DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.02.004

绿色冶金创新发展战略研究

柴立元 [1,2]，王云燕 [1,2*]，孙竹梅 [1,2]，司梦莹 [1,2]，梁彦杰 [1,2]，闵小波 [1,2]

（1. 中南大学冶金与环境学院，长沙 410083；2. 国家重金属污染防治工程技术研究中心，长沙 410083）

摘要：冶金工业是国民经济与国防建设的重要基础原材料产业，冶金工业发展水平代表着国家工业化发展水平；绿色冶金能够创新产业可持续发展模式，突破资源、能源、环境的多重制约因素，是我国冶金工业今后发展的必经之路。结合“碳达峰、碳中和”“国内国际双循环”“供给侧结构性改革”等时代背景，本文全面分析了国内外钢铁与有色金属的资源、能源现状及其发展态势，综合评述了冶金工业技术发展现状，从资源、能源、环境多维度审视绿色冶金创新发展形势，进而凝练面临的重大问题；在绿色冶金创新发展态势预测与潜力分析的基础上，研判了绿色冶金创新发展的重大战略需求。研究建议：强化冶金强国战略地位，超前布局无废冶金颠覆性技术，部署资源能源替代与减污降碳冶金重大创新工程，实施绿色冶金政策与标准以引领产业发展，构建冶金创新人才保障体系与科普平台。

关键词：冶金工业；绿色冶金；冶金强国；态势预测；潜力分析

中图分类号：TF-9　　**文献标识码：**A

Innovative Development Strategy of Green Metallurgy

Chai Liyuan [1,2], Wang Yunyan [1,2*], Sun Zhumei [1,2], Si Mengying [1,2], Liang Yanjie [1,2], Min Xiaobo [1,2]

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Chinese National Engineering Research Centre for Control & Treatment of Heavy Metal Pollution, Changsha 410083, China)

Abstract: As a basic raw material industry, metallurgical industry is crucial for national economy and defense construction. Its development level reflects the industrialization process of a country. The metallurgical industry currently faces multiple constraints in terms of resource, energy, and environment. To address these constraints, green metallurgy is the only way and can create a sustainable development mode for future development of the metallurgical industry in China. Considering the background of carbon peak and carbon neutrality, domestic and international dual circulation, as well as supply-side structural reforms, we analyze the current status and development trend of steel and nonferrous metals in China and abroad, and review the development status of metallurgical technologies. Moreover, we examine the innovative development of green metallurgy from the perspective of resource, energy, and environment, and summarize several major problems. Based on the prediction and potential analysis, we present the major strategic demand for green metallurgy and propose the following countermeasures: enhancing the strategic position of the metallurgical industry, developing disruptive technologies for waste-free metallurgy, deploying major innovation projects regarding resource and energy substitution as well as control of environmental pollution and carbon emission, implementing green metallurgy policy and standards,

收稿日期：2022-01-22；**修回日期：**2022-02-27

通讯作者：[*]王云燕，中南大学冶金与环境学院教授，研究方向为冶金环境工程；E-mail: wyy@csu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“绿色冶金创新发展战略研究”(2021-XZ-26)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

and creating an innovative talent training system and science popularization platforms.
Keywords: metallurgical industry; green metallurgy; metallurgical power; situation prediction; potential analysis

一、前言

绿色冶金指复杂物料冶金过程中资源、能源利用效率和环保效益的最大化，是一种综合考虑资源、能源消耗及环境影响的金属冶炼模式；旨在使金属产品在涵盖设计、生产、包装、运输、使用、报废的全生命周期中，能耗最小、资源利用率最高、环境负面影响最小，同时促进企业经济效益、环境效益、社会效益的协调优化与和谐发展。

绿色冶金是清洁低环境熵变的冶金过程：狭义上表现为冶金过程资源循环、能源低碳、生态环保；广义上表现为冶金原料无害化，冶炼废物资源化，生产过程洁净化、智能化，过程控制数字化。强调从源头控污减污的发展策略，但不完全排斥末端治理；主要从过程科学、技术与工程研发角度着手，发展环境友好的生产工艺（如原料、能源的选择及替代）、技术装备、制造流程、绿色产品及其服务等过程，解决环境污染与可持续发展之间的矛盾，促进环境效益与经济效益的高度统一、共同增长。

绿色冶金以密切依赖企业发展模式转型，强调企业更加关注经济、社会、环境效益的统一为前提，发展要素表现为：冶金产业结构的优化升级及全面绿色化转型，产业链上、跨产业之间的资源高度循环与清洁能源替代。着眼冶金工业资源、环境、能源问题，基于宏观政策支持，通过资源高度循环、企业绿色转型，实现资源能源效益最大化、环境排放最小化、增值冶金效益最大化（见图 1）。

着眼未来发展，面向国家关键金属资源需求，筑牢冶金工业对国家高质量发展的基础支撑，提升绿色冶金的产业创新效率，实现创新产业链的深度融合，尽快扭转战略性关键金属方面的被动局面，由此增强冶金强国战略地位。鉴于国家战略需求与冶金工业发展面临资源、能源和环境约束的重大矛盾，系统开展我国绿色冶金的学术研究意义重大。本文把握与冶金工业紧密关联的时代背景因素并剖析其影响，阐述国内外钢铁与有色金属的资源、能源现状并进行发展态势评述；审视并剖析绿色冶金创新发展的形势及重大问题，就态势与潜力开展预测研究；据此提出绿色冶金创新发展的战略需求及发展建议，为冶金强国战略研究提供基础性参考。

二、绿色冶金创新发展的时代背景

（一）碳达峰、碳中和形势下冶金工业的发展

目前，我国是全球最大的 CO_2 排放国 [1]，已正式提出了“CO_2 排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”的发展目标。钢铁行业是我国制造业 31 个门类中碳排放量最高的行业。20 多年来，我国钢铁产量呈现较快增长态势（见图 2）[2]，预测未来 15 年仍将保持适度的增长率。碳达峰、碳中和的宏观发展形势，将助推钢铁行业构建更高水平的供需动态平衡，优化工艺流程结构，实现冶炼技术革命；实施产业智能化升级，加大多产业协同的环保治理力度，促进钢材产品的全生命周期评价，制定适应国情的行业低碳标准。

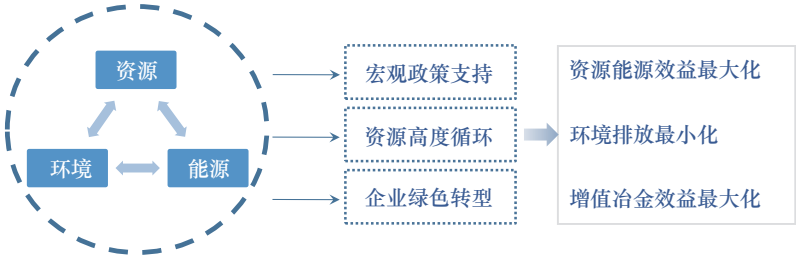

图 1　绿色冶金的发展路径与模式示意

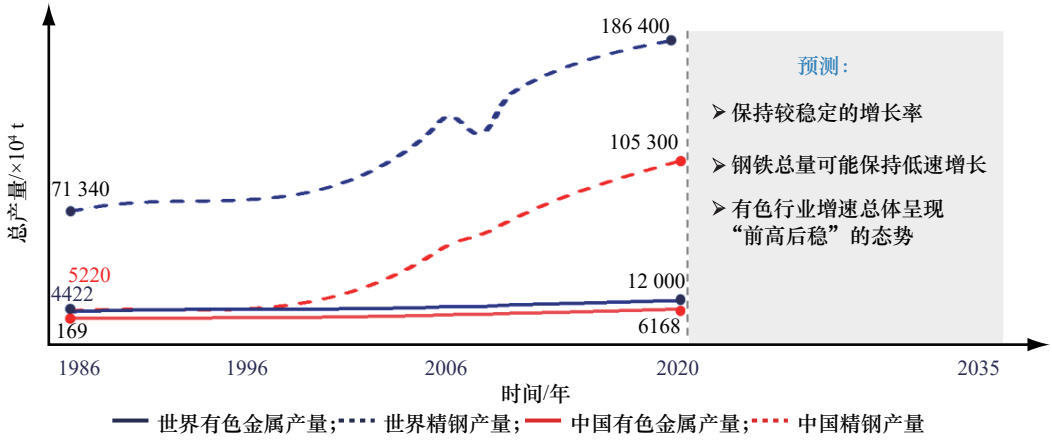

图 2　世界及中国钢铁与有色金属产量变化趋势

30 多年来，我国有色金属产量呈现较快增长态势（见图 2）[3]，预测未来 15 年仍将保持稳定增长，整体表现为“前高后稳”。2020 年，有色金属工业 CO_2 排放占全国总排放量的 4.7% [4]，其中电解铝约占有色金属工业总排放的 64.6%，将是有色金属工业实现碳达峰的重要方面。《国家发展改革委等部门关于严格能效约束 推动重点领域节能降碳的若干意见》（2020 年）要求，推动电解铝等重点行业的绿色低碳转型 [5]。在碳达峰、碳中和目标提出后，需继续保持电解铝产能上限值（4.5×10^7 t），严控新增铜、铅、锌冶炼产能，提高清洁能源使用比例，扩大再生有色金属利用范围，争取全行业提前实现碳达峰；开发并应用绿色减碳技术，争取在碳达峰后以良好的速度减碳。

（二）国内国际双循环产业政策下冶金工业的发展

我国钢铁生产坚持以国内循环为主，2019 年钢材出口比例仅为 6.6%，在粗钢产量超 2×10^7 t 的国家中出口比例最低。在强调国内国际双循环的背景下，未来钢铁行业的格局变化主要体现为国内形成新的供需平衡、拓展新的外需市场。同时在“一带一路”倡议的指引下，我国钢铁企业不断提升国际化水平，旨在实现更高质量的开放合作。

在有色金属行业，内循环将继续扩大有色金属的国内消费，外循环则经由国际市场保障供给安全，以加快形成以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局。

（三）供给侧结构性改革背景下冶金工业的发展

在国家供给侧结构性改革要求提出之后，钢铁行业的商业模式积极开展全面升级，装备水平、产品结构已经迈向世界先进行列，支撑我国成为世界钢铁行业的制造中心、消费中心、研发中心、投资中心。例如，冶炼钢种（包括高温合金、精密合金在内）超过 1000 个，可轧制、加工 4 万多个品种规格的钢材；22 大类钢铁产品中有 19 类自给率超过 100%（其他 3 类超过 98.8%）。“十四五”时期，供给侧结构性改革仍是钢铁行业发展的主线，重心则转向产品类型高端化、关键环保技术提升等。

在供给侧结构性改革背景下，部分有色金属冶炼能力快速增长的势头得到遏制；供给侧受到压制，而新的需求空间将被打开，导致国内供需缺口可能逐步扩大。有色金属工业后续将加快智能化改造进程，保持高端、绿色、低碳、安全发展势头，提升有色金属新材料的高端供给能力；拓展内需市场，不断提升有色金属行业发展质量效益。

三、国内外冶金资源开发利用现状及发展态势

（一）钢铁资源现状及发展态势

世界铁矿石资源储量较为丰富，集中在澳大利亚、巴西、俄罗斯和中国，合计储量占比基本稳定在 70% 左右；但我国 98% 为贫矿（含铁量仅为 35%），明显低于其他三国富矿水平（含铁量约为

64%）。此外，几内亚的西芒杜铁矿是世界上尚未开发铁矿中储量最大、品质最高的露天赤铁矿资源，合理推断的铁矿石储量超过 2.25×10^9 t，潜在总量可达 5×10^9 t，整体品位约为 66%~67% [6]

目前，我国铁矿石产量与粗钢产量明显失配，突出表现为铁矿石的对外依存度达到 85%。预测未来 15 年，我国粗钢产量仍将保持低速增长，因而铁矿石依赖进口的局面仍将持续，但进口途径趋于多元化。例如，2020 年我国从几内亚的进口量同比增长显著，对“一带一路”沿线国家进口量正在稳步上升，从印度的进口量也有积极增长。此外，我国积极参与国际开发市场，逐渐加大海外矿产的开发利用力度，非洲铁矿区的深度开采有望持续供应 2.4×10^9 t。

废钢铁可视为绿色资源，加大利用可减少 CO_2 及固体废物排放；既有助于钢铁工业节能降耗，也是唯一可替代铁矿石的炼钢资源。《“十四五”循环经济发展规划》（2021 年）提出，到 2025 年全国废钢利用量达到 3.2×10^8 t [7]，以废钢为原料的粗钢占比逐渐提高。

（二）有色金属资源现状及发展态势

全球有色金属资源储量相对集中，但分布比较分散。我国的镁、钨、钼、稀土资源等均属全球范围内储量极其丰富的品种。澳大利亚、智利、秘鲁、巴西是著名的矿藏资源国，如澳大利亚典型的品种是钽、锆（全球占比超过 60%），金红石（近 50%），铅、锌、镍、铝土矿（超过 20%），金、银、钴、铜、锂、锑（超过 10%）；智利、秘鲁具有明显的铜资源优势，巴西的钽、铌（全球占比约为 90%），锡、镍（分别约为 15%、13%）资源储备丰厚。此外，非洲地区的储量潜力大，如刚果（金）的钴储量约占全球总量的 50%，几内亚是铝土矿高储量国家。

从资源总量角度看，我国是有色金属矿产资源大国，镁、钛铁矿、钨、钼、稀土等资源储量均居世界首位，铝土矿、铜、铅、锌等资源储量也属丰富。但随着新一代信息技术、高端装备制造等战略新兴产业的快速发展，我国矿产资源需求仍将保持高位态势：铝土矿、钛等低品质矿供大于求，高品位需求仍依赖进口；作为世界第一大精炼铜、铅、锌生产国，相关精矿进口需求依然较大，正在积极拓展海外资源；稀土消费量占全球总量的 57%，稀土进口量逐渐增长；镍、钴矿资源相对较少，如镍矿资源对外依存度达到 90%。

预测未来 15 年，我国有色金属消费总量增长并维持高位的态势将会持续，矿产资源需求仍然旺盛。然而，新增资源储量跟不上储量消耗的增长速度，国内资源有效供应能力依然偏低，部分矿产资源依赖进口的局面仍将继续。目前，矿产资源面临的需求量大、全球市场控制力不足且话语权不强、供应链与运输安全性待提升等问题，导致我国矿产资源供应形势严峻的格局未有好转 [8]。着眼未来发展，应充分利用再生有色金属资源（到 2025 年，再生有色金属产量将达 2×10^7 t，其中铜、铝、铅分别为 4×10^6 t、1.15×10^7 t、2.9×10^6 t [7]），开发低品位、难处理、复杂矿等提升国内资源保障力；积极推进境外矿山项目建设，提升国际资源保障力，形成“原生 + 再生 + 难开采”协同发展的新格局。

四、我国冶金工业发展现状及面临问题

（一）钢铁冶金现状与挑战

1. 钢铁冶金发展现状

我国钢铁产量、消费量、进出口量连续多年位居世界第一。2020 年，我国钢铁产量为 1.065×10^9 t，占世界总产量的 56.7%；全球前 50 大钢铁公司中，国内企业数量占据一半；成品钢表观消费量为 9.95×10^8 t，出口总量为 5.14×10^7 t，进口总量为 3.79×10^7 t [2]。对应地，我国铁矿石主要依赖进口。2020 年，进口量占总消耗量的 82.35%，约 80% 的进口矿源来自澳大利亚、巴西；全国废钢利用量约为 2.6×10^8 t，减少 CO_2 排放量约 4.16×10^8 t [2]。

近年来，随着落后产能加快退出、短流程炼钢迅速发展、节能工艺技术装备水平不断提升，我国企业的吨钢综合能耗持续下降，2020 年为 0.551 tce（比 2015 年下降 3.7%），与世界先进水平差距逐渐缩小。尽管如此，因庞大的行业产能，2020 年钢铁行业能源消费在全社会能源消费总量中的占比超过 13%。后续，我国将全面落实钢铁行业超低排放，拓展节能减排新途径，实现钢铁工业绿色可持续发展；基于高质量发展理念引领，保持甚至拓展钢铁工业未来发展空间也是需要面对的问题。

我国钢铁行业污染物排放强度已进入世界先进水平行列。2020 年，钢铁企业吨钢耗新水同比下降

4.34%，化学需氧量同比下降 10.11%，SO_2 排放量同比下降 14.38%；钢渣利用率同比提高 0.98 个百分点，焦炉煤气利用率同比提高 0.08 个百分点 [9]。

我国钢铁工业技术装备整体达到国际先进水平，在钢铁工业设计与设备制造、施工建设综合能力方面甚至引领世界发展。钢铁冶炼进入以自主创新、集成创新为主的发展阶段，在溅渣护炉 [10] 与长寿复吹工艺 [11,12]、薄板坯连铸连轧高效化生产技术 [13,14]、“负能炼钢”工艺与装备技术 [15,16]、高效低成本洁净钢生产技术 [17]、减碳熔融还原技术 [18]、氢能炼钢技术 [19,20]、钢企智能化制造技术 [21] 等方面取得了系列成就。

2. 钢铁冶金发展面临的问题

铁矿石是钢铁生产企业的重要原材料，我国铁矿石品位较差，合格铁精矿产率较低。为应对基础设施建设需要，我国铁矿石的需求量大增，而自主供应无法满足钢铁生产需求，只能依靠进口来弥补供需缺口。

近年来，我国钢铁行业建设项目的区域分布均衡性不佳，呈现“南多北少”格局；特钢产量占比偏低，而中高端特钢占比更低，仍需部分进口才能满足装备发展需求。

我国钢铁工业在技术体系、绿色发展等方面都取得了显著提升，但钢铁冶金面临的资源 / 能源 / 环境负荷增加、工艺流程复杂化、能源结构高碳化等问题并未消除，实现碳达峰、碳减排、碳中和面临极大挑战。

（二）有色冶金现状与挑战

1. 有色冶金发展现状

近年来，我国有色金属工业转型升级成效显著，主要表现在规模优势得到提升，粗铜、精炼铜、电解铝产量居世界首位，产能结构调整取得新进展；绿色转型呈现新面貌，创新能力迈上新台阶，智能制造达到新水平。

我国是世界有色金属生产和消费第一大国，10 种常用有色金属产量的世界占比长期稳定在 50% 以上。2020 年，有色金属总产量为 6.188×10^7 t，其中精炼铜、铜材产量分别为 1.003×10^7 t、2.046×10^7 t，同比增速分别为 7.4%、0.9% [22]；氧化铝、电解铝、铝材产量分别为 7.313×10^7 t、3.708×10^7 t、5.779×10^7 t，同比增速分别为 0.3%、4.9%、8.6%。再生有色金属产业规模不断壮大，2020 年总产量达到 1.45×10^7 t，占 10 种有色金属总产量的 23.5%。其中，再生铜产量为 3.25×10^6 t（对应占比为 32.4%），再生铝产量为 7.4×10^6 t（对应占比为 20%），再生铅产量为 2.4×10^7 t（对应占比为 37.25%）[7]。

有色金属冶炼行业重点金属的综合能耗逐步下降。2020 年，单位电解铝综合能耗同比下降 1%；吨铜冶炼综合能耗下降至 0.212 tce，部分冶炼企业综合能耗在 0.15 tce 以下，达到行业国际顶尖水平；吨铅综合能耗由 2012 年的 0.467 tce 降低至 0.345 tce；1 kg 氧化钼焙烧耗煤从 0.4 tce 降至零。在 CO_2 排放量方面，2020 年有色金属工业为 6.6×10^8 t，占全国总排放量的 4.7%。其中，铝工业 CO_2 排放量约为 5.5×10^8 t，铜、铅、锌等其他有色金属冶炼业约占 9%，铜、铝压延加工业约占 10%。

有色金属冶金行业在环境保护方面取得重大进展。大气污染重点防控区的电解铝企业整体达到超低排放水平，如烟气排放颗粒物低于 10 mg/m^3、SO_2 降至 35 mg/m^3、氟化物低于 1 mg/m^3。铜冶炼各项技术经济指标持续优化，铜冶炼企业硫的捕集率、回收率均达 99%。氧化铝工业初步实现了赤泥的综合利用，可回收铁、碱等有价元素和产品的综合利用量超过产量的 25%。

我国有色金属工业技术装备水平整体进入世界先进行列。以 500 kA、600 kA 大型铝电解槽，新型阴极结构等铝电解节能技术为代表，电解铝工业技术达到国际领先水平；以氧气底吹 / 侧吹炼铜、氧气顶吹炼铜、双闪炼铜为代表，铜冶炼工业技术达到世界一流水平；铅、锌、镍、锡冶炼技术达到或接近国际先进水平；镁、钛、钨、钼冶炼，稀土冶炼分离等技术取得重大进步。

2. 有色冶金发展面临的问题

有色金属工业面临高质量发展的新形势，如电解铝等产品需求即将转入平台期，规模数量型需求扩张动力趋弱。

我国有色金属资源循环利用率较低（仅为 30%），而发达国家普遍在 70% 以上。再生有色金属的产业定位调整为节能环保产业和战略性新兴产业，在资源环境安全、经济社会绿色发展方面的重要性凸显；但与原生矿产资源相比，有色金属二次资源具有原料来源不确定性、资源丰富性及多样性、

组分高度复杂性、组元含量高波动性、材料高致密性及复合性等特性，回收处理过程相对复杂。

有色金属冶金工业产生的“三废”问题依然突出。截至 2020 年，全国尾矿累计堆存量约为 2.07×10^{10} t，其中铜尾矿约为 3.5×10^{9} t，钨尾矿约为 4.5×10^{8} t；综合利用的尾矿总量约为 3.35×10^{8} t，综合利用率仅为 28%；冶炼废渣产生量约为 3.7×10^{5} t，包括赤泥、铜渣、镍渣等。因此，有色金属行业的节能减排及资源综合利用形势复杂、任务艰巨。

五、绿色冶金创新发展态势预测与潜力分析

（一）绿色冶金发展态势预测

绿色发展是推动我国冶金行业高质量发展的重要内容、关键体现、终极目标，以资源、能源、环境良好协调的物质循环型社会为核心。冶金产业的发展方向为产业布局合理、技术装备先进、智能化水平高、全球竞争力强、绿色低碳可持续。展望新时期的冶金行业技术，其发展态势定位为综合应对资源、能源、环境等挑战的技术体系，核心课题是促进环境保护与物质循环。

1. 破解资源循环利用难题，突破资源、环境束缚

资源化循环利用是冶金工业绿色发展的必然趋势，而废钢利用将逐步缓解铁矿石依赖进口的局面。以废钢为代表的钢铁循环材料是充分还原后的金属，属于载能、环保的绿色资源；大比例使用钢铁循环材料将是未来低碳冶金的重要发展方向，在节约高炉铁水使用的同时，大幅减少 CO_2 和污染物排放。2020 年，我国废钢利用量约为 2.6×10^{8} t，可减少 CO_2 排放约 4.16×10^{8} t，等效替代 62% 品位铁精矿约 4.1×10^{8} t；预计到 2025 年废钢利用量约为 3.2×10^{8} t [7]。

我国 10 种有色金属的表观消费量将持续上升，预计 2025 年达到 8.162×10^{7} t，需求的增长加剧了资源对有色金属行业发展的束缚。未来应全面、超前部署资源替代综合方案，建设再生资源循环回收体系，实现再生资源占比提高 15%~50% 的基本目标。创新原生冶炼搭配城市矿产利用技术，破解资源循环利用难题；实施“采选冶”联合，提升钢铁、有色资源利用水平，进而实现绿色低碳冶金；强化尾矿、冶炼废渣等的循环利用。从全生命周期角度着手，提高冶炼技术水平，显著降低资源消耗量，同时提高国内、国际资源保障力，支撑行业绿色低碳转型。

2. 实施能源替代革新，强化冶金减污降碳

高炉流程在一定时期内还是我国钢铁工业的主流流程，钢铁行业将大力发展并积极应用节能低碳技术，如采取余热余能资源化技术提升界面能效，优化冶金工业的全流程能源效率。着力提高天然气等清洁能源使用比例，扩大太阳能、风能、生物质能等可再生能源利用规模，适时布局氢能产业，综合推进能源结构清洁低碳化；同时加强碳捕集利用与封存等技术的应用。

对于直接消耗化石燃料的冶金工艺，实施清洁能源替代成为解决碳排放问题的必经之路，如氢能将成为有色金属工业应用清洁能源的优选类型。鼓励冶金企业主动调整用能结构，力争 2050 年可再生清洁能源占比提高至 45%；推广水电 – 冶金联合项目工程，突破系列清洁能源冶金新工艺及装备，从全生命周期角度提高冶炼技术水平、降低碳排放强度。

3. 提升产业集中度，促进多产业链接

我国钢铁产业布局的结构调整面临新挑战，继续加快钢铁企业优化重组步伐，着眼产业综合效率提升，合理加强产业集中度，坚决淘汰落后产能。在这一过程中，注重从技术、结构、制度、资源等角度开展全方位整合，尤其是人力资源、核心技术的整合优化，支持产业竞争力的实质性提升。鼓励钢铁产业与多类工业产业的链接配合，促进产业发展的高值化、高端化。进入高质量发展阶段后，钢铁工业着力加快构建国内国际双循环发展格局，深入实施钢铁行业供给侧结构性改革，促成上、下游产业顺畅衔接并助推可持续发展。

有色金属工业深入开展产业结构调整以实现科学布局迫在眉睫，未来应摒弃粗放式增产，积极转向附加值更高、需求更广的有色金属深加工。① 基于产能充足的行业背景，以先进技术驱动产业转型升级、提质增效，形成完整的产业链，加速低端向高端、高速发展向高质量发展的转型升级；推动有色金属产业与航空、航天、汽车、装备制造等行业结合，由传统工业应用拓宽至新工业应用。② 统筹国（境）内外的资源、能源、环境、运输等生产要素，整体性优化有色金属产业布局，推动低效产能退

出，鼓励现有产能向能源、资源富集地区，消费集中地区转移，如电解铝产业向西部转移、铝加工产业向北方转移；形成煤（水）– 电 – 氧化铝 – 电解铝 – 铝深加工 – 再生铝一体化“高效铝产业链”，尽可能将原铝就地或就近转化为深加工产品，向零部件制造、半成品、制成品、生产服务业延伸。

4. 推进工艺信息化应用，实现产业智能制造

智能制造已经成为诸多行业的发展趋势，冶金企业引入后既能提高生产率与产品质量，也能实现生产信息的互联互通。未来钢铁行业将充分利用新一代信息技术，不断提升数字化、网络化、智能化水平；以智能制造为发展主题 [23]，促进转型升级与高质量发展。具体而言，构建工艺参数 – 产品综合性能 – 质量稳定性的大数据平台，开展制品生产全流程工艺参数深度优化，建立适应大规模定制、多工序协同的制品生产智能化工艺模型库。未来有色金属工业将突破有色、钢铁、化工、建筑等产业的传统分工界面，以利益协调的方式形成跨行业的复合型企业或联合型企业，在提升有色金属新材料高端供给能力的同时，实现绿色、低碳、安全发展。

（二）钢铁冶金创新发展潜力

当前，我国钢铁行业去产能成效显著，从源头上保障了行业绿色发展水平，在“十三五”时期不仅提前完成了目标上限（1.5×10^8 t），还依法取缔了一定规模的“地条钢”产能（1.4×10^8 t）。在这一过程中，工艺装备性能显著提高，先进绿色技术推广加快；5.5 m 及以上捣固、6 m 及以上顶装焦炉产能提高了 6.7%，1000 m^3 及以上高炉产能提高了 6.5%，100 t 及以上转炉、电炉产能占比提高了 10 个百分点。此外，绿色发展能力明显提升，节能减排指标显著改善，如重点统计钢铁企业的平均吨钢 SO_2、NO_x、颗粒物排放量分别下降 48%、18%、39%，吨钢综合能耗由 0.572 tce 下降到 0.554 tce。

面对更高层次绿色发展亟需，开发新的绿色流程、装备和技术，建设适应国情特色的绿色钢铁工业生产模式。运用产业结构优化方式，合理提高产业集中度并拓宽市场影响力，彻底改变行业发展“小散乱”局面，以优势企业带动全行业的绿色发展进程。推进原料结构及工艺流程转换，力争到“十四五”末期全国钢铁工业废钢使用占比达到 30%、电炉钢比例提升至 20%。实施钢铁绿色升级改造，加快资源综合利用产业的高值化、集聚化发展速度；鼓励钢铁企业建设能够发挥市场引领作用的废弃物资源化综合产业基地，切实推动钢铁与建材、电力、化工等行业耦合发展。完善绿色制造标准体系，全面建成钢铁行业节能、节水、资源综合利用标准体系。

（三）有色冶金创新发展潜力

当前，我国有色冶金行业在结构转型升级方面效果显著。通过产业结构转型升级，遏制了低效产能扩张，激励了有色金属生产向水电等清洁能源丰富地区（如云南省、四川省）转移；依赖燃煤的生产局面出现明显改变，产品应用拓展提供了行业发展新动能，如建筑领域的“以铝节木”、交通领域的“以铝代钢”、包装领域的“以铝代塑”等。

有色冶金行业节能减排潜力持续释放，驱动能源消耗占比的不断降低，铝锭综合电耗、粗铜冶炼综合能耗等均达到世界先进水平。减排新技术改善了节能减排指标，如惰性阳极使电解铝电流效率提高至 97%、将杂质元素脱除效果增加至 80%。铅锌冶炼行业 SO_2 产生强度下降 97%、颗粒物产生强度下降 90% [23]，铅冶炼富氧熔炼 + 直接还原工艺将清洁生产水平提高到 90%。

再生有色金属产业迅速发展，逐渐形成了“原生 + 再生”协同发展的新格局。新材料开发和成果应用打破了国外封锁的部分“卡脖子”技术，如高纯金属、8 英寸硅片、引线框架材料等。

着眼未来，有色冶金行业的发展潜力取决于以下方面。研发再生金属利用技术，深化金属资源的循环利用，化解原生资源短缺问题 [7]。推广行业能源革新技术，最大限度地节约能源、降低能耗。优化产业结构和集群链接，推进互联网、大数据、人工智能、第五代移动通信（5G）、边缘计算、虚拟现实等前沿技术应用，驱动资源高附加值利用并促进产业上、下游一体化发展。提升冶金关键技术体系，从本质上突破制约行业发展的瓶颈环节。

（四）冶金工业绿色发展阶段与路径

针对冶金工业绿色发展目标，辨识绿色冶金发展不同阶段的特征与使命，研究提出我国冶金工业

绿色发展的四阶段划分（见图 3）。在冶金工业发展的不同阶段，采取相应的绿色发展措施，实现各阶段的目标，使得冶金工业平稳转向创新、低碳、绿色、智能发展。

六、绿色冶金创新发展举措

（一）强化冶金强国战略地位，优化绿色冶金产业发展思路

1. 依托优势资源和清洁能源聚集地，重构冶金产业布局

鼓励冶金产能向风能、太阳能（西北地区），水电（西南地区）等可再生能源富集区或金属资源 / 再生资源富集区转移；结合产业链基地建设，可在沿海核电企业（如福建省福清市）附近布局冶金产业（如铝电解）。强化资源能源区域集聚效应，立足国内，针对性加大锂、钴、离子型稀土等战略性矿产的调查评价力度，兼顾铁、铜等大宗紧缺矿产的勘查；加大重点成矿区带找矿力度，积累储量；加快推进西南、西北地区铜、镍、锂等重点成矿区带的远景调查与找矿预测，提高战略性矿产资源保障能力；积极开展老矿山深部和外围勘探，形成一批重点矿产资源接续区。调整产品结构及产能布局，合理延伸产业链，如未来钢厂布局可分成两类：以高炉、转炉长流程和板材生产为主的大型联合企业，主要布置在沿海深水港地区；以建筑用长材生产为主的全废钢电炉短流程钢厂，主要布置在城市周边，消纳废钢、弃电、城市中水等社会废弃物。

2. 响应“一带一路”倡议，积极布局海外冶金聚集地

通过投资并购、联合投资等多种市场化方式获取境外矿产资源，重点发展方向有：刚果（金）、赞比亚、秘鲁等国的铜资源，几内亚、印度尼西亚、牙买加、老挝、柬埔寨等国的铝土矿资源，印度尼西亚、菲律宾、缅甸、巴布亚新几内亚等国的红土镍矿。统筹规划、合理布局、长期跟进，有序推进相关地区的重大项目，完善配套的基础设施与港口建设；形成一批规模大、品种全、配套完整、具有国际竞争力的境外矿产资源基地，实质性增强境外资源保障能力。“一带一路”沿线国家和地区具有丰富的铁、铜、铅、锌、镍、金等资源储备，通过海外冶金聚集地布局，带动我国先进冶金技术及标准走向国际。例如，选择“一带一路”沿线有条件的国家和地区布局铝、铜等加工能力，拓展产业发展新空间，高效延伸产业链。

3. 构建国家冶金战略科技力量，强化国家实验室能力建设

建设有色金属国家实验室等高端科技创新平台，攻关极贫杂资源、极端环境、复杂体系下金属提取、材料制备、生态处置等行业性重大技术难题，高效应对资源环境安全与“卡脖子”环节挑战。运用先进信息技术平台，支持冶金科技水平提升：通过工业互联网、5G 等技术，发展智能制造信息基础设施；基于数据驱动理念，应用大数据、人工

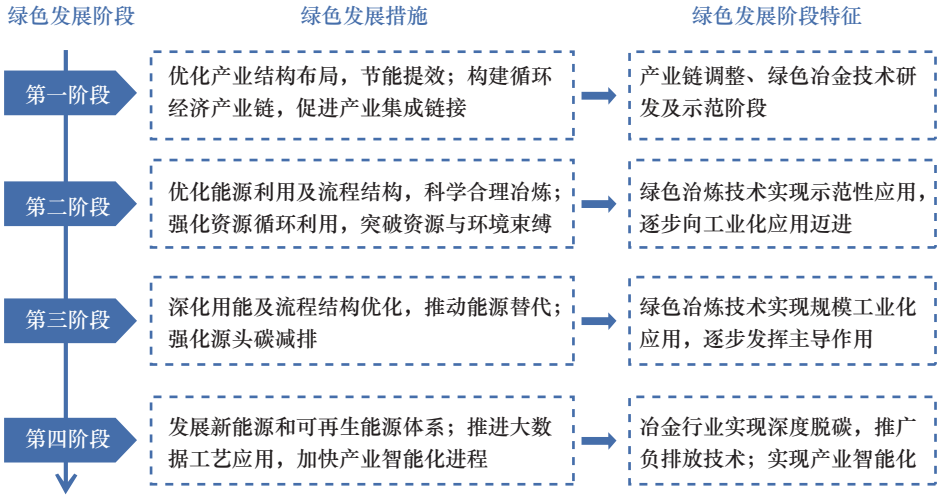

图 3　冶金工业绿色发展阶段及路径

智能（AI）、边缘计算等技术，提升信息系统的学习与认知能力，支持解决冶炼过程中工艺控制不稳定、设备故障频发等实际问题；利用虚拟现实 / 增强现实等技术，形成人机协同混合增强智能，充分发挥工艺技术人员智慧、机器智能优势，相互启发增值。

4. 实施冶金大国向强国转变的战略规划

论证制定冶金行业基础研究行动方案、工程技术战略发展规划，增强冶金领域科技综合水平；提升行业技术装备性能，促进行业绿色转型升级及产能布局调整，推动高端价值链发展，根本性解决“传统资源短缺、环境污染严重”的行业发展瓶颈。对于钢铁行业，不以出口导向作为化解过剩产能的出路；禁止生铁、钢坯等初级产品出口，严格限制高耗能、低附加值产品出口，不鼓励大量中档产品出口；对技术含量高的钢材出口，以动态管理形式调整出口目录；鼓励加工成高端制成品或机电产品后再出口；鼓励到国外建厂，实施就近生产与销售。

（二）布局绿色冶金技术发展与重大工程

1. 超前布局无废冶金颠覆性技术

针对关键战略金属及其应用面临的诸多“卡脖子”技术问题，加强基础研究，发展原创理论，突破核心关键技术。

一是加大冶金 + 多领域融合方向的基础研究投入力度。与化学、物理、信息、数学等学科专家共同组建跨学科研究团队，针对开放基础研究基金、由企业或地方政府设立的揭榜挂帅制项目，开展联合研究与集中攻关。研究重点有能源替代、资源替代、冶金变革（如氢冶金）、减污降碳等关键技术的基础理论及技术原理，力求萌发重大原始创新成果。

二是突破颠覆性与核心关键技术。大力推动冶金行业技术变革，实现从原子 / 分子层面提高反应效率，力争从源头解决冶金过程中的高能耗、高物耗、高污染问题。研究并揭示冶金过程各类环境、不同尺度下分子运动、传递、碰撞、吸附、反应的过程机制，多尺度协同调控分子传递与反应过程；开发冶金过程强化技术，如微反应器、超重力、微波、过程耦合等，着力发展氢冶金、临界冶金、非常规资源冶金、无碳铝冶金、砷冶金、智能冶金等前瞻性技术。

2. 部署冶金工业重大创新工程

一是未来资源 / 能源安全保障创新工程。综合运用遥感、信息等技术，建设资源管理信息系统及信息共享机制。重点研究内容包括：①智能化冶炼钢铁技术，从材料基础科学（分子、原子微观维度）、工序技术科学（工序、装备中观维度）、流程工程科学（流程、工厂宏观维度）等层面对钢铁冶炼进行智能化设计；②大数据冶炼钢铁技术，依托炼铁大数据平台进行在线监测、高炉体检、报表查询、工艺计算、实时预警、质量追溯、炉长报告、专家咨询等；③智能机器人全流程冶炼钢铁技术，代替人工进行钢铁冶炼全流程生产工作，将人从苦、累、脏、差的工作环境中解放出来，显著提高生产效率和产品质量。此外，论证制定金属资源 / 能源发展战略，完善资源保护相关的约束及管理制度；支持海洋等领域的能源、资源开发，拓宽产业资源供给渠道；鼓励企业“走出去”，高质量参与全球矿产资源开发与冶炼技术产业化应用。

二是再生资源循环的冶炼创新工程。针对我国尚未建立完善的废金属回收利用体系，面临产业基础较弱、集中度偏低、技术装备水平和产品附加值有待提升等问题，强化再生资源循环利用基础研究，建立高效清洁分离提取方法，发展原生冶炼搭配城市矿产利用技术，实现资源的高效循环利用。构建包含废弃物 – 回收加工（循环）– 产品或生产原料（再利用）在内的一体化产业链，缓解资源约束，减轻环境污染，推动社会循环经济发展。矿山资源开发过程中的大宗固体废物与冶炼渣的利用及消纳，也是有待展开的科技创新研发课题。

三是清洁能源替代创新工程。引入氢能、太阳能、风能、水电、煤转气等清洁能源，突破多能协同互补技术，提高冶金行业清洁能源使用比例；发展余热利用等能源回收新方法、新路径，形成关键工艺及装备，促进跨工序、跨行业的能源回收利用。重点研究内容包括：① 考虑清洁能源富集地区的生态承载力，鼓励电解铝产能向可再生电力富集地区转移，由自备电向网电转换，从源头实施减排；② 全面实施天然气替代发生炉煤气改造，淘汰高耗能、高污染煤气生产工艺；③ 充分利用城市垃圾热值，冷冻粉碎并部分替代粉煤，实现循环经济产业链接；④ 鼓励企业调整用能结构，充分利用水电、风电、光伏、核电等资源，重点推广水电

应用，推进冶金工业碳达峰行动。

四是全生命周期视野的清洁冶炼创新工程。针对钢铁、铝等重点品类，推动冶金工业生态化设计、关键产污节点精准控制，突破热电联产等产业链接技术，促进全过程资源能源配置优化，提升污染控制技术水平，实现减污降碳。① 在钢铁行业，建立反映闭环回收特性的冶金产品生命周期清单计算方法、钢铁工业碳足迹模型；结合碳捕集技术进展，研发钢铁冶炼 CO_2 捕集的烟气回收治理技术，兼顾低成本碳捕集和资源化 / 产品化。② 在铝工业，铝土矿开采环节减少小型矿山“采富弃贫”现象，以开采技术提升来减少采矿损失量；氧化铝冶炼环节通过技术进步来提高拜耳法的氧化铝回收率；原生铝电解环节加快淘汰落后的电解槽，不断提高电解铝厂的运行管理、电解操作水平；铝材和最终产品生产环节进行电解铝厂、铸件厂、铝材加工企业的优化组合布局，提高铝液直接铸轧比例（省略铝的铸锭和重熔环节），减少烧损量和能源消耗量。

五是循环经济产业创新工程。建立复杂矿物资源绿色提取及二次资源循环利用的新理论、新方法，驱动资源高效利用技术升级。引导构建行业内 / 跨行业资源能源的链接，优化资源能源利用的配给、供应及处置，建立区域性的多产业循环模式。重点研究内容包括：① 构建焦炉煤气规模制氢与石化行业的循环经济生态链；② 建立石油、煤炭、天然气资源综合高效利用生产清洁产品的绿色制程，形成煤气化联合循环多联产化学品成套技术；③ 推广有色金属“原材料生产 + 终端应用”衔接发展模式，通过上、下游联动实现资源高附加值利用，促进产品消费升级，推进“以铝节木”“以铝代钢”“以铝代塑”等；④ 建设“铝型材 – 汽车零部件 – 建筑构件 – 家居产品”“稀有稀土金属 – 新能源材料 – 新能源汽车零部件 – 动力电池材料”等产业群；⑤ 促进铜产业的矿山 – 冶炼 – 加工一体化发展道路，支持铝产业与煤炭、电力、化工、清洁能源一体化发展，形成若干特色鲜明的产业集群。

六是有色、钢铁产业链接创新工程。增强冶金行业资源绿色循环支撑力度，突破二次物料有价元素回收、伴生金属固体废物循环利用等关键技术。重点方向涉及有色、钢铁全过程含铁、含锌固体废物中的金属分离与资源提取，有色、钢铁冶金过程中的多金属协同冶炼，从而降低矿产资源依赖，提高二次、稀贵资源回收率。开展跨行业、跨部门的创新产业链工程，实施矿冶与住建、交通、环保、环境等领域的产业链协同，促进固体废物资源消纳。

七、对策建议

（一）完善国家政策体系，引领产业绿色发展

完善冶金行业绿色发展政策，形成明确的指标约束及配套的财税支撑体系，引导建立绿色、低碳、循环、智能的行业发展新模式。实施严格的资源环境政策，驱动冶金工业绿色化发展，注重形成长效机制。建议打破传统的冶金行业条块分割局面，保持与再生资源、环境保护行业的深度结合，将城市矿产、危险固体废物等二次资源处理纳入冶金行业体系。完善碳交易市场，鼓励新能源消纳并减少煤电消费，对高能耗、高排放冶金企业征收环境税；加强碳排放源头控制，建立冶金行业重大项目库；对于存量产能，采取逐步减少碳排放配额或差异电价等方式，驱动企业尽快实现清洁能源替代。促进社会废钢形成“回收 – 分类 – 加工配送 – 利用”完整体系，对符合准入条件的废钢加工配送企业给予税收减免政策。鼓励进口资源性产品（废船、废旧汽车、废旧家电等含铁资源），规范并简化废钢进口管理程序，在零关税的基础上降低进口废钢的增值税。

（二）制定绿色冶金标准体系，规范产业优质发展

在《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南》（2021 版）引领下，建立冶金低碳标准体系、绿色冶金评价标准体系，制定引导行业绿色健康发展计划；统筹推进绿色冶金体系建设试点，发布绿色冶金标准体系建设指南。综合考虑国家战略需求及行业发展态势，梳理重点企业发展水平与提升空间，建立系统化的管理制度、技术规范、标准体系。面向冶金领域国际合作，牵头或参与制定国际冶金技术标准，提升我国冶金企业的国际市场及技术话语权。

（三）培育冶金创新人才，增强产业发展动力

人才是第一资源，建立支撑冶金工业高质量发展的国家人才优先培养体系，保障产业与技术核心竞争力。建议设立冶金创新人才培养专项，依托高

水平大学及重点企业，培育冶金行业高层次工程技术人才队伍；重点培养冶金与化学、环保、碳金融等行业交叉型人才，为绿色冶金基础研究、碳减排等提供全面智力支持；以各类优惠条件吸引人才汇集、激励人才创新活力，打造科研创新高地。搭建信息化资源共享、交流及科普平台，高水平开展专业化的科普宣传，提高社会公众对绿色冶金的关注度、认可度、参与度。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 22, 2022; **Revised date:** February 27, 2022

Corresponding author: Wang Yunyan is a professor from the School of Metallurgy and Environment, Central South University. Her major research field is metallurgical environmental engineering. E-mail：wyy@csu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Green Metallurgy Innovation Development Strategy” (2021-XZ-26)

参考文献

[1] 郭士伊, 刘文强, 赵卫东. 调整产业结构降低碳排放强度的国际比较及经验启示 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 22–32.
Guo S Y, Liu W Q, Zhao W D. Adjusting industrial structure and reducing carbon emission intensity: International comparison and experience enlightenment [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 22–32.

[2] World Steel Association. World steel statistics 2021 [R]. Brussels: World Steel Association, 2021.

[3] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 [M]. 北京: 中国有色金属工业协会, 2019.
Editorial Committee of Yearbook of Nonferrous Metals Industry of China. The yearbook of nonferrous metals industry of China [M]. Beijing: China Non-ferrous Metals Industry Association, 2019.

[4] 人民网. 中国有色金属工业协会:《有色金属行业碳达峰实施方案》正在征求意见 [EB/OL]. (2021-04-08)[2022-01-15]. http://finance.people.com.cn/n1/2021/0408/c1004-32073250.html.
People’s Daily Online. China Non-ferrous Metals Industry Association: *Implementation plan of carbon peak for non-ferrous metal industry* is seeking advice [N]. [EB/OL]. (2021-04-08)[2022-01-15]. http://finance.people.com.cn/n1/2021/0408/c1004-32073250.html.

[5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委等部门关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见 [EB/OL]. (2021-10-18)[2022-01-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202110/t20211021_1300583.html?code=&state=123.
National Development and Reform Commission. Some opinions of National Development and Reform Commission and other departments on promoting energy saving and carbon reduction in key fields by strict energy efficiency constraint [EB/OL]. (2021-10-18)[2022-01-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202110/t20211021_1300583.html?code=&state=123.

[6] 百度百科. 西芒杜铁矿 [EB/OL]. (2021-11-29)[2022-01-15]. https://baike.baidu.com/item/%E8%A5%BF%E8%8A%92%E6%9D%9C%E9%93%81%E7%9F%BF/12616188?fr=aladdin.
Baidu Baike. Simandou iron ore [EB/OL]. (2021-11-29)[2022-01-15]. https://baike.baidu.com/item/%E8%A5%BF%E8%8A%92%E6%9D%9C%E9%93%81%E7%9F%BF/12616188?fr=aladdin.

[7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知 [EB/OL]. (2021-07-01)[2022-01-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202107/t20210707_1285527.html?code=&state=123.
National Development and Reform Commission. The Notice of National Development and Reform Commission on printing and distributing the 14th Five-Year Plan for circular economy development [EB/OL]. (2021-07-01)[2022-01-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202107/t20210707_1285527.html?code=&state=123.

[8] 陈甲斌, 冯丹丹. 战略性矿产资源形势分析 [N]. 中国有色金属报, 2020-09-01(08)
Chen J B, Feng D D. Situation analysis of strategic mineral resources [N]. China Nonferrous Metals News, 2020-09-01(08).

[9] 中国钢铁工业协会. 2020年12月会员企业环保情况[EB/OL]. (2022-01-26)[2022-01-28]. http://www.chinaisa.org.cn/gxportal/xfgl/portal/content.html?articleId=23fc9d9d1ae6edc21cf3c22eb61eedeaaef8bd2de7281e512808db6a34a110e2&columnId=619ce7b53a4291d47c19d0ee0765098ca435e252576fbe921280a63fba4bc712.
China Iron and Steel Association. Environmental condiction of member enterprises in December 2020 [EB/OL]. (2022-01-26)[2022-01-28]. http://www.chinaisa.org.cn/gxportal/xfgl/portal/content.html?articleId=23fc9d9d1ae6edc21cf3c22eb61eedeaaef8bd2de7281e512808db6a34a110e2&columnId=619ce7b53a4291d47c19d0ee0765098ca435e252576fbe921280a63fba4bc712.

[10] Tang B, Zhao Z Y, Li H B, et al. The present situation and analysis of slag splashing technology of converter in China [C]. Bristol: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018.

[11] 武钢第二炼钢厂. 复吹转炉溅渣护炉实用技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
No.2 Steel-making Plant, WISCO. Practical technology of slag splashing in converter [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.

[12] 刘浏, 兰德年, 萧忠敏. 中国炼钢技术的发展、创新与展望 [J]. 炼钢, 2007, 23(2): 1–6.
Liu L, Lan D N, Xiao Z M. Development, innovation and prospect steel-making technology in China [J]. Steelmaking, 2007, 32(2): 1–6.

[13] 殷瑞钰. 中国薄板坯连铸连轧的进展与展望 [J]. 钢铁, 2006, 41(7): 1–6.
Yin R Y. Progress and prospect of thin slab casting and rolling process in China [J]. Iron & Steel, 2006, 41(7): 1–6.

[14] Wang L T, Deng C H, Dong M, et al. Development of continuous casting technology of electrical steel and new products [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19(2): 1–6.

[15] Chen L G, Yang B, Shen X, et al. Thermodynamic optimization opportunities for the recovery and utilization of residual energy and heat in China’s iron and steel industry: A case study [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 86: 151–160.

[16] Lu X, Cao L, Wang H K. et al. Gasification of coal and biomass as a net carbon-negative power source for environment-friendly electricity generation in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of American, 2019, 116(17): 8206–8213

[17] 殷瑞钰. 关于高效率低成本洁净钢平台的讨论——21世纪钢铁工业关键技术之一 [J]. 炼钢, 2011, 27(1): 1–10.
Yin R Y. Discussion on high efficient and low cost clean steel production platform: One of the key technologies for steel industry in 21st century [J]. Steelmaking, 2011, 27(1): 1–10.

[18] 张向国, 贾利军. 我国熔融还原炼铁技术发展现状及生产实践 [J]. 冶金与材料, 2019, 39(4): 90–91.
Zhang X G, Jia L J. Development status and production practice of smelting reduction ironmaking technology [J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(4): 90–91.

[19] Tang J, Chu M S, Li F, et al. Development and progress on hydrogen metallurgy [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Material, 2020, 27(6): 713–723.

[20] Lei R, Zhou S, Penget T, et al. A review of CO_2 emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 143: 1–12.

[21] Zhou D D, Xu K, Zhou P, et al. The production of large blast furnaces of China in 2018 and thoughts of intelligent manufacturing in the ironmaking process [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(6): 1–12.

[22] 中国有色金属工业协会. 2020年1—12月有色金属产量汇总表 [EB/OL]. (2021-04-26)[2022-01-15]. https://www.chinania.org.cn/html/hangyetongji/tongji/2021/0426/43420.html.
China Nonferrous Metals Industry Association. Summary of nonferrous metal production from January to December in 2020 [EB/OL]. (2021-04-26)[2022-01-15]. https://www.chinania.org.cn/html/hangyetongji/tongji/2021/0426/43420.html.

[23] 中国钢铁新闻网. 中钢协: 绿色智能成我国钢铁业发展主题 [EB/OL]. (2019-12-13)[2022-01-15]. http://www.csteelnews.com/xwzx/znzz/201912/t20191223_22708.html.
China Metallurgical News. China Iron and Steel Association: Green intelligence has become the development theme of China's steel industry [EB/OL]. (2019-12-13)[2022-01-15]. http://www.csteelnews.com/xwzx/znzz/201912/t20191223_22708.html.