

编者按: 炼钢-连铸生产过程是现代钢铁企业生产流程中的核心工序,主要涉及炼钢、精炼、连铸三大工序的作业计划。在我国钢铁工业推动高质量发展的新阶段,持续不断地优化炼钢-连铸生产工艺,提高钢的质量稳定性、优化品种结构以更好地满足行业发展的需求,对我国钢铁工业转型升级、实现高质量发展具有重要意义。为了总结我国钢铁行业在产学研用方面和关键技术领域取得的创新突破,推动冶金科研成果转化和新技术应用,加快新成果、新技术的开发和传播,值此新中国成立 70 周年之际,《钢铁》编辑部特邀请东北大学朱苗勇教授联合策划出版“炼钢-连铸新工艺和关键共性技术专刊”,以期推动钢铁行业科技创新和技术进步,为新中国成立 70 周年献礼。

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190284

中国电炉炼钢的技术进步

王新江

(中国金属学会,北京 100081)

摘 要: 总结了建国 70 年来中国电炉炼钢的发展历程,特别是改革开放 40 年来电炉工艺技术的进展,分析了电炉钢比例先升后降的原因。阐述了废钢和电力对电炉钢成本的影响以及电炉短流程对钢铁工业结构调整和高质量发展的影响等,对世界主流电炉炉型在中国的应用进行了归纳,同时总结了电炉炼钢工艺技术的创新和装备发展情况,指出了电炉炼钢未来的发展趋势。

关键词: 电炉炼钢;废钢;炉型;短流程

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)08-0001-08

Technological progress of EAF steelmaking in China

WANG Xin-jiang

(The Chinese Society for Metals, Beijing 100081, China)

Abstract: The development process of EAF steelmaking in the 70 years since the founding of the China was summarized, especially the technological progress of EAF steelmaking in 40 years since the reform and opening up of China. The reasons for the increase first and then decrease in the ratios of EAF steel was clarified. The effects of scrap and electric power on the cost of EAF steelmaking, as well as EAF steelmaking route on the structure adjustment of the steel industry and the quality of steel products were ascertained. The application situation of the world's mainstream EAF in China, and the innovation and development of main technologies of EAF steelmaking were summarized. The future development trend of EAF steelmaking was pointed out.

Key words: EAF steelmaking; scrap; furnace profile; short route

电弧炉简称电炉,是使用清洁能源电为主要能源、社会废弃物废钢为主要原料进行钢的冶炼的一种设备。该工艺是钢铁生产中温室气体排放比较低的一种短流程钢铁生产工艺^[1-3]。由于具有排放低、生产组织灵活以及产品适用性好等特点,在世界范围内发展较快,产量约占总粗钢量的 1/4。中国电炉炼钢在建国 70 年来也有了长足发展,产量已达到 10%左右,由于受到废钢和电力的制约,工艺技术和装备水平远远未达到世界平均水平,在未来的发展中还有相当大的空间。

1 中国电炉炼钢的历史发展

电炉炼钢与中国钢铁工业 70 年的发展可谓激

荡起伏、催人振奋,大致可分为前 30 年和后 40 年两个阶段。前 30 年经历了“动员”和“大会战”的发展时期,建成了钢铁工业的初步体系;后 40 年经历了“改革”“大力发展”以及“全面深化改革”等不同阶段,实现了历史跨越,粗钢产量连续 24 年蝉联全球产量第一,2018 年粗钢产量达到 19.28 亿 t,开始步入高质量发展阶段。

1.1 建国 30 年,电炉炼钢初成体系

1949 年中国钢产量为 15.8 万 t,占世界钢产量的 0.1%,钢产量作为当时衡量国民经济发展的第一指标得到了快速发展。在这一阶段,中国钢铁工业经历了“一次重大转变”“两个黄金发展期”“三次基本建设高潮”和“一段曲折发展道路”。(1)“一次

重大转变”:建国初期,中国钢铁工业在前苏联支援下发展,模式也是照搬前苏联的。(2)“两个黄金发展期”:第一个五年计划期间(1953—1957年)与国民经济调整期间(1963—1965年),年均增钢 80 万 t,年均增长 31.6%,到 1957 年达到了 535 万 t,可谓是迅速发展。(3)“三次基本建设高潮”:第一次即“一五”期间,实施前苏联 156 个援建项目中的八大钢铁项目的建设,同时还进行了 20 个企业改扩建工程;第二次是 1956 年规划并开始建设的“三大”“五中”和“十八小”,其中“三大”指继续进行鞍钢、武钢、包钢 3 个大型钢铁基地建设,“五中”指扩建、新建太钢、重钢、马钢、石景山钢铁厂和湘钢,“十八小”指济钢、临钢、南钢等 18 个小型钢厂;第三次指 1964 年开始的三线建设,新建了攀钢等钢铁厂,恢复建设了兰钢和酒钢,扩建了遵义铁合金厂等。这 3 次基本建设高潮的开展,为新中国钢铁工业日后发展打下了重要的基础。(4)“一段曲折发展道路”:1958 年的“大跃进”、1976 年的“文革”以及之后的“闹翻番”“洋跃进”等脱离实际、违背钢铁工业发展规律的行为,这使中国钢铁工业付出了沉重的代价,直到改革开放的 1978 年,全国的钢产量才 3 178 万 t。电炉作为一种特钢冶炼设备,发展比较缓慢,与整个钢铁工业的发展是一致的。

1.2 改革开放 40 年,实现了历史性跨越

改革开放后 40 年,电炉炼钢发生了一系列的新变化,实现了质的飞跃。生产规模迅速扩大,技术装备取得重大进展,实现了大型化,品种质量得到了优化,节能减排取得了巨大进展,分 4 个阶段来看^[4-5]。

1.2.1 稳步增长期(1979—1989 年)

20 世纪 80 年代主要产钢国电炉钢比例见表 1^[6]。这一阶段是传统电炉炼钢技术成熟期,工艺上采用“熔化-氧化-还原”三段操作,高功率或普通功率供电,开始引入化学能和物理能,冶炼周期一般为 180~240 min,电耗为 500~600 kW·h/t 左右,电极消耗为 7.0~8.5 kg/t,生产率较低,以生产特殊钢为主,见表 2。

表 1 20 世纪 80 年代主要产钢国电炉钢比例

年份	美国	日本	欧盟	世界
1980	27.9	24.5	23.8	21.1
1985	33.9	29.0	25.1	24.8
1988	36.9	29.7	29.1	26.6

表 2 传统电炉炼钢的特点

项目	特点
能源	电能
冶金过程	熔化、氧化、还原三段操作
主要原料	废钢、10%生铁
产品	钢锭
品种	特殊用途钢
环境	环保意识差
生产率/(t·a ⁻¹)	低,0.3 万~0.4 万
出钢量/t	≤30
电能输入/(kW·h·t ⁻¹)	400~600

1.2.2 高速发展期(1989—1999 年)

在传统电炉炼钢成熟技术孕育的基础上,LF 精炼炉的诞生标志着电炉炼钢进入高速发展期,即进入现代电炉炼钢技术成熟期,其工艺技术具有 6 个特点。

(1)现代电炉炼钢的能源有 3 种,除传统的电能外,还有化学能和物理能,化学能和物理能所占的比例可能超过 50%。

(2)现代电炉的冶炼过程主要为熔化氧化过程,取消了传统电炉炼钢的还原期,传统电炉炼钢还原期的任务由在线的炉外精炼完成,现代电炉成为了一个初炼炉;用氧的主要目的由传统电炉的助熔、脱碳去气(熔毕碳质量分数大于 0.2%)变为提供化学热,增加现代电炉炼钢的一个重要热源。由于化学热和物理热的增加,冶炼过程中,当采用加部分铁水冶炼时,可以有一个停电不停氧的操作,这是由于兑入的铁水比例高,有一段时间像转炉一样可以不供电。

(3)现代电炉炼钢的主要原料除废钢外,还有 30%~40%的生铁或 DRI/HBI 等。生铁在传统电炉炼钢过程中主要用做增碳剂,在现代电炉炼钢过程中主要用来提高配碳量,以增加化学热和物理热。生铁是最佳的配碳剂。

(4)超高功率供电及其相关技术。超高功率供电包括超高功率电炉的超高功率供电原理、高时间利用率和功率利用率、三相功率平衡和设备(主要是大型交流炉用变压器及整流设备);相关技术包括水冷炉壁、水冷炉盖、高压长弧操作、泡沫渣、计算机控制、偏心炉底出钢、二次燃烧和氧燃烧嘴等。

(5)现代电炉冶炼的产品主要为连铸坯,传统电炉冶炼的产品为钢锭。由于某些钢种的特殊需要,在现代电炉炼钢厂中,可以保留部分模铸(尺寸较大

的钢锭),但是由于经由模铸的钢通常数量较小,为了提高企业的市场竞争力,这些钢厂有必要大量生产连铸坯轧材,所以必须采用现代电炉炼钢技术。

(6)传统的电炉冶炼环保意识差,电炉车间上空往往褐色烟尘滚滚,现代电炉炼钢从末端治理(公害治理)将发展到源头治理、绿色制造、工业生态链和循环经济。

在这一阶段,中国淘汰了大批小炉子,从欧洲、美国、日本引进了大量平均出钢量大于 70 t 的电炉,主要炉型有竖井废钢预热式、ConSteel 电炉、Danarc 电炉、双壳炉及其超高功率交、直流电炉。在消化吸收国外先进技术的基础上,创造出良好的技术经济指标,见表 3。电炉炼钢技术发展历史分期示意图如图 1 所示。从图 1 可以看出这一阶段电炉炼钢的技术进步情况。中国电炉钢的比例已达到 15.9%,而且还有上升趋势,但世界电炉钢的比例也由 26.6%上升到 33.7%。20 世纪 90 年代主要产钢国电

炉钢比例见表 4。

表 3 现代电炉炼钢的技术经济指标
Table 3 Technical and economic indicators of modern EAF steelmaking

指标	数值
冶炼周期/min	平均 41,最短 30
送电时间/min	平均 31,最短 27
竖炉作业率/%	>92
热停率/%	<1.5
最高班产/炉	13
最高日产/t	3 970(37 炉)
最高月产/t	103 673
2003 年产钢量/t	1 081 278
电耗/(kW · h · t ⁻¹)	平均 222,最低 160
氧耗/(m ³ · t ⁻¹)	平均 41(标态)
电极消耗/(kg · t ⁻¹)	平均 1.5,最低 1.3
生产率/(t · a ⁻¹)	8 000~10 000

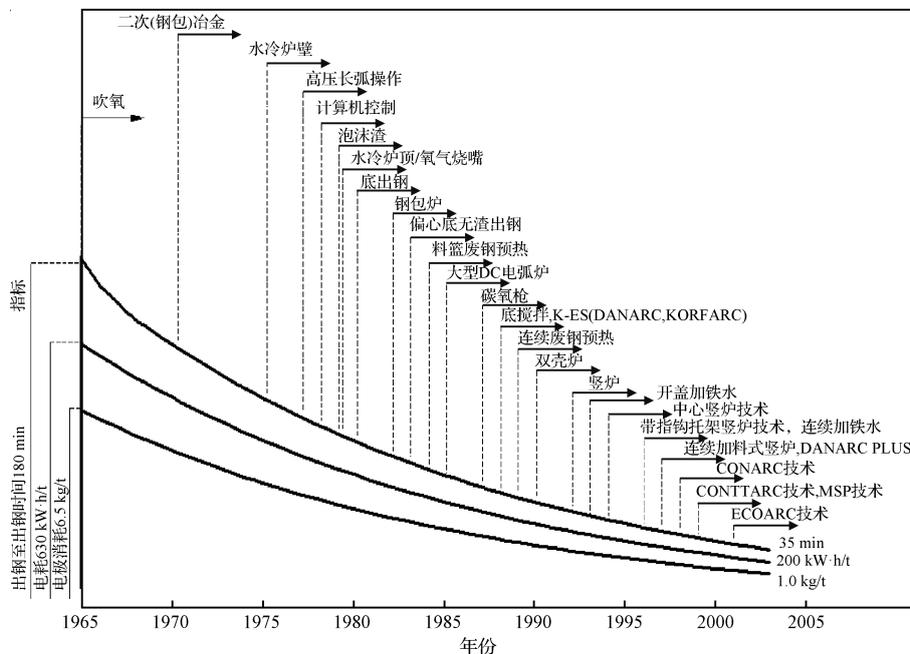


图 1 电炉炼钢技术发展历史分期示意图

Fig. 1 Schematic diagram of development historical division of EAF steelmaking technology

1.2.3 发展调整期(1999—2009 年)

改革开放后近 20 年的发展,中国钢产量已突破 1.2 亿 t,其中电炉钢达到 2 000 万 t,比例接近 17%。装备水平、工艺技术和产品档次均与世界先进水平的差距越来越小,基本实现了炉容大型化,形成了电炉冶炼→炉外精炼→连铸→连轧的现代化工艺流程,技术经济指标大幅提高。在冶炼周期、电

耗、利用系数、生产率、电极消耗等方面已经进入国际先进甚至国际领先行列。

电炉冶炼技术的进步,也促进了中国电炉钢生产规模的扩大和发展。不利因素是废钢的积蓄速度不及电炉炼钢对废钢的需求。另外,转炉钢的高速增长也增加了废钢需求,再加上电力供应满足不了国民经济高速发展,致使电炉的主要能源电力供应

表4 20世纪90年代主要产钢国电炉钢比例

Table 4 Proportions of EAF steel in main countries in 1990s

年份	日本	美国	韩国	德国	印度	中国	世界
1995	32.3	39.4	37.8	24.1	29.7	19.0	32.6
1996	33.3	42.1	39.5	26.0	25.9	18.7	32.9
1997	32.8	43.2	43.1	26.4	31.6	17.6	33.7
1998	31.9	44.6	40.3	27.5	31.8	15.8	33.9
1999	30.5	46.2	41.6	29.2	32.1	15.7	33.5
2000	28.8	46.8	42.8	28.7	32.1	15.9	33.7

紧张,价格居高不下。因此,电炉钢成本开始步入上升通道。2005年后,相同钢种的电炉冶炼比转炉冶炼高出150~200元/t,短流程电炉工艺增长变缓,甚至有些企业的电炉开始采取停产、错峰生产以及改变炉料结构等措施。电炉在炉料结构方面的变化就是在这个时期开始突破的,如使用铁水。对于电炉炼钢而言,热铁水提供了大量的物理热和化学热,减少了装料次数,改善了电弧燃烧条件,特别是避免了使用社会废钢中残余金属杂质带来的污染,是电炉炼钢高效节能的首选条件。铁水加入量的最佳比例为35%,这是冶炼时间最短、冶炼电耗最低的加入参数,但有些企业的加入量已突破50%,甚至是全铁水冶炼,称为电转炉。从工艺技术上来看是不合理的,更应禁止小型电炉炼钢厂建小高炉为电炉供应铁水。

由于国民经济的高速发展,房地产市场的强劲需求造成长流程投资剧增,使得转炉钢产量大幅增加;与此同时,电炉投资建设的潜能基本饱和,使得电炉钢比例开始大幅降低,最终低到了6.2%甚至更低。

1.2.4 政策转折期(2009—2019年)

美国金融危机发生后,中国钢铁工业进入调整期,政府采取了大量措施来降低危机带来的影响,钢铁行业的产业结构调整和核心竞争力提高成为当时的主要措施。(1)国务院出台《关于化解严重过剩产能的指导意见》,优化布局,压缩钢铁产能8000万t;(2)依法依规全面取缔“地条钢”产能约1.4亿t,涉及企业700余家;(3)为减少温室气体的排放,建设绿色钢铁,北方钢厂冬季采暖季限产,涉及6省市的“2+26”个城市,粗钢产量约为3600万t,钢铁限量3600万t;(4)智能化工厂建设推进速度大大加快,钢铁行业在2018年实现利润4704亿元,出现了历史最好态势。

需要关注的是取缔1.4亿t地条钢产能,使长

材供需关系改变,螺纹钢价格从2017年春节期间的3300元/t上升到4800元/t,个别地区甚至超过5000元/t,废钢市场价格下降500元/t以上。此外,个别专家呼吁钢铁工业的第三次革命,即电炉取代转炉即将到来,使电炉建设成为热点。2015年,304家规范企业中有电弧炉203座,产能为1.006亿t,实际产量为5079万t;2016年钢协会会员企业有电弧炉129座,实际产量为5379万t。

尽管国家发改委有明确的电炉发展指导意见,但电炉设备制造厂的订单仍不断上升,国内大型电炉制造厂的订单十分饱满,处于供不应求的状况。截至2017年底,有意上电炉的企业有96家,拟上电炉145座,其中在建48座,已投产50座,大量的电炉产能在2018年上半年逐步释放。据初步统计,2018年中国钢产量为9.29亿t,其中电炉钢已达到1亿t,占比达到了10%,世界各主流电炉装备生产企业云集中国,一年内签署100t级以上电炉35座;国内电炉装备制造厂签约30座,合计65座,其中绝大多数为100t电炉,涉及产量近7000万t,拟建设的电炉有30多座,累计有百座电炉在几年投产。这些电炉在装备水平上不尽相同,工艺路线也各有千秋,需研究关注。预计到2025年,中国电炉钢会达到2亿t,占粗钢比例会超过20%。

2 中国电炉炼钢的现状

中国电炉炼钢经过几十年的发展,其工艺技术、装备水平以及品种结构都有了翻天覆地的变化,目前还处于增量趋势。下面从原料结构、主要技术经济指标以及炉型结构逐一分析。

2.1 废钢铁资源

废钢可分为3类:自产废钢、加工废钢和废旧废钢。自产废钢指钢铁厂内部炼钢、轧钢等工序的剩余部分,约占粗钢产量的5%,一般不外流;加工废钢指制造加工业对钢铁产品进行机械加工时产生的废钢,长材加工约产生6%废钢,其他产品约产生20%废钢;废旧废钢指各种钢铁制品使用一定年限后报废形成的废钢。加工废钢和废旧废钢统称为社会废钢。

据中国废钢铁应用协会统计,2018年中国废钢资源量为2.0亿t。其中铸造行业消耗2000万t,钢铁行业消耗1.8亿t,由3部分构成:转炉热平衡用、电炉原料用和高炉增产用,供需基本平衡。从废钢资源量上看,2015年中国废钢资源总量达到1.5亿t,钢铁工业可利用废钢量约为1.3亿t;2020年中国

废钢资源总量达到 2.1 亿 t, 钢铁工业可利用废钢量约为 1.8 亿 t; 到 2025 年, 中国废钢资源总量可达 2.9 亿 t, 其中折旧废钢资源量约为 2.2 亿 t, 占总量的 75%, 扣除机械工业使用的废钢外, 钢铁工业可利用废钢资源总量约为 2.4 亿~2.6 亿 t, 废钢资源短缺的局面彻底扭转; 到 2030 年, 中国废钢资源总量可达 3.3 亿 t 以上, 其中折旧废钢资源量约为 2.7 亿 t, 占总量的 80%, 钢铁工业可利用废钢资源总量约为 2.7 亿~2.9 亿 t, 废钢资源供应充足。

2.2 工艺装备和炉型

对近两年来已投产或正在建设的电炉炉型进行技术分析。

2.2.1 传统式顶装料电炉

三相交流电弧炉用于工业生产已有一百多年历史了, 早期传统电炉的生产率比较低, 20 世纪初电炉炼钢技术取得了重大进展, 在电能为主要能源的基础上引进辅助能源和化学能源, 由于自动控制技术的发展, 功率输入由普通功率上升为高功率和超高功率, 消耗下降, 生产率有了极大程度提高, 达到了一个吨位公称容量年产钢超过 1 万 t, 即公称容量 100 t 电炉年产钢 100 万 t 以上。传统式电炉是早期的主流电炉, 废钢从炉顶加入, 即旋开炉盖用天车料篮加入废钢, 每炉钢需要加料 2~3 次甚至更多, 加料瞬间烟量大, 外溢非常明显, 热损失大, 需配备较大容量的变压器, 对电网冲击也相对较大, 电极消耗略高, 送电时噪声大, 一般采用炉盖第四孔除尘加厂房屋顶大烟罩或“狗窝(doghouse)”进行二次粉尘收集、噪声捕集。但经近几年炼钢技术的发展, 这种炉型越发表现出优异的技术经济指标和性能。如达涅利电炉在全废钢为原料的情况下, 冶炼周期少于 45 min, 电耗低于 280 kW·h/t, 电极消耗小于 1.2 kg/t, 最大特点为废钢适应性强, 留钢量在 30% 以下, 运行故障率非常低, 可达到智能化操作。

2.2.2 连续加料式电炉

连续加料式电炉是近几年新投产电炉中比较多的一种炉型, 最大的特点是冶炼过程中废钢连续加入, 不开炉盖、不停电, 能量输入不间断, 避免了巨大的能量损失, 烟尘不外溢, 从炉内抽出的高温烟气从连续加料的隧道通过, 也对废钢进行预热, 预热温度一般不超过 400 °C, 吨钢电耗可降 30~100 kW·h, 但需留钢量 60% 以上, 熔池比较平稳, 降低了传统电炉在电极穿井期巨大的噪声和对电网的冲击, 电极消耗吨钢下降 0.1~0.3 kg, 但一次性投资比传

统电炉高。国外供货主要是 Tenova, 国内中冶赛迪等电炉制造厂也在供货, 而且也做了改进, 具有自主知识产权, 它的最大特点是连续加料^[7]。

2.2.3 竖炉式电炉

目前有 4 种形式的竖炉式电炉: (1) Fuchs 竖炉式电炉。特点是废钢温度可预热至 600~800 °C, 在冶炼的同时, 用天车料篮在竖井中加入下一炉的废钢, 用指型托架拖住废钢, 废烟气从废钢中通过, 废钢温度预热可控制, 实现 100% 废钢预热, 可节约电耗, 生产率高, 但缺点是竖炉一次性投资较高, 指型托架易漏水, 维修难度大、故障率高等。尽管该炉型做了多项改进, 但还存在竖炉故障多、维修费用高等缺点, 目前已不是主流炉型。(2) ECOARC 电弧炉。日本 SPCO 公司研发的环保生态电弧炉, 利用竖炉的竖井来预热废钢, 可使用轻薄型废钢, 实现倾斜的料线上小车连续加料, 预热温度可达 600 °C 以上, 熔池稳定, 可使用各种辅助能源, 电耗低于 250 kW·h/t。电极消耗低于 0.9 kg/t, 一次性设备投资较高, 运行稳定, 最大的特点为能把废钢预热中产生的二噁英处理掉, 全球有 7 套此炉型电炉。(3) Quantum 电炉。普锐特公司对竖炉式电炉进行了改进, 用倾斜的料线上小车连续加料, 竖井和炉盖是固定安装的, Fuchs 竖炉式电炉的改进型解决了原指型托架故障多的缺点, 出钢时倾翻炉体实现无渣出钢。该炉型废钢可预热至 600 °C 以上, 电耗为 280 kW·h/t, 炼钢周期为 33 min, 电极消耗为 0.9 kg/t。目前 Quantum 电炉在墨西哥 Tyasa 有一座 100 t 电炉在生产, 目前中国已有此炉型在建设中。(4) Sharc (shaft arc furnace) 电炉。属于改进型双竖炉式直流电炉, 最大的特点为电炉上方有两个对称的双竖井, 加料方式还是天车料篮, 竖井内废钢铁由上升的炉气预热, 熔池稳定, 可 100% 废钢预热, 采用轻薄料, 堆密度可为 0.25~0.30, 废钢价格、电极消耗和冶炼成本较低, 其他原理与竖炉式电炉的预热废钢类似, 欧洲有 140 和 100 t 炉子在生产, 在中国已有 2 座此炉型正在建设中。

中国电炉炼钢已进入快速发展期, 这在业界已达成共识, 世界主流炉型在中国钢铁厂全部可以看到; 此外, 通过对技术的消化吸收再创新, 已创造出世界领先的技术经济指标, 见表 5。

2.3 技术运用与创新

围绕电炉炼钢高效、低成本、绿色化以及智能化的生产应用研究已经有了新的突破, 也支撑了电炉炼钢装备水平的不断提高。

表 5 近年来电炉炼钢的技术经济指标

Table 5 Technical and economic indicators of EAF steelmaking in recent years

指标	数值
冶炼周期/min	36
冶炼电耗/(kW·h·t ⁻¹)	280
电极消耗/(kg·t ⁻¹)	0.9
氧耗/(m ³ ·t ⁻¹)	40
生产率/(t·a ⁻¹)	10 000

2.3.1 废钢处理技术

2018 年社会废钢总量已超过 2 亿 t,废钢处理的技术成熟(图 2),废钢应用的标准正在制定中,这对城市废弃物废钢的收集、加工和配送到钢铁厂促进电炉技术价格指标提升是有意义的。电炉炼钢总能量有 10%~20%随烟气而排放,利用这部分能量来预热废钢,可达到电炉炼钢节能、降耗、提高生产率的目的。目前,各种废钢预热技术应用中,竖炉式电炉(Sharc 电炉,ECOARC 电炉和 Quantum 电炉)废钢预热温度是最高的,其次是连续加料式电炉(ConSteel 电炉)。

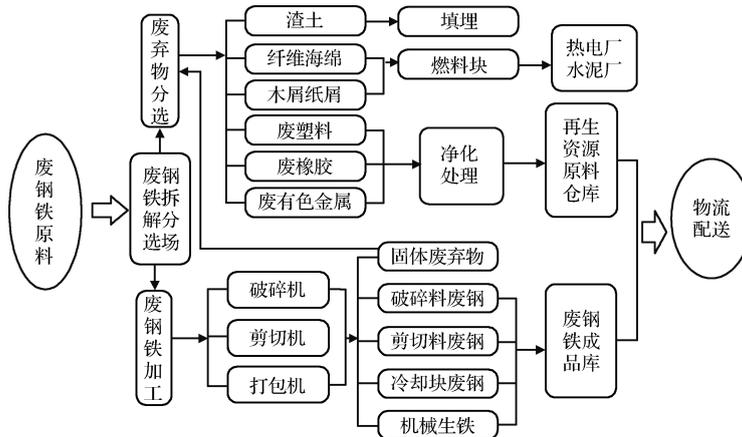


图 2 废钢加工配送总体工艺流程

Fig. 2 Process of scrap processing and distribution

2.3.2 二噁英治理技术

废钢在预热或冶炼过程中,温度到 400 °C 后会产 生 呋 喃 气 体 (二 噁 英),它 是 一 种 致 癌 物 质。首 先,主 要 采 用 源 头 控 制,即 在 线 检 测 和 人 工 分 选,最 大 限 度 地 减 少 含 氯 源 物 质 入 炉;其 次 是 利 用 炉 内 气 体 温 度 自 动 分 析,让 炉 气 进 入 除 尘 器 以 前 快 速 冷 却,催 化 或 抑 制 或 控 制 二 噁 英 的 产 生。一 般 情 况 下,烟 气 出 口 处 二 噁 英 含 量 控 制 为 0.5 ng-TEQ/m³。

2.3.3 余热回收技术

由于电炉炼钢的工艺特点,余热回收的研究应用比较滞后,但是废气带走总能量 10%~20%的热量回收会降低电炉炼钢的部分成本。目前部分电炉废气是通过强制通风冷却器来实现热交换的。回收热量又用于发电,也有部分热交换后转换为蒸汽,蒸汽与工厂管道并网或用于真空喷射泵等。此外,随着节能新技术的发展,用于储存非连续烟气余热热能储存系统也开始在工业中应用。总之,电炉余热回收技术越来越受到重视。

2.3.4 洁净化技术

洁净化技术包括提高钢的洁净度和减轻外部环境负荷内外两方面。电炉炼钢的主要原料为社会废弃物废钢,本身不消耗不可再生资源,使用最清洁的能源电能,发展电炉炼钢本身就是减排温室气体,促进绿色钢铁生产,如图 3 所示。

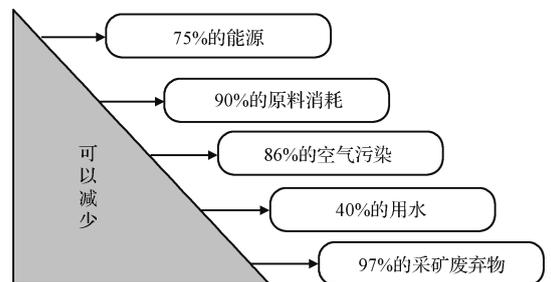


图 3 电炉流程使用的优势

Fig. 3 Advantages of EAF processes

2.3.5 智能炼钢技术

电炉智能炼钢的应用研究主要包括以下方面^[8]。(1)智能配料。在自动化的配料基础上,根据电炉设备参数、钢种生产工艺、原料使用量的条件及

化学成分,建立优化配料数学模型,采用数学规划方法计算成本最优的标准炉料结构,实现智能化配料。(2)电能智能调节。按不同冶炼工艺达到三相平衡控制,保证供电稳定。(3)炉门机器人。可解决自动测温取样、氧活度测定等高温恶劣环境下的各种工艺操作。(4)熔池温度连续测量。(5)泡沫渣检测与控制。(6)炉气在线检测。(7)吹炼终点控制。

2.3.6 冶炼过程成本优化控制技术

为降低电炉炼钢的成本而开发的控制系统,其基本原理为将影响成本的因素分为两类,分别为原料入炉量对成本的影响和未实现控制目标(冶炼变量)对成本的影响。将电弧炉冶炼变量分为两类:操作变量和控制变量。操作变量包括第四孔除尘风机功率、第四孔滑套移动距离、氧气输入速度、废钢(或DRI)加入速度和炭粉加入速度,控制变量包括炉压、CO排放量、废气温度、钢液质量、钢液温度、钢液中碳含量和泡沫渣高度。各种控制变量不是实时检测的,而是采用MPC系统预测的,每炉冶炼过程中不定期测量各控制变量,修正系统预测变量,实现冶炼过程成本优化控制。随着信息化技术和自动化技术的发展,电炉炼钢智能化不仅局限于某一环节,而是从系统工艺流程出发,将冶炼过程采集的信息和数据库进行综合分析、决策和控制,达到电炉炼钢过程的最优化^[6]。

3 中国电炉炼钢面临的问题

中国的电炉炼钢近几年在装备水平、工艺技术以及产品结构上有了相当大的进步,但还需要引导,合理发展。钢铁行业需要实现高质量发展,实现绿色化、智能化发展,还需要合理发展电炉炼钢工艺。

(1)电炉炼钢成本问题。长期制约中国电炉炼钢发展的主要因素是其产品成本比转炉炼钢的产品成本高。目前条件下主要原因为废钢和电力供应问题,2019年电炉钢成本要高出400元/t以上。

(2)电炉炼钢余热回收问题。由于电炉炼钢工艺的特殊性和历史原因,冶炼过程中余热的回收应用研究滞后,输入炉内总能量的10%~20%的能量没有很好利用,回收技术需要进一步发展。

(3)二噁英治理技术。废钢在升温过程中会产生二噁英气体,这种气体是强致癌物质。国家标准是 0.5 ng-TEQ/m^3 ,但目前绝大多数电炉未安装处理装置,环保要求严格的电炉(ECOANC电炉)排放已达到 0.1 ng-TEQ/m^3 。

(4)废钢行业的规范管理。完善的废钢加工体

系和分类详细的入炉废钢会提高电炉钢的竞争力,促进钢铁行业的转型升级。虽然行业有准入制度,但缺乏管理,政策落实不到位,回收配送等体系需要进一步完善。

(5)没有中国自主知识产权的电炉装备。中国电炉钢产量接近1亿t,占比已达到10%,产能置换的电炉近几年有百座以上、多种炉型,但尚无具有自主知识产权的电炉装备^[9]。

4 中国电炉炼钢的未来发展

中国钢铁工业正在进行结构调整,走高质量发展之路,这也为电炉炼钢的合理发展提供了契机。

(1)发展全废钢短流程电炉钢厂。工信部已核准264家废钢基地建设,年处理废钢2亿t以上,随着税收政策的落实和规范管理的推进,电炉用废钢将形成一批“回收-拆解-加工-分类-配送-应用”一体化的示范废钢基地。产品领域为长材,如螺纹钢、圆钢和线材等,年产钢材在100万t左右。生产高效、成本低,生产规范灵活,又实现了工艺流程的高效运转,具有很强的市场竞争力。

(2)电炉钢厂与城市和谐共存。电炉炼钢的主要原料为废钢,为城市废弃物。随着经济的发展,废钢会越来越多,预计到2025年,每年可产生2.6亿t以上的废钢量。电炉是唯一可以处理这么大的废钢量的手段,但要考虑在城市周边一定距离内建厂,尽可能地减少配送运输物流的费用;同时,在工艺流程中要对电炉冶炼的粉尘和噪声进行治理,对固体废弃物进行综合利用,对废钢预热和冶炼过程产生的二噁英进行治理,对余热进行回收,电炉短流程与长流程的比较优势就可以显现出来。所以,电炉短流程钢可以与城市和谐共存,但要全国范围内合理布局、统筹规划、有序合理地发展。

(3)中国即将进入电炉炼钢快速发展期。中国钢铁工业已进入结构调整和转型升级为主的发展阶段,不再是粗放发展,要走高质量发展之路。废钢政策正在逐步到位,电力供应和价格越来越有利于电炉炼钢,能源环境约束日益增强,电炉炼钢发展的条件正在逐步显现,预计到2030年,社会废钢资源可达到4亿t;此外,电炉装备制造也会达到国际先进水平,具有中国自主知识产权的电炉设备也会支撑电炉炼钢的发展。预计在2020—2030年电炉炼钢会进入快速发展期,电炉钢比例超过20%,这对建设绿色钢铁工业是关键的一步,是高质量发展中要重视的环节。

参考文献:

- [1] 徐匡迪,洪新.电炉短流程回顾和发展中的若干问题[J].中国冶金,2005,15(7):1.(XU Kuang-di,HONG Xin.Review of electric arc furnace process and problems in its development [J].China Metallurgy,2005,15(7):1.)
- [2] 殷瑞钰.当代电炉流程的工程进展评价[C]//中国电炉流程与工程技术研讨会文集.上海:中国金属学会,2005:236.(YIN Rui-yu.A view on development of contemporary mini mills with electric furnace steelmaking[C]//Proceedings of China Electric Furnace Process and Engineering Technology Seminar.Shanghai:The Chinese Society for Metals,2005:236.)
- [3] 李士琦.关于电炉炼钢能量问题的讨论[C]//中国电炉流程与工程技术研讨会文集.上海:中国金属学会,2005:54.(LI Shi-qi.Discussion on the energy problem of electric furnace steelmaking[C]//Proceedings of China Electric Furnace Process and Engineering Technology Seminar.Shanghai:The Chinese Society for Metals,2005:54.)
- [4] 赵沛,蒋汉华.钢铁节能技术分析[M].北京:冶金工业出版社,1999.(ZHAO Pei,JIANG Han-hua.Steel Energy Saving Technology Analysis [M].Beijing:Metallurgical Industry Press,1999.)
- [5] 王成喜,刘骁.电弧炉炼钢提高生产率的技术进展[J].炼钢,2005,21(6):48.(WANG Cheng-xi,LIU Xiao.Technical progress in improvement of EAF productivity[J].Steelmaking,2005,21(6):48.)
- [6] 彭兵,张传福,彭及.国外电弧炉炼钢的最新进展[J].钢铁研究,2000(3):47.(PENG Bing,ZHANG Chuan-fu,PENG Ji.Latest development in electric arc furnace steelmaking abroad [J].Research on Iron and Steel,2000(3):47.)
- [7] 李士琦,李伟立,刘仁刚.现代电弧炉炼钢[M].北京:原子能出版社,1995.(LI Shi-qi,LI Wei-li,LIU Ren-gang.Modern Electric Arc Furnace Steelmaking[M].Beijing:Atomic Energy Press,1995.)
- [8] 崔健,刘晓.电弧炉炼钢技术若干问题的实践与认识(1)[J].钢铁,2006,41(2):1.(CUI Jian,LIU Xiao.Practice and recognition of electric arc furnace steelmaking technology (1) [J].Iron and Steel,2006,41(2):1.)
- [9] 王定武.电炉短流程钢厂的发展趋势[J].中国冶金,2003,13(9):9.(WANG Ding-wu.Development trends of EAF compact route[J].China Metallurgy,2003,13(9):9.)