

# 面向2040年冶金工程科技前沿与创新发展的研究

柴立元<sup>1,2,3\*</sup>, 王海鹰<sup>1,2,3</sup>, 闵小波<sup>1,2,3</sup>, 刘恢<sup>1,2,3</sup>, 王庆伟<sup>1,2,3</sup>, 古黄玲<sup>1</sup>

(1. 中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083; 2. 有色金属强化冶金新技术全国重点实验室, 长沙 410083;  
3. 国家重金属污染防治工程技术研究中心, 长沙 410083)

**摘要:** 促进冶金工业绿色、低碳、循环、智能、高端化发展, 建立低碳、绿色化的新型冶金工业体系, 保障国家金属资源、能源与生态安全, 支撑制造强国、“双碳”、美丽中国等建设是我国重要的长期发展战略目标。立足全球视野, 我国尚处于冶金工业中低端制造阶段, 需要将金属资源自主可控、智能化制造、环境保护和国家安全维护作为有机整体, 开展冶金强国建设的顶层设计。本文概括了世界冶金工程科技前沿及发展趋势, 详细分析了我国冶金工程科技发展愿景, 提出了面向2040年我国冶金工程科技发展战略, 包括总体发展思路、重点战略任务以及主要的技术发展方向。最后, 从超前布局未来冶金颠覆性技术、重构冶金行业一体化产业创新链、构建精尖人才体系、完善政策标准体系、构建国家经济核心技术驱动力等方面提出了对策建议, 以期满足我国社会主义现代化强国建设对冶金工业发展的需求。

**关键词:** 冶金工业; 工程科技; 冶金工程; 技术预见; 冶金强国

**中图分类号:** TF **文献标识码:** A

## Frontiers and Innovative Development of Metallurgical Engineering Science and Technology in China Toward 2040

Chai Liyuan<sup>1,2,3\*</sup>, Wang Haiying<sup>1,2,3</sup>, Min Xiaobo<sup>1,2,3</sup>, Liu Hui<sup>1,2,3</sup>,  
Wang Qingwei<sup>1,2,3</sup>, Gu Huangling<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy for Non-ferrous Metals, Changsha 410083, China; 3. Chinese National Engineering Research Centre for Control & Treatment of Heavy Metal Pollution, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Promoting the low-carbon and intelligent development of the metallurgical industry and establishing a low-carbon metallurgical industry system are crucial for ensuring national metal resource and energy security, strengthening the manufacturing sector, and supporting carbon reduction and ecological construction in China. Based on a global perspective, the metallurgical industry of China is still at a stage of low-end manufacturing. Therefore, it is necessary to conduct the top-level design to boost China's strength in metallurgical development, integrating the independent control of metal resources, intelligent manufacturing, environmental protection, and national security maintenance as an organic whole. This study summarizes the frontiers and development trends of metallurgical engineering science and technology worldwide, analyzes the development vision of metallurgical engineering science and technology

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-10-08

通讯作者: \*柴立元, 中南大学冶金与环境学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为有色冶金环境工程; E-mail: lychai@csu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国工程科技未来20年发展战略研究”(2021-XBZD-13)

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

in China, and proposes medium- and long-term strategic measures for China's metallurgical engineering technology development toward 2040, involving general development ideas, key strategic tasks, and main technology development directions. Furthermore, the following countermeasures are proposed: (1) developing disruptive technologies in the metallurgical field in advance, (2) integrating the industrial and innovation chains of the metallurgical industry, (3) building a sophisticated talent system, (4) improving the policy and standards systems, and (5) constructing driving forces for core technology development.

**Keywords:** metallurgical industry; engineering science and technology; metallurgical engineering; technology foresight; country with a strong metallurgical sector

## 一、前言

金属是国民经济发展中不可或缺的重要基础和工业化支撑材料，是航空、航天、国防军工领域重大战略工程的关键原材料。多年来，我国金属产量一直位居世界第一，是世界冶金工业第一大国<sup>[1]</sup>。冶金工业是流程工业的重要组成部分，包括钢铁及有色金属产业，是世界各国国民经济、国防建设、民生保障的重要基础原材料支撑部门，也是国际产业链竞争的焦点<sup>[2]</sup>。在当前复杂的国际竞争格局中，我国冶金工业迫切需要化解资源、能源和环境约束，强化关键金属产业链的核心竞争力，实现高质量发展。

未来 20 年，积极应对资源、能源、环境、经济挑战始终是全球冶金产业发展面临的重大课题。冶金领域的工程科技创新及其产业变革，已经成为世界各国推动国家战略发展、应对国际竞争的重要策略<sup>[3]</sup>，也为世界及我国冶金产业的转型发展带来了历史性机遇。未来，我国冶金产业将由中低端制造向高端制造发展，冶金工艺向资源 / 能源替代、冶炼过程强化、高端金属产品制造及智能化方向发展，带动产业链上、下游等相关产业的整合和提升，实现可持续发展，保障国家金属资源安全，有力支撑建设社会主义现代化强国建设<sup>[4]</sup>。

科技创新是冶金工业发展的关键。实现我国金属生产和消费体系的长期稳定与可持续发展，亟待冶金领域科技创新驱动与支撑。因此，本文旨在探索符合我国发展需求和资源特色的冶金工程科技创新体系，在总结国内外冶金工业发展态势的基础上，识别国家对冶金工程科技的重大战略需求，研判面向 2040 年的冶金工程科技发展趋势，提出关系全局和长远发展的重点领域、优先技术方向与对策，为我国中长期冶金工程科技发展的系统谋划和前瞻部署提供参考。

## 二、世界冶金工程科技前沿及发展趋势

进入 21 世纪以来，冶金工业的可持续发展面临较大挑战。以钢铁为例，当前全球约 70% 的粗钢仍通过传统的长流程高炉-转炉法生产，碳排放居高不下，带来了较大的环境压力<sup>[5]</sup>；而资源和能源消耗少、污染物排放少的氢冶金等创新冶金流程工业技术，被认为是未来冶金工业生产的重要方向之一。因此，加快冶金工业领域的基础原理及工艺技术创新，实现工业流程结构变革，强化生产效率及产业核心价值，推动可持续发展。

### (一) 关键金属资源保障是国际竞争及新兴产业发展的迫切需求

以稀有、稀散金属元素为主体的关键金属资源及产品，在国防、新材料、新能源和信息技术等领域中发挥着不可或缺的支撑作用，直接影响国防安全、国土安全、资源安全等。当前，全球范围内的国际竞争日益加剧<sup>[6]</sup>，美国、欧洲等国家和地区先后制定了各自的关键矿产资源发展战略，未来进一步保障这些金属资源的持续安全供给，面临诸多挑战，迫切需要推进冶金工业工程科技的变革发展，加快建设金属资源高效利用及生产的现代化冶金工业体系，解决冶金工业可持续发展问题。

### (二) 绿色低碳是冶金工程科技发展的必由之路

减污降碳是当前世界冶金工业发展的关键<sup>[2]</sup>。在全球及国家整体低碳转型的大趋势下，低碳的工业核心技术、发展能力、产业结构已经成为国家及行业核心竞争力的重要体现。低碳技术与冶金工业的发展紧密相连，涉及从开采、冶炼、加工、消费、回收废弃的全生命周期，与产业绿色制造、绿色转型理念息息相关。由此，需要坚决遏制冶金工业生产过程中的高物耗、高能耗、高排放现象，基于全生命周期理念开展生态工艺及产品设计，开发

优质、高强、可循环的绿色冶金产品，推进产业绿色转型<sup>[7,8]</sup>。未来，冶金工业的能源生产消费方式将向清洁、低碳方向发展，成为应对全球气候变化的重要支撑。

### （三）循环、减量是世界冶金工业发展的必然趋势

近年来，面对资源短缺和环境压力，全球冶金工业越来越重视节能环保和循环经济，正逐渐从末端治理向生产全过程控制转变<sup>[9]</sup>。未来20年，金属资源日益匮乏，复杂低品位矿物逐步成为主要原料，冶金领域将面临流程工业生产方式变革的极大压力。迫切需要强化应用绿色低碳生产技术和装备，并建立多产业间的工业生态链接，提高工业资源/能源利用率，降低化石燃料消耗和污染物排放。因此，冶金产业需进一步调整产业结构、流程结构、资源/能源结构，并加快实施产业优化布局/链接、清洁生产技术应用，促进国家及社会层面金属资源循环经济的全面发展，实现源头减量、节能提效和资源/能源的回收利用。

### （四）信息及能源技术是新一轮国际冶金科技革命的重要特征

智能制造及工业4.0是未来冶金领域科技发展的必然趋势，将推动传统冶金产业向智能化、信息化方向发展，并带来能源结构的颠覆性变化<sup>[10]</sup>。随着人工智能、物联网和大数据等技术的发展，冶金产业将实现更程度的自动化和智能化，通过实时数据分析和机器学习算法，提高生产及资源利用效率，并可快速响应需求变化，提供符合特定要求的金属产品；能源技术的发展促进碳基和无碳能源代替化石燃料，能源安全与效率持续提升，推动冶金产业转向使用更多的清洁能源，如太阳能、风能、氢能等，使非化石能源在一次能源总量中的比重稳步上升，实现规模减碳降耗<sup>[11]</sup>；通过建立先进的能源管理系统，冶金产业能够更有效地实时监控和管理能源消耗，实现能源的优化配置及高效利用。

## 三、面向2040年的我国冶金工程科技发展愿景

工程科技是与社会经济、产业发展联系最直接

的科学技术。工程科技发展战略研究需要紧密结合国家社会经济发展需求，重视需求牵引的带动作用，以及科技项目的可实现性和可应用性<sup>[12]</sup>。面向2040年，冶金领域的工程科技发展需要立足全球视野，推动更加和谐安全、可持续发展的制造强国建设，提升冶金工业的国际地位及话语权。我国冶金工程科技2040年的主要发展愿景包括以下3个方面。

### （一）初步建成冶金新工业化体系，提升行业生产效率及生产能力，满足国家资源安全、工业生产和社会生活的关键金属安全保障需求

到2040年，初步建成冶金领域新工业化生产体系，实现生产智能化、管理网络化、过程绿色化，智能化工厂建设覆盖全行业，钢铁、铜、铅、锌等金属，合金及其高端产品得到规模化高效生产，突破高端金属产品“卡脖子”问题，能够满足国家国防、信息等战略领域以及其他工业部门、社会领域的金属供给和高端需要，满足大部分的个性化、多样化的消费需求，形成产业高端生产力。国家资源安全能力得到持续保障，实现冶金金属领域的制造强国建设，全面支撑载人航天、探月探火等前沿战略方向的发展，并在国际制造业领域掌握主动权和话语权。

### （二）建立面向冶金工艺的能源综合利用体系，国家及社会领域金属资源/能源效率显著增强，促进国家资源/能源结构的持续绿色转型

作为典型流程工业，冶金工业生产过程展现了金属资源密集和能源消耗大的特征。我国冶金金属产量连续20多年居全球第一，能源消耗占全国工业总能源消耗的28%<sup>[13,14]</sup>。关键金属资源是国家经济社会发展过程中不可或缺的基础原材料，亦是未来全球竞争体系中主要国家的核心关注点。随着全球社会经济的快速发展，我国对能源的消费需求也将不断提升。冶金工业的发展对我国金属资源利用和能源消耗格局调控的作用将愈发显著。到2040年，冶金过程关键/颠覆性技术及装备的发展，将推动冶金工业低碳、绿色变革性发展，形成大宗金属资源/能源综合利用及替代技术，建立金属资源/能源的工业综合利用体系，增强国家及社会领域的资源/能源效率，促进资源/能源结构的持续绿色转型，并逐步消除资源/能源的“卡脖子”风险。

### （三）形成以冶金工业为核心枢纽的区域金属资源循环体系，构建金属资源生产—应用—循环的“无废社会”工业生态链

绿色、低碳、循环发展是促进国家生态文明建设、构建现代化经济体系和实现高质量发展的必由之路。随着工业、社会经济的快速发展，我国现有自然资源逐步匮乏，尤其是金属矿产原生资源自给率已经严重不足，存在资源“卡脖子”的风险。城市矿产、二次资源等废弃物堆存不仅导致资源流失，还将带来严重的生态环境污染问题。传统工业发展模式已经无法适应当代经济社会发展的需求。到2040年，我国将建立工业产业体系—社会之间有序稳定的物质循环利用体系，构建基于资源闭环式流动的工业生态链循环模式，实现非常规二次资源逐步替代自然资源，减少自然资源消耗及废弃物排放，支撑建立国家“无废社会”体系<sup>[15,16]</sup>，保障“双碳”目标、美丽中国建设，促进人与自然和谐共存。

## 四、面向2040年我国冶金工程科技技术预见分析

### （一）技术预见调查

本文采用专家会议、通信研讨等形式，开展了面向2040年的我国冶金工程科技技术预见调查，

共获得15项备选技术项，分别于2022年5—6月、2022年10—11月开展了两轮技术预见专家调查，共获得897份有效问卷。以两轮技术预见调查的数据开展统计研究，分析我国冶金领域技术预见的调查结果。

### （二）技术发展水平与约束条件

#### 1. 技术发展水平

冶金领域工程科技15项备选技术的研发水平指数均值为53.01（见图1），说明我国冶金领域技术方向研发水平整体较低，仍有较大的提升和拓展空间。“低（无）赤泥拜耳法氧化铝清洁冶金技术”的研发水平指数为79.79，属于研发水平相对较高的技术项，说明矿业呼唤先进适用技术；“极端环境冶金技术”的研发水平最低，研发水平指数仅为41.43，说明超前冶金技术的发展任重道远。

#### 2. 制约因素

整体来看，研发投入、工业基础能力和科技资源是绿色冶金子领域技术发展的主要制约因素（见图2）。无碳智慧铝冶金、绿色炼铜、镁清洁连续冶炼、钢铁氢冶金等技术主要受研发投入和人才队伍制约。钒铬钛强化冶金、复杂共伴生资源选冶强化分离等技术主要受研发投入、人才队伍、工业基础能力和科技资源的制约。能源金属强化冶金与循环、半导体冶金、废钢电炉直接冶炼、城市矿产清

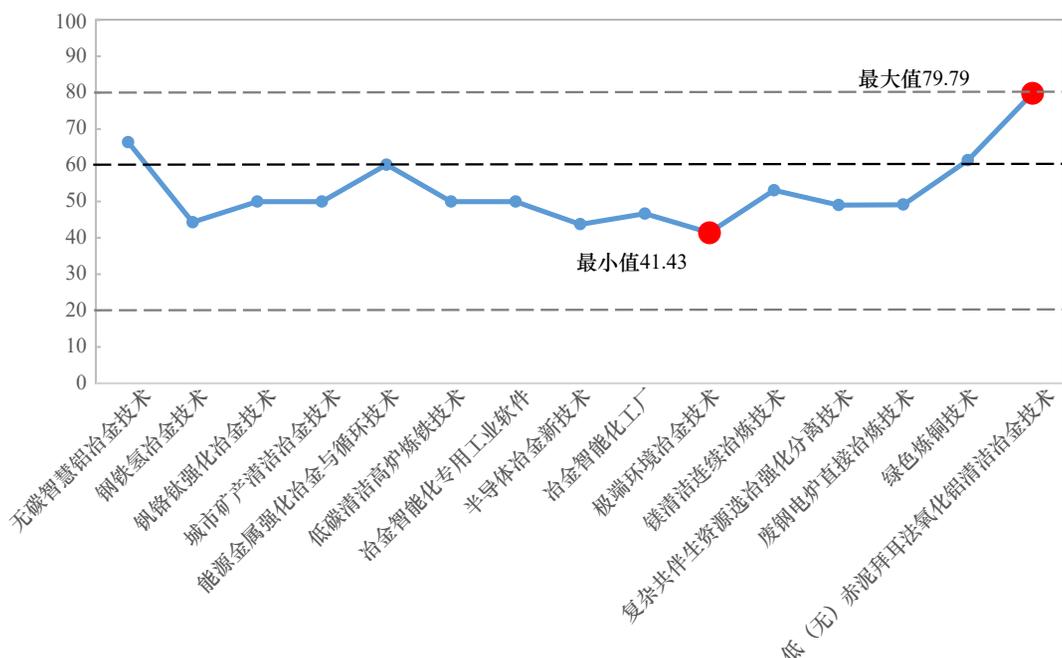


图1 冶金领域工程科技15项备选技术项的研发水平指数

洁冶金等技术受研发投入和人才队伍制约最明显，但也不同程度受工业基础能力、科技资源、科学原理突破、协调与合作、国外限制竞争等条件的制约。极端环境冶金、低（无）赤泥拜耳法氧化铝清洁冶金等技术主要受危害性 / 伦理性风险和国外限制竞争影响；而冶金智能化专用工业软件还需考虑研发条件、协调与合作的制约效应。冶金智能化工厂及低碳清洁高炉炼铁等技术主要考虑人才队伍、研发投入、工业基础能力、科技资源等条件的限制。

我国冶金产业正逐步走向高端和可持续发展以在世界产业领域获得更多话语权，然而，仍存在基础研究不深入、原始性创新能力不足等问题，尤其是重大关键技术研究投入欠缺。冶金领域碳达峰、碳中和实现，需要推动冶金技术取得变革性发展，其核心是实现工程技术创新、关键突破和产业推广，切实保障国家金属供应安全，并推动社会体系金属资源的高效循环。

## 五、面向2040年我国冶金工程科技发展战略

### （一）发展思路和总体框架

围绕高质量发展、促进人与自然和谐共生等中国式现代化的本质要求，坚持“四个面向”，紧扣国家“十四五”发展规划和2035年远景目标，以增强国家资源安全能力、建设现代化产业体系为目的，重点瞄准我国未来资源 / 能源安全保障、新型工业化、绿色冶金及工业生态链等关键方向，持续投入“冶金+”多领域基础研究，突破颠覆性及核心关键工程技术，重构冶金产业工程核心技术链及装备，实现冶金行业资源 / 能源利用最大化、污染最小化，掌握全球金属产业发展的话语权；推动工业、社会生活领域非常规资源高效利用，打通冶金等多产业资源链接，构建国家工业生态链资源循环链接的核心工业枢纽；实现我国冶金工业绿色、低碳、循环、智能、高端发展，建立低碳、绿色化的新型冶金工业体系，保障国

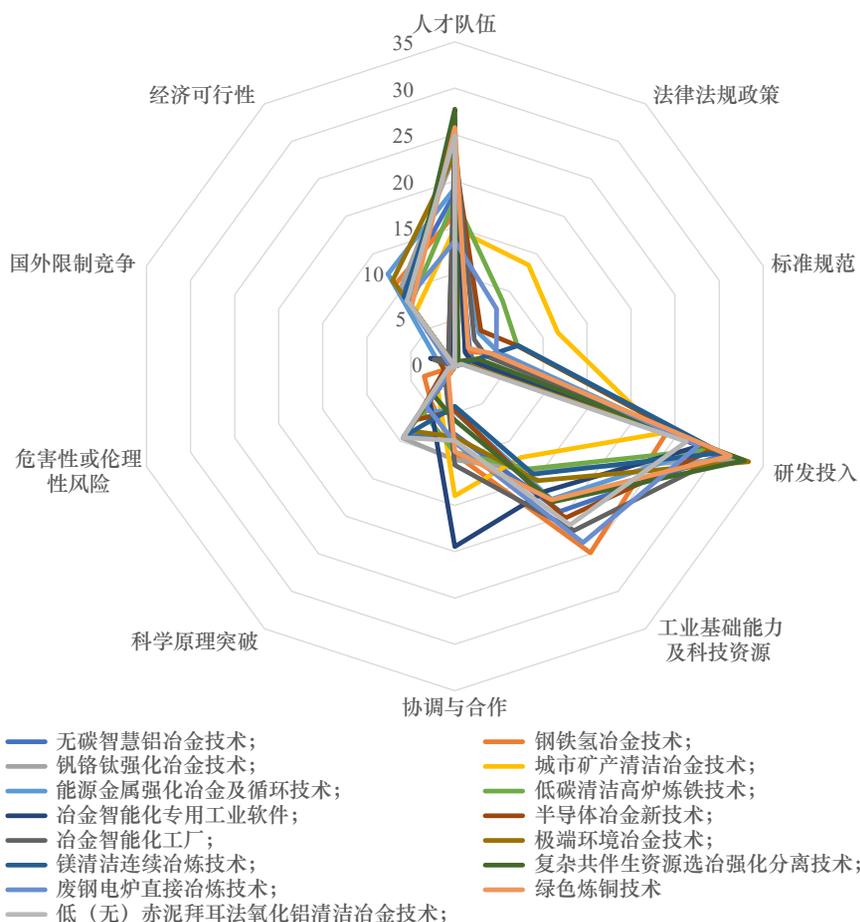


图2 冶金领域各技术项制约因素分析

家资源 / 能源安全，支撑制造强国、“双碳”目标、美丽中国建设。

为推动国家经济社会、工程科技发展，满足生活和工业生产的需要，基于目前冶金领域工程科技发展仍然不成熟的现状，本文提出了“554”冶金工程科技发展总体框架（见图3），即以绿色、低碳、循环、智能、高端5个冶金工业未来工程科技发展特征为核心<sup>[17]</sup>，基于与冶金工程科技发展紧密相关的资源、能源、产业体系、自然环境和社会环境5个要素，发展以资源 / 能源安全保障、新型工业化（智能化）、绿色冶金、工业生态链等为核心的4个主要发展方向<sup>[2]</sup>。

一是构建新型冶金高端智能工业化体系，支撑制造强国建设，保障社会主义现代化强国建设。聚焦产业调整，提升产业高端制造水平，掌握高纯金属、高端合金等高端产品制造技术，并发展基于冶金流程工业特征的信息化平台，研发全数字化与智能化大型冶金反应器，形成金属制造专用工业控制系统，建造冶金智能工厂，制定符合工业4.0的技术标准，实现产业高端智能化制造。

二是突破资源 / 能源综合利用的未来冶金变革性新技术，支撑国家资源安全发展。围绕铜、铝、铬、钒、钛、镍、钴、锂等典型关键金属资源以及能源、国防等领域的金属产品需求，发展前沿冶金工程技术体系，突破临界、深海、深空等极端环境

冶金技术瓶颈，实现复杂金属资源的高效供给和利用，推动产业能源综合利用体系建设，实现跨工序、跨企业的能源回收利用，提高总体能源效率，实现能源使用安全。

三是形成绿色冶金的高质量发展新模式，支撑“双碳”目标、美丽中国建设。研发冶金过程全生命周期污染精准控制及资源高效提取技术，发展冶金工业资源 / 能源替代，建立非常规资源冶金等复杂资源高效利用技术体系，突破氢能等绿色能源利用及余热余压回收等节能技术，推动低碳、绿色化发展。同时，重视供给侧结构性改革，通过优化产业结构、提高生产效率来推动冶金行业的持续健康发展，并加强“去产能、降产量”要求，实现减量化发展，有效促进产业转型升级，提高资源利用效率，实现冶金领域的可持续、绿色发展。

四是建立基于“无废社会”的工业生态链，支撑美丽中国建设，切实保障产业实现碳达峰、碳中和。推动有色金属-钢铁协同冶炼等，促进工业资源 / 能源优化分布配置，发展多产业间资源循环利用技术，大幅提高社会经济领域有价资源的循环流通效果和利用效率，实现自然资源利用的大幅削减。

## （二）发展目标和发展路线

面向2030年，冶金工业将重点解决资源、能源

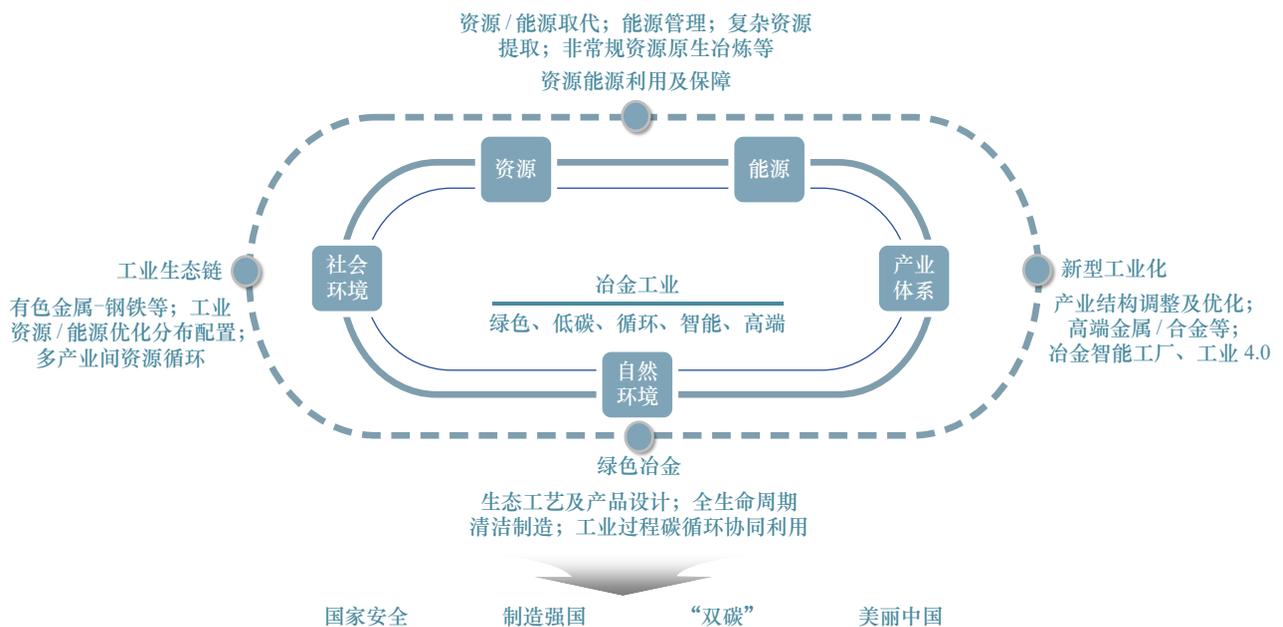


图3 面向2040年的我国冶金工程科技发展总体框架

消耗和负荷减排问题，发展高端制造和智能化生产，促进产业升级转型。重点开展“冶金+”的基础和方法研究，为技术研发提供理论指导；推动现有工艺技术改进、因素优化和效果强化，显著缓解工业生产过程中的资源、能源和环境负荷矛盾问题；推动行业碳排放增量削减，实现碳达峰；突破冶金智能化和高端产品制造瓶颈，紧密结合新一代信息网络和大数据技术，初步建设一批智能化工厂，逐步显现国际金属产业领域的影响力和话语权；加快不同行业间的产业链融合，逐步展现工业流程系统与社会资源的结合，促进多领域交叉和产业融合，形成冶金领域工程技术的创新能力和先进的现代化工业基础。

面向2040年，冶金工业将重点推动冶金工程技术和生产模式的变革性发展以及金属工业生态链的建立问题。氢冶金、临界流体冶金等系列颠覆性技术和装备产生重大突破，逐步实现冶金工业生产转型，建立冶金新工业体系，支撑制造强国建设；建立冶金工业全过程清洁冶炼模式，资源/能源得到高效利用和回收，显著减少污染负荷排放，根本实现绿色低碳化发展；行业间深度融合，信息化技术与冶金工业化结合日益普遍，逐步形成智能生产模式及标准体系，建立智能化冶金工厂；高端产品制造技术瓶颈全面突破，行业发展摆脱了“卡脖子”限制，逐步主导国际高端产业发展标准制定，开始显现全球控制力；建立社会经济发展领域金属资源工业生态链，支撑构建全社会资源循环经济体系，初步形成以冶金工业为核心的“无废社会”发展模式，展现显著的行业碳中和趋势。在本阶段，将全面建立未来冶金工程技术和装备体系，保障国家资源/能源安全，支撑“双碳”、制造强国、美丽中国建设，推动工业和社会生活的高质量发展。

基于冶金领域工程科技发展战略目标，其技术路线如图4所示。

## 六、面向2040年我国冶金工程科技重点任务

### （一）开展基础研究的主要方向

#### 1. 矿产资源绿色选冶基础理论

基于地球化学的战略性矿产选冶新理论与新方法、战略性矿产共伴生多组分利用选冶专属药剂、

战略性矿产相似元素的分离纯化与高端制备理论、矿产资源低碳选冶新方法、清洁生产与绿色矿山新理论。

#### 2. 非常规资源短流程冶金基础理论

联合冶炼过程多金属/多组分的氧化-还原反应机制，多金属迁移分配规律及定向调控原理，多金属与造渣剂的熔分反应机制及调控原理，烟气中高分子分解产物迁移转化及二噁英抑制形成调控，联合冶炼过程多相多场耦合理论与数值模拟，铅、锌、铜、铁短流程富氧熔池熔炼技术与装备<sup>[18]</sup>。

#### 3. 氢冶金理论

富氢冶金过程物理化学模型、氢冶金反应器优化、氢冶金工艺流程开发与综合调控机制、机器学习增强的分子尺度模拟及理论解析、氢冶金与传统钢铁工艺的耦合<sup>[19]</sup>。

#### 4. 特种冶金理论

真空感应熔炼、电渣重熔和真空电弧重等特种冶金过程中物理化学反应的热力学和动力学规律、传输特性和铸锭凝固缺陷形成机理等基础理论问题。

#### 5. 半导体/能源金属材料化冶金

低品位难提取能源金属资源分选富集-多金属元素同步提取基础理论与新方法，基于材料构效关系的功能导向分离机制与方法，多场耦合能质流协同优化与粉体微观组织结构/缺陷精准控制理论与方法构建，金属材料化冶金制备原理与关键技术，全生命周期金属组元迁移转化规律及绿色高值循环基础理论与关键技术研究<sup>[20]</sup>。

#### 6. 长流程炼铁工艺降碳增效基础理论

高炉清洁燃料喷吹高效冶炼机理，高炉喷煤性价比评价与优化搭配，铁矿石超厚料层烧结降耗减碳机制，高炉高比例球团高效冶炼机理，焦炭质量综合评价与高效化利用原理，基于能量与物质流的碳排放精准核算，高炉安全长寿分析评价与数值仿真，高炉冶炼大数据与智能化系统研发<sup>[21]</sup>。

#### 7. 低碳智能冶金基础理论与关键技术

面向零碳排放的冶炼工艺与反应器的颠覆性理论与技术研究、全数字化与智能化大型冶金反应器-冶炼工厂基础理论与关键技术研究、材料跨尺度建模与设计、材料智能化自主计算与设计、高性能金属材料连续浇铸制备专用工业软件、材料冶金基因工程基础理论与关键技术研究<sup>[22]</sup>。

	2025—2030年	2030—2040年
需求	关键金属资源保障是国际竞争及新兴产业发展的迫切需求	
	绿色低碳是冶金工程科技发展的必由之路	
	循环、减量是世界冶金工业发展的必然趋势	
	信息及能源技术是新一轮国际冶金科技革命的重要特征	
目标	构建新型冶金高端智能工业化体系	突破未来冶金变革性新技术
	形成绿色冶金的高质量发展新模式	建立基于“无废社会”的工业生态链
重点任务	建立冶金行业新工业化体系，支撑国家制造强国等战略	
	突破冶金过程冶炼强化技术，支撑保障国家资源能源安全及“双碳”等国家战略	
	形成冶金与多产业资源能源利用的工业生态链，支撑美丽中国及“双碳”等战略	
关键技术	无碳智慧铝冶金技术	能源金属强化冶金与循环技术
	半导体冶金新技术	极端环境冶金技术
	冶金智能化工厂	冶金智能化专用工业软件
	钢铁氢冶金技术	绿色炼铜技术
	镁清洁连续冶炼技术	低碳清洁高炉炼铁技术
	钒铬钛强化冶金技术	低（无）赤泥拜耳法氧化铝清洁冶金技术
	城市矿产清洁冶金技术	废钢电炉直接冶炼技术
	复杂共伴生资源选冶强化分离技术	
基础研究	矿产资源绿色选冶基础理论	半导体/能源金属材料化冶金
	非常规资源短流程冶金基础理论	长流程炼铁工艺降碳增效基础理论
	氢冶金理论	低碳智能冶金基础理论与关键技术
	特种冶金理论	极端环境冶金理论与新方法
领域重大工程	冶金产业高端智能化制造工程	
	绿色冶金产业创新工程	
	基于“无废社会”发展的工业生态链接工程	
领域重大工程项目	战略性矿产资源的选冶、强化、分离及精深加工	非常规资源多金属短流程联合冶炼
	氢基直接还原-电炉短流程炼钢	极端环境冶金技术及装备
	特种冶金技术及装备	冶金智能化技术与装备
	降碳增效高炉炼铁生产技术	冶金过程物理化学解析及信息化工业管控软件
保障措施	超前布局未来冶金工业颠覆性/核心关键技术，抢占国际竞争制高点	
	依托优势资源和清洁能源聚集地，重构冶金行业一体化产业技术链	
	强化部署冶金领域国家战略科技力量，铸就全球冶金人才高地与创新高地	
	完善政策标准体系建设，引领全球冶金产业工程科技发展	
	把握“一带一路”共建国家冶金合作发展契机，构建国际竞争核心技术驱动力	

图4 面向2040年的我国冶金领域工程科技发展技术路线图

8. 极端环境冶金理论与新方法  
探索超高压、超微、超高温、超快变温等临界

条件下，金属原子/分子运动、传递、碰撞、吸附、结晶等物理/化学反应规律，重点研究氢等离

子体直接还原理论与方法、极端条件下金属矿局部赋能解离机理、有色冶炼微流控临界形核与非平衡生长机制、超重力/失重力等环境下复杂金属物料强化分离规律等<sup>[23]</sup>。

### (二) 实施冶金重大工程

#### 1. 冶金产业高端智能化制造工程

推动冶金工业智能化工厂建设。突破热电联产等产业链接技术，促进冶金全过程资源/能源的配置优化。基于全分布式智能感知、数字孪生、数字化工厂等新一代智能控制与决策系统研发，实现冶金工厂的智能运行及优化调控，建造冶金工业智能工厂，提升效率，削减污染负荷。

加速行业金属生产的高端化。研发冶金过程复杂资源体系分离提纯新技术和装备，建立冶金行业高纯金属、新型合金材料制备技术，重点包括高纯金属短流程高效制备、靶材精准成形技术等。支撑实现高端金属资源规模稳定制备、高端器件关键原料国产化及成型制备，提高产业附加值，解决“卡脖子”问题。

#### 2. 绿色冶金产业创新工程

实现冶炼全过程减污降碳。遵循全生命周期管理的理念，推动和发展冶金工业生态化设计与关键产污节点精准控制，实现污染负荷大幅削减；推动冶金制造流程从间歇、停顿、长流程向紧凑化、连续化、短流程的方向发展，研发冶金冶炼全过程金属资源高效提取、废钢电炉冶炼、惰性阳极电解铝等低碳冶炼技术，实现冶金工业的源头减污降碳。突破适合于金属冶碳捕集、回收治理技术，实现低成本碳捕集及资源化利用。

推动金属资源/能源替代及综合利用。加强资源/能源技术的基础研究和工业化技术研究，突破核心关键技术；建立冶金过程原生矿产资源替代技术，推动冶金过程主要原料由自然资源向二次资源转移，实现“城市矿产”、工业二次资源及低品位矿产等非非常规资源强化冶金，提高复杂资源金属回收利用率；建立冶金过程能源替代技术，实现主要能源从煤、石油等高化石能源为主，向水、电等碳中性能源、低碳能源和非碳能源转型；研发冶金过程余热、余压的高效回收利用等节能强化技术，发展氢能等绿色能源替代及利用等能源替代技术；根据空间调度与地理资源分布特征，因地制宜地选

择新能源开发建设路径，解决能源产业链供应与下游能源需求不匹配、不平衡发展的问题。

#### 3. 基于“无废社会”发展的工业生态链接工程

建立多行业联合冶金及资源协同处置技术。突破多行业二次资源协同处置与循环利用等关键技术，重点涉及实现有色/钢铁、铅-锌-铜等冶金领域内多金属联合冶炼（钢铁-有色金属），冶金-石化等跨行业间二次资源协同资源化处置（冶金/流程工业），打通不同产业间资源链接壁垒（冶金-静脉产业），提高金属及其他有价值资源在工业/社会流通领域的资源化利用率，推动跨产业工业二次资源协同处置和利用。

形成构建行业内/跨行业资源/能源链接的工业生态链接模式。发展“互联网+”回收利用新模式，使资源回收领域向智能回收、互联网回收延伸拓展；构建废弃物-回收加工（循环）-产品或生产原料（再利用）的全过程资源综合循环产业链，形成冶金工业与相关产业的资源生态链接；突破冶金行业与电力、石化等行业的工业能源链接技术，建立区域性跨产业能源分配系统，促使不同行业的能量流循环利用；使工业资源/能源实现优化分布配置及高效利用，通过上、下游联动实现废物资源高附加值利用，形成若干特色鲜明的产业集群及工业生态链接模式，支撑“无废社会”建设。

### (三) 开展重大工程科技项目

#### 1. 战略性矿产资源的选冶、强化、分离及精深加工

战略性矿产资源的深度开发和精细加工，在高端制造、国防安全等产业中发挥关键作用。重点形成战略性矿产选冶新理论，突破战略性矿产资源绿色分离与选冶联合精深加工技术瓶颈，建立基于地球化学的战略性矿产选冶新理论与新方法、矿产资源低碳选冶新工艺、清洁生产与绿色矿山新技术等，为保障我国有色金属资源供应提供重要技术支撑。

#### 2. 氢基直接还原-电炉短流程炼钢

传统长流程钢铁制造工艺减碳能力有限，以富氢直接还原为主，配合电炉炼钢的短流程工艺是当今国际钢铁生产流程低碳发展的重要趋势。重点开展富氢气体重整调质及富氢还原竖炉能质匹配设计与工艺创新，提升能源与资源利用效率；突破高

品质直接还原铁技术，显著降低电炉炼钢渣量与能耗；建立全流程碳核算、捕集与再资源化技术，提高短流程炼钢占比，优化产业结构布局，加快推动行业碳达峰与碳中和。

### 3. 特种冶金技术及装备

高端特殊钢和特种合金是国家重大工程与重点装备不可或缺的关键基础材料。然而，我国在高端金属材料制备工艺、理论、技术和装备方面仍然滞后于发达国家水平。围绕高端精品特钢制备的特种冶金工艺和装备发展需求，攻克制约高端金属材料制备的关键共性技术和高端装备设计制造技术，建立机理与数据驱动机器学习融合的智能化模型，促进我国重大工程和重点装备用高端精品特钢生产技术的跨越式发展。

### 4. 降碳增效高炉炼铁生产技术

高炉炼铁工艺是钢铁行业长流程重要的前置生产工艺，也是高碳排放的主要来源之一。降碳增效是钢铁行业低碳绿色转型过程中的关键支撑。重点突破基于不同炉料交互作用机理的高炉综合炉料优化工艺、极致减碳降本增效工艺联合高炉炼铁等关键技术及装备，建立碳排放精准核算与碳捕集回收利用的钢铁联合冶炼技术体系；结合大数据与智能化控制，实现钢铁冶炼的低碳智慧生产，支撑冶金工业的全面转型发展。

### 5. 非常规资源多金属短流程联合冶炼

非常规资源多金属短流程联合冶炼技术可破解冶金行业资源供应短缺、固废环境污染的瓶颈问题，支撑冶金行业可持续、绿色化发展，保障国家资源安全；针对现有冶金技术问题和基础，突破铅锌冶炼搭配非常规资源多金属短流程冶炼、搭配非常规资源有色金属与钢铁联合冶炼等技术及装备，实现复杂资源、危废、冶炼渣、城市矿产等非常规二次资源的低碳清洁循环利用，支撑“无废城市”“无废社会”建设，推动原生冶炼与再生行业协同转型发展。

### 6. 极端环境冶金技术及装备

我国传统冶金技术能耗、物耗及污染负荷居高不下，有色金属资源循环利用率（仅为30%）远低于发达国家普遍水平（>70%）<sup>[24]</sup>，面临诸多“卡脖子”问题。围绕当前传统冶金技术存在的典型“卡脖子”问题，突破氢等离子体冶金直接还原和熔融还原、湿法冶炼微尺度流体强化反应和废渣减量等

关键技术与装备，大幅提升金属提取与循环利用效率，满足金属冶炼绿色、低碳、高效、循环的发展需求，推动冶金行业优化升级，奠定我国在世界金属资源竞争格局中的优势地位。

### 7. 冶金智能化技术与装备

面向冶金绿色发展需求，针对冶金过程高温、强磁、大电流、强腐蚀等特点，将冶金先进制造与云计算、虚拟现实等信息技术深度融合，研制具有自主知识产权的冶金智能自主控制系统、全流程智能协同优化控制系统、智能优化决策系统、智能安全监控与自优化系统和虚拟制造系统等，提升冶金企业在生产管控和安全环保等方面的前沿智能技术及装备水平，实现智能化、绿色化与高效化生产。

### 8. 冶金过程物理化学解析及信息化工业管控软件

我国冶金领域工业软件匮乏，受制于人，极大影响了冶金工业的自主发展和转型升级，甚至是国家金属资源的安全保障。需加快行业信息系统战略布局，开发冶金过程多相多场物理化学解析软件、面向金属冶炼全生命周期的核心软件、智能工厂技术与系统软件、产业协同平台软件等，保障我国冶金过程基础计算软件和工业管控核心软件的自主可控；基于工业互联网，建立信息化分析与管控工业软件生态，实现行业“产供销管控”的智慧决策和集成优化。

## 七、加快冶金工程科技强国建设的保障措施

### （一）超前布局未来冶金工业颠覆性 / 核心关键技术，抢占国际竞争制高点

面向国家“双碳”目标，瞄准国家金属资源和产业能源安全问题，针对关键战略金属及其应用面临的“卡脖子”技术需求，布局冶金基础理论、关键技术与工程示范创新链，实施系列冶金重大创新，发展超临界、深海、深空等极端环境下的冶金原创理论，开发原子经济技术，提高反应和资源利用效率，形成冶金过程复杂资源体系分离提纯和高端装备制造的新理论与新方法，突破国家战略金属产业链关键技术，力争从源头解决冶金过程中的高能耗、高物耗、高污染问题。强化未来资源 / 能源安全保障、非常规资源冶金、清洁能源替代、智能化冶炼装备及工厂、冶金产业工业循环链接等技术创

新，推动冶金行业技术变革。

### (二) 依托优势资源和清洁能源聚集地，重构冶金行业一体化产业技术链

引导现有布局不合理的产能向具有资源/能源优势和环境承载力的地区有序转移，鼓励冶金产能向我国风能、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，以实现产业布局优化，提升优势产能组成。针对冶金行业发展带来的新态势，围绕清洁能源消纳与资源循环利用，建立一体化产业链新技术体系。如电解铝产业向西部转移，加快完善“高效铝产业链”，形成煤（水）-电-氧化铝-电解铝-铝深加工-再生铝一体化产业技术链，尽可能将原铝就地或就近转化为深加工产品。

### (三) 强化部署冶金领域国家战略科技力量，铸就全球冶金人才高地与创新高地

夯实冶金工业作为国家高质量发展战略的基础支撑，强化冶金在现代化强国中的战略地位，尽快扭转我国在战略性关键金属方面的被动局面。发挥国内外冶金类高水平大学及重点企业的基础优势，聚集高层次人才，建立冶金强国亟需的战略科技力量；培养冶金行业高层次学术人才队伍与工程技术人才队伍；构建冶金领域人才培养机制，激励人才创新活力，打造集聚高端优秀人才的高地。组建冶金国家级实验室，建立国家战略金属资源保障及资源循环的高端技术支撑平台，提升自主科研创新能力。

### (四) 完善政策标准体系建设，引领全球冶金产业工程科技发展

面向全球冶金领域，制定资源/能源、工艺装备、绿色生产全生命周期国际冶金标准体系，构建行业绿色、低碳、循环、智能化发展的新模式，提升行业在国际冶金领域的话语权和权威性。加快行业减污降碳和持续发展标准的制定。完善行业绿色发展的政策约束、指标体系和财税支撑体系，加大有色金属行业企业生产工艺的提升改造力度，协同推进减污降碳；依托先进信息技术平台，推动信息技术、数据驱动等与有色金属工业生产过程的技术结合，提升产业发展的科技内核实力，切实解决产

业企业工艺发展瓶颈及重金属污染防治问题。

### (五) 把握“一带一路”共建国家冶金合作发展契机，构建国际竞争核心技术驱动力

抓住“一带一路”的发展契机，通过投资并购、联合投资等多种方式开发和利用境外矿产资源。以刚果民主共和国、赞比亚、秘鲁等国家的铜资源，几内亚、印度尼西亚、牙买加、老挝、柬埔寨等地区的铝土矿资源，印度尼西亚、菲律宾、缅甸、巴布亚新几内亚等地区的红土镍矿为重点，统筹规划，实施一大批海外国际产能合作、装备制造、基础设施合作等重大工程<sup>[25]</sup>，针对国际冶金行业资源特征、发展趋势和重大工程需求，建设形成一批配套完整的、具有国际竞争力的规模化境外矿产资源利用技术体系与标准，建设基于我国冶金核心技术体系的国际矿业基地，增强境外资源保障能力，延增国际产能，提高全球竞争核心技术驱动力。

#### 致谢

衷心感谢邱定蕃、黄伯云、干勇、何季麟、孙传尧、张文海、王一德、王国栋、刘炯天、邱冠周、李元元、谢建新、毛新平、黄小卫、聂祚仁、刘正东、姜涛、赵中伟等院士，贾明星、高焕芝、何发钰、李会泉、张一敏、郭学益、王华、杨斌、马文会、高贵超、喻鸿、刘诚、肖永力、储双杰、王海北、叶恒棣、刘朗明、林璋、李劼、吴玉锋、王成彦、朱苗勇、王万林、袁水平、邢奕、胥福顺、李卫锋、王辉、宁平、郑诗礼、杨洪英、李小斌、王云燕、郭培民等多位专家提供了宝贵指导与帮助。特别感谢参与德尔菲调研的百余位行业同仁，其贡献对本文技术预见调查及重点任务、重大工程等战略规划内容研究至关重要。

#### 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:** September 2, 2024; **Revised date:** October 8, 2024

**Corresponding author:** Chai Liyuan is a professor from the School of Metallurgy and Environment, Central South University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is nonferrous metallurgical environmental engineering. E-mail: lychai@csu.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of China’s Engineering Science and Technology of the Next 20 Years” (2021-XBZD-13)

#### 参考文献

- [1] 贾明星. 七十年辉煌历程 新时代砥砺前行——中国有色金属工业发展与展望 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1801–1808.  
Jia M X. A review of nonferrous metals industry achievements in

- China (1949—2019) and prospects for the future [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(9): 1801–1808.
- [2] 王佳璐. 有色产业现状及发展趋势分析 [J]. *中国有色金属*, 2024 (9): 38–39.  
Wang J L. Analysis of the current situation and development trends of nonferrous industry [J]. *China Nonferrous Metals*, 2024 (9): 38–39.
- [3] 叶永恒, 李承智. 智能化绿色冶金工厂技术的发展方向 [J]. *智能建筑与智慧城市*, 2024 (9): 33–35.  
Ye Y H, Li C Z. Development direction of intelligent and green metallurgical factory technology [J]. *Intelligent Building & Smart City*, 2024 (9): 33–35.
- [4] 孙兴雷, 王有臣, 任洪磊. 有色冶炼企业优势再造的探索与思考 [J]. *中国有色金属*, 2024 (15): 58–59.  
Sun X L, Wang Y C, Ren H L. Exploration and reflection on the reconstruction of advantages in nonferrous smelting enterprises [J]. *China Nonferrous Metals*, 2024 (15): 58–59.
- [5] 李浩丞, 刘玉军, 赵卓, 等. 短流程钢铁冶金发展 [J]. *材料导报*, 2023, 37(S1): 408–413.  
Li H C, Liu Y J, Zhao Z, et al. Short process of iron and steel metallurgy [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(S1): 408–413.
- [6] 张宇燕, 邹治波. 国际形势黄皮书: 全球政治与安全报告 2022 [R]. 北京: 社会科学文献出版社, 2022.  
Zhang Y Y, Zou Z B. Annual report on international politics and security (2022) [R]. Beijing: Social Science Academic Press, 2022.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部印发《“十四五”工业绿色发展规划》[EB/OL]. (2021-11-15)[2024-05-05]. [https://www.miit.gov.cn/cms\\_files/filemanager/1226211233/attach/20224/99a5c254cd5a45c9896b0cb0b675ed03.pdf](https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/1226211233/attach/20224/99a5c254cd5a45c9896b0cb0b675ed03.pdf).  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. The Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China issued the 14th Five-Year Plan for industrial green development [EB/OL]. (2021-11-15)[2024-05-05]. [https://www.miit.gov.cn/cms\\_files/filemanager/1226211233/attach/20224/99a5c254cd5a45c9896b0cb0b675ed03.pdf](https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/1226211233/attach/20224/99a5c254cd5a45c9896b0cb0b675ed03.pdf).
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部, 国家发展和改革委员会, 生态环境部. 工业领域碳达峰实施方案 [EB/OL]. (2022-07-07)[2024-05-08]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/5703910/files/f7edf770241a404c9bc608c051f13b45.pdf>.  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Implementation program for carbon peak in the industrial sector [EB/OL]. (2022-07-07)[2024-05-08]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/5703910/files/f7edf770241a404c9bc608c051f13b45.pdf>.
- [9] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. “十四五”循环经济发展规划 [EB/OL]. (2021-07-01)[2024-05-30]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content\\_5623077.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content_5623077.htm).  
National Development and Reform Commission. The 14th Five-Year Plan for the development of circular economy [EB/OL]. (2021-07-01)[2024-05-30]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content\\_5623077.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content_5623077.htm).
- [10] 德国联邦教育研究部. 把握德国制造业的未来——实施“工业 4.0”攻略的建议 [R]. 柏林: 德国联邦教育研究部, 2013.  
Federal Ministry of Education and Research. Securing the feature of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative industry 4.0 [R]. Berlin: Federal Ministry of Education and Research, 2013.
- [11] 中国宏观经济研究所. 中国能源转型展望 [R]. 北京: 中国宏观经济研究所, 2023.  
Energy Research Institute of the China Macroeconomic Research Institute. Outlook on China's energy transition [R]. Beijing: China Macroeconomic Research Institute, 2023.
- [12] 王崑声, 周晓纪, 龚旭, 等. 中国工程科技 2035 技术预见研究 [J]. *中国工程科学*, 2017, 19(1): 34–42.  
Wang K S, Zhou X J, Gong X, et al. Technology foresight on China's engineering science and technology to 2035 [J]. *Strategic Study of CAE*, 2017, 19(1): 34–42.
- [13] 清华—力拓资源能源与可持续发展联合研究中心. 中国资源能源与可持续发展——金属碳中和战略研究专题报告 [R]. 北京: 清华—力拓资源能源与可持续发展联合研究中心, 2022.  
Tsinghua-Rio Tinto Joint Research Centre for Resources, Energy and Sustainable Development. China's resources, energy and sustainable development: 2022 — Special report on carbon neutrality strategy for metal industry [R]. Beijing: Tsinghua-Rio Tinto Joint Research Centre for Resources, Energy and Sustainable Development, 2022.
- [14] Ren L, Zhou S, Peng T D, et al. A review of CO<sub>2</sub> emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 143: 110846.
- [15] 刘晓龙, 崔磊磊, 杜祥琬. 纵深推进“无废城市”建设的总体思路和发展方向 [J]. *环境保护*, 2023, 51(24): 18–20.  
Liu X L, Cui L L, Du X W. Overall thought and development direction of promoting the construction of “zero-waste city” [J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(24): 18–20.
- [16] Zero Waste International Alliance. Zero waste definition [EB/OL]. (2020-07-23)[2024-05-30]. <https://zwia.org/zero-waste-definition/>.
- [17] 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 America*, 2019, 116(17): 8206–8213.
- [18] Tang J, Chu M S, Li F, et al. Development and progress on hydrogen metallurgy [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020, 27(6): 713–723.
- [19] 中国冶金报. 短流程如何助力“冶炼”绿色未来?——全国电炉短流程炼钢推进大会撷英 [EB/OL]. (2023-05-09)[2024-05-30]. [http://www.csteelnews.com/xwzx/jrrd/202305/t20230508\\_74460.html](http://www.csteelnews.com/xwzx/jrrd/202305/t20230508_74460.html).  
China Metallurgical News. How can short processes help “smelting” a green future? —National electric furnace short process steelmaking promotion conference [EB/OL]. (2023-05-09)[2024-05-30]. [http://www.csteelnews.com/xwzx/jrrd/202305/t20230508\\_74460.html](http://www.csteelnews.com/xwzx/jrrd/202305/t20230508_74460.html).
- [20] 国家自然科学基金委员会. 国家自然科学基金“十四五”发展规划 [EB/OL]. (2022-11-18)[2024-05-30]. <https://www.nsf.gov.cn/>

- publish/portal0/tab1392/.
- National Natural Science Foundation of China. The 14th Five-Year Plan for the development of the national natural science foundation of China [EB/OL]. (2022-11-18)[2024-05-30]. <https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab1392/>.
- [21] 翁威. 典型难熔金属含氧酸盐熔盐电解金属的基础研究 [D]. 北京: 北京科技大学(博士学位论文), 2018.
- Weng W. Basic research on direct preparation of metals from refractory metal oxysalts by molten salt electrolysis [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing (Doctoral dissertation), 2018.
- [22] 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): 650–654.
- [23] Zhang L G, Xu Z M. A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127: 19–36.
- [24] 中国物资再生协会. 中国再生资源回收行业发展报告(2023) [J]. *资源再生*, 2023 (5): 16–22.
- China National Resources Recycling Association. China renewable recycling industry development report (2023) [J]. *Resource Recycling*, 2023 (5): 16–22.
- [25] 康义. 加入世界贸易组织20年——我国有色金属工业回顾与展望 [J]. *中国有色金属*, 2022 (1): 64–65.
- Kang Y. 20 years of joining the World Trade Organization — Review and prospect of China's non-ferrous metals industry [J]. *China Nonferrous Metals*, 2022 (1): 64–65.