



邢奕, 教授, 博士生导师, 北京科技大学能源与环境工程学院院长, 从事环境科学与工程领域的科研与成果推广工作, 主要研究方向为钢铁行业超低排放、碳中和及固废资源化。目前已发表学术论文 200 余篇, 3 篇入选 ESI 高被引论文; 编写与参编教材 4 部, 专著 2 部, 其中《环境工程微生物学》入选“十二五”国家级规划教材, 并荣获北京市精品教材; 获授权发明专利 35 项。主持国家重点研发计划 1 项、国家自然科学基金项目 5 项、北京市科技计划项目 7 项, 其他省部级纵向项目 14 项。先后荣获中国科协求是杰出青年成果转化奖、茅以升科学技术奖-北京青年科技奖、北京青年五四奖章、中国金属学会冶金青年科技奖、南京大学紫金全兴环境基金青年学者奖等奖项。邢奕教授带队研发的“钢铁烟气超低排放多功能耦合关键技术”入选中国科协“科创中国”先导技术榜单, 相关科研成果获省部级科研奖励 10 项, 包括环境保护科学技术奖一等奖, 环境技术进步奖一等奖, 北京市科学技术奖(科技进步奖)一等奖, 中国钢铁工业协会/中国金属学会冶金科学技术奖一等奖等。



移动扫码阅读

邢奕, 耿孟达, 叶凯航, 等. 钢铁企业高能效低碳发展分析[J]. 能源环境保护, 2023, 37(1): 102-114.
XING Yi, GENG Mengda, YE Kaihang, et al. Analysis on the development of high energy efficiency and low carbon in iron and steel enterprises[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(1): 102-114.

钢铁企业高能效低碳发展分析

邢奕, 耿孟达, 叶凯航, 苏福永*, 李存旺, 夏德宏, 岳涛, 苏伟

(北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 钢铁企业的低碳转型, 对我国钢铁企业高能效低碳发展、实现我国“双碳”目标起着至关重要的作用。本文分析了我国钢铁企业在能源方面的利用现状和余热资源的主要分布情况以及余热资源的主要利用方式。在能源消耗方面, 虽然中国重点钢铁企业吨钢综合能耗在逐年下降, 但是由于大部分钢铁企业节能技术较为传统, 导致近年来吨钢能耗下降幅度逐渐减小, 已经呈现出几乎不变的趋势, 在节能技术方面进行改革创新已势在必行。同时, 各个钢铁企业技术发展水平不一, 导致吨钢能耗最小值与最大值之间相差巨大。在钢铁企业余热资源利用方面, 情况依旧不容乐观, 虽然炼钢、热轧工序中余热资源利用程度在 40%~50% 之间, 但是焦化、烧结、炼铁工序中余热资源利用程度不足 20%, 尤其在炼铁工序中, 余热资源利用程度仅仅达到 10% 左右。因此, 进行余热回收技术的创新, 对钢铁企业降低能耗, 提高余热资源利用程度至关重要。最后, 本文讨论了新能源(例如生物质能、绿电等)对传统能源的替代作用, 使用新能源有助于降低钢铁企业的能耗, 从而早日达成“双碳”目标。

关键词: 能效; 低碳; 节能; 余热利用; 钢铁企业

中图分类号: X32; X706

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2023)0102-13

Analysis on the development of high energy efficiency and low carbon in iron and steel enterprises

XING Yi, GENG Mengda, YE Kaihang, SU Fuyong*, LI Cunwang, XIA Dehong, YUE Tao, SU Wei
(School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Low-carbon transition of iron and steel enterprises plays an important role in the efficient and low-carbon development of Chinese iron and steel enterprises and the realization of "double carbon" goal. This paper presents the present situation of energy utilization in Chinese iron and steel enterprises, the main distribution and main utilization of waste heat resources. In terms of energy con-

收稿日期: 2022-11-29; 责任编辑: 金丽丽

DOI: 10.20078/j.eep.20230117

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22373805D)

作者简介: 邢奕(1976—), 男, 山西太原人, 教授, 主要从事钢铁企业节能减排方向研究。E-mail: xingyi@ustb.edu.cn

通讯作者: 苏福永(1982—), 男, 天津蓟县人, 教授, 主要从事能源管理及余热利用方向研究。E-mail: sfyong@ustb.edu.cn

sumption, the comprehensive energy consumption per ton of steel in China's key iron and steel enterprises has been declining year by year, due to the traditional energy-saving technology in most iron and steel enterprises. However, the decrease rate of energy consumption per ton of steel has gradually decreased in recent years, which has shown an almost constant trend. It is imperative to carry out innovation and reform in energy-saving technology. At the same time, the technical development level of each steel enterprise is different, resulting in a huge difference between the minimum and maximum energy consumption per ton of steel. Moreover, the situation is still not optimistic in the utilization of waste heat resources in iron and steel enterprises. Although the utilization degree of waste heat resources in steel making and hot rolling processes is between 40% and 50%, the utilization degree of waste heat resources in coking, sintering and iron making processes is less than 20%. In the iron making process, the utilization degree of waste heat resources only reaches about 10%. Therefore, the innovation of waste heat recovery technology is very important for iron and steel enterprises to reduce energy consumption and improve the utilization of waste heat resources. Finally, this paper discusses the alternative role of new energy, such as biomass energy, green electricity, etc. to traditional energy. The use of new energy can help reduce the energy consumption of iron and steel enterprises, so as to achieve the "double carbon" goal as soon as possible.

Keywords: Energy efficiency; Low carbon; Energy conservation; Waste heat utilization; Iron and steel enterprises

0 引言

2020年9月22日,习近平主席在第75届联合国大会上发表重要讲话,承诺二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,并且努力争取2060年前实现碳中和^[1]。钢铁行业是中国典型的高能耗、高碳排放部门,在整个钢铁工艺流程中能耗大约占到全国总能耗的16%,但是在整个钢铁生产过程中仅有30%~50%的能量得到有效利用。同时钢铁企业的二氧化碳排放量仅次于电力行业^[2],占到全国碳排放总量的16%。由此可见,钢铁行业的低碳、绿色转型对于我国实现“双碳”目标至关重要。但从现阶段钢铁企业能耗、余热资源利用以及碳排放状况来看,达到这一目标并非轻而易举,仍然面临着巨大的挑战。

在国际著名钢铁企业的碳排放方面^[3],安赛乐米塔尔公司从2010年以来长流程吨钢CO₂排放维持在2.3~2.4 t,短流程吨钢CO₂排放维持在0.5~0.7 t。新日铁作为日本主要的碳排放企业之一,2019年吨钢CO₂排放为2.06 t,全年总的碳排放量为9 400万t。韩国最大钢铁公司浦项钢铁,2019年碳排放量为8 020万t,2020年为7 560万t,虽然总排放量略有下降,但是吨钢CO₂排放强度并没有明显降低,基本维持在2.1 t左右。1991—2020年我国钢铁行业吨钢CO₂排放量由1991年

的3.91 t降低到2020年的1.60 t,下降幅度为59%,与新日铁和浦项公司2019年吨钢碳排放量相比分别低了0.46 t和0.5 t,从一定程度说明我国在节能减排方面取得了显著效果。有研究^[4]指出,中国粗钢产量从2000年的1.29亿t增长到了2020年的10.6亿t,增长了大约7.3倍;而中国钢铁行业每年CO₂的排放量从2000年的4.92亿t增长到了2019年的22.27亿t,增长了大约3.5倍,从数据可以看出钢铁行业碳排放量与粗钢产量是直接相关的,粗钢产量越大,碳排放量也就越大。而粗钢产量的大幅度上升也就意味着钢铁企业的能耗也会大幅度上升,从而增加了碳排放量。

在能源利用方面,中国整个钢铁制造工艺流程有效利用的能量只占了总能耗的30%~50%,剩余的能量则以余热形式存在。全国各大钢铁企业技术水平不一,能耗情况相差较大。根据2018年中国钢协会员能耗对比情况可知,烧结工序吨钢能耗最小值为40.62 kgce/t,最高值为60.95 kgce/t,相差了20.33 kgce/t;焦化工序吨钢能耗最小值为74.76 kgce/t,最高值为152.43 kgce/t,相差了77.67 kgce/t;轧钢工序吨钢能耗最小值为27.05 kgce/t,最高值为141.52 kgce/t,但是相差最大的还是电炉工序,吨钢能耗最小值为25.35 kgce/t,最大值竟然达到了1 447 kgce/t,中间相差了1 421.65 kgce/t。当然,不同钢铁企业由于其产品

种类不同,对其能耗水平有一定的影响,但如果全国钢铁企业各个工序都可以革新技术,互相学习,使得吨钢能耗值接近先进值,那么将极大程度减少能源消耗和碳排放量。

从以上分析数据可以看出,高碳排放量与钢铁企业能源消耗紧密相关,为实现钢铁企业高效能低碳发展,达成“双碳”目标,就需要钢铁企业在现阶段加大节能减排力度、提高二次能源利用率,同时还需要技术创新。提高二次能源即提高余热资源的利用,例如在炼铁过程

中余热资源利用率仅为 10%,浪费了极大部分的余热资源。技术创新即用新能源取代传统能源,比如深入研生物质能,提高生物质能在能源消耗中的比重。

1 钢铁企业生产工序及主要能源消耗状况

1.1 生产工序简介

钢铁企业生产工序一般包括焦化、球团、烧结、高炉炼铁、转炉炼钢、电炉炼钢、连铸、热轧、冷轧等^[5],完整的钢铁企业生产工序如图 1 所示。

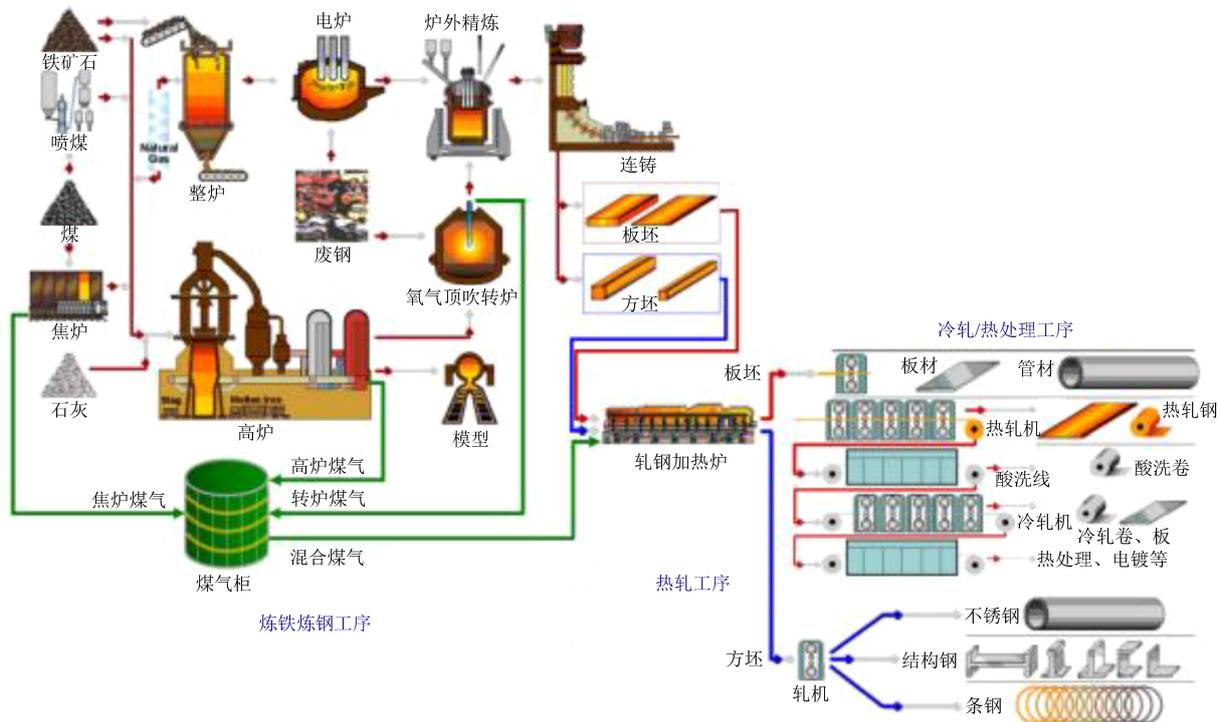


图 1 钢铁企业生产流程

Fig. 1 Iron and steel production process

由图 1 可以看出,钢铁企业主要工序流程为:焦化→烧结→炼铁→炼钢→热轧→冷轧→钢铁产品,其中焦炉焦化、高炉炼铁、转炉炼钢等工序产生的焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气会储存在煤气柜中作为轧钢加热炉、热处理炉、石灰窑等设备的主要燃料。在整个工序流程中,能源消耗工序主要有炼焦、烧结、炼钢、炼铁、轧制等,各工序具体作用如下:

(1) 炼焦:炼焦指在无空气条件下加热到 1 000 ℃,通过热分解和结焦产生焦炉煤气、焦炭以及其它化学产品的钢铁工艺流程^[6]。作为高炉炼铁的重要燃料和还原剂,冶金焦炭不仅碳含量高、孔隙率高、强度大(特别是高温强度),而且还是整个高炉料柱的支撑剂和疏松剂。同时,炼

焦过程中的焦炉煤气热值高,可以作为加热炉等的气体燃料,属于钢铁企业的重要能源组成部分。

(2) 烧结:烧结是指将各种粉末状含铁原料,在其中配入适量的燃料和熔剂,加入适量的水,经混合和造球后在烧结设备上使物料发生一系列物理化学变化,烧结成块的过程,烧结矿主要用于进行高炉炼铁。

(3) 炼铁:将金属铁从含铁矿物(主要为铁的氧化物)中提炼出来的工艺过程^[7],方法主要有等离子法、直接还原法、高炉法、熔融还原法等,实际生产中,纯粹的铁不存在,得到的一般为铁合金。

(4) 炼钢:炼钢主要指控制碳元素含量(一般小于 2%),消除磷、硫、氧、氮等有害元素,保留或

增加硅、锰、镍、铬等有益元素并调整元素之间的比例,获得最佳性能^[8]。将炼钢用的生铁放到炼钢炉内按一定工艺熔炼,即可以得到钢。钢的产品有钢锭、连铸坯或者直接铸成各种钢铸件。

(5) 轧制:在旋转的轧辊间改变钢锭、钢坯形状的压力加工过程叫做轧钢。轧钢的目的主要有:1) 得到需要的形状;2) 改善钢的内部质量。

1.2 钢铁工序能耗现状

钢铁企业能耗一般用总能耗和吨钢能耗进行表述,总能耗指钢铁企业所有工序消耗的所有能耗之和,吨钢能耗是指钢铁企业每生产 1 t 产品所消耗的能源总和^[9-10],计算方法如下:

表 1 重点钢铁企业各主要生产工序能耗情况

| Table 1 Energy consumption of major production processes in key iron and steel enterprises | | | | | | | | kgce/t |
|--|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 年份 | 吨钢综合能耗 | 烧结 | 球团 | 炼焦 | 炼铁 | 转炉 | 电炉 | 轧钢 |
| 2013 | 593.10 | 49.76 | 28.58 | 100.31 | 399.88 | -7.81 | 62.38 | 60.32 |
| 2014 | 588.13 | 49.48 | 27.12 | 97.50 | 388.70 | -8.73 | 60.06 | 63.30 |
| 2015 | 574.11 | 48.66 | 26.70 | 96.67 | 385.00 | -12.25 | 60.38 | 63.70 |
| 2016 | 585.66 | 48.39 | 26.80 | 96.88 | 391.52 | -13.20 | 52.65 | 56.08 |
| 2017 | 567.35 | 48.44 | 25.43 | 100.40 | 392.92 | -14.23 | 55.33 | 54.79 |
| 2018 | 555.24 | 48.60 | 25.36 | 104.88 | 392.13 | -13.99 | 55.70 | 54.32 |
| 2019 | 551.78 | 48.34 | 23.92 | 104.63 | 387.97 | -14.01 | 56.10 | 54.26 |
| 2020 | 549.22 | 48.33 | 24.48 | 102.80 | 387.46 | -14.74 | 53.06 | 52.52 |

表 1 所示工序能耗可以反映出重点钢铁企业单一生产工序的能耗水平,由表 1 可以看出,除了炼焦工序以外,其它工序吨钢综合能耗都出现了不同程度的下降,在整体水平上吨钢综合能耗数值从 2013 年的 593.10 kgce/t 下降到 2020 年的 549.22 kgce/t,下降幅度达到 7.4%。2019—2020 年间,烧结、炼铁、炼焦等工序吨钢综合能耗变化

$$\varphi = \sum \frac{Q_i}{P} \quad (1)$$

式中: Q_i ——各种能源消耗总量,kg;

P ——粗钢产量,t。

运用吨钢综合能耗指标不仅可以反映出能源消耗情况,还可以反映出钢铁的产量,所以吨钢综合能耗可以作为衡量钢铁企业能源消耗的重要指标。

近些年来我国钢铁能耗增幅低于我国钢铁产量,说明我国钢铁工业节能不断取得新进展^[11],行业吨钢综合能耗、部分工序能耗逐步下降,详细情况见表 1^[12]。

很小,其它工序吨钢综合能耗值虽然有波动,但也不是很大,说明传统的钢铁工业节能技术已不能满足未来节能、低碳、绿色的发展要求,这就需要钢铁企业积极探索新的节能技术,引入新的能源。为了更进一步了解中国钢铁工业能耗状况的变化情况,某研究^[13]统计记录了中国重点钢铁企业 1980—2020 年之间的吨钢综合能耗情况见图 2。

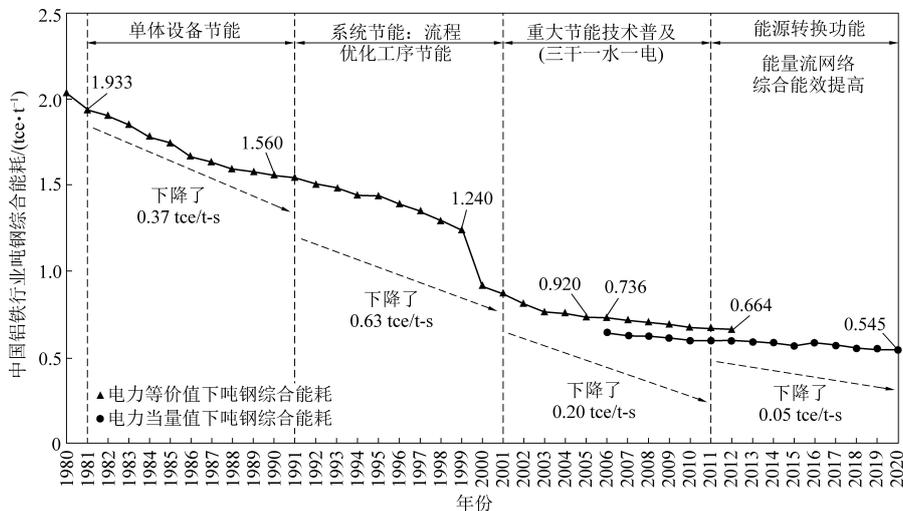


图 2 中国钢铁工业吨钢能耗变化

Fig. 2 Changes in energy consumption per ton of steel in China's steel industry

由图2可以看,中国吨钢综合能耗(以标准煤计)从1981年的1.933 t/t下降至2020年的0.545 t/t,虽然整体降低幅度较大,但是从2012—2020年间,吨钢综合能耗仅仅只降低了0.1 t/t,降低幅度呈现明显下降的趋势。说明从传统钢铁节能技术进行钢铁企业的节能,其效果在逐渐降低,带来的节能效果也在逐渐减小。中国钢铁工业总吨钢能耗、单个工序吨钢综合能耗降低幅度的减小,说明在未来某一天传统的钢铁节能技术将不会在满足“双碳”背景下提出的节能减排目标,要求各个钢铁企业需要积极探寻新的高效节能技术,寻求新能源,例如绿电、生物质能等,替代天然气、煤炭等传统燃料,保证钢铁企业更好的节能效果。

除工序吨钢综合能耗以外,为了解每个工序内的设备吨钢综合能耗的现状水平,笔者还统计了国内某先进钢铁厂各工序设备的吨钢综合能耗值,并与企业内的先进标杆值进行了对比分析,该钢铁厂各工序吨钢综合能耗见表2。

由表2可以看出,该钢厂各工序设备吨钢综合能耗距离行业标杆值还有一定的差距,这也从侧面显示出我国钢铁企业之间技术发展不平衡,能耗水平还有一定差距。2020年中国钢协会员单位能耗情况对比表(见表3)更是直接说明了钢铁企业之间发展不平衡的问题。

表3 2020年中国钢协会员单位能耗情况对比

| | 吨钢综合能耗 | 烧结 | 球团 | 焦化 | 高炉 | 电炉 | 转炉 | 轧钢 |
|------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2020 | 545.27 | 48.08 | 24.35 | 102.38 | 385.17 | 55.92 | -15.36 | 54.75 |
| 最低值 | / | 37.69 | 15.49 | 75.54 | 322.24 | 12.04 | -33.78 | 29.13 |
| 最高值 | / | 58.0 | 33.52 | 153.51 | 429.50 | 108.91 | 10.09 | 108.86 |

由表4可知,每个工序都会有余热资源产生,其中有高热值余热、高温余热、低温余热以及中低温余热。虽然,余热资源较为丰富,但有些资源仍然无法有效回收,即使可以回收,其回收效率也不是很高。某研究^[17]中简略计算了余热余能资源量、回收量及利用程度(见表5),可以进一步了解每个工序余热资源量的具体详细情况。

从表5的数据可以看出,烧结、炼铁、炼钢3部分的总余热资源量大约占到了整个钢铁企业余热资源量的78%,其中炼铁工序占比最多为41.4%,吨钢能耗为108.1 kgce/t。而在我国重点钢铁企业中,炼钢、炼铁、烧结这三部分余热资源总合占到总余热资源的75%~80%,与表5中呈现

表2 2021年某钢铁厂工序设备吨钢能耗

Table 2 Energy consumption per ton of process

equipment in a steel plant in 2021

kgce/t

| 指标名称 | 股份现状 | 标杆值 | 比标杆 |
|-------|---------|------------|-----------|
| 焦炉 | 115.50 | 112.30(宝钢) | +3.20 |
| 热风炉 | 79.60 | 65.00(宝钢) | +14.00 |
| 白灰窑 | 59.80 | / | / |
| 回转窑 | 26.80 | 29.60(邯钢) | -2.80 |
| 套筒窑 | 285.58 | 183.33(文献) | +102.25 |
| 钢包烘烤器 | 1427.50 | 190.47(文献) | +1 237.00 |
| 加热炉 | 37.53 | 33.78(行业) | +3.75 |
| 立式退火炉 | 30.04 | 33.80(宝钢) | -3.76 |

2 钢铁企业主要余热能源分布及评价

众所周知,钢铁企业所有工序的能耗中,仅仅只有30%~50%的能量得到了有效利用,而未被有效利用的能量则以余热的形式存在,数量巨大。进行余热资源回收,对降低钢铁企业能源消耗、钢铁企业成本,提高企业的效益至关重要^[16]。因此,钢铁企业应该密切关注余热资源的分布,提高余热资源的回收效率。

钢铁企业余热资源分布在钢铁全流程的各个工序,不仅余热资源量丰富,而且余热种类较多。表4总结了钢铁企业二次能源的种类与品质分类。

出的数据基本相同。在余热回收方面,轧钢工序与炼钢工序回收的余热量占比分别占各自资源量的43.22%和51.11%,将近占到一半。烧结和烧焦工序余热资源回收可以占到各自资源量的大约17%,余热回收利用情况不是很差,但是炼铁工序中余热资源回收仅仅只占了资源量的10.36%。虽然炼铁中产生的余热资源量很大,但是其回收利用程度仅仅只占了10%左右,所以炼铁工序余热回收潜力巨大,钢铁企业应该提升炼铁工序方面的节能降耗技术,提升炼铁工序余热回收的效率,从而增加企业效益。

通过分析得到了余热能源的主要分布,可以从分析数据中很明显地看出,并不是所有的余热

表 4 二次能源的种类和品质
Table 4 Types and qualities of secondary energy sources

| 工序 | 二次能源种类 | 品质 | 利用现状 |
|------|---------|----------|----------|
| 焦化工序 | 焦炉煤气 | 高热值、显热较高 | 仅回收潜热 |
| | 焦炭显热 | 高温余热 | CDQ 技术 |
| | 废烟气显热 | 低温余热 | 未回收 |
| 烧结工序 | 烧结矿显热 | 高温余热 | 余热蒸汽或发电 |
| | 烧结烟气显热 | 中低温余热 | 热风烧结 |
| 球团工序 | 球团矿显热 | 高温余热 | 未回收 |
| | 竖炉烟气 | 低温余热 | 未回收 |
| 高炉工序 | 高炉煤气 | 热值高、显热较低 | 仅回收潜热 |
| | 高炉炉渣显热 | 高温余热 | 冲渣水采暖 |
| | 热风炉烟气显热 | 中低温余热 | 煤气、空气双预热 |
| 转炉工序 | 转炉煤气 | 高热值、显热较高 | 回收潜热、显热 |
| | 炉渣显热 | 高温余热 | 未回收 |
| 轧钢工序 | 加热炉烟气余热 | 高温余热 | 回收显热 |

资源都可以得到很好的回收利用,即余热资源的利用率、利用效果不尽相同,所以还需要对余热资源进行评价,其评价方式与其可利用的方式有关,余热利用可以分为三种基本形式^[18]:余热的焓利用、焓利用和全利用。余热的焓利用与其温度水平无直接关系,而是与余热回收量的大小有关,余热回收量越大,利用效果越大。根据热力学第一定律确定其利用效果。利用效率计算公式为:

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

其中, T_1 、 T_2 、 T_3 分别为环境温度(可以取零度)、余热利用前温度和余热利用后温度。从式(2)可以看出能量回收程度只和余热资源的温差有关,即400℃/800℃带来的节能效率大小与40℃/80℃相同。然而从热量的品质来看,温度高的热量其

品质质量要高于温度低的热量,这与热量的焓利用有关。

回收余热资源中的高品质可用能,使其转化为可用的动力能源即为余热的焓利用。一般来说,余热资源的温度越高,其品质也就越高,焓利用效率也就越高。钢铁企业中的余热发电便是余热焓利用的典型形式。

余热的全利用不仅包括余热的焓利用,还包括余热的焓利用,是将两种方式结合在一起的一种综合利用方式。属于能量全利用的设备有背压式汽轮发电机组,该设备不仅要提供生产过程中的蒸汽需求,更要用于发电。一般来说,余热资源温度较高时,可采用焓利用或者全利用的方式;温度较低时,可用能较少,做工的本领也较少,一般采用焓利用的方式。

表 5 余热余能资源工序分布及利用情况
Table 5 Process distribution and utilization of waste heat and energy resources

| 工序 | 资源量 | | 回收量 | | 利用程度 |
|----|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-------|
| | 能耗/(kgce·t ⁻¹) | 占比/% | 能耗/(kgce·t ⁻¹) | 占比/% | 占比/% |
| 烧焦 | 28.90 | 11.07 | 5.10 | 8.87 | 17.65 |
| 烧结 | 58.56 | 22.43 | 10.10 | 17.57 | 17.25 |
| 炼铁 | 108.10 | 41.40 | 11.20 | 19.48 | 10.36 |
| 炼钢 | 36.00 | 13.79 | 18.40 | 32.00 | 51.11 |
| 热轧 | 29.50 | 11.30 | 12.75 | 22.17 | 43.22 |

3 钢铁企业主要余热利用方法

从钢铁企业余热资源的主要分布可以看到每一个工序都会有大量的余热资源产生,对余热资

源的回收可以用于热电厂发电、供暖或供冷、加热热水锅炉回水或补水等,不仅可以为钢铁企业带来可观的经济效益^[19],同时也可以从一定程度上减小钢铁企业的能耗,所以对钢铁余热资源进行

回收利用至关重要。钢铁企业余热回收可以分为三个方面,分别是气体余热资源、液体余热资源以及固体余热资源的回收,回收形式丰富多样。因此,在具体的钢铁生产过程中,钢铁需要根据一定的实际情况,采取合理的技术措施确保余热的回收效果^[20]。

3.1 气体余热资源

钢铁企业气体余热资源一般来自于各个工序产生的烟气或者水蒸气排出时携带余热,例如在轧钢工序中,加热炉排放的烟气温度在 600 ~ 750 °C^[21],而且加热炉产生的烟气量巨大,具有一定的余热回收价值。由于不同工序排放的烟气温度不一样,所以对不同烟气的回收方式也不尽相同。

(1) 轧钢加热炉烟气余热回收

轧钢加热炉能耗一般可以占到整个轧钢工序能耗的 60%,存在 75%左右的热量损失^[22],而其中加热炉烟气排放带走的热量占到整个加热炉热量的 30%~50%^[23]。如果对加热炉排放烟气余热进行回收利用,不仅可以降低加热炉能耗,而且还可以提升企业效益^[24]。

八钢^[25]在加热炉烟气余热回收方面积极探索创新,不仅引入空气加热器设备对烟气余热资源进行回收,使得烟气温度降低到 350~450 °C,而且还在在此基础上使用余热锅炉对低品位的余热资源再次进行回收,使得轧钢加热炉烟气最终排放温度降低到 140 °C 左右。空气加热器及余热锅炉的使用不仅完善了轧钢加热炉烟气余热回收系统,而且还为钢铁企业降低了能耗,提升了效益。图 3^[25]为轧钢加热炉余热回收系统示意图。

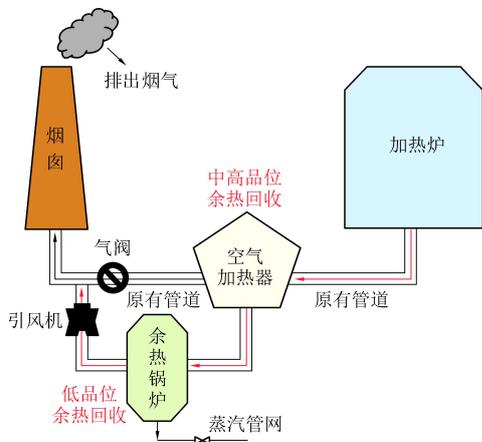


图 3 加热炉余热利用示意图

Fig. 3 Schematic diagram of waste heat utilization in the heating furnace

(2) 焦炉上升管余热回收技术

焦炉在焦化工序中产生的荒煤气温度可达到 650~800 °C,荒煤气携带的余热量占到焦炉总热量的 37%左右,从余热资源回收角度来说具有很高的回收价值^[26]。我国各个钢铁企业在技术研究中发现,利用上升管回收技术对荒煤气余热进行回收效益最高,也是最适合钢铁企业发展的。

上升管余热回收技术主要是利用荒煤气的显热产生蒸汽,从而达到余热资源回收的目的。由图 4^[27]可以看出其主要工艺流程为:首先对除盐水槽送来的除盐水进行预处理,通过一定方式送入到缓冲水槽中,然后经由汽包通过循环泵送入到上升管换热装置中。在上升管换热装置中,用荒煤气余热加热循环水产生汽水混合物,然后经由汽包分离将水蒸气直接送入到蒸汽管网中,循环之后的冷凝液则在此返回到上升管换热装置中进行循环使用。

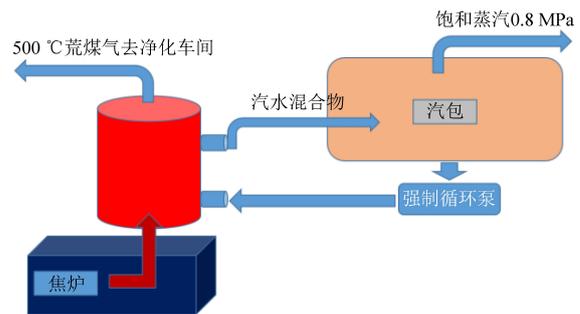


图 4 上升管余热回收流程图

Fig. 4 Flow chart of waste heat recovery of riser

(3) 蒸汽转换发电技术

炼钢工序中产生的烟气余热资源巨大,主要使用蒸汽发电技术进行回收利用,从而提升企业效益。具体原理为:对产生的 1 400 °C 的高温烟气使用汽化设备进行降温,然后将换热之后产生的高温蒸汽送到相应存储设备中,当用户需要时便以饱和蒸汽的形式输送给用户,从而达到对高温烟气余热最大程度利用的目的^[28]。图 5 为蒸汽发电技术流程示意图。

(4) 煤调湿技术

在焦炉工序中也会产生大量的高温烟气,而煤调湿技术便是用来回收焦炉烟气中余热资源的一项重要技术。该技术的关键点在于,通过加热的处理方式去除炼焦材料中的水分,使其水分含量处于一个较低的水平,大约维持在 6%左右^[29]。

煤调湿技术可以将整个炼焦过程中产生的废气、煤气等余热以及发电机组的热量综合起来,然

后通过对焦炉中煤气的加热使得其水分含量降低到5%~6%,不仅达到了煤气余热利用的目的,还达到了煤调湿的目的。在钢铁企业炼焦工序中使用煤调湿技术不仅可以极大程度地减少炼焦过程中的能源损耗,还可以提高焦化产品的回收率^[30]。

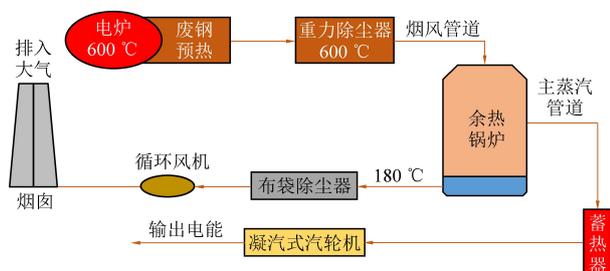


图5 蒸汽转换发电技术

Fig. 5 Steam conversion power generation technology

3.2 固体余热资源

固体余热资源一般来源于高温炉渣,例如在炼铁过程中产生的高炉渣及以及焦化工序中的红焦显热等。

(1) 炼铁工序中高炉渣的余热回收

在炼铁工序中会产生大量的高炉渣,高炉渣中的显热大约会占到余热资源的30%左右,而且高炉渣余热回收效率很低,现有的回收方法主要有化学方法及物理方法。

1) 化学回收方法

钢铁企业中最常见的高炉渣化学方法主要有高炉渣制备微晶玻璃以及高炉渣生产渣棉等。

部分学者研究表明,可以用高炉渣来制备微晶玻璃,以此来提高高炉渣的回收利用率。樊涌^[31]等人将高炉渣和污泥焚烧灰通过一定的比例混合,然后利用高温加热的方式制备出了微晶玻璃。同样,程向前等人将高炉渣用于陶瓷的烧制过程中,结果发现这样不仅可以改善陶瓷的材料性能,还可以降低陶瓷的烧结温度。

首先将提前调制好的混合料加入到高温状态下的高炉渣中,等加入的混合料完全融化以后,以酸性尾矿和废石作为调质剂,用压缩空气将预先配置好的混合料喷吹成丝状,从而制造出了具有高附加值的渣棉纤维,这种方法不仅可以回收高炉渣的大部分余热资源和高炉渣的废料,同时还可以保护化境、节约资源^[32]。

2) 物理回收方法

在钢铁工业炼铁过程中,会产生大量的高温炉渣,而且这些炉渣出炉温度很高,含有大量的余热资源。因此,钢铁企业会用物理方法回收高炉

渣的余热资源,常见的物理余热回收方法主要有风淬法、水淬法、液态金属换热法等。

水淬法:该方法主要包括图拉法、拉萨法、因巴法、底滤法、明特克法等5种^[33],该方法主要是在破碎的高温状态炉渣上直接喷洒冷却水,利用冷却水的汽化实现热量转移。冷却水吸热汽化以后变成中压蒸汽,蒸汽进入蒸汽管网实现再利用,从而实现高炉渣的余热资源回收^[34]。

液态金属换热法:该方法利用液态金属沸点高、换热效果好的优点,采用辊式金属换热器将高温炉渣余热进行回收。该方法回收后液态金属温度高,可得到高温高压蒸汽用于发电工序或其它生产工序。

风淬法:其原理主要是用高压气流将已经加压过的高温熔融态炉渣吹散粒化,通过对高压气流速度的调节,使得1050 °C的高炉粒化渣在碰到分散板之后落下,在落下过程中高温炉渣由于空气冷却的原因温度会降低到800 °C左右,然后排出。排出以后的炉渣会存储在炉渣仓中,然后用换热器将炉渣温度降低到150 °C左右,从而实现高温炉渣余热资源的回收^[35]。风淬余热回收装置如图6^[36]所示。

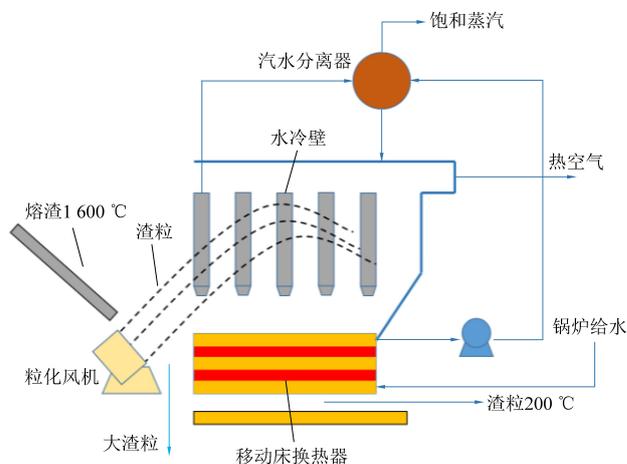


图6 风淬法钢渣热能回收装置

Fig. 6 Heat energy recovery device of steel slag by air quenching

双鼓法:在具有良好导热性的余热回收设备中填充回收余热用的流动介质^[36],将高温熔融态的炉渣倒入转鼓之中,然后转动转鼓,在转动过程中高温熔融态炉渣的热量会传递给余热回收用的流动介质,介质升温便实现了高炉渣的余热资源回收,双鼓法余热回收装置如图7^[37]所示。

(2) 用干熄焦技术回收红焦显热

干熄焦技术主要是将焦化工序中产生的红焦的显热转化为蒸汽用于发电,从而提高余热资源

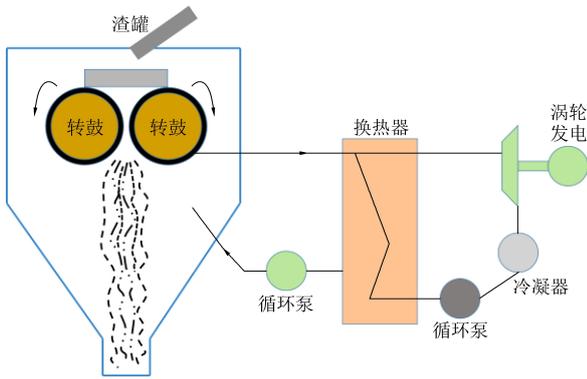


图7 双鼓法余热回收装置

Fig. 7 Double drum waste heat recovery device

利用程度。具体工艺流程为:首先将产生的高温焦炭放入密闭式干熄炉中,然后用保护性气体(常用为氮气)回收焦炭的热量,直至焦炭温度降低到200℃以后便可以将换热气体排出。排出后的换热气体通过余热锅炉产生高温高压的蒸汽,用于生活采暖或者发电,而冷却后的气体则继续进入干熄炉进行换热循环^[38]。具体工艺流程如图8^[39]所示。

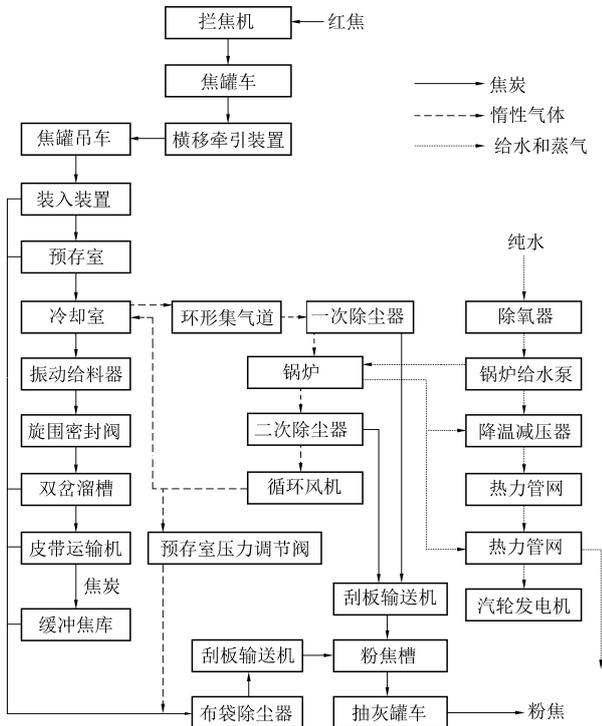


图8 干熄焦工艺流程图

Fig. 8 Process flow chart of coke quenching

从钢铁企业干熄焦发电技术的实际应用效果可以看出,该技术可以大幅度提高红焦焦炭余热的利用。在现阶段下,红焦显热余热资源可以占到焦炉总能耗的40%左右,使用干熄焦技术不仅可以很大程度上保留这部分余热,使得红焦显热

回收程度达到80%以上,同时还可以节约资源,提升钢铁企业的效益。

3.3 液体余热资源

在转炉炼钢、高炉炼铁过程中,会产生大量的80~95℃低温冲渣水,这部分冲渣水余热量很大。回收冲渣水液体余热不仅可以避免余热的浪费,提升企业效益,而且还可以在在一定程度上起到保护环境的作用。

冲渣水温度较低、余热量较少,所以其显热一般直接用于城市居民浴室用水以及北方城市的冬季供暖,这种利用方式不仅技术简单,而且成本也较低,已经得到了广泛研究与应用。但是,由于南方城市无冬季供暖需求,所以冲渣水用于供暖也存在一定的局限性。因此,有不少的研究学者探索了冲渣水用于发电的可能性。孟凡凯^[40]等学者提出了一种用冲渣水余热进行发电的装置,该装置通道截面如图9所示。

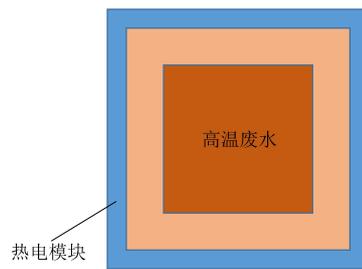


图9 流体换热通道截面

Fig. 9 Fluid heat transfer channel section

由图9所示,该装置由两部分组成,包括用于实现热能转换的发电模块以及实现发电模块与环境热交换的散热器。冲渣水从该装置入口进入,作为热源在流动过程中放出热量,自身温度降低,所以可将冲渣水看作变温热源,环境空气视为恒温冷源。大量的研究以及实际应用已经证明,利用冲渣水余热进行余热发电是可行的。因此,该方式可以完全用于钢铁企业液体余热资源的回收。

4 绿色能源在钢铁厂中的应用状况

4.1 生物质能

生物质一般是指动植物、微生物等有生命的物质通过自身生命活动产生的有机物质,主要包括秸秆、木材等农作废弃物以及动物粪便等。而生物质能是指自然界中有生命活动的植物提供的能量,其能量来源一般为太阳能,属于可再生能源。根据数据估算,自然界中存储的

生物质能是世界能源消费总量的 2 倍还多。随着全球范围内传统能源(煤、石油、天然气)的枯竭以及人类对绿色环保问题越来越高的关注度,运用生物质能替代传统能源用于钢铁企业的技术已经成为了各国学者研究创新的热点问题。其中日本、欧洲、美国等国家在生物质能方向研究较多。

日本各大钢铁企业对生物质能在钢铁行业中的运用做出了积极探究,不仅是为了降低企业效益,更是为了减少炼铁工序中煤、焦炭消耗以及 CO₂ 排放^[41]。日本某公司研发出一种生物碳化技术,该技术主要是用生物质能来生产生物炭,然后将得到的生物炭用于钢铁各个工序中,主要适用于高炉炼铁过程中。该技术的主要特点是能量回收率可以达到至少 60%,而且由于不需要任何其他辅助燃料,可以大大提升钢铁企业的效益。图 10 为生物质碳化技术流程图。

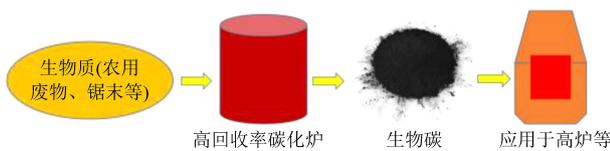


图 10 生物质碳化技术工艺流程图

Fig. 10 Process flow chart of biomass carbonization technology

欧洲钢铁工业采用木炭作为高炉的原料,从而达到减少 CO₂ 排放的目的。德国学者通过对高炉的仿真模拟,探究了两种不同的喷吹技术,分别是木炭粉喷吹以及木炭粉和煤粉混合喷吹^[41]。该模拟研究不仅估算出了各种形式木炭粉的喷吹对高炉热平衡及整体行为的影响,还用热分析模型对高炉关键部位进行了模拟。最终的模拟实验结果表明,在燃烧速率方面,木炭粉略快于煤粉,即燃烧行为木炭粉好于煤粉。同时实验结果还表明,在熔损反应方面,木炭粉快于煤粉。当温度从 900 ℃ 上升到 1 300 ℃,反应速度会呈现出指数增长,随反应温度升高,反应速率差距逐渐减小。

从日本以及欧洲国家对生物质能的研究来看,虽然在现阶段下,生物质能并没有替代传统能源大规模运用于钢铁工业中,但是从现在“双碳”大背景及国内外研究来看,在未来生物质能必将替代部分传统能源运用于钢铁企业中。

4.2 绿 电

绿电是在“双碳”背景下提出的一个重要理念,从字面意思理解是指绿色发电,而绿色便是指

在碳达峰碳中和大背景下的一种发电模式。绿色发电要求在电力生产的过程中,排放的二氧化碳量为零或者接近于零。因此,相比于其他的传统发电方式,绿电对环境的污染最小,对环境造成的冲击也是最小的。绿电主要来源有地热能、生物质能、风能、太阳能等,在我国主要以太阳能为主。

随着能源组成结构以及绿色节能技术的完善,“绿电”越来越受到传统工业的重视。而钢铁行业作为我国重工业的重要组成部分,也需要响应“双碳”号召,为我国的节能降碳、绿色环保积极贡献力量。钢铁行业正面临着转型革新的艰难处境,不少钢铁企业开始引入“绿电”,从而最大化地实现资源利用。在现阶段下,越来越多的钢铁企业走上了“绿电”革新的道路。

2022 年初鞍钢积极响应国家提出的绿电交易政策,大幅度提升了发电能源中核电、风能发电等绿色环保能源的占比。截止到 4 月初,鞍山钢铁(本部、鲅鱼圈、朝阳)2022 年绿色环保能源交易电量已经达到 26 亿 kW·h,其中包含风电 5.6 亿 kW·h,占到了总交易电量的 37%。鞍钢取得如此大的成果与其践行低碳发展理念,积极响应国家绿电政策密不可分。

2022 年 2 月,河北省张宣高科科技公司利用自己获得的“绿电”交易资格,总共购入绿电量为 6 923.8 万 kW·h,使得碳排放量降低了大约 6.9 万 t,为企业自身节省效益 7 亿元。把“新能源”项目落地作为保证绿色低碳转型的基因,张宣高科全面启动“绿色低碳转型百日攻坚行动”,发力“绿电+高端制造”,奋力打造行业绿色环保、节能低碳发展示范企业。

2022 年 3 月,发布的清洁能源年度电力交易结果显示,河钢清洁能源成交电量为 2.7 亿 kW·h。这次交易作为河钢的首次绿电交易,不仅仅标志着河钢在钢铁行业绿电交易中取得了领先的地位,同时也暗示了河钢接下来紧跟绿电交易政策,跟进绿电交易需求,为我国实现碳达峰碳中和贡献力量的巨大决心。

鞍钢、河钢等大型钢铁企业在 2022 年绿电交易量巨大,不仅说明走“绿电”发展道路,把电变“绿”让我国钢铁企业在“双碳”目标下有了新的发展及转型方向,同时“绿电之路”也标志着我国钢铁行业在未来发展中将会不断探求绿色能源,进一步增大绿色能源的使用比例,为推动未来钢铁行业可持续发展打下坚实的基础。

5 未来展望

当前阶段,绿色发展已经成为一个重要趋势,世界上许多国家把发展绿色产业作为推动国家经济结构的调整的重要措施,突出绿色发展的理念和内涵。绿色发展是以效率、和谐、持续为目标的经济增长和社会发展方式。绿色发展理念是以绿色低碳循环为主要原则,以生态文明建设为基本抓手。

钢铁工业不仅是资源消耗最大,也是能源消耗最大的产业之一。因此,绿色、低碳发展是钢铁产业改变生产模式、转型的最重要,也是最紧迫的任务。尤其是对中国钢铁而言,根据数据统计2020年中国粗钢产量占世界粗钢总产量的57.13%。同时,据有关专家指出,我国的钢铁行业每年可消费5.5亿t标准煤,约占全国总能耗的11%,碳排放量贡献占到全球钢铁碳排放总量的60%以上。

“绿水青山就是金山银山”,绿色低碳正在成为钢铁行业高质量发展有力推手,成为改变全球未来的重大社会发展趋势。钢铁行业绿色低碳发展之路,任重道远,各企业唯有笃行不怠,以身作则,通过实实在在的技术创新和不断的投入,方能将一项项任务落实到行动中,才能在计划时间内实现钢铁行业乃至全国“双碳”目标,进而为我国能源结构的低碳化转型和高质量发展做出应有的贡献。

参考文献(References):

- [1] 王灿,张雅欣.碳中和愿景的实现路径与政策体系[J].中国环境管理,2020,12(6):58-64.
WANG Can, ZHANG Yaxin. The path and policy system to realize the vision of carbon neutrality[J]. Environmental Management in China, 2020, 12(6): 58-64.
- [2] 李明煜,张诗卉,王灿,等.重点工业行业碳排放现状与减排定位分析[J].中国环境管理,2021,13(3):28-39.
LI Mingyu, ZHANG Shihui, WANG Can, et al. Analysis of carbon emission status and emission reduction position of key industries[J]. Environmental Management in China, 2021, 13(3): 28-39.
- [3] 王新东,上官方钦,邢奕,等.“双碳”目标下钢铁企业低碳发展的技术路径[J/OL].工程科学学报:1-12[2022-12-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1297.tf.20221110.1733.004.html>.
WANG Xindong, SHANGGUAN Fangqin, XING Yi, et al. The technological path of low-carbon development of iron and steel enterprises under the goal of "double carbon" [J/OL]. Journal of Engineering Science: 1-12[2022-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1297.tf.20221110.1733.004.html>.
- [4] 李晋,谢臻阳,蔡闻佳,等.碳中和背景下中国钢铁行业低碳发展路径[J].中国环境管理,2022,14(1):48-53.
LI Jin, XIE Canyang, CAI Wenjia, et al. Low-carbon development path of China's steel industry under the background of carbon neutrality[J]. Environmental Management in China, 2022, 14(1): 48-53.
- [5] 王海风,郦秀萍,周继程,等.钢铁工业节能技术发展现状及趋势[J].冶金能源,2018,37(4):3-8.
WANG Haifeng, LI Xiuping, ZHOU Jicheng, et al. Development status and trend of energy saving technology in iron and steel industry[J]. Metallurgical Energy, 2018, 37(4): 3-8.
- [6] 刘云江.先进的炼焦技术[J].煤化工,1989(3):62-63.
LIU Yunjiang. Advanced coking technology[J]. Coal Chemical Industry, 1989(3): 62-63.
- [7] 稽立磊.我国炼钢工艺现状与发展趋势分析[J].冶金与材料,2022,42(5):169-170.
JI Lilei. Analysis of current situation and development trend of Chinese steelmaking technology[J]. Metallurgy and Materials, 2022, 42(5): 169-170.
- [8] 李严.高炉炼铁工艺的优化与发展趋势研究[J].冶金管理,2022(21):12-14.
LI Yan. Study on optimization and development trend of blast furnace ironmaking process [J]. Metallurgical Management, 2022(21): 12-14.
- [9] 国家统计局能源司.能源统计工作手册[M].北京:中国统计出版社,2010.
- [10] 何坤.冶金系统能源调控与流程配置优化的节能增效潜力研究[D].北京:北京科技大学,2019:7-16.
HE Kun. Research on energy saving and efficiency increasing potential of energy regulation and process optimization in metallurgical system[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019: 7-16.
- [11] 王维兴.钢铁工业能耗现状和节能潜力分析[C]//第十二届中国钢铁年会论文集.能源、环保与资源利用,2019:188-193.
- [12] 历年钢铁工业统计12月月报[R].北京:中国钢铁工业协会,2021.
- [13] 王海风,平晓东,周继程,等.中国钢铁工业绿色发展回顾及展望[J/OL].钢铁:1-12[2022-12-21].<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220465>.
WANG Haifeng, PING Xiaodong, ZHOU Jicheng, et al. Review and prospect of green development of Chinese iron and steel industry[J/OL]. Steel: 1-12[2022-12-21].<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220465>.
- [14] 王维兴.钢铁工业能耗现状和节能潜力分析[C]//第十二届中国钢铁年会论文集.能源、环保与资源利用,2019:188-193.
- [15] 李洪福.炼钢转炉烟气余热回收利用研究[D].济南:山东大学,2006:1-10.
LI Hongfu. Study on recovery and utilization of waste heat from converter flue gas[D]. Jinan: Shandong University, 2006: 1-10.
- [16] 柯菲,高雅萱,张倩,等.钢铁企业余热资源回收利用技

- 术现状综述[J]. 机电信息, 2021(19): 62-65.
- KE Fei, GAO Yaxuan, ZHANG Jin, et al. Review on the status quo of waste heat resources recovery and utilization technology in iron and steel enterprises[J]. Electromechanical Information, 2021(19): 62-65.
- [17] 吴春华. 钢铁企业余热余能资源利用现状分析[J]. 冶金能源, 2014, 33(2): 54-57.
- WU Chunhua. Analysis on utilization of waste heat and energy resources in iron and steel enterprises[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2014, 33(2): 54-57.
- [18] 苑安民, 陈红国. 钢铁企业余热资源量的评价与利用[C]//2008 全国能源与热工学术年会论文集, 2008: 443-447.
- [19] 石峥, 周华鑫, 覃皓, 等. 钢铁工业余热回收技术现状研究[J]. 科技风, 2019(25): 152.
- SHI Zheng, ZHOU Huaxin, TAN Hao, et al. Research on waste heat recovery technology of iron and steel industry[J]. Science and Technology Trend, 2019(25): 152.
- [20] 孙文龙. 钢铁企业余热余能回收利用措施研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(2): 157-158+164.
- SUN Wenlong. Research on recycling measures of waste heat and energy in iron and steel enterprises[J]. Leather Making and Environmental Technology, 2022, 3(2): 157-158+164.
- [21] 侯中晓, 胡砚斌, 何赛. 轧钢加热炉烟气余热回收工程实践[J]. 山东冶金, 2022, 44(5): 71-72.
- HOU Zhongxiao, HU Yanbing, HE Sai. Engineering practice of waste heat recovery from flue gas of steel rolling heating furnace[J]. Shandong Metallurgy, 2022, 44(5): 71-72.
- [22] 刘伟. 热轧加热炉烟气余热回收利用技术[J]. 冶金动力, 2014(8): 56-58.
- LIU Wei. Recovery and utilization technology of flue gas waste heat in hot rolling heating furnace[J]. Metallurgical Power, 2014(8): 56-58.
- [23] 高月, 陈丽娟, 赵帅, 等. 热轧板坯加热炉烟气余热回收技术的开发和应用[J]. 热能动力工程, 2020, 35(7): 223-228.
- GAO Yue, CHEN Lijuan, ZHAO Shuai, et al. Development and application of waste heat recovery technology in hot rolled slab heating furnace[J]. Thermal Power Engineering, 2020, 35(7): 223-228.
- [24] 常志明. 梅钢热轧加热炉空煤气双预热的节能效果分析[J]. 工业炉, 2016, 38(6): 60-63.
- CHANG Zhiming. Analysis of energy saving effect of double preheating of empty gas in hot rolling heating furnace of Mei Steel[J]. Industrial Furnace, 2016, 38(6): 60-63.
- [25] 石晓鑫, 刘小军, 冯宇阳. 八钢轧钢系统加热炉低品位余热的回收利用[J]. 新疆钢铁, 2021(4): 51-53.
- SHI Xiaoxin, LIU Xiaojun, FENG Yuyang. Recovery and utilization of low grade waste heat in heating furnace of rolling steel system of Basang[J]. Xinjiang Iron and Steel, 2021(4): 51-53.
- [26] 赵勇, 黄海清, 沈毅, 等. 荒煤气在焦炉上升管内的流动与传热研究[J]. 燃料与化工, 2019, 50(5): 1-4.
- ZHAO Yong, HUANG Haiqing, SHEN Yi, et al. Study on flow and heat transfer of waste gas in coke oven riser[J]. Fuel & Chemical Processes, 2019, 50(5): 1-4.
- [27] 张怀东, 许宝先, 安占来. 焦炉上升管余热回收技术[J]. 冶金能源, 2017, 36(S1): 89-91.
- ZANG Huaidong, XU Baoxian, AN Zhanlai. Coke oven riser waste heat recovery technology[J]. Metallurgical Energy, 2017, 36(S1): 89-91.
- [28] 柯菲, 高雅萱, 张倩, 等. 钢铁企业余热资源回收利用技术现状综述[J]. 机电信息, 2021(19): 62-65.
- KE Fei, GAO Yaxuan, ZHANG Jin, et al. Review on the status quo of waste heat resources recovery and utilization technology in iron and steel enterprises[J]. Electromechanical Information, 2021(19): 62-65.
- [29] 赵爱华. 煤调湿技术在炼焦生产中的应用[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(2): 66-68+73.
- ZHAO Aihua. Application of coal moisture control technology in coking production[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(2): 66-68+73.
- [30] 冯跃敬, 崔祥晋, 满华东. 节能降耗技术在焦化产品回收中的应用[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(5): 96.
- FENG Yuejing, CUI Xiangjin, MAN Huadong. Application of energy - saving technology in coke product recovery[J]. Chemical Design Communication, 2019, 45(5): 96.
- [31] 樊涌, 李宇, 苍大强, 等. 污泥和高炉渣协同制备微晶玻璃[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(7): 901-907.
- FAN Yong, LI Yu, CANG Daqiang, et al. Preparation of microcrystalline glass by sludge and blast furnace slag[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(7): 901-907.
- [32] 周君, 邢宏伟, 田铁磊, 等. 高炉渣制备渣棉试验研究[J]. 矿产综合利用, 2014(6): 71-75.
- ZHOU Jun, XING Hongwei, TIAN Tielei, et al. Experimental study on preparation of slag cotton from blast furnace slag[J]. Complex Utilization of Valuable Minerals, 2014(6): 71-75.
- [33] 冯会玲, 孙宸, 贾利军. 高炉渣处理技术的现状及发展趋势[J]. 工业炉, 2012, 34(4): 16-18.
- FENG Huiling, SUN Huan, JIA Lijun. Current situation and development trend of blast furnace slag treatment technology[J]. Industrial Furnaces, 2012, 34(4): 16-18.
- [34] 邱润强, 许征鹏. 高炉渣微水淬法余热回收技术开发[J]. 山东冶金, 2014, 36(1): 48-50+53.
- QIU Runqing, XU Zhengpeng. Development of waste heat recovery technology by micro-water quenching of blast furnace slag[J]. Shandong Metallurgy, 2014, 36(1): 48-50+53.
- [35] 林高平. 熔融渣显热回收利用技术综述及展望[J]. 中国废钢铁, 2007(4): 30-36.
- LIN Gaoping. Review and prospect of sensible heat recovery and utilization technology of molten slag[J]. Chinese Scrap, 2007(4): 30-36.
- [36] 李德军, 刘清海, 许孟春, 等. 钢渣余热回收方法分析[J]. 鞍钢技术, 2018(1): 7-11+18.
- LI Dejun, LIU Haiqing, XU Mengchun, et al. Analysis of

- waste heat recovery method of steel slag[J]. *Angang Technology*, 2018(1): 7-11+18.
- [37] 高洋, 贵永亮, 宋春燕, 等. 高炉渣显热回收利用现状与展望[J]. *矿产综合利用*, 2018(1): 12-16.
- GAO Yang, GUI Yongliang, SONG Chunyan, et al. Current situation and prospect of sensible heat recovery and utilization of blast furnace slag[J]. *Complex Utilization of Valuable Minerals*, 2018(1): 12-16.
- [38] 陈光辉, 李升大, 陶少辉, 等. 焦炉余热综合利用研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(10): 3799-3805.
- CHEN Guanghui, LI Shenda, TAO Shaohui, et al. Research progress in comprehensive utilization of coke oven waste heat [J]. *Chemical Industry Progress*, 2018, 37(10): 3799-3805.
- [39] 郭毅. 新时期焦化厂干熄焦技术节能减排探究[J]. *山西化工*, 2022, 42(2): 291-292+316.
- GUO Yi. Research on energy saving and emission reduction of coke quenching technology in coking plant in new period[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2022, 42(2): 291-292+316.
- [40] 孟凡凯, 陈林根, 孙丰瑞. 一种空冷式冲渣水余热热发电装置及性能分析[C]//高等学校工程热物理第二十届全国学术会议论文集——工程热力学专辑, 2014: 196-206.
- [41] 曲余玲, 毛艳丽, 景馨, 等. 生物质能在钢铁生产中的应用研究及前景分析[J]. *上海金属*, 2015, 37(5): 70-74.
- QU Yuling, MAO Yanli, JING Qing, et al. Application research and prospect analysis of biomass energy in steel production[J]. *Shanghai Metal*, 2015, 37(5): 70-74.