DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190171

钢铁冶炼渣的处理利用难点分析

张 俊, 严定鎏, 齐渊洪, 沈朋飞, 徐洪军, 高建军
(钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 为促进熔炼渣的显热回收、降低钢铁冶炼能耗,提高熔炼渣的利用率和经济性,通过分析钢铁厂熔渣的处理和利用难点,提出了熔渣调质及泡沫化处理的干法粒化方法,通过引入金属铁提高熔渣的导热系数、熔渣泡沫化改善粒化效果,为解决干法粒化及熔渣利用面临的难题提供了思路,并对干法粒化的研究方向给出了建议。

关键词: 熔渣; 干法粒化; 泡沫渣; 调质
文献标志码: A **文章编号**: 0449-749X(2020)01-0001-05

Difficulty analysis on treatment and utilization of iron and steel smelting slag

ZHANG Jun, YAN Ding-liu, QI Yuan-hong, SHEN Peng-fei,
XU Hong-jun, GAO Jian-jun
(State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to promote sensible heat recovery of smelting slag, reduce energy consumption in iron and steel smelting process, and improve utilization rate and economy of smelting slag, by analyzing the difficulties in the treatment and utilization of the molten slag in steel mills, a dry granulation method for molten slag based on the modification and foaming treatment is proposed, and the thermal conductivity as well as granulation of slag are improved by introducing metallic iron and foaming, which provides a way to solve the problems faced by the dry granulation and slag utilization. At last, some suggestions on the future research direction of dry granulation are given.

Key words: molten slag; dry granulation; foaming slag; modification

目前,环境保护受到的关注度越来越高,而钢铁企业一直以来都是污染和能耗大户,节能降耗是钢铁企业发展的必然方向。随着炼铁、炼钢工艺的逐渐优化和日趋成熟,熔炼渣的显热回收是节能降耗的突破口,熔炼渣特别是钢渣的利用效率成为制约钢铁企业污染减量的关键环节。“干法粒化”技术的提出由来已久,被认为是熔炼渣显热回收的理想方式,但到目前为止还没有成功的应用案例。本研究对高炉渣、钢渣的处理利用现状进行了分析,探讨了“干法粒化”技术的应用难点及钢渣利用存在的问题,提出了解决“干法粒化”技术瓶颈和钢渣利用制约难点的思路。

1 钢铁厂炉渣的利用现状

1.1 高炉渣

高炉炼铁过程中吨铁渣量约为 300~500 kg,占钢铁行业废弃物的一半[1-3],高炉渣的合理利用不仅能消除土地占有和环境污染的风险,还可以有效减少一次资源消耗,对生态环境和国民经济发展具有重要意义。目前高炉渣的利用方式较多,包括制备无机肥料、微晶玻璃、矿渣棉、矿渣水泥[4-12]等,由于技术条件、利用经济性、市场需求量等方面的原因,中国高炉渣 90%用于制备矿渣水泥[13],其他方面的应用较少。

高炉渣制备矿渣水泥的添加量可达到 20%~70%,从而降低水泥熟料的用量及相应的一次资源和能源消耗,其原理在于高炉渣中的活性组元通过碱激发形成 C-S-H 型胶凝材料,高炉渣必须为玻璃态。为实现玻璃化率 95%以上,高炉渣一般采取水淬处理达到所需的冷却速率。

高炉的排渣温度为 1 400~1 500 ℃,每吨高炉渣带走的热量相当于 40~60 kg 标准煤[14],由于水淬过程产生的水蒸气品质包括温度和压力均较低,无法用于汽轮机发电,少数钢企用于居民生活供热,

基金项目: 北京市科技计划资助项目(Z151100001515004)
作者简介: 张 俊(1984—),男,博士,高级工程师; **E-mail**: zjxt424@163.com; **收稿日期**: 2019-04-18

但利用效率较低。总的来说,高炉渣的物理显热还没有得到有效利用,造成热量的大量损失。另外,水淬吨渣的耗水量约为 0.8～1.2 t[15],水资源浪费严重,且水淬渣水含量高需干燥处理才能用作水泥原料[16],这造成能源的再次消耗,成为高炉渣利用经济性的限制性环节。

1.2 钢渣

每生产 1 t 钢约产生 150 kg 钢渣[17],目前中国的钢渣堆存量已超过 10 亿 t,利用率仅为 10%～20%[18]。钢渣的处理利用流程如图 1 所示[18],结合图 1,探讨处理过程不同阶段的产物特征和利用途径,弄清限制钢渣利用的关键因素。

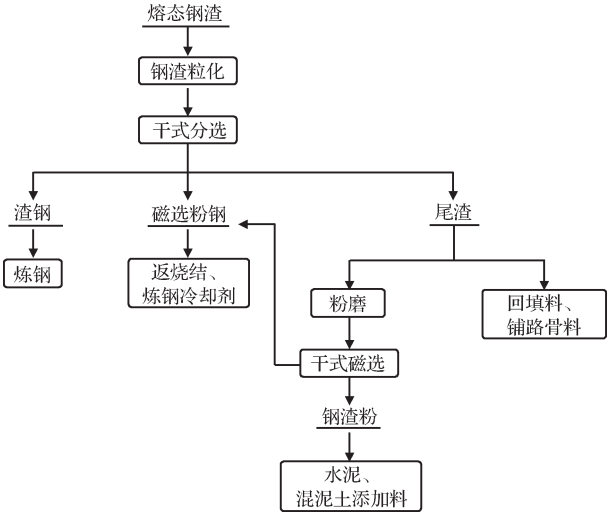

图 1 钢渣的处理和利用流程

Fig. 1 Flow chart of steel slag processing and utilization

钢渣的粒化方式[19]包括热闷法、盘泼法、风淬法、水淬法、滚筒法、粒化轮法,本质上均以水作为冷却剂,除了风淬法能回收少部分热量外,其他方法中钢渣的热能都被浪费,与高炉渣的粒化过程面临相同的窘况。另外,有别于高炉渣的成分特征,钢渣的利用面临新的障碍。

首先,钢渣的熔化温度较高、流动性较差,对粒化方式的选择性较强,且钢渣碱度高,即使经过粒化消解处理,尾渣中仍含有一定含量的游离 CaO、MgO,且急冷后硅酸钙处于亚稳相,造成尾渣的组织稳定性差,直接作为回填料或铺路料时需堆放使其达到稳态化,耗时较长。

其次,尾渣致密、坚硬,可磨性较差,制备钢渣微粉的磨矿成本高,降低了利用经济性,作为水泥或混凝土添加料时吸水性较强,会缩短硬化时间,铁含量高,添加量一般控制在 30%以内,用量受到限制。另外,磁选粉的铁品位较低、磷含量较高,作为烧结配料会造成磷在铁水中的富集,降低烧结矿的铁品位,提高铁水的处理成本。因此,钢渣的使用受限主要在于组织稳定性差和组分的不合理。

2 高炉渣、钢渣利用的突破口

2.1 干法粒化的难点问题

高炉渣和钢渣面对的共同问题是显热没有得到有效利用,干法粒化技术理论上可有效解决这一关键问题。自 20 世纪 70 年代以来,英国、瑞典、德国、日本、澳大利亚等国家先后开展了高炉熔渣干法粒化的技术研究[20],粒化方式包括钢珠浸淬法[21]、转杯法[22-24]、转盘法[25-26]、转筒法[27-28]、滚筒法[29]、风淬法[30-31]等,但到目前为止,干法粒化依然没有形成工业化应用,主要存在以下问题。

(1)产品质量。干法粒化的重要目的是在回收炉渣物理显热的同时,形成满足水泥原料要求的玻璃相,虽然在实验室条件下干法粒化技术均可满足要求,但工业化试验时难以保证,如钢珠浸淬法和机械搅拌法。另外,粒化过程容易形成丝状棉,提高了后期处理难度。

(2)热回收效率低。由于气体的比热容小、导热系数低,必须加大风压、风量提高冷却强度,造成动力消耗大,同时,大风量造成回收热效率低[32]。

(3)连续运行难度大、成本高。造粒装置的耐热抗磨损性能要求高、价格昂贵、损耗大,设备系统复杂,高温下粒化装置的机械稳定性存在问题,对连续运行造成影响。

总的说来,干法粒化需要解决两方面的问题:尽量简化粒化设备,提高运行的稳定性、降低运行成本;提高渣与冷却介质之间的换热强度,如提高熔渣的导热率、改善粒化效果等,从而达到减小风量、提高风温的效果,提升冷却介质的热品质。

2.2 钢渣成分的调质处理

基于上述分析可知,钢渣成分的不合理,对粒化过程以及后续应用均会产生不利的影响,通过调质处理得到类似高炉渣的炉渣成分,转变为高炉渣的处理和利用模式,这是消除钢渣利用弊端的有效方式。钢渣调质[33-38]主要通过添加酸性熔剂降低熔渣碱度达到消除钢渣游离 CaO、MgO 的目的,同时,以碳作为还原剂将铁充分还原获取铁水回收,降低熔渣的铁含量。因此,钢渣利用的突破口是采取调质与干法粒化相结合的处理方式。

3　基于熔渣泡沫化调质的稀相干法粒化构想

本研究提出了一种熔渣泡沫化调质的稀相干法粒化工艺，如图 2 所示。熔渣装入调质炉，调整碱度至高炉渣碱度范围，解决钢渣成分的不合理性；添加碳质还原剂将铁氧化物（高炉渣需另行引入）还原为金属铁，从调质炉底部鼓入惰性气体造泡沫渣，形成渣、铁弥散混合物，增大熔渣的导热系数；体积膨胀数倍或数十倍的泡沫渣稀相溢流进入粒化室，在粒化室的负压膨胀和冷淬风冲击的双重作用下爆裂为细小颗粒，改善熔渣的粒化效果、提高换热面积；粒化渣颗粒进入流化床完成二次换热，与一次换热气共同用于余热锅炉发电；冷却渣经磨粉、磁选回收金属铁，渣粉用于水泥制备。

通过电炉能快速便捷地对炉渣温度进行控制，克服钢渣流动性差的缺点，添加酸性熔剂对钢渣进行改性干法粒化已有工业化应用，熔渣碳热还原获取金属铁也是常规手段；另外，脱碳反应形成的 CO 起泡、金属液滴与液态转炉渣激烈混合，形成高度弥散的金属小液滴和大量小气泡分布在渣液中，构成高度弥散的乳浊液泡沫渣体系，这是转炉吹炼过程的常见现象。本工艺通过碳热还原获取金属铁、底吹气体提供起泡源，满足制备泡沫渣的基本条件，稀相干法粒化理论上是完全可行的。

针对以上工艺，未来的研究重点应集中在以下几个方面：

（1）熔渣的起泡性能研究，包括熔渣碱度、温度、底吹气体流量控制，实现熔渣的稳态泡沫化。

（2）泡沫渣的粒化性能研究，考察粒化室负压变化、风淬流量对熔渣粒径的影响关系。

（3）研究熔渣中金属铁含量对导热系数的影响，弄清导热系数与粒化渣玻璃化临界尺寸之间的关系，合理控制冷却风量，提高冷却介质的热回收效率。

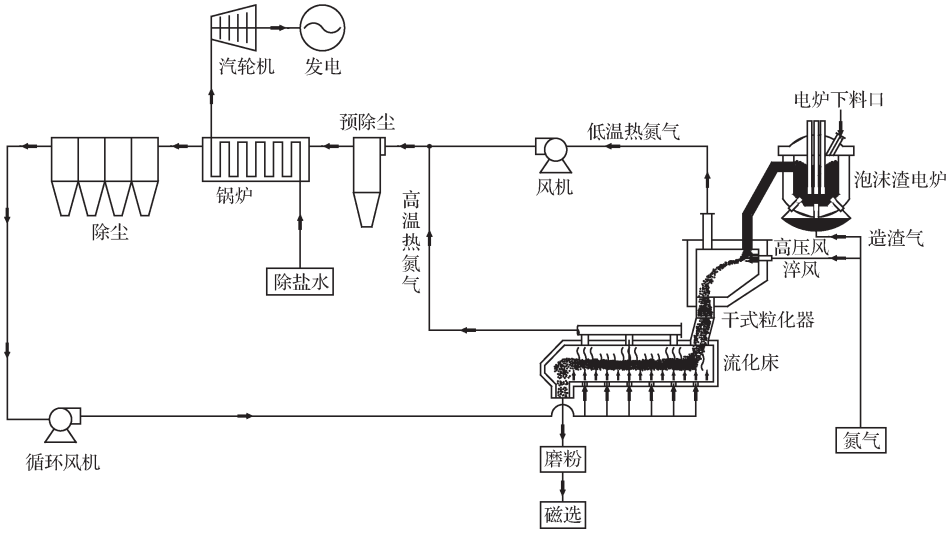

图 2　熔渣调质及泡沫化干法粒化示意图

Fig. 2　Schematic diagram of dry granulation for molten slag based on modification and foaming

4　结语

（1）物理显热无法回收利用是高炉渣和钢渣面临的共同难题，同时，钢渣成分和组织的不合理性是造成其难于处理和应用的根本原因，通过调质处理获得类似于高炉渣的成分，结合干法粒化处理是提高钢渣利用效率的最佳途径。

（2）引入金属铁提高熔渣的导热系数、通过泡沫化改善熔渣的粒化效果，有望从根本上解决干法粒化面临的难点问题，为未来干法粒化的研究和发展方向提供了思路。

参考文献：

[1] 曾丹林，刘胜兰，龚晚君，等. 高炉尘泥渣综合利用研究现状[J]. 湿法冶金，2014，33(2)：94.（ZENG Dan-lin，LIU Sheng-lan，GONG Wan-jun，et al. Research progress on comprehensive utilization of BI [J]. Hydrometallurgy of China，2014，33(2)：94.）

[2] 王海风，张春霞，齐渊洪，等. 高炉渣处理技术的现状和新的发展趋势[J]. 钢铁，2007，42(6)：83.（WANG Hai-feng，ZHANG Chun-xia，QI Yuan-hong，et al. Present situation and development trend of blast furnace slag treatment[J]. Iron and Steel，2007，42(6)：83.）

[3] 张立生，李慧，张汉鑫，等. 高炉渣的综合利用及展望[J]. 热加工工艺，2018，47(19)：20.（ZHANG Li-sheng，LI Hui，ZHANG Han-xin，et al. Comprehensive utilization and prospect of blast furnace slag[J]. Hot Working Technology，2018，47(19)：20.）

[4] 任庆华，赵明琦. 利用高炉渣生产硅肥技术综述[J]. 安徽冶金，2005(1)：54.（REN Qing-hua，ZHAO Ming-qi. Producing silicon fertilizer from iron slag[J]. Anhui Metallurgy，2005(1)：54.）

[5] 孟华栋，张柏汀. 利用高炉渣生产包膜缓释氮肥的实验研究[J]. 金属功能材料，2014，21(2)：21.（MENG Hua-dong，ZHANG Bai-ting. Study on blast furnace slag used as coated material of slow release fertilizer[J]. Metallic Functional Materials，2014，21(2)：21.）

[6] 刘洋，张春霞，宗男夫. 高炉熔渣直接资源化绿色制备高效硅肥研究[J]. 矿产保护与利用，2018(5)：126.（LIU Yang，ZHANG Chun-xia，ZONG Nan-fu. Green and high efficiency preparation of silicon fertilizer with blast furnace slags[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2018(5)：126.）

[7] 杨淑敏，张伟，戴晔. 利用新疆高炉渣制备微晶玻璃的研究[J]. 硅酸盐通报，2014，33(1)：48.（YANG Shu-min，ZHANG Wei，DAI Ye. Research on preparation of glass-ceramics with blast furnace slag from Xinjiang area[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2014，33(1)：48.）

[8] 肖永力，李永谦，刘茵，等. 高炉渣矿棉的研究现状及发展趋势[J]. 硅酸盐通报，2014，33(7)：1689.（XIAO Yong-li，LI Yong-qian，LIU Yin，et al. Status and development trend of research on blast furnace slag wool[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2014，33(7)：1689.）

[9] 朱宣. 岩矿棉无焦熔制工艺技术探讨[J]. 玻璃纤维，2011(3)：32.（ZHU Xuan. Analysis on cokeless melting technology for producing rock/slag wool[J]. Glass Fibre，2011(3)：32.）

[10] 严丽君，葛潭潭，闫潇娟，等. 高炉渣颗粒粒径对矿渣水泥水化的影响[J]. 上海大学学报：自然科学版，2013，19(2)：619.（YAN Li-jun，GE Tan-tan，YAN Xiao-juan，et al. Influence of particle diameter on performance of blast furnace slag cement[J]. Journal of Shanghai University：Natural Science，2013，19(2)：619.）

[11] 张明涛，谭克锋，赵敏. 无熟料高炉矿渣水泥的物料配比与性能的关系[J]. 西南科技大学学报，2011，26(2)：32.（ZHANG Ming-tao，TAN Ke-feng，ZHAO Min. Research on proportioning and performance of non-clinker blast furnace slag cement[J]. Journal of Southwest University of Science of Technology，2011，26(2)：32.）

[12] 崔素萍，董诗婕，王瑞蕴. 风冷高炉渣与水淬高炉渣的水化性能研究[J]. 水泥，2014(6)：1.（CUI Su-ping，DONG Shi-jie，WANG Rui-yun. Study on hydration property of air cooling blast furnace slag and water quenching blast furnace slag[J]. Cement，2014(6)：1.）

[13] 朱广宇. 钢铁渣处理的意义和综合利用[J]. 化学工程与装备，2015(3)：237.（ZHU Guang-yu. Comprehensive utilization and sense of iron and steel slag treatment[J]. Chemical Engineering and Equipment，2015(3)：237.）

[14] 周扬民，罗思义，李宗刚，等. 液态高炉渣分裂破碎模式与控制技术[J]. 冶金能源，2013，32(5)：52.（ZHOU Yang-min，LUO Si-yi，LI Zong-gang，et al. Fragmentation model of liquid blast furnace slag and corresponding control technology[J]. Energy for Metallurgical Industry，2013，32(5)：52.）

[15] 杜滨，张衍国. 转盘离心粒化液态高炉渣实验研究[J]. 冶金能源，2013，32(4)：29.（DU Bin，ZHANG Yan-guo. Centrifugal granulation experimental study of molten blast furnace slag by rotary disk[J]. Energy for Metallurgical Industry，2013，32(4)：29.）

[16] 戴晓天，齐渊洪，张春霞，等. 高炉渣急冷干式粒化处理工艺分析[J]. 钢铁研究学报，2007，19(5)：14.（DAI Xiao-tian，QI Yuan-hong，ZHANG Chun-xia，et al. Analysis of blast furnace slag quenching dry granulation process[J]. Journal of Iron and Steel Research，2007，19(5)：14.）

[17] 黄毅，徐国平，程慧高，等. 典型钢渣的化学成分、显微形貌及物相分析[J]. 硅酸盐通报，2014，33(8)：1902.（HUANG Yi，XU Guo-ping，CHENG Hui-gao，et al. Analysis on chemical composition，mirco-morphology ang phase of typical steel slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2014，33(8)：1902.）

[18] 王延兵，许军民，范永平，等. 钢渣全流程处理技术对比分析研究[J]. 环境工程，2014(3)：143.（WANG Yan-bing，XU Jun-min，FAN Yong-ping，et al. Comparison analysis of the whole process treatment technology of steel slag[J]. Environmental Engineering，2014(3)：143.）

[19] 章耿. 宝钢钢渣综合利用现状[J]. 宝钢技术，2006(1)：20.（ZHANG Geng. Status of comprehensive utilization of steel slag of Baosteel[J]. Baosteel Technology，2006(1)：20.）

[20] 李大鹏. 国内外高炉渣干法粒化技术进展分析[J]. 冶金设备，2015(1)：44.（LI Da-peng. Progress on dry granulation technologies for blast furnace slag at home and abroad[J]. Metallurgical Equipment，2015(1)：44.）

[21] Kappes H，Michels D. Dry slag granulation with energy recovery：Pilot campaign at ROGESA[C]// AISTech 2014—Proceedings of the Iron and Steel Technology Conference. Indianapolis：[s. n.]，2014：93.

[22] Pickering S J，Hay N，Roylanae T F，et al. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast furnace slag[J]. Ironmaking and Steelmaking，1985，12(1)：14.

[23] 徐永通，丁毅，蔡漳平，等. 高炉熔渣干式显热回收技术研究进展[J]. 中国冶金，2007，17(9)：1.（XU Yong-tong，DING Yi，CAI Zhang-ping，et al. Development of heat recovery from blast furnace slag using dry granulation methods[J]. China Metallurgy，2007，17(9)：1.）

[24] 于庆波，刘军祥，窦晨曦，等. 转杯法高炉渣粒化实验研究[J]. 东北大学学报：自然科学版，2009，30(8)：1163.（YU Qing-bo，LIU Jun-xiang，DOU Chen-xi，et al. Dry granulation experimental of blast furnace slag by rotary cup atomizer[J]. Journal of Northeastern University：Natural Science，

2009，30(8)：1163.）

[25] 张华，倪红卫，李先旺，等. 高炉渣干式离心粒化实验研究[J]. 冶金能源，2012，31(5)：15.（ZHANG Hua，NI Hong-wei，LI Xian-wang，et al. Experimental study of dry centrifugal granulation for blast furnace slag[J]. Metallurgy Energy，2012，31(5)：15.）

[26] 闫兆民，周扬民，杨志远，等. 高炉渣干式平盘粒化实验研究[J]. 冶金能源，2010，29(3)：44.（YAN Zhao-min，ZHOU Yang-min，YANG Zhi-Yuan，et al. Experimental study of plates dry granulation of BF slag[J]. Metallurgy Eergy，2010，29(3)：44.）

[27] Yoshiaki Kashiwaya，Yutaro In-Nami，Tomohiro Akiyama. Development of a rotary cylinder atomizing method of slag for the production of amorphous slag particles[J]. ISIJ International，2010，50(9)：1245.

[28] 毛艳丽，曲余玲，王涿. 高炉熔渣处理及显热回收工艺的研究进展[J]. 上海金属，2013，35(3)：45.（MAO Yan-li，QU Yu-ling，WANG Zhuo. Review of blast furnace molten slag treatment and sensible heat recovery technologies[J]. Shanghai Metals，2013，35(3)：45.）

[29] 杨文策，赵增武，李永治. 高炉渣滚筒法处理过程的模拟实验研究[J]. 铸造技术，2017，38(6)：1385.（YANG Wen-ce，ZHAO Zeng-wu，LI Yong-zhi. Simulation of rotating drum process for blast furnace slag[J]. Foundry Technology，2017，38(6)：1385.）

[30] 于明志，常浩，胡爱娟，等. 高炉熔渣喷射粒化方法及模拟试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报，2015，23(4)：836.（YU Ming-zhi，CHANG Hao，HU Ai-juan，et al. Simulation experimental study on granulating molten blast furnace slag by nozzel jetting[J]. Journal of Basic Science and Engineering，2015，23(4)：836.）

[31] 王子兵，刘跃，张玉柱，等. 高炉熔渣气淬粒化热量回收试验研究[J]. 钢铁钒钛，2018，39(4)：93.（WANG Zi-bing，LIU Yue，ZHANG Yu-zhu，et al. Experimental study on heat recovery of the process of gas blowing for blast furnace slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2018，39(4)：93.）

[32] 杜宾，罗光亮，姜荣泉. 熔渣干法粒化与余热回收技术进展[J]. 干燥技术与设备，2012，10(4)：3.（DU Bin，LUO Guang-liang，JIANG Rong-quan. Development of molten slag dry granulation and heat recovery[J]. Drying Technology and Equipment，2012，10(4)：3.）

[33] 王德永，李勇，刘建，等. 钢渣中同时回收铁和磷的资源化利用新思路[J]. 中国冶金，2011，21(8)：50.（WANG De-yong，LI Yong，LIU Jian，et al. A new design of fe and p simultaneous recovery from steel slag[J]. China Metallurgy，2011，21(8)：50.）

[34] 卢翔，李宇，马帅，等. 钢渣热态改质技术在电炉中的应用[J]. 工业炉，2016，38(5)：23.（LU Xiang，LI Yu，MA Shuai，et al. Application of molten slag modification technology in electric arc furnace[J]. Industrial Furnace，2016，38(5)：23.）

[35] 卢翔，代文彬，李宇，等. 电炉渣热态改质过程中碱度对胶凝活性的影响[J]. 安徽工业大学学报：自然科学版，2017，34(3)：209.（LU Xiang，DAI Wen-bin，LI Yu，et al. Effects of basicity on the cementitious activity of eaf slag during hot modification process[J]. Journal of Anhui University of Technology：Natural Science，2017，34(3)：209.）

[36] 刘杰，赵东明，李建军，等. 鞍钢高炉低镁渣冶炼技术研究与应用[J]. 钢铁，2018，53(3)：22.（LIU Jie，ZHAO Dong-ming，LI Jian-jun，et al. Research and application of blast furnace′s low w([MgO]) slag in Ansteel[J]. Iron and Steel，2018，53(3)：22.）

[37] 谢洪恩，秦兴国，郑魁，等. 高钛型高炉渣熔化性温度影响因素[J]. 中国冶金，2017，27(9)：13.（XIE Hong-en，QIN Xing-guo，ZHENG Kui，et al. Analysis of effect factors of smelting temperature of high-titanium-type blast furnace slag[J]. China Metallurgy，2017，27(9)：13.）

[38] 居殿春，邱家用，徐敏人，等. 碳对含钛高炉渣钠化反应热力学及钠化率的影响[J]. 钢铁，2018，53(1)：88.（JU Dian-chun，QIU Jia-yong，XU Min-ren，et al. Effect of carbon on rate and thermodynamics of sodium reaction of titanium-bearing blast furnace slag[J]. Iron and Steel，2018，53(1)：88.）