

矿渣-钢渣-石膏体系早期水化反应中的协同作用

李颖¹, 吴保华², 倪文¹, 牟欣丽¹

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 河钢钢铁集团有限公司邯钢钢铁股份有限公司, 河北 邯郸 056015)

摘 要: 研究了矿渣-钢渣-石膏体系在水化早期的反应过程, 侧重于分析单独变量条件下早期水化产物的种类、产生时间、相对产生量和微观形貌。结果表明: 石膏和钢渣都可以激发矿渣水化, 在矿渣-钢渣-石膏胶凝材料体系的早期水化过程中, 矿渣、钢渣及石膏能够产生以生成钙矾石为驱动力的协同作用, 主要水化产物是钙矾石和 C-S-H 凝胶。钢渣及钢渣与石膏混合物的极早期水化速度很快, 对调节矿渣-钢渣-石膏胶凝材料体系的凝结时间具有重要意义。

关 键 词: 水化; 激发作用; 钙矾石; C-S-H 凝胶; 协同作用

中图分类号: TD 989

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)04-0581-06

Synergies in Early Hydration Reaction of Slag-Steel Slag-Gypsum System

LI Ying¹, WU Bao-hua², NI Wen¹, MU Xin-li¹

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Handan Iron & Steel Co., Ltd., HBIS Group Co., Ltd., Handan 056015, China. Corresponding author: NI Wen, E-mail: niwen@ces.ustb.edu.cn)

Abstract: The reaction process of slag-steel slag-gypsum system in early stage of hydration was studied with a focus on the types, production time, relative production and micromorphology of early hydration products under the single variable conditions. The results showed that both gypsum and steel slag can stimulate the hydration of slag. In early hydration process of slag-steel slag-gypsum cementitious material system, the synergies of slag, steel slag and gypsum can be driven by the formation of ettringite, and the main hydration products are ettringite and C-S-H gel. The very early hydration rate of steel slag and mixture of steel slag and gypsum is fast, which has great significance to adjusting the setting time of slag-steel slag-gypsum cementitious material system.

Key words: hydration; activation effect; ettringite; C-S-H gel; synergy

随着我国环境保护力度的逐步加大和法规政策的不断完善, 冶金工业固体废弃物的处理成为日益严峻的经济和环境问题。在这类固体废弃物中矿渣和钢渣约占总产生量的 84%^[1], 将其有效应用于建筑材料的生产是大规模消纳冶金固体废弃物的有效手段之一。近几十年以来, 矿渣逐渐成为混凝土生产中的一种主要矿物掺合料, 而钢渣由于水化性能较差和安定性存在不确定性, 其综合利用率还有待提高^[2-4]。

基于不同种类固体废弃物成分和性质的不

同, 将 2 种或 2 种以上固体废弃物混合制成复合矿物掺合料是一种很受关注的研究方向^[5-9]。基于不同矿物掺合料之间的互补属性, 在合理的分配比条件下, 复合矿物掺合料会表现出优于单独矿物掺合料的性能^[10-11]。Wang 等^[12]研究发现将钢渣和矿渣以适当比例配成复合矿物掺合料能够使混凝土强度提高、水化热降低、流动性更佳。Duan 等^[13]认为相较于一元和二元体系, 优化配比的粉煤灰、钢渣和脱硫石膏三元混合物, 在水化 28 d 时表现出明显的协同效应, 使抗压强度提高。

崔孝炜等^[14]从离子浓度角度解释了矿渣-钢渣-石膏体系中 3 种原料的协同促进作用,但没有对 3 种原料成分进行单独变量分析. 一些研究^[15]表明矿渣-钢渣-石膏体系的早期凝结时间较长、早期强度较低,但对该体系早期水化过程中的协同作用,尤其是早期产物的产生时间和产生量还缺乏文献和试验数据支持. 进行这方面的研究对发挥各组分的优势特征及进一步强化协同胶凝作用具有重要意义.

1 试 验

1.1 原料

本试验采用产自河北省邯郸地区的粒化高炉

矿渣、转炉钢渣和电厂脱硫石膏. 矿渣质量系数 $K = m(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/m(\text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{TiO}_2) = 2.06$, 为高活性矿渣. 钢渣的碱度系数 $M = m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) = 1.91$, 为中碱度钢渣. 脱硫石膏的主要成分是二水硫酸钙. 3 种原料的主要化学成分如表 1 所示.

1.2 样品的制备

将原料置于 40 ℃烘箱,烘干至含水率不大于 1% 后,使用 5 kg 球磨机将矿渣、钢渣和石膏分别粉磨至比表面积 560,460 和 400 m²/kg. 按照表 2 的配比制备 6 组胶凝材料净浆样品,采用 0.32 的水胶比,精准称量加水混匀后放入塑料离心管中密封,置于标准养护条件下养护至指定龄期后使用无水乙醇终止水化,经烘干、研磨后制成粉样.

表 1 原料的主要化学成分(质量分数)										
Table 1 Chemical compositions of raw materials(mass fraction)										%
原料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂
矿渣	39.74	30.09	14.85	10.14	2.18	0.33	0.30	0.38	0.02	0.83
钢渣	41.96	20.26	5.16	6.95	0.39	16.01	3.30	4.15	1.74	0.69
石膏	40.92	0.11	0.06	0.03	36.89	0.02	0.01	—	—	0.02

表 2 胶凝材料的配比			
Table 2 Compositions of cementitious materials g			
编号	矿渣	钢渣	石膏
X1	300	—	—
X2	—	300	—
X3	264	—	36
X4	—	264	36
X5	240	60	—
X6	211.2	52.8	36

1.3 试验设备和仪器

采用日本理学 Ultima IV X 射线衍射仪(XRD)测定水硬化浆体的物相组成;采用德国 NETZSCH STA 409-QMS 高温热分析仪进行热重(TG)和差示扫描量热(DSC)分析;采用德国蔡司 SUPRA 55 型场发射扫描式电子显微镜(FE-SEM)观察水化后浆体的微观形貌;采用英国 Link 公司 LinkNA1000 型能谱仪(EDX)测定水化产物微区的元素种类和原子比.

2 试验结果与讨论

2.1 X 射线衍射分析

图 1 是矿渣、钢渣原料和各组净浆试块水化 3 d 的 XRD 图谱. 由图 1 可见:矿渣原料以非晶态

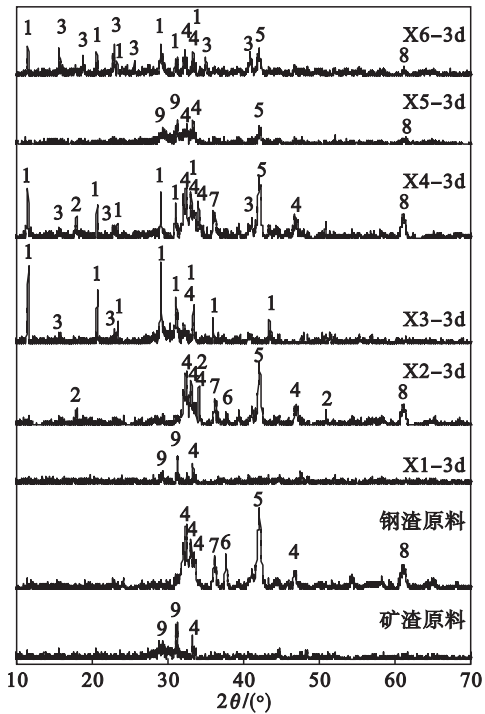


图 1 主要原料和各组净浆水化 3 d 的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of materials and pastes at 3 d

1—石膏; 2—氢氧化钙; 3—钙矾石;
4—硅酸二钙; 5—铝铁酸钙(CaAl₁₈Fe₄O₁₉);
6—铁酸钙(CaFeO₂); 7—黑钙铝石(CaAl₁₂O₁₉);
8—RO 相; 9—钙镁黄长石(Ca₂Al₂SiO₇).

物相为主,含有少量钙镁黄长石和硅酸二钙. 钢渣

的主要矿物相为硅酸二钙、铁酸钙、黑钙铝石和RO相(MgO,FeO和MnO固溶体)。

对比矿渣原料,X1,X3和X6组净浆的XRD图谱可见:在水化3 d时,矿渣在0.32水胶比的条件下直接与水反应并无新的结晶相产生.添加质量分数12%的石膏以后,水化3 d产生了钙矾石相,但钙矾石的峰形并不突出,并且没有出现氢氧化钙的峰.而在加入钢渣后水化产物中钙矾石的峰明显增强,石膏峰显著降低,说明钙矾石的生成消耗了体系中的石膏,并且钢渣的加入对钙矾石的生成具有显著的促进作用.从成分上来看,钢渣并没含有比矿渣更多的铝,因此XRD的结果表明钢渣能够有效促进矿渣的解聚,以释放出更多的铝参与反应生成钙矾石。

对比钢渣原料,X2,X4和X6组净浆的XRD图谱可见:在水化3 d时,钢渣在0.32水胶比的条件下与水反应生成了氢氧化钙物相,并且硅酸二钙、铝铁酸钙、铁酸钙和黑钙铝石等富钙相的峰强有所降低.与X1组净浆的XRD图谱对比可知:相较于矿渣,钢渣中的二价金属阳离子更容易水化,使体系呈碱性.在钢渣中添加质量分数12%的石膏以后,水化3 d产生了钙矾石相,钙矾石的峰并不突出,但氢氧化钙的峰依然保留并略有增强.这说明石膏对钢渣的水化具有促进作用,钙矾石生成量较少主要是由于体系中的铝含量不足所致.因此在加入矿渣之后,X6组净浆的钙矾石峰强明显增加,石膏也得到了充分利用。

对比矿渣、钢渣原料和X5组净浆水化3 d的XRD图谱可见:矿渣和钢渣的混合物水化3 d后并没有新的结晶态物相产生.与X3和X4组对比可知,石膏对于矿渣和钢渣都具有显著的激发作用。

图2是X6组净浆不同龄期的XRD图谱.由图2可见:X6组净浆在水化1 h,8 h和1 d时,并没有出现明显的结晶态水化产物,石膏的峰强变化不大,表示石膏没有被大量消耗.但与水化1 h和8 h相比,水化1 d的XRD图谱在横坐标25°~35°范围内出现了明显的峰包,这表明体系中生成了一定量的非晶态水化产物.而在水化3 d时,石膏的峰强明显降低,并出现了突出的钙矾石峰形,这表明该配比的矿渣-钢渣-石膏体系在标准养护条件下,在水化1~3 d之间进行着大量生成钙矾石的反应。

在图2中自始至终没有出现氢氧化钙和氢氧化镁的峰形,表示钢渣水化生成的氢氧化钙和氢氧化镁完全参与到了反应中,促进矿渣水化生成

钙矾石和非晶态产物.这个反应过程对减小和消除钢渣在该体系中的不稳定性因素起着重要作用.大量研究结果表明钢渣的不稳定性因素是游离氧化钙和游离氧化镁产生体积膨胀所致^[16].如果钢渣水化形成的氢氧化钙和氢氧化镁能够不经过固体结晶阶段就被体系进一步反应所吸收,就能够避免体积膨胀。

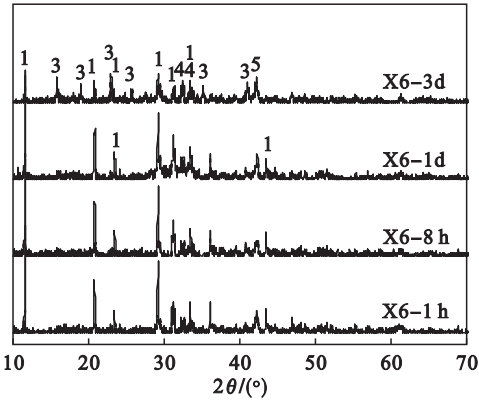


图2 X6组净浆不同龄期的XRD图谱
Fig. 2 XRD patterns of X6 pastes at different ages
1—石膏; 3—钙矾石; 4—硅酸二钙;
5—铝铁酸钙(CaAl₂Fe₂O₉)。

2.2 热重分析

在氮气氛围及30~1 000℃的升温过程中,表3统计了不同龄期各组净浆样品的失重总量.由表3可见:在水化前3 d的过程中,X1和X2组净浆的整体失重总量相对较小,说明不含石膏的两组净浆的水化程度较低.X2组净浆的整体失重总量远大于X1组,这说明钢渣磨细后,其早期水化速度比矿渣粉快得多.这是由于钢渣中二价金属氧化物的水化速度远大于矿渣中硅酸盐玻璃相的水化速度。

表3 各组净浆样品不同龄期的失重总量
Table 3 Total weight loss of pastes at different ages %

编号	龄期			
	1 h	8 h	1 d	3 d
X1	0.06	0.37	0.56	0.63
X2	2.43	3.77	4.36	4.97
X3	0.05	0.12	1.77	6.27
X4	4.06	5.18	6.09	6.95
X5	0.71	1.10	1.52	6.15
X6	0.38	1.54	1.84	7.99

注:数据已扣除原料加水前自身水化的失重量。

X3,X4和X6组净浆的失重总量较多,说明其净浆中含有较多的水化产物,证明石膏对于矿渣和钢渣都具有明显的激发作用.X6组1 d的

水化产物占 3 d 水化产物的 23%,表明该体系在水化极早期具备一定的反应速度.值得注意的是,X4 组在水化 1 h 的时候其整体失重总量就已经达到 3 d 整体失重总量的 58%,这说明本试验中的钢渣和石膏在水化极早期反应速度极快,这是由于钢渣中含铝成分与石膏快速形成了钙矾石类产物.对这一点进行深入研究,有助于解决矿渣-钢渣-石膏体系早期凝结时间过长的问题.

X5 组净浆的整体失重总量虽然不及含石膏的三组,但明显较 X1 和 X2 组更多,这说明钢渣对矿渣的水化也具有重要的激发作用.

图 3 是水化 3 d 的 X1,X5 和 X6 组净浆微分热重和差示扫描量热曲线(微分热重曲线:DTG,是 TGA 曲线的一阶导数;差示扫描量热曲线:DSC).由图 3 可见:X1 组的 DTG 和 DSC 曲线波动较小,在 120 ℃左右出现微弱失重峰,显示矿渣单独水化会生成少量 C-S-H 凝胶.X5 组的 DTG 曲线显示矿渣和钢渣的混合物水化 3 d 的产物在 100 ℃左右和 600~700 ℃区间有明显的失重峰,这分别代表了矿渣、钢渣水化产生的少量 C-S-H 凝胶和钢渣水化产生氢氧化钙碳化后形成的碳酸钙.X6 组的 DTG 和 DSC 曲线显示矿渣、钢渣和石膏混合物水化 3 d 的产物只在 100 ℃左右有非常明显的失重峰和吸热峰,表示产物含较多 C-S-H 凝胶和钙矾石,并没有出现氢氧化钙或碳酸钙的明显失重.这表明体系中含有石膏时,钙矾石的迅速结晶大量消耗 Ca^{2+} 离子,使体系吸收 CO_2 产生碳酸钙的速度下降,这与 XRD 的结果吻合.

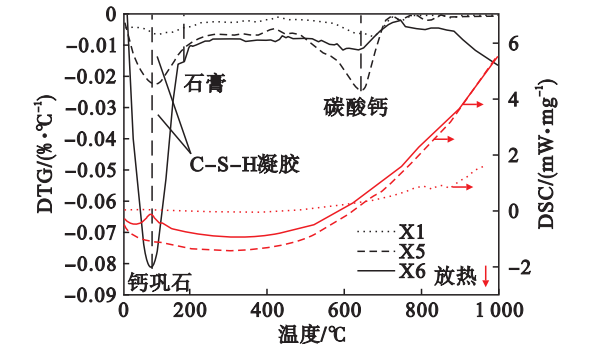


图 3 X1,X5 和 X6 组水化 3 d 的净浆微分热重和差示扫描量热曲线
Fig. 3 DTG and DSC curves of pastes X1, X5 and X6 (3 d)

2.3 场发射扫描电镜分析

图 4 是水化龄期为 3 d 时,X2,X3,X4 组净浆的 FE-SEM 照片.由图 4a 可见:X2 组净浆的水

化产物中有板片状结晶产物,EDX 结果显示:主要元素为钙元素和氧元素,且钙元素与氧元素的平均原子比例为 0.36.结合产物形貌特征判断这种板片状结晶产物应为氢氧化钙和碳酸钙.这说明钢渣单独加水后,其中含有的氧化钙容易水化生成氢氧化钙,一部分氢氧化钙在养护过程中碳化形成碳酸钙.由图 4b 可见:X3 组净浆水化 3 d 的产物中还存在明显的石膏晶体,并在靠近石膏的孔洞位置可见极少量钙矾石晶体,这是由于矿渣-石膏体系中缺乏足够的碱性物质激发,抑制了矿渣中铝的解聚,进而影响了钙矾石等水化产物的生成.由图 4c 可见:X4 组净浆水化 3 d 的产物中有片状和短柱状产物,结合 EDX 和 XRD 结果判断应为氢氧化钙和钙矾石,这说明钢渣水化产生的氢氧化钙和体系中的石膏对钙矾石的生成有促进作用,但钢渣中铝含量过少,导致钙矾石的晶型较小,结晶总量较少.

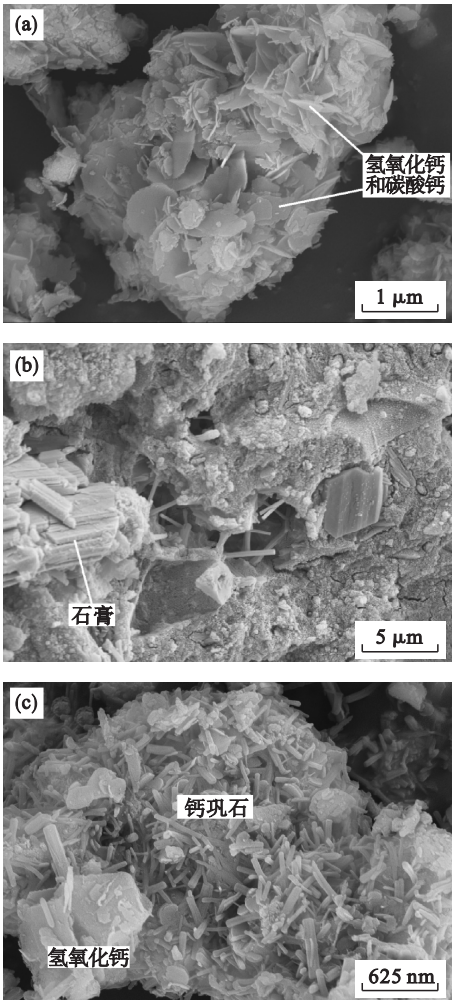


图 4 X2,X3,X4 组净浆水化 3 d 的 FE-SEM 照片
Fig. 4 FE-SEM images of X2, X3 and X4 pastes(3 d)
(a)—X2; (b)—X3; (c)—X4.

图 5 是 X6 组净浆不同水化龄期的 FE-SEM

照片. 对比图 5a 和图 5b 能够发现:水化 8 h 的矿渣和钢渣颗粒表面发生了一定程度的水化,有少许非晶态产物,这类产物在水化 1 d 时更为明显,逐渐包裹了矿渣和钢渣颗粒,结合 EDX 和 TG 结果推断,这些非晶态水化产物是 C - S - H 凝胶. 图 5c 显示:水化 3 d 的产物形貌中就能够看到清晰的钙矾石结晶体,这与 XRD 的结果吻合.

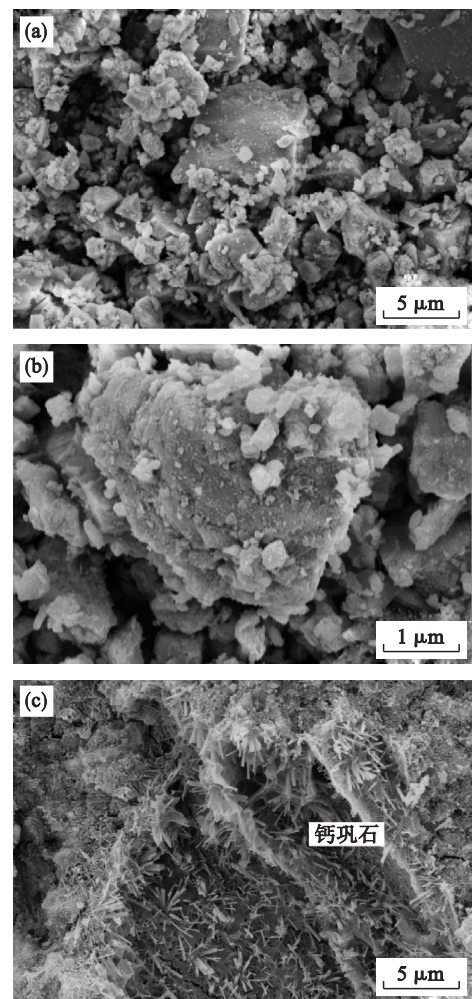


图 5 X6 组净浆不同龄期的 FE - SEM 照片
Fig. 5 FE-SEM images of X6 pastes at different ages
(a) — 水化 8 h; (b) — 水化 1 d; (c) — 水化 3 d.

2.4 协同作用机理分析

综合以上多种测试结果可以发现:矿渣单独水化时没有结晶态产物,只有少量凝胶类物质生成. 这是因为矿渣发生水解反应,产生的 Ca^{2+} 和 OH^- 离子能与矿渣的硅酸盐或硅铝酸盐解聚体结合成水化硅酸钙凝胶或水化硅铝酸钙凝胶. 这种凝胶的形成能让反应物迅速离开矿渣表面,如此循环往复,使矿渣不断水化. 在水胶比较大时,这种反应进行得较为缓慢.

钢渣单独水化会产生一定量的氢氧化钙,这是由于钢渣中富含大量的二价金属阳离子,其中

以 Ca^{2+} 为主. 二价金属阳离子水化后液相的碱度迅速升高直至平衡状态,在某些富含二价金属阳离子的位置,液相能够达到氢氧化钙结晶的溶度积,因此有氢氧化钙的晶体析出. 但由于此后没有进一步反应能够消耗 Ca^{2+} 和 OH^- 离子,水化产物逐渐包裹钢渣颗粒使反应进展缓慢. 同理,矿渣和钢渣以质量比 4:1 的比例混合后水化,由于矿渣占比较大,水化后液相未能达到氢氧化钙结晶的溶度积,因此也没有氢氧化钙的晶体析出,后期反应进展缓慢.

当矿渣和钢渣各自与石膏混合水化时,由于体系中引入了 SO_4^{2-} 离子,两组的水化产物中都出现了少量钙矾石,但导致这一现象的原因不同. 矿渣 - 石膏体系是由于液相碱度不足以充分解聚矿渣中的铝,进而影响了钙矾石的生成;钢渣 - 石膏体系是由于钢渣自身铝含量不足,导致无法生成更多的钙矾石. 在这两个体系中,由于钙矾石生成量较少,未能大量消耗体系中的 Ca^{2+} , OH^- 和 SO_4^{2-} 等离子,加之铝氧四面体的解聚困难和含量不足等原因,使水化反应进程逐渐变慢.

从以上分析不难看出,钙矾石的生成对于矿渣 - 钢渣 - 石膏体系的水化反应具有极大的驱动作用. 钙矾石是一种溶度积极低 ($10^{-11.6}$) 的复盐,常出现在富钙铝硫材料的水化产物中. 在本文研究的矿渣 - 钢渣 - 石膏体系中,矿渣富含钙硅铝元素,钢渣富含钙硅和二价金属元素. 三种主要原料在体系中能分别发挥各自作用:矿渣提供 Ca^{2+} 和 Al^{3+} 离子,钢渣提供二价金属阳离子和 OH^- 离子,石膏提供 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子,共同形成极难溶的钙矾石,推动反应不断进行. 同时促进矿渣和钢渣中硅氧四面体和铝氧四面体的解聚,使体系中出现大量活性硅氧四面体,它们以单个硅酸根离子或多个硅酸根离子的多聚体为单位,与液相中 Ca^{2+} 离子结合形成越来越多的 C - S - H 凝胶. 将多种原料分别提供关键反应驱动因子以促进反应持续进行的作用称之为协同作用.

3 结 论

- 1) 石膏能够对矿渣和钢渣的水化起到激发作用,钢渣能够对矿渣的水化起到激发作用.
- 2) 钢渣单独水化及钢渣与石膏共同水化时,极早期反应速度很快,对调节矿渣 - 钢渣 - 石膏胶凝材料体系的凝结时间具有重要意义.
- 3) 在早期水化过程中,矿渣 - 钢渣 - 石膏胶凝材料体系能够发生协同作用,形成以钙矾石和

C-S-H 凝胶为主的水化产物.

4) 在早期水化过程中,矿渣、钢渣和石膏分别提供硅氧四面体、铝氧四面体、碱性环境和硫酸根离子,矿渣-钢渣-石膏胶凝材料体系以钙矾石的生成驱动力,推动水化反应持续进行.

参考文献:

[1] 中华环保联合会固危废治理专业委员会. 2017 年度中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告[R]. 北京: 工业固废网, 2018.
(All-China Environment Federation Professional Committee for the Treatment of Solid and Endangered Wastes. Development report on comprehensive utilization of large industrial solid waste in China in 2017 [R]. Beijing: Industrial Solid Waste Network, 2018.)

[2] Jiang Y, Ling T C, Shi C J, et al. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—a review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 136: 187 – 197.

[3] Wang Q, Yan P Y, Yang J W, et al. Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 1414 – 1420.

[4] Kourounis S, Tsivilis 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.

[5] Nochaiya T, Wongkeo W, Chaipanich A. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete[J]. *Fuel*, 2010, 89(3): 768 – 774.

[6] Radlinski M, Olek J. Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing Portland cement, fly ash and silica fume [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(4): 451 – 459.

[7] Zhao J H, Wang D M, Yan P Y, et al. Self-cementitious property of steel slag powder blended with gypsum [J].

Construction and Building Materials, 2016, 113: 835 – 842.

[8] Shabab M E, Shahzada K, Gencturk B, et al. Synergistic effect of fly ash and bentonite as partial replacement of cement in mass concrete [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(5): 1987 – 1995.

[9] Liu J, Wang D M. Application of ground granulate blast furnace slag-steel slag composite binder in a massive concrete structure under severe sulphate attack [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017: 1 – 9.

[10] Cho B S, Choi Y C. Hydration properties of STS-refining slag-blended blast furnace slag cement [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018: 1 – 9.

[11] Muhmood L, Vitta S, Venkateswaran D. Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags [J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(2): 102 – 109.

[12] Wang Q, Yan P Y, Mi G D. Effect of blended steel slag-GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35: 8 – 14.

[13] Duan S, Liao H Q, Cheng F Q, et al. Investigation into the synergistic effects in hydrated gelling systems containing fly ash, desulfurization gypsum and steel slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 1113 – 1120.

[14] 崔孝炜, 倪文, 任超. 钢渣矿渣基全固废胶凝材料的水化反应机理[J]. 材料研究学报, 2017(9): 687 – 694.
(Cui Xiao-wei, Ni Wen, Ren Chao. Hydration mechanism of all solid waste cementitious materials based on steel slag and blast furnace slag [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2017(9): 687 – 694.)

[15] 张作顺, 徐利华, 赛音巴特尔, 等. 钢渣矿渣掺合料对水泥性能的影响[J]. 金属矿山, 2010(7): 173 – 176.
(Zhang Zuo-shun, Xu Li-hua, Sayinbater, et al. Effect of concrete admixture of steel slag and blast furnace slag on cement performances [J]. *Metal Mine*, 2010(7): 173 – 176.)

[16] Ji X, Hou J, Liu Y, et al. Effect of CaO-FeO-MnO system solid solution on the hydration activity of tri-component f-CaO in steel slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 476 – 484.



(上接第 567 页)

[8] Parker T, Shi F N, Evans C, et al. The effects of electrical comminution on the mineral liberation and surface chemistry of a porphyry copper ore [J]. *Minerals Engineering*, 2015, 82: 101 – 106.

[9] Zhang X L, Lin B Q, Li Y J, et al. Enhancement effect of NaCl solution on pore structure of coal with high-voltage electrical pulse treatment [J]. *Fuel*, 2019, 235: 744 – 752.

[10] Murakami K, Dosho Y, Uemura K, et al. Concrete demolition and surface scraping using high voltage pulse discharge [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, 16(8): 358 – 367.

[11] Duan C L, Han J, Zhao S, et al. The stripping effect of using high voltage electrical pulses breakage for waste printed circuit boards [J]. *Waste Management*, 2018, 77: 603 – 610.

[12] Akimoto Y, Iizuka A, Shibata E. High-voltage pulse crushing and physical separation of polycrystalline silicon photovoltaic panels [J]. *Minerals Engineering*, 2018, 125: 1 – 9.

[13] 余建文, 韩跃新, 李艳军, 等. 东鞍山贫铁矿石磁选预富集行为 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 94 – 98.
(Yu Jian-wen, Han Yue-xin, Li Yan-jun, et al. Pre-enrichment behaviors of low-grade Donganshan iron ore using magnetic separation [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(1): 94 – 98.)

[14] Zhu C J, Lu X M, Lin B Q, et al. Experimental study on the microscopic characteristics affecting methane adsorption on anthracite coal treated with high-voltage electrical pulses [J]. *Adsorption Science and Technology*, 2018, 36(1/2): 170 – 181.