

锻造绿色钢铁新质生产力： 可持续钢铁材料的技术攻坚与产业突围

习近平总书记在2025年初视察辽宁本溪钢铁集团时指出：“钢铁产业是我们国家的重要基础产业，实体经济是国民经济的根基所在。要继续努力，把短板补上，把结构调优，继续为中国式现代化多作贡献。”这一指示不仅为钢铁产业转型升级指明方向，更揭示了钢铁工业在国家发展中的战略定位。

当前，全球产业链重构与低碳革命交织，中国钢铁工业正处于从规模扩张向绿色循环转型的关键节点。2024年，全球钢产量18.826亿t，是产量最大的金属材料，中国钢产量10.051亿t，占全球的53%。传统钢铁行业能耗高、排放大，2023年，中国钢铁行业碳排放18.6亿t，占全国的15%，在全球气候治理和国家碳中和背景下面临严峻挑战。

相比以铁矿石为原料的原生钢铁，以废钢为原料的可持续钢铁材料制造具有减碳60%~70%的潜力。2024年，新央企“中国资源循环集团”成立，习近平总书记作出重要指示，强调“坚持循环利用、变废为宝，坚持创新驱动”。2025年《政府工作报告》中首次纳入“再生材料”的政策信号，体现可再生材料在当前阶段国家发展中的关键地位。

1 破解资源困境，保障国家安全

钢铁材料再生是解决钢铁工业对原生金属资源依赖，提高关键产业原材料战略安全的根本途径。据中国地质科学院的统计，2024年中国进口铁矿石12.37亿t，创历史新高。过高的对外依存度严重威胁钢铁工业产业链安全。发达国家高度重视矿产资源安全，并将

钢铁材料可持续发展是全球科技创新和产业布局竞争的焦点，对保障中国资源与产业安全意义重大，是最具代表性的绿色生产力。

再生循环利用作为保障关键金属资源供应安全的战略共识。美国能源部在《2023年关键材料清单》(《2023 Final Critical Materials List》)中，将电工钢等列为与能源相关的关键材料，并认为保障关键材料和矿产供应链安全，对确保美国在新一轮科技革命中的领先地位至关重要。日本于2020年出台的《日本全球资源新战略》，明确促进关键金属循环再生的战略意义。2022年5月，欧盟发布的《清洁能源金属：解决欧洲原材料挑战的途径》(《Metal for Clean Energy: Pathways to Solving Europe's Raw

Materials Challenge》)指出，循环利用是实现欧洲清洁能源关键金属战略自主的关键所在。

随着国内建筑拆迁、汽车报废以及各种制造企业产生的废料积蓄量不断增长，“城市矿产”逐渐作为二次资源释放出来，关键金属再生供应潜力将大幅上升。未来，钢铁材料可持续发展对于降低钢铁产业矿产资源对外依存度、保障国家矿产资源的战略安全、提升产业链供应链韧性和安全水平，将发挥不可替代的作用。

2 赋能经济高质量发展，应对全球碳关税壁垒

钢铁材料可持续发展是应对全球碳关税壁垒的重要技术路径，对于提高中国钢铁产业市场竞争力至关重要。近年来，西方发达国家碳壁垒政策制定步伐显著提速，旨在争夺全球应对气候变化的主导权及国际贸易规则制定权，进而影响全球产业格局及分工。欧盟已出台《欧盟碳边境调节机制》(《Carbon Border Adjustment Mechanism》，CBAM)、《循



毛新平

中国工程院院士

金属压力加工专家，现任北京科技大学碳中和研究院院长。研究方向为先进钢铁材料及其低碳制备。

北京科技大学碳中和研究院，北京 100083

环经济行动计划》(《Circular Economy Action Plan》, CEAP)等碳壁垒重点法案,钢铁等5类产品被纳入首批征税产品范畴,2026年起全面征收碳关税。美国、英国、加拿大、日本等国家也正在谋划清洁竞争法案(Clean Competition Act, CCA)等政策法案。传统钢铁材料及其制品,作为高载能、高排放的产品,其国际贸易将受到碳关税壁垒的直接冲击和影响。以CBAM为例,国内钢铁企业主要采用高炉-转炉长流程,吨钢碳排放显著高于电炉为主的欧美发达国家。同时,由于中国和欧盟较大的碳价差,未来中国钢铁产品出口欧盟需缴纳较多碳关税,削弱出口企业在产品价格上的比较优势,进而降低同类产品及产业链上下游产品的国际竞争力。

通过钢铁材料可持续发展可显著降低钢铁生产过程的碳排放,进而建立新的竞争优势。碳中和背景下钢铁产品下游制造商越来越倾向于选择可持续和更低碳的钢铁材料,例如,汽车行业已明确要求金属生产商采用更加可持续的生产方法,要求通过金属材料再生、采用绿电等方式,减少交付金属的碳排放。可以预见,可持续发展技术水平的高低将是决定钢铁材料行业国际竞争力的关键因素。

3 抢占技术制高点,培育新质生产力

习近平总书记指出,绿色发展是高质量发展的底色,新质生产力本身就是绿色生产力。钢铁材料可持续发展具有绿色化的显著特征,是最具代表性的绿色生产力。当前,全球每年从消费前和消费后金属废料中回收约6.3亿t钢铁,但普遍存在降级使用和产品低端化的特点。金属废

料具有成分复杂、杂质元素含量高的特性,例如废旧汽车、家电等零部件拆解过程中黑色和有色金属难以完全分离;可持续钢铁原料在产生、收集、包装和运输过程中易混入废塑料、油污、灰尘、污泥等非金属污染物质;废料来源广泛,合金牌号多样,钢铁材料循环过程中容易形成元素的累积效应。这些因素共同导致再生钢铁原料“脏”的特性,并最终导致不期望的微观结构效应出现,包括大的碳化物和氮化物、金属间化合物、非金属夹杂物、带状微观结构特征、低熔点共晶、晶界和相界偏析、相变响应延迟等,从而严重制约其在高性能钢铁材料生产上的使用。

为实现可持续钢铁材料的高质化利用,必须构建完善的科学技术体系,从基础科学理论和关键技术入手,解决以下3大挑战。

1) 残余元素的去除。

高质化利用的重大挑战之一,即在材料冶金过程中如何高效去除再生金属原料中的高含量杂质元素。可持续钢铁原料中含有Cu、Ni、Cr、Mo和Sn等残余元素,这些元素由于较高的晶界偏析系数和较低的熔点,容易在钢中引起晶界弱化、形成软相或低熔点相,并在热轧、弯曲和拉伸载荷条件下发生晶间断裂,严重影响高值钢铁材料的机械和功能性能。传统的熔体净化方法无法满足钢铁材料高质化再生利用的需求,必须充分发挥化学冶金方法与多物理场耦合的复场协调效应,发展新的熔体净化原理与技术。

2) 残余元素的赋存状态及构效关系。

残余元素是影响可持续钢铁材料组织与性能的关键变量,也是钢铁材料可持续发展的核心问题。受技术与经济性的限制,可持续钢铁原料由“脏”变“纯净”难

度很大,或需要付出较为高昂的成本代价,因而明确残余元素的赋存状态及其影响因素,厘清残余元素对微观结构和各种性能的影响规律与作用机理,是实现高质化利用的前提和基础。然而,鉴于残余元素在材料加工过程中的遗传效应十分复杂,多组元低剂量条件下残余元素存在多尺度的微耦复合效应,要想建立残余元素-微观结构-宏观性能的系统构效关系模型难度极大,这也是当前学术界面临的一个重大挑战。

3) 面向钢铁材料可持续发展的新材料新工艺设计。

如何设计并开发出对废料兼容性好、残余元素容忍度高的新材料新工艺,并实现在汽车、能源等领域中的高端应用,是高质化利用的第3个重大挑战。传统的材料与工艺主要基于原生钢铁材料设计,不仅对残余元素的含量有严格限制,往往对主合金元素也有精细的区分。而废料成分复杂、残余元素含量高的特点,为新材料新工艺的设计提供了更广阔的空间。另外,残余元素对材料的影响往往具有多面性。例如,铜元素在钢中容易因表面富集和晶界渗透导致铜脆现象,但是铜元素也有利于提高钢铁材料的耐蚀性能。因此,若能通过新工艺的开发,抑制其不利的影响,同时充分发挥其有益的作用,提高残余元素的容忍极限(容限),将可为新材料的设计研发、可持续金属的推广应用提供新的思路与选择。

综上所述,聚焦高质化利用的钢铁材料可持续研究是当前钢铁行业技术发展的大势所趋,是锻造绿色钢铁新质生产力的核心所在。其背后孕育着新兴的研究方向,既具有极大挑战,又蕴含巨大机遇。