



钢渣在复合胶凝材料的水化过程中对水泥水化的影响

王强, 阎培渝*, 韩松

清华大学土木工程系, 北京 100084

* E-mail: yanpy@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2010-08-08; 接受日期: 2010-11-08

北京市自然科学基金重大项目(批准号: 8100001)和国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2009CB623106)资助项目

摘要 通过对胶凝材料水化放热特性、水化产物的种类和水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量的测定, 研究了钢渣在复合胶凝材料的水化过程中对水泥水化的影响. 结果表明: 在复合胶凝材料的水化过程中, 水泥和钢渣只是通过改变彼此的水化环境而影响彼此的水化, 钢渣并不发生类似于火山灰反应的二次水化反应; 水泥-钢渣复合胶凝材料的水化诱导期比水泥的长, 且复合胶凝材料的水化诱导期随着钢渣掺量的增大而延长; 钢渣对水泥的早期水化有延缓的作用, 而且钢渣的掺量越大, 延缓作用越明显; 钢渣对水泥的后期水化有促进作用, 且钢渣掺量越大, 龄期越长, 促进作用越明显.

关键词

钢渣
水泥
复合胶凝材料
水化

1 概述

钢渣是炼钢过程中产生的废渣, 其排放量约为钢产量的 15%^[1]. 美国的钢渣基本上实现了排用平衡^[2], 欧洲的大部分钢渣也已得到了高效的利用^[3]. 相对而言, 我国的钢渣利用率很低, 低于 45%^[4]. 目前我国堆放的钢渣已达 3 亿吨以上, 而且仍以每年几千万吨的排放量递增, 堆放的钢渣既占用了大量的土地, 又污染环境. 目前钢渣主要是作为填料用于土木工程中, 也有部分钢渣作为骨料应用于沥青路面和混凝土工程中^[5~7]. 与普通的骨料相比, 钢渣具有一定的活性, 因而将钢渣作为骨料应用于沥青混凝土中或水泥混凝土中时, 对混凝土的力学性能和耐久性都有一定的改善^[8~11]. 少量的钢渣也被用于生产砖, 在一定程度上能改善砖的性能^[12]. 也有少量的钢渣

在工业上做中和剂和除杂剂使用^[13~15].

钢渣的主要化学成分包括: CaO 45%~60%, SiO_2 10%~15%, Al_2O_3 1%~5%, F_2O_3 3%~9%, MgO 3%~13%, FeO 7%~20%, P_2O_5 1%~4%^[16]. 与水泥相比, 钢渣中的钙、硅含量低, 但铁、镁含量高. Mason^[17]提出用钢渣化学组成计算得到的碱度值(用 M 表示)来评价钢渣的活性, 定义钢渣碱度 $M = w(\text{CaO})/[w(\text{SiO}_2) + w(\text{P}_2\text{O}_5)]$. 我国对钢渣碱度的定义都采用了 Mason 的方法, 而且按碱度将钢渣分为低碱度渣 ($M < 1.8$)、中碱度渣 ($M = 1.8 \sim 2.5$) 及高碱度渣 ($M > 2.5$) 3 种. 钢渣的主要矿物组成是硅酸二钙 (C_2S)、硅酸三钙 (C_3S)、RO 相 (MgO 、 FeO 和 MnO 的固溶体) 及少量游离氧化钙 ($f\text{-CaO}$)、铁铝酸钙 (C_4AF)、金属铁、橄榄石、镁蔷薇辉石^[18,19]. 因为钢渣中含有 C_2S 和 C_3S 等成分, 因而钢渣具有一定的活性.

将钢渣磨细到接近或者超过水泥的细度, 可以作为掺合料用于水泥或混凝土的生产. 钢渣的掺量较低时(约 10%), 比较容易满足水泥的相关标准^[20,21]. 但当钢渣的掺量较大时, 会使水泥的强度降低, 只能生产低强度的水泥. 同样, 当钢渣的掺量较低时, 对混凝土的强度和耐久性影响很小; 当钢渣掺量较高时, 明显降低混凝土的早期强度^[22-24]. 现代混凝土的主要特征是“高性能”和“绿色”, 这 2 个特征是与矿物掺合料分不开的. 现代混凝土的核心技术之一就是围绕矿物掺合料展开的^[25]. 矿渣和粉煤灰是最常用的矿物掺合料, 对它们的研究也已经很深入, 目前这些矿物掺合料在很多地区已成为紧缺的建材原材料. 因而开发利用钢渣既有利于环境保护, 又能为混凝土工业提供更多的矿物掺合料来取代水泥.

水泥与水接触后, Ca^{2+} 和 OH^- 迅速从颗粒的表面释放出来, pH 值在几分钟内上升至大于 12.0; 随着水化的进行, 水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不断结晶出来, 浆体孔溶液的 pH 值很快就略高于 13.0^[26]. 即使是含有大量矿物掺合料的混凝土, 其孔溶液的 pH 值仍大于 12.0^[27,28]. 因而, 在水泥-钢渣复合胶凝材料的水化硬化过程中, 钢渣的水化受到水泥水化产生的碱性环境激发. 研究结果表明^[19,29], 碱性环境对钢渣的水化有促进作用, 这利于钢渣活性的发挥. 尽管钢渣的水化性能对水泥-钢渣复合胶凝材料的水化性能有一定的影响, 但水泥是复合胶凝材料的主要成分, 水泥的水化

性能对复合胶凝材料的水化性能有决定性作用, 因而钢渣对水泥水化的影响是不可忽视的. 本文将系统研究在水泥-钢渣复合胶凝材料的水化过程中, 钢渣对水泥水化的影响, 从而为钢渣作为矿物掺合料应用于混凝土提供理论基础.

2 原材料与实验方法

2.1 原材料

实验用水泥为强度等级 42.5 的基准水泥(符合 GB 175-1999), 该水泥为纯硅酸盐水泥, 比表面积为 $312 \text{ m}^2/\text{kg}$. 钢渣为转炉钢渣(未经过水焖处理), 比表面积为 $458 \text{ m}^2/\text{kg}$. 钢渣与水泥的化学组成如表 1 所示, 钢渣中游离氧化钙的含量为 1.16%. 图 1 是钢渣的 XRD 结果, C_2S , C_3S 和 RO 相是主要矿物成分.

2.2 试验方法

成型了水泥浆体、钢渣浆体和复合胶凝材料浆体, 如表 2 所示, 其中试样 SS 是用 pH 值为 13.0 的 NaOH 溶液代替水拌合而成. 浆体成型后立即密封于塑料离心管内, 并置于 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 的养护环境中至测试龄期. 到达养护龄期后, 取样放入无水乙醇中停止水化, 在测试前将样品从无水乙醇中取出并烘干.

采用等温差分热量仪在恒温 25°C 的条件下测定胶凝材料的水化放热特性; 用 X 射线衍射仪在 50 kV

表 1 水泥与钢渣的化学成分(w%)

Composition	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$	MnO	Loss on ignition
Cement	21.86	4.25	2.66	63.59	2.19	2.42	0.55	0	1.75
Steel slag	17.03	5.64	22.69	43.38	5.98	0	0.45	1.70	1.86

Note: $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$

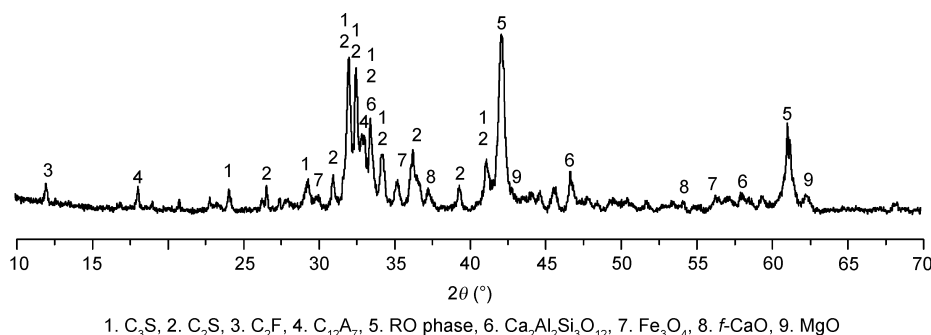


图 1 钢渣的 XRD 结果

表 2 不同浆体的配合比(g)

Sample	Cement	Steel slag	Water
S	-	100	30
SS	-	100	30
C	100	-	42
CS1	77.5	22.5	42
CS2	55	45	42

电压和 200 mA 电流的条件下测定胶凝材料的水化产物; 用热重方法在 N_2 环境、 $10^\circ C/min$ 的条件下测定了样品水化产物的 TG 曲线。

3 结果与讨论

3.1 水泥-钢渣复合胶凝材料的水化产物

图 2 是试样 S 水化 3, 90, 360 d 和试样 SS 水化 360 d 的水化产物的 XRD 谱。从图 2 中可以看出, 钢渣在加水后可以发生自身水化反应, 随着水化龄期的增加, C_2S , C_3S , $C_{12}A$, $Ca_2Al_2SiO_{12}$ 的特征峰强度不断减弱, 说明这些成分在不断减少; 但 RO 相, Fe_3O_4 , C_2F 的特征峰强度变化很小, 说明这些成分参与反应的程度很低。通过将试样 S 和 SS 在 360 d 的水化产物的 XRD 谱进行对比, 可以发现, 它们水化产物的种类是一样的, 这说明在碱激发的条件下, RO 相, Fe_3O_4 , C_2F 的活性依然很低。所以, 钢渣无论是在纯水条件下还是碱激发条件下的水化产物的种类是相同的, 即 C-S-H 凝胶(非晶态, 不能通过 XRD 确认), $Ca(OH)_2$, 未完全水化的 C_2S , C_3S , $C_{12}A$, $Ca_2Al_2SiO_{12}$ 等成分, 未参与反应的 RO 相, Fe_3O_4 , C_2F 等成分。

可以将钢渣分为 2 部分: 一部分为胶凝相, 即

C_2S , C_3S , $C_{12}A$, $Ca_2Al_2SiO_{12}$ 等成分; 另一部分为惰性相, 即 RO 相, Fe_3O_4 , C_2F 等成分。钢渣中的胶凝相是与水泥熟料类似的硅酸盐相和铝酸盐相, 但由于钢渣是从熔融态自然冷却到常温, 因而钢渣中的这些胶凝相结晶较完整, 活性也较低。而水泥的冷却方式是急冷, 矿物的结晶不完整, 活性较高。因此, 可以将钢渣看作是劣质水泥与惰性成分的组合。图 3 将水泥-钢渣复合胶凝材料的水化产物与水泥的水化产物进行了对比。从图 3 中可以看出, 复合胶凝材料与水泥的主要水化产物是相同的, 即 C-S-H 凝胶(非晶态, 不能通过 XRD 确认)和 $Ca(OH)_2$ 。随着钢渣的掺量增大, 复合胶凝材料水化产物中的 RO 相, Fe_3O_4 , C_2F 增多。

众所周知, 粉煤灰和矿渣在复合胶凝材料水化过程中所参与的水化反应主要是与水泥的水化产物 $Ca(OH)_2$ 发生反应生成凝胶。然而, 钢渣在复合胶凝材料水化过程中并不与水泥的水化产物发生反应; 同时, 水泥也不与钢渣的水化产物发生反应。在水泥-钢渣复合胶凝材料的水化过程中, 水泥和钢渣只是在一定程度上改变了彼此的水化环境, 从而影响了彼此的水化速率和水化程度。

3.2 钢渣对水泥早期水化的影响

图 4 将钢渣($W/S=0.30$)和水泥 ($W/C=0.42$) 的水化放热速率曲线进行了对比。从图 4 中可以看出, 总体上来讲, 钢渣和水泥的水化放热过程相似, 都经历了快速放热期、诱导期、加速期、减速期和稳定期这 5 个阶段。第一阶段很快形成了一个放热峰, 峰值为 $30\sim40 J g^{-1} h^{-1}$, 放热峰的形成主要是由于粉体在接

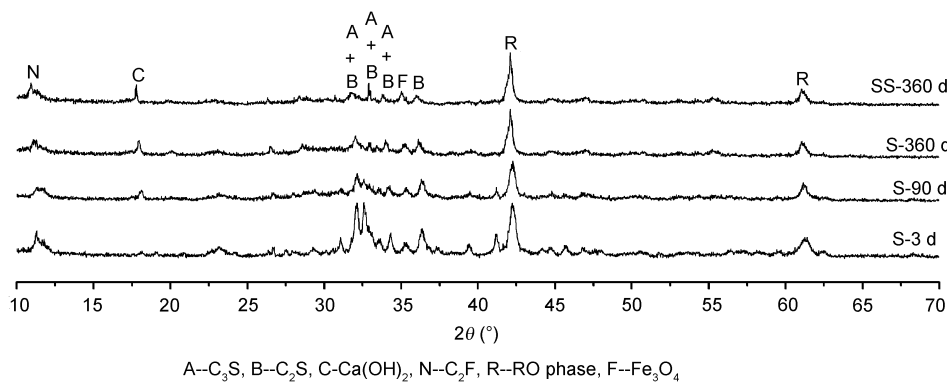


图 2 钢渣在不同水化龄期的水化产物的 XRD 谱

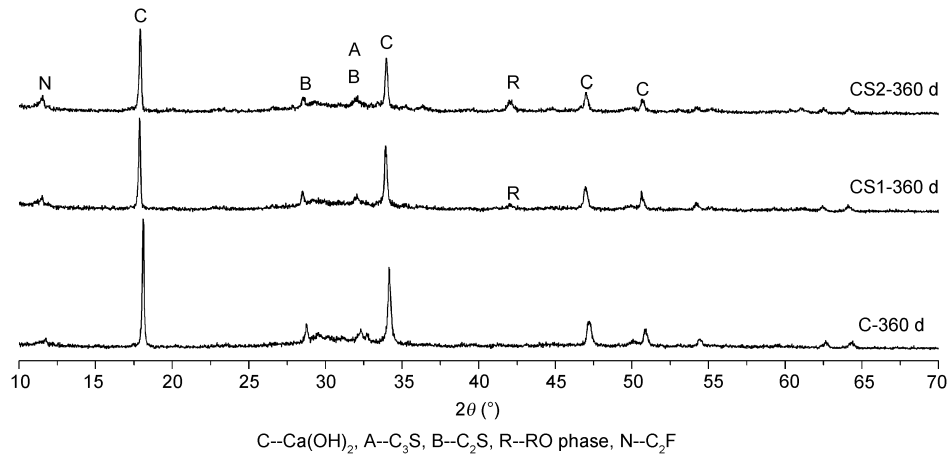


图3 不同胶凝材料水化 360 d 的水化产物的 XRD 谱

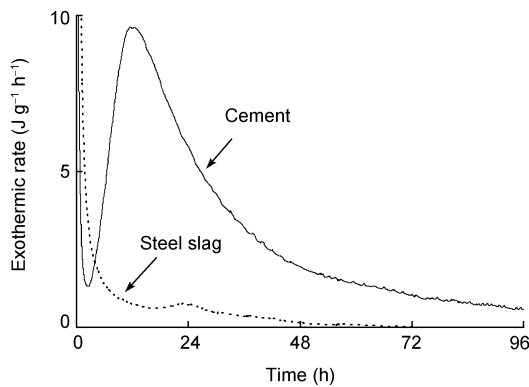


图4 钢渣和水泥的水化放热速率

触水时表面能的释放, 为了使后面阶段的曲线更清晰, 图 4 的纵坐标的最大值设置为 $10 \text{ J g}^{-1} \text{ h}^{-1}$. 钙和氢氧根的浓度只有达到一个临界值时, 水化产物 Ca(OH)_2 和 C-S-H 凝胶才开始从溶液中结晶出来, 因此第一个阶段之后, 水化进入诱导期. 很显然, 钢渣水化的诱导期远长于水泥, 这使得钢渣水化第二放热峰出现的时刻比水泥晚 12 h 左右. 钢渣在水化加速期、减速期和稳定期的放热速率明显低于水泥, 其在 96 h 内的放热总量为 60.74 J g^{-1} , 远低于相同时间内水泥的放热量.

图 5 将水泥-钢渣复合胶凝材料和水泥的水化放热速率曲线进行了对比, 其中 3 种胶凝材料的水胶比均为 0.42, complex binder 1 和 complex binder 2 中钢渣的掺量分别为 22.5% 和 45%. 从图 5 中可以看出, 随着钢渣掺量的增大, 胶凝材料的水化诱导期延长, 且水化第 2 放热峰出现的时间推迟. 有研究结果表

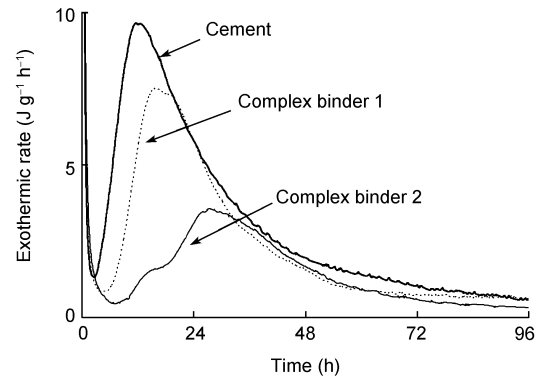


图5 复合胶凝材料和水泥的水化放热速率

明^[18,30,31], 掺入钢渣后的水泥和混凝土的初凝时间延长, 而且钢渣掺量越大, 初凝时间越长. 因此, 水泥-钢渣复合胶凝材料的初凝时间长的一个重要原因是它的水化诱导期长.

用 pH 值为 13.0 的 NaOH 溶液来模拟钢渣在水泥-钢渣复合胶凝材料中的碱性环境, 钢渣在该碱性环境下的水化放热曲线如图 6 所示. 钢渣在 96 h 内的放热总量为 69.78 J g^{-1} , 可见碱激发对钢渣活性的发挥有一定的促进作用. 设图 6 中钢渣在时间 t 内的放热量为 $Q_s(t)$, 图 5 中复合胶凝材料在时间 t 内的放热量为 $Q_B(t)$, 钢渣的掺量为 p , 则复合胶凝材料中单位质量的水泥的放热量可用下式表示

$$\frac{Q_B(t) - Q_s(t) \cdot p}{1 - p} \quad (1)$$

根据(1)式分别计算出在 Complex binder 1 和 Complex binder 2 中单位质量水泥在时间 t 内的放热

量, 分别用 Cement 1 和 Cement 2 表示, 如图 7 所示. 图 7 显示, 在龄期 96 h 内, 复合胶凝材料中单位质量水泥的放热量低于单位质量纯水泥的放热量. 由此可见, 用钢渣替代部分水泥后, 复合胶凝材料中水泥的水化发生了一定的延缓现象, 并且钢渣的掺量越大, 水泥水化的延缓现象越明显. 这主要是因为钢渣的水化诱导期明显比水泥的长, 从而水泥和钢渣组成的复合胶凝材料的诱导期比水泥的长, 这就使得复合胶凝材料中水泥的早期水化变慢.

3.3 钢渣对水泥后期水化的影响

本文测定了钢渣在 pH 值=13.0 的碱性条件下水化 90 和 360 d 的水化产物的热重曲线(即试样 SS), 同时测定了水泥(试样 C)、水泥-钢渣复合胶凝材料(试样 CS1, CS2)水化 90 和 360 d 的水化产物的热重曲线. 图 8~10 分别为水泥、复合胶凝材料(CS2)和钢渣水化 360 d 的水化产物的热重曲线, 可以看出, 3 种胶凝材料的水化产物在 900℃ 以下的温度范围内都有 3 个

主要的吸热峰: C-S-H 凝胶、水化铝酸盐脱水阶段(50~200℃); $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 脱水阶段(400~550℃); C-S-H 凝胶及水化铝酸盐后期脱水阶段(550~770℃). 这也再一次证明了钢渣的主要水化产物是与水泥的水化产物类似的, 但通过对比图 8 和 10 中可以明显看出, 钢渣水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量比水泥水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量低.

根据胶凝材料水化产物的热重曲线, 计算出水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的质量百分比, 如表 3 所示. 由于

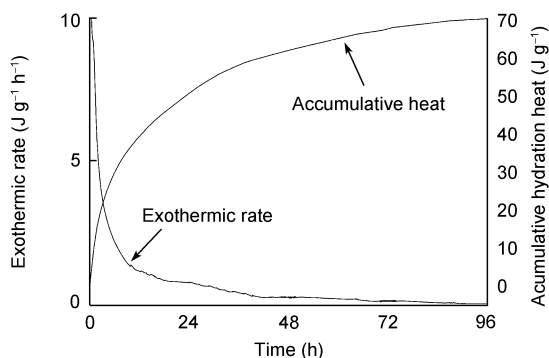


图 6 钢渣在碱性条件下的水化放热曲线

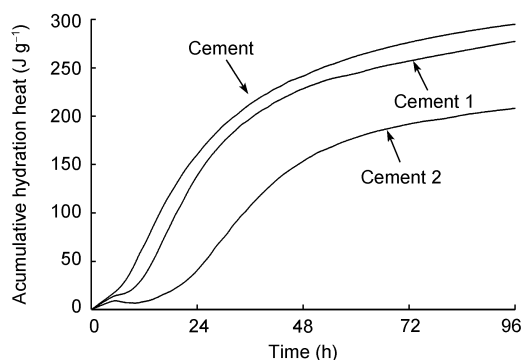


图 7 复合胶凝材料中单位质量水泥和单位质量纯水泥的水化热对比

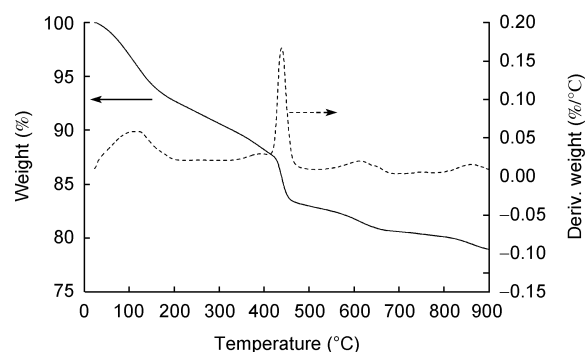


图 8 水泥水化 360 d 的水化产物的 TG 曲线

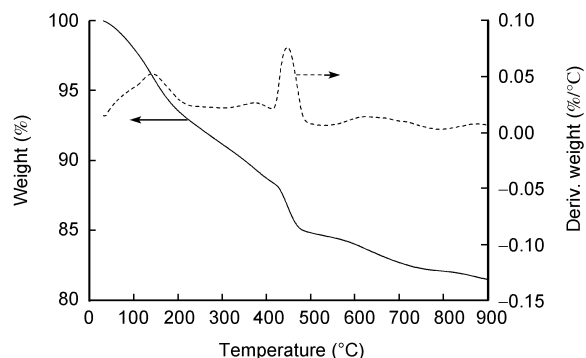


图 9 CS2 水化 360 d 的水化产物的 TG 曲线

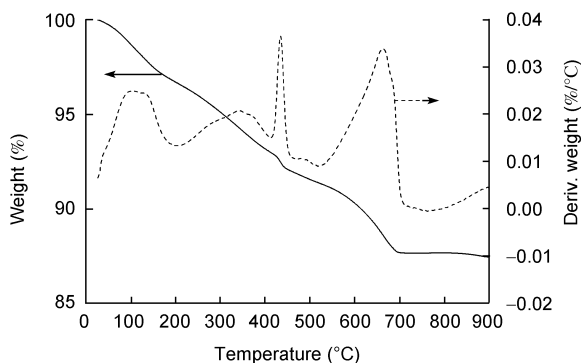


图 10 钢渣(SS)水化 360 d 的水化产物的 TG 曲线

表 3 水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量(%)

Samples	Ages (d)	
	90	360
SS	3.54	5.82
C	18.38	20.08
CS1	15.77	18.59
CS2	13.27	16.34

水泥和钢渣的水化反应是互不交叉的, 因而复合胶凝材料水化产物中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是由水泥和钢渣分别水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的总和. 本文通过使钢渣在 pH 值=13.0 的碱性条件下水化, 是为了模拟钢渣在复合胶凝材料中的水化环境, 相当于考虑了水泥对钢渣水化的影响. 设龄期为 t 时, 单位质量纯水泥的水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量为 m , 单位质量钢渣的水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量为 n , 单位质量复合胶凝材料的水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量为 p , 钢渣的掺量为 w . 则可以用下式来表示复合胶凝材料中单位质量水泥的水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量

$$\frac{p-nw}{1-p} \quad (2)$$

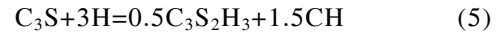
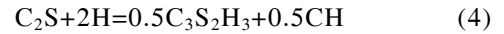
在复合胶凝材料中, 由于钢渣改变了水泥的水化环境, 使水泥的水化程度发生了变化, 这个变化的幅度可以称为钢渣对水泥水化的影响系数, 用下式表示. 显然, $K(t)>0$ 表示钢渣对水泥的水化起到了促进的作用; $K(t)<0$ 表示钢渣对水泥的水化起到了抑制的作用. 并且 $K(t)$ 的绝对值越大, 表明钢渣对水泥水化的影响程度越大.

$$K(t) = \frac{\frac{p-nw}{1-p} - m}{m} \times 100\%. \quad (3)$$

将表 3 中的数值代入(3)式中, 可以得到以下结果: 当钢渣掺量为 22.5%时, $K(90 \text{ d})=5.11\%$, $K(360 \text{ d})=11.04\%$; 当钢渣掺量为 45%时, $K(90 \text{ d})=15.51\%$, $K(360 \text{ d})=24.24\%$. 这表明, 在水化后期, 钢渣对水泥的水化起到促进的作用; 钢渣的掺量越大, 对水泥水化的促进作用

用越明显; 龄期越长, 对水泥水化的促进作用越明显.

一般而言, C_2S 和 C_3S 的水化反应可以用下式表示^[32]



式中, H 表示水, CH 表示氢氧化钙, $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ 为 C_2S 和 C_3S 的水化产物. 即 1 mol C_2S 消耗 2 mol 水, 1 mol C_3S 消耗 3 mol 水. 水泥的胶凝组分以 C_3S 为主, 而钢渣的胶凝组分以 C_2S 为主^[18, 24], 并且钢渣中的惰性相不消耗水, 因而单位质量钢渣水化的需水量低于水泥. 在保持水胶比不变的条件下, 用钢渣替代部分水泥, 相当于增大了水泥水化的实际水灰比. 随着水泥水化的进行, 水泥颗粒表面的 C-S-H 凝胶层逐渐变厚, 水泥的水化进入稳定期后的化学反应是扩散控制, 反应速率取决于水扩散到未水化水泥颗粒表面的难易程度. 钢渣中的惰性相颗粒被水泥水化生成的 C-S-H 凝胶所包裹, 起到了成核的作用, 间接减小了水泥颗粒表面的 C-S-H 凝胶层的厚度. 因此, 钢渣改善了水泥后期的水化环境, 对水泥的后期水化起到了促进作用.

4 结论

(i) 钢渣可分为胶凝相和惰性相两部分, 其胶凝相与水泥的熟料相成分相似, 钢渣的胶凝相的主要水化产物为 C-S-H 凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$. 在水泥-钢渣复合胶凝材料的水化过程中, 水泥和钢渣只是通过改变彼此的水化环境来影响彼此的水化.

(ii) 水泥-钢渣复合胶凝材料的水化诱导期比水泥长, 且钢渣掺量越高, 复合胶凝材料的水化诱导期越长. 钢渣对水泥早期的水化有一定的延缓作用, 且钢渣的掺量越大, 对水泥水化的延缓作用越明显.

(iii) 钢渣改善了水泥后期的水化环境, 对水泥的后期水化有一定的促进作用. 钢渣掺量越大, 对水泥水化的促进作用越大; 龄期越长, 对水泥水化的促进作用越明显.

参考文献

- 1 Dong B P. Treatment and Utilization of Solid Wastes. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999. 22-34
- 2 Motz H, Geiseler J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. Waste Manage, 2001, 21: 285-293
- 3 石膏. 美国钢铁渣工业的发展概况. 建筑节能, 1980, 4: 31-35
- 4 朱桂林. 中国钢铁工业固体废物综合利用的现状和发展. 废钢铁, 2003, 3: 34-41

- 5 Hendrik G. Iron and Steel Slag. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2009
- 6 Murphy J N, Meadowcroft T R, Barr P V. Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. *Can Metall Quart*, 1997, 36: 315–331
- 7 Shi C J. Steel slag-Its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *J Mater Civil Eng*, 2004, 16: 230–236
- 8 Wu S P, Xue Y J, Ye Q S, et al. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Bldg Environ*, 2007, 42: 2580–2585
- 9 Asi I M, Qasrawi H Y, Shalabi F I. Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. *Can J Civil Eng*, 2007, 34: 902–911
- 10 Beshr H, Almusallam A A, Maslehuddin M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Constr Build Mater*, 2003, 17: 97–103
- 11 Maslehuddin M, Alfarabi M, Shameem M, et al. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Constr Build Mater*, 2003, 17: 105–112
- 12 Shih P H, Wu Z Z, Chiang H L. Characteristics of bricks made from waste steel slag. *Waste Manage*, 2004, 24: 1043–1047
- 13 Dimitrova S V. Metal sorption on blast-furnace slag. *Water Res*, 1996, 30: 228–332
- 14 Kang H J, An K G, Kim D S. Utilization of steel slag as an adsorbent of ionic lead in waste water. *J Environ Sci Health A*, 2004, 39: 15–28
- 15 Gahan C S, Cunha M L, Sandstrom A. Comparative study on different steel slags as neutralizing agent in bioleaching. *Hydrometall*, 2009, 95: 190–197
- 16 Shi C J, Qian J S. High performance cementing materials from industrial slags—a review. *Resour Conserv Recy*, 2000, 29: 195–207
- 17 Mason B. The constitution of some open-hearth slag. *J Iron Steel Inst*, 1994, 11: 69–80
- 18 Kourounis S, Tsivilis S, Tsakiridis P E, et al. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. *Cem Concr Res*, 2007, 37: 815–822
- 19 Shi C J. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. *Cem Concr Res*, 2002, 32: 459–462
- 20 Tsakiridis P E, Papadimitriou G D, Tsivilis S, et al. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *J Hazard Mater*, 2008, 152: 805–811
- 21 Ahmad M, Masoud K A. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. *Cem Concr Res*, 1999, 29: 1373–1377
- 22 孙家瑛. 磨细钢渣对混凝土力学性能及安定性影响研究. *粉煤灰*, 2003, 5: 7–9
- 23 王博, 戴连鹏, 周明辉. 磨细钢渣高性能混凝土的实验研究. *沈阳建筑工程学院学报*, 2003, 19: 148–149
- 24 李永鑫. 含钢渣粉掺合料的水泥混凝土组成结构及性能研究. 博士学位论文. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2003
- 25 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土. 北京: 中国铁道出版社, 1999
- 26 Taylor H F M. *Cement Chemistry*. 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997
- 27 蒲心诚. 大掺量粉煤灰水泥研究. *房产与应用*, 1996, 3: 4–12
- 28 Resheeduzaafar, Ehteshan H. Effect of microsilica and blast furnace slag on pore solution composition and alkali-silica reaction. *Cem Concr Res*, 1991, 21: 219–235
- 29 Wang Q, Yan P Y. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. *Constr Build Mater*, 2010, 24: 1134–1140
- 30 Altun A, Yılmaz S. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. *Cem Concr Res*, 2002, 32: 1247–1249
- 31 Rai A, Prabakar J, Raju C B, et al. Metallurgical slag as a component in blended cement. *Constr Build Mater*, 2002, 16: 489–494
- 32 Lea F M. *The Chemistry of Cement and Concrete*. 3rd ed. New York: Edward Arnold, 1974