

Research Progress and Development Direction of Soft-Melt Dripping Performance of Iron Ore

Guofeng Gao^{1,2}, Xiaolei Zhou^{1,2*}, Zhe Shi^{1,2}, Bangfu Huang^{1,2}, Jinlin Lu^{1,2}, Weisai Liu^{1,2}, Lei Liu^{1,2}, Yingtao Meng^{1,2}, Lanpeng Liu^{1,2}

¹Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

²Clean Metallurgy Key Laboratory of Complex Iron Resources, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Email: *zhouxiaolei81@163.com

Received: Jul. 1st, 2018; accepted: Jul. 13th, 2018; published: Jul. 20th, 2018

Abstract

The blast furnace is the largest reactor used by humans so far. It mainly realizes the reduction process of iron ore. In the blast furnace, the iron ore mainly undergoes reduction reaction and soft melt dripping reaction. This paper introduces the soft melt drop of iron ore, the current research progress at home and abroad and its research direction, and the direction that should be developed in the future.

Keywords

Iron Ore, Soft Melt Drop Performance

铁矿石软融滴落性能研究进展与发展方向

高国锋^{1,2}, 周晓雷^{1,2*}, 施哲^{1,2}, 黄帮福^{1,2}, 卢金霖^{1,2}, 刘维赛^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 孟颖涛^{1,2}, 刘兰鹏^{1,2}

¹昆明理工大学, 冶金与能源工程学院, 云南 昆明

²昆明理工大学, 复杂铁资源洁净冶金重点实验室, 云南 昆明

Email: *zhouxiaolei81@163.com

收稿日期: 2018年7月1日; 录用日期: 2018年7月13日; 发布日期: 2018年7月20日

*通讯作者。

文章引用: 高国锋, 周晓雷, 施哲, 黄帮福, 卢金霖, 刘维赛, 刘磊, 孟颖涛, 刘兰鹏. 铁矿石软融滴落性能研究进展与发展方向[J]. 矿山工程, 2018, 6(3): 170-174. DOI: 10.12677/me.2018.63023

摘要

高炉作为目前为止人类用到的最大的反应器，主要用于实现铁矿石的还原过程，在高炉中铁矿石主要发生还原反应与软熔滴落反应，本文介绍了铁矿石软融滴落性能国内外目前的研究进展与其研究方向，以及将来应该发展的方向。

关键词

铁矿石，软融滴落性能

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

软融滴落是高炉生产过程中的重要过程。铁矿石不是纯物质，没有确定的熔点，而是具有一定范围的软融区间。高炉在炼铁过程中，随着炉料的下降，炉料温度升高，铁矿石受热膨胀，继续加热开始发生软化。软化的炉料继续下降，在下降过程中发生还原与熔融。在渣项与金属形成液滴前，软融层的透气性极差。此时，炉料的透气性极差，不利于反应的进一步进行。因此铁矿石的软融滴落性能具有重要的研究意义。

目前国内外研究者[1]-[10]，从 MgO、高炉操作条件、Al₂O₃、焦炭混装、热压含碳球团、碱度等几个方向对高炉的软融滴落性能进行了研究。本文对以前提出的研究结果进行总结分析，并对以后的发展方向提出自己的观点。

2. 铁矿石软融滴落的影响因数

2.1. 成分对铁矿石软融滴落的影响

钒钛磁铁矿是以铁、钒、钛元素为主，含有钴、镍、铬等其他有用元素的多元共生铁矿，其中含有丰富的 TiO₂。王耀祖[11]等人，通过研究发现，随着烧结矿中 TiO₂ 质量分数的增加，开始软化温度逐渐升高，试样软化开始温度 t_{10} 和试样软化终了温度 t_{40} 均在 1130℃ 以上，低钛烧结矿的软化温度区间 Δt_A 为 195℃，其余含钛烧结矿的软化温度区间 Δt_A 均在 200℃ 以上。说明了 TiO₂ 会使炉料中生成高熔点物质不利于反应的进行。同时钛会使炉料的软融区间变大，增大煤气留阻力损失不利于高炉内反应的进行。

柳政根[12]等人，通过研究发现随着烧结矿中 MgO 质量分数的提高，综合炉料的软化区间 $t_{40} \sim t_4$ 变宽；熔化区间 $t_D \sim t_S$ 稍有收窄，软熔带变薄且位置略微下移；熔滴性能总特征值 S 先减小后增大，综合炉料透气性先变好后恶化，在 MgO 质量分数为 2.98%~3.40% 时透气性最好；滴落率逐渐变小，烧结矿中 MgO 质量分数在 3.40% 左右为宜，此时高炉渣中 MgO 质量分数约为 12%。说明适当添加 MgO 有利于铁矿石的软融滴落性能。

王喆[13]等人，通过研究发现随着 Al₂O₃ 质量分数增加促进了还原过程中钙铝黄长石(2CaO·Al₂O₃·SiO₂)和浮士体共晶相(2CaO·SiO₂-2CaO·Al₂O₃·SiO₂-FeO)等低熔点富铝相的生成，导致高 Al₂O₃ 烧结矿在较低温度下出现开气孔孔隙封闭，从而降低了压差陡升温度。在熔融滴落阶段，高 Al₂O₃ 烧结矿中渣相的 Al₂O₃

质量分数较高。存在于金属铁颗粒之间渣相的液相线和黏度随 Al_2O_3 质量分数增加而提高,在一定程度上降低金属铁颗粒的聚合,使得烧结矿的滴落温度提高。同时,高 Al_2O_3 烧结矿具有较宽的熔滴区间,使得熔融滴落区间的透气性较差。说明添加 Al_2O_3 不利于铁矿石的软融滴落性能。

2.2. 碱度对软融滴落性能的影响

陈伟[14]等人,研究了烧结矿碱度变化对软融滴落性能的影响。试验结果表明:对于高碱度烧结矿来说,随着碱度升高,开始软化温度、开始熔化温度均呈现下降趋势,滴落温度升高,软熔区间、熔化区间均变宽,初渣熔点升高,整体性能呈现变差趋势。

刘杰[15]等人,研究发现随碱度提高,矿物组成渐趋合理,烧结矿的还原和粉化指标改善,在碱度为 1.90~2.05 时,单一烧结矿的软化熔融性能较好;在碱度为 1.95~2.15 时,透气性较好;当烧结矿与球团矿搭配,碱度为 1.90~2.15 时,软熔区间窄,S 特性值低。说明适当的碱度有利于改善铁矿石的软融滴落性能。

储满生[16]等人,在固定碳氧比 $n_{(\text{FC})}/n_{(\text{O})}$ 为 1.00 的条件下,通过改变热压含碳球团碱度,系统研究了碱度对热压含碳球团软融滴落性能的影响。研究表明:碱度对软化区间、熔化区间、滴落率等软融滴落性能参数有显著的影响。随着碱度的增加,软化区间 $t_{40}\sim t_4$ 先变窄后加宽,在碱度为 1.40 时最窄,降至 331°C ;熔化区间 $t_D\sim t_S$ 先缓慢变窄后急剧加宽,在碱度为 1.00 时最窄,降至 47°C ;滴落率先增加后降低,在碱度为 1.20 时滴落率最高,达到 22.22%。从软融滴落性能角度综合考虑,实际生产热压含碳球团时其适宜的碱度范围为 1.00~1.20。

2.3. 焦炭对于软融滴落性能的影响

焦丁与矿石混装一方面可以回收利用焦丁,质量较差的焦丁置换焦炭,降低高炉生产成本;另一方面可以改善高炉操作,高煤气利用率。国内外对矿焦混装的研究已进行多年[7][17]。

陈立杰[18]等人,研究发现矿焦混装对高炉综合炉料的软化区间、熔化区间、滴落率和透气性等软融滴落性能参数有显著影响。随着混装率提高,软化区间 $t_{40}\sim t_4$ 稍微变宽;熔化区间 $t_D\sim t_S$ 逐渐变窄,软熔带变薄且位置下移;熔滴性能总特征值明显减小,综合炉料透气性能显著改善;渣铁滴落率先增加后减少。说明,一定程度的矿焦混装有利于改善铁矿石的软融滴落性能。

南祥民[19]等人,通过实验,就钒钛铁矿的混装率在其软融滴落过程中对钒还原反应的影响进行研究。结果表明:随矿焦混装率增加,炉料的软融滴落性能及透气性得以改善;在利于 V 还原的同时, Ti 的还原也得以发展;从促进 V 还原的角度考虑,矿焦混装率应维持在 50%左右为佳。

2.4. 生产方案对软融滴落性能的影响

吕庆[20]等人,对宣钢 12 种含钛高炉炉料的化学成分及熔滴性能测试结果进行综合分析,给出宣钢 2 号高炉(2500 m^3)、3 号高炉(2000 m^3)、4 号高炉(1800 m^3)不同原料条件下最佳的炉料结构,并对 3 组炉料结构进行比较。发现对于不同的炉料结构铁矿石的软融滴落性能不同。因此选择不同的炉料结构会对性能有所影响。

吴胜利[21]等人,试验考察不同金属化率、不同碳含量下预还原含铁炉料软融滴落特性。结果表明:与未还原含铁炉料相比,预还原含铁炉料的软化温度区间或软熔温度区间虽然较大,但温度区间内的料柱压差较小;熔滴温度区间内,熔化开始温度随着金属化率的增加而升高,滴落温度随铁水碳含量的增加而降低,料柱的最大压差随着金属化率的增加而减小;软融滴落性能特征值(SD)随着金属化率和碳含量的增加而减小。由此推测,高炉使用具有一定碳含量的预还原含铁炉料将有利于增大软化层空隙、降

低熔融层厚度,从而改善软熔带的透气性。

南祥民[19]等人,就钒钛铁矿的预还原度在其软熔滴落过程中对钒还原反应的影响进行了针对性的实验研究。结果表明:随炉料预还原度的增加,铁中钒含量升高,同时炉料的软熔滴落性能有所改善;预还原度为 80%时,铁中钒含量较预还原度 60%提高了近 2 倍。

2.5. 煤粉对于软融滴落性能的影响

热压含碳球团[8] [9] [10] [22]是一种利用煤的热塑性提高冶金性能的新型优质炼铁原料,具有高温强度高,在 1000℃左右热压含碳球团的高温抗压强度在 450 N/个以上,明显优于冷固结合碳球团和常见的氧化焙烧球团、还原速度快、原料适应性强等优点。

相冬文[23]等人,研究了内层为含碳球团、外层为精矿粉的双层结构复合含碳球团的软熔滴落性能,研究结果表明:双层含碳球团随温度升高,表现为先略微膨胀后有 2 段快速收缩的过程;当球团碳氧物质的量比为 2:3 时,双层球团开始软化温度比普通球团高 30℃左右,软化终了温度相差不大;当球团碳氧物质的量比为 1:1 时,双层球团软化终了温度比普通球团低 30℃左右,开始软化温度相差不大;在配碳量相同的条件下,双层含碳球团的开始熔化温度和开始滴落温度较低。说明双层含碳球团有利于改善铁矿石的软融滴落性能。

储满生[24]等人,以常用的炼铁原料为基础,系统研究了配加不同比例的热压含碳球团对高炉炉料的软熔滴落性能的影响,并进行了理论分析。研究表明,配加热压含碳球团对高炉综合炉料的软化区间、熔化区间、滴落率和透气性等软熔滴落性能参数有显著的影响。随着热压含碳球团配比的增加,软化区间 $t_{40}\sim t_4$ 逐渐变宽;熔化区间 $t_D\sim t_S$ 逐渐变窄,熔化开始温度 t_S 逐渐升高,滴落温度 t_D 逐渐降低;滴落率先增加后降低,当配比为 40%时,滴落率最高,为 67.10%;最高压差先下降后升高,但在配加热压含碳球团条件下,炉料的最高压差都有所降低。从综合炉料的软熔滴落性能综合考虑,高炉炉料配加热压含碳球团的适宜配比应为 40%~50%。

在碱度固定为 1.20 的条件下,系统研究了配碳比 $n_{(C)}/n_{(O)}$ 对热压含碳球团软熔滴落性能的影响,并进行了理论分析。研究表明,配碳比对软化区间、熔化区间、滴落率等软熔滴落性能参数有显著的影响。随着配碳比增加,软化区间 $t_{40}\sim t_4$ 先变窄后加宽,在配碳比为 1.00 时最窄,降至 348℃;熔化区间 $t_D\sim t_S$ 也先变窄而后加宽,当配碳比为 1.00 时最窄,降至 46℃;滴落率先增加后降低,在配碳比为 1.08 时滴落率最高,达到 24.66%。从软熔滴落性能角度综合考虑,实际生产热压含碳球团时其配碳比宜定在 1.00 左右。

3. 结语

目前,对于改善铁矿石软融滴落性能的研究主要分为 5 个方面:加煤粉、碱度、混装焦炭、生产方案和成分。而成分主要以研究 MgO 和 Al_2O_3 对铁矿石的软融滴落性能的影响为主。

而目前企业多以添加煤粉和添加成分为主要解决方案,而添加煤粉会带入灰分,增加环境污染,同时会增加脱硫的负担。而添加 MgO 和 Al_2O_3 必然会增加高炉渣量,消耗更多的热能。而对生产方案与焦炭的混装只是对于工艺的改进,不会造成上面的影响。因此对于研究生产方案与焦炭的混装成为了以后研究的重点。

基金项目

云南省教育部资助的 KKJB201752017 项目;云南省教育部科研基金 2016CYH07 产业发展项目;云南省科技计划项目 2017ZE033。

参考文献

- [1] Ichiro, S., Mineo, S. and Masahiro, M. (1981) Melting Property of MgO Containing Sinter. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, **1**, 862-869.
- [2] Yadav, U.S. and Pandey, B.D. (2002) Influence of Magnesia on Sintering Characteristics of Iron Ore. *Ironmaking and Steelmaking*, **9**, 91-94. <https://doi.org/10.1179/030192302225002018>
- [3] Gunther, S. (1998) Experiment and Study on Effects of Different Basicity and Contents of MgO and SiO₂ in Sinter. *ISIJ International*, **8**, 457-462.
- [4] Tocarovskii, I.G., Bolshakov, V.I., Togobitskaya, D.N., et al. (2009) Influence of the Softening and Melting Zone on Blast-Furnaces Melting. *Steel in Translation*, **9**, 34-44. <https://doi.org/10.3103/S0967091209010100>
- [5] Umadevi, T., Sah, R. and Mahapatra, P.C. (2014) Influence of Sinter Basicity (CaO/SiO₂) on Low and High Alumina Iron Ore Sinter Quality. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, **23**, 75. <https://doi.org/10.1179/1743285514Y.0000000052>
- [6] Lu, L., Holmes, R.J., Manuel, J.R. (2007) Effects of Alumina on Sintering Performance of Hematite Iron Ores. *ISIJ International*, **7**, 349. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.47.349>
- [7] Shiro, W., Kanji, T., Hirobumi, N., et al. (2006) Development of High Ratiocoke Mixed Charging Technique to the Blast Furnace. *ISIJ International*, **46**, 513. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.513>
- [8] Matsui, Y., Sewayama, M. and Kasai, A. (2003) Reduction Behavior of Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette in Shaft Furnace and Scope in Blast Furnace Performance Reinforcement. *ISIJ International*, **43**, 1904. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1904>
- [9] Kasai, A., Matsui, Y., Noma, F., et al. (2001) Cold Strength Enhancement Mechanism of Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette. *Tetsu-to-Hagane*, **87**, 313. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.87.5_313
- [10] Kasai, A., Mataui, Y. and Miyagawa, K. (2003) Development of Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette and Basic Investigation on Its Strength Enhancing Mechanism and Reducibility. Science and Technology of Iron Making for Aiming at Energy Half Consumption. MEXT, Tokyo, 205.
- [11] 王耀祖, 张建良, 刘征建, 等. w(TiO₂)对烧结矿矿相结构及软熔滴落性能的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(10): 20-28.
- [12] 柳政根, 储满生, 陈立杰, 等. 烧结矿中MgO对钒钛矿综合炉料软熔滴落的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 655-659.
- [13] 王喆, 张建良, 左海滨, 等. Al₂O₃质量分数对高碱度烧结矿软熔滴落性能影响[J]. 钢铁, 2015, 50(7): 20-25 + 76.
- [14] 陈伟, 李俊平, 申勇, 等. 烧结矿碱度变化对软熔滴落性能影响的试验研究[J]. 河南冶金, 2016, 24(6): 9-11 + 20.
- [15] 刘杰, 张洪宇, 周明顺, 等. 基于软熔滴落性能的高炉合理炉料结构[J]. 钢铁, 2016, 51(9): 11-15.
- [16] 储满生, 柳政根, 王兆才, 等. 碱度对热压含碳球团软熔滴落性能的影响[J]. 钢铁, 2010(7): 8-12.
- [17] Mousa, E.A., Bahich, A. and Senk, D. (2011) Effect of Nut Coke-Sinter Mixture on the Blast Furnace Performance. *ISIJ International*, **51**, 350. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.350>
- [18] 陈立杰, 柳政根, 付小佼, 等. 矿焦混装对钒钛矿综合炉料软熔滴落的影响[J]. 钢铁, 2015(1): 5-10.
- [19] 南祥民. 矿焦混装率对高炉软熔滴落过程钒还原反应的影响[J]. 铸造技术, 2013(6): 732-734.
- [20] 吕庆, 王福佳, 李豪杰. 宣钢高炉合理炉料结构熔滴试验[J]. 钢铁, 2016(6): 19-25, 33.
- [21] 吴胜利, 庾必阳, 张丽华, 等. 预还原含铁炉料在高炉内的软熔滴落行为[J]. 钢铁, 2013(5): 11-16.
- [22] Chu, M.S., Yagi, J. and Nogami, H. (2007) Numerical Evaluation on Lower Temperature Operation of Blast Furnace by Charging Carbon Composite Agglomerates. *Steel Research International*, **78**, 10-18. <https://doi.org/10.1002/srin.200705853>
- [23] 相冬文, 李家新, 梁晨, 等. 双层含碳球团软熔滴落性能的研究[J]. 钢铁研究, 2017(3): 1-5, 62.
- [24] 储满生, 柳政根, 王兆才, 等. 配碳比对热压含碳球团软熔滴落性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010(3): 394-397.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2329-7301，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：me@hanspub.org