

转炉石灰石代替石灰造渣炼钢研究现状及展望

孙华康, 李晨晓, 王书桓, 佟帅, 薛月凯, 张凯璇

(华北理工大学冶金与能源学院, 唐山市特种冶金及材料制备重点实验室,
河北 唐山 063009)

摘要: 系统分析了石灰石代替石灰炼钢造渣工艺的研究现状和发展趋势, 通过对比分析可知, 目前转炉石灰石造渣炼钢工艺简化了整个造渣工艺流程, 提高了化渣脱磷效果, 减少了钢渣产生量, 增加了吨钢经济效益。综合来看, 石灰石炼钢造渣工艺是一种高效、低耗、环保的新型造渣方式, 对促进钢铁企业节能减排和可持续发展具有重要意义。但是石灰石分解需要消耗大量的热量, 进而影响化渣速率, 因此, 为了进一步优化石灰石炼钢造渣工艺, 提出一种石灰石喷粉造渣技术, 该技术能有效解决石灰石直接造渣工艺中因热耗大引起的化渣及 CO_2 利用率问题。

关键词: 转炉造渣; 石灰石; 高效脱磷; 少渣; 节能减排

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.013

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 01-0104-07

近些年来中国粗钢产量与日俱增, 钢渣排放量也是大大增多, 而在造渣工艺环节对于能源的消耗和环境的污染却日益加重。传统转炉造渣炼钢过程均是采用石灰作为造渣剂化渣, 该工艺过程存在着资源浪费、 CO_2 过度排放、环境污染严重等问题。因此, 如何优化传统转炉造渣炼钢工艺成为国内外企业及专家学者关注和研究的重点。

北京科技大学李宏^[1-2]提出了“转炉石灰石代替石灰造渣炼钢”的方法, 该工艺是直接将石灰石加入到转炉内, 在炉内经高温直接分解化渣, 从而缩短传统的石灰造渣工艺流程, 减少了燃料消耗和污染物排放, 达到降低能源消耗和减少环境污染的双重目的。近年来转炉炼钢采用石灰石代替石灰造渣是一大热点研究, 由于石灰是石灰石在高温环境下烧制而成的, 而转炉作为天然的高温容器为石灰石转化成石灰提供了优越条件, 采用石灰石造渣的终渣碱度变化不大, 冶炼终点钢水成分稳定, 脱磷效果良好, 减少了石灰用量还均衡了铁水的化学热和物理热, 减少了原料消耗。

目前, 转炉石灰石造渣炼钢工艺还在不断探索过程中, 对于石灰石的加入量及颗粒大小, 尚

需要进一步深入研究。

1 转炉炼钢石灰石造渣工艺概述

石灰石的主要成分为碳酸钙 (CaCO_3), 通常被用作建筑材料和钢铁工业造渣原料。在钢铁工业生产过程中石灰石的消耗量巨大, 而我国石灰石资源日益紧张, 所以势必寻找一种减少资源消耗冶炼方法。

转炉内高温铁水为石灰石煅烧提供了有利环境, 是直接采用石灰石进行造渣炼钢的先决条件之一。石灰石直接加入转炉内, 在炉内铁水拥有自身的物理热, 满足了煅烧石灰石的温度, 使石灰石在转炉内快速分解, 在转化为石灰的同时产生大量气体, 气泡上浮过程中形成“熔体柱”运动, 会产生强大的搅拌动力使物质传质和热量传递更加均匀, 从而改善冶炼动力学条件, 更好地弥补了转炉前期动力学不足的缺点^[3], 而且大量气泡上浮带动杂质上浮, 满足转炉造渣脱磷的条件。

1.1 石灰石在转炉中的造渣机理

高温下石灰石在转炉内会发生爆裂分解反应, 释放出大量 CO_2 气体, 造渣过程中能有效

收稿日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金 (52274334); 国家自然科学基金 (52004097); 河北省自然科学基金 (E2019209597)

作者简介: 孙华康 (1997-), 男, 硕士, 研究方向为特种冶金与材料制备。

通信作者: 李晨晓 (1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为特种冶金与材料制备。

阻止 SiO_2 与石灰石接触，减少了高熔点化合物 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 生成，有利于更好的化渣，由于 SiO_2 与 CaO 反应在石灰表面生成致密的硅酸钙外壳影响快速化渣。石灰石块继续爆裂分解成许多更小粒度的石灰石块和石灰块，而小块石灰石更容易吸热发生连续性分解反应，最终得到弥散在渣中的小块或微粒状石灰。相比块状石灰而言，弥散

在渣中的小块或微粒石灰与炉渣接触的反应界面更大，成渣速度更快。高温下爆裂分解的小块或微粒状石灰属于初生石灰具有更高的活性，同时表面上具有大量列缝和气孔，更有利于炉渣中组元向石灰内部扩散和渗透，加快反应形成新造熔渣，有效提升了化渣速率^[4-5]。石灰石造渣微观机理见图1。

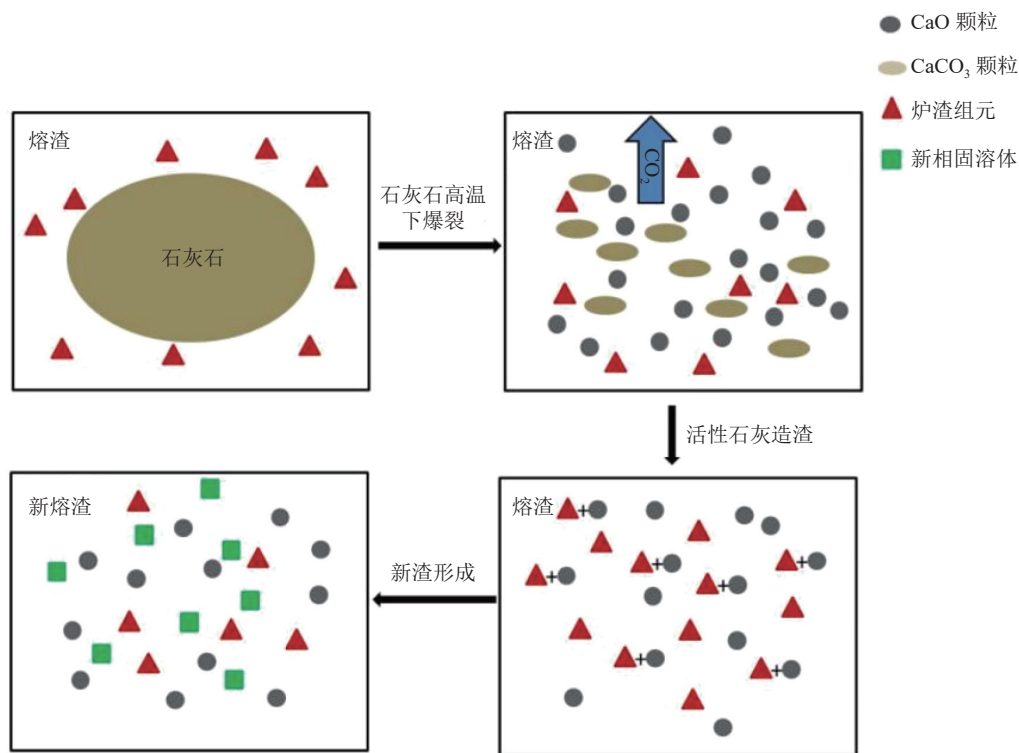


图1 石灰石造渣微观机理
Fig.1 Microscopic mechanism of limestone slagging

2 转炉石灰石造渣炼钢现状分析

“十一五”规划中我国对钢铁行业节能降耗和废弃物再利用提出了明确要求和目标，重点强调工业清洁生产，实现钢铁工业可持续发展。而转炉炼钢石灰石代替石灰造渣具有显著优越性，不仅能降低能耗，还能从源头减少新渣的产生量，为钢铁企业实现最大化经济效益、社会效益和环境效益。因此，转炉炼钢石灰石代替石灰造渣成为国内外学者研究热点，既有实验室基础研究，又有工业实验，为优化造渣提供理论基础。

2.1 转炉石灰石造渣技术理论性研究

李晨晓等^[6]对不同地区的石灰石矿进行实验，研究了石灰石微观形貌对其煅烧后石灰孔隙度、水活性的影响。研究结果表明，石灰石在相同煅烧温度和时间下，随着石灰石微观晶粒度增

大，煅烧后所获得石灰越疏松、孔隙率越高，石灰活性越大，在急速受热时会发生爆裂，化渣速度更快。

冯佳等^[7]对传统石灰造渣炼钢工艺和新型石灰石代替石灰造渣炼钢工艺进行了对比分析，用薄片状石灰石模拟块状石灰石中的单个薄层，在不同条件下煅烧，测量产物收缩率、比表面积、孔容积、孔径、晶体结构及水化活性等参数。结果发现，在高温短时间内煅烧的石灰石薄片收缩率低、比表面积和孔容积大、平均孔径小、晶粒细小、晶格畸变大、水化反应速度极快。石灰石造渣工艺中新生成的石灰反应活性高于传统工艺，有利于加快化渣速率。

茹继龙^[8]对转炉炼钢造渣过程使用石灰石代替石灰做造渣剂，所带来的节能减排成效进行分析。石灰石代替石灰做造渣剂进行转炉造渣炼钢

过程,在技术指标上达到钢水冶炼的质量标准,使钢水中的硫、磷等元素,以及各种夹杂物含量达标,达到节能的效果。石灰石直接加入转炉内,省去了在石灰窑中的煅烧过程,可以相对减少石灰石在石灰窑中烧制所产生的大量气体和灰尘,减少污染物的产生。

胡彬等^[9]对转炉内高温下石灰石颗粒的爆裂行为进行研究。研究结果表明,煅烧温度和时间对石灰石的爆裂行为影响较大,而石灰石固体粒径影响不明显。随着石灰石在转炉内煅烧温度和时间增加,石灰石样品表面裂纹明显增多并破碎成更小的颗粒。李自权等^[10]研究了在转炉炼钢过程前期加入石灰石进行造渣,发现石灰石可以在5~6 min内完成爆裂分解,很快的完成煅烧转化和造渣过程,且成渣状态良好,完全满足钢铁生产的要求。

熊天宇^[11]等对转炉造渣炼钢过程中采用石灰石造渣的合理性和可行性进行了研究,分别从石灰的生产工艺、石灰的物化性质、石灰在炼钢中的作用和转炉热平衡等多个方面进行分析。研究结果表明,使用石灰石进行炼钢化渣不仅可以达到使钢水各数据达标,而且相较于石灰造渣实现了节能减排。

周宝等^[12]对石灰石替代石灰的比率进行了研究。研究结果表明,石灰石替代石灰的比例会受到多种因素的影响,硅含量对替代比的影响存在一个临界值,当铁水硅含量低于临界值时,硅含量提高,替代比随之提高;硅含量高于临界值时,硅含量提高,替代比随之降低。当铁水比为94%、渣碱度 $R=3.5$ 时,石灰石替代比1.02,热量略有富余。随着铁水碳含量、锰含量、铁水温度、铁水比的提高,石灰石替代比不断提高;随着铁水硅含量、碱度、钢水温度提高,石灰石替代比不断降低。综合前人对石灰石造渣炼钢的基础理论研究,得出以下结论:

- 1) 石灰石微观晶粒度越大,煅烧后产生的石灰活性越高。
- 2) 石灰石造渣工艺缩短了整个转炉炼钢流程,减少了能源消耗。
- 3) 石灰石转炉内爆裂分解产生大量 CO_2 和高活性石灰,加快了化渣速率。
- 4) 石灰石造渣工艺减少了原材料使用和污染物排放,实现节能减排。

通过对转炉炼钢石灰石造渣机理、高温下爆

裂行为、微观形貌对冶炼的影响以及石灰替代比率的研究分析,进一步体现石灰石替代石灰造渣的显著优越性,肯定了石灰石造渣理论的合理性,为石灰石造渣在工业实践中奠定基础。

2.2 转炉石灰石造渣技术工业应用性研究

基于石灰石造渣炼钢工艺原料廉价且消耗量少、脱磷效率高的优势,国内已有数十家钢铁企业采用此工艺,下面就对转炉石灰石造渣工艺在全国范围内的应用情况进行统计^[13-27]。

表1为2010~2020年近十年文献调研统计石灰石代替石灰造渣炼钢工艺在国内各大钢铁厂的应用情况。

表1 石灰石代替石灰造渣炼钢工艺应用统计

Table 1 Statistics on the application of limestone instead of lime for slagging steelmaking technology

序号	公司名称	报道时间	转炉吨位/t	造渣模式	替代比/%	吨钢经济效益/元
1	鞍钢	2011年5月	260	单渣	37	11.6
2	湘钢	2012年7月	90	单渣	16	3.2
3	包钢	2012年8月	80	单渣	20	3.5
4	本钢	2012年9月	180	单渣	26	14.7
5	武钢	2013年8月	120	单渣	43	3.3
6	石钢	2013年11月	60	单渣	100	9.2
7	重钢	2014年3月	80	单渣	53	8.5
8	首秦	2014年10月	100	双渣	35	10.4
9	莱钢	2015年3月	120	单渣	15	12.5
10	舞钢	2015年6月	120	单渣	40	5.2
11	邯钢	2015年10月	260	单渣	-	2.0
12	永钢	2015年12月	50	单渣	50	3.2
13	承钢	2017年3月	100	单渣	-	6.7
14	唐钢	2017年12月	60	单渣	20	3.0
15	马钢	2020年1月	300	单渣	100	7.5

从表1可以看出石灰石造渣工艺获得国内众多家钢铁厂的关注和认可,并得以推广应用。各大钢铁厂在采用石灰石代替石灰造渣炼钢过程中有一些新发现,进一步证明了石灰石代替石灰造渣炼钢的优势。下面对石灰石造渣炼钢工艺在应用中的一些关注点进行解释,对新工艺取得的冶炼效果进行总结。

(1) 替代比 η

现行转炉内存在较多的富余热量来熔化废钢和冷铁料,当用石灰石代替石灰进入转炉造渣炼钢时,与石灰不同,石灰石在炉内分解需要消耗转炉大量的热量,为保证冶炼效果和出钢量,各炼钢厂在石灰石代替石灰的比例上会有所变化,根据表1的数据显示替代比在15%~100%之间浮动。根据首秦、石钢等钢铁厂的工业实验证实石灰石全部替代石灰造渣炼钢是可行的,即替代比

η 为 100% 的转炉并不存在热量不足的问题，只需要做的是调整下入炉金属料中铁水和冷铁料（废钢、烧结矿、铁矿石）的比例，保证转炉内能富余更多热量来供给石灰石分解所用。但目前国内的钢铁厂在采用石灰石造渣炼钢时，由于变动代价、工厂管理规划等一系列问题，并非能够采用替代比为 100% 的石灰石造渣炼钢工艺，需要特别说明的是，通过理论计算和工业实验验证，转炉采用石灰石全部替代石灰造渣炼钢具备可行性和先进性。

（2）经济效益

转炉采用石灰石代替石灰造渣炼钢，不仅节省了石灰生产工序，还降低了造渣料成本，必然会巨大的经济效益。表 1 给出了各大钢铁厂采用新工艺的吨钢经济效益，石灰石造渣工艺吨钢经济效益在 2.0 元到 14.7 元之间，之所以会有较大的差别是因为各厂的生产情况以及核算方式存在不同，例如某些钢厂仅仅核算了因石灰石和石灰的价格差带来的经济效益，而没有核算省去石灰窑厂所节省的整体效益。虽然石灰石造渣炼钢工艺在各大钢厂取得经济效益略有差别，但他们的报道均证实了转炉采用石灰石代替石灰造渣炼钢会节省成本，产生巨大的经济效益。根据已发表的数据统计分析，相比现行石灰造渣工艺，石灰石代造渣工艺的平均吨钢经济效益为 7.0 元。

（3）增收转炉煤气

石灰石在转炉内分解会释放出大量的 CO_2 气体，其中部分 CO_2 会与铁水中的 C、Si、Fe 等元素反应形成 CO，因此采用石灰石代替石灰造渣后，必然会增加转炉炉气中 CO 的生成量，尽管每个钢铁厂的替代比和转炉煤气回收条件存在差别，但石灰石的加入无疑会增加转炉吨钢煤气回收量。武钢和首秦的文献报道均证实了石灰石造渣在增收煤气回收量方面的功效。

（4）减少入炉造渣料及渣量

根据石灰石和石灰的相对原子质量之比，1.79 t 石灰石可代替 1 吨的石灰参与转炉造渣炼钢工序，但通过相关的文献报道以及大量的工业实验证实，当按照理论计算值对转炉造渣所需石灰石量进行添加时，炉渣碱度会有所提高；同时发现采用石灰石造渣炼钢时，较低碱度的炉渣也可保证比较高的脱磷率。究其原因是因为转炉采用石灰石代替石灰造渣后，铁水中的 Si 元素有一部分会氧化成 SiO_2 气体直接进入炉气中，这样带来的

结果就是再造同等碱度炉渣炉渣脱磷时，石灰石造渣工艺可以减少入炉氧化钙 CaO 的加入量，而随着入炉造渣料加入量的减少，转炉渣量也会随之减少。包钢、本钢的文献均证实了石灰石造渣工艺可以减少转炉石灰的用量，减少比例从 20% 到 50% 不等。

以上对石灰石代替石灰造渣炼钢工艺在国内的应用情况进行了统计，并对新工艺的经济效益进行了核算分析，各大钢铁厂的应用实例也证实了新工艺在减少石灰用量，增收转炉回收煤气 CO 量，以及降低炉渣渣量等方面的优势。总之，相信随着石灰石代替石灰造渣炼钢工艺的优势逐渐展现，新工艺必定会得到更加广发的认可和运用。

3 石灰石造渣炼钢工艺的解析与展望

现阶段钢铁冶炼过程中，一直都是以石灰作为最主要的造渣剂，然而石灰的成渣效果受多种因素的影响，其中石灰的活性对于化渣影响尤为突出，高活性石灰的化渣效果远优于低活性石灰，因此各国专家都关注于活性石灰的生产制造，可是在生产高活性石灰的过程中对于资源的消耗和环境的污染相当严重，进而也增加了钢铁冶炼的成本。

图 2 石灰造工艺流程^[28]，由图 2 可知，石灰造渣过程工序繁琐，第一步要对石灰石进行煅烧，既消耗了大量燃料，又产生了大量的粉尘和 CO_2 造成严重的环境污染。第二步要对石灰进行降温，降温时不仅使石灰吸收大量水分和 CO_2 ，而且使石灰的活性降低。第三步，石灰加入转炉内造渣，需要再次煅烧升温，消耗燃料，而且二次煅烧使得石灰活性再次降低。

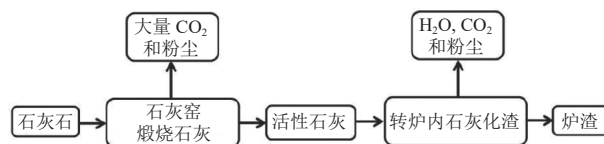


图 2 石灰造渣流程

Fig.2 Lime slagging flow chart

图 3 为石灰石转炉炼钢造渣示意图^[28]。相比于石灰造渣工艺来说，有一个非常突出的特点，就是其取消了石灰石煅烧工序，从而不会产生石灰石煅烧过程所带来的能源消耗和环境污染，同时提高了化渣时的石灰活性，提高了化渣速率。采用石灰石造渣做到了将石灰石煅烧和熔解化

渣两道工序一体化,实现了节能减排,进而提高收益。

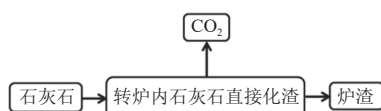


图3 石灰石造渣流程

Fig.3 Limestone slagging flow chart

相比传统石灰造渣而言,石灰石造渣工艺在减少环境污染和降低能源消耗方面有了很大提升,尤其在加快成渣速率,提高脱磷率,提高煤气回收率,减少钢渣产生量等方面比较突出。但现阶段石灰石造渣炼钢工艺还不够完善,石灰石分解需消耗大量热量,尤其通过料仓从顶部集中加入大批量时,耗热量更大。加入的石灰石直径一般在10~40 mm之间,较大石灰石块不易煅烧分解,石灰石加入熔渣后由于分解吸热,导致石灰石与初渣接触面温度快速降低,形成较硬渣壳,反应表面活性降低,不利于后续化渣过程;另外石灰石密度约为2.7 g/cm³为铁水熔池的一半,通过转炉顶部直接加入后,即便有顶吹氧气的搅拌作用,但仍有部分石灰石会浮于熔池上部,石灰石分解产生的CO₂无法与熔池充分接触,直接进入炉气,CO₂利用率不高。为了解决这个问题,本文提出转炉底部高压喷石灰石粉造渣炼钢冶炼的方法,转炉底部喷吹的石灰石颗粒粒径较小,传热过程不再受限制,可以在金属熔池中迅速被加热分解,煅烧生成的优质石灰具有比表面积大、孔隙度大、堆密度小的特点,表面活性较高,可提高造渣效果和脱磷速率;而且石灰石颗粒分解释放的CO₂作为内生气源可充分参与炼钢反应,替代部分氧气供氧的同时实现软吹,改善熔池动力学条件,实现CO₂的资源化利用。

4 结 论

综上所述,结合当前钢铁冶金行业造渣炼钢工艺的发展现状和发展趋势,转炉石灰石造渣炼钢简化了整个造渣工艺流程,实现了工序的节能减排,提高了化渣脱磷效果,增加了吨钢经济效益,具有十分可观的发展前景。但是现阶段石灰石造渣工艺还不够完善,需要进一步优化探索,提出一种石灰石喷粉造渣技术,能有效解决石灰石直接造渣工艺中因能耗大引起的化渣及CO₂利用率问题,可有效改善石灰石造渣工艺,具有较高的学术价值,且满足了当前国家、社会、企业

对节能减排和循环经济的需求。

参考文献:

- [1] 李宏, 曲英. 一种在氧气顶吹转炉中用石灰石代替石灰造渣炼钢的方法: CN101525678 [P]. 2009-09-09.
- LI H, QU Y. Method for making slagging and steelmaking by replacing lime with limestone in oxygen top-blowing converter: CN101525678 [P]. 2009-09-09.
- [2] 李宏, 曲英. 氧气转炉炼钢用石灰石代替石灰节能减排初探[J]. 中国冶金, 2010, 20(9):45-48.
- LI H, QU Y. Discussion on limestone addition instead of lime for energy-saving and emission reduction in BOF steelmaking[J]. China Metallurgy, 2010, 20(9):45-48.
- [3] 谢基表, 闫海龙, 鲍生科, 等. 转炉石灰石直接造渣炼钢工艺研究[J]. 河北冶金, 2018, 271(7):18-21.
- XIE J B, YAN H L, BAO S K, et al. Study on direct slagging steel-making process by converter[J]. Hebei Metallurgy, 2018, 271(7):18-21.
- [4] 朱英雄, 钟良才. 转炉炼钢用石灰和石灰石熔化成渣机理及应用[J]. 炼钢, 2017, 33(1):12-17.
- ZHU Y X, ZHONG L C. Melting slagging mechanism and application of lime and limestone in BOF steelmaking[J]. Steelmaking, 2017, 33(1):12-17.
- [5] 路文刚, 朱荣, 于灏. 转炉利用石灰石造渣炼钢的试验研究[J]. 工程科学学报, 2016, 38(S1):78-82.
- LU W G, ZHU R, YU H. Research on slagging by limestone during BOF steelmaking process[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(S1):78-82.
- [6] 李晨晓, 王书桓, 赵定国, 等. 石灰石微观形貌对其煅烧后物化性能影响拌混合影响[J]. 矿产综合利用, 2020(1):184-187.
- LI C X, WANG S H, ZHAO D G, et al. Effect of microscopic morphology of limestone on its physical and chemical properties after calcining[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):184-187.
- [7] 冯佳, 胡龙飞, 朱少楠, 等. 不同条件下石灰石煅烧的产物特性研究[J]. 炼钢, 2015, 31(6):73-78.
- FENG J, HU L F, ZHU S N, et al. Characteristics of limestone calcined under different conditions[J]. Steelmaking, 2015, 31(6):73-78.
- [8] 茹继龙. 氧气转炉炼钢用石灰石代替石灰节能减排初探[J]. 南方农机, 2018, 49(11):47.
- RU J L. Discussion on limestone addition instead of lime for energy-saving and emission reduction in BOF steelmaking[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(11):47.
- [9] 胡彬, 李建立, 李静, 等. 炼钢温度条件下石灰石颗粒的热爆裂行为研究[J]. 炼钢, 2017, 33(1):34-38.
- HU B, LI J L, LI J, et al. The explosion behavior of limestone particles during calcination at steelmaking temperature[J]. Steelmaking, 2017, 33(1):34-38.
- [10] 李自权, 李宏, 郭洛方, 等. 石灰石加入转炉造渣的行为初探[J]. 炼钢, 2011, 27(2):34.
- LI Z Q, LI H, GUO L F, et al. Preliminary research on the

behavior of limestone charged into converter in the process of making slag[J]. *Steelmaking*, 2011, 27(2):34.

[11] 熊天宇, 谢煜程, 白莎, 等. 浅议转炉炼钢使用石灰石造渣的合理性和可行性[J]. *中国高新技术企业*, 2017(9):86-88.

XIONG T Y, XIE Y C, BAI S, et al. Discussion on the rationality and feasibility of using limestone for slagging in converter steelmaking[J]. *China High-Tech Enterprises*, 2017(9):86-88.

[12] 周宝, 李宏, 朱荣, 等. 转炉炼钢石灰石替代石灰比率研究[J]. *河南冶金*, 2015, 23(5):4-6+37.

ZHOU B, LI H, ZHU R, et al. Research on proportion of lime substituted by limestone in using limestone instead of lime for BOF slagging[J]. *Henan Metallurgy*, 2015, 23(5):4-6+37.

[13] 刘宇, 王文科, 王鹏, 简龙. 转炉采用石灰石部分替代石灰的冶炼实践[J]. *鞍钢技术*, 2011(5):41-44.

LIU Y, WANG W K, WANG P, JIAN L. Steel-making operations by substituting limestone for some limes in converter[J]. *Angang Technology*, 2011(5):41-44.

[14] 田志国, 汤伟, 潘锡泉. 转炉采用石灰石替代部分石灰冶炼的应用分析[J]. *中国冶金*, 2012, 22(7):47-51.

TIAN Z G, TANG W, PAN X Q. Application analysis of substituting limestone for some limes in BOF[J]. *China Metallurgy*, 2012, 22(7):47-51.

[15] 王鹏飞, 张怀军. 石灰石替代石灰炼钢造渣效果研究[J]. *包钢科技*, 2012, 38(4):30-32.

WANG P F, ZHANG H J. Study on slagging effects with limestone instead of lime in steelmaking[J]. *Science and Technology of Baotou Steel*, 2012, 38(4):30-32.

[16] 魏宝森. 石灰石在转炉炼钢中的应用[J]. *材料与冶金学报*, 2012, 11(3):157-159+170.

WEI B S. Limestone in converter steelmaking practice[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2012, 11(3):157-159+170.

[17] 雷强, 田勇, 朱志鹏, 等. 石灰石在转炉冶炼中应用实践[A]. 中国金属学会炼钢分会. 第十七届(2013年)全国炼钢学术会议论文集(A卷)[C]. 中国金属学会炼钢分会: 中国金属学会, 2013: 4.

LEI Q, TIAN Y, ZHU Z P, et al. Application practice of limestone in converter smelting[A]. The Steelmaking Branch of the Chinese Society of Metals. The 17th (2013) National Steelmaking Conference Proceedings (Volume A) [C]. Chinese Society of Metals Steelmaking Branch: Chinese Society of Metals, 2013: 4.

[18] 董大西, 冯佳, 年武, 等. 石钢 60t 转炉采用石灰石替代石灰造渣炼钢试验[J]. *中国冶金*, 2013, 23(11):58-61.

DONG D X, FENG J, NIAN W, et al. Experimental study on using limestone instead of lime for slagging in 60 t converter[J]. *China Metallurgy*, 2013, 23(11):58-61.

[19] 张杰新, 阮铭. 石灰石在转炉炼钢工艺上的应用[A]. 中国金属学会. 2014 年全国炼钢—连铸生产技术会论文集[C]. 中国金属学会: 中国金属学会, 2014: 3.

ZHANG J X, RUAN M. Application of limestone in converter steelmaking process[A]. Chinese Society of Metals. Proceedings of the 2014 National Steelmaking-Continuous

Casting Production Technology Conference[C]. Chinese Society of Metals: Chinese Society of Metals, 2014: 3.

[20] 秦登平, 杨建平, 危尚好, 等. 100t 顶吹氧气转炉石灰石造渣炼钢技术的分析和工艺实践[J]. *特殊钢*, 2014, 35(5):34-36.

QIN D P, YANG J P, WEI S H, et al. Analysis and process practice on steelmaking technology of 100 t top-blown oxygen converter by limestone for slag making[J]. *Special Steel*, 2014, 35(5):34-36.

[21] 张飞. 石灰石在莱钢 120 t 转炉炼钢中应用实践[J]. *中国冶金*, 2015, 25(3):37-40.

ZHANG F. Application of limestone in Laigang 120 t converter steelmaking[J]. *China Metallurgy*, 2015, 25(3):37-40.

[22] 朱道良, 王青. 舞钢转炉炼钢石灰石代替部分石灰的工艺实践[J]. *宽厚板*, 2015(3):32-34.

ZHU D L, WANG Q. Process Practice to partly use limestone instead of lime during converter steelmaking in Wugang[J]. *Wide and Heavy Plate*, 2015(3):32-34.

[23] 张春杰, 郝强, 王玉生, 等. 石灰石部分替代石灰转炉炼钢技术研究与应用[J]. *炼钢*, 2015, 31(5):47-50.

ZHANG C J, HAO Q, WANG Y S, et al. Research and application of converter steelmaking with limestone partial replacement lime[J]. *Steelmaking*, 2015, 31(5):47-50.

[24] 李尚兵, 朱蕴艳. 石灰石在永钢 50 t 转炉炼钢中的应用[J]. *现代冶金*, 2015, 43(6):52-54.

LI S B, ZHU Y Y. Application of limestone in yonggang's 50 t converter steelmaking[J]. *Modern Metallurgy*, 2015, 43(6):52-54.

[25] 韩宇, 张明博, 袁娜, 等. 100 t 转炉应用石灰石造渣半钢炼钢工业实践[J]. *上海金属*, 2017, 39(2):50-54.

HAN Y, ZHANG M B, YUAN N, et al. Industrial practice on using limestone as the semi-steel steelmaking slagging material in 100 t-capacity converter[J]. *Shanghai Metal*, 2017, 39(2):50-54.

[26] 李晨晓, 郝华强, 王书桓, 等. 唐钢 60 t 转炉石灰石替代部分石灰造渣炼钢的工业试验[J]. *特殊钢*, 2017, 38(6):16-18.

LI C X, HAO H Q, WANG S H, et al. Commercial pilot production on replacing partial lime in slag by limestone in 60 t converter steelmaking at Tangsteel[J]. *Special Steel*, 2017, 38(6):16-18.

[27] 桂满城, 乌力平, 朱伦才, 等. 300 t 转炉石灰石造渣炼钢工艺能耗对比分析[J]. *中国冶金*, 2020, 30(1):87-90.

GUI M C, WU L P, ZHU L C, et al. Contrastive analysis of energy consumption in 300 t converter steelmaking process with limestone as slagging agent[J]. *China Metallurgy*, 2020, 30(1):87-90.

[28] 李晨晓, 李宏, 朱少楠, 等. 石灰石替代石灰作炼钢造渣原料节能减排估算[J]. *中国冶金*, 2015, 25(10):66-69+72.

LI C X, LI H, ZHU S N, et al. Estimation of energy conservation and emissions reduction by substitution limestone for lime as the steelmaking slagging material[J]. *China Metallurgy*, 2015, 25(10):66-69+72.

Research Status and Prospects of Converter Limestone Instead of Lime for Slagging and Steelmaking

Sun Huakang, Li Chenxiao, Wang Shuhuan, Tong Shuai, Xue Yuekai, Zhang Kaixuan
(College of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan Key Laboratory of Special Metallurgy and Material Manufacture, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: Research status and development trend of limestone instead of lime for steelmaking and slagging technology are systematically analyzed. Through comparative analysis, it can be seen that the current converter limestone slagging and steelmaking technology simplifies the entire slagging process, improves the slag dephosphorization effect, and reduces steel slag. The production volume has increased the economic benefit per ton of steel. On the whole, the limestone steelmaking slagging process is a high-efficiency, low-consumption, and environmentally-friendly new slagging method, which is of great significance to promoting energy conservation, emission reduction and sustainable development of steel enterprises. However, the decomposition of limestone requires a large amount of heat, which affects the slagging rate. Therefore, in order to further optimize the limestone steelmaking slagging process, a limestone powder spraying slagging technology is proposed, which can effectively solve the heat caused by the direct limestone slagging process. Slagging and CO₂ utilization problems caused by high consumption.

Keywords: Converter slagging; Limestone; Efficient dephosphorization; Less slag; Energy conservation

(上接第 98 页)

Geochemical Characteristics and Re-Os isotopic dating of Tongde Graphite Deposit, Sichuan Province

Chen Chao^{1,2}, Kong Decai^{1,2}, Tian Xiaolin^{1,2}, Liu Zhicheng³, Guo Yuheng³, Wu Deqiang^{1,2},
Wen Zhenzhen¹, Long Bo^{1,2}, Zheng Yi¹

(1.106 Geological Team of Sichuan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Chengdu, Sichuan, China; 2.Sichuan Research Institute of Strategic Mineral Resources Exploration and Utilization, Chengdu, Sichuan, China; 3.Sichuan Institute of Land Science and Technology, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: The Tongde Graphite Deposit in Panzhihua is located in the accretionary zone on the western margin of the Yangtze plate. In this paper, the whole rock geochemical analysis, C isotope determination and Re-Os isotope dating of the ore in Tongde graphite mining area are carried out, the original rock of the ore is restored, and the metallogenic environment is discussed. Research shows that the ore SiO₂ is 55.65~61.68%, SiO₂/Al₂O₃ ratio is 4.59~5.42, and Ni/Co ratio is 6.23~12.88. It is rich in Ba, Rb, Sr and other large ion lithophile elements and Nb, Zr, Hf, Th, U and other high field strength elements. Total rare earth elements of ore ΣREE is 149.13×10⁻⁶~195.37×10⁻⁶, with weak Ce negative anomaly and Eu negative anomaly, representing the anoxic marine sedimentary environment. The Carbon isotope δ¹³C_{V-PDB} in ore is -25.0‰~-23.5‰, which is within the range of biogenic organic carbon, indicating that the ore-forming carbon mainly comes from organic matter. The Re-Os isotopic age of graphite is 983 ± 72 Ma (MSWD=1.7), belonging to the early Neoproterozoic, earlier than the intrusion age of magmatic rocks around Tongde. The content of re is between 27.66×10⁻⁹~79.81×10⁻⁹, the contents of ordinary Os and ¹⁸⁷Os are 0.52 ×10⁻⁹~2.16×10⁻⁹, 0.28 × 10⁻⁹~0.83×10⁻⁹, respectively, it is significantly enriched relative to the abundance of Re and Os in the crust. The ¹⁸⁷re/¹⁸⁸os ratio is 122.9~350.5, and the initial Os isotope ratio ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os=0.31±0.21. Combined with the field geological survey, the original rock of ore and ore bearing mica quartz schist in Tongde area is restored, and it is concluded that the original rock is sedimentary rock.

Keywords: Graphite; Re-Os isotope; Geochemical characteristics; Carbon isotope; Western margin of the Yangtze Plate