

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190287

基于高炉炉料结构优化的源头减排技术及应用

王新东, 李建新, 胡启晨

(河钢集团有限公司, 河北 石家庄 050023)

摘要: 为了更进一步降低污染物排放总量,河钢集团在实现污染物超低排放的同时积极开展源头和过程硫硝减排技术研发。针对国内矿粉资源特点和球团、烧结过程污染物生成规律,以减少污染物生成总量为出发点,开发出适于高比例球团冶炼的低排放、低能耗熔剂性球团制备技术,阐明了熔剂性球团焙烧过程吸放热规律,克服了生球爆裂、回转窑结圈等技术难题,成功生产出 SiO_2 质量分数在 4.5% 以上, MgO 质量分数为 1.8% 左右,二元碱度 (R_2) 为 1.0 左右的镁质熔剂性球团,并且具备长期连续生产的能力。开发了焙烧温度与球团矿质量调控、燃烧温度与硫硝生成控制技术,使得熔剂性球团抗压强度大于 2 200 N/个, SO_2 生成量比酸性球团降低了 20%,比烧结矿产生的 SO_2 、 NO_x 分别降低 75%、53%。研发了高比例球团高炉冶炼集成技术,高炉球团质量分数由 20% 增加到 80%,燃料比降低 11 kg/t,吨铁 SO_2 、 NO_x 分别减排 50%、26%。提出了炼铁流程全生命周期节能减排定量分析方法和持续改进方向,成功实现污染物在源头和过程上的削减。已成功推广至河钢集团 2 000 m^3 级、3 000 m^3 级高炉和河钢乐亭沿海基地 3 000 m^3 级高炉在建项目上,为国内钢铁工业减少污染物排放总量开辟了新的方向。

关键词: 高炉; 熔剂性球团; 源头; 污染物; 高比例球团

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)12-0104-07

Application practice of source and process sulfur-nitrate reduction technology based on optimization of blast furnace charge structure

WANG Xin-dong, LI Jian-xin, HU Qi-chen

(HBIS Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, Hebei, China)

Abstract: On the premise of achieving ultra-low pollutant emission, HBIS actively carries out research and development of source and process sulfur-nitrate emission reduction technology in order to further reduce the total pollutant emission. Aiming at the characteristics of domestic mineral powder resources and the law of pollutant generation in pellets and sintering process, the fluxed pellet with low-emission and low-energy, which is suitable for high ratio pellet smelting, was developed to reduce the total pollutant emission. The heat absorption and release law of fluxed pellet during the roasting process was clarified, the technical problems such as green ball bursting and rotary kiln ring formation were overcome, the magnesium fluxed pellet with mass percent of SiO_2 above 4.5%, mass percent of MgO about 1.8%, and binary alkalinity (R_2) around 1.0 was developed with long-term continuous production. The roasting temperature and pellet quality control, combustion temperature and sulfur-nitrate production control technology were developed, so that the compressive strength of fluxed pellet was more than 2 200 N, the SO_2 production amount was 20% lower than that of acidic pellet, and the SO_2 and NO_x were reduced by 75% and 53% respectively than that of sinter. The blast furnace smelting integrated technology of high proportion pellet was developed. And the proportion of blast furnace pellet was increased from 20% to 80%, the fuel ratio was decreased by 11 kg/t, and the SO_2 and NO_x emission of per ton iron was reduced by 50% and 26% respectively. Quantitative analysis method of energy saving and emission reduction during the iron-making life cycle and the continuous improvement direction were put forward, and the source and process pollutant reduction was realized. It has been successfully extended to the online 2 000 m^3 blast furnace, 3 000 m^3 blast furnace and 3 000 m^3 blast furnace in Laoting plant of HBIS Group. It opens up a new direction for reducing the total pollutant emission of domestic iron and steel industry.

Key words: blast furnace; fluxed pellet; source; pollutant; high proportion pellet

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0210600); 河北省重点研发计划专项资助项目(19274002D)

作者简介: 王新东(1962—), 男, 硕士, 教授级高级工程师; **E-mail:** wangxindong@hbisco.com; **收稿日期:** 2019-06-26

通讯作者: 胡启晨(1977—), 男, 硕士, 高级工程师; **E-mail:** huqichen@hbisco.com

中国钢铁工业正面临着历史上环保要求最严厉的时期,国家已经正式要求钢铁工业要在 2020 年底达到超低排放的标准^[1](PM:10 mg/m³(标准态,下同),SO₂:35 mg/m³,NO_x:50 mg/m³),这是一个比欧美国家排放还严格的标准,实施难度大,投资和运行成本高,再生固体废弃物越来越复杂,继续采用“末端治理”的方法去实现“超低排放”将会付出很大的代价,面对中国钢铁工业不稳定的市场和经济形势,急需找到一种不同于“末端治理”的新的环保低碳途径和开发低成本的环保技术,“源头治理”和“过程治理”是发达国家已经和正在实施的一种深度治理环保问题的方法。中国的钢铁工业是以焦化、烧结造块、高炉炼铁、转炉炼钢为主的长流程,从原料准备开始到高炉的炼铁流程担负着 60% 的能源消耗,70% 的吨钢成本,90% 的污染物排放总量^[2]。而高炉是目前世界上单体容积最大、配套最成熟、寿命最长、冶炼效率最高的炼铁装备,在很长时间内还会居于主导地位。高炉冶炼需要大量使用块状原燃料,矿山开采富集的粉状物料需要经过焦化、烧结、球团等高温焙烧造块过程,造成原矿中的硫、氮、重金属等有害元素氧化分解排放到大气中,造成大气环境污染。中国以仅占世界陆地面积 6.44% 的国土面积上生产了全世界近一半的钢铁,而国内钢铁产能集中到中东部地区,尤其是京津冀、长三角、珠三角、长江经济带钢铁带来的环境污染更为集中,这些地区的环境承载能力已经达到上限^[3-5],实现超低排放后污染物总量仍然巨大。因此最大限度降低钢铁行业污染物排放浓度(mg/m³(标准态)),降低污染物排放总量是环保治理工作的重中之重,也是钢铁工业实现绿色冶炼的首要任务。

河钢集团作为国有特大型钢铁企业,始终秉持“人、钢铁、环境和谐共生”的理念,积极推进“绿色”引领战略,在超低排放基础上,积极开展源头和过程污染物削减技术研究工作。借鉴欧美西方国家发展经验,立足中国矿粉资源特点,开展适于中国钢铁工业现状的绿色钢铁发展之路。

1 钢铁工业的排放现状

钢铁流程污染物排放对比如图 1 所示。2014 年国家统计局数据表明,钢铁工业 GDP 增加值占全国工业总产值的 3.01%,而污染物排放量在工业总污染物中占比较高,SO₂ 占 12.8%,NO_x 占 6.5%,烟粉尘占 17.7%,主要集中在焦化、烧结、球团高炉

炼铁流程。在整个钢铁流程中,原燃料制备环节的粉尘排放占整个流程排放总量的 60%、SO₂ 占 93.5%、NO_x 占 73.4%^[6-8]。其中烧结工序排放质量分数最高,粉尘占 35.4%、SO₂ 占 67%、NO_x 占 51.1%。球团工序的污染物排放远低于烧结工序,粉尘占 5.2%,是烧结工序的 1/7,SO₂ 占 20.1%,是烧结工序的 1/3,NO_x 占 10.4%,是烧结工序的 1/5。高炉工序粉尘排放在整个钢铁流程中占 20.6%、SO₂ 占 1.6%、NO_x 占 14.2%。炼钢和轧钢工序粉尘 19.2%、SO₂ 占 2.1%、NO_x 占 7.8%。因此,要实现钢铁行业的绿色发展之路,需要调整现有高炉炉料结构,减少烧结矿,增加球团矿使用质量比例。

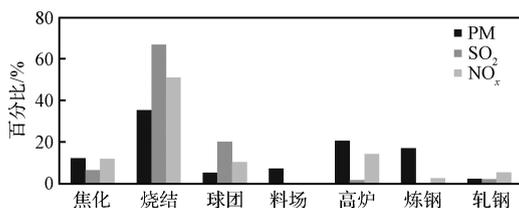


图 1 钢铁流程污染物排放对比

Fig. 1 Pollutant emission comparison of steel process

钢铁行业全部达到超低排放标准,按照生铁产量 7 亿 t 计算,每年排放到大气中的烟气粉尘约为 8 万 t,SO₂ 约为 20 万 t,NO_x 约为 30 万 t。由此可见,钢铁行业达到超低排放标准情况下排放到大气中的污染物总量仍旧很大,尤其是钢铁工业集中地区,排放总量更大^[9]。因此要寻求更进一步降低污染物排放总量的源头减排和过程治理措施,通过减少污染物生成量,降低环保投资,降低运行费用,降低污染物排放总量。

而球团矿烟气生成量是烧结矿的 50% 左右,在相同烟气排放浓度情况下可以降低一半左右的烟气总量,因此发展球团矿替代烧结矿的冶炼方式能够从根本上减少污染物生成浓度,能够实现污染物源头减排;球团焙烧温度低于烧结矿焙烧温度,制备熔剂性球团可以进一步降低污染物浓度,因此可以通过焙烧温度控制,在过程中降低污染物生成浓度。

欧洲和北美受环保因素的影响,高炉炉料结构由高比例烧结矿逐步转变为高比例球团矿,尤其是瑞典和芬兰的钢铁企业,基于环保政策,取消烧结机,使用全球团冶炼,厂内废料采用冷压块的方式投入高炉冶炼。而北美的高炉炉料结构也是以球团矿冶炼为主,烧结机承接处理筛下粉末和回收废料的

功能。高比例球团冶炼不但在原料制备环节上清洁,还具有入炉品位高、渣量低、燃料比低等优势。欧洲 SSAB 钢铁公司高炉球团配比超过 90%,渣量

比为 160 kg/t 左右,燃料比为 450 kg/t 左右,比国内同容积高炉平均燃料比低 50~60 kg/t。欧美部分钢铁公司高炉炉料结构见表 1^[10-11]。

表 1 炉料结构和重点指标

Table 1 Burden structure and key indicators

国家企业	炉料结构/%			利用系数/ ($t \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$)	入炉品位/%	焦比/ ($kg \cdot t^{-1}$)	煤比/ ($kg \cdot t^{-1}$)	燃料比/ ($kg \cdot t^{-1}$)	渣铁比/ ($kg \cdot t^{-1}$)
	烧结矿	球团矿	冷压块						
ArcelorMittal 7 号	20	80	0	2.4	63.3	335	120	455	275
USASTEEL 4 号	20	80	0	2.4	61.8	300	160	460	250
SSAB 3 号	0	92	8	2.6	65.6	300	150	450	166
SSAB 4 号	0	97	3	2.9	65.2	352	90	442	153
DOFASCO	0	100	0	3.2	65.1	—	—	480	194

中国高炉炉料结构以高比例烧结矿配加少量酸性球团矿或天然块矿为主,烧结矿平均质量配比为 75%左右^[12]。目前国内使用球团矿较多的主要钢铁公司像首迁、京唐、太钢等,质量分数接近 30%,河钢高炉球团质量分数为 10%~25%。大量烧结矿入炉,造成入炉品位低、渣量高、高炉燃料比高。高比例球团使用有利于降低燃料比,增加产量,改善高炉指标。

2 制约中国球团矿发展的瓶颈

中国的矿石储量巨大,但平均品位较低(35%左右),需要经过选矿富集。像东北、华北地区的变质-沉积磁铁矿储量超过 200 亿 t,且可选性能好,经选矿后可以获得含铁 65%以上的精矿^[6]。这类富选铁精粉粒度细,很适于造球。但由于选矿成本高,被低价进口铁矿石冲击,造成开采规模减少。铁矿资源以高 SiO₂ 型铁矿精粉为主,制备的酸性球团矿 SiO₂ 质量分数更高,造成冶金性能差,带入高炉的渣比高,冶炼技术不成熟,使得球团质量分数一直比较低。

国内球团矿生产主要采用链篦机-回转窑工艺,生产熔剂性球团难度大。传统的酸性球团为 Fe₃O₄ 氧化再结晶固结,其矿物组成以赤铁矿为主,仅存在微量的 FeO-SiO₂ 二元系液相;而熔剂性球团为 Fe₃O₄ 氧化再结晶和 FeO_x-SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃ 五元系液相黏结相结合,存在铁酸钙、复合铁酸钙等有益矿物和 CaO-SiO₂、CaO-FeO-SiO₂、CaO-SiO₂-MgO 系低熔点物相^[7],造成熔剂性球团强度偏低、产量低、回转窑结圈等问题。

包括中国在内的亚洲地区高炉多数是以高比例烧结矿为主,烧结矿可以使用粉状物料,大多数以进

口铁矿粉为主,进口铁矿粉品位高,价格便宜,这就造成烧结成本相对较低。相反,生产球团要以铁精粉为主,国内矿山铁精粉成本较高,进口精粉价格更贵,这就造成球团成本升高。从原燃料使用成本上,球团成本要高于烧结矿成本。另外,国内以生产酸性球团为主,SiO₂ 质量分数偏高,冶炼不经济,高炉不能高比例配加,高炉燃耗不能大幅降低,无法弥补原料上升的成本,使得球团冶炼的经济性无法发挥出来,以至于大多数钢铁企业不愿意也不能大比例使用球团矿。近十年高炉球团矿质量分数和铁矿石价格对比如图 2 所示。

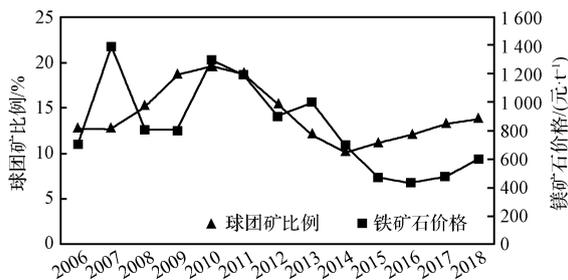


图 2 近 10 年国内高炉球团矿质量分数与铁矿石价格对比
Fig. 2 Comparison of pellet ratio and iron ore price of domestic blast furnace in past decade

在超低排放的基础上,进一步降低污染物排放总量,降低环保投资和运行费用,就需要减少烧结矿使用量,多使用相对清洁的球团矿,开发适于中国矿粉资源特点的优质冶金球团,达到高比例球团冶炼,实现钢铁工业绿色可持续发展。河钢集团使用冀东地区磁铁矿精粉,搭配使用南非 PMC 精粉,成功实现低排放熔剂性球团工业化生产和高炉高比例球团矿冶炼。

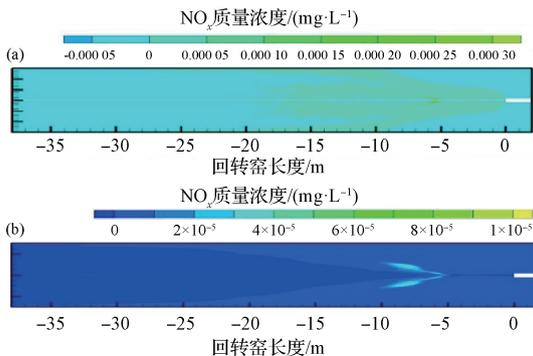
3 低排放熔剂性球团制备

3.1 SO_2 、 NO_x 减排原理及效果

河钢唐钢青龙炉料为单独球团制备企业,具备年产 200 万 t 链篦机回转窑氧化球团生产能力,使用煤粉作为热源。为了更深入地了解硫、氮元素的来源和去向,对原燃料和相应产品进行大量的实验室研究。结果表明煤粉中硫元素以 FeS 和有机硫两种形态存在,且有机硫占最主要部分,质量分数达 86.8%;球团混匀精粉中硫元素以 FeS 和硫酸盐形态存在。煤粉燃烧后,全部的 FeS 和几乎全部的有机硫被氧化;球团混料焙烧后, FeS 全部被氧化,在熟矿中只存在硫酸盐形态的硫,这是由于原料中添加的熔剂和黏结剂成分中的钙元素质量分数较高,钙和硫结合生成硫酸钙和亚硫酸钙。这证明了碱性熔剂起到一定的固硫作用,因此提高球团碱度,制备熔剂性球团有利于降低球团烟气 SO_2 生成总量,结果表明生产碱度 1.0 的熔剂性球团比碱度 0.3 的酸性球团 SO_2 浓度降低 25.13%。

通过模拟热工参数变化对温度场和浓度场的影响来确定 NO_x 的生成和分布。 NO_x 是氮元素在高温有氧燃烧条件下产生的,燃烧过程中 NO_x 依据生成机理可分为 3 种类型:热力型 NO_x 、燃料型 NO_x 和快速型 NO_x 。热力型 NO_x 是空气中的氮气在高温富氧条件下与氧气反应生成的氮氧化物,窑头火焰温度高达 1 900~2 000 K,满足热力型 NO_x 生成所需要的温度要求;燃料型 NO_x 主要由煤粉中的氮氧化物与周围氧气反应得到的;快速型 NO_x 是在较低温度下空气中的 N_2 与燃料中含有的碳氢化合物结合出现的,煤粉燃烧中其产生的质量分数不足 5%。因此,对熔剂性球团回转窑内燃烧的数值模拟只考虑了热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 两种,其浓度分布特征如图 3 所示。

回转窑内 NO_x 和 NO 分布云图如图 4 所示。由图 3、图 4 可知,回转窑内的 NO_x 组分浓度分布与温度分布有着紧密的相关性,峰值主要集中在窑头区域和燃烧形成的高温区域。在窑身长度 25 m 后 NO_x 的生成量很少,这是由于煤粉燃烧在窑头位置时尚处于初始阶段,此阶段主要发生的是煤粉的热解,逸出的挥发分和燃烧区域内氧气的浓度均较高,因此该区域生成了大量燃料型 NO_x 和极少量的热力型 NO_x ;随着反应的继续进行,煤粉热解后形成的残余焦炭继续燃烧,窑内烟气的温度逐渐升高,热力型 NO_x 开始大量生成。结合图 4 可以看出,在

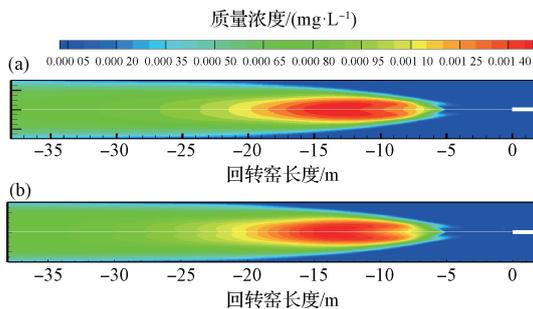


(a) 燃料型; (b) 热力型。

图 3 不同类型 NO_x 分布云图

Fig. 3 Cloud pictures of NO_x distribution of different types

10~17 m 的温度峰值靠后区域,窑内 NO_x 的浓度达到最大值。在 25 m 后由于燃烧反应基本完成,窑内温度逐渐降低,低于热力型 NO_x 的生成温度在 1 600 K,故窑内 NO_x 的浓度逐渐减少。



(a) NO_x ; (b) NO 。

图 4 NO_x 和 NO 分布云图

Fig. 4 Cloud pictures of NO_x and NO distribution

通过对熔剂性球团生产过程热工参数进行精确控制,在确保球团矿质量,减少回转窑结圈等方面,通过调整焙烧温度,控制生成 CaO-SiO_2 、 CaO-FeO-SiO_2 、 $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO}$ 系低熔点物相量措施,尽可能减少污染物 NO_x 生成总量。结果表明,焙烧温度较酸性球团降低 40~60 °C,熔剂性球团比酸性球团 NO_x 生成量降低 4.91%,燃料中的氮元素全部氧化成 NO_x 进入烟气中,局部火焰区域产生热力型 NO_x 所占质量分数很少。

3.2 球团矿质量和冶金性能

在链篦机-回转窑工艺中制备中高硅熔剂性球团难度较大,涉及到回转窑结圈、球团粉化、表面黏结等难题。欧洲和国内制备熔剂性球团的 SiO_2 质量分数普遍低于 3.5%,中高硅熔剂性球团仅限于实验室研究阶段,还没有工业生产的先例。为此河钢集团根据国内矿粉 SiO_2 高的实际情况,合理匹配

精粉资源,成功生产出 SiO_2 质量分数在 4.5% 以上, R_2 为 1.0 左右的镁质熔剂性球团,具备长期连续生产的能力。熔剂性球团与普通酸性球团典型成分对比见表 2。熔剂性球团因添加钙镁等熔剂品位由 63.10% 降低到 61.80%, SiO_2 质量分数为 4.50%, MgO 质量分数为 1.80%, 二元碱度为 0.98, 解决了回转窑结圈等制约高硅熔剂性球团生产问题, 完全满足高比例球团冶炼需要。

表 2 球团成分

Table 2 Pellet composition

球团种类	$w(\text{TFe})/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	碱度
普通酸性球团	63.1	5.8	1.4	0.31
镁质熔剂球团	61.8	4.5	1.8	0.98

表 3 球团冶金性能

Table 3 Metallurgical properties of pellets

球团种类	抗压强度/N	膨胀指数/%	还原性能 RI/%	低温还原粉化/%						
				RDI _{>6.3 mm}	RDI _{>3.15 mm}	RDI _{<0.5 mm}				
普通酸性球	2 635	14.53	61.32	95.0	96.3	3.3				
镁质熔剂球	2 549	12.00	76.90	85.7	88.1	5.4				
	$t_{10}/^\circ\text{C}$	$t_{40}/^\circ\text{C}$	$\Delta t/^\circ\text{C}$	$t_S/^\circ\text{C}$	$t_D/^\circ\text{C}$	$\Delta t_{DS}/^\circ\text{C}$	$t_m/^\circ\text{C}$	$\Delta P_{\max}/\text{kPa}$	$\Delta H/\text{mm}$	$S/(\text{kPa}\cdot^\circ\text{C})$
	1 214	1 334	120	1 367	1 490	123	1 472	7.0	20.5	431
	1 247	1 349	102	1 387	1 481	94	1 469	5.1	18.2	240

注: t_{10} 为软化开始温度; t_{40} 为软化终了温度; Δt 为软化温度区间; t_S 为熔化开始温度; t_D 为滴落开始温度; Δt_{DS} 为熔滴温度区间; t_m 为熔化滴落温度; ΔP_{\max} 为最大压差值; ΔH 为料柱降低高度; S 为透气性指数特征值。

结矿相比,烟气流量、污染物浓度得到大幅降低,由具备污染物检测资质的第三方机构检测烧结、球团烟气浓度结果如图 5 所示。

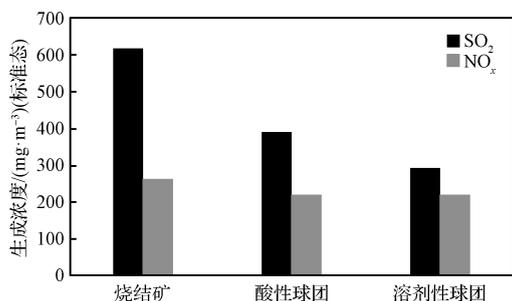


图 5 烧结、球团烟气污染物浓度

Fig. 5 Concentration of sintering and pellet flue gas

熔剂性球团 SO_2 浓度比酸性球团降低 98 mg/m^3 (标准态,下同),降低了 25%, NO_x 浓度持平。与烧结矿相比,熔剂性球团生成的 SO_2 由 617 降低到 292 mg/m^3 ,降低了 53%; NO_x 由 263 降低到 220 mg/m^3 ,降低了 16%。

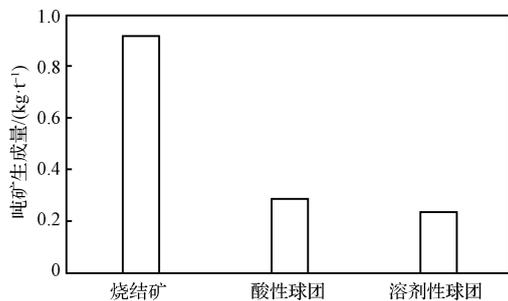
因添加镁质熔剂,熔剂性球团与酸性球团相比,除抗压强度和低温还原粉化性能外,熔剂性球团的其他冶金性能均优于普通酸性球团,虽然抗压强度和低温还原粉化性能低于普通酸性球团,但仍处于较好水平,满足高炉炼铁要求。

球团冶金性能见表 3。由表 3 可知:熔剂性球团还原性能比酸性球团增加了 15.58 个百分点,膨胀指数改善了 2.53 个百分点,软化开始温度增加了 33 $^\circ\text{C}$,软熔温度区间降低,明显接近于烧结矿,有利于高炉软熔带厚度的降低,降低高炉料柱阻力。

3.3 减排效果对比

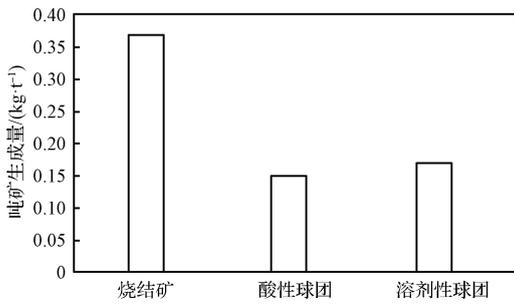
通过提高碱度、降低焙烧温度、优化工艺参数等措施,熔剂性球团污染物生成浓度进一步降低,与烧

根据现场第三方实际检测浓度和烟气流计算每生产 1 t 烧结矿和球团矿所生成的 SO_2 、 NO_x 总量对比如图 6 和图 7 所示。

图 6 烧结、球团 SO_2 生成量对比Fig. 6 Comparison of sintering and pellet SO_2 products

如图 6 所示,折合成相同硫负荷情况下,每吨熔剂性球团 SO_2 生成量由酸性球团的 0.29 降低到 0.23 kg/t ,降低了 0.06 kg/t ,降低了 20%;比烧结矿 0.92 kg/t ,降低了 0.69 kg/t ,降低了 75%。

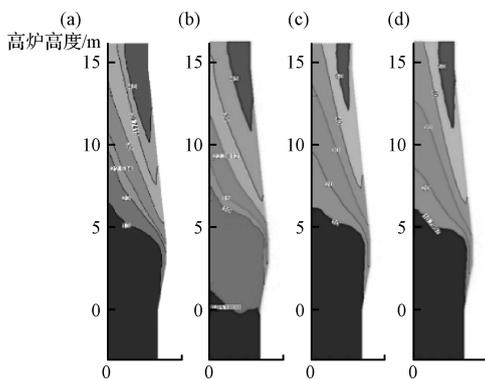
如图 7 所示,折合成相同氮负荷情况下,因熔剂

图 7 烧结、球团 NO_x 生成量对比Fig. 7 Comparison of sintering and pellet NO_x production

性球团和酸性球团 NO_x 浓度持平,而熔剂性球团产量降低,吨矿烟气量增加,导致生成总量比酸性球团有所增加;与烧结矿相比,由 0.37 降低到 0.17 kg/t,降低了 0.20 kg/t,降低了 54%。

4 高比例球团矿冶炼

河钢唐钢在不锈钢公司 450 m³ 高炉上开展高比例球团工业试验,球团质量分数由 20% 增加到 80%,炉况稳定性优于同级别高比例烧结矿冶炼高炉。针对高比例球团布料规律和软熔带位置变化规律先进行实验室对比试验和数值模拟研究,炉内软熔带位置随着球团质量比例的提高有一个先升高的过程,然后又有所降低;软熔带的厚度先变厚,球团比例从 31% 提高到 50% 以后就开始变薄。高炉不同球团质量分数煤气利用率模拟结果如图 8 所示,可以看出使用高比例球团后煤气利用率有所升高。



(a) 20%; (b) 40%; (c) 60%; (d) 80%。

图 8 不同球团比例煤气利用率模拟结果

Fig. 8 Gas utilization simulation results of different pellet ratios

从现场冶炼结果来看,球团滚动对气流的影响逐步显现,尤其是球团配比达到 40% 以后,中心气

流明显不足,需要上下部操作制度配合进行调整。达到 60% 以后,开始谋求优化高炉技术指标,将降低消耗指标作为高炉指标优化的重点。在达到 80% 球团配比后,高炉通过优化基本操作制度,提高炉况顺行度,为提高焦炭负荷和煤比创造条件,通过合理调整下部送风制度和上部装料制度,活跃炉缸,提高煤气利用率,降低燃料比,与试验基准期比较,渣比降低 100 kg/t,入炉焦比降低了 18 kg/t,煤比提高了 7 kg/t,煤气利用率提高了约 1.5%,燃料比降低了 11 kg/t。因高炉处于炉役后期,不得不采取降低冶炼强度,提高炉温,增加钛矿负荷等措施,导致高炉燃料比降低幅度不大,高比例球团冶炼的优势未完全发挥出来,但应用镁质熔剂性球团后高炉稳定性明显优于同级别高比例烧结矿冶炼高炉,高炉铁水质量未受影响。

通过使用熔剂性球团进行高比例球团冶炼试验结果表明,在国内矿粉资源条件下,生产中高硅熔剂性球团完全可行,高比例球团冶炼效果良好,能够从源头和过程实现污染物减排,能够更大程度降低污染物排放总量。通过计算得到的污染物减排效果如图 9 所示。

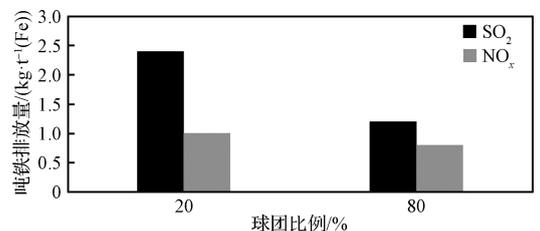


图 9 高比例球团冶炼结果对比

Fig. 9 Comparison of high ratio pellet smelting results

高炉球团质量分数达到 80%,相比基准期 20% 球团时计算可知:SO₂ 吨铁由 2.4 降低到 1.2 kg/t,降低了 50%,NO_x 由 1.0 降低到 0.8 kg/t,降低了 26%。

鉴于高比例球团冶炼效果,河钢唐钢在 2 000 m³ 级、3 000 m³ 级高炉均配加使用熔剂性球团,高炉炉况稳定顺行。进一步推广至河钢乐亭钢铁公司产能转移搬迁项目上,为降低中高硅熔剂性球团制备难度采用带式焙烧机氧化球团生产线,按照 50% 以上的球团质量分数进行整体配置。

5 经济、社会环境效益

相比酸性球团而言,熔剂性球团冶金性能得到极大改善,适应高炉高比例球团冶炼需求,球团售价

和冶炼经济性都得到提高。从现场运行结果来看,在相同污染物治理工艺条件下,熔剂性球团烟气浓度相比烧结矿降低 50%左右,污染物脱硫剂成本和运行费用仅为烧结矿的一半。另一方面球团品位的提高,弥补了售价提升的不足,高炉渣比得到降低,高炉吨铁综合成本降低 41 元。

带来经济效益的同时更带来巨大社会环境效益,通过使用 LCA 的炼铁流程污染物排放、能耗的减排潜力和持续改进的定量分析方法得出结论:温室效应是炼铁流程中对环境造成影响的主要因素,球团资源消耗潜力(ADP)和酸化(AP)次之,分别为 27.26%和 17.30%;烧结酸化(AP)和光化学毒性(POCP)次之,分别为 23.45%和 7.21%;高炉酸化(AP)和光化学毒性(POCP)次之,分别为 35.51%和 10.56%。本项目在源头上有效降低污染物生成总量,吨铁 SO_2 生成量减少 1.45 kg/t, NO_x 生成量减少 0.32 kg/t, CO_2 生成量减少 10.67 kg/t。

按全国生铁产能 7 亿 t,一半产能推广计算:每年炼铁工序 SO_2 生成量减少 50 万 t, NO_x 生成量减少 12 万 t,每年 CO_2 生成总量降低 370 万 t。

6 结论

(1)河钢集团在链篦机-回转窑氧化球团流程中成功实现了中高硅熔剂性球团工业化生产,在高炉上成功实现了高比例球团矿冶炼应用。开发了低排放熔剂性球团焙烧技术,阐明了熔剂性球团焙烧过程吸放热规律,克服了生球爆裂、回转窑结圈等技术难题,成功生产出 SiO_2 质量分数在 4.5%以上,二元碱度(R_2)为 1.0 左右的镁质熔剂性球团,并且具备长期连续生产的能力。

(2)开发了与之相适宜的低排放熔剂性球团焙烧技术,获得了焙烧温度与球团矿质量调控、燃烧温度与热力型氮氧化物生成量控制平衡点,使得每吨熔剂性球团 SO_2 生成量比酸性球团降低了 20%;比烧结矿产生的 SO_2 、 NO_x 分别降低 75%、53%。

(3)研发了高比例球团高炉冶炼集成技术,高炉应用该球团质量分数由 20%增加到 80%,燃料比降低 11 kg/t,吨铁 SO_2 、 NO_x 分别减排 50%、26%。

(4)提出了炼铁流程全生命周期节能减排定量分析方法和持续改进方向,成功实现污染物在源头和过程上的削减,为国内钢铁工业减少污染物排放总量开辟新的方向。

参考文献:

[1] 河北省环境保护厅,河北省质量技术监督局. DB 13/2169—

2018 钢铁工业大气污染物超低排放标准[S]. 石家庄:河北省环境保护厅,河北省质量技术监督局,2018-09-19. (Hebei Provincial Department of Environmental Protection, Hebei Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. DB 13/2169—2018 Ultra-Low Emission Standards for Atmospheric Pollutants in the Steel Industry[S]. Shijiazhuang: Hebei Provincial Department of Environmental Protection, Hebei Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision, 2018-09-19.)

- [2] 胡启晨,姜曦. 高炉炉料结构调整是源头减排的必然趋势[N]. 中国冶金报,2017-10-19(06). (HU Qi-chen, JIANG Xi. The adjustment of blast furnace charge structure is the inevitable trend of source reduction[N]. China Metallurgical News, 2017-10-19(06).)
- [3] 郝吉明,许嘉钰,吴剑,等. 我国京津冀和西北五省(自治区)大气环境容量研究[J]. 中国工程科学,2017,19(4):13. (HAO Ji-ming, XU Jia-yu, WU Jian, et al. Study on atmospheric environmental capacity of Beijing, Tianjin and Hebei and the five northwestern provinces (autonomous regions) [J]. China Engineering Science, 2017, 19(4): 13.)
- [4] 李新创. 加快钢铁“绿色制造”提升绿色发展水平[J]. 冶金经济与管理,2019(2):4. (LI Xin-chuang. Accelerating the "green manufacturing" of steel to improve the level of green development[J]. Metallurgical Economics and Management, 2019(2):4.)
- [5] 殷瑞钰. 绿色制造与钢铁工业——钢铁工业的绿色化问题[J]. 科技和产业,2003(9):25. (YIN Rui-yu. Green manufacturing and steel industry—Greening problem of iron and steel industry[J]. Science and Technology and Industry, 2003(9):25.)
- [6] 杨晓东,张玲,姜德旺,等. 钢铁工业废气及 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特性与污染控制对策[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程,2013,5(3):240. (YANG Xiao-dong, ZHANG Ling, JIANG De-wang, et al. Exhaust gas and $\text{PM}_{2.5}$ emission characteristics and pollution control countermeasures in iron and steel industry[J]. Engineering Research-Interdisciplinary Engineering, 2013, 5(3): 240.)
- [7] 贺泓. 氮氧化物选择性催化还原研究新进展[C]// 第十一届全国环境催化与环境材料学术会议论文集. 沈阳:中国化学会,中国化学会催化委员会,2018:1. (HE Hong. New progress in selective catalytic reduction of nitrogen oxides[C]// Proceedings of the 11th National Conference on Environmental Catalysis and Environmental Materials. Shenyang: Chinese Chemical Society, Chinese Chemical Society Catalysis Committee, 2018: 1.)
- [8] 殷瑞钰. 流程工业的绿色发展是当务之急[N]. 中国电子报,2015-09-08(005). (YIN Rui-yu. The green development of process industry is a top priority [N]. China Electronics News, 2015-09-08(005).)