

# 矿渣活性激发方式的研究进展

张 雄, 鲁 辉, 张永娟, 赵 明

(同济大学建筑材料研究所 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘 要:** 粒化高炉矿渣具有潜在的水硬性, 作为水泥混合材和混凝土掺合料代替熟料和水泥, 不仅节约资源和能源、减少 CO<sub>2</sub> 排放, 还能改善混凝土的性能。主要论述了影响矿渣潜在水硬活性的因素, 介绍了矿渣活性激发方式的研究进展并比较了各活性激发方式的优缺点, 探讨了该领域的发展方向, 即寻找更为有效的化学激活剂、提高机械激活效率、探索有效且成本较低的养护制度以及三种活性激发方式的复合运用。

**关键词:** 矿渣; 化学激活; 机械激活; 热激活

中图分类号: X757

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)03-0379-06

2009年12月7日在哥本哈根召开的世界气候大会上碳排放问题成为各国关注的焦点。我国政府承诺到2020年单位GDP排放量比2005年降低40%到45%。我国是建材工业大国, 其中的水泥混凝土产业对资源和环境影响极大。据统计, 每生产1 t水泥, 需要消耗约1.2 t石灰石、150 kg标准煤, 同时排放约0.87 t CO<sub>2</sub>。全球范围内, 水泥工业向大气中排放的CO<sub>2</sub> 占总排放量的7%左右<sup>[1]</sup>。

矿渣是高炉冶炼生铁时的副产物在1 400~1 500 °C下由铁矿石的土质成分和石灰石助熔剂熔融化合而成的工业废渣。矿渣具有潜在的水硬性, 作为水泥混合材和混凝土掺合料代替熟料和水泥, 不仅具有经济和环境效益, 即节约资源和能源、减少 CO<sub>2</sub> 排放, 还具有技术效益<sup>[2]</sup>, 如降低水化热、改善和易性、孔结构、后期强度高、耐高温及耐久性(耐酸性、抗硫酸盐侵蚀性、抗钢筋锈蚀性)好等。

本文主要论述了影响矿渣潜在水硬活性的因素, 介绍了矿渣活性激发方式的研究进展并比较了各活性激发方式的优缺点, 探讨了该领域的发展方向。

## 1 影响矿渣活性的因素

矿渣具有潜在的水硬性, 化学组成、玻璃体含量、细度和养护温度等是影响其活性的主要因素。

### 1.1 化学组成

矿渣的化学组成因矿石的成分而异, 但是大体上包含27%~42%SiO<sub>2</sub>、30%~50%CaO、5%~33%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和0~21%MgO<sup>[3]</sup>。其中, CaO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>是矿渣活性的主要来源, 水化形成水化硅酸钙、水化铝酸钙和铝硅酸盐。GB/T 203—2008《用于水泥中的粒化高炉矿渣》中用质量系数 $K((CaO + MgO + Al_2O_3)/(SiO_2 + TiO_2 + MnO))$ 来表征矿渣的活性, 并规定 $K \geq 1$ 。2. 碱性系数 $B((CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2)$ 也可以用来表征矿渣的活性。B越大, 在碱激活剂存在的条件下矿渣的水硬活性越高。Itouh<sup>[4]</sup>研究了矿渣的各种参数与混凝土抗压强度( $F_c$ )的关系。结果表明, 矿渣中CaO含量与 $F_c$ 正相关, 而SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量与 $F_c$ 负相关。

### 1.2 玻璃体

矿渣是结晶相和玻璃相的聚合体, 前者是惰性成分, 后者是活性成分。玻璃相的含量越多, 矿渣的活性越高; 对于玻璃相而言, 玻璃网络的聚合度越小, 其活性越高。关于玻璃相的结构, 一些人认同网络学

收稿日期: 2011-03-01 修改稿日期: 2011-04-12

基金项目: 973项目(2009CB623104)

作者简介: 张 雄(1956—), 男, 台湾台北人, 博士, 教授, 主要从事建筑结构与功能材料方面的研究。

说<sup>[5]</sup>,认为玻璃体具有连续的网络结构,由网架形成体和网架改性体组成.具体而言,矿渣是由硅氧四面体 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 形成的三维空间网络, $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Al}^{3+}$ 等阳离子作为改性物质位于网络的空隙中,平衡阴离子团的负价.随着测试手段的深入,利用透射电镜结合电子探针元素分析观测到矿渣玻璃体具有分相结构,由连续的富钙相和非连续的富硅相组成,其中富钙相占多数,富硅相分散于富钙相中.富钙相具有较高的热力学不稳定性,是矿渣活性的主要来源之一<sup>[6]</sup>.

### 1.3 细度

一般而言,矿渣的活性随其细度的增加而增大.张永娟等<sup>[7]</sup>的研究表明,在矿渣低掺量(质量分数25%)时,矿渣水泥早期(7 d)胶砂活性指数与其总体细度、水泥与矿渣的细度差均有关,即细度差愈大,总体细度愈小,活性指数愈高;当矿渣掺量大于50%时,细度差与早期活性的关联性较大,即细度差愈大,活性指数愈高,矿渣水泥后期(28 d)胶砂活性则与其总体细度的关联性较大,即总体细度愈大,活性愈高;水泥与矿渣的细度愈接近,活性愈高.

### 1.4 养护温度

与硅酸盐水泥相比,矿渣的表观活化能较高,因此,对温度较敏感.矿渣砂浆的早期强度发展对温度的依赖性很高.在标准养护条件下,矿渣砂浆的强度增长比硅酸盐水泥砂浆慢.但是在较高温度下,强度增长较快,而且矿渣掺量较大时早期强度增长更为显著. Barnett 等<sup>[8]</sup>研究了养护温度对矿渣砂浆强度发展的影响.结果表明,养护温度高于标准温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 就能显著加快大掺量矿渣砂浆的强度发展; $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,矿渣砂浆的3 d强度已经和硅酸盐水泥砂浆相当.

## 2 矿渣活性激发方式的研究进展

矿渣的潜在水硬性需要一定的手段来激发.目前,矿渣的激活手段主要有化学激活、机械激活和热激活.

### 2.1 化学激活

化学激活是指采用某些化学试剂来激发矿渣的潜在活性.碱激活和硫酸盐激活是两种最常用的化学激活方法.

#### (1)碱激活

粒化高炉矿渣在纯水中的水化速度很慢,原因可能是矿渣与水接触后立即在颗粒表面形成一层不透水的铝硅酸盐薄膜,阻止了其进一步水化<sup>[3]</sup>.碱激活剂能够加快矿渣玻璃体的解体,促进矿渣的水化过程. Palomo 等<sup>[9]</sup>将碱激活剂分为六大类:(1)烧碱, $\text{MOH}$ ;(2)弱酸(非硅酸)盐, $\text{M}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{M}_2\text{SO}_3$ 、 $\text{M}_3\text{PO}_4$ 、 $\text{MF}$ 等;(3)硅酸盐, $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ;(4)铝酸盐, $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ ;(5)铝硅酸盐, $\text{M}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2 \sim 6)\text{SiO}_2$ ;(6)强酸盐, $\text{M}_2\text{SO}_4$ ( $\text{M}$ 代表碱金属元素).其中, $\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 和 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 最为常用和经济.对于碱激活矿渣水泥而言,决定其净浆和砂浆强度的主要因素包括矿渣和激活剂的性质、激活剂掺量、养护温度、水胶比及矿渣细度等. Sajedi 等<sup>[2]</sup>研究了化学激活剂对普通硅酸盐水泥-矿渣砂浆早期强度的影响, $\text{NaOH}$ 、 $\text{KOH}$ 和 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 的掺量分别为2%、4%和6%的 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{O}$ .结果表明, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 的效果最好, $\text{NaOH}$ 的效果最差. Zivica<sup>[10]</sup>以 $\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 为激活剂研究了激活剂种类和掺量对新拌碱激活矿渣水泥凝结时间及和易性的影响. Atis 等<sup>[11]</sup>以 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{NaOH}$ 和 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 为激活剂研究了其对碱激活矿渣砂浆强度和干缩的影响并推荐采用 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 作为矿渣砂浆的激活剂,原因是与硅酸盐水泥砂浆相比,以 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 为激活剂的矿渣砂浆具有足够的强度、相似的凝结时间及较小的收缩.

#### (2)硫酸盐激活

硫酸盐激活剂(如 $\text{M}_2\text{SO}_4$ 、石膏等)在矿渣解体后能够与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 反应生成钙矾石从而提高早期强度,10%~20%硫酸钙(主要以无水石膏的形式)、75%~90%矿渣和少量普通硅酸盐水泥的混合物被称

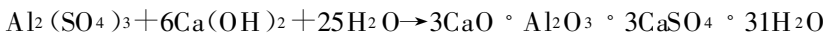
为过硫酸盐水泥 (supersulphated cement, SSC)<sup>[12]</sup>. Chen 等<sup>[13]</sup> 研究了硫酸钠激活 SSC 的水化特征. 结果表明: (1)SSC 的主要水化产物为低钙硅比的 C-S-H 凝胶及含碱金属阳离子的沸石型和三硫型水化硫铝酸钙 AFt 型晶体; (2)水化产物中不存在单硫型水化硫铝酸钙 AFm 和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 因此提高了体系的强度和耐久性; (3)含  $\text{Na}^+$  的沸石型和 AFt 型结晶相极大地降低了游离碱含量, 减轻了碱骨料反应对体系的危害; (4)与普通硅酸盐水泥相似, SSC 的水化过程可以分为五个阶段, 即水化初始期、诱导期、加速期、减速期和衰减期; (5)表现活化能随体系中矿渣含量的增加而增大且升高温度能够促进 SSC 的水化. Gruskovnjak 等<sup>[14]</sup> 研究了无水石膏和少量碱激活 SSC 的水化和强度发展过程. 结果表明, 掺加  $\text{Al}(\text{SO}_4)_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  能够提高低活性矿渣水化产物中钙矾石的含量.

### (3) 碱-硫酸盐复合激活

碱激活是硫酸盐激活的前提, 实际应用中往往将两者复合起来. 马保国等<sup>[15]</sup> 以矿渣、钢渣、晶种、表面活性剂和激活剂为组分发明了一种高活性混凝土掺合料. 其中, 激活剂采用硫酸盐与碳酸盐复合体系或硫酸盐与碱化合物复合体系. 该掺合料 50% 取代普通硅酸盐水泥时, 混凝土各龄期强度均高于对比混凝土. 和兴民<sup>[16]</sup> 以轻质水玻璃、烧石膏、烧石灰和元明粉为组分发明了一种矿渣复合激活剂. 在水泥生产中加入该复合激活剂可大大提高矿渣掺量.

### (4) 活性铝激活

$\text{CaO}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  是矿渣活性的主要来源. 一般地,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量高, 矿渣活性也高. 因此, 向矿渣中掺入铝盐或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  也能够激发其活性. 活性  $\text{Al}^{3+}$  与矿渣的水化液相离子具有一定的互补性, 矿渣的水化反应被诱导加速, 使玻璃体中网络配位离子  $\text{Ca}^{2+}$  被不断地萃取, 玻璃体网络结构被不断地瓦解, 表现出较高的水化活性. 张冠伦等<sup>[17]</sup> 以矾泥、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、粉煤灰和木钙等为组分配制了一种矿渣水泥混凝土外加剂并研究了该外加剂对矿渣水泥的作用机理. 矾泥中的硫酸铝与水泥熟料水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的反应是一种不需要 C3A 就能生成钙矾石的反应, 即:



该反应消耗氢氧化钙, 可以加速熟料的早期水化速度. 与此同时, 随着熟料水化速度的加快, C-S-H 凝胶显著增多, 也有利于早期强度的发展. A aron 等<sup>[18]</sup> 研究了硅铝比对碱激活矿渣混凝土微结构和力学性能的影响. 结果表明, 掺入少量  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2% 矿渣) 能够显著提高混凝土的强度. 烧高岭土能够提高混凝土的强度特别是早期强度, 其主要成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$ , 与矿渣的化学组成有一定的互补性. 有研究者尝试将烧高岭土掺入矿渣混凝土中, 以弥补早期强度较低的缺陷. Khatib 等<sup>[19]</sup> 的研究表明, 10% 是矿渣混凝土中烧高岭土的最佳掺量. Buchwald 等<sup>[20]</sup> 研究了碱激活烧高岭土-矿渣体系的反应进程, 认为烧高岭土提高了体系孔溶液中的铝含量并且通过引入铝四面体加快了 C-S-H 凝胶的形成.

## 2.2 机械激活

机械激活是指通过粉磨将机械能转化为矿渣的表面能从而提高其活性的一种方法. 延长粉磨时间不仅能够提高矿渣的比表面积, 使其与侵蚀液之间的反应加速, 而且能够增加缺陷或活性中心的数量, 这些地方原子间距离异常或有杂原子嵌入, 处于比正常结构能量高的状态. 缺陷或活性中心越多, 矿渣的活性越高<sup>[21]</sup>. 靳秀芝等<sup>[22]</sup> 研究了矿渣粉比表面积和掺量对掺矿渣粉水泥强度的影响. 结果表明, 矿渣水泥的抗压强度随着矿渣比表面积的增加而增大, 且提高矿渣粉细度更有利于提高矿渣水泥的早期强度. 张永娟等<sup>[23]</sup> 研究了多种化学试剂对矿渣粉磨的影响, 结果发现多元醇、胺类、硫酸盐、萘系和铝酸盐均有明显的助磨效果, 对矿渣水泥各龄期胶砂强度有不同程度的提高. 其中, 以多元醇为助磨剂的矿渣制得的胶砂早期强度较高, 以胺类为助磨剂的矿渣制得的胶砂 28 d 强度较高.

## 2.3 机械-化学复合激活

近年来, 国内外许多科研人员致力于机械-化学复合激活矿渣的研究并取得了一定的成果. Roy 等<sup>[24]</sup> 发现将  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  与大掺量矿渣水泥混磨, 不仅可以对矿渣进行化学激活, 使矿渣掺量达到 40% ~

60%,还可以作为助磨剂有利于矿渣水泥的粉磨.掺量为 1%时激活效果最佳;掺量为 1.5%时,比表面积增加  $25\text{ m}^2/\text{kg}$ .崔崇等<sup>[25]</sup>研究了在粉磨、碱激活和硫酸盐激活复合作用下大掺量矿渣的活性激发与强度的关系.结果表明,对矿渣进行复合激活可显著提高大掺量矿渣水泥的早期和后期强度.在工业生产中应用可生产高标号少熟料和无熟料砌筑水泥.白光辉等<sup>[26]</sup>以氧化钙、明矾石、三聚磷酸钠、亚硫酸钠、芒硝、甲酸钾及三异丙醇胺等为组分发明了一种高强复合水泥添加剂.粉磨前将该添加剂掺入熟料和矿渣中,熟料用量可低至 30%,在保证水泥性能的同时极大地降低了生产成本.

## 2.4 热激活

热激活是指通过提高养护温度来激发矿渣活性的一种方法.与水泥熟料相比,矿渣玻璃相具有较高的表观反应活化能,因此,矿渣水泥对温度的敏感性高于硅酸盐水泥,提高养护温度对矿渣水泥的水化更为有利.Sajedi 等<sup>[27]</sup>研究了普通硅酸盐水泥-矿渣砂浆的热激活.结果表明,60℃是获得较高早期强度的最佳养护温度,而 20 h 是最佳的持续时间,试件的 3 d 和 7 d 强度分别比常温养护的高 64.5%和 66.5%.路青波等<sup>[28]</sup>的研究也表明矿渣净浆的强度随养护温度的提高而增大,即温度对矿渣潜在活性的激发有很大的影响.

## 3 各活性激发方式的比较

综上所述,化学激活、机械激活和热激活都可以激发矿渣的潜在水硬性.但是,这三种方式都有其优缺点.Bougara 等<sup>[29]</sup>研究了这三种方式对矿渣的激活效果.结果表明:(1)矿渣砂浆的后期强度随矿渣细度的增加而增大;(2)提高养护温度能够提高矿渣砂浆的早期强度,但是后期强度有所降低;(3)碱激活时早期强度较低且至少 90 d 才能达到中等强度.Sajedi 等<sup>[30]</sup>比较了普通硅酸盐水泥-矿渣砂浆活性激发的三种方式.结果表明:(1)1 d 时,化学激活的效果居中,其余龄期其效果均最差;3 d 时热激活的强度最高;7 d 以后,机械激活的效果最好;(2)尽管机械激活和热激活的成本较高,但是这两种方式激活的强度较高,因此可以作为简单可行的活性激发方式.化学激活仅在 1 d 时对强度有积极贡献,3~90 d 时强度反而降低,因此不作为可行的活性激发方式.

## 4 结 语

据估计,2008 年我国矿渣产量约 2 亿 t,其中约 99.3%用于水泥混凝土产业中.随着矿渣在水泥混凝土中应用的深入,大掺量矿渣混凝土具有广阔的发展前景<sup>[31]</sup>.化学激活、机械激活和热激活的研究虽然取得了一定进展,但是国内外对这三种活性激发方式的激活效果尚未达成共识,有待进一步研究.而且,激活效果仅局限于强度方面,对耐久性的研究还十分有限.因此,寻找更为有效的化学激活剂、提高机械激活效率、探索有效且成本较低的养护制度以及三种活性激发方式的复合运用将成为未来矿渣活性激发方式的发展方向.

## 参考文献 References

- [1] HALE W M, FREYNE S F, BUSH Jr T D, et al. Properties of concrete mixtures containing slag cement and fly ash for use in transportation structures[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(9): 1990-2000.
- [2] SAJEDI F, RAZAK H A. The effect of chemical activators on early strength of ordinary Portland cement-slag mortars[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(10): 1944-1951.
- [3] JUENGER M C G, MONTEIRO P J M, GARTNER E M. In situ imaging of ground granulated blast furnace slag hydration[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(21): 7074-7081.
- [4] ITOH T. Rapid discrimination of the character of the water-cooled blast furnace slag used for Portland slag cement[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(6): 2191-2193.

- [ 5 ] 吕晓姝, 史可信, 翟玉春. 粒状高炉矿渣的研究和利用进展[ J ]. 材料导报, 2005, 19(S1): 382-384.  
Lǚ Xiao-shu, SHI Ke-xin, ZHAI Yu-chen. Investigation and Utilization of Ground Granulated Blast Furnace Slag [ J ]. Materials Review, 2005, 19(S1): 382-384.
- [ 6 ] 徐 彬, 蒲心诚. 矿渣玻璃体分相结构与矿渣潜在水硬活性本质的关系探讨[ J ]. 硅酸盐学报, 1997, 25(6): 729-733.  
XU Bin, PU Xin-cheng. Study on the relationship between the phase separation of slag glass and the latent hydraulic activity of BFS[ J ]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1997, 25(6): 729-733.
- [ 7 ] 张永娟, 张 雄. 矿渣水泥活性研究[ J ]. 同济大学学报, 2005, 33(2): 208-211.  
ZHANG Yong-juan, ZHANG Xiong. Study on activity of slag cement[ J ]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(2): 208-211.
- [ 8 ] BARNETT S J, SOUTSOS M N, MILLARD S G, et al. Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies[ J ]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 434-440.
- [ 9 ] PALOMO A, GRUTZECK M W, BLANCO M T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future[ J ]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(8): 1323-1329.
- [ 10 ] ZIVICA V. Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures[ J ]. Construction and Building Materials, 2007, 21(7): 1463-1469.
- [ 11 ] ATIS C D, BILIM C, CELIK O, et al. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar[ J ]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 548-555.
- [ 12 ] BELLMANN F, STARK J. Activation of blast furnace slag by a new method[ J ]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(8): 644-650.
- [ 13 ] CHEN Y Z, PU X C. Hydration characteristics of sodium sulfate slag cement system[ J ]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, 16(4): 45-47.
- [ 14 ] GRUSKOVNJAK A, LOTHENBACH B, WINNEFELD F, et al. Hydration mechanisms of super sulphated slag cement[ J ]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(7): 983-992.
- [ 15 ] 马保国, 李宗津, 李永鑫. 高活性混凝土掺合料的制备技术和方法: 中国, CN 1262254[ P ]. 2000.  
MA Bao-guo, LI Zong-jin, LI Yong-xin. Preparation technique of high activity concrete admixture: China, CN 1262254[ P ]. 2000.
- [ 16 ] 和兴民. 复合激发剂: 中国, CN 1330051[ P ]. 2002.  
HE Xing-min. Composite activating agent: China, CN 1330051[ P ]. 2002.
- [ 17 ] 张冠伦, 方 元. H 型混凝土早强减水剂对矿渣水泥作用机理的研究[ J ]. 混凝土与水泥制品, 1983 (3): 43-49.  
ZHANG Guan-lun, FANG Yuan. Research on mechanism of H-type early strength and water-reducing admixture on slag cement[ J ]. China Concrete and Cement Products, 1983 (3): 43-49.
- [ 18 ] SAKULICH A R, ANDERSON E, SCHAUER C L, et al. Influence of Si<sub>2</sub>/Al ratio on the microstructural and mechanical properties of a fine-limestone aggregate alkali-activated slag concrete[ J ]. Materials and Structures, 2010, 43(7): 1025-1035.
- [ 19 ] KHTIB J M, HIBBERT J J. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin[ J ]. Construction and Building Materials, 2005, 19(6): 460-472.
- [ 20 ] BUCHWALD A, TATARIN R, STEPHAN D. Reaction progress of alkaline-activated metakaolin-ground granulated blast furnace slag blends[ J ]. Journal of Materials Science, 2009, 44(20): 5609-5617.
- [ 21 ] SAJEDI F, RAZAK H A. Effects of thermal and mechanical activation methods on compressive strength of ordinary Portland cement - slag mortar[ J ]. Materials and Design, 2011, 32(2): 984-995.
- [ 22 ] 靳秀芝, 赵宏杰, 韩 涛, 等. 矿渣粉细度分类与优化[ J ]. 中北大学学报, 2010, 31(3): 269-274.  
JIN Xiu-zhi, ZHAO Hong-jie, HAN Tao, et al. Classification and optimization of fineness of slag powder[ J ].

- Journal of North University of China, 2010, 31(3): 269-274.
- [ 23] 张永娟, 张 雄. 矿渣助磨剂的试验研究[ J] . 水泥, 2003 (4): 9-12.  
ZHANG Yong-juan, ZHANG Xiong. Research on slag grinding aid[ J] . Cement, 2003 (4): 9-12.
- [ 24] ROY S, CHANDA S, BANDOPADHYAY S K, et al. Investigation of Portland slag cement activated by water-glass[ J] . Cement and Concrete Research, 1998, 28(7): 1049-1056.
- [ 25] 崔 崇, 谢运波, 朱守东. 少熟料水泥中大掺量矿渣激发条件的研究[ J] . 水泥, 2000 (2): 13-16.  
CUI Chong, XIE Yun-bo, ZHU Shou-dong. Research on activation of slag in cement with low amount of clinker [ J] . Cement, 2000 (2): 13-16.
- [ 26] 白光辉, 孔令骥, 孔德方, 等. 高强复合水泥添加剂: 中国, CN 101164951 [ P] . 2008.  
BAI Guang-hui, KONG Ling-ji, KONG De-fang, et al. Admixture for high strength cement; China, CN 101164951 [ P] . 2008.
- [ 27] SAJEDI F, RAZAK H A. Thermal activation of ordinary Portland cement-slag mortars[ J] . Materials and Design, 2010, 31(9): 4522-4527.
- [ 28] 路青波, 杨全兵. 影响矿渣潜在活性激发的主要因素研究[ J] . 混凝土与水泥制品, 2005(6): 13-14.  
LU Qing-bo, YANG Quan-bing. Influencing factors to activate the potential activity of slag[ J] . China Concrete and Cement Products, 2005(6): 13-14.
- [ 29] BOUGARA A, LYNSDALE C, EZZIANE K. Activation of Algerian slag in mortars[ J] . Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 542-547.
- [ 30] SAJEDI F, RAZAK H A. Comparison of different methods for activation of ordinary Portland cement-slag mortars[ J] . Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 30-38.
- [ 31] 程福安, 魏瑞丽, 李 辉. 粒化高炉矿渣资源化利用的技术现状[ J] . 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(3): 446-450.  
CHENG Fu-an, WEI Rui-li, LI Hui. Status of recycling technology of blast furnace slag[ J] . J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(3): 446-450.

## Research progress of slag activation

ZHANG Xiong, LU Hui, ZHANG Yong-juan, ZHAO Ming

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials, Ministry of Education,  
Institute of Building Materials, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract** Ground granulated blast furnace slag has latent hydraulic activity and its application in cement and concrete as dinker and cement replacement can not only save resource and energy, reduce CO<sub>2</sub> emission but also improve the concrete property. This paper mainly presents the factors that affect its latent hydraulic activity, introduces the research progress of activation of slag and compares the activation methods and shows the research direction in this field. Future research on searching for more effective chemical activator, enhancing the efficiency of mechanical activation, exploring effective. The low cost curing regime and the combination of each activation method is also discussed.

**Key words** slag; chemical activation; mechanical activation; heat activation