

高炉渣的化学成分对其微观结构影响的研究现状

严照照, 张淑会, 董晓旭, 吕庆, 刘小杰, 郟亚娜

(华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009)

摘要: 高炉渣的化学成分对其微观结构具有重要影响, 改变高炉渣的化学成分, 高炉渣的微观结构也发生改变。本文综述了碱度、 MgO/Al_2O_3 比值及 MgO 、 Al_2O_3 化学成分对高炉渣微观结构的影响, 高炉渣主要为硅氧四面体相互连接成的网络结构, Ca^{2+} 和 Na^+ 等离子进入到炉渣网络结构中破坏了硅酸盐网络结构, 促使硅酸盐中简单结构单元增多; Al^{3+} 、 Ti^{4+} 和 B^{3+} 等离子在不同环境中对高炉渣微观结构起到不同作用, 既可以使炉渣网络结构复杂化, 也可以使炉渣网络结构转变为较小的结构单元。并指出了关于化学成分对中钛渣微观结构影响是中钛渣的研究重点。

关键词: 高炉渣; 微观结构; 硅酸盐; 中钛渣

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.01.005

中图分类号: TD988;TF524

文献标志码: A

文章编号: 1000-6532 (2019) 01-0022-06

钢铁工业在我国工业中占有重要地位, 特别是近几年来, 我国钢铁工业迅猛发展, 设备大型化、智能化炼钢厂, 成为世界上粗钢产量最大的国家。在迅速发展的同时, 钢铁工业产生的二次固体废弃物资源越来越多, 特别是高炉渣和转炉渣。与国外相比, 我国炉渣的利用率比较低^[1]。高炉渣主要成分为 $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3$ (普通高炉渣) 和 $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-TiO_2$ (含钛高炉渣), 转炉渣主要成分为 $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3-FeO$ 。国内普通高炉渣主要用水泥掺和料, 以及水泥、矿渣棉、陶瓷、玻璃制造等行业^[2-3], 而含钛高炉渣和转炉渣因其细磨处理困难等原因目前难以实现大规模利用^[4]。炉渣属于多组元硅酸盐混合物, 其微观结构决定了炉渣的活性、可磨性等物理化学性质。研究炉渣的微观结构, 不仅可以了解其在熔融状态下的性能, 实现冶炼操作, 亦可以对其进行高温改质等处理手段来改善炉渣的微观结构, 从而对其宏观性质加以调控, 便于实现炉渣资源的高附加值资源化利用。

1 高炉渣微观结构的主要研究方法 及高炉渣的结构组成

研究高炉渣微观结构是了解其冶金性能的重要部分, 也是改善高炉渣冶金性能的主要手段。目前, 研究高炉渣微观结构的方法主要有拉曼光谱 (Raman) 分析、红外光谱分析 (FTIR)、核磁共振分析 (NMR) 等测试分析技术, 同时与炉渣样品的扫描电镜分析 (SED 和 EDS) 和 X 射线衍射分析 (XRD) 等技术相结合还可以得到炉渣的矿物组成和微观形貌, 从而对炉渣微观结构更好的认识。

高炉渣属于硅酸盐体系, 在硅酸盐熔体中, 模式理论^[5]认为硅酸盐体系主要以硅氧四面体 $[SiO_4]$ 通过聚合作用相互连接成网络结构。硅酸盐网络结构中的氧根据其在网络结构中不同的位置可以分成三种, 分别为桥氧、非桥氧和自由氧^[6-7], 其中桥氧对硅酸盐网络结构的连接起到了决定性作

收稿日期: 2017-07-18; 改回日期: 2017-08-14

基金项目: 河北省钢铁联合基金资助项目 (E2015209073); 华北理工大学杰出青年基金资助项目 (JP201508)

作者简介: 严照照 (1991-), 男, 硕士生, 从事炼铁理论与工艺研究。

通讯作者: 张淑会 (1976-), 女, 博士, 教授, 从事炼铁及资源综合利用的研究。

用，桥氧将网络结构中的四面体结构单元相互连接起来^[8]，根据结构单元连接中桥氧数不同，可将结构单元划分为单体 $\text{SiO}_4^{4-}(\text{Q}_0)$ 、二聚体 $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}(\text{Q}_1)$ 、链状 $\text{Si}_2\text{O}_6^{4-}(\text{Q}_2)$ 、层状 $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}(\text{Q}_3)$ 和网络状 $\text{SiO}_2(\text{Q}_4)$ ^[9]。同时可用每个单位非桥氧数表示硅酸盐网络结构的聚合度，用 NBO/T 表示^[6-10]。通过高炉渣的化学成分变化，高炉渣的网络结构也会发生改变。

2 高炉渣的化学成分对其微观结构的影响

2.1 碱度对高炉渣微观结构的影响

适宜的碱度对高炉冶炼过程起到了至关重要的作用。碱度过高，导致渣中的高熔点化合物增多，高炉渣的流动性变差，渣铁不易分离；碱度过低，使高炉渣脱硫能力降低，同时高炉渣易于侵蚀炉衬。因此有必要研究碱度对高炉渣结构的影响以确定适当的碱度。郝金龙^[11]用红外光谱研究了碱度对高炉渣微观结构的影响，研究发现随着渣的碱度增大，炉渣中桥氧的总数量减少， Si-O 中 Q_0 、 Q_1 含量增多， Q_2 、 Q_3 含量减少，但是在炉渣中占据主导地位的还是 Si-O-Si 与 Al-O-Si 结构，表明渣中 CaO 含量增加，使炉渣中自由氧离子增多，自由氧离子与炉渣中的桥氧相互作用，使硅酸盐网络结构逐渐解聚。

Lingtao Bian^[6]在高温状态下应用高温黏度计研究了碱度对高炉渣黏度的影响，发现高炉渣黏度随着碱度的提高而降低，主要由于网络结构发生了改变，高炉渣网络结构中的 $\text{Si}_2\text{O}_6^{4-}$ 解聚转变为 $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$ ，即渣中的 Q_2 减少， Q_1 增多，导致网络结构聚合度降低。诸建阳^[12]采用红外光谱研究不同碱度对含铬高钛高炉渣结构的影响。研究发现碱度在 0.9 ~ 1.1 时， Q_n 值变化不明显，当碱度增加到 1.2 和 1.3 时， Q_3 深度略变浅，随着炉渣碱度增大，渣中的 O^{2-} 浓度增大， O^{2-} 破坏了复杂硅酸根离子团，炉渣结构由复杂变得简单。储满生^[13]采用熔体物性综合测定仪来研究不同碱度对钒钛

磁铁矿高炉渣黏度的影响。研究发现，随着碱度提高，炉渣中的碱性氧化物向高温熔体中提供了大量的自由 O^{2-} ，使高炉渣中的复合阴离子 $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$ 逐渐解聚成简单结构单元，使炉渣黏度降低。

2.2 MgO 对高炉渣微观结构的影响

随着炉渣中的 Al_2O_3 、 TiO_2 等含量增加，炉料结构发生改变，高炉渣冶金性能也发生改变，特别是炉渣流动性。目前在高炉冶炼过程中，高炉渣中含有一定量的 MgO 可以改善其流动性，不同 MgO 含量炉渣的微观结构差异很大，对冶金性能的影响亦不相同。企业通过各种方式往高炉中加含镁添加剂，同时也有学者对其机理进行了深入研究。李洪玮^[14]用拉曼光谱分析了硅酸盐熔体的微观结构变化。在改变炉渣中 MgO 和 CaO 的含量时发现，在硅酸盐渣中 Ca^{2+} 的结合能力和稳定性与 Mg^{2+} 并不相同， Ca^{2+} 只能存在于 2 个四面体之间电荷补偿，而 Mg^{2+} 既可以在一个四面体上进行电荷补偿，也可以在 2 个四面体之间进行电荷补偿，对体系的聚合度产生了影响，导致 Q_n 发生改变。刘超^[15]采用 Factsage 热力学软件研究了 MgO 对四元炉渣黏度影响。研究发现，在高温状态下增加渣中 MgO 含量，可使渣中的 O^{2-} 增多， O^{2-} 进入到渣中破坏了硅酸盐网络结构，降低了离子团的聚合度，使炉渣黏度降低，改善了炉渣的流动性。彭波^[16]研究了 MgO 含量对含钛炉渣黏度与熔化性温度的影响。研究发现，随着 MgO 含量的增加，炉渣中 O^{2-} 离子浓度增多，降低了炉渣中阴离子团的聚合度，同时减少了 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 生成，因此炉渣黏度和熔化性温度都降低。孙长余^[17]研究了 MgO 含量对高铝高炉渣脱硫能力的影响，研究发现，随着炉渣中 MgO 含量的增加，增加了高炉渣中 O^{2-} 离子，使渣中的复杂网络离子团解体为结构简单的离子，如 $\text{Al}_x\text{O}_y^{z-}$ 和 $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$ ，改善了炉渣脱硫动力学。

2.3 Al_2O_3 对高炉渣微观结构的影响

随着钢铁冶金行业冶炼技术的进步，多数企业的原燃料条件亦发生了较大的变化。为了降低

生产成本,在经济配矿的原则下,高炉开始使用高 Al_2O_3 等复杂铁矿石作为入炉原料。在上述冶炼条件下,炉渣中 Al_2O_3 含量较高,使炉渣的黏度增大,流动性变差,炉渣的冶金性能亦变差。为了对高 Al_2O_3 炉渣冶金性能进行更好的调控,冶金工作者对其微观结构进行了深入研究。许仁泽^[18]采用旋转柱体法研究了 Al_2O_3 含量对五元高炉渣黏度的影响。研究发现,随着渣中 Al_2O_3 含量增加,炉渣黏度也增大,即在渣中 Al_2O_3 是两性氧化物,在该试验范围内 Al_2O_3 呈现酸性,为网络形成子,在炉渣中以 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 形式存在,使炉渣的聚合度增加,网络结构更加复杂,因此炉渣黏度也随之增大。张杰^[19]采用拉曼光谱研究 Al_2O_3 对高铝高炉渣结构的影响。研究发现,渣中Si-O和Al-O聚合结构单元数量随着渣中 Al_2O_3 含量的变化而变化,随着渣中 Al_2O_3 含量的增加, $\text{Si}((\text{Q}_2+\text{Q}_3)/(\text{Q}_0+\text{Q}_1))$ 聚合单元的百分含量比值先增加后降低,其临界值为 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=24\%$, $\text{Al}(\text{Q}_2/(\text{Q}_0+\text{Q}_1))$ 聚合单元的百分含量比值逐渐增加。龙防^[20]研究了不同 Al_2O_3 含量对高炉渣脱硫能力的影响,研究发现,高炉渣的脱硫能力随着 Al_2O_3 含量增加而降低,在保持碱度不变时, Al^{3+} 和 O^{2-} 相结合生成了铝氧以及硅铝氧复合阴离子团,使渣中的 O^{2-} 含量降低,当 Al_2O_3 含量过多时,炉渣中将生成高熔点尖晶石等矿物。邹祥宇^[21]等人研究了不同 Al_2O_3 含量对炉渣冶金性能的影响。研究发现,高炉渣中复杂离子团数量随着 Al_2O_3 含量的增加而增加,即 Al_2O_3 与 O^{2-} 相结合生成 $(\text{AlO}_4)^{5-}$,炉渣网络结构更加复杂,使炉渣中的尖晶石、铝酸一钙等高熔点化合物含量增加。

2.4 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值对高炉渣微观结构的影响

高炉渣中 Al_2O_3 的存在往往导致炉渣网络结构更加复杂,而 MgO 可以破坏炉渣的桥氧,使炉渣结构更加简单。研究者认为适宜的 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值更能反映二者对炉渣微观结构的影响。前人对此也做了很多研究。龙明华等^[22]采用红外光谱与黏度测试试验研究不同 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值对炉渣

结构的影响,研究发现,随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值增大,炉渣的熔化性温度降低,并且呈线性关系,炉渣的黏度减小,黏度减小的趋势随着测试温度的降低变化更加突出。主要是由于 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值增大,渣中的自由氧离子增多,自由氧离子破坏了硅酸盐中的桥氧,使硅酸盐复杂的网状结构解聚,炉渣黏度减小。郝金龙^[11]采用红外光谱、分子动力学和Wayman-Frankel公式研究了 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值对炉渣结构的影响,研究发现,随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值的增大,炉渣中桥氧数量减少, Q_1 增多, Q_0 、 Q_4 基本保持不变,即渣中自由氧离子与渣中的桥氧(O_0)相互作用,使得复杂的Al-O和Si-O结构逐渐解聚,使炉渣复杂的结构解聚成简单的结构单元。

李湘凡^[23]采用旋转黏度计研究不同的 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值对高炉渣流动性的影响,研究发现,在渣中 MgO 为碱性氧化物,随着 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值的逐渐增大,渣中的 O^{2-} 浓度增多,破坏了硅酸盐网络结构,使炉渣结构分解为更小结构单元,因此炉渣流动性得到改善。袁骧^[24]采用双层坩埚研究不同镁铝比对炉渣脱硫能力的影响,在渣中 Al_2O_3 属于弱酸性氧化物,在炉渣中作为网络形成子,参与到网络结构中易于与渣中 TiO_2 、 MgO 、 SiO_2 等物质生成高熔点复杂化合物,导致炉渣脱硫能力下降;同时 MgO 在渣中为网络修饰子,随着渣中镁铝比的提高,渣中 O^{2-} 含量增加,破坏了炉渣网络结构,改善了炉渣流动性,有利于脱硫反应。根据相图可知,渣相由高熔点尖晶石和方镁石向低熔点黄长石区域偏移,提高了炉渣流动性。张旭升^[25]通过改变 $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 五元渣中的 MgO 和 TiO_2 含量研究不同 MgO 和 TiO_2 含量对高炉渣脱硫能力的影响。结果表明,当渣中的 MgO 比较低时随着渣中 MgO 含量的增加,渣中的 O^{2-} 浓度增加,使硅酸盐网络结构分解为结构更小的单元,炉渣黏度降低,脱硫能力增强,当炉渣中的 MgO 含量较高时,渣中容易生成高熔点物质,炉渣黏度增大。增加渣中的 TiO_2 含量,

导致炉渣流动性变差，即 TiO_2 与渣中其他组分生成了高熔点物质，炉渣流动性变差，炉渣脱硫能力降低。

2.5 TiO_2 对高炉渣微观结构的影响

我国钛资源丰富，主要分布在攀枝花、承德等地区^[26]。近年来，面对高炉炉料紧张，高炉炉料结构也发生了改变，加入高炉中炉料中的 TiO_2 含量逐渐增加，导致高炉渣中的 TiO_2 含量呈现上升的趋势^[27]。钒钛磁铁矿经高炉冶炼后，大多数钛以 TiO_2 的形式进入高炉渣中，对炉渣的物理化学性能产生重要影响。赵满祥^[28]等采用傅里叶变换红外光谱仪分析炉渣结构来研究 TiO_2 对高炉渣黏度的影响，研究发现，当渣中 TiO_2 含量增加到一定程度，1773K 时炉渣的黏度随着渣中 TiO_2 的增加而逐渐减小，主要是由于炉渣中的 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体离子结构逐渐解聚成更小的结构单元，O 与渣中 Si、Al 间的距离逐渐增大，吸引力减弱，表明 TiO_2 可提供促使解聚的氧离子。王龙^[29]采用红外光谱和拉曼光谱测定了含有不同 TiO_2 含量的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元炉渣，发现 TiO_2 含量在 0%~10% 范围内，炉渣中 Q_1 和 Q_0 的含量随着 TiO_2 含量的增加而增加， Q_2 和 Q_3 的含量逐渐减少，即 Ti 可以使炉渣的结构解聚，Ti 是网络修饰子主要是以六配位的形式存在；当炉渣中 TiO_2 含量从 10% 增加到 15% 时，四种四面体所占比例几乎不再发生变化。董相娟^[30]采用旋转柱体法研究 TiO_2 对 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ 四元低碱度高钛渣黏度的影响。研究发现，炉渣黏度随着渣中 TiO_2 含量增加而降低，即渣中 Si^{4+} 离子半径比 Ti^{4+} 离子半径小， Si^{4+} 离子的静电势比 Ti^{4+} 离子的静电势大，Ti-O 键强度比 Si-O 键弱，随着炉渣中 Ti^{4+} 增多，阳离子对部分氧离子的束缚力减弱，部分氧离子具有分离的趋势， Ti^{4+} 不会形成结构特别复杂阴离子团，使炉渣结构更加简单。沈龙龙^[31]探究了 TiO_2 对高炉渣流动性的影响。研究发现，当炉渣中 TiO_2 含量维持在 2% 左右时，炉渣流动性得到了改善，随着 TiO_2 含量的继续增加，炉渣的熔化性温度先增

加后降低。渣系微观结构研究表明，在高炉渣中 TiO_2 为酸性氧化物，主要以 $[\text{TiO}_6]^{8-}$ 的形式存在， TiO_2 对高炉渣微观结构的影响分为两方面：一方面 $[\text{TiO}_6]^{8-}$ 进入高炉渣中破坏炉渣网络结构，导致炉渣黏度降低，改善了炉渣流动性；另一方面在炉渣中 TiO_2 与 O^{2-} 相结合，使 $[\text{SiO}_4]$ 四面体中的 O^{2-} 减少，炉渣聚合度增加，黏度增大。当炉渣黏度比较低时，随着渣中 TiO_2 含量的增加，炉渣黏度逐渐增加，当黏度升高到一定值时，黏度随着 TiO_2 含量的增加而降低，继续增加炉渣中 TiO_2 含量时容易生成熔点高的物质（如钙钛矿、TiC、TiN 等），导致炉渣流动性变差。

2.6 B_2O_3 对高炉渣微观结构的影响

我国硼资源丰富，大多为伴生、品位低等特点^[32]，含硼矿物加入到高炉中将对高炉冶炼过程产生重要影响，前人也研究了 B 对高炉渣微观结构的影响。高艳宏^[33]研究 B_2O_3 对高炉渣黏度的影响。研究发现：高炉渣黏度随着 B_2O_3 含量的增加而降低， B^+ 和 O^{2-} 之间的键较强，使 B^+ 夺取了硅酸盐网络结构中 O^{2-} 形成硼离子团，使硅酸盐网络结构分解为结构单元更小的单元，简化了聚合阴离子团结构。REN Shan^[34]等研究 B_2O_3 对高钛渣流动性的影响。结果发现，随着渣中 B_2O_3 含量的增加，高钛渣黏度逐渐降低， B_2O_3 可与炉渣中物质结合为低熔点化合物，同时炉渣在高温状态下 B 以 $[\text{BO}_4]^{5-}$ 转变为 $[\text{BO}_3]^{3-}$ ，所以炉渣黏度降低。祁成林^[35]采用扭矩法测量含硼高铝高炉渣黏度变化来研究硼对高炉渣微观结构的影响。研究发现，硼可降低高铝渣的熔化性温度，即 B 可以使高炉渣中的 Si-O 键断裂，同时 B、Al 可将硅酸盐网络结构中的 Si 原子替换，使硅酸盐网络结构骨架局部不对称。

3 结 论

本文讨论了碱度及 MgO 和 Al_2O_3 等化学成分对高炉渣微观结构的影响，结果表明，高炉渣属于硅酸盐体系，其主要结构单元是硅氧四面体，

Ca^{2+} 和 Na^+ 等属于网络修饰子, 网络修饰子进入到炉渣中破坏了硅酸盐网络结构, 使离子团变小; 而 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 和 B^{3+} 等离子在不同的炉渣中充当不同的角色, 既可以充当网络形成子, 使炉渣的网络结构更加复杂, 也可以充当网络修饰子, 使炉渣的网络结构转变为结构简单的单元体。目前, 有关炉渣化学成分对中钛渣微观结构影响的研究较少, 中钛渣主要以堆放的形式处理, 不能够充分利用, 若能对中钛渣微观结构进行深入研究, 并进行改性处理, 降低难磨相含量, 对其利用将有重大作用。

参考文献:

- [1] 杨淑敏, 张伟. 利用高炉渣和粉煤灰制备微晶玻璃热处理制度的优化 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(3):776-781.
- [2] 成海芳, 文书明, 殷志勇. 高炉渣综合利用的研究进展 [J]. 现代矿业, 2006, 25(9):21-23.
- [3] 张朝晖, 莫涛. 高炉渣综合利用技术的发展 [J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(5):12-15.
- [4] 王爱平, 赵磊, 汪胜东, 等. 含钛炉渣综合利用技术研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2014, 32(10):32-34.
- [5] 莫宣学. 岩浆熔体结构 [J]. 地质科技情报, 1985, (2):21-31
- [6] Lingtao Bian, Yanhong Gao. Influence of B_2O_3 and Basicity on Viscosity and Structure of Medium Titanium Bearing Blast Furnace Slag [J]. 2016:1-8
- [7] Fincham C J B, Richardson F D. The Behaviour of Sulphur in Silicate and Aluminate Melts [J]. Mathematical and Physical Sciences, 1954, 223(1152):40-62
- [8] Mysen BO. Structure and properties of silicate melts [J]. 1988.
- [9] Mysen BO, Virgo D, CM Scarfe. Relations between the anionic structure and viscosity of silicate melts-A Raman spectroscopic study [J]. Brazilian Journal of Biology, 2014, 74(7):290-310
- [10] Mills KC. Influence of Structure on the Physico-chemical Properties of Slags [J]. ISIJ Int, 1993, 33(1):148-155
- [11] 郝金龙. $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对南钢高炉渣性能的影响 [D]. 重庆: 重庆大学硕士论文, 2014.
- [12] 诸建阳. 含铬高钛高炉渣流动性性质及物相转变规律研究 [D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2014.
- [13] 储满生, 冯聪, 唐珏, 等. 碱度对钒钛磁铁矿高炉渣冶金性能的影响 [C]. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集, 2015, 1-6.
- [14] 李洪玮, 张建良, 刘峰. 拉曼光谱分析 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}$ 渣结构中 Mg 和 Ca 的影响 [J]. 中国冶金, 2014, 24:180-183.
- [15] 刘超, 张玉柱, 康月. Factsage 计算 MgO 含量对高炉渣粘度的影响 [J]. 河北联合大学学报: 自然科学版, 2014, 36(4): 25-29.
- [16] 彭波, 吴光亮, 代宾, 等. 含钛高炉渣熔化性温度的试验研究 [J]. 金属材料与冶金工程, 2012, 40(1):18-21.
- [17] 孙长余, 陈亚春, 李静, 等. MgO 对高铝高炉渣脱硫的影响及其动力学分析 [J]. 重庆大学学报, 2016, 39(4):82-87.
- [18] 许仁泽, 张贺顺, 张建良, 等. 京唐高炉渣性能评价及低镁渣性能分析 [J]. 中国冶金, 2016, 26(11):16-20.
- [19] 张杰. 高铝高炉渣流动性及结构研究 [J]. 重庆: 重庆大学硕士毕业论文, 2016.
- [20] 龙防, 徐方, 赵颖. 高炉高 Al_2O_3 炉渣冶炼综合分析 [J]. 冶金能源, 2009, 28(2):21-23.
- [21] 邹祥宇, 张伟, 王再义, 等. 碱度和 Al_2O_3 含量对高炉渣性能的影响 [J]. 鞍钢技术, 2008(4):20-22.
- [22] 龙明华, 张东升, 肖扬武. $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值对高炉渣流动性和结构的影响 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2015, 29(7): 49-54.
- [23] 李湘凡, 吕学伟. $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 对高炉渣流动性能的影响研究 [J]. 南钢科技与管理, 2014, (3): 5-10.
- [24] 袁骧, 张建良, 毛瑞等. 镁铝比对高炉渣脱硫能力的影响 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2015, 36(11):1609-1613.
- [25] 张旭升, 吕庆, 刘小杰, 等. 钒对高炉渣性能的影响 [J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(6):71-74.
- [26] 陈艳, 白晨光, 吉川昇, 等. 微波场中加热高钛高炉渣的数值模拟 [J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(2):14-18.
- [27] 董晓旭, 张淑会, 兰臣臣. 低钛高炉渣排碱能力研究 [J]. 钢铁钒钛, 2016, 37(6):99-102.
- [28] 赵满祥, 李明, 马金芳. TiO_2 对高炉渣黏度的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2015, 43(1):1-4.
- [29] 王龙, 温良英, 涂家佳, 等. TiO_2 对 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$ 三元炉渣结构的影响 [J]. 第十七届(2013年)全国冶金反应工程学学术会议论文, 2013:179-184
- [30] 董娟娟, 孙昊延, 余雪峰. $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 低碱度高钛渣熔体黏度特性 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(10):1297-1303.
- [31] 沈龙龙, 孙向伟, 刘彪, 等. 高炉低 $w(\text{TiO}_2)$ 炉渣流动性的研究 [J]. 钢铁研究, 2013, 41(3):19-21.
- [32] 张立涛, 王超, 杨合, 等. 利用含硼废渣制备泡沫玻璃 [C]. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集 (第五卷). 2013.

[33] 高艳宏. 含硼高炉钛渣粘性特征与结构的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

[34] Shan REN, Jianliang Zhang, Liushun Wu, et al. Influence of B₂O₃ on viscosity of high Ti-bearing blast furnace slag[J].

ISIJ International. 2012, 52(6): 984-991.

[35] 祁成林, 柴铁凡, 张建良, 等. 红外吸收光谱对 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO-B₂O₃ 五元系渣结构的研究 [C]. 全国冶金物理化学学术会议, 2014.

Research Status of the Influence of Blast Furnace Slag Chemical Composition on its Microstructure

Yan Zhaozhao, Zhang Shuhui, Dong Xiaoxu, Lv Qing, Liu Xiaojie, Qie Yana

(Panzhuhua University Panxi Science and Technology Innovation Center, Panzhuhua, Sichuan, China)

Abstract: The chemical composition of blast furnace slag has important effects on the microstructure. The changes of the chemical composition of blast furnace slag influences its microstructure change. The effects of alkalinity, Al₂O₃ and MgO were reviewed to explore the impact of the chemical composition of blast furnace slag on the microstructure. The reticular structure blast of furnace slag are formed through the silicon oxygen tetrahedron connects; Ca²⁺, Na⁺ ions into the network structure of slag destroye the silicate network structure. Simple silicate structure increase; Al³⁺, Ti⁴⁺ and B³⁺ ions in different environments will exert different effects on blast furnace slag microstructure, which can complicate the slag network structure, and also make slag network structure into smaller structural unit. And the research points out that the chemical composition in the impact on the microstructure of titanium slag is the research emphasis of titanium slag.

Keywords: Blast furnace slag; Microscopic structure; Silicate; Medium titaniferous slag.

////////////////////////////////////
(上接 43 页)

Microwave-assisted Grinding of a Molybdenum Ore

Nie Qi¹, Ge BaoLiang², Zhang JinLu², Jiao Xin²

(1. Mining Institute, Kunming Metallurgy College, Kunming, Yunnan, China; 2. Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China)

Abstract: With the low-grade copper-molybdenum ore from Jinduicheng as the research object, conventional heating and microwave heating were employed to previously deal with the crushed ore with a grain size of -2 mm, and followed by water quenching. The different pretreatment methods on the sample grinding were investigated under the same grinding conditions. Though mechanical analysis, variation of rock strength after conventional heating pretreatment and microwave heating pretreatment, respectively, was identified. The effect of microwave heating on the cracks in the ore was studied using scanning electron microscope coupled with energy dispersive spectroscopy. The results show that with the microwave heating pretreatment the test sample is easier to milling under the same heating temperature condition. With the increasing of heating temperature, after pretreatment, the rock strength is decreased to varying degrees. However with microwave heating pretreatment, the weakening extent of rock strength is bigger than that with conventional heating pretreatment. With microwave heating pretreatment, when the temperature reaches 350 °C and followed by water quenching, the intergranular cracks appear on the boundaries between molybdenite, chalcopyrite and silicate minerals by using scanning electron microscope.

Keywords: Copper-molybdenum ore; Microwave heating; Milling test