

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180347

钢铁工业的空气消耗与废气排放

蔡九菊^{1,2}

(1. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国金属学会能源与热工分会, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于工业系统与环境之间的物质交换, 建立空气是冶金资源的概念, 阐述了钢铁工业空气消耗量、废气产生量、污染物排放量三者间的联系及其对区域大气环境质量的影响。调研核查了若干家钢铁企业, 统计其烧结、炼焦、炼铁、炼钢和轧钢等各生产工序, 以及高炉-转炉流程、全废钢-电炉流程的空气消耗量和废气排放量。以吨钢为计算基准, 给出了中国钢铁工业的资源消耗结构和废物排放结构以及空气消耗和废物排放数据, 其中吨钢空气消耗量(以质量计)占吨钢资源消耗总量的 85% 以上, 强调了减少空气消耗和废气产生量对降低污染物排放总量、改善区域大气环境质量的重要性。列举了富氧乃至纯氧燃烧、废气循环再利用、烧结矿竖式冷却换热技术的节能减排案例, 指明应用这些关键技术、优化钢铁生产流程和发展全废钢电炉短流程等是大幅度减少空气消耗和废气产生量, 进而减少颗粒物、SO₂、NO_x 排放量的有效途径。

关键词: 钢铁工业; 空气消耗; 废气排放; 纯氧燃烧; 废气循环; 大气环境质量

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)04-0001-11

Air consumption and waste gas emission of steel industry

CAI Jiu-ju^{1,2}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Energy and Thermal Engineering Branch, The Chinese Society for Metals, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: By investigating the material metabolism between industrial system and the environment, the air was regarded as a resource for metallurgy, and the relationship among air consumption, waste gas production, polluted materials emission and the ambient air quality was established. Based on the survey of steel plants, the air consumptions and waste gas emissions of BF-BOF route, including sintering, coking, iron-making, steel-making and steel rolling, were obtained and compared with EAF route. The shares of materials consumption and waste gas emission of Chinese steel industry were calculated on a ton-of-steel basis. It is shown that air consumption contributes more than 85% of the mass of materials consumption. Thus, it is reducing the air consumption and waste gas emission that is of great significance to the reduction of polluted materials and improvement of air quality. The emission-reducing scenarios, such as oxygen-enriched or pure oxygen combustion, waste gas recycle and reuse, and vertical-type sintering ore waste heat recovery were investigated. It is pointed out that these operative technologies, as well as optimizing steel manufacturing process and developing EAF-route, are effective to reduce air consumption and the resulted reduction of particulate matters, SO₂ and NO_x emissions.

Key words: steel industry; air consumption; waste gas emission; pure oxygen combustion; waste gas recycle and reuse; ambient air quality

近些年来, 由于钢铁工业的能耗高、物耗高、排放高等问题, 引发全国上下的普遍关注, 行业内及其学术界发表了许多评论, 但是大家的看法却很不一致^[1-2], 对矿物、能源、水和空气等 4 类冶金资源的认识, 对固体废物、废水和废气等 3 类废物的产生根源、治理方向和减排途径的讨论尚

未形成共识。因此, 对中国钢铁工业的资源消耗、废物产生、污染物排放问题及其三者关系进行全面深入地研究, 尤其是把钢铁工业源头上消耗的“空气”和末端排放的“废气”关联起来, 研究它们对区域大气环境质量的影响, 显得十分重要和紧迫。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51734004, 21561122001); 国家环境保护公益性行业科研专项资助项目(201409023)

作者简介: 蔡九菊(1948—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** rcjj@mail.neu.edu.cn; **收稿日期:** 2018-09-05

1 工业系统与自然界之间的物质交换

工业系统与自然界之间的物质交换如图1所示^[1],工业系统从自然界索取的资源有矿物、能源、水和空气等4类,向自然界排放的废物有废水、废气和固体废物等3类。系统内部是工业产品的生产、制造、使用、回收和再使用等,直至使用终了报废或排放的物质代谢^[4],例如钢铁制造流程中的铁素物质流、碳素能量流、水质流和气质流等。当工业系统提供给人类社会的物质存量(指建筑物、道路、基础设施,以及各种生活耐用品中所含工业物质质量的总和)不随时间变化时,则根据质量守恒定律,在单位时间内向工业系统输入的物质质量一定等于它向自然界输出的物质质量,即

$$\text{矿物量} + \text{能源量} + \text{水量} + \text{空气量} = \text{固体废物量} + \text{废水量} + \text{废气量}$$

或写成

$$\Sigma \text{资源消耗量} = \Sigma \text{废物产生量} \quad (1)$$

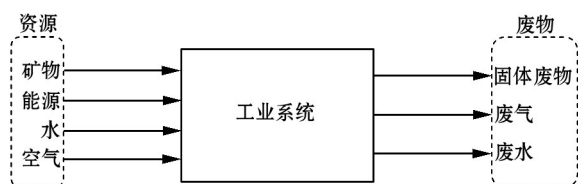


图1 工业系统与自然界之间的物质交换

Fig. 1 Mass exchange between industrial system and nature

由于污染物排放总量的大小对环境质量有决定性影响,所以将式(1)进一步扩展成如下形式(符号→表示具有决定性影响):

$$\Sigma \text{资源消耗量} = \Sigma \text{废物产生量} \rightarrow \Sigma \text{污染物排放量} \rightarrow \Sigma \text{环境质量}$$

矿物量	废气量	粉尘	大气质量指标
能源量	废水量	SO ₂	水体质量指标
水量	固体废物量	COD	土地污染程度
空气量		NO _x	其他环境指标
		CO ₂	
(I)	(II)	(III)	(IV)

(2)

就钢铁工业而言,式(2)是它提供给人类社会的物质存量在不随时间变化的情况下,钢铁生产与环境之间进行物质交换的基本关系式。需要说明的是,这里列出的资源消耗,不只是自然界中的矿物资源和能源,还包括水资源和空气资源。通常,

人们不把空气看作资源是不全面的,甚至是错误的。由于各类资源消耗量之和等于各类废物产生量之和,而废物产生量又决定污染物排放量,所以要想降低污染物排放量,就必须减少废物产生量^[5],进而减少源头上的矿物、能源、水和空气等天然资源的消耗量。钢铁企业不仅要节矿、节能,而且还要节水,更要节气^[6]。式(2)中4类变量之间的关系为:(1)第I类变量的总和等于第II类变量的总和;(2)第II类变量的总和通过末端治理直接影响第III类变量的总和;(3)第III类变量,即废物流量与其特征污染物的排放浓度的乘积,最终影响第IV类变量。在相互关系上,第I和第II类变量是源头上产生的“因”,而第III和第IV类变量是末端结出的“果”。钢铁工业实施蓝天工程,要特别关注源头上的空气消耗量、过程中废气产生量、末端污染物排放量三者之间的联系,不能顾此失彼,更不能舍本逐末。大气环境不堪重负,究根结底是无节制地过量消耗矿物、能源和空气资源造成的,是污染物排放总量超出了自然界承载力(环境自净能力)的缘故。

2 钢铁工业空气的用途及消耗

众所周知,空气是氮气、氧气等组成的多种气体混合物。通常,人们不把空气看成是资源,也不顾及消耗空气资源的多少,只是在物料平衡或热平衡计算时才列入此项,以保持输入与输出相等。殊不知,钢铁工业在末端输出的废气量与源头上输入的空气量存在着紧密的内在联系。

2.1 空气的用途及去向

(1)空气作为助燃气体与燃料一起燃烧,为钢铁生产提供热能,生成的燃烧产物经烟囱直接排入环境。当燃料种类和热值一定时,空气消耗量的大小(即空气消耗系数)决定燃料的燃烧温度、不完全燃烧程度和废气量的多少。空气消耗系数过大会增加空气系统和排烟系统的负荷,增加废气量,增大设备投资和动力消耗。(2)空气经过空分装置分离成氧气、氮气和氩气,其中氧气作为强化冶金过程的氧化气体用于炼钢吹氧和高炉富氧等,氮气和氩气作为惰性气体广泛用于冶金工艺过程的保护气、吹扫气、搅拌气或喷吹气和输送气体等。这些气体经使用后都将变成废气排入环境。(3)空气作为传递输送能量或物质的媒介,携带动能、热能或化学能以热风、动力风或燃气等能量流形式,经使用终了后变成废气由烟囱排入环境,如高炉鼓风、

压缩空气、换热用风、冷却用风、清洁用风等。(4) 空气作为输送携带烟尘、粉尘和其他污染物的载体, 通过吸尘罩和管道系统将逸出生产系统或装置的大量烟粉尘捕集并输送到除尘装置, 经过除尘、脱硫和脱硝等末端治理后再排入环境。

2.2 钢铁工业的空气消耗

为了弄清楚钢铁企业的空气消耗与废气排放的来龙去脉, 笔者与课题组成员从2014年起承担国家环境保护公益性行业科研专项“钢铁行业烟粉尘排放特性及监控技术研究”, 先后调查分析了中国23家钢铁企业烟粉尘的产生和排放特性。经数据统计、现场核查以及对典型钢铁企业废气排放源的实际测试, 获得了中国钢铁联合企业有关空气消耗和废气排放的运行数据。这些被调查企业用于燃

料燃烧、高炉鼓风以及压缩空气和氧气等各生产工序(统称生产系统)的吨钢空气消耗量数据见表1, 以 $\text{m}^3/\text{t}(\text{钢})(\text{标准态})$ 表示。目前中国钢铁联合企业生产每吨钢消耗的空气质量为 $33\,500.3\,\text{m}^3/\text{t}$ (包含流经除尘系统的空气质量 $23\,705.3\,\text{m}^3/\text{t}$), 生产系统消耗的空气质量为 $9\,795\,\text{m}^3/\text{t}$ (包含空分制氧所用的空气量)。其中, 消耗空气最多的是烧结工序, 主要用于烧结机的点火炉和铁矿烧结, 生产每吨烧结矿消耗空气 $4\,270.7\,\text{m}^3/\text{t}$, 占空气消耗总量的43.6%; 其次是炼铁工序的热风炉消耗空气 $2\,472.2\,\text{m}^3/\text{t}$, 占25.2%; 然后是发电厂和燃气厂锅炉燃用企业富余煤气所消耗的空气质量 $1\,719.8\,\text{m}^3/\text{t}$, 占17.6%; 炼焦、炼钢和轧钢工序的吨钢空气消耗量都比较少, 分别占4.7%、3.5%和5.4%。

表1 钢铁联合企业生产系统吨钢空气消耗量
Table 1 Air consumption per ton of crude steel of integrated steel plants

工序	燃料燃烧/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	高炉鼓风/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	压缩空气/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	氧气等 ^① / ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	吨钢空气消耗量 合计/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	比例/ %
炼焦	458.3	—	—	—	458.3	4.7
烧结	4 250.1	—	20.6	—	4 270.7	43.6
炼铁	866.4	1 435.7	33.7	136.4	2 472.2	25.2
炼钢	34.3	—	86.4	223.1	343.8	3.5
轧钢	473.6	—	56.6	—	530.2	5.4
燃气发电等	1 714.2	—	5.6	—	1 719.8	17.6
合计	7 796.9	1 435.7	202.9	359.5	9 795.0	100

①以空气当量表示氧气消耗量, $1\,\text{m}^3\text{空气}=0.21\,\text{m}^3\text{氧气}(\text{标准态})$ 。

3 钢铁工业废气的产生与排放

钢铁工业废气源于两部分: 一部分是炼焦、烧结、炼铁、炼钢和轧钢等生产系统(装置)内产生的废气; 另一部分是从生产系统(装置)逸出的、经除尘系统捕集的废气。

3.1 废气的产生及流向

这些钢铁企业的废气产生量或排放量见表2, 均以 m^3/t 表示。其中, 源于生产系统的废气产生量

为 $10\,944.7\,\text{m}^3/\text{t}$, 简称“生产系统废气产生量”; 源于除尘系统的废气产生量为 $23\,705.3\,\text{m}^3/\text{t}$, 简称“除尘系统废气产生量”, 吨钢废气排放量合计为 $34\,650\,\text{m}^3/\text{t}$ 。其中, 排放废气量最多的是烧结工序, 为 $11\,969.8\,\text{m}^3/\text{t}$, 占废气排放总量的34.6%; 其次是炼铁和炼钢工序, 分别为 $8\,177.3\,\text{m}^3/\text{t}$ (占23.6%)和 $6\,003.2\,\text{m}^3/\text{t}$ (占17.3%)。炼焦、烧结和炼铁等铁前工序的废气排放量占整个钢铁企业废气排放量的67.9%, 炼钢和轧钢两个工序的废气排放量占22.3%, 燃气发电等占9.8%。

表2 钢铁联合企业吨钢废气产生量和排放量
Table 2 Waste gas generation and emission per ton of crude steel of integrated steel plants

工 序	生产系统废气		除尘系统废气		吨钢废气排放量	
	产生量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	比例/%	产生量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	比例/%	合计/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	比例/%
炼焦	621.8	5.7	2 729.8	11.5	3 351.6	9.7
烧结	4 722.1	43.2	7 247.7	30.6	11 969.8	34.6
炼铁	1 708.3	15.6	6 469.0	27.3	8 177.3	23.6
炼钢	244.4	2.2	5 758.8	24.3	6 003.2	17.3
轧钢	1 007.4	9.2	740.0	3.1	1 747.4	5.0
燃气发电等	2 640.7	24.1	760.0	3.2	3 400.7	9.8
合计	10 944.7	100	23 705.3	100	34 650.0	100

3.2 钢铁生产流程对空气消耗和废气排放的影响

钢铁生产流程是影响企业生产成本、产品能耗和环境负荷的关键因素,直接关系并决定着空气消耗量和废气排放量的多少,以及对所在区域大气质量的影响程度。中国钢铁企业的生产规模、流程结构差别很大,为使研究对象更具代表性,在广泛调研国内不同类型钢铁企业的基础上,构造 2 类典型生产流程,并依据企业生产数据分析不同流程对空气消耗和废气排放的影响。其中,高炉长流程是指从铁矿石开始,由烧结、焦化、高炉炼铁、转炉炼钢、连铸和轧钢等工序组成的一类生产流程;全废钢电炉短流程是指用于普通建筑、结构用钢等棒材的生产,两者的装备水平及其技术经济指标均为国内同类流程的较好水平。全废钢电炉短流程吨钢废气排放量为 6 837.9 m³/t,排放废气最多的是电炉工序,占吨钢废气排放

总量的 74.7%。其中,源于生产系统的废气量为 1 904.2 m³/t,占 27.8%;源于除尘系统的废气量^①为 4 933.7 m³/t,占 72.2%。

高炉长流程与全废钢电炉短流程的空气消耗、废气排放量的比较见表 3。表中数据说明,长短两种流程的吨钢空气消耗量、废气排放量的差别极大。高炉长流程的吨钢空气消耗量高达 31 020.5 m³/t,吨钢废气排放量高达 31 249.3 m³/t(为了可比,不包含钢铁联合企业燃气发电等燃用富余煤气所消耗的空气量及其废气排放量),其中源于生产系统的废气量为 8 304 m³/t,占吨钢废气排放总量的 26.6%,源于除尘系统的废气量为 22 945.3 m³/t,占 73.4%。与高炉长流程相比,全废钢电炉短流程的吨钢空气消耗量只有 6 392.5 m³/t,是高炉长流程的近 1/5。显然,若用电炉短流程替代高炉长流程可削减废气排放量接近 80%。

表 3 高炉流程与电炉流程的空气消耗及废气排放水平的比较

Table 3 Comparison of waste gas emissions between conventional and compact routes

生产流程	吨钢空气消耗量	生产系统废气量	除尘系统废气量	吨钢废气排放量
高炉长流程 ^① /(m ³ ·t ⁻¹)	31 020.5	8 304.0	22 945.3	31 249.3
电炉短流程/(m ³ ·t ⁻¹)	6 392.5	1 904.2	4 933.7	6 837.9
电炉短流程的削减率/%	79.4	77.1	78.5	78.1

①未计入高炉长流程燃用企业富余煤气所消耗的空气量及其废气排放量。

3.3 冶金资源结构中空气的质量与分量

冶金资源结构包括资源的消耗结构和废物的排放结构两部分。前者是指钢铁工业消耗的各种天然资源量在全部资源消耗总量中所占的比例;后者是指这些天然资源使用终了产生的某种废物在全部废物排放总量中所占的比例。依据图 1 给出的资源与废物之间的物质交换关系,以及对中国 23 家钢铁企业生产数据的不完全统计,钢铁工业的资源消耗结构及其废物排放结构见表 4。表中的消耗和排放数据均以实物量表示,“矿物”是指每吨钢消耗铁矿石和熔剂矿的质量;“能源”是指每吨钢消耗的

能源折算成煤炭的质量。中国生产每吨钢消耗矿物、能源、新水和空气等天然资源量为 50.7 t/t(钢)。其中,用于生产系统的空气消耗量为 9 795 m³/t,用于除尘系统的空气消耗量为 23 705.3 m³/t,两者合计为 33 500.3 m³/t,折合空气质量为 43.2 t/t(钢),占全部资源消耗总量的 85.2%。中国钢铁工业消耗空气和水的比例为 92.1%,矿物和能源为 7.9%,与工业社会资源消耗结构“空气和水占 95%,矿物和能源占 5%”^[3]大体相符。吨钢排放废物为 50.7 t/t,其中排放废气为 34 650 m³/t,折合质量为 44.7 t/t,占全部废物排放总量的 88.2%。由此可见,空气和废气的

表 4 中国钢铁工业的资源消耗结构和废物排放

Table 4 Resource consumption and waste emission of Chinese iron and steel industry

指标	资源消耗结构					废物排放结构			
	矿物	能源	新水	空气	合计	固体废物	废水	废气	合计
实物量/(t·t ⁻¹)	3.0 ^①	1.0	3.5	43.2	50.7	2.5	3.5	44.7 ^②	50.7
比例/%	5.9	2.0	6.9	85.2	100	4.9	6.9	88.2	100

① 按原生钢比 90%核算的矿物消耗量,不包含废钢消耗量; ② 按标准状态下(273.15 K, 101 kPa)废气密度 1.29 kg/m³折算的废气质量。

密度虽然较小,但是在冶金资源结构中的分量很重。目前,中国钢铁工业无节制地过量消耗空气和废气排放是导致污染物排放总量超出区域环境容量的主要原因之一。未来,降低空气消耗和废气排放总量很可能成为中国钢铁工业改善大气环境质量,打赢蓝天保卫战的重要途径。

4 减少污染物排放的途径与措施

依据式(2)中标示的资源消耗量、废物产生量、污染物排放量三者间的关系及其对大气环境质量的影响,在钢铁生产流程一定的情况下,得出钢铁企业减少污染物排放的途径包括3个方面:控制空气消耗量;减少废气产生量;完善末端治理^[8]。

4.1 控制空气消耗量

控制钢铁企业的空气消耗量,如同控制矿物资源和能源消耗量一样,都是从源头上设法提高资源效率、能源效率和减少污染物排放的治本之策^[9-12]。在实际生产中,凡是改善和强化冶金炉窑内热交换的一切措施,都会减少其燃料消耗量和空气消耗量,提高冶金炉窑热效率。

(1) 降低烧结机、焦炉、高炉、转炉、锅炉、加热炉和热处理炉等工艺设备的单位燃耗及其空气消耗量。过去,在钢产量高速增长的形势下,中国钢铁厂的工艺装备大多在超负荷下运行(俗称“小马拉大车”)。如轧钢加热炉,经常在“经济区”的右侧工作(图2),炉子的生产率或热负荷 P 高,单位燃耗 b 和空气消耗量 A 也高。近些年来,受钢铁工业“限产”和小批量“订单制”等市场环境的影响,炉子又回到了“经济区”的左侧工作,即在低负荷下运行(俗称“大马拉小车”),炉子的生产率低,单位燃耗和空气消耗量仍然很高。造成这种情况的原因除

了炉子的结构不尽合理有待改进之外,炉子的操作与控制不能依据炉子产量波动及时调整供热量分配、供风量分配和炉膛压力等参数,这也是造成炉子偏离“经济区”工作的重要原因。

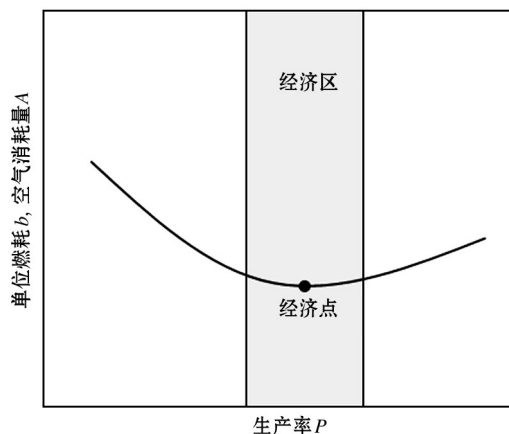


图2 加热炉工作状态划分示意图

Fig. 2 Sketch of operating scheme of reheating furnace

在实际生产中,炉子产量的波动是不可避免的。在这种情况下,改变炉子的均匀供热制度为非均匀供热制度,可以节约更多的燃料和空气量^[13]。尤其在炉子低产时,减少燃料、空气消耗量和废气产生量的效果更加明显。例如,一座5段供热连续式加热炉,采取非均匀供热制度,在操作时可以随着产量波动控制炉子的供热段数和烧嘴的开启度。这座炉子在不同产量和供热制度条件下的出炉废气量、废气温度及其单位热耗见表5。随着炉子产量的降低,供热段数逐渐减少,关闭烧嘴的熄火区范围也逐渐扩大,先是由5段操作变为4段操作,最后减少到3段操作。炉子的单位热耗、废气量和废气温度等不断降低,炉子热效率逐渐提升。

表5 炉子产量变化时采用非均匀供热操作制度的节能减排效果

Table 5 Energy-saving and emission-reducing effects of reheating furnace working at non-uniform heating scheme under different yields

炉子产量/(t·h ⁻¹)	操作制度	烧嘴熄火区域	废气量/(m ³ ·t ⁻¹)	废气温度/℃	单位燃耗/(GJ·t ⁻¹)	平均热效率/%
>130	5段操作	—	703	1 000~1 100	215	41.0
110~130	4段操作	预热段上部烧嘴	573	800~950	175	50.3
<110	3段操作	预热段上下烧嘴	545	670~800	167	52.9

(2) 降低高炉鼓风、烧结机漏风、燃烧产生的烟尘外逸和除尘系统吸风量,降低吨钢压缩空气以及氧氮氩气体的消耗量。目前,中国先进高炉的风耗为1 000 m³/t(铁)左右,大部分为1 400 m³/t上下,个

别高达2 000 m³/t。烧结机漏风率低的大约为20%,高的为60%左右。吨钢压缩空气消耗从20到200 m³/t参差不齐,国际先进企业 Arcelormittal 钢厂的压缩空气消耗量只有19 m³/t(钢)^[14],是中国吨钢压缩空

气消耗量的 1/10。钢铁企业重点排放源除尘风机的设计能力远远超出实际测量的废气流量,有的竟超出 40% 甚至更多。这种过分宽打窄用的设计思想造成动力供应与需求不匹配,使原本有限的烟粉尘由于吸入过量空气而导致废气产生量或排放量成倍增长。空气的过量吸入不但增加了除尘装置的运行负荷和处理成本,而且也给末端治理带来难度。由于空气的稀释作用,大量貌似“达标排放”废气流量的背后掩盖的是高昂的设备投资、能耗代价和运行成本,其间蕴藏着可观的节电效益和减排潜力。

(3) 提高助燃空气中氧含量和高炉富氧率,实施富氧燃烧乃至纯氧燃烧^[15],努力构建钢铁厂绿色能源 IGCC 系统^[16]。从助燃、节能和环保等几方面考量,空气并不是理想的助燃剂,钢铁联合企业应尽量使用富氧或纯氧替代空气组织燃烧(用氮气取代压缩空气),这是对传统燃烧方式的重大变革,具有大幅度节能、节风和减少燃烧产物产生量等多重优越性。如图 3 所示,相比空气燃烧,纯氧燃烧可节省燃料 30%~55%,减少空气消耗和废气排放 70%~80%。

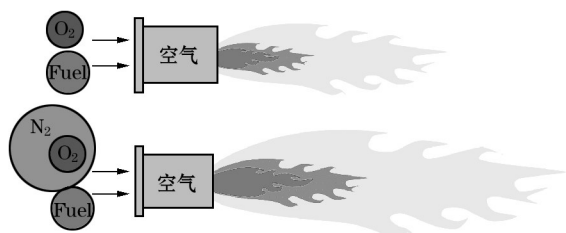


图 3 纯氧燃烧与空气中燃烧的效果比较

Fig. 3 Comparison of oxy-fuel and air-fuel combustion

此外,钢铁企业还要充分利用钢铁企业副产煤气的资源优势和制氧装置的设备条件,开发具有冶金特色的钢铁厂绿色能源 IGCC 系统,把钢铁企业的能源高效转换功能与燃气-蒸汽联合循环高效发电系统(CCPP)紧密结合起来,彻底解决钢铁企业现存的“三高”问题,尽快实现钢铁生产绿色化。

4.2 减少废气产生量

如同减少天然矿物、能源和水资源消耗离不开废钢、余热、废水等物质的再使用和再循环一样,钢铁企业减少空气消耗和废气产生量也都离不开气体的再使用和再循环,其差别只是回收利用的物质、方式、数量、周期长短和难易程度不同罢了。在铁素物质流中回收利用的是废钢铁;在能量流中回收利用的是余热或余能;在水质流中回收的是可利用的废水;在气质流中回收的是可利用的废气。其中,空气是钢铁企业使用量最多、最频繁的天然资

源,从空气→废气→除尘→再回流到大气中,如此年复一年日复一日地循环往复,注定了中国穹顶之下的空气早已不像几十年前新鲜空气那样洁净了。面对由来已久的空气污染和不堪重负的环境承载力,钢铁工业必须把超出当地环境承载力的那部分废气排放量大幅度地降下来,否则积重难返的周边空气质量不会有根本性好转。减少污染物排放量,前提是减少废气产生量。减少废气产生量单凭末端治理是无济于事的,必须在源头上或过程中凭借节省空气和燃料的消耗量来减少废气的产生量,通过废气再循环来减少废气的排放量。实践已经证明:废气循环再利用可大幅度减少空气消耗量和废气产生量,从而进一步减少颗粒物、SO₂、NO_x等污染物排放量,同时还可减少后续除尘、脱硫、脱硝装置的投资和运行费用,此外,还能使烟气中 CO 及其他可燃物通过循环再利用重新燃烧,有效降低废气中一氧化碳排放量。

4.2.1 铁矿烧结烟气分段式循环的应用举例

烧结过程所需热量的 80%~90% 都是由分散在烧结料层中的固体燃料提供的。为了保证这些燃料迅速且充分燃烧,不得不提供过量的空气,致使生产每吨烧结矿的空气消耗量高达 2 000~3 000 m³/t(含烧结机漏风在内)。即便如此,在烧结料层的局部区域仍然存在碳的不完全燃烧,表现在烧结烟气中既有相当数量的剩余氧气(O₂)也有尚未燃烧的一氧化碳(CO)。烧结烟气中 O₂、CO₂、CO、H₂O 含量沿烧结机长度方向的变化规律(风箱采样数据)如图 4 所示。由图可知,在烧结机两端(靠近机头和机尾的

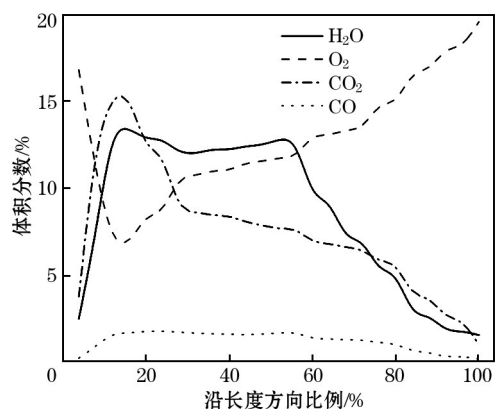


图 4 烧结烟气成分沿烧结机长度方向的分布规律

Fig. 4 Profile of component of sintering waste gas along length direction of sintering machine

风箱)的氧气含量高而中部低;与其相反,水分是两端低而中部高。烧结烟气的区域性分布特点,不但

使废气中没有耗尽的氧气通过分段循环得以有效利用,而且也大幅度地减少空气消耗量和烟气排放量、降低烟气处理负荷、环保装备投资和运行成本提供可能。早在 1992 年,日本新日铁八幡厂

将 1 台 480 m²烧结机 32 个风箱的烧结烟气分成 5 段 4 区,依据各部分烟气的温度、氧气含量、水分和 SO₂ 浓度等,选择性地分区段循环到烧结机的相应台面^[17](图 5)。

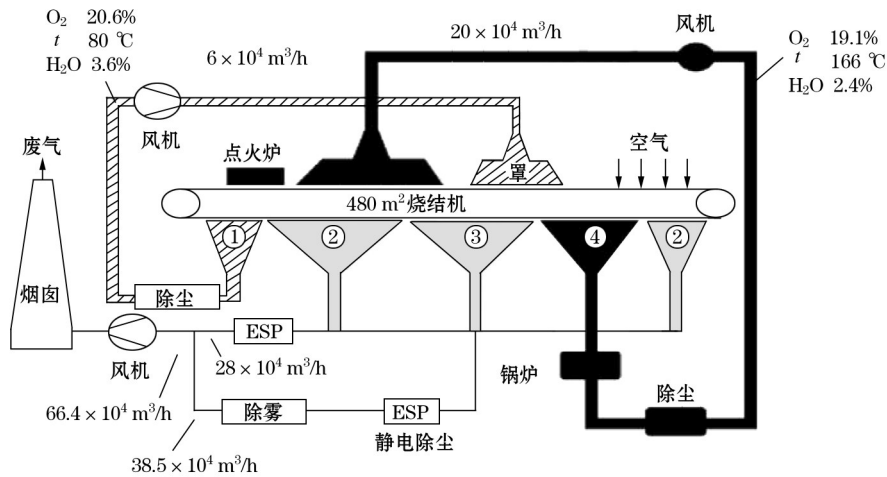


图 5 日本新日铁 480 m²烧结烟气分段式循环再利用工艺

Fig. 5 Sectional recycle technique of sintering waste gas of a 480 m² sintering machine at Nippon Steel

图 5 中,①区对应 1 号~3 号风箱,烟气中氧的体积分数为 20.6%,水分为 3.6%,循环到烧结机台面的中部加以利用;②区对应 4 号~13 号和 32 号风箱,烟气中氧含量低、水分高、SO₂ 浓度低、粉尘浓度大,不具备再使用的条件,经除尘后直接排入大气;③区对应 14 号~25 号风箱,也不具备再使用的条件,经过除尘、脱硫和除雾后排入大气;④区对应 26 号~31 号风箱,废气中氧体积分数为 19.1%,温度为 166 °C,水分为 2.4%,循环到烧结机点火炉的后部台面再利用。

烧结机烟气分段循环再利用工艺与传统烧结工艺的比较见表 6。尽管烧结烟气的循环率不到 1/3,但是减少污染物排放量的效果却十分明显,其中削减烟粉尘排放量 56.5%,削减 SO₂ 排放 62.5%,节约烧结工序燃料消耗 5.5%。此外,烧结烟气选择性循环再利用工艺在日本的其他烧结厂,在德国、荷兰、奥地利和中国台湾的一些烧结厂也都有成功应用的案例,均取得了削减废气排放 50% 左右的显著效果。

表 6 烧结废气分段循环利用与传统烧结工艺的比较

Table 6 Comparison of sectional recycle technique of sintering waste gas and traditional sintering technique			
废气组成		传统烧结工艺	废气分段循环工艺
废气小时流量		925 000 m ³ /h	665 000 m ³ /h
粉尘	排放浓度	50 mg/m ³	30 mg/m ³ ①
	排放量	46 kg/h	20 kg/h
SO ₂	排放浓度	26 mg/m ³	14 mg/m ³ ②
	排放量	24 kg/h	9 kg/h
NO _x	排放浓度	408 mg/m ³	550 mg/m ³
	排放量	377 kg/h	366 kg/h
工序能耗		56.8 kg/t	53.7 kg/t

①包含改善静电除尘装置的减排效果;②包含部分废气脱硫的减排效果。

2013 年以来,中国多家钢铁企业相继采用烧结烟气循环技术,首先在宝钢宁波钢铁公司 450 m²烧

结机上顺利投运,填补了国内大型烧结机烟气循环利用的空白^[18]。到目前为止,烧结烟气循环技术先

后在宝钢、首钢、沙钢、永钢以及信阳钢铁和张家港联丰钢铁等十余台烧结机上得以应用^[19-20],降低工序能耗5%,减少废气排放20%~30%,减少脱硫装置投资及运行成本20%~30%。

4.2.2 烧结矿竖式冷却换热新工艺的减排效果

20世纪70年代末,日本为了快速冷却烧结矿而设计的环冷机,始终存在风量大、料层薄、漏风和粉尘排放严重等问题,1台415 m²环冷机(烧结机360 m²)需要配置功率710 kW、小时风量484 000 m³/h的鼓风机5台,折合每吨烧结矿的空气消耗量多达4 000 m³/t。2009年,为了实现既要冷却烧结矿又要高效回收烧结矿显热的双重目的,笔者基于物质流与能量流协同优化的理念,提出了烧结矿竖式冷却换热新工艺^[21-22]。新工艺改环形卧式结构为立式装置(罐炉、窑),以气固逆流式换热取代错流式换热,彻底地解决了传统工艺冷却风量大、漏风率高、换热效率低、烟粉尘排放严重等技术难题,具有快速冷却、热回收高效、空气消耗最少、废气和粉尘排放最少等多重优越性。2016年,“烧结矿竖冷窑冷却及显热高效回收发电工艺及装备”由天津天丰钢铁股份有限公司建成并投产运行。图6所示为烧结矿竖式冷却换热装置的结构简图,由进料口、气固换热带、风帽、卸料斗和排料口等几部分组成。

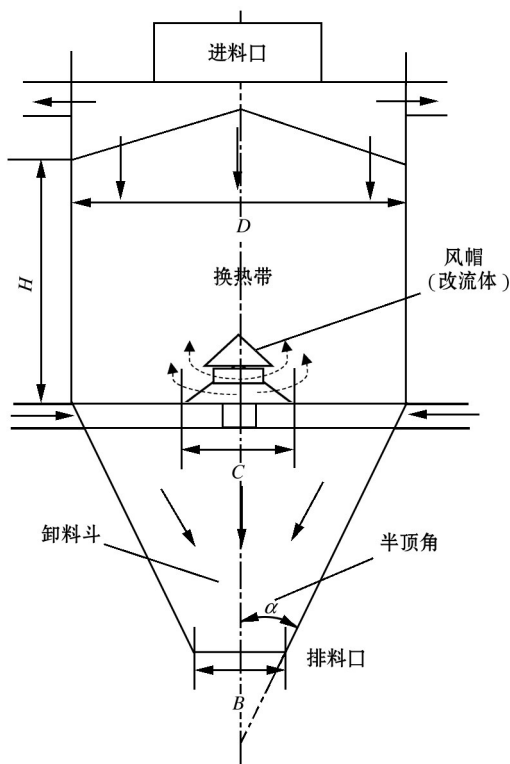
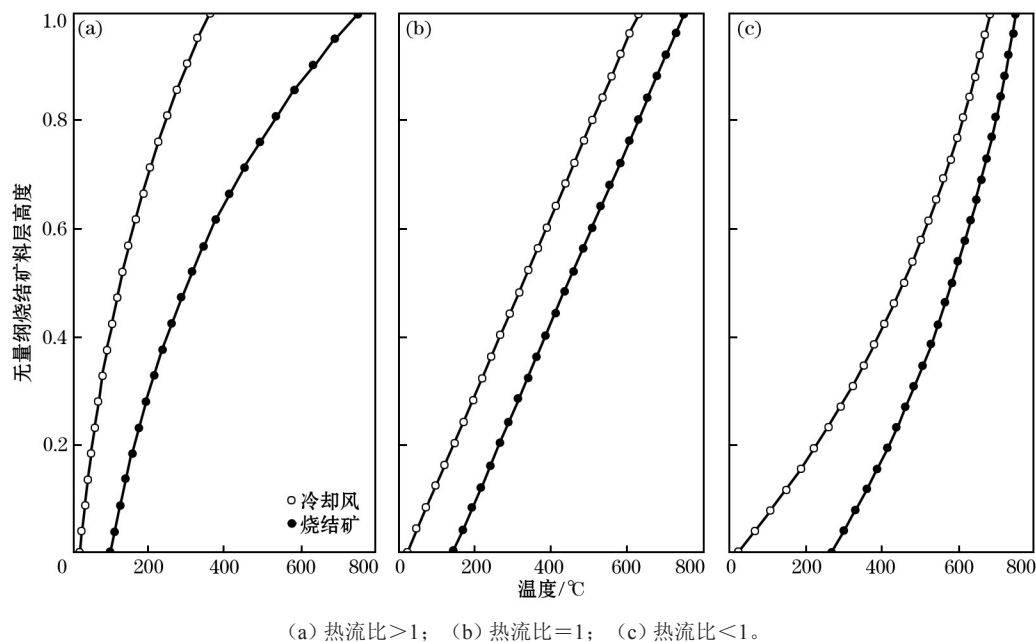


图6 烧结矿竖式冷却换热装置结构简图

Fig. 6 Schematic diagram of shaft cooling device for sintered ores

烧结矿保持“整体流”流动是实现气固高效冷却换热的充要条件,一旦流动不均匀,装置内就会出现“漏斗流”或“管状流”。烧结矿能否实现“整体流”完全取决于装置结构、砌筑壁面性质和烧结矿的粒度组成等。其中,风帽(改流体)和排料口的结构尺寸及布置至关重要。风帽的结构尺寸过小,在装置中部容易形成“管道流”;尺寸过大又有可能阻碍烧结矿流动,在装置中部出现停滞区。冷却风与烧结矿的热流比是影响温度效率、热效率和沿料层高度方向气固温度曲线走向的基本因素。当冷却风的热流量大于烧结矿的热流量时,两条温度曲线向左弯曲(图7(a)),冷却风量越大,获取的热量越多(烧结矿冷却得越快,出口温度越低),但出口的热风温度会越来越低;当冷却风的热流量小于烧结矿时,两条温度曲线向右弯曲(图7(c)),冷却风量越小,其出口的风温越高(烧结矿冷却得越慢,出口温度越高),但获取的热量会越来越少。均匀烧结矿料层内气固换热模型的解析结果表明^[23],随着图7(a)和(c)沿着热流量比等于1的方向逐渐靠近时,两者的差异会越来越小,直到冷却风与烧结矿的热流比相等(风矿比达到最佳值),两幅图的温度曲线便变成了一幅平行线(图7(b))。在整个烧结矿料层内,烧结矿与冷却风的温度差不随空间位置变化,“温差场”等于常量^[24]。这表明,烧结矿每降低1℃放出的热量恰好等于冷却风升高1℃需要的热量;物质流(即烧结矿的冷却)与能量流(即冷却风的加热)彼此协同、相得益彰,气固换热过程的焓损失最小,焓效率达到最大值。在实际生产中,受烧结矿流动和孔隙率等不均匀程度的影响,竖式冷却换热新工艺的冷却风用量会偏离最佳值,一般为1 000 m³/t,只是传统工艺空气消耗量的1/4,如果经余热锅炉使用以后还能循环利用,也可实现废气的“近零”排放。新旧两种工艺的技术经济指标对比见表7。新工艺的生产流程紧凑、装置结构简单、密闭负压操作,比传统工艺减少空气消耗、废气和粉尘排放均为75%左右。应该说,烧结矿竖式冷却换热装置还有许多问题需要研究,但从现有的工业应用来看^[25],其减少废气排放、高效回收余热和改善大气环境的优势是明显的。随着粉体力学的不断发展和烧结矿流动特性的日趋完善,关于烧结矿散料层内气固流动不均匀问题一定会得到有效解决。



(a) 热流比>1； (b) 热流比=1； (c) 热流比<1。

图 7 气固热流比对烧结矿冷却换热减排效果的影响

Fig. 7 Effect of gas-solid ratio on emission of sinter ores cooling process

表 7 烧结矿竖式冷却换热新工艺与传统环冷机的比较

Table 7 Comparison of sinter ores shaft cooler and annular collar

指标	卧式传统环冷机		竖式冷却换热新工艺	
	烧结矿	冷却风	烧结矿	冷却风
每吨矿的空气消耗量/(m ³ ·t ⁻¹)	4 000		≤1 000	
每吨矿的废气产生量/(m ³ ·t ⁻¹)	4 000		≤1 000	
气固换热行程/m	120	1.2	4~6	4~6
气固换热时间/min	120	1.2	120~150	120~150
入口温度/℃	550~750	20	550~750	20
出口温度/℃	≤150	100~350	≤150	400~550
每吨烧结矿的发电量/(kW·h·t ⁻¹)	15~20		25~40	

4.3 完善末端治理

依照更全面、更严格的环保要求,中国一些钢铁企业对所属废气源的排放流量和排放浓度的检测及控制还不齐全,有关废气中的污染物排放总量还没达到“可测量、可报告、可核查”的程度,需要进一步配备和尽快完善起来。各级主管部门制定污染物浓度的排放标准也应依据污染物排放总量的多少和所在地区的环境容量来确定,实行“严格但有区别”的环境监管标准。

由于污染物排放量等于“废气排放量”乘其“排放浓度”,所以当“排放浓度”达到超低乃至超净排放时,“废气排放量”便成为影响污染物排放量大小的决定性因素。在中国,尽管“污染物排放总量”已作为钢铁工业环保工作的约束性指标,但是人们还

是习惯地用排放浓度指标的高低来考核污染物排放量的多少和末端治理技术的水平,甚至误认为减少废气排放量不属于末端治理的技术范畴。这种忽视废气排放量对大气环境的影响,一味追求严格排放标准的环保思路,是片面的和不切实际的。例如,欧盟的国土面积有400多万平方公里,每年生产近2亿吨钢,而中国的河北省在近20万平方公里的国土面积上也生产2亿多吨钢。按单位国土面积的钢产量核算,河北省便是欧盟的20多倍。也就是说,即便河北省实行比欧盟提高1倍的超低超净排放标准,在单位国土面积上一个河北省排放出来的污染物总量仍然是整个欧盟的10倍之多。显然,钢铁工业实施蓝天工程,务必在减少废气排放量和降低污染物排放浓度两方面不断完善末端治理技

术。尤其是将废气循环再利用技术与其多种污染物协同净化技术相结合^[26-27],两者相辅相成是末端治理技术的发展方向。例如,优化钢铁生产流程,适时发展全废钢电炉,以电炉短流程替代高炉长流程可降低吨钢废气排放量近4/5;实施废气循环再利用可削减烧结废气及其污染物排放1/2以上;烧结矿竖式冷却换热新工艺可减少废气生成量3/4之多。如此“事半功倍”的减排措施和效果,是任何现有末端治理技术所不能及的。没有资源节约型企业,就没有环境友好型钢厂。过分依赖严格排放标准的后果,不仅会影响企业在严格、公平的监管环境下积极主动地开展节能减排的积极性,而且也会误导环境监管部门盲目出台违反客观规律的行政指令或标准。

5 结论

(1) 在冶金资源消耗结构(矿物、能源、水和空气)中,空气资源的消耗量最多,吨钢消耗空气33 500 m³/t,折合质量为43.2 t/t(钢),占全部资源消耗总量的85.2%;在废物排放结构(固体废物、废水和废气)中,废气的排放量最多,吨钢排放废气34 650 m³/t,折合质量为44.7 t/t(钢),占废物排放总量的88.2%。钢铁工业不仅要节矿、节能,还要节水,更要节气。

(2) 生产流程是影响吨钢空气消耗量和废气排放量的关键因素,优化工艺流程,适时发展全废钢电炉,电炉短流程的吨钢空气消耗量约为高炉长流程的1/5,可削减吨钢废气排放量近80%。

(3) 废气循环再利用,如同废钢、余热和废水的循环再利用一样,是大幅度减少空气消耗量和废气产生量,进而减少颗粒物、SO₂、NO_x排放量及其末端治理装置投资和运行费用的有效途径,是未来钢铁企业节能降耗减排的重要出路和潜力所在。

(4) 空气并不是理想的助燃剂,钢铁联合企业应尽可能使用氧气取代空气实施富氧燃烧乃至纯氧燃烧。保持烧结矿“整体流”流动是实现烧结矿竖式冷却协同换热的前提条件,取决于竖冷装置、改流体和排料口的结构设计、烧结矿散料的粉体力学性质及其颗粒物的几何特征等。

本文在撰写过程中,得到殷瑞钰院士、李文秀、温燕明、王天义等专家学者的支持和指正,特此感谢。

参考文献:

- [1] 陆钟武,蔡九菊,杜涛,等.论钢铁行业能耗、物耗、排放的宏观调控[J].中国工程科学,2015,17(5):126. (LU Zhong-wu, CAI Jiu-ju, DU Tao, et al. The macro-control on energy consumption, material consumption and waste emission of steel industry[J]. Engineering Sciences, 2015, 17(5): 126.)
- [2] 陶光远.治霾,中国须制定全球最严格标准[EB/OL].财新网, <http://opinion.caixin.com/2017-01-22/101047867.html>. (TAO Guang-yuan. Haze Treatment: China Should Execute the Strictest Standard[EB/OL]. Caixin, <http://opinion.caixin.com/2017-01-22/101047867.html>.)
- [3] 陶在朴.生态包袱与生态足迹[M].北京:经济科学出版社,2003. (TAO Zai-pu. Ecological Rucksacks and Footprint[M]. Beijing: Economical Science Press, 2003.)
- [4] YIN Rui-yu. Theory and Methods of Metallurgical Process Integration[M]. San Diego: Elsevier Inc, 2016.
- [5] LI Xiao-ling, SUN Wen-qiang, ZHAO Liang, et al. Material metabolism and environmental emissions of BF-BOF and EAF steel production routes[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2018, 39(1): 50.
- [6] 蔡九菊.节能潜力寓于不平衡之中[N].中国冶金报,2012-06-26. (CAI Jiu-ju. Energy conservation potential lies in the unbalance[N]. China Metallurgical News, 2012-06-26)
- [7] 王永忠,宋七棣.电炉炼钢除尘[M].北京:冶金工业出版社,2003. (WANG Yong-zhong, SONG Qi-di. Dedusting of Electrical Arc Furnace Steelmaking[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.)
- [8] 陆钟武.工业生态学基础[M].北京:科学出版社,2010. (LU Zhong-wu. Foundations of Industrial Ecology[M]. Beijing: Science Press, 2010.)
- [9] 陆钟武,蔡九菊.系统节能基础[M].2版.沈阳:东北大学出版社,2010. (LU Zhong-wu, CAI Jiu-ju. Foundations of Systems Energy Conservation[M]. 2nd ed. Shenyang: Northeastern University Press, 2010.)
- [10] 蔡九菊,孙文强.中国钢铁工业的系统节能和科学用能[J].钢铁,2012,47(5):1. (CAI Jiu-ju, SUN Wen-qiang. Systems energy conservation and scientific energy utilization of iron and steel industry in China[J]. Iron and Steel, 2012, 47(5): 1.)
- [11] SUN Wen-qiang, WANG Yan-hui, ZHANG Feng-yuan, et al. Dynamic allocation of surplus byproduct gas in steel plant by dynamic programming with reduced state space algorithm[J]. Engineering Optimization, 2018, 50(9): 1578.
- [12] SUN Wen-qiang, YUE Xiao-yu, WANG Yan-hui, et al. Energy and exergy recovery from exhaust hot water using ORC (organic Rankine cycle) and a retrofitted configuration[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(6): 1464.
- [13] 陆钟武.火焰炉[M].北京:冶金工业出版社,1995. (LU Zhong-wu. Flame Furnace[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995.)
- [14] Deusch C. Group Overall Energy Bill[D]. Luxembourg: Arce-lormittal University, 2016.
- [15] Adolff J B, Ekman T, Von Schéele J, et al. Scale formation and

- surface quality of carbon steel at oxyfuel heating[C]// 9th International Steel Rolling Conference and 4th European Steel Rolling Conference. Paris: The French Steel Technical Association, 2006.
- [16] 李杨. 钢铁企业提升能源效率的分析与对策[J]. 工程研究, 2017, 9(1): 6. (LI Yang. Energy efficiency analysis and promotion countermeasure in iron and steel enterprises[J]. Journal of Engineering Studies, 2017, 9(1): 6.)
- [17] Werz H J, Otto J, Rengersem J. Pollution control at iron ore sintering plants through vaster gas recycling[J]. Stahl und Eisen, 1995, 115(11): 37.
- [18] 刘文全. 烧结烟气循环技术创新与应用[J]. 山东冶金, 2014, 36(3): 5. (LIU Wen-quan. Innovation and application of sintering waste gas recycle technology[J]. Shandong Metallurgy, 2014, 36(3): 5.)
- [19] 苏步新, 张标, 邵久刚. 我国烧结烟气循环技术应用现状及分析[J]. 冶金设备, 2016, 26(6): 55. (SU Bu-xin, ZHANG Biao, SHAO Jiu-gang. Analysis of domestic sintering flue gas technology and its application[J]. Metallurgical Equipment, 2016, 26(6): 55.)
- [20] 张志刚, 郑绥旭, 丁志伟. 烧结烟气循环技术工业化应用概述[J]. 中国冶金, 2016, 26(7): 54. (ZHANG Zhi-gang, ZHENG Sui-xu, DING Zhi-wei. Overview of industrial application of sintering flue gas recirculation technology[J]. China Metallurgy, 2016, 26(7): 54.)
- [21] 蔡九菊, 董辉. 烧结过程余热资源的竖罐式回收与利用方法及其装置: 中国, ZL200910187381.8[P]. 2011-01-05. (CAI Jiu-ju, DONG Hui. Vertical Recovery and Reuse Method for Recycling Waste Heat Resources from Sintering Process: China, ZL200910187381.8[P]. 2011-01-05.)
- [22] 蔡九菊, 董辉, 杜涛, 等. 烧结过程余热资源分级回收与梯级利用研究[J]. 钢铁, 2011, 46(4): 88. (CAI Jiu-ju, DONG Hui, DU Tao, et al. Study on grade recovery and cascade utilization of waste heat from sintering-cooling process[J]. Iron and Steel, 2011, 46(4): 88.)
- [23] 蔡九菊. 钢铁制造流程的节能减排[C]//第九届全国能源与热工学术年会. 西安: 中国金属学会能源与热工分会, 东北大学, 2017. (CAI Jiu-ju. Energy conservation and emission reduction of steel manufacturing process[C]//The 9th National Conference on Energy and Thermal Engineering. Xi'an: Energy and Thermal Engineering Branch of the Chinese Society for Metals, Northeastern University, 2017.)
- [24] 过增元. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. (GUO Zeng-yuan. Field Synergy Principle and New Enhanced Heat Transfer Technology[M]. Beijing: China Electrical Press, 2004)
- [25] 毕传光, 孙俊杰. 竖式冷却回收烧结矿显热工艺在梅钢的应用[J]. 烧结球团, 2018, 43(4): 69. (BI Chuan-guang, SUN Jun-jie. Application of process to recycle sensible heat of sinter using vertical cooling furnace in Meisteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4): 69.)
- [26] 贾秀凤, 喻波. 宁钢烧结烟气循环系统的节能减排效果[J]. 烧结球团, 2015, 40(4): 51. (JIA Xiu-feng, YU Bo. Energy saving and emission reduction effect of Ningsteel sintering flue gas recirculation system[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(4): 51.)
- [27] 胡长庆, 师学峰, 张玉柱, 等. 烧结余热回收发电关键技术[J]. 钢铁, 2011, 46(1): 86. (HU Chang-qing, SHI Xue-feng, ZHANG Yu-zhu, et al. Key technologies of sintering residual heat recovery for power generation[J]. Iron and Steel, 2011, 46(1): 86.)