

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190137

中国高炉炼铁技术装备发展成就与展望

张福明^{1,2}

(1. 首钢集团有限公司, 北京 100041; 2. 北京市冶金三维仿真设计工程技术研究中心, 北京 100043)

摘 要: 近 40 年来,中国钢铁工业取得了巨大进步,钢铁产量连续多年居世界第一。中国高炉炼铁技术装备在大型化、现代化、高效化、长寿化等方面发展成就显著。2000 年以来,一批 5 000 m³ 以上特大型高炉、500 m² 以上大型烧结机、7.63 m 超大容量焦炉和年产 400 万 t/a 以上大型球团生产线相继建成投产,一系列自主研发、集成创新的炼铁关键技术在生产实践中取得重大应用成效。在技术装备大型化的同时,高炉富氧喷煤、无料钟炉顶、煤气干法除尘、顶燃式热风炉及高风温、高效低耗烧结技术、大型清洁炼焦技术等先进技术及其装备研发与应用成效显著,有力推动了炼铁技术装备进步。到 21 世纪中叶,中国钢铁工业格局和流程结构将发生重大变革,减量化、绿色化、智能化、高效化将是未来一个时期炼铁技术装备的主要发展趋势。

关键词: 炼铁; 技术装备; 高炉; 烧结; 球团; 焦化; 绿色化

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)11-0001-08

Prospect and development achievements of blast furnace ironmaking technologies and equipments in China

ZHANG Fu-ming^{1,2}

(1. Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100041, China; 2. The Research Center of Engineering Technology of Three Dimensions Simulating Design of Beijing, Beijing 100043, China)

Abstract: In the past 40 years,the Chinese iron and steel industry has made great progress,and the crude steel production output has ranked first in the world for many years. Chinese blast furnace ironmaking technological equipments have achieved outstanding achievements in large-scale,modernization, high-efficiency,long service life and so on. Since 2000,a batch of super large blast furnaces above 5 000 m³,large sintering machines above 500 m²,large volume coke ovens with battery height 7.63 m and large pelletizing production lines with an annual output of 4 million t/a have been built and put into commission in succession,and a series of the key technologies of integrated innovation and independent research have been achieved great achievements in production practice. At the same time of the technical equipments large sizing, lots of advanced technologies and equipments research and application have achieved remarkable results,such as blast oxygen enrichment and pulverized coal injection,bell-less top equipment,BF gas dry dust removal,dome combustion hot blast stove and high blast temperature technology,high efficiency and low consumption sintering technology,large scale clean coking technology,and so on. These achievements promote the progress of ironmaking technologies and equipments. Up to the middle of this century,great changes will take place in the situation and steel manufacturing process structure of China's iron and steel industry. Reduction,greenization,intelligentization and high efficiency will be the main development tendency of ironmaking technology and equipment in the coming period.

Key words: ironmaking; technical equipment; blast furnace; sintering; pelletizing; coking; greenization

1 概述

近 40 年来,中国钢铁工业发展迅猛,钢铁产量逐年增长^[1-3]。2018 年中国生铁产量达到 77 105 万 t,占世界生铁总产量的 62.23%^[4],中国和世界高炉生铁产量变化如图 1 所示(数据来源于国家统计局

网站和世界钢铁协会网站)。在钢铁产量增长的同时,中国冶金技术装备也取得长足进步,在炼铁、烧结、球团、焦化技术装备大型化、现代化、高效化、长寿化等方面成效显著^[5],经过 40 多年的自主创新、集成创新和引进消化、再创新,高炉炼铁技术装备发展成就举世瞩目、成就斐然。

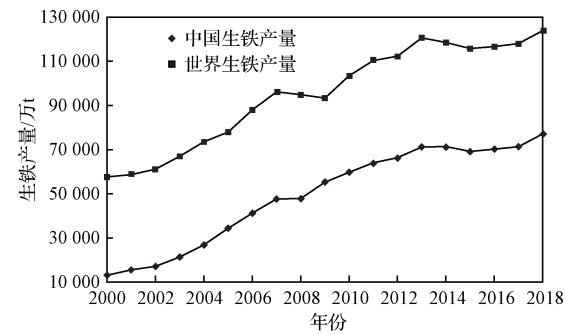


图 1 中国和世界高炉生铁产量变化

Fig. 1 Variation of blast furnace hot metal production in China and world

20 世纪 80 年代,宝钢工程引进日本技术和装备,建设了 4 063 m³ 高炉、450 m² 烧结机、6 m 焦炉等代表 20 世纪 80 年代初国际先进水平的大型炼铁技术装备。通过对宝钢工程单元工艺、技术、设备和装置的消化、吸收、移植和再创新,中国炼铁技术装备在已有技术的基础上,不断取得新的技术装备创新成果。

20 世纪 90 年代,中国炼铁技术装备自主集成、

自主创新能力显著提升,自主设计建造了一批 2 000~3 000 m³ 高炉、一批 260~450 m² 烧结机、一批年产 100 万~250 万 t/a 链算机-回转窑球团生产线和一批 6.0 m 顶装焦炉,自主集成国际先进技术设计建造了 3 200 和 4 350 m³ 高炉。

2000 年以来,中国炼铁技术装备自主创新能力持续增强,与发达国家“并驾齐驱”,有的甚至领跑世界。近 10 年,中国自主设计、建造了 5 000 m³ 以上特大型高炉、500 m² 以上大型烧结机,自主集成创新了 500 m² 以上带式焙烧机球团生产线和 65 孔 7.0 m 以上大型焦炉以及 260 t/h 干熄焦装置。这些具有国际先进水平的大型炼铁技术装备,支撑了中国钢铁工业的迅猛发展,提升了中国钢铁工业的综合技术实力。

2 发展现状

2.1 高炉

据不完全统计,2017 年中国约有 917 座高炉,高炉炼铁总能力约为 92 700 万 t/a^[6]。中国各级别高炉的数量和产能分布见表 1^[6]。

表 1 中国高炉级别的分布和产能

Table 1 Distribution and production capacity of blast furnaces in China

项目	≥3 000 m ³	2 000~3 000 m ³	1 200~2 000 m ³	450~1 200 m ³	≤450 m ³	合计
高炉数量/座	41	76	135	452	213	917
高炉产能/(万 t·a ⁻¹)	12 660	15 172	17 227	36 433	11 240	92 732

1985 年 9 月,通过引进日本技术设计建造的宝钢 1 号高炉(4 063 m³)建成投产,这是中国首座 4 000 m³ 以上的高炉。1990 年,武钢通过技术引进和集成创新,采用多项当时国际先进技术的武钢新 3 号高炉(3 200 m³)建成投产^[7],随后建成投产的还有宝钢 2 号高炉(4 063 m³)、3 号高炉(4 350 m³)等几座大型高炉。在此期间,首钢、鞍钢、马钢、包钢、本钢、唐钢等一大批自主设计建造的 2 000~2 500 m³ 级高炉相继建成投产,至 20 世纪 90 年代末期,中国大型钢铁企业的高炉技术装备水平普遍提高。2000 年以后,中国高炉技术装备大型化取得飞跃发展,鞍钢、武钢、首钢迁钢、天钢、唐钢、邯钢、梅钢等一大批 2 500~3 200 m³ 级高炉相继建成投产;宝钢、太钢、马钢、鞍钢鲅鱼圈、首钢迁钢、本钢、安钢、包钢等一批 4 000 m³ 级大型高炉也相继建成投产;特别是自主设计建造的首钢京唐 1 号 5 500 m³ 高炉是中国首座 5 000 m³ 以上特大型高炉,于 2009 年 5

月建成投产;其后沙钢 5 800 m³ 高炉于 2009 年 10 月建成投产,京唐 2 号高炉(5 500 m³)于 2010 年 6 月建成投产;宝钢湛江 2 座 5 050 m³ 高炉分别于 2015 年和 2016 年建成投产;山钢日照 2 座 5 100 m³ 高炉也即将建成投产。

近 20 年来,中国高炉大型化进程发展迅猛,高炉容积不断扩大,高炉技术装备水平不断提升。中国在 4 000 m³ 以上高炉的设计、建造和运行等方面,已经完全掌握了核心关键技术,全面实现了自主设计和技术装备国产化。

2017 年,中国有 23 座 4 000 m³ 以上高炉运行,其中有 6 座是 5 000 m³ 以上的特大型高炉^[8]。中国高炉大型化和技术装备现代化与淘汰落后、技术升级密切相关。近年来,中国加大产业结构调整 and 转型升级力度,通过供给侧结构性改革,淘汰落后产能和技术装备,产业结构调整和升级取得显著效果。目前,中国高炉平均容积达到 1 047 m³,高炉产能集

中在 1 000~2 000 m³ 级的高炉,这一级别的高炉产能约占生铁总量的 35.8%,而在 2011 年和 2014 年中国高炉平均容积分别为 580 和 770 m³[9]。

在高炉技术装备大型化、现代化、高效化的同时,中国高炉炼铁技术创新也取得重大进步[10]。自主设计研发了高炉无料钟炉顶设备及其炉料分布控制技术,在首钢京唐 3 座 5 500 m³ 高炉和湛江 2 座 5 050 m³ 高炉上得到成功应用;自主创新了特大型高炉煤气全干法布袋除尘技术和炉顶煤气余压发电技术(TRT),净煤气含尘量降低到 5 mg/m³ 以下,TRT 发电量达到 45 kW·h/t 以上,比传统的煤气湿法除尘工艺提高煤气余压发电量 35% 以上;采用顶燃式热风炉和高风温综合技术,在燃烧低热值高炉煤气的条件下,高炉风温达到 1 250~

1 300 ℃[11];通过采用合理高炉炉型、纯水(软水)密闭循环冷却、铜冷却壁、新型优质耐火材料、自动化监测等综合技术,可以延长高炉寿命,中国先进大型高炉寿命已达到 15 年以上;积极推广采用高炉富氧喷煤技术,先进高炉煤比已达到 180~200 kg/t 甚至更高。大型高炉鼓风机、煤气余压发电装置、无料钟炉顶设备、高效长寿铜冷却壁、高温长寿热风阀等高炉主要技术装备均已实现全面国产化。

近年来,中国高炉技术经济指标不断改善[12-14],高炉炼铁工序能耗从 407.62 降低到 390.8 kg/t,热风温度由 1 127 提高到 1 142 ℃,劳动生产率提高到 7 200 t/(人·a) 以上。近 4 年主要钢铁企业高炉技术经济指标见表 2。

表 2 近 4 年主要钢铁企业高炉技术经济指标

Table 2 Technical index of iron-making in blast furnace of main iron and steel enterprise in recent four years				
指标	2018 年	2017 年	2016 年	2015 年
高炉利用系数/(t·m ⁻³ ·d ⁻¹)	2.58	2.51	2.48	2.46
燃料比/(kg·t ⁻¹)	536	544	543	526
入炉焦比/(kg·t ⁻¹)	372	363	363	358
煤比/(kg·t ⁻¹)	139	148	140	142
热风温度/℃	1140	1142	1139	1134
入炉矿品位/%	57.4	57.3	57.0	57.0
熟料率/%	89.9	89.1	84.9	89.3
休风率/%	1.86	1.93	2.57	2.27
劳动生产率/(t·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)	7 263.9	7 227.2	6 998.1	6 093.8
炼铁工序能耗/(kg·t ⁻¹)	392.1	390.8	390.6	387.3

注:统计的钢铁企业为中国钢铁工业协会会员单位。

2.2 烧结

由于资源禀赋和技术传承,中国形成了以高碱度烧结矿配加酸性球团和块矿的高炉炉料结构,铁矿粉造块主要以烧结工艺为主。1985 年,宝钢通过引进国外先进技术,建成了中国第一台 450 m² 现代化大型烧结机,带动了中国烧结工艺技术的发展。2000 年以后,中国烧结技术进入了前所未有的高速发展时期,一大批 180~660 m² 大型烧结机相继建成投产,2010 年太钢投产的 660 m² 烧结机,是当时世界上最大的烧结机。

近 20 年来,通过对烧结机密封、给料、布料等装置的持续改进,在提高产量、改善质量、降低能耗等方面取得显著成效。近年来,中国烧结机大型化进程加快,2018 年中国 360 m² 以上烧结机已经超过 100 台,主要钢铁企业拥有 280 多台烧结机,烧结机

平均面积已经达到 240 m² 以上[15]。当前中国大型烧结机的设计、制造和运行均已经达到国际先进水平[16],为中国烧结生产技术进步奠定了坚实基础。

随着烧结机装备大型化,烧结新工艺、新技术、新设备的研发应用也取得了显著成效。烧结新型点火、偏析布料、超厚料层烧结、烧结机密封、烧结环冷机余热回收利用、烟气脱硫-脱硝等技术被广泛采用。烧结生产自动化、智能化控制水平不断提高;以针状复合铁酸钙(SFCA)为主的高碱度烧结矿得到普遍应用;烧结料层平均厚度达到 688 mm,最高可达 900 mm 以上。由于技术装备和生产水平的提高,烧结技术经济指标不断改善。2018 年中国主要钢铁企业烧结工序能耗降至 48.6 kg/t,烧结矿质量性能稳定提高。近 3 年主要钢铁企业烧结技术经济指标见表 3。

表 3 近 3 年主要钢铁企业烧结技术经济指标

Table 3 Technical index of sintering of main iron and steel enterprise in recent three years

项目	2018 年	2017 年	2016 年
烧结矿含铁品位/%	55.65	55.79	55.65
烧结矿转鼓指数/%	78.29	77.96	76.69
烧结固体燃料消耗/(kg·t ⁻¹)	53.16	52.87	53.08
烧结利用系数/(t·m ⁻² ·d ⁻¹)	1.28	1.28	1.26
烧结日历作业率/%	93.42	93.58	91.74
烧结工序能耗/(kg·t ⁻¹)	48.60	48.50	48.53

注:统计的钢铁企业为中国钢铁工业协会会员单位。

2.3 球团

长期以来,中国球团技术装备和产量在世界上均处于相对落后水平。2000 年以来,中国球团技术取得了迅猛发展,2017 年球团矿产能已增加到 17 000 万 t 以上。武钢鄂州、宝钢湛江相继建成了年产 500 万 t 链算机-回转窑球团生产线,引领中国链算机-回转窑装备大型化发展;带式焙烧机原料适应性强、生产规模大,工艺成熟、技术可靠^[17]。目前,中国生产运行的带式焙烧机共 6 台,分别是鞍钢 321.6 m²带式焙烧机、包钢 624 和 162 m²带式焙烧机、首钢京唐 3 台 504 m²带式焙烧机,中国带式焙烧机球团生产能力已达到 2 000 万 t/a 以上。目前,中国链算机-回转窑球团生产线约有 100 条,链算机-回转窑球团生产能力约占全国球团总产能的一半以上。

同烧结工艺相比,球团生产工艺具有产品品位高、质量高、能耗低、污染小等技术优势。近年来中国加快了球团技术的发展,采用铁矿粉高压滚磨、润磨预处理技术,赤铁矿、镜铁矿生产球团技术,降低膨润土技术,链算机-回转窑防止结圈技术,复合球团造块技术,混合原料复合球团制备与焙烧技术等取得成功应用,首钢京唐采用大型带式焙烧机生产含镁球团、含钛球团取得显著成效,镁质球团、碱性球团、自熔性球团的制备与应用获得成功,为中国高炉实现大比例球团冶炼创造了有利条件。

2.4 焦化

2000 年以来,中国焦化总体技术装备水平不断提高,焦炭产量持续增长。2016 年,中国独立焦化厂为 468 家,焦炭产能为 43 600 万 t;钢铁企业联合焦化厂为 134 家,焦炭产能为 25 100 万 t^[18]。2018 年,中国焦炭产量达到 43 820 万 t。

中国焦炉大型化及干熄焦(CDQ)技术的推广

应用,提高了焦炭质量,降低了炼焦能耗,减少了 CO₂ 和 NO_x 的排放,目前中国炼焦技术已经进入国际先进行列。中国干熄焦技术发展迅猛,已建成 75 套干熄焦装置,集成创新的 260 t/h 大型高温高压干熄焦装置达到国际领先。

2000 年以来,中国焦炉大型化、炼焦工艺多样化、炼焦自动化、节能环保、拓展炼焦煤资源、降低炼焦成本、焦炉煤气综合利用等方面均取得显著进步。在焦炉装备大型化方面,在 4.3 m 顶装焦炉的基础上,设计建造了 6、7、7.63 m 各种系列的大型顶装焦炉;捣固焦技术发展迅速,从 4.3 m 捣固焦炉发展到 5.5、6.25 m 捣固焦炉。在节能环保方面,积极研发和推广应用干熄焦技术、煤调湿技术、焦炉烟道气余热回收技术、焦化污水深度处理回用技术、焦炉烟道气脱硫-脱硝技术等,特别是在干熄焦技术领域取得显著应用成效,大型干熄焦发电量达到 100 kW·h/t 以上,节能减排效益显著。在拓展炼焦煤资源炼焦方面,开发并采用了捣固炼焦工艺多配加低价弱黏结性煤,使焦煤配比降低了 9%,肥煤配比降低了 5%,气煤、1/3 焦煤和瘦煤的比例相应提高 3.5%~6.5%,有效降低了炼焦成本。

目前,中国已经具备了 7 m 以上顶装焦炉以及 6.2 m 以上捣固焦炉的自主设计和建造能力。积极推广应用干熄焦技术,可回收 80% 的红焦显热,不仅降低炼焦能耗 50~60 kg/t,还有效提高了焦炭质量。随着焦化污水深度处理及回用技术、干熄焦技术的广泛应用,中国大中型钢铁企业的炼焦生产基本全部实现了焦化污水的净化处理和“近零排放”,焦化生产的工序能耗不断降低。2018 年,中国主要钢铁企业焦化工序能耗平均为 102.53 kg/t,比 2007 年降低近 40 kg/t。近 3 年主要钢铁企业焦化技术经济指标见表 4。

表 4 近 3 年主要钢铁企业焦化技术经济指标

Table 4 Technical index of coking of main iron and steel enterprise in recent three years

项目	2018 年	2017 年	2016 年
M ₄₀ /%	87.64	87.54	87.31
M ₁₀ /%	6.01	6.06	6.13
灰分/%	12.63	12.54	12.46
硫分/%	0.82	0.78	0.78
冶金焦率/%	90.70	89.30	90.16
洗精煤消耗/(kg·t ⁻¹)	1.37	1.38	1.37
工序能耗/(kg·t ⁻¹)	102.53	99.67	97.16

注:统计的钢铁企业为中国钢铁工业协会会员单位。

3 主要技术创新成就

3.1 富氧喷煤技术

中国从 20 世纪 60 年代开始在首钢、鞍钢高炉上喷煤,是当时世界上开发应用喷煤技术较早的国家之一。1990 年以后,高炉喷煤技术列入国家科技计划,1999 年宝钢 1 号高炉创造了月平均喷煤量达到 250 kg/t 以上的新纪录。目前,全国大中型高炉基本全部采用高炉喷煤技术,取得了显著的经济和环境效益。2017 年,全国高炉喷煤平均达到 143.16 kg/t,入炉焦比为 363.83 kg/t,宝钢、湛江、首钢京唐、太钢、武钢等部分大型高炉入炉焦比和煤比达到世界先进水平。高炉鼓风富氧率稳步提高,普遍达到 3%~5%,先进大型高炉鼓风富氧率达到 5%~10%,高炉鼓风量降低到 1 000 m³/t 甚至更低,为提高生产效率、改善高炉透气性创造了良好条件。在发展富氧喷煤的同时,还加强煤粉制备、输送、喷吹系统的安全设计和流程优化,首钢京唐 1 号高炉 2013 年 8 月率先使用氧煤枪技术,2 号高炉于 2014 年 6 月开始使用氧煤枪,高炉采用氧煤枪后,高炉顺行状况得到较好改善,风口前煤粉燃烧率和煤粉利用率得到提高。

3.2 高效长寿技术

在中国,高炉长寿化也取得突出进步,长期困扰高炉高效、安全、稳定、顺行、长寿的技术难题得到有效解决。近年来,中国在大型高炉设计体系、核心装备、工艺理论、智能控制等关键技术方面取得了重大进步。中国高炉在炉型设计、耐火材料选用及其结构设计、铜冷却壁、高效冷却方式、自动化监控系统以及高炉维护措施等方面,形成了高炉高效长寿综合技术体系,高炉长寿取得了显著成效,宝钢、武钢、首钢等企业的高炉寿命已达到 15 年以上,其中宝钢 3 号高炉寿命创下近 19 年中国高炉长寿新记录,进入世界先进行列。应当指出,中国高炉长寿技术发展很不均衡,高炉平均寿命仅为 5~10 年,个别高炉寿命更短,与国外先进高炉相比还存在较大差距。近些年,中国高炉长寿再次面临新的挑战,炉缸侧壁温度异常升高、铜冷却壁过早破损等技术问题仍需要认真研究解决。

3.3 高温技术

高温技术是高炉降低焦比、提高喷煤量、提高能源转换效率的重要技术途径。目前,大型高炉的设计风温一般为 1 250~1 300 °C,提高风温是 21 世纪高炉炼铁的重要技术特征之一^[19]。目前中国已

完全掌握在单烧低热值高炉煤气(热值约为 3 000 kJ/m³)条件下风温达到 1 250~1 300 °C 的高温风温的集成技术,其核心技术是通过预热煤气和助燃空气,使热风炉拱顶温度达到(1 380±20) °C,在送风期将热风温度稳定地维持在 1 250~1 300 °C,热风炉拱顶温度与风温之差缩小到 80~100 °C。设计研发并应用了多种结构形式高温热风炉,尤其是首钢京唐 5 500 m³高炉在世界上首次应用了顶燃式热风炉,实现了顶燃式热风炉的大型化;研发多种形式的煤气和空气双预热技术,使燃烧单一高炉煤气的热风炉拱顶温度达到 1 400 °C;研发应用小孔径高效格子砖,有效提高了热风炉传热效率;优化热风管结构,合理设置管道波纹补偿器及拉杆;采取有效措施防止炉壳发生晶间应力腐蚀,使热风炉达到长寿、高效。应当看到,中国高温技术发展并不平衡,先进与落后并存,部分先进大型高炉年平均风温可以保持在 1 250 °C 左右,但还有一批高炉年平均风温仍徘徊在 1 000~1 100 °C 区间,使中国高炉平均风温水平与国际先进指标相比差距较大。

3.4 高炉煤气干法除尘技术

目前中国自主研发的高炉煤气干式布袋除尘技术在设计研究、技术创新、工程集成及生产应用等方面取得突破性进展^[20],自主设计研发了大型高炉煤气全干式脉冲喷吹布袋除尘技术,完全取消高炉煤气湿式除尘备用系统。高炉煤气布袋除尘技术发展迅猛,近期中国新建或大修改造的高炉几乎全部采用煤气布袋除尘工艺,取得了显著的应用效果。首钢京唐 3 座 5 500 m³高炉以及宝钢、湛江、包钢等企业的大型高炉均采用了煤气干法除尘技术。通过自主创新和技术集成,有效解决了高炉煤气干法除尘的关键技术难题,取得了许多技术创新成果。如设计研发了煤气调温装置和喷碱脱氯装置,提高单箱体过滤能力,合理选择滤料,采用双向电磁脉冲喷吹技术,采用压力可调式正压气力输送装置,阀门和管道内壁喷涂耐磨涂层,波纹补偿器采用抗酸抗氯侵蚀的不锈钢材质等。

3.5 高效低耗烧结技术

2000 年以来,中国烧结工艺技术取得重大进展,烧结矿质量和性能显著提高。研发应用了低温烧结、超厚料层(1 000 mm 料层厚度)烧结、添加适宜 MgO 烧结矿制备技术、热风烧结、复合烧结技术、烧结烟气循环等,均取得较好效果。首钢研发应用了烧结料面喷吹蒸汽技术,改善了烧结过程的传热机制,有效降低了烧结过程的固体燃料消耗和污

染物的排放;梅钢开发应用了烧结料面喷吹焦炉煤气技术,使燃料消耗有效降低;烧结智能化控制技术取得较好应用;烧结过程多种污染物的协同控制和治理取得明显成效,活性焦、循环流化床烟气脱硫以及 SCR 脱硝技术在中国烧结机上得到推广应用,使烧结烟气中的 SO_2 、 NO_x 、粉尘和二噁英等得到有效脱除。

3.6 球团技术

近年来中国在球团技术领域发展成就突出,建成了一批带式焙烧机和链算机-回转窑球团生产线,球团技术装备大型化、现代化取得长足进步。中国拥有国际先进的 500 万 t/a 带式焙烧机和链算机-回转窑球团生产线,自主研发的链算机-回转窑和自主集成的带式焙烧机工程设计、装备制造、生产运行等均取得显著成效。通过技术攻关,有效解决了造球、布料、焙烧、回转窑结圈等技术难题,球团品位、强度等指标达到国际先进水平。积极研究高铁低硅酸性球团、含钛含镁球团、赤铁矿氧化球团,大型带式烧结机生产赤铁矿球团取得显著进展,碱性球团、自熔性球团、高镁低硅复合球团的生产取得成功;球团烟气脱硫-脱硝技术取得明显应用成效。

3.7 大型高效焦化技术

为降低配煤成本,节约优质炼焦煤资源,扩大炼焦煤源开发,中国结合国情开展了一系列研究工作,拓展弱黏结煤在炼焦中的应用。基于煤调试技术和炼焦煤水分调控技术,武钢 7.63 m 大型焦炉贫瘦煤配加量达 14%~16%,少用优质瘦煤达 10%以上,低变质弱黏结性煤配加量达 20%以上。马钢、攀钢、沙钢等焦化企业结合大容积焦炉用煤的特殊性,开展炼焦用煤细化分类使用技术及煤岩学配煤研究,实现了优化配煤、提高焦炭质量、降低生产成本。通过配加型煤炼焦技术,将弱黏性煤配加黏结剂后压制成型煤,与其余散状煤混合装入炼焦炉内炼焦。宝钢焦化工序设置了配加型煤设施,型煤配加量达到 15%~30%,焦炭质量可以满足 5 000 m^3 级高炉的要求。同时,中国干熄焦技术应用推广成效突出,总体技术达到国际先进水平;焦炉烟道气余热回收、烟道气脱硫-脱硝技术研发应用取得良好效果。

4 发展趋势与展望

4.1 技术装备对产业发展的推动作用

近 40 年来,中国高炉、烧结、球团、焦化等工序技术装备的大型化、现代化、高效化,有力支撑了中

国钢铁工业的快速发展,迅速提高了中国炼铁系统整体技术水平,为实现炼铁工业高效、低耗、优质、长寿、安全、环保做出贡献,使中国炼铁工业绿色低碳发展取得重要技术进步。与此同时,技术装备水平的提升,对于中国解决技术发展不平衡问题、淘汰落后、流程优化、产业升级、技术进步都具有重要的现实意义和深远的历史意义^[21],特别是近年来中国加大淘汰过剩和落后钢铁产能,钢铁工业供给侧结构性改革,取得了举世瞩目的成就。

面向未来,高炉炼铁的减量化发展仍是一项十分艰巨的任务。近年来,中国加大钢铁工业供给侧结构性改革力度,淘汰、关停了一大批技术装备落后、能耗高、污染大的小高炉、小烧结、小焦炉,通过淘汰落后、削减过剩产能,中国高炉数量明显减小、高炉平均容积逐渐增加,未来 1 200 m^3 以下的小高炉、100 m^2 以下的烧结机、竖炉球团以及落后的无回收小焦炉等都将淘汰。

4.2 总体发展趋势

到 21 世纪中叶,中国经济发展将从速度效率型向质量效益型转变,经济社会将保持平稳发展,持续提高发展质量,解决经济过快增长所带来的各种不平衡与不充分。在未来经济发展环境下,钢铁作为首选的功能性结构材料,仍将继续发挥不可替代的作用^[22]。

随着中国经济发展的速度减缓和增长方式转变,市场拉动将会降低,加上资源和能源可获取性的制约,以及生态环境治理的限制,直到 21 世纪中叶,中国钢铁产业发展必须坚持减量化^[23]。钢铁产业“去产能”将在未来很长一个时期内成为产业发展的主旋律,必须摒弃过去那种不讲条件、不顾市场、背离产业发展规律的粗放型盲目扩张的发展理念,钢铁项目“一哄而上”、“盲目攀比”而造成的钢铁产能过度扩张,导致钢铁产能严重过剩,产业发展举步维艰,为经济社会和产业发展带了沉重负担和巨大代价,教训惨痛、代价沉重,必须给予高度的关注,进行深刻的反思。

在钢铁产业减量化、集约化发展的背景下,必须坚持产业发展的科学性,自觉遵循产业发展的客观规律,以工程哲学的视野审视产业未来发展的方向、目标、路径和格局。在优质铁矿石资源和炼焦煤资源不断匮乏的未来,生态环境的制约也会日趋严苛,钢铁产业在未来一个时期内所面临的发展形势是:市场需求拉力减弱,资源、能源供给力不足,生态环境制约力增强。钢铁企业在这样一个发展环境下,

如果不坚持绿色发展,建设资源—能源节约型、环境友好型企业,将难以在愈加激烈的市场竞争中生存,更是勿谈发展^[24]。

今后,智能化将带动经济社会发展,成为整个经济社会发展的主流,技术装备智能化也将是钢铁产业的重要发展方向之一。对于炼铁工序而言,是大通量的物质流、能量流和信息流输入/输出的过程,基于人工智能的高炉操作专家系统、智能化烧结技术和智能化炼焦技术,将是未来炼铁技术装备发展一个重要方向。

4.3 产业发展格局

至 21 世纪中叶,中国钢铁产业结构和格局将发生重大变化。主要体现在钢铁产量将在一定时期内保持平稳,不再出现高速增长,这是中国经济转型发展和经济社会的市场需求所决定的,随着投资拉动效应的减缓,钢铁产量将出现下降趋势,市场供求将保持一种动态平衡。随着产业结构调整、生态环境治理和企业转型升级,将会有一批钢铁企业实现转型发展,转向新的产业领域,寻求新的经济增长点。未来 10 年间,中国钢铁技术装备水平将进一步提升,高炉炼铁技术装备大型化、现代化将成为主要特征,在生产总量严格控制、总体产能削减的前提下,一大批装备先进、绿色高效的大型高炉、大型烧结和新型焦炉将结合现有炼铁装备的技术改造和结构调整,进行装备升级改造。不仅是单体技术装备的大型化、现代化,而且高炉、烧结机、焦炉的数量将不断减少,总体生产规模和产能将逐步降低,达到合理的规模区间。

未来 10 年,中国钢铁产业和钢铁制造流程结构也将发生重大变化。随着社会废钢资源的不断积累,一定规模的电炉炼钢流程将会出现,不依赖高比例高炉铁水的电炉钢产量将逐渐增加。而且在可预见的未来,具有一定生产规模的熔融还原、直接还原等不依赖焦炭的非高炉炼铁装备将实现工业化生产。高炉炼铁的产量和比例都将出现下降,高炉炼铁减量化、绿色化、智能化将成为未来炼铁技术发展的主要趋势和方向。

5 结语

(1)近 40 年来,中国钢铁工业取得了举世瞩目的技术成就,钢铁产量以及主要炼铁技术装备达到或接近国际先进水平,为中国经济社会发展做出了重大贡献。

(2)炼铁技术装备大型化是 21 世纪以来最显著

的产业发展特征,以 5 000 m³ 以上特大型高炉的自主设计建造为代表,中国已经在特大型高炉、烧结、焦化等工序完全掌握了工程设计、装备制造、工程建设、运行操作等一系列技术,关键技术及生产指标达到国际先进水平。

(3)高炉喷煤、高风温等一系列关键共性技术,对于炼铁技术装备创新和产业技术进步,起到了至关重要的推动作用,对技术装备大型化和现代化起到了重要的支撑作用。

(4)面向未来,中国钢铁产业将发生重大变革,炼铁技术装备的发展应遵循产业发展战略、不断创新,实现炼铁技术装备的大型化、现代化、绿色化、智能化发展。

参考文献:

- [1] 张寿荣. 中国炼铁企业的前景[J]. 中国冶金, 2016, 26(10): 7. (ZHANG Shou-rong. Prospect of Chinese ironmaking enterprises[J]. China Metallurgy, 2016, 26(10): 7.)
- [2] 李新创. 新时代钢铁工业高质量发展之路[J]. 钢铁, 2019, 54(1): 1. (LI Xin-chuang. Road map to high-quality development of iron and steel industry in new age[J]. Iron and Steel, 2019, 54(1): 1.)
- [3] 赵沛,董鹏莉. 碳排放是中国钢铁业未来不容忽视的问题[J]. 钢铁, 2018, 53(8): 1. (ZHAO Pei, DONG Peng-li. Carbon emission cannot be ignored in future of Chinese steel industry[J]. Iron and Steel, 2018, 53(8): 1.)
- [4] 王维兴. 2018 年我国炼铁生产技术述评[J]. 世界金属导报, 2019-03-20(B02). (WANG Wei-xing. Review on Chinese ironmaking production technology in 2018[J]. World Metals, 2019-03-20(B02).)
- [5] 刘波,宋家齐. 湛江钢铁项目建设及高炉关键装备技术开发应用[J]. 中国冶金, 2019, 29(3): 63. (LIU Bo, SONG Jia-qi. Project construction and development and application of key equipment technology for blast furnace of Zhanjiang Iron and Steel[J]. China Metallurgy, 2019, 29(3): 63.)
- [6] 王维兴. 2017 年我国炼铁技术发展评述[C]// 2018 年全国炼铁生产技术暨炼铁学术年会文集. 杭州: 中国金属学会炼铁分会, 2018: 20. (WANG Wei-xing. Review on development of Chinese ironmaking technology in 2017[C]// 2018 Chinese Ironmaking Production Technology and Ironmaking Academic Annual Meeting Proceedings. Hangzhou: Ironmaking Branch of the Chinese Society for Metals, 2018: 20.)
- [7] 张寿荣,于仲洁. 中国炼铁技术 60 年的发展[J]. 钢铁, 2014, 49(7): 8. (ZHANG Shou-rong, YU Zhong-jie. Development of ironmaking technology in the past 60 years[J]. Iron and Steel, 2014, 49(7): 8.)
- [8] 杨天钧,张建良,刘征建,等. 持续改进原燃料质量提高精细化操作水平努力实现绿色高效炼铁生产[J]. 炼铁, 2018, 37(3): 1. (YANG Tian-jun, ZHANG Jian-liang, LIU Zheng-

- jian, et al. Constant improvement of raw material and fuel quality, improvement of delicacy operation level and endeavor for realizing green and efficient ironmaking production[J]. Ironmaking, 2018, 37(3): 1.)
- [9] 杨天钧, 张建良, 刘征建, 等. 近年来炼铁生产的回顾及新时期持续发展的路径[J]. 炼铁, 2017, 36(4): 1. (YANG Tian-jun, ZHANG Jian-liang, LIU Zheng-jian, et al. Ironmaking production in recent years and its sustainable development route[J]. Ironmaking, 2017, 36(4): 1.)
- [10] 张寿荣, 毕学工. 中国炼铁的去、现在与展望[J]. 炼铁, 2015, 34(5): 1. (ZHANG Shou-rong, BI Xue-gong. The past, the present and the prospects of ironmaking in China[J]. Ironmaking, 2015, 34(5): 1.)
- [11] 张福明. 高炉高风温技术发展与创新[J]. 炼铁, 2013, 32(6): 1. (ZHANG Fu-ming. Development and innovation of high blast temperature of blast furnace[J]. Ironmaking, 2013, 32(6): 1.)
- [12] 王维兴. 2016 年我国炼铁技术经济指标述评[J]. 世界金属导报, 2017-02-28(B02). (WANG Wei-xing. 2016 Review on ironmaking technical economic indexes of China[J]. World Metals, 2017-02-28(B02).)
- [13] 杨天钧, 张建良, 刘征建, 等. 化解产能脱困发展技术创新实现炼铁工业的转型升级[J]. 炼铁, 2016, 35(3): 1. (YANG Tian-jun, ZHANG Jian-liang, LIU Zheng-jian, et al. Transformation and upgrade of ironmaking industry via addressing over capacity defusing difficulty, and by technical innovation[J]. Ironmaking, 2016, 35(3): 1.)
- [14] 沙永志, 滕飞, 曹军. 我国炼铁工艺技术的进步[J]. 炼铁, 2012, 31(1): 7. (SHA Yong-zhi, TENG Fei, CAO Jun. Progress of ironmaking technology in China[J]. Ironmaking, 2012, 31(1): 7.)
- [15] 许满兴, 张玉兰. 新世纪我国烧结生产技术现状与发展趋势[J]. 烧结球团, 2017, 42(2): 25. (XU Man-xing, ZHANG Yulan. Present situation and development trend of sintering technology in the new century in China[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(2): 25.)
- [16] 张福明, 颜建新. 冶金工程设计的发展现状及展望[J]. 钢铁, 2014, 49(7): 41. (ZHANG Fu-ming, XIE Jian-xin. Prospect and developing status of metallurgical engineering design[J]. Iron and Steel, 2014, 49(7): 41.)
- [17] 王海风, 裴元东, 张春霞, 等. 中国钢铁工业烧结/球团工序绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 1. (WANG Hai-feng, PEI Yuan-dong, ZHANG Chun-xia, et al. Green development of sintering/pellet procedure in China iron and steel industry[J]. Iron and Steel, 2016, 51(1): 1.)
- [18] 李超, 郑文华. 我国焦化行业近况、展望及应对[J]. 河北冶金, 2018, 265(1): 1. (LI Chao, ZHENG Wen-hua. The current situation, prospect and countermeasures of Chinese coking industry[J]. Hebei Metallurgy, 2018, 265(1): 7.)
- [19] 张福明. 高风温低燃料比高炉冶炼工艺技术的发展前景[J]. 中国冶金, 2013, 23(2): 1. (ZHANG Fu-ming. Developing prospects on high temperature and low fuel ratio technologies for blast furnace ironmaking[J]. China Metallurgy, 2013, 23(2): 1.)
- [20] 张福明. 21 世纪初巨型高炉的技术特征[J]. 炼铁, 2012, 31(2): 1. (ZHANG Fu-ming. Technical features of super large sized blast furnace in earlier 21 century[J]. Ironmaking, 2012, 31(2): 1.)
- [21] 张福明, 钱世崇, 殷瑞钰. 钢铁厂流程结构优化与高炉大型化[J]. 钢铁, 2012, 47(7): 1. (ZHANG Fu-ming, QIAN Shi-chong, YIN Rui-yu. Blast furnace enlargement and optimization of manufacture process structure of steel plant[J]. Iron and Steel, 2012, 47(7): 1.)
- [22] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2009. (YIN Rui-yu. Metallurgical Process Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.)
- [23] 殷瑞钰. 以绿色发展为转型升级的主要方向[N]. 中国冶金报, 2013-10-31(1). (YIN Rui-yu. Taking the green development as the main direction of transformation and upgrading[N]. China Metallurgical News, 2013-10-31(1).)
- [24] 张福明. 面向未来的低碳绿色高炉炼铁技术发展方向[J]. 炼铁, 2016, 35(1): 1. (ZHANG Fu-ming. BF ironmaking technological development trend characterized by green and low carbon emission[J]. Ironmaking, 2016, 35(1): 1.)