

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20200196

球团矿化学成分控制现状及展望

张淑会, 王宝勇, 兰臣臣, 刘小杰, 吕庆

(华北理工大学冶金与能源学院, 河北唐山 063210)

摘要: 综述了近年来国内外高炉球团矿使用比例的现状, 分析了球团矿化学成分控制以及不同化学成分对球团矿冶金性能的影响。分析表明, 多数国内钢铁企业球团矿 TFe 的质量分数较低, SiO_2 质量分数较高且差异较大。不同企业球团矿 Al_2O_3 和 FeO 的质量分数不同。应控制球团矿中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 FeO 的质量分数。随着 CaO 和 MgO 质量分数的提高, 球团矿抗压强度均降低。适宜质量分数的 CaO 有利于改善球团矿的还原膨胀性能。随着 MgO 质量分数的提高, 球团矿的还原膨胀性和软熔滴落性能均变好。高炉炉料结构采用低 MgO 烧结矿、酸性球团矿和镁质球团相结合, 可以充分发挥球团矿的冶炼优势, 实现球团矿入炉比例的提高。MgO 和 CaO 在球团矿焙烧过程中的作用机理, 以及如何控制镁质球团中的液相含量以提高球团矿的抗压强度等需要进一步深入研究。

关键词: 球团矿; 化学成分; 冶金性能; 炉料结构; 镁质球团;

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2020)08-0019-08

Prospects and present status of pellets chemical composition control

ZHANG Shu-hui, WANG Bao-yong, LAN Chen-chen, LIU Xiao-jie, LÜ Qing

(College of Metallurgy and Engineering, North China University of Science and Engineering
and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: The proportion of pellets used in the blast furnaces at home and abroad in recent years were investigated. And the pellets chemical composition in different conditions were analyzed as well as its effects on the metallurgical properties of pellets. It is pointed out that the pellets produced by most of domestic steel enterprises possess low TFe mass percent and high SiO_2 mass percent with larger fluctuation. The mass percent of Al_2O_3 and FeO varies greatly in different enterprises. The mass percent of SiO_2 、 Al_2O_3 and FeO should be controlled further. The pellet compress strength decreases with the increase of CaO and MgO mass percent. CaO with appropriate mass percent can improve the reduction expansibility of pellets. The increase of MgO mass percent can improve the reduction expansibility and softening-dripping performance of pellets. The combination of low MgO sinter, acidic pellet and magnesium-bearing pellet can sufficiently exploit the advantages of pellet metallurgical properties to realize the increase of pellet proportion used in blast furnace. The function mechanism of MgO and CaO in pellet baking process should be studied in detail, and how to control the content of liquid phase in magnesium-bearing pellet should be also investigated further in order to improve the pellet compress strength.

Key words: pellet; chemical composition; metallurgical property; charge structure; magnesium-bearing pellet

近年来,随着国民经济的不断发展,国家对钢铁企业在节能、降耗和减排等方面提出了严格的要求。据统计,炼铁工序约占钢铁生产能耗的 70%,而铁前工序则是炼铁能耗的主要环节。其中,烧结矿是目前高炉的主要含铁原料之一,具有生产原料广泛、成本较低等优点,但其存在粒度不均、抗压强度不高、生产过程污染和能耗严重等问题。而球团矿不仅粒度均匀,而且其生产过程在能耗和污染物排放等方面比烧结矿具有明显优势。

统计表明^[1],球团工序吨矿电耗 32 kW·h/t、

吨矿能耗 24.5 kg/t(标准煤),分别约为烧结工序的 74%和 49%;并且球团生产的污染物指标远低于烧结工序,其中粉尘、 SO_2 和 NO_x 排放量仅为烧结工序的 14%~35%。另外,与烧结生产工艺相比,球团生产工艺简单,建设和生产管理费用均较低。据统计吨球加工费仅约为烧结加工费的 50%。

多年来,中国高炉的炉料结构是以高碱度烧结矿为主,配加一定比例的球团矿和少量块矿。各生产企业对高炉炉料结构没有统一的要求,一般根据企业具体情况和外部资源条件加以确定。高炉生产

实践表明,提高球团矿的入炉比例,可以提高入炉矿综合品位,降低渣量,降低焦比等,从而实现增产降耗;同时有利于实现铁前工序的清洁生产,减少粉尘、SO₂、NO_x 等有害物质的排放。虽然在提高球团矿入炉比例的初期阶段,高炉会出现料面形状和煤气流不稳、软熔带增厚、炉内压差过高和透气性变差等问题,但这些问题可以通过提高球团矿冶金性能、改善操作制度和优化生产管理等手段解决。炼铁生产是一个复杂的系统工程,发展球团生产、提高球团入炉比例对生铁成本的影响需要综合考虑。从长远来看,提高球团入炉比例,虽然表观成本增加,但结合高炉操作和管理优化、降低燃料比等,可以实现高炉冶炼经济技术指标的提高。在当前的环保要求下,烧结矿的生产将会受到进一步的限制,因此,提高球团矿的入炉比例,对于炼铁生产实现节能降耗具有更重要的意义。

目前,中国主要钢铁企业的高炉已经开始进行高球团比生产的实践。例如,首钢京唐公司高炉入炉球团比达到了 50% 以上,其中酸性球团和含镁球团各占约 50%。在球团矿入炉比例不断提高的过程中,不同种类的球团矿搭配使用才能满足高炉生产的要求。一方面,需要考虑高炉炉渣碱度的要求。现阶段,高炉炉渣二元碱度一般为 1.0~1.2,烧结矿碱度为 1.8~2.2。经计算表明,若入炉球团矿比例为 50%,碱度为 1.0 左右的球团矿和烧结矿搭配,才能满足高炉对造渣碱度的要求。另一方面,还需要考虑高炉造渣对 MgO 质量分数的要求。近年来,高炉生产造渣需要的 MgO 多是通过烧结矿带入,但是烧结矿中 MgO 质量分数过多会使其冶金性能不利于高炉冶炼。

随着生产水平的提高,人们逐渐认识到在球团矿生产原料中添加一定的含镁物质生产碱度较高的镁质球团,不仅可以为高炉提供一定的 MgO,还可以改善球团矿本身的冶金性能。酸性球团矿初始软熔温度低、还原膨胀率高,若其比例过大将会影响高炉炉料的透气性。镁质球团矿具有膨胀率低、低温还原粉化率小、软熔与滴落性能好等优点,但其抗压强度较差^[2-3]。另有资料报道,在欧洲和北美一些国家,高炉使用碱度为 1.0 左右的熔剂性球团进行全球团冶炼^[4]。

上述分析可见,不同化学成分和种类的球团冶金性能不同,在高炉生产中的作用也不同。充分了解各化学成分对球团性能的影响,是球团生产控制的关键,也是高炉选择高球团比、确定球团矿使用种

类和比例的关键。基于此,本文综述了国内外现阶段球团矿使用的情况,基于化学成分对球团矿冶金性能的影响,分析了当前球团矿生产对化学成分的控制情况,为球团生产过程高效利用铁矿粉以及高炉生产确定适宜的炉料结构、提高入炉球团比提供指导。

1 国内外高炉球团矿使用比例

1.1 国外高炉球团矿使用比例

国外钢铁生产地域主要集中在亚洲、欧洲和北美地区,各高炉炉料结构由当地的铁矿粉原料条件决定。其中,部分企业高炉球团矿使用比例见表 1。

表 1 国外部分企业高炉球团矿使用比例
Table 1 Proportion of blast furnace pellets used by some foreign companies

国别	企业	高炉炉容/m ³	球团比例/%
日本	新日铁 4 号	5 500	10.0
韩国	光阳	5 500	6.5
加拿大	Algoma 7 号	2 538	99.0
美国	米塔尔 7 号	4 860	80.0
瑞典	SSAB 3 号	2 500	100.0
德国	不莱梅 2 号	2 143	52.0
芬兰	罗塔鲁基	—	26.3

由表 1 可知,亚洲地区日本和韩国高炉球团使用比例偏低。据统计,2019 年全球粗钢产量达到 18.7 亿 t,其中亚洲粗钢产量约为 13.4 亿 t,占到全球粗钢产量的 70% 以上。亚洲一直是世界上钢铁的主要产区,但亚洲地区缺乏优质的铁矿资源,高炉生产以进口南美及澳洲矿粉为主。进口矿粉种类复杂、粒度较粗,不适合生产球团矿,因此,亚洲地区高炉球团矿比例一直较低。

北美地区铁矿资源多为较难开采的铁燧岩,为了提高品位需要对矿粉进行细磨处理,因此该类地区的铁矿粉适合球团矿,高炉球团矿使用比例较高甚至采用全球团冶炼;欧洲地区因环保要求较严,烧结厂的生产 and 建设受到严格的限制,钢铁企业高炉球团比例均较高。由表 1 可知,瑞典 SSAB3 号高炉球团比达 100%,其他国家企业高炉的球团使用比例也高于亚洲地区日本和韩国高炉球团矿使用比例。另一方面,欧美部分高炉不仅球团比较高,而且多使用熔剂性球团,例如加拿大 Algoma 7 号高炉、美国 Amanda 高炉和墨西哥 Monclova 厂 5 号高炉

使用的球团矿均为熔剂性球团^[4-5]。同时,因为国外铁精粉品位较高,球团生产过程使用的膨润土量也较低,因此国外球团矿全铁质量分数多为65%以上, SiO_2 质量分数多为4.0%以下。

1.2 国内高炉球团矿使用比例

近年来,国内球团的发展经历了几个不同的阶段。在2000年前后,球团生产发展比较迅速。1999年中国球团产量为1 197万t/a,2004年为4 000万t/a,2011年球团产量达到2亿t/a^[6]。而且当时高炉炉料结构中球团比例达到接近20%的水平。2011年之后,因铁精粉供应价格的变化和“低价料”的理念出现,入炉球团比出现负增长,直至2015年球团产量才开始回升。据统计,2017年国内球团矿产量约达1.7亿t,另有2 000万t球团需要从国外进口。2017年中钢协会会员单位高炉炉料结构大致为烧结矿78%、球团矿13%、块矿9%。总体而言,国内高炉使用球团矿的比例整体较低,高炉炉料仍以烧结矿为主,但烧结矿生产存在能耗高、环境污染严重等问题。随着国内各项环保政策的出台,各大钢铁企业均面临着限产、节能和降耗的压力,提高球团矿的入炉比例已成为国内炼铁工作者的共识。目前,已经有很多钢铁企业,如太钢、唐钢、宝钢、沙钢等都高炉采用大比例球团矿冶炼进行了可行性和工业实践。

首钢京唐公司为了提高球团矿的入炉比例,从2015年开始先后进行了高球团比+石灰石或钢渣、碱性球团+酸性球团+烧结矿+块矿高炉生产的工业试验,逐步掌握了高球团比冶炼的关键控制技术。目前,首钢京唐3座高炉炉料结构中球团矿比例均超过50%,其中3号高炉的利用系数和燃料比分别为2.34 t/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)和481 kg/t,综合入炉矿品位为

61.3%,渣量降低至225 kg/t^[7]。2002年,沙钢在烧结产能不足的情况下调整了高炉炉料结构,将球团比从40%逐渐提高到75%,并且保持了高炉的稳定顺行^[8]。2006年,新疆八钢因为烧结矿产能不足,高炉炉料结构中球团矿比例高达80%,运行开始阶段高炉炉墙结厚、产量下降,但技术人员经过不断实践和探索,找到了合理的装料制度,使高炉稳定顺行,并实现了高产^[9]。唐钢不锈钢1号高炉利用镁质熔剂球团和镁质酸性球团进行了高炉冶炼的工业试验,球团比达到了60%以上^[10]。2013年,太钢球团工艺投产后,5号高炉进行了提高球团矿比例的生产实践,采用提高烧结矿碱度至2.20~2.32、提高炉渣二元碱度至1.18~1.22、调整装料制度等措施,使球团比提高到30%以上^[11]。2017年宝钢2台烧结机停产,3号高炉在实践中不断提高球团矿的比例,最终达到30%以上,并能保持高炉长期稳定顺行^[12]。

上述实践表明,国内重点企业高炉已经开始了提高球团比的生产实践。国家“十三五”规划已明确写明高炉炉料结构中将球团比提高到50%的工作目标,可见中国今后若干年球团矿的使用潜力巨大。

2 球团矿化学成分控制现状

2.1 球团矿中TFe和 SiO_2 的控制

TFe质量分数是炉料最重要的化学成分指标,也是高炉炼铁原料的核心。在目前的冶炼技术和条件下,一般认为入炉铁矿石品位提高1%,焦比降低1.5%,产量增加2.0%。球团矿作为酸性炉料,和高碱度烧结矿搭配使用,充分发挥着其高TFe和低 SiO_2 的优点。2011—2014年,国内自产球团矿TFe和 SiO_2 质量分数的平均值见表2^[13]。

表2 2011—2014年中国自产球团矿TFe和 SiO_2 质量分数的平均值

Table 2 Average value of TFe and SiO_2 content of pellets produced domestically from 2011 to 2014

2011年		2012年		2013年		2014年	
TFe	SiO_2	TFe	SiO_2	TFe	SiO_2	TFe	SiO_2
63.64	5.27	63.72	5.03	63.17	5.56	62.61	5.75

由表2可知,国内球团矿TFe质量分数多为63%左右, SiO_2 质量分数多为5%~6%。而国外先进球团厂生产的球团矿TFe质量分数多大于65%, SiO_2 质量分数低于4.5%。其中,瑞典LKAB球团TFe质量分数高达66.9%, SiO_2 质量分数仅为2.6%。

国内各地球团厂原料来源复杂且品位较低,这导致多数球团品位较低,而 SiO_2 质量分数较高。统计表明,沙钢自产球团 SiO_2 质量分数曾高达9.22%,唐钢青龙球团 SiO_2 质量分数为7.55%。近几年,首钢京唐球团生产因为采用了 SiO_2 质量分数较低的秘鲁粉,球团矿 SiO_2 质量分数仅为2.8%,但国

内采用秘鲁粉生产的球团企业并不普遍。与国外球团矿 TFe 质量分数相比,国内球团 TFe 质量分数还有提升的空间。实践证明,通过改善球团原料质量、合理科学配料,同时优化膨润土和开发有机黏结剂等措施可以进一步提高球团 TFe 质量分数到 65% 以上。在高炉不断提高入炉球团比的背景下,通过改进生产来提高球团矿的 TFe 质量分数也是现阶段球团生产努力的方向。

研究表明, SiO₂ 质量分数是球团矿质量的重要影响因素之一。一般认为,随着 SiO₂ 质量分数的增加,球团矿抗压强度降低,还原膨胀率降低。这是因为球团中 SiO₂ 质量分数的提高阻碍了赤铁矿晶粒长大;同时, SiO₂ 质量分数过高时,球团矿中石英和玻璃质增多,使其抗压强度降低^[14]。青格勒等^[15]对低硅球团矿的还原膨胀率进行了研究,结果表明, SiO₂ 质量分数为 2% 左右的低硅球团矿还原膨胀现象较为严重,其还原膨胀率高达 75%;随着 SiO₂ 质量分数增加,球团矿的还原膨胀率降低。当 SiO₂ 质量分数在 1.8%~6.7% 增加时,球团矿的还原膨胀率由约 75% 降至 14%。生产实践表明,随着球团矿 SiO₂ 质量分数增加,其还原性和熔融滴落性能也会明显变差^[13]。因此,综合考虑 SiO₂ 质量分数对球团矿质量和高炉冶炼的影响,应尽量降低球团中 SiO₂ 的质量分数。

现阶段控制球团矿中 SiO₂ 质量分数的方法主要包括两种。一种是控制含铁原料中带入的 SiO₂,通过引进新的低硅资源^[16-17],并结合优化配矿,可有效控制球团矿 SiO₂ 质量分数,但这往往受到各企业铁矿粉资源来源的限制;另一种是降低膨润土用量或利用有机黏结剂替代部分膨润土,可以使球团品位提高、SiO₂ 质量分数降低,还可以提高生球的落下强度、成球率以及成品球的抗压强度等^[18-19]。

2.2 球团矿中 FeO 化学成分控制分析

FeO 质量分数是球团矿的主要理化指标之一,对球团矿冶金性能有着重要的影响。2010—2015 年,全国不同球团生产工艺生产的球团矿中 FeO 质量分数统计见表 3^[20]。由表 3 可知,国内不同球团生产工艺产成品球团矿中 FeO 质量分数差别较大。其中,竖炉生产的球团矿 FeO 质量分数较低,多为 1.0% 以下;带式焙烧机生产的球团矿 FeO 较高,多为 1.3%~1.8%;链算机-回转窑工艺生产的球团 FeO 质量分数居中。

FeO 质量分数是高炉炉料还原度评价的标志。炉料的 FeO 质量分数降低,则其还原度提高。一般

表 3 不同生产工艺生产球团的 FeO 质量分数

Table 3 FeO mass percent of pellets produced by different production processes

年份	竖炉	链算机-回转窑	带式焙烧机
2010	1.01	0.74	1.36
2011	0.75	0.95	1.48
2012	1.00	1.10	1.57
2013	0.84	1.09	1.76
2014	0.67	1.09	1.60
2015	0.67	1.52	0.40

认为, FeO 质量分数每降低 1 个百分点,焦比也降低 1 个百分点^[21]。影响球团矿 FeO 质量分数的因素很多,既有铁精粉原料因素,也有生产工艺因素,如球团原料中磁铁矿粉占的比例较大,或者生产过程中焙烧时间不够等。因此,应合理设计球团原料结构,降低磁铁精粉的配比;或通过改善工艺过程,调整热工参数等措施优化球团矿的矿物组成以降低 FeO 质量分数。例如,首钢京唐公司为了解决球团矿 FeO 偏高的问题,采取了改造干燥设备稳定生球水分、优化辊压参数提高生球强度、优化干燥预热参数减少爆裂等措施,有效地降低并使球团矿的 FeO 质量分数达到较好的指标^[22]。宣钢公司曾因原料价格变化调整了球团生产用的铁精粉品种和配比,结果使球团矿 FeO 质量分数发生波动^[23]。实践结果证明,调整原料后球团矿的粒径降低至 10~14 mm,可以有效控制球团矿的 FeO 质量分数。

2.3 球团矿中 Al₂O₃ 的化学成分控制

含有 Al₂O₃ 的矿物往往熔点较高,而球团矿的焙烧温度较低,焙烧过程中产生的液相较少,因此, Al₂O₃ 对球团矿冶金性能影响也很小。但近年来,随着铁矿石消耗量的增加,高品位矿石不断降低,铁矿石中的 Al₂O₃ 质量分数也呈升高趋势。

随着 Al₂O₃ 质量分数的增加, Al₂O₃ 将与铁橄榄石(2FeO·SiO₂)结合并生成硅铝酸盐(2FeO·2Al₂O₃·5SiO₂),这可以降低铁橄榄石对赤铁矿再结晶的抑制作用,从而使球团矿的抗压强度略有升高。但继续增加 Al₂O₃ 质量分数,高熔点的 Al₂O₃ 阻碍晶粒的聚集和长大,导致球团矿内部孔隙率升高,且孔隙分布不均匀,球团矿强度下降^[24]。

因此,球团生产过程中应该尽量控制 Al₂O₃ 的质量分数。一方面,通过优化铁精粉种类和配比可以控制球团矿中 Al₂O₃ 质量分数;另一方面,不同种类的膨润土搭配使用或者开发可替代膨润土的有

机黏结剂等也是降低球团矿中 Al_2O_3 的重要途径^[25]。国内生产球团矿的精矿粉大部分粒度较粗,且焙烧设备多为竖炉和链算机-回转窑,对生球和干球的强度要求较高,因此膨润土用量较大。据统计,国内多数钢铁公司球团膨润土用量为 20 kg/t,而国外部分球团矿膨润土用量仅约为 10 kg/t^[26]。膨润土的主要成分为蒙脱石,其中 Al_2O_3 质量分数为 12%~18%,故过多的膨润土用量无疑会降低球团矿品位,同时增加 Al_2O_3 质量分数。因此,控制球团矿生产过程中膨润土的加入量是降低球团矿 Al_2O_3 质量分数的有效手段。此外,球团生产过程采用润磨工艺可细化矿粉粒度、提高其成球性能,也可有效降低膨润土用量,从而降低球团矿中 Al_2O_3 质量分数^[27]。

2.4 球团矿中 CaO 的化学成分控制

球团矿中 CaO 质量分数的变化体现为球团矿碱度的变化。国内钢铁企业球团矿碱度差别较大。其中酸性球团矿多为自然碱度,CaO 质量分数较低;而碱性球团矿 CaO 质量分数较高,例如济钢 2 号球团 CaO 质量分数高达 1.65%。国外球团多为碱性或熔剂性球团矿,其 CaO 质量分数也有差别。例如,巴西 CVRD 球团矿中 CaO 质量分数高达 2.57%,而瑞典 LKAB 则相反,控制 CaO 质量分数仅为 0.2%。

CaO 在酸性球团和碱性球团中形成的矿物组成不同。对于酸性球团矿,含有的 CaO 较少,多以 $\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 矿物形式存在。而对于碱性球团矿,其中的 CaO 多以 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 矿物形式存在。球团矿碱度不同,焙烧过程中产生的液相量不同,对球团矿冶金性能的影响也不相同。随着 CaO 质量分数增加,球团矿在焙烧过程中生成的低熔点 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 增多,次生赤铁矿增多。同时,赤铁矿晶粒被气孔和低熔点物质隔开,降低了赤铁矿晶粒间的连晶程度,削弱了球团矿固相固结的强度,从而抑制了 Fe_2O_3 的连晶长大,球团矿强度降低^[28-29]。同时,CaO 质量分数的增加还可以促进焙烧过程中 Mg^{2+} 的迁移和矿化^[30]。Umadevi T 等^[31]研究了碱度对球团矿还原膨胀性的影响,认为碱度对球团矿还原膨胀性的影响分为 3 个阶段。当碱度在 0~0.3 内增加时,球团矿还原膨胀指数增加;当碱度在 0.3~0.7 内增加时,球团矿还原膨胀指数变化不大;碱度继续增加时,还原膨胀指数迅速降低。范建军等^[32]研究了碱度对细粒级铁矿粉球团矿性能的影响,结果认为,碱度在

0.2~1.4 范围内增加时,球团矿的抗压强度在碱度为 1.2 时最大,还原膨胀率在碱度为 0.8 时最高;球团矿还原度随着碱度的增加持续升高,这是因为随着 CaO 质量分数增多,焙烧过程中产生的液相量增加,球团矿中气孔增多,从而使氧离子的扩散阻力减小,促进 Fe_3O_4 氧化,使 FeO 质量分数降低,还原度升高。

上述文献表明,在生产过程中,需要综合考虑 CaO 质量分数或碱度对球团冶金性能的影响。应该在球团矿质量满足入炉基本要求的前提下,结合实际烧结矿的碱度以及高炉能接受的炉料结构来确定球团矿的适宜碱度和 CaO 质量分数。

2.5 球团矿中 MgO 的化学成分控制

高炉含铁炉料中需要含有一定量的 MgO,这主要源于高炉冶炼时造渣的要求。高炉炉渣中含有一定量的 MgO,有利于炉渣流动性的改善,并提高炉渣的脱硫能力。长期以来,高炉炉渣需要的 MgO 多通过烧结矿带入高炉。一般通过在烧结原料中配加白云石等方式生产含有一定 MgO 的烧结矿。烧结矿中含有适宜的 MgO 还可以改善烧结矿的低温还原粉化作用,但若 MgO 质量分数过高,烧结矿镁铁橄榄石增多而铁酸钙减少,会导致烧结矿强度和还原性均变差^[33-34]。

近年来,随着生产技术的进步,人们逐渐认识到镁质球团的优点,并将其和低镁烧结矿、酸性球团按一定比例加入到高炉以调节炉渣碱度和 MgO 质量分数。以这种方式组织生产,现场烧结矿可以控制较低的 MgO 质量分数,不仅改善烧结矿的冶金性能,也可以满足高炉冶炼的要求,也是今后高炉改变现有炉料结构、提高球团矿比例的发展方向。据统计,国内部分钢铁企业球团矿 MgO 质量分数多为 0.6%~1.2%^[35]。2019 年,首钢京唐的酸性球团矿和碱性球团矿 MgO 质量分数控制为 0.65%~0.71%。国外钢铁企业对球团矿 MgO 质量分数控制也各不相同。例如,巴西 CVRD 和瑞典 LKAB 球团矿都是高碱度球团,但前者属于高 CaO 低 MgO 型(MgO 质量分数仅为 0.08%),而后者则属于高 MgO 型,其 MgO 质量分数高达 1.45%。

现有文献关于 MgO 对球团矿抗压强度的影响规律存在不同的认识。高强健等^[36]的研究也表明,当球团矿中 MgO 质量分数在 0~2% 内增加的过程中,MgO 可以抑制 Fe_3O_4 的氧化,使球团矿体积收缩率降低,孔隙度增加,从而使其抗压强度降低。李杰等^[37]曾针对镁质熔剂性球团进行了研究,结果也表明球团矿抗压强度随着 MgO 质量分数的增加而

降低,当 MgO 质量分数增加到 2.4% 时,球团矿抗压强度降低趋势变小。一般认为,在球团矿焙烧过程中,MgO 对 Fe_3O_4 到 Fe_2O_3 的氧化过程起阻碍作用,影响了 Fe_2O_3 的连晶固结和长大,因此导致球团矿抗压强度降低。潘向阳等^[38]研究了 MgO 对熔剂性球团矿冶金性能的影响,结果表明,随着 MgO 质量分数的增加,焙烧球团矿抗压强度呈先上升后下降的趋势,当 MgO 质量分数为 2.0% 时,焙烧球团矿抗压强度达到最大,满足实际生产对球团矿抗压强度的要求。该研究制备的球团矿碱度较高,认为当 MgO 质量分数低于 2.0% 时,主要是 CaO 和 Fe_2O_3 反应生成的铁酸钙起固结作用;而 MgO 质量分数超过 2.0% 后,则会生成高熔点的铁酸镁,从而导致球团矿抗压强度下降。上述文献中 MgO 对球团矿抗压强度的影响规律的差异可能与各自的试验原料、球团矿碱度、添加的含镁物质的种类不同有关。

球团矿含有一定量的 MgO 可以改善球团的还原膨胀和软熔滴落性能。宋招权^[39]的研究表明,随着 MgO 质量分数的增加,球团矿还原膨胀率明显下降,软熔滴落性能提高。青格勒等^[40]研究了不同含镁添加剂对球团矿工艺参数和质量的影响,研究表明,适量的镁质添加剂可以改善球团矿的软熔滴落性能,当球团矿 MgO 质量分数为 1.8% 时,其性能仍然可以满足高炉要求。李乃尧等^[41]研究了 MgO 对镁质含钛球团矿冶金性能的影响,认为球团矿中的 MgO 质量分数从 1.32% 升高到 2.38%,球团矿的熔融温度区间降低了 40%。此外,不同的含镁添加剂对球团性能的影响也有差别。郭贺等^[42]综合考虑 MgO 对球团矿抗压强度、还原膨胀指数和微观结构认为,轻烧菱镁石是熔剂性球团比较适宜的含镁添加剂。

综上所述,MgO 对球团矿抗压强度虽有不利的影响,但适宜的 MgO 质量分数能够改善球团矿的综合冶金性能,因此在保证球团矿抗压强度能够满足高炉冶炼要求的前提下,可以将镁质球团作为一种优质的高炉炉料代替部分酸性球团矿,从而优化高炉炉料结构,实现球团矿入炉比例的提高。

3 结论

(1)与国外球团矿相比,国内球团矿 TFe 质量分数较低, SiO_2 质量分数较高。除个别企业外,多数企业球团矿 TFe 质量分数为 63% 左右, SiO_2 质量分数多为 5%~6%。不同企业球团矿 CaO 和

MgO 质量分数差异较大。不同工艺生产的球团矿 FeO 质量分数由高到低排序为带式焙烧机、链算机-回转窑、竖炉。

(2)降低 SiO_2 质量分数,不仅可以提高球团矿 TFe 质量分数,而且可以提高球团矿的抗压强度;但随着 SiO_2 质量分数的降低,球团矿还原膨胀指数升高,对高炉冶炼过程的透气性不利。提高 CaO 质量分数,球团矿低熔点物质增多,抗压强度降低,而还原膨胀指数先增加后降低。增加 Al_2O_3 质量分数,球团矿抗压强度降低。随着 MgO 质量分数的增加,球团矿抗压强度降低,而还原膨胀性和软熔滴落性能变好。

(3)通过合理选择铁精粉原料、改善铁精粉的成球性能、降低膨润土加入量、选择适宜的镁质添加剂、优化生产工艺参数等,可以进一步优化球团矿的化学成分,并改善球团矿的冶金性能。

(4)提高球团矿的入炉比例已经成为现代高炉冶炼努力的方向。低 MgO 烧结矿、酸性球团矿和镁质球团或碱性镁质球团相结合,将是未来高炉炉料结构的发展方向,既可以兼顾烧结矿和球团矿的冶金性能指标,又能满足高炉冶炼的要求,符合绿色冶金的发展方向。

参考文献:

- [1] 许满兴,冯根生,祁成林. 论我国高炉炉料结构的未来与高品质球团矿生产[J]. 世界金属导报, 2019-12-03 (8). (XU Man-xing, FENG Gen-sheng, QI Cheng-lin. Future of blast furnace charge structure in China and the production of high-quality pellets[J]. World Metal Reports, 2019-12-03 (8).)
- [2] 刘祥,杜群力,李响,等. 镁质球团矿的研究现状与应用进展[J]. 鞍钢技术, 2018(3): 11. (LIU Xiang, DU Qun-li, LI Xiang, et al. Development and application progress of magnesian pellets[J]. Angang Technology, 2018(3): 11.)
- [3] 司金凤,贾彦忠,李凤臣. 配加高镁球团矿高炉炉料结构的研究[J]. 钢铁研究, 2016, 44(3): 1. (SI Jin-feng, JIA Yan-zhong, LI Feng-chen. Study on burden structure of blast furnace with adding high magnesium pellets[J]. Research on Iron and Steel, 2016, 44(3): 1.)
- [4] 金永龙,何志军,王川. 不同炉料结构高炉实现低碳排放的解析[J]. 钢铁, 2019, 54(7): 8. (JIN Yong-long, HE Zhi-jun, WANG Chuan. Analysis on low carbon emission of blast furnace with different raw materials structure[J]. Iron and Steel, 2019, 54(7): 8.)
- [5] 胡俊鸽. 国内外部分高炉球团矿配比及其布料控制特点[C]//2008 年全国炼铁生产技术会议暨炼铁年会论文集. 宁波:中国金属学会和中国金属学会炼铁分会, 2008: 675. (HU Jun-ge. Proportion and distribution control of pellets in some

- blast furnace domestic and overseas[C]//Proceedings of the 2008 National Ironmaking Production Technology Conference and Ironmaking Annual Meeting. Ningbo: The Chinese Society for Metals and The Chinese Society for Metals Iron Branch, 2008: 675.)
- [6] 许满兴,冯根生,张天启,等. 高炉炉料进步与球团发展[M]. 北京:冶金工业出版社,2019. (XU Man-xing, FENG Gen-sheng, ZHANG Tian-qi, et al. Progress of Blast Furnace Charge and Pellet Development[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019.)
- [7] 张卫华. 带式焙烧机球团新技术研究与应用[J]. 世界金属导报,2019-10-22 (B13). (ZHANG Wei-hua. Research and application of pellet new technology of traveling grate machine [J]. World Metal Reports, 2019-10-22 (B13).)
- [8] 仵玉玲,李增伟. 沙钢高炉大比例配用球团矿的生产实践[C]//2004年全国炼铁生产技术暨炼铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2004: 344. (WU Yu-ling, LI Zeng-wei. Production practice of Shagang's blast furnace with large proportion of pellets[C]// Proceedings of 2004 National Ironmaking Production Technology and Ironmaking Annual Meeting. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2004: 344.)
- [9] 沈云. 八钢1号高炉高比例球团矿操作实践[J]. 山西冶金, 2010(1): 66. (SHEN Yun. Operation practice of high-proportion pellet in Basteel No. 1 BF process[J]. Shanxi Metallurgy, 2010(1): 66.)
- [10] 张文强,肖洪,高冰,等. 唐钢1号高炉高比例球团矿冶炼工业试验[J]. 炼铁,2019,38(2): 13. (ZHANG Wen-qiang, XIAO Hong, GAO Bing, et al. Commercial test of high-rate pellet smelting in Tanggang No. 1 BF[J]. Ironmaking, 2019, 38(2): 13.)
- [11] 唐顺兵,李秀为,梁建华,等. 太钢5号高炉高比例球团矿生产实践[J]. 炼铁,2014,33(5): 30. (TANG Shun-bing, LI Hang-wei, LIANG Jian-hua, et al. Production practice of high-rate pellets in Taigang No. 5 BF [J]. Ironmaking, 2014, 33(5): 30.)
- [12] 高峰,张永忠. 宝钢3号高炉低烧结矿比例的生产实践[J]. 炼铁,2017,36(2): 43. (GAO Feng, ZHANG Yong-zhong. Production practice of low-rate sintered ore in Baosteel No. 3 BF[J]. Ironmaking, 2017, 36(2): 43.)
- [13] 许满兴. 坚持球团矿的“精料”定位,分析球团矿生产品位的价值和SiO₂含量的影响[N]. 中国冶金报,2015-10-01 (005). (XU Man-xing. Persistence of pellets "fine material" positioning, value analysis of pellets iron grade value and influence of SiO₂ content[N]. China Metallurgical News, 2015-10-01(005).)
- [14] 李杰,韩闯闯,杨爱民,等. SiO₂对镁质酸性球团性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2017,29(11): 872. (LI Jie, HAN Chuang-chuang, YANG Ai-min, et al. Effect of SiO₂ on quality of magnesian acidic pellets[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(11): 872.)
- [15] 青格勒,王朝东,侯恩俭,等. 低硅含镁球团矿抗压强度及冶金性能[J]. 钢铁研究学报,2014,26(4): 7. (QING Ge-le, WANG Chao-dong, HOU En-jian, et al. Compressive strength and metallurgical property of low silicon magnesium pellet[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(4): 7.)
- [16] 王志花,里光森,腾飞,等. 利用澳大利亚Hawsons磁铁精矿生产氧化球团试验[J]. 钢铁,2017,52(3):9. (WANG Zhi-hua, LI Guang-sen, TENG Fei, et al. Pelletizing performance of Hawsons magnetite concentrate[J]. Iron and Steel, 2017,52(3):9.)
- [17] 吴云,周云花. 湘钢提高球团矿品位试验研究及应用[J]. 金属材料与冶金工程,2018(3): 39. (WU Yun, ZHOU Yun-hua. Experimental research and application of increasing iron content and decreasing silicon content in pellets[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2018(3): 39.)
- [18] 周建安,丁斌,邓冬一,等. 膨化淀粉在铁矿球团内的作用行为[J]. 钢铁,2017,52(5): 13. (ZHOU Jian-an, DING Bin, DENG Dong-yi, et al. Action and behavior of gelatinized starch in iron pellets[J]. Iron and Steel, 2017,52(5): 13.)
- [19] 刘杰,宫作岩,周明顺,等. 鞍钢球团生产配加有机粘结剂的研究[J]. 烧结球团,2015(5): 28. (LIU Jie, GONG Zuo-yan, ZHOU Ming-shun, et al. Study on proportioning with organic binder in Ansteel pellet production[J]. Sintering and Pelletizing, 2015(5): 28.)
- [20] 许满兴,张玉兰. 新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势[J]. 烧结球团,2017,42(2): 25. (XU Man-xing, ZHANG Yu-lan. Analysis of pellet technology and production of China in 21st century[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(2): 25.)
- [21] 解珍健. 降低球团矿FeO含量的生产实践[J]. 球团技术, 2005(4): 33. (XIE Zhen-jian. Production practice of reducing FeO content of pellet[J]. Pelletizing Technology, 2005(4): 33.)
- [22] 李明. 首钢京唐球团矿降FeO含量的生产实践[J]. 山东冶金,2015(4): 6. (LI Ming. Practice of decreasing the FeO content in pellets in Shougang Jingtang[J]. Shandong Metallurgy, 2015(4): 6.)
- [23] 张建军,柴勇,顾爱军. 影响球团矿FeO含量的因素[J]. 河北冶金,2016(9): 28. (ZHANG Jian-jun, CHAI Yong, GU Ai-jun. Factors to affect FeO content in pellet[J]. Hebei Metallurgy, 2016(9): 28.)
- [24] 王振阳,邢相栋,张建良. 氧化铝对球团矿抗压强度的影响及其机理分析[C]//第九届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2013:382. (WANG Zhen-yang, XING Xiang-dong, ZHANG Jian-liang. Effect of aluminum oxide on compressive strength of pellets and it's mechanism analysis[C]// Proceedings of the Ninth China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2013:382.)
- [25] 覃德波,钱磊,杜绍明,等. 安徽长钢竖炉球团配加印度膨润土工业试验[J]. 烧结球团,2019,44(10): 57. (QIN De-bo, QIAN Lei, DU Shao-ming, et al. Industrial test of using Indian bentonite for ChangJiang Steel shaft furnace pellet[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(10): 57.)
- [26] 张永祥,田发超,张克添,等. 添加复合粘结剂的球团试验

- [J]. 烧结球团, 2004, 29(5): 9. (ZHANG Yong-xiang, TIAN Fa-chao, ZHANG Ke-tian, et al. Pelletizing test of adding various complex binders[J]. Sintering and Pelletizing, 2004, 29(5): 9.)
- [27] 徐佳鑫, 杨大兵. 润磨对程潮铁矿成球过程影响的研究[J]. 矿业工程, 2014(2): 27. (XU Jia-xin, YANG Da-bing. Study of the influence of damp milling to the pelletizing process of Chengchao iron ore[J]. Mining Engineering, 2014(2): 27.)
- [28] 严照照, 卢建光, 吕庆, 等. 碱度对生球质量和球团矿抗压强度的影响[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(6): 110. (YAN Zhao-zhao, LU Jian-guang, LÜ Qing, et al. The impact of basicity on the green ball quality and compressive strength of pellets[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(6): 110.)
- [29] Dwarapudi S, Ghosh T K, Shankar A, et al. Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets[J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 99: 43.
- [30] FAN X H, GAN M, JIANG T, et al. Influence of flux additives on iron ore oxidized pellets[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(4): 732.
- [31] Umadevi T, Kumar A, Karthik P, et al. Characterization studies on swelling behavior of iron ore pellets[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2018, 45(2): 157.
- [32] 范建军, 郭宇峰, 臧龙, 等. 碱度对细粒级铁矿粉球团性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(5): 440. (FAN Jian-jun, GUO Yu-feng, ZANG Long, et al. Effect of basicity on properties of pellets produced by ultra fine-sized iron concentrate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(5): 440.)
- [33] 张建良, 刘东辉, 王筱留, 等. 烧结矿化学成分控制现状及发展方向[J]. 烧结球团, 2017, 42(4): 1. (ZHANG Jian-liang, LIU Dong-hui, WANG Xiao-liu, et al. Research status and development trend of chemical composition control of sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(4): 1.)
- [34] Yadav U S, Pandey B D, Das B K, et al. Influence of magnesia on sintering characteristics of iron ore[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2002, 29(2): 91.
- [35] 许满兴. 国内外几种球团矿的冶金性能及质量分析[J]. 球团技术, 2005(3): 2. (XU Man-xing. Metallurgical properties and quality analysis of several pellets domestic and overseas[J]. Pelletizing Technology, 2005(3): 2.)
- [36] GAO Q J, SHEN F M, JIANG X, et al. Gas-solid reduction kinetic model of MgO-fluxed pellets[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2014, 21(1): 12.
- [37] 李杰, 韩闯闯, 杨爱民, 等. MgO 含量对镁质熔剂性球团性能的影响[J]. 烧结球团, 2017, 42(2): 31. (LI Jie, HAN Chuang-chuang, YANG Ai-min, et al. Effect of MgO on the performance of magnesian fluxed pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(2): 31.)
- [38] 潘向阳, 龙跃, 李神子, 等. $w(\text{MgO})$ 对熔剂性球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(10): 17. (PAN Xiang-yang, LONG Yue, LI Shen-zi, et al. Effect of $w(\text{MgO})$ on metallurgical properties of flux pellets[J]. Iron and Steel, 2019, 54(10): 17.)
- [39] 宋招权. MgO 对球团矿质量的影响[J]. 烧结球团, 2001(6): 22. (SONG Zhao-quan. Influence of MgO content on the quality product pellet[J]. Sintering and Pelletizing, 2001(6): 22.)
- [40] 青格勒, 吴铿, 曲俊杰, 等. 不同含镁添加剂对球团矿工艺参数及质量的影响[J]. 钢铁, 2013, 48(7): 17. (QING Ge-le, WU Keng, QU Jun-jie, et al. Effect of different magnesium additives on process parameters and pellet quality[J]. Iron and Steel, 2013, 48(7): 17.)
- [41] 李乃尧, 张建良, 刘兴乐, 等. MgO、TiO₂ 对镁质钒钛球团矿综合冶金性能的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(7): 14. (LI Nai-yao, ZHANG Jian-liang, LIU Xing-le, et al. Effects of MgO and TiO₂ on comprehensive metallurgical properties of magnesia vanadium titanium pellets[J]. Iron and Steel, 2017, 52(7): 14.)
- [42] GUO He, SHEN Feng-man, JIANG Xin, et al. Effects of MgO additive on metallurgical properties of fluxed-pellet[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(12): 3238.