

高炉渣显热回收利用现状与展望

高洋, 贵永亮, 宋春燕, 胡宾生, 王亚文

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063000)

摘要: 高炉渣是炼铁过程中生产的副产品, 也是工业生产的废弃物。随着钢铁企业的快速发展, 高炉渣的排放量也日益增多。相比国外某些发达国家, 我国高炉渣的利用率相对较低。高炉渣的堆放不仅浪费土地资源, 还严重污染着环境, 与我国现行的可持续发展计划相悖。但是如果将其经过回收和利用, 便可以成为很好的矿物资源。与此同时, 高炉渣也含有大量的显热。我国传统的水淬法对熔渣显热没有任何回收利用, 白白地散失了大量的热量。针对这种情况, 国内外科研人员进行多次的实验, 主要可以分为两个方向: 物理换热法和化学回收法。物理换热法主要是高炉渣通过特定的能量载体进行收集实现显热回收化学回收法是直接利用熔渣及显热生产高附加值的产品。与前者相比, 化学回收法对显热的回收更有效率, 更能体现高炉渣的综合利用。本文详细地综述了物理法和化学法显热回收, 并分析了各种方法的优缺点。在此基础上, 作者开发了新的回收方式: 高炉渣干法粒化技术, 这是高炉渣处理的发展趋势。

关键词: 高炉渣; 显热回收; 物理换热法; 化学回收法; 干法粒化技术

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.01.003

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2018) 01-0012-05

随着钢铁企业的快速发展, 高炉渣的排放量也日益增多。一般来说, 高炉每吨生铁的产渣量随着矿石品位和冶炼强度的不同而发生变化。炉料品位达到 60%~66% 时, 每炼一吨生铁即产渣 250~300 kg^[1]。相比国外某些发达国家对高炉渣的总体利用达到 90% 以上, 我国高炉渣的利用率相对较低。高炉渣的堆放不仅占用大量的土地, 而且势必会污染环境。同时为修建排渣场地和铁路排渣线, 每年都要消耗大量的人力物力^[2]。因此, 如何实现对高炉渣的综合利用, 实现高炉渣利用的高附加值化, 发展钢铁企业的循环经济, 是摆在我们面前的一道难题。

1 高炉渣简介

1.1 高炉渣的化学成分

高炉渣是冶炼生铁时高炉排出物, 其主要成分是硅酸盐和铝酸盐。当炉温达到 1400~1600℃,

炉料熔融, 矿石中的脉石, 焦炭中的灰分, 助溶剂和其他不能进入生铁中的杂质形成以硅酸盐和铝酸盐为主浮在铁水上面的熔渣。高炉渣的主要化学成分为 CaO、SiO₂、Al₂O₃ 和 MgO, 合计超过了炉渣组成的 95%。根据矿石及焦炭灰分成分之不同, 可能会有较多的其他化合物如 TiO₂、BaO 和 CaF₂ 等, 以及少量的 MnO、FeO、CaS 等^[3]。承钢高炉渣中还含有 TiO₂ 和 V₂O₅, 酒泉高炉渣中含有 BaO, CaF₂ 等。

1.2 高炉渣的矿物组成

碱性高炉渣中最常见的矿物黄长石、橄榄石、硅酸二钙、硅钙石、硅灰石和尖晶石。酸性高炉渣根据冷却速度不同, 形成不一样的矿物。当快速冷却结成玻璃体, 往往出现结晶的矿物相, 如黄长石, 假硅灰石, 斜长石等。

高炉渣中存在大量的硅酸一钙 (CaO·Al₂O₃)、二铝酸钙 (CaO·2Al₂O₃)、三铝酸五钙 (5CaO·3Al₂O₃)

收稿日期: 2016-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51404087), 河北省自然科学基金-钢铁联合基金资助项目 (E2014209213); 河北省高等学校科学研究计划资助项目 (Q2012076)

作者简介: 高洋 (1993-), 男, 硕士。

蔷薇辉石 ($MnOSO_2$) 矿物等。

2 高炉渣的处理方法

目前, 我国的高炉渣的处理方法主要分为干渣和水淬渣两种方式。

由于干渣法的处理方法易产生大量渣棉和硫化氢气体污染环境, 而且对资源的利用率也不高。生产的干渣量多, 需要一套完整的运渣设备。因此, 只有在水渣系统有故障才会使用。水渣法大致分为4种方式: 底滤法、因巴法、拉萨法、图拉法^[4]。

(1) 底滤法 (OCP 法)

高炉熔渣在冲制箱内由多孔喷头喷出, 在一定的水压和流量的冲击下进行水淬, 水淬渣流经粒化槽被粒化, 然后进入沉渣池过滤, 经过过滤后的水渣由抓斗吊出, 堆放于渣场继续脱水。沉渣池内的水及悬浮物通过分配渠流入过滤池, 经过过滤后的水经集水管后送入冷却塔冷却, 循环使用, 失去的水量由新水补充。

(2) 因巴法 (INBA 法)

因巴法 INBA 水渣处理系统是 20 世纪 80 年代初由比利时西德玛 (SIDMAR) 公司与卢森堡 P&W 公司^[5] 共同开发的一项渣处理技术。因巴法的工艺过程为: 高炉熔渣由熔渣沟流入冲制箱中, 熔渣被高压水流水淬成水渣, 之后, 水渣经水渣沟送入水渣池再进行细化加工。当水渣则经分配器均匀地流入分配器, 渣水混合物在其中进行水渣分离。随着滚筒的旋转, 渣落到筒内皮带机上运出; 水由分配器下部流出, 在冷却泵的压力下流入冷却塔, 经处理后循环使用。

(3) 拉萨法 (RASA 法)

拉萨法水渣处理系统由日本钢管公司和英国 RASA 贸易公司共同研发的。我国宝钢^[6] 于 20 世纪 80 年代首次引入。熔渣由渣沟流入冲制箱进行水淬。水淬后的渣水混合物经过水淬沟进入粗粒分离槽内浓缩, 浓缩后的渣浆由渣浆泵送至脱水槽脱水。浮在分离槽水面的微粒渣送到沉淀池, 经沉淀后, 同分离器送去的渣水混合物一起进行脱水, 脱水后水渣由卡车外运; 过滤后的水经过沉

淀池到达冷却塔再回收利用。

(4) 图拉法 (TYNA 法)

图拉法是我国近几年才兴起的一项水渣处理系统, 与因巴法不同, 把高炉渣先机械破碎, 再将水淬渣流到转股脱水器中的一种工艺流程。图拉法是由我国和俄罗斯共同发明, 由俄罗斯国立冶金厂设计院研制的水渣处理技术。1998 年在唐钢首次开始投入生产运行。

3 高炉渣的显热回收利用

钢铁生产过程中产生的大量高温熔融渣, 出渣温度高达 $1400 \sim 1600^\circ\text{C}$ 。渣的比热容约为 $1.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 如果熔渣温度的平均值以 1400°C 计算, 回收热量排出渣的温度按 400°C 计算, 则每吨渣可加回收 1.2 GJ 的显热, 大致相当于 41 kg 标准煤完全燃烧产生的热量。其能量热值之高, 含有物理潜热之大, 如果加以充分的回收利用, 将是一笔具有比较高的经济效益^[7] 的措施。

3.1 高炉渣物理显热的回收利用情况

每生产一吨生铁, 消耗掉的煤约在 400 kg 左右。因此, 高炉炼铁属于能源密集型产业。高炉渣是生产生铁过程中的主要副产品之一, 其出炉温度在 $1400 \sim 1600^\circ\text{C}$ 之间, 含有大量的物理潜热, 高炉渣的余热回收具有比较高的经济效益^[8]。到目前为止, 高炉渣物理热的回收方式主要有风淬法、旋转杯粒法、双鼓法和甲烷水蒸气法等^[9]。

水淬法熔渣对炉料的物理热回收没有任何帮助。因此, 需要借助于一种介质 (空气、液态锡等) 来间接回收显热, 从而提高热回收效率。

风淬法^[10] 是由电动机将高炉排出的 1500°C 以上的熔融态高炉渣抬高加压, 经喷嘴喷入风洞造粒部。高压气流将由喷嘴喷出的熔渣吹散粒化。通过调节高压气流的流速, 使 1050°C 左右的粒化渣碰到风洞内的分散板而落下。当粒化渣从分散板落下的过程, 由冷空气将其冷却到 800°C 左右, 然后从风洞中排出。从风洞中排出的粒化渣经振动筛分后, 存储在热渣存储仓中。最后经过特定热交换器将粒化渣冷却到 150°C 左右后, 将粒化渣

排出热渣储存仓。高炉虽然是间断式出渣,但由于热交换需要一定的时间,根据高炉出渣量设计一定容积的风洞及热渣存储仓以实现热量的连续回收。将热空气出口收集到的高温空气输送到发电机组发电。

高温熔融态的高炉渣经电动机提升进入流渣槽,由流渣槽进入转杯粒化器。由于其高速旋转,液态高炉渣在切向力的作用下,被甩出粒化,沿切线喷出。在炉渣被甩出到碰撞主流化床壁的过程中,冷空气自下而上将粒渣进一步冷却。粒渣在撞到主流化床壁的瞬间进一步破碎,沿壁下落,冷却到析晶温度以下,随后,粒化渣被溢出到次级流化床进行再冷却,然后经出渣口排出。最后将从热空气出口收集高温空气,从而实现高炉渣热量的回收。

NKK^[11]公司研究的双鼓法余热回收设备,是将液态炉渣经提升后倒入反向旋转的两个转鼓面上。转鼓是由导热性良好的材料制做,以利于热量的传导,使炉渣快速冷却。为了有利于热量的回收利用,转鼓由低沸点的流动的冷却介质填充。倒在转鼓间的炉渣由于重力作用向下流动,但转鼓的转动使炉渣向上运动。在这两种合力的作用下,通过调节转鼓转速,使炉渣沿转鼓面以合适的运动速度向上运动。在炉渣与转鼓接触的时间内,炉渣迅速冷却。转鼓内部的流动介质得到加热。转鼓内的介质加热到一定温度后,从转鼓中导出,从而使高炉渣的物理热得到合理利用。

另外,日本科技人员^[12]将常规吸热化学反应和高炉渣的余热回收。很多化学反应是生成物的能量之和大于反应物的能量之和,在化学反应中表现为吸热反应。这些反应进行的过程中,需要人为的提供能量来维持化学反应的进行。甲烷-水蒸气法就是充分利用高炉渣的潜在物理热使甲烷和水蒸气进行反应,以达到将高炉渣的物理热转化成化学能的方法。

3.2 高炉渣化学显热的回收利用情况

以上的物理回收方法,都需要借助于载体(如:空气、液态锡等)来回收显热。但是,在整个过

程中综合热能的回收效率并不是很高。从资源综合利用的角度上讲,最有效进行热回收的方法是直接利用熔渣及显热生产高附加值的产品。

(1) 高炉渣生产渣棉

早在上个世纪50年代,我国首次在高炉渣沟末端,在喷嘴处通入压缩空气或蒸汽作为喷吹介质,将未经调质、调温处理的熔融态高炉渣喷吹成矿渣棉纤维^[13]。如果利用液态高炉渣直接调质生产矿渣棉,高炉渣显热的利用率在80%以上,可以大幅度降低矿渣棉的生产成本。

(2) 高炉渣生产成型陶瓷

近些年来,欧美国家在研究高炉渣制造高附加值的陶瓷产品领域取得了丰硕的成果。例如:美国的Agarwal G.等^[14]利用钢铁炉渣制造富CaO的微晶玻璃,它具有比普通玻璃更低的热膨胀系数,更高的机械强度,又具有显著的耐磨性和耐腐蚀性能。西欧的Goktas A.用废钢铁炉渣制造出透明玻璃和彩色玻璃陶瓷,可以用作墙面装饰块及地面瓷砖^[15]。作为结构材料、功能材料、装饰材料等可以广泛应用于建筑,航空,化工,电气,电子等行业。

1979年日本Harada等利用高炉熔渣与铝业红泥在高温下发生热化学反应^[16],产生不膨胀、不破碎的成分,来改善高炉熔渣的稳定性,使其成为路基的替代品。当熔融炉渣即将出炉的时候,加入一定的调节成分使其均匀混合。浇筑到特定的铸造型中,能得到对应形状的建筑制件。这样,由高炉渣直接获得高附加值的陶瓷产品,既消除了水淬渣带来的问题,又间接回收了炉渣的显热。该熔渣热态技术成本低,适合中小规模钢铁企业。

杨铎等^[17]也对利用工业熔渣直接生产节能型建材(XP砖)进行了探讨。

3.3 利用炉渣显热制煤气技术

刘宏雄^[18]提出利用高炉渣显热生产煤气的工艺,该技术也是基于对熔渣进行粒化处理。高炉渣在处理中需要急速冷却,放出大量的热;而煤的气化反应正好是一个吸热的过程,需要利用高炉渣的显热来确保所需要的反应温度。

此技术在理论上可行,但其问题在于:气化反应的残渣将影响高炉渣的综合利用;同时,气化反应不彻底,煤的转化率不高。

4 物理显热回收和化学显热回收的对比

传统的物理法显热回收的特点是以蒸气、热水为介质回收熔渣的热量。但是普遍存在的一些问题:一是高炉渣的导热系数很低,不利于炉渣热量的传导。这是制约高炉渣进行余热回收的最重要的因数。在液相阶段,高炉渣的导热系数为 $0.1\sim 0.3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,在固相阶段也只有 $1\sim 2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,所以高炉渣的传热很慢^[19]。二是能量传递的层数多,热量散失很大。熔渣所含有的高品质能量经过大量的介质,层层传递,层层递减。等到回收的时候已经是低温低品质的热量。并且温差越大,能量损失越大。而目前钢厂在二次能源利用的现实是高品质余热资源不足,低品质余热资源过剩^[20]。这样,即便以低温烟气(蒸汽)的形式回收了熔渣显热,意义也不大。

相比之下,化学法回收炉渣热量拥有很多优势。首先,可以省去很多的余热回收设备,其次,化学法回收能量形式转化的次数比较少,炉渣的热量损失少。最后,从资源的综合利用方面来讲,它的效率要远远高于物理法。但是,化学法生产高附加值产品消耗的渣量有限且工艺尚不成熟,产品的种类比较有限。

5 发展趋势

鉴于目前高炉渣处理方法存在一些技术上问题,物理法和化学显热回收法都存在一些弊端。急需开发一种全新的高炉渣显热回收技术:高炉渣干法粒化。粒化渣即做矿渣水泥,又可高效回收炉渣显热。

大体上思路是:利用转碟与风淬结合的方法进行高炉渣的干法粒化,显热回收尽量采取直接利用的方式:当液态渣下落至高速旋转的转盘时,通过转盘的离心力将渣破碎。离开转盘的高炉渣在下降到某过程的多处,需鼓风机鼓入大量空气加速冷却。炉渣在下落过程中逐渐被冷却,而空气则被逐渐加热。冷却到一定温度的粒化渣作为

水泥原料出售,被加热的空气可回收利用^[21]。

高炉渣干法粒化及其热能回收所要研究的关键技术在于:(1)合理的高炉渣冷却条件的控制,以产生足够数量的玻璃体,满足后续水泥生产的需求;(2)机械装置的强度,持久性,可维护性需要引起注意;(3)要兼顾粒化渣的冷却速度和余热回收的效果。一方面要想在短时间内获得大幅度的温降,必须加大冷却介质(通常为空气)的流量;另一方面想介质的流量过大,又会导致回收热量品质不高。

因此,高炉渣干法粒化及其热能回收技术从根本上改变了高炉渣的传统处理方法,也是对炼铁生产技术的一项重点革新,可产生显著的社会效益、经济效益和环境效益,且具有极为广阔的市场前景和发展前途。

参考文献:

- [1] 胡俊鸽. 国内外高炉炉渣综合利用技术的发展及对鞍钢的建议[J]. 鞍钢技术, 2003(3): 8-11.
- [2] 张升晓, 岳钦艳, 于慧, 等. 高炉渣制备微晶玻璃的研究[J]. 山东大学学报:理学版, 2006, 41(5):129-133.
- [3] 王筱留. 钢铁冶金学炼铁部分等[M]. 北京:冶金工业出版社, 2000.24.
- [4] 孔德文, 张建良, 郭伟行. 高炉渣处理技术的现状及发展方向[J]. 冶金能源, 2011(05):55-60.
- [5] 冯会玲, 孙宸, 贾利军. 高炉渣处理技术的现状及发展趋势[J]. 工业炉, 2012, 34(4): 16-18.
- [6] 曹智堂. 拉萨法水渣处理系统运行实践[J]. 宝钢技术, 1988, 02:22-25.
- [7] Zhang Ze Long, Chen Lin Gen, Yang Bo, et al. Thermodynamic analysis and optimization of an air brayton cycle for recovering waste heat furnace slag[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90:742-748.
- [8] 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):83-87.
- [9] DING Lin Feng, MING Wei, WANG Qing Wei, et al. Preparation and characterization of glass-ceramic foams from blast furnace slag and waste glass[J]. Materials Letters, 2015, 141:327-329.
- [10] 林高平. 熔融渣显热回收利用技术综述及展望[J]. 中国废钢铁, 2007(4):30-36.
- [11] Kenney W F. Energy Conservation in the Process

Industries[M]. Orlando: Academic Press, 1984.

[12] Toshio M, Jun-ichirof Y, Tomohiro A. Granulation of Molten Slag for Heat Recovery[A]. 2002 37th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)[C]. 641-646.

[13] 龙跃, 杜培培, 张良进, 等. 高炉熔渣直接纤维化矿渣棉的性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2016, (2):019.

[14] Agrawal G, Speyer RF. Devitrifying Cupola slag for use in Abrasive Products[J]. JOM, 1992, 44(3):32-37.

[15] Goktas A A. Manufacture and Properties of Slag-based Transparent glass and Light Coloured Glass-ceramic[J]. Second International Ceramics Congress. 1994:405.

[16] Genzaburo H, Takuma Y, Masao T. Process for Treating

Molten Steel Slag With Red Mud From Aluminum Industry [P]:USA, US 4179279.1979-12-18.

[17] 杨铎, 杨文崧. 利用工业熔渣及其显热生产节能型建筑材料可能性探讨[J]. 中国建材, 2006, 15(3):78-81.

[18] 刘宏雄. 利用高炉熔渣作热载体进行煤气化的探讨[J]. 节能, 2004, 8(6):41-43.

[19] 李顺. 国内外熔融高炉渣显热回收方法[J]. 工业加热, 2009, 38(3):1-4.

[20] 戴晓天, 齐渊洪, 张春霞. 熔融钢铁渣干式粒化和显热回收技术的进展[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(7):1-6.

[21] 冯会玲, 孙宸, 贾利军. 高炉渣处理技术的现状及发展趋势[J]. 工业炉, 2012, 34(4): 16-18.

Present Situation and Prospect of Using Blast Furnace Slag Sensible Heat Recovery

Gao Yang, Gui Yongliang, Song Chunyang, Hu Binsheng, Wang Yawen

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: Ironmaking blast furnace slag is a byproduct of the production process, but also the industrial production waste. With the rapid development of steel industry, blast furnace slag emissions are increasing. Compared to some developed countries, China's utilization of blast furnace slag is relatively low. Blast furnace slag pile is not only a waste of land resources, but also seriously pollute the environment, and the sustainable development of China's current program contrary. But if it is through recovery and use, it can be good mineral resources. At the same time, blast furnace slag also contains a lot of sensible heat. China's traditional method of water quenching slag sensible heat without any recycling, and simply lost a lot of heat. In view of this situation, domestic and foreign researchers conducted several experiments can be divided into two directions: physical and chemical heat recovery method. Heat method primarily physical high slag collected achieve significant heat recovery through a specific energy carriers. Chemical recycling method is the direct use of the sensible heat of the slag and the production of high value-added products. Compared with the former, the chemical recovery process of sensible heat recovery more efficient, to better reflect the comprehensive utilization of blast furnace slag. This paper reviewed in detail the physical and chemical methods sensible heat recovery, and analyzed the advantages and disadvantages of each method. Based on this, the authors developed a new way of recycling: blast furnace slag dry granulation technology, which is the development trend of blast furnace slag processing.

Keywords: Blast furnace slag; Sensible heat recovery; Physical heat exchange method; Chemical recycling method; Dry granulation technology