

在淡水鱼类方面,重金属富集的微塑料对多种鱼类也存在显著的损伤作用。微塑料(MPs)和铅(Pb)复合污染会显著增加鲤组织中Pb的蓄积,并导致肠道MPs富集,引发抗氧化系统紊乱、神经递质失调和代谢异常。此外,复合暴露还会破坏鲤的肠道菌群结构和肠壁形态,降低微生物多样性并损害肠道屏障功能。同样,王艳丽等以斑马鱼为模型,探究了微塑料和Cd复合污染的毒性效应<sup>[2]</sup>。结果表明,不同浓度的MPs和Cd联合暴露会加剧斑马鱼的氧化应激、炎症反应和组织损伤,并呈现剂量依赖性效应,同时显著降低肠道菌群多样性。

在海洋鱼类方面,重金属富集的微塑料同样会引发多重毒性效应,且复合污染的危害往往超过单一污染物。研究表明,微塑料与重金属共同作用会显著抑制海洋鱼类的正常生长发育,降低其免疫防御能力,并造成神经毒性损伤。当微塑料吸附了镉、铅等重金属后,鱼类摄入这些复合颗粒会导致重金属在肝脏、鳃和肠道等关键组织中富集,引发组织氧化损伤和代谢功能紊乱。同时,复合污染会破坏鱼类的免疫系统平衡,降低其对病原体的抵抗能力,增加感染风险。此外,微塑料与重金属的联合暴露还可能干扰鱼类神经递质的正常传递,影响其行为活动和感官功能,如游泳模式异常和对环境变化的反应迟钝。这些发现表明,海洋鱼类在面对微塑料与重金属复合污染时,会遭受生长受限、免疫力下降和神经功能损伤等多重威胁,其复合毒性效应比单一污染物更为复杂和严重。

### 3.3.2 藻类

MPs对重金属的吸附可能会对水生生物产生潜在的毒性,包括对藻类的光合作用及某些水生生物的生长和繁殖影响<sup>[6]</sup>,这将蔓延到整个食物链,因此严重危害人类健康。

微塑料与重金属在水环境中的复合暴露,主要通过“物理-化学-生物”三重机制对藻类产生显著的协同毒性效应。微塑料凭借其大比表面积,可有效吸附并富集水体中的重金属离子(如Pb<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>等),形成稳定的复合污染物。藻类摄入或接触这些负载重金属的微塑料后,后者可在藻细胞内部解吸释放,从而大幅提高重金属的生物可利用性,产生“木马效应”,加剧了重金属的直接毒害。在毒性机制层面,复合污染会引发藻细胞严重的氧化应激,导致活性氧(ROS)过量累积,破坏抗氧化酶系统,并诱发脂质过氧化,损伤细胞膜结构。同时,微塑料的光遮蔽作用与重金属对叶绿素合成的抑制相互叠加,导致叶绿素含量显著下降,并干扰光系

统的电子传递,使光合效率大幅降低。此外,复合暴露还会干扰藻类的能量代谢与营养物质合成,最终表现为生长速率受到显著抑制。尽管在特定条件下(如纳米级微塑料吸附大量重金属离子)可能观察到短暂的拮抗现象,但绝大多数研究表明,微塑料与重金属对藻类的联合毒性呈现协同增强效应,其生态风险远高于单一污染物对水生生态系统的初级生产力构成持续威胁。

## 4 结语

本文系统综述了微塑料与重金属在水环境中的污染现状、相互作用机制及其对水生生物的复合毒性效应研究进展。研究表明,微塑料因其较大的比表面积和疏水特性,能够有效吸附水体中的重金属(如Pb、Cd、Hg等),形成复合污染物。这种相互作用受微塑料类型、老化程度、环境条件等多因素影响,其中老化微塑料因表面氧化产生的含氧官能团可显著增强对重金属的吸附能力。值得注意的是,微塑料-重金属复合污染对水生生物的影响表现出复杂的协同或拮抗效应,具体表现为:一方面可通过增强重金属的生物可利用性,加剧氧化损伤、炎症反应和组织病理变化;另一方面在特定条件下可能通过调节肠道菌群或抑制金属转运蛋白表达等机制减轻重金属毒性。未来研究需重点关注MPs-重金属复合污染的长期生态效应、真实环境低浓度长期暴露的风险评估、食物链传递对人类健康的潜在威胁,以及开发高效联合修复技术并评估其生态安全性。

## 参考文献

- [1] 杨国祥,沈卫新,汤建华,等.海洋微塑料研究进展[J].水产养殖,2024,45(02):8-16+22.
- [2] 王艳丽.聚苯乙烯微塑料与镉对斑马鱼的联合毒性效应[D].山东农业大学,2024.
- [3] 赵丽凤.微塑料和重金属铅复合暴露对鲤的毒性效应[D].河南师范大学,2023.
- [4] Liu H, Rao C, Xu H. Enhancement of Pb adsorption by aged polyethylene terephthalate microplastics in the presence of microalgae: kinetic and mechanistic[J]. Environmental geochemistry and health, 2025, 47(7): 254.
- [5] 徐驰,冼健安,郭慧,等.重金属对虾类毒性作用机制的研究进展[J].水产科学,2025,44(03):490-502.
- [6] 沈佳慧,唐铮,戚琳媛,等.微塑料与重金属暴露对植物的联合毒性及其机制研究[J].粮油科学与工程,2025,39(03):32-36+40.

# Research on Energy Saving and Consumption Reduction and Pollutant Co-control Technology in Metallurgical Industry

Guangze Wei

University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning, 114051, China

## Abstract

As a vital foundational industry of the national economy, the metallurgical sector provides critical raw materials for social development while simultaneously facing significant challenges of energy consumption and environmental pollution. Against the backdrop of the “dual carbon” goals, promoting energy conservation, emission reduction, and integrated pollutant control in the metallurgical industry has become a core task for its green transformation. This paper systematically analyzes the current status and characteristics of energy consumption and pollutant emissions in the metallurgical sector, explores synergistic control technologies across multiple dimensions including source reduction, process control, end-of-pipe treatment, and system optimization, and proposes corresponding technical pathways and development recommendations. These findings aim to provide theoretical references and technical support for achieving green, low-carbon, and high-quality development in the metallurgical industry.

## Keywords

metallurgical industry; energy conservation and emission reduction; pollutant control; synergistic control; cleaner production

## 冶金行业节能降耗与污染物协同控制技术研究

魏光泽

辽宁科技大学, 中国·辽宁鞍山 114051

## 摘要

冶金工业作为国民经济的重要基础产业, 在为社会发展提供关键原材料的同时, 也面临着巨大的能源消耗与环境污染压力。在“双碳”目标背景下, 推动冶金行业实现节能降耗与污染物协同控制, 已成为行业绿色转型的核心课题。本文系统分析了冶金行业能源消耗与污染物排放的现状与特征, 深入探讨了源头减量、过程控制、末端治理及系统优化等层面的协同控制技术, 并提出了相应的技术路径与发展建议, 以期冶金行业实现绿色低碳高质量发展提供理论参考与技术支撑。

## 关键词

冶金行业; 节能降耗; 污染物控制; 协同控制; 清洁生产

## 1 引言

冶金工业涵盖钢铁、有色冶金等多个领域, 是能源密集型与资源密集型产业的典型代表。面对资源约束趋紧、环境容量受限以及“碳达峰、碳中和”目标的刚性要求, 传统的“先污染、后治理”模式已难以为继。如何将节能降耗与污染物控制有机结合, 实现从单一介质治理向多介质协同控制的转变, 已成为冶金行业技术创新与产业升级的关键方向。因此, 将二者纳入统一的协同控制框架, 不仅能够避免不同治理措施之间的冲突与重复投入, 更可产生显著的协同增效作用。

作者简介: 魏光泽 (2005-), 男, 中国山东潍坊人, 在读本科生, 从事冶金工程研究。

## 2 冶金行业能耗与污染排放特征分析

### 2.1 能源消耗特征

冶金行业能耗呈现总量大、强度高、流程复杂的特点。以钢铁行业为例, 其生产工艺主要包括长流程 (高炉-转炉) 和短流程 (电炉) 两种。长流程以铁矿石、焦炭为主要原料, 涉及烧结、球团、炼铁、炼钢、轧钢等工序, 能源结构以煤炭为主, 能耗水平显著高于短流程。有色冶金则包括铜、铝、铅、锌等多种金属的冶炼, 其中电解铝的电力消耗尤为突出, 占行业总能耗的较大比重。

从能源消费结构来看, 冶金行业对化石能源依赖度较高, 煤炭、焦炭及电力是主要能源形式。能源效率方面, 重点钢铁企业吨钢综合能耗虽已接近国际先进水平, 但中小企业及部分有色冶炼企业的能效水平仍有较大提升空间。能源损失主要表现为余热余能未充分利用、设备运行效率偏

低、生产流程匹配不佳等。

## 2.2 污染物排放特征

冶金行业排放的污染物种类繁多、毒性复杂,主要包括:

大气污染物:二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、颗粒物(PM)、二噁英、氟化物、重金属(如铅、汞、砷、铬)等。烧结、炼铁、炼钢等工序是大气污染的主要产污节点。

水污染物:包括酸碱废水、含重金属废水、含油废水、氟化物等,具有成分复杂、毒性强、难降解等特点。

固体废物:包括高炉渣、钢渣、赤泥、铜渣、阳极泥、脱硫石膏等,产生量大、综合利用难度高。

传统治理模式下,能耗控制与污染物治理往往分属不同管理体系,缺乏系统统筹。例如,为降低二氧化硫排放而增设的末端脱硫设施,可能带来额外的能源消耗和碳排放;反之,某些节能改造措施(如烟气余热回收)若设计不当,可能影响后续污染治理设施的运行效率。这种割裂的治理模式,亟需向协同控制方向转变<sup>[1]</sup>。

## 3 协同控制关键技术体系

基于源头预防—过程控制—末端治理—系统集成的全链条思路,冶金行业节能降耗与污染物协同控制的技术体系可概括为以下四个层面。

### 3.1 源头减量技术

#### 3.1.1 清洁原料替代技术

原料品质直接影响能耗水平与污染物生成量。在钢铁领域,采用高品位铁精矿、低硫低灰煤粉和优质废钢,可显著降低烧结、炼铁工序的燃料消耗与污染物产生。在有色冶金领域,推广高品位铜精矿、预焙阳极等优质原料,有助于减少电解、熔炼环节的能耗与废气排放。此外,利用生物质燃料、氢能等低碳能源替代部分化石能源,可同时实现碳减排与 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等污染物源头削减。

#### 3.1.2 废钢资源高效利用

对于钢铁行业而言,提高废钢比是降低长流程依赖、实现源头减量降耗的关键路径。电炉短流程吨钢能耗仅为长流程的1/3左右,污染物排放强度亦显著降低。通过完善废钢回收体系、发展高效电炉炼钢技术,可推动钢铁生产结构优化,从源头实现节能与减排的协同。

#### 3.1.3 低品位资源综合利用技术

针对大量伴生矿、复杂共生矿资源,开发选择性还原、梯级提取等技术,提高有价元素回收率,减少固体废物产生量,降低后续冶炼过程的能耗与污染负荷。

### 3.2 过程清洁生产技术

#### 3.2.1 高温过程强化与能效提升

冶金高温反应器是能耗与污染物的集中产生环节。通过富氧喷吹、高风温技术、低温烧结等工艺强化手段,可提高反应效率,降低燃料消耗。例如,高炉富氧喷煤技术可提高煤粉燃烧效率,降低焦比,减少 $\text{CO}_2$ 及污染物排放。烧

结工序采用烟气循环烧结技术,将部分烧结烟气返回烧结料层,既回收了烟气余热,又降低了末端烟气处理量,减少二噁英、 $\text{SO}_2$ 等污染物排放。

#### 3.2.2 干法熄焦与余热回收

焦化是钢铁联合企业中的重要能耗与污染环节。干法熄焦(CDQ)相较于湿法熄焦,可回收红焦显热生产蒸汽,同时避免了湿法熄焦过程中产生的含酚、氰等污染蒸汽排放,实现了节能与环保的双重效益。该技术已在大型钢铁企业广泛推广,是协同控制的典型范例。

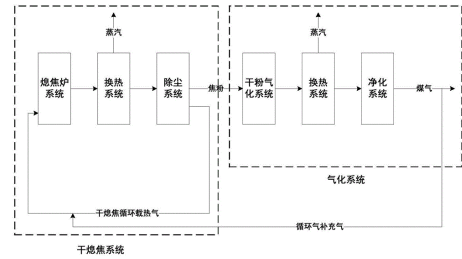


图 1: 干熄焦系统

#### 3.2.3 过程智能控制与优化

借助物联网、大数据、人工智能等技术,建立工序级与全流程级的能源—环境智能管控平台,实现关键工艺参数的动态优化。例如,通过烧结终点智能控制,可在保证烧结矿质量的同时降低固体燃料消耗,减少烟气中 $\text{SO}_2$ 与二噁英的生成波动,为后续治理设施稳定运行创造条件<sup>[2]</sup>。

### 3.3 末端治理协同技术

#### 3.3.1 高效除尘与余热回收一体化技术

针对高温含尘烟气,开发具有余热回收功能的除尘装置,如余热锅炉与高温电除尘器耦合系统。在捕集颗粒物的同时回收烟气显热,用于发电或供热,实现污染物去除与能源回收的双重目标。

#### 3.3.2 脱硫脱硝协同与资源化技术

传统的湿法脱硫、选择性催化还原(SCR)脱硝分别建设、分别运行,存在占地大、投资高、能耗高等问题。近年来,活性焦/活性炭干法脱硫脱硝一体化技术得到快速发展。该技术利用活性焦的吸附与催化性能,在一个塔内同时脱除 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、二噁英、重金属等多种污染物,且可回收硫资源制备硫酸,不产生废水,具有显著的环境效益与资源效益。同时,该技术能耗相对可控,体现了末端治理中的协同理念。

#### 3.3.3 多污染物协同脱除技术

针对烧结、冶炼烟气中多种污染物共存的特点,开发催化滤袋、臭氧氧化协同湿法洗涤等集成技术,在一个反应单元内实现颗粒物、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、重金属及二噁英的协同脱除,简化流程、降低能耗。

#### 3.3.4 固废协同处置与资源化

冶金固体废物中富含铁、碳、钙等有用组分,可通过协同处置实现资源化利用。例如,利用钢渣、矿渣制备低碳

胶凝材料,替代水泥熟料,既消纳固废,又降低建材行业的碳排放;将除尘灰、轧钢氧化铁皮等返回烧结或炼钢工序,实现铁素资源循环利用。此外,利用冶金炉窑协同处置社会危废(如废轮胎、废塑料等),既可回收能源与材料,又能减少污染物排放。

### 3.4 跨工序、跨介质系统优化技术

#### 3.4.1 能源—环境耦合优化模型

从全厂角度出发,建立涵盖能源介质(煤气、蒸汽、电力、水等)与环境介质(废气、废水、固废)的耦合优化模型。通过数学规划、动态仿真等手段,优化煤气、蒸汽的跨工序调度,实现余热余能资源在不同工序间的梯级利用,同时考虑污染治理设施的能耗约束,寻求全局最优解。

#### 3.4.2 物质流—能量流—环境流协同调控

借鉴冶金流程工程学思想,将生产流程视为物质流、能量流与环境流交织的复杂网络。通过对铁素流、碳素流、水循环网络等进行分析与重构,识别并消除瓶颈环节,减少物质与能量损失,降低全流程污染物排放强度。例如,通过优化高炉煤气与转炉煤气的回收与分配,平衡电厂锅炉与热风炉的燃料需求,可减少煤气放散,提高自发电比例,同时降低全厂外购电力对应的间接碳排放。

#### 3.4.3 循环经济与产业共生

推动冶金企业与周边化工、建材、电力等行业构建循环经济产业链,形成跨行业的协同控制模式。例如,利用焦炉煤气、转炉煤气生产化工产品(甲醇、乙二醇等),将钢渣用于道路材料或土壤改良剂,将高炉水渣作为水泥混合材,将余热用于区域供暖或现代农业。这种产业共生模式可将单一企业难以消纳的余能、废物转化为外部可利用的资源,拓展了协同控制的外延<sup>[3]</sup>。

## 4 存在的问题与发展建议

### 4.1 存在问题

尽管冶金行业在节能降耗与污染物协同控制方面已取得显著进展,但仍面临诸多挑战。

首先,技术集成度不足,现有技术多集中于单一工序或单一介质,缺乏跨工序、跨介质乃至跨行业的系统集成解决方案,导致协同效应难以充分发挥。其次,成本压力与收益错配问题突出,协同控制技术往往初始投资较高,而环境效益与节能收益的回收期较长,一定程度上抑制了企业的投资意愿。再次,标准体系尚不完善,现有标准多针对单一污染物或单一能效指标,缺少能够系统评价协同控制效果的综合标准与核算方法。此外,数据基础较为薄弱,能源流、物质流与环境流数据分散于不同管理部门,缺乏统一的数据平台与共享机制,制约了系统优化模型的构建与应用。

与此同时,低碳转型也带来了新的挑战,“双碳”目标对冶金行业提出了更高要求,氢冶金、碳捕集利用与封存(CCUS)等颠覆性技术尚处于示范阶段,其与传统污染物

协同控制之间的关系仍有待深入研究。

### 4.2 发展建议

#### 4.2.1 加强顶层设计,完善政策引导

应制定冶金行业节能降耗与污染物协同控制的专项规划,明确技术路线图与阶段性目标。将协同控制效果纳入环保、能效“领跑者”评价体系,通过绿色金融、税收优惠、差别化电价等政策工具,激励企业采用协同控制技术。

#### 4.2.2 突破关键技术,强化创新支撑

加大对源头减量、过程清洁、末端协同及系统集成技术的研发投入。重点支持氢基直接还原、烟气多污染物协同脱除、冶金炉窑协同处置固废、跨行业能源梯级利用等前沿技术攻关。构建产学研用协同创新平台,加速科技成果转化应用。

#### 4.2.3 健全标准体系,建立评价方法

研究制定冶金行业协同控制技术规范与评价指南,建立涵盖能效、污染物减排、碳减排、资源循环等多维度的综合评价指标体系。推动企业开展协同控制绩效评估,引导行业对标提升。

#### 4.2.4 推动数字化转型,赋能系统优化

利用工业互联网、数字孪生等技术,构建冶金企业“能源—环境—碳”一体化智慧管控平台。通过数据驱动建模与优化算法,实现全流程物质流、能量流、环境流的协同匹配与动态调度,挖掘系统层面的协同控制潜力。

#### 4.2.5 探索协同降碳路径,应对未来挑战

面向碳中和目标,积极探索氢能与冶金深度融合、生物质能利用、CCUS等低碳技术与传统污染物控制技术的协同路径。开展长期低碳情景下的协同控制路线图研究,确保冶金行业在绿色转型过程中平稳有序发展<sup>[4]</sup>。

## 5 结论

冶金行业节能降耗与污染物协同控制是实现行业绿色低碳发展的必然选择。基于对冶金流程能量流—物质流—环境流耦合特性的深刻认知,通过源头减量、过程清洁、末端协同及系统优化等技术的集成应用,可以突破传统单一要素治理的局限,实现能效提升与环境绩效改善的双赢。当前,冶金行业正处在由规模扩张向质量效益转变、由末端治理向全过程优化转变的关键时期。加快推进协同控制技术创新与应用,不仅有助于企业降低能源环境成本、提升市场竞争力,更是推动冶金行业实现“双碳”目标、建设美丽中国的重要支撑。

### 参考文献

- [1] 冯梓莫. 冶金工业领域节能环保技术创新与低碳生产模式优化[J].能源与节能,2025,(S1):78-80+84.
- [2] 张秀宝. 绿色节能在冶金行业经济发展中的作用研究[J].有色金属(冶炼部分),2025,(12):257.
- [3] 吕堃. 基于机械自动化冶金行业节能降耗策略研究[J].冶金管理,2025,(06):66-68.
- [4] 龙应瑞,韩龙,李国亮. 新时代冶金轧钢生产新技术研究[J].冶金管理,2023,(11):22-24.