅度的降低<sup>[5-6]</sup>。因此,为了提高钢渣在水泥中的掺量,必须提高大掺量钢渣水泥基胶凝材料(钢渣掺量不小于 30% 时,认为是大掺量)的活性。

Lubica 等<sup>[7]</sup>和 Kumar 等<sup>[8]</sup>通过物理粉磨来提高钢渣活性,发现钢渣活性随比表面积增大而增大。李建新等<sup>[9]</sup>和秦力川等<sup>[10]</sup>对钢渣进行高温重构,重构钢渣 28 d 强度有大幅度提高,但 3 d 强度提高不大。Tossavainen 等<sup>[11]</sup>研究了高温冷却机制对钢渣性能的影响,发现钢渣的活性随着冷却速度的增大而增大。王强等<sup>[12]</sup>对磨细钢渣进行筛分,将钢渣中易磨组分和水泥以 20% : 80% 的比例进行胶砂试验,其 28 d 抗压强度可达到纯水泥的 93%,但是 3 d 强度较低。林宗寿等<sup>[13]</sup>通过添加水玻璃来提高钢渣水泥基胶凝材料强度;罗珣等<sup>[14]</sup>利用硫酸盐、碱对大掺量钢渣水泥基胶凝材料进行活性激发,钢渣水泥基胶凝材料早期强度增加,但是后期强度有不同程度的降低。李东旭提出钠钙硫复合活化钢渣的方法<sup>[15]</sup>,激发剂可生成 NaOH,提高水化环境碱度,促进钢渣水化反应。

物理粉磨和高温重构对钢渣活性的改善很有限,而碱性激发不利于水化产物的聚合,并且高浓度 Na<sup>+</sup> 会引起泛碱,影响钢渣水泥基胶凝材料后期强度。本文钢渣以 30% 比例替代水泥,复合加入适量 CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 和硅灰,使大掺量钢渣水泥基胶凝材料早期和后期强度均有大幅度增加,满足 42.5 复合水泥强度要求;同时通过对水化产物种类、硬化浆体显微形貌分析,揭示 CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 和硅灰复合改性的机理。

## 1 实验原材料以及方法

### 1.1 实验原材料

钢渣:山东日照钢铁厂转炉钢渣,其冷却机制采用热闷处理,由表 1 知,钢渣的主要化学成分为氧化硅、氧化钙和铁的氧化物,其总量约占钢渣的 80% 左右,本实验采用的钢渣和中国钢渣的平均水平相当,有一定的代表性。

水泥:基准水泥,主要化学成分见表 1。

硅灰:粒径小于 1 μm 占 80% 以上,平均粒径为 0.1~0.3 μm,比表面积:20 000~28 000 m<sup>2</sup>/kg,化

学成分见表 1。

标砂:厦门艾思欧标准砂有限公司生产。

水:普通自来水。

CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 为分析纯。

表 1 原料的化学成分分析

化学成分	日照热闷钢渣/%	中国钢渣平均水平 <sup>[16]</sup> /%	基准水泥/%	硅灰/%
SiO <sub>2</sub>	11.24	10~15	21.18	96.60
CaO	41.92	40~50	63.42	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.92	1~5	5.02	0.41
MgO	8.24	约 12	4.32	0.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.84	3.14	0.49	
FeO	7.44	约 24		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.31	约 8		

### 1.2 实验方法:

用颚式破碎机将钢渣破碎至 5 mm 以下,除铁后磨细至比表面积 450~500 m<sup>2</sup>/kg<sup>[17]</sup>,取钢渣微粉进行胶砂试验。测得磨细钢渣比表面积 475 m<sup>2</sup>/kg,密度 3.47 g/cm<sup>3</sup>,满足 GB/T 20491—2006 标准。砂浆尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm,钢渣和水泥的配比为 3 : 7,水胶比 0.5,胶砂比 1 : 3,养护温度(20±1)℃,相对湿度不低于 95%。将加入 CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 和硅灰的胶砂养护到 3、7、28 d,测试不同龄期胶砂强度,并控制 CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O 和硅灰的总加入量不超过 5%。

水化机理研究采用净浆试验,水胶比 0.3,钢渣和水泥配比 3 : 7,到规定养护时间后将试块敲碎,并用酒精浸泡以终止水化。净浆水化产物物相用日本理学 Rigaku/max-2500VB 型 X 射线衍射仪测试;浆体微观形貌用 HITACHI S-4700 型扫描电子显微镜观察。

## 2 结果与分析

### 2.1 日照热闷钢渣矿物组成

钢渣物相如图 1 所示。主要矿物成分有 3CaO · SiO<sub>2</sub>、2CaO · SiO<sub>2</sub>、Ca · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、4CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、RO 相(CaO—FeO—MnO—MgO 固溶体),与文献[18-20]所述一致,这些成分与水泥类似,因此钢渣是具有水硬性的材料。但是由于钢渣在高于 1 600 °C 下烧成,冷却速度慢,C<sub>3</sub>S 在 1 250 °C 下发生分解,β-C<sub>2</sub>S 在 500 °C 下转变为 γ-C<sub>2</sub>S,而 γ-C<sub>2</sub>S 几乎没有水硬胶凝性,所以钢渣中活性 C<sub>3</sub>S 和 β-C<sub>2</sub>S 含量远低于水泥,只能作为一种低活性水泥掺和料。

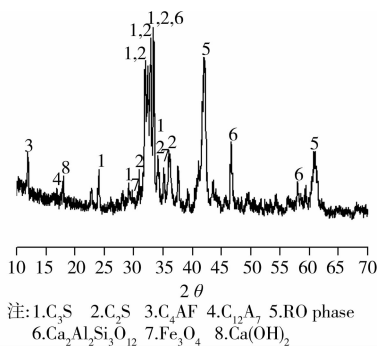
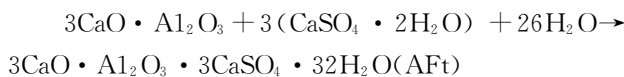


图1 日照钢渣 XRD 图谱

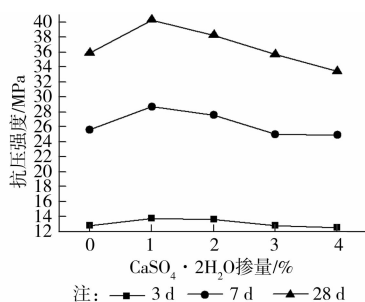
## 2.2 单掺 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 对钢渣水泥基胶凝材料强度的影响

实验中钢渣水泥基胶凝材料抗折强度的变化趋势与抗压强度相同,故只对抗压强度作系统描述。

由图2可以看出,在钢渣水泥基胶凝材料中掺加适量  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  可以增加各龄期强度,最佳掺量为1%。 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  提高钢渣水泥基胶凝材料强度的机理:



钢渣和水泥中均含有铝酸盐,在水泥基胶凝材料中,早期水化速度最快的是铝酸盐,加入的  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  与钢渣水泥基胶凝材料中的  $\text{C}_3\text{A}$  生成一定数量钙矾石(AFt),使浆体强度增加;但是当  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  掺量超过1%时,AFt 数量过多,而浆体中并未产生足量的 C—S—H 凝胶连接包覆这些 AFt,因此强度不再增加,反而有降低的趋势。

图2  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  掺量对钢渣水泥基胶凝材料抗压强度的影响

## 2.3 单掺硅灰对钢渣水泥基胶凝材料强度的影响

由图3示,硅灰的加入对钢渣水泥基胶凝材料各龄期强度均有提高作用,并随着硅灰掺量增加,强度不断提高。硅灰的粒径在数值上比钢渣和水泥的粒径小两个数量级,颗粒相对粒径的大小显著影响体系的堆积密度,颗粒粒径越小,体系物理填充效应就越好<sup>[21]</sup>,因此硅灰对钢渣水泥基胶凝材料有微集

料填充作用。

王强等<sup>[22]</sup>通过研究纯钢渣水化过程,认为钢渣虽然水化速度慢,但是其水化过程与硅酸盐水泥相似,水化产物中含有相当量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。硅灰加入体系后与水接触,溶液中富  $\text{SiO}_2$  贫钙的凝胶在硅灰粒子表面形成附着层,经过一定时间后,富  $\text{SiO}_2$  和贫钙凝胶附着层开始溶解和钢渣水泥基胶凝材料水化产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成 C—S—H 凝胶<sup>[23]</sup>,使得掺硅灰钢渣水泥基胶凝材料后期强度提高幅度更大。

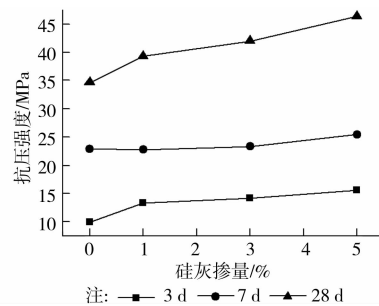


图3 硅灰掺量对钢渣水泥基胶凝材料强度的影响

## 2.4 复掺 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和硅灰对钢渣水泥基胶凝材料强度的影响

从2.2和2.3中可知单掺1%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和4% 硅灰可以提高钢渣水泥基胶凝材料强度,因此将二者复合加入钢渣水泥基胶凝材料中,考察复合作用;并与基准水泥(PO)、未掺  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和硅灰的钢渣水泥基胶凝材料(PC)对比,见图4。

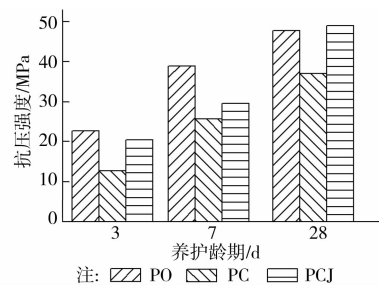


图4 3种胶凝材料强度对比

掺入  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和硅灰的钢渣水泥基胶凝材料(PCJ)水化3 d 抗压强度较 PC 提高 59.0%, 28 d 提高 32.4%; PCJ 3 d 抗压强度与 PO 比较接近,达到 20.3 MPa, 28 d 的抗压强度达到 49.0 MPa, 超过 PO 1.4 MPa; 同时也应该看到 PC、PCJ 与 PO 相比, 7 d 抗压强度相差较大, 说明钢渣水泥基胶凝材料与 PO 相比, 浆体强度发展相对缓慢。

## 2.5 复掺 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和硅灰的钢渣水泥基胶凝材料水化机理

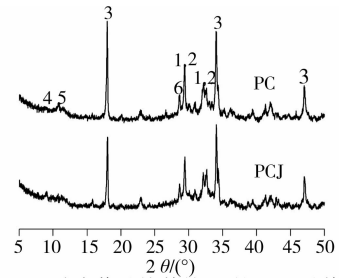
由图5(a)、(b)可以看出, PCJ 与 PC 的水化产

物是一样的,3 d 龄期 PCJ 中 AFt 峰值比 PC 的大,28 d 龄期 PCJ 中单硫型水化硫铝酸钙(AFm)峰值小于 PC 中 AFm 峰值,说明  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  在水化早期与铝酸盐反应形成强度高的 AFt,并阻碍水化后期 AFt 发生分解。

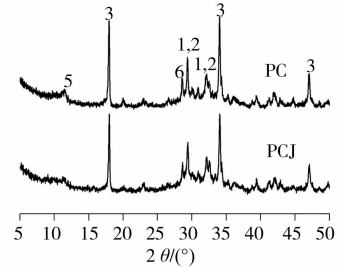
同龄期 PCJ 中  $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  峰值均低于 PC 中,根据化学平衡,硅灰和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的火山灰效应不但使体系生成了更多的 C-S-H 凝胶,而且加速了  $\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$  水化反应;胶凝材料中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的消耗也可以促进钢渣中游离氧化钙的反应,改善钢渣水泥基胶凝材料的安定性。

由图 6(a)可以看出 PC 硬化浆体中有大孔和明显未水化的大颗粒出现,影响浆体早期强度。图 6(a)与 6(b)对比,PCJ 浆体结构更加密实,钢渣和水泥颗粒水化程度高;图 6(c)中细小硅灰颗粒在浆体孔隙中填充,并富集在  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体附近,A 区域已有部分硅灰颗粒与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体反应生成了 C-S-H 凝胶,改善了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体与 C-S-H 凝胶的

界面结构,同时减小  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体尺寸。



(a) 2种净浆试块养护3 d的XRD图谱



(b) 2种净浆试块养护28 d的XRD图谱

1:  $\text{C}_3\text{S}$  2:  $\text{C}_2\text{S}$  3:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  4: AFt 5: AFm 6:  $\text{CaCO}_3$

图 5 钢渣胶凝材料水化产物 XRD 图谱

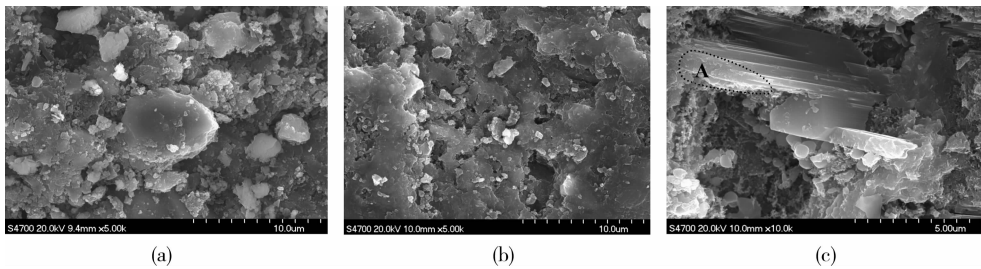


图 6 净浆试样水化 3 d 形貌

图 7(a)中区域 B 所示,28 d PC 浆体中钢渣颗粒表面附着水化层,但其颗粒边界还清晰可见;PCJ 浆体中钢渣颗粒水化较为彻底,颗粒边界已不明显,

钢渣颗粒基本被水化胶凝物质全部包覆图 7(c)示。

图 7(b)浆体中出现一条深裂纹,裂纹周围是层片状 AFm 晶体。在养护后期水分充足的条件下,

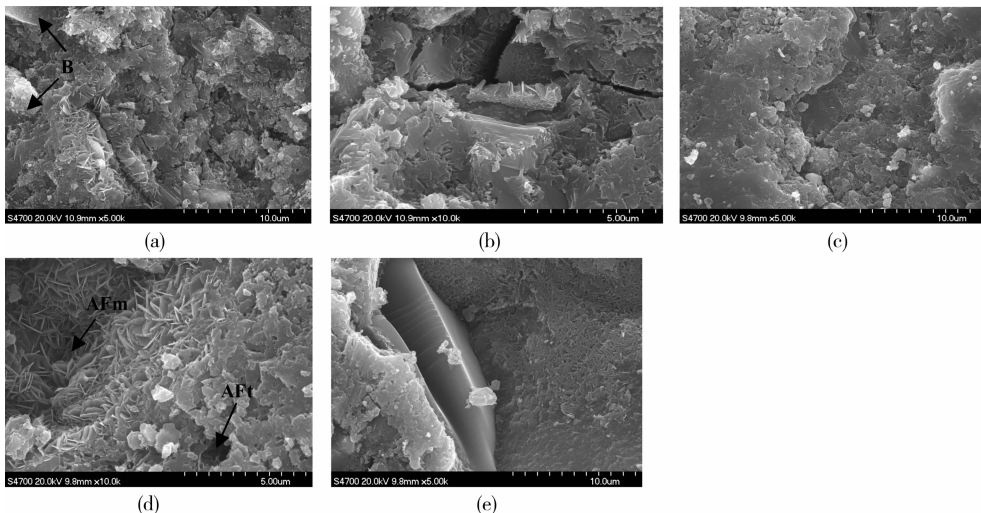


图 7 净浆试样水化 28 d 形貌

AFm 遇到  $\text{SO}_4^{2-}$  反应生成 AFt, 结构水增加, 密度减小, 体积发生膨胀, PC 浆体强度发展相对缓慢, 对 AFt 生长的膨胀应力约束有限, 导致浆体内部出现裂纹, 这也是 PC 后期强度低的主要原因之一。PCJ 中  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  的掺入可以减少早期浆体中 AFm 的数量, 进而减小水化后期 AFt 生成量; 硅灰的掺入, 加速浆体水化反应, 增加 C-S-H 凝胶量; 两者协同作用使浆体强度发展与 AFt 生长协调进行, 浆体的抗拉强度大于 AFt 产生的膨胀应力, 阻止膨胀开裂<sup>[24]</sup>, 如图 7(d) 所示, AFm 与周围水化产物紧密连结, 没有裂纹; 同时浆体孔隙中看到有细小针状 AFt 填充, 增加浆体密实度, 提高整体强度。

由图 7(e) 可看出, 加入复合改性剂的钢渣水泥基胶凝材料中, 存在几乎不发生水化的光滑大颗粒, 属于钢渣中的惰性组分, 文献<sup>[22]</sup> 也有涉及, 这种大颗粒与周围水化产物连接不紧密, 是钢渣水泥基胶凝材料中的有害组分。

## 4 结 论

采取宏观力学性能测试和微观检测相结合的方法对石膏和硅灰复掺, 提高钢渣水泥基胶凝材料机理进行了研究, 并得出了以下结论:

1) 钢渣水泥基胶凝材料中, 适量  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  加入可以增加 AFt 含量, 从而增加浆体强度,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  最佳掺量是 1%; 硅灰细集料填充作用和火山灰反应可以增加浆体强度, 并随硅灰掺量增加强度不断增加。

2)  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和硅灰复合改性作用, 使钢渣胶凝材料前期和后期强度均有大幅提高, 其组成为:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  1%、硅灰 4%。

3)  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和硅灰对钢渣水泥基胶凝材料水化产物种类没有影响, 水化产物为 C-S-H 凝胶、AFt、AFm 和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体; 与 PC 相比, PCJ 中 C-S-H 凝胶、AFt 晶体生成量增多,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体生成量和晶体尺寸减小, 各水化产物具有良好的匹配, 形成坚强、密实的水泥石。

4) 钢渣中的惰性组分几乎不发生水化反应, 与周围水化产物连接不紧密, 属于钢渣水泥基复合材料中的有害组分。

### 参考文献:

[1] 董保澍. 我国固体废弃物现状和处理对策[J]. 中国环保产业, 2001(5): 20-21.  
Dong B S. The current situation and treatment

countermeasure of industry solid wastes in China [J]. China Environmental Protection Industry, 2001(5): 20-21.

[2] 朱桂林, 孙树衫. 应加快钢铁渣资源化利用[J]. 中国钢铁业, 2007(1): 23-27.

Zhu G L, Sun S S. The resource utilization of steel slag [J]. China Steel, 2007(1): 23-27.

[3] Tsakiridis P E, Papadimitriou G D, Tsivilis S, et al. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 805-811.

[4] Ahmad M, Masoud K A. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7): 1373-1377.

[5] 李云峰, 王玲, 林晖. 掺钢渣粉混凝土工作性和力学性能研究[J]. 混凝土, 2008(9): 38-40.

Li Y F, Wang L, Lin H. Workability and mechanical properties of concrete with steel slag power [J]. Concrete, 2008(9): 38-40.

[6] 孙家瑛. 磨细钢渣对混凝土力学性能及安定性影响研究[J]. 粉煤灰, 2003(5): 7-9.

Sun J Y. Study on effects of ground steel slag on mechanical performance and soundness of concrete [J]. Coal Ash China, 2003(5): 7-9.

[7] Lubica K A, Yiannis P A, Ozlem Z C, et al. Effect of mechanical activation on the hydraulic properties of stainless steel slags [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(6): 778-788.

[8] Kumar S, Kumar R, Bandopadhyay A, et al. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of Portland slag cement [J]. Cement Concrete Composite, 2008, 30(8): 679-685.

[9] Li J X, Yu Q J, Wei J X, et al. Structural characteristics and hydration kinetics of modified steel slag [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3): 324-329.

[10] 秦力川, 杨涛. 钢渣彩色水泥熟料低温烧成及其性能研究[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1991, 13(1): 59-71.

Qin L C, Yan T. Study on the low temperature calcination the behaviour of steel slag color clinker cement [J]. Journal of Chongqing Institute of Architecture and Engineering, 1991, 13(1): 59-71.

[11] Tossavainen M, Engstrom F, Yang Q, et al. Characteristics of steel slag under different cooling conditions [J]. Waste Management, 2007, 27(10): 1335-1344.

[12] Wang Q, Yan P Y, Feng J W. A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral compositions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2): 1070-1075.

- [13] 林宗寿,陶海征,涂成厚,等. 钢渣粉煤灰活化方法研究 [J]. 武汉理工大学学报,2001,23(2):4-7.  
Lin Z S, Tao H Z, Xu C H, et al. Research for Increasing the activation of steel slag and fly ash [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2001,23(2):4-7.
- [14] 罗珣,刘家祥,王博,等. 不同无机早强剂对钢渣胶凝材料早期强度的影响[J]. 粉煤灰综合利用,2010(5):36-39.  
Luo X, Liu J X, Wang B, et al. Effect of different inorganic accelerators on early strength of steel slag cementitious materials [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization,2010(5):36-39.
- [15] 李东旭. 利用工业废渣研制少熟料高标号复合水泥[J]. 新型建筑材料,2000(11):8-10.  
Li D X. To develop few clinker high grade compound cement with utilization of industrial waste residue [J]. New Building Materials,2000(11):8-10.
- [16] 陈益民,许仲梓. 高性能水泥制备和应用的科学基础 [M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [17] 彭艳周,陈凯,胡曙光. 钢渣粉颗粒特征对活性粉末混凝土强度的影响[J]. 建筑材料学报,2011,14(4):541-545.  
Peng Y Z, Chen K, Hu S G. Influence of the characteristics of steel slag powder particle on compressive strength of reactive powder concrete [J]. Journal of Building Materials,2011,14(4):541-545.
- [18] Kourounis S, Tsivili S, Tsakiridis P E, et al. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag [J]. Cement and Concrete Research,2007,37(6):815-822.
- [19] Shi C J. Steel slag-Its production, processing, characteristics, and cementitious properties [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2004,16(4):230-236.
- [20] Wang G. Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate [J]. Construction and Building Materials,2010,24(10):1961-1966.
- [21] 龙广成,王新友,肖瑞敏. 矿物细掺料对  $C_3S$  胶凝体系的填充密实效应研究[J]. 建筑材料学报,2002,5(3):215-219.  
Long G C, Wang X Y, Xiao R M. Research of filling role of mineral blends in  $C_3S$  cementitious system [J]. Journal of Building Materials,2002,5(3):215-219.
- [22] Wang Q, Yan P Y. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag [J]. Construction and Building Materials,2010,24(7):1134-1140.
- [23] Duval R, Kadri E H. Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Research,1998,28(4):533-547.
- [24] 严培渝,杨文言. 模拟大体积混凝土条件下生成的钙矾石的形态[J]. 建筑材料学报,2001,4(1):39-43.  
Yan P Y, Yang W Y. Microstructure of ettringite formed under the simulated condition of the core of massive concrete [J]. Journal of Building Materials,2001,4(1):39-43.

(编辑 王秀玲)