



钢铁材料合金化技术的发展现状及趋势

潘晓坤¹, 孙万利¹, 闫建升¹, 张朝磊^{1,2}

(1 北京科技大学碳中和研究院, 北京 100083; 2 辽宁材料实验室钢铁再生技术研究所, 沈阳 110167)

摘要: 钢铁材料合金化技术始于 19 世纪初法拉第等人对镍、铬等合金元素的系统性探索, 历经经验积累、相图理论指导及微合金化等阶段, 现已发展为可实现成分精准设计与性能调控的关键技术。当前, 该技术正面临着持续合金化使材料成本急剧增加, 对材料性能的提升作用逐渐趋于饱和; 多数合金资源回收率不足 1%, 且近乎不可再生, 过度依赖合金化可能引发国家资源安全问题; 以及高度合金化使材料回收再利用愈发困难, 与材料可持续再生循环利用相悖等问题与挑战。微合金化技术通过添加 $<0.1\%$ Nb、V、Ti 等元素可实现“减量增效”; 低密度化实现了钢材轻量化与强塑性倒置关系的极限突破, 其中, 每添加 1% 的 $w[Al]$ 可使钢材密度降低约 1.4%, 高锰钢在汽车领域的应用使得零部件减重 15%~20%; 混杂与归一化推动“一钢多用”与循环经济深度融合, 780 MPa-980 MPa-1 180 MPa 三个级别汽车零部件产品成分归一化降低了汽车制造的复杂性; 素化通过位错等缺陷工程替代贵重合金元素。未来, 合金化技术将朝着深度挖掘微合金元素协同效应、解决残余元素无害化调控、结合机器学习加速成分设计等方向演进, 以实现“性能极限突破”与“全生命周期低碳化”协同发展, 为全球钢铁行业碳中和目标提供技术支持。

关键词: 先进钢铁材料; 合金钢; 合金设计; 绿色低碳

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. N250518 **中图分类号:** TG142. 1

The Development Status and Trends of Alloying Technology for Iron and Steel Materials

Pan Xiaokun¹, Sun Wanli¹, Yan Jiansheng¹, Zhang Chaolei^{1,2}

(1 Institute for Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Institute of Steel Sustainable Technology, Liaoning Academy of Materials, Shenyang 110167, China)

Abstract: The alloying technology of steel materials originated in the early 19th century with Faraday's systematic exploration of alloying elements such as nickel and chromium. It has evolved through stages of empirical accumulation, phase diagram theory guidance, and microalloying, and has now developed into a key technology enabling precise composition design and performance control. Currently, this technology faces several challenges: the continuous addition of alloying elements drastically increases material costs while the improvement in material performance tends to saturate; Most of alloy resources have a recovery rate of less than 1% and are nearly non-renewable, and excessive reliance on alloying may trigger national resource security concerns; Moreover, highly alloyed materials are increasingly difficult to recycle and reuse, which contradicts the goal of sustainable material regeneration and circular utilization. Microalloying technology achieves "doing more with less" by adding elements such as Nb, V, and Ti in amounts $<0.1\%$. Low-density design breakthroughs the trade-off between lightweighting and strength-ductility synergy, where adding 1% mass fraction of Al reduces steel density by approximately 1.4%, and the application of high-manganese steel in automotive components leads to a weight reduction of 15%-20%. Hybrid and normalization strategies promote the deep integration of "one steel for multiple uses" and the circular economy, exemplified by the compositional unification of automotive components across 780 MPa, 980 MPa, and 1 180 MPa grades, which reduces the complexity of automotive manufacturing. Plain technology replaces precious alloy elements through defect engineering such as dislocations. In the future, alloying technology will evolve towards in-depth exploration of synergistic effects among microalloying elements, addressing the harmless control of residual elements, and incorporating machine learning to accelerate composition design. These advancements aim to achieve the synergistic development of "performance limit breakthroughs" and "full life-cycle low-carbonization," providing technical support for the global steel industry's carbon neutrality goals.

Key Words: Advanced Steel Materials; Alloy Steel; Alloy Design; Green and Low-carbon

钢铁材料是工业社会、人类社会和经济发展的物质基础, 是最重要的、通用性和适应性最强的结

基金项目: 国家自然科学基金 No.52574422

作者简介: 潘晓坤(1998—), 男, 博士; **E-mail:** 2840811905@qq.com; **收稿日期:** 2025-08-20

通信作者: 张朝磊(1984—), 男, 博士, 副教授; **E-mail:** zhangchaolei@ustb.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

构材料,也是用量最大的功能材料。2015年1月23日,习近平总书记考察鞍钢集团所属的本钢板材冷轧总厂第三冷轧厂时指出:“钢铁产业是我们国家的重要基础产业”。世界钢协与比尔及梅琳达·盖茨基金会^[1]的统计报告预测,非洲等广大欠发达地区社会经济的进一步发展将带动钢铁需求与产能增加,2050年全球将大约生产28亿吨。钢铁材料可持续发展的关键在于合金优化设计、工艺创新等技术内在的创新突破。当前,全球钢铁行业正处于“绿色低碳化”与“高性能化”双轨并行的转型关键期。一方面,资源依赖、回收壁垒及高碳排放等历史性难题亟待通过绿色设计范式破解;另一方面,微合金化、低密度化、归一化、混杂化、素化等创新技术持续突破材料性能极限,推动钢铁材料在航空航天、新能源、交通运输等领域释放应用潜能。

1 钢铁材料合金化发展历程

目前的绝大多数工程材料均为合金,合金化即人们将金属元素与其它金属或非金属元素进行组合,通过组成元素原子间的相互作用以及调整合金相的相对数量、形态、大小与分布等,从而获得所需的显微组织与性能。其本质是通过加入合金元素改变原有晶格的电子态和应变场,或是形成具有不同性质的新相来改变材料的性能。

在18世纪,人们逐渐发现并分离出Co、Ni、Mn、Cr等合金元素,之后法拉第在19世纪初首次开展了向钢中加入Ni、Cr、Ag、Pt、Pd、Rh、Au等合金元素的研究,为合金钢的发展奠定了基础,被誉为“合金钢发展先驱”。19世纪中期,贝塞麦发明的转炉炼钢法与西门子发明的平炉炼钢法使碳钢实现了大规模生产,标志着大规模液态冶金时代的到来^[2]。与此同时,哈德菲尔德开展了大量关于合金钢成分设计的工作,其发明的硅钢、高锰钢一直沿用至今,被誉为“现代合金钢奠基人”。

20世纪初期,相图理论与热处理工艺的突破推动合金化进入科学化阶段,新合金钢种大量涌现。1913年马氏体不锈钢的发现解决了耐蚀性难题,高速钢、高碳铬轴承钢、易切削钢等专用合金体系相继建立,满足了汽车、军工等领域对材料耐蚀性、强度与耐磨性的复合需求^[3]。二战后,在航空航天领域为应对硬铝高比强度的挑战提出了超高强度钢的概念,开发出了以9Ni、18Ni为代表的马氏体时效钢以及以Custom450为代表的沉淀不锈钢等系列超高强高韧钢^[4]。20世纪60年代,微合金化概念被正

式提出,合金化技术呈现高性能化与可持续发展双重特征。微合金化理论的成熟催生了Nb、V、Ti等元素强化的高强度低合金(HSLA)钢,通过晶粒细化和析出强化实现“减量增效”,成为桥梁、船舶等重大工程的关键材料。

进入21世纪,计算材料学与绿色冶金理念深度融合,基于机器学习加速轻质合金、超高强度钢的成分设计,开发出了无镍奥氏体不锈钢、Fe-Mn-Al系低密度钢、中锰钢、混杂钢等一系列先进钢铁材料,而短流程炼钢、再生钢技术及低钴镍合金开发则显著降低资源消耗与碳排放^[5]。卢柯院士提出了“材料素化”概念^[6],促进着钢铁材料向着“一钢多用”的绿色化方向发展。当前,钢铁合金化正朝着“性能极限突破”与“全生命周期低碳化”协同演进,在航空航天、新能源等新兴领域持续释放创新潜力。

2 合金化带来的问题与挑战

通过合金元素添加实现了强度、韧性、耐蚀性等关键性能指标的突破性进展,支撑了现代工业从基建到高端装备的广泛应用。然而,随着材料服役环境极端化(如深海、高温、强腐蚀)和可持续发展需求的升级,当前钢铁材料合金化正面临“性能需求-资源约束-绿色低碳”的三元悖论^[6],主要面临以下问题与挑战:

1) 持续合金化使材料成本急剧增加,对材料性能的提升作用也逐渐趋于饱和

为追求更高的性能,Ni、Mo、Co等贵重金属元素在钢中含量越来越高,直接造成了钢铁材料的合金成本大幅增加。合金元素的添加无疑可大幅提高钢铁材料的强度、耐蚀或耐高温等性能,但随着合金元素添加量增加,性能提升呈现边际效益递减而成本指数级增长。例如,在过去30年的发展历程中,由于诸多稀贵元素的添加,单晶高温合金的成本提高了约10倍,但其相应的使用温度仅由1010℃提高至1110℃,提高幅度不足10%^[7-8]。类似地,在马氏体时效钢中存在相同的问题,为保证钢中一定量的细小纳米析出相往往增加10%左右的Co元素,这使得马氏体时效钢在具有超高强度的同时,仍具有不错的塑韧性。但随着Co元素含量的增加,并不会大幅提升马氏体时效钢的强塑性,反而由于昂贵合金元素的添加使得其成本大幅增加^[4]。合金元素的过量添加不仅会引发脆化或加工难题从而导致的复杂工艺将进一步推高成本^[9-10],

对于材料性能的提升作用也趋于饱和。

2) 多数合金资源近乎不可再生, 过度依赖合金化可能引发国家资源安全问题

Fe、Cu、Zn、Al 等基础金属材料的全寿命回收率已超过 50%, 但工业中使用的绝大部分合金元素的全寿命回收率不足 1%, 几乎不可再生。在当前合金元素回收率较低的情况下, 钢铁材料中合金元素仍主要依赖于矿产供给。合金需求的急剧增加, 刺激了稀贵金属资源开采, 加快了稀贵元素消耗。Ni、Mo、V 等贵重合金元素价格受地缘政治和矿产资源分布影响显著。例如, 预测显示 2025 年镍价可能因菲律宾矿山政策调整而上涨, 而钼价或因南美供应受限而增加。稀土元素(如铈、镧)虽在耐蚀钢中应用广泛, 但全球 90% 的稀土精炼产能集中于中国, 供应链风险突出。

3) 高度合金化使材料回收再利用愈发困难, 与材料可持续再生循环利用相悖

在“双碳”目标驱动下, 钢铁行业绿色低碳转型迫在眉睫, 氢冶金虽被视为清洁冶炼方向^[11], 但受限于绿氢制备成本高昂, 现阶段废钢+电炉短流程成为更可行路径^[12-13]。然而, 废钢循环利用面临“合金元素逆向转化”悖论: 传统钢铁产品中精心设计的 Cr、Ni、Cu 等有益合金元素, 经多次循环后作为残余元素在电炉冶炼中引发晶界脆化、热裂等缺陷。这种元素功能属性的动态反转暴露出残余元素跨周期迁移的定向调控技术缺失以及动态演化的再生钢成分标准体系尚未建立两大系统缺陷。

3 钢铁材料合金低碳设计发展现状与趋势

钢铁产业是典型的高载能、高能耗、高排放的复杂流程工业。为响应国家“双碳”发展战略, 钢铁行业低碳工作推进委员会 2022 年年会上发布《钢铁行业碳中和愿景和低碳技术路线图》, 其中, 产品迭代升级作为中国钢铁工业“双碳”技术路径之一。通过开发高性能的绿色钢铁产品, 使钢铁材料具有更高强度、更长寿命、更强效能, 减少钢铁材料用户需求量, 预期减碳潜力 10%。

3.1 微合金化(Microalloy)设计

微合金化技术是 20 世纪 70 年代出现的新型冶金学科, 是传统钢铁生产向现代化冶金生产转变的重要标志之一^[14]。微合金元素主要指钒(V)、铌(Nb)和钛(Ti), 有时还包括铝(Al)、硼(B)、锆(Zr)和稀土(RE)等, 其在钢中应用时间如图 1 所示。

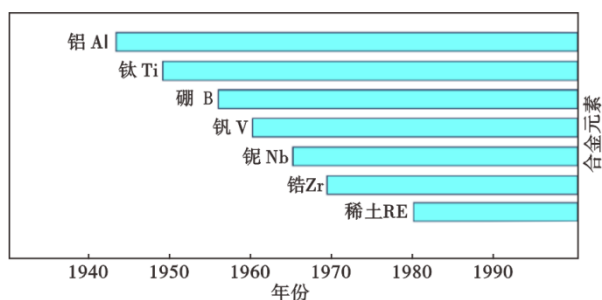


图 1 微合金元素在钢中的应用时间

Fig. 1 Application time of microalloying elements in steel

1959 年, Nb 首次在文献中被记载为微合金钢的添加元素^[15]。1960 年后, V 和 Ti 作为复合微合金化元素在钢中得到了广泛应用^[16-18]。B 最初用于显著改善钢的淬透性, 但在 20 世纪 50 年代左右由于钢中“有效硼”的含量难以控制而停滞, 直到 20 世纪 70 年代后才重新得到重视^[19]。Al、Zr 等元素在微合金钢中主要起辅助作用, 单独添加时效果并不显著。自 20 世纪 60 年代以来, 国内外冶金学者对稀土元素在钢中的作用进行了大量研究, 并取得了重要成果^[20]。21 世纪后, 随着冶炼质量和洁净度的提高, 稀土元素在钢中的应用领域逐步扩大。微合金元素在钢铁材料中发挥多重关键作用: 一方面, 通过形成纳米级析出相阻碍位错运动、抑制晶粒长大、细化组织提升强韧性以及溶入基体引发晶格畸变等机制显著提升材料力学性能; 另一方面, 其在形变过程调控中具有重要功能, 例如通过动态析出或钉扎晶界延缓再结晶, 优化热加工过程中的奥氏体组织演变, 从而实现对轧制、锻造等生产工艺参数的精准匹配。这种“性能-工艺”协同作用, 不仅增强了材料的综合性能, 同时, 提高了生产可控性与效率。微合金元素的特点各不相同, 见表 1^[21-33]。

TMCP(Thermomechanical control process), 即控轧控冷工艺的发展是微合金化技术得以广泛应用的基础^[34]。两者的协同应用是现代高性能钢铁材料研发的核心策略, 通过成分设计与工艺调控的多尺度耦合, 实现了“低成本, 高效能”的工业化目标。低温控轧和快速冷却等核心工艺与微合金元素的析出过程密切相关, 两者可以显著细化未再结晶的奥氏体晶粒, 当前更为重大的挑战集中于析出相的精准调控, 包括多相析出尺寸分布协同以及微合金元素含量的有效控制。

近些年, 微合金化技术取得了显著进展。首先, 微合金元素作用机制的解析更加精确, 通过双

表1 微合金元素含量、析出相及其影响
Table 1 Effects of microalloying elements content, and precipitates

元素	成分(质量分数)/%	析出相主要类型及形态	析出相尺寸	核心的有利作用	突出的不利影响
V	0.01~0.10	V(C,N):球状或椭球状	数十到数百纳米	强析出强化,性能稳定	高温下强化效果不稳定
Nb	0.015~0.040	Nb(C,N):圆形或椭圆形	数十纳米、亚微米	强细晶强化,显著抑制再结晶	工艺敏感性高,高碳中溶解度极小
Ti	0.01~0.06	TiN:立方状 TiC:多面体状	TiN:数十纳米~数微米 TiC:数十纳米	强烈抑制奥氏体晶粒长大	冶炼收得率低且不稳定,性能波动大,大尺寸析出对疲劳性能不利
Al	0.05~0.02	AlN:六方或立方状	数十纳米	强固氮元素,减少时效脆性,抑制奥氏体晶粒长大	粗大析出相引发晶界脆性,过量铝生成Al ₂ O ₃ 夹杂物
B	≤0.0030	BN:球状	数十到数百纳米	提高淬透性	易偏聚脆化晶界,降低晶粒粗化温度
Zr	0.01~0.05	Zr(C,N):球状或近球状	数十到数百纳米	细化晶粒,夹杂物改性	易形成大尺寸夹杂物
RE	0.01~0.10	氧化物碳氮化物:球状或近球状	数十到数百纳米	净化钢质,夹杂物改性	易偏析,破坏组织均匀性,影响加工性能

球差校正透射电子显微镜、原子探针断层扫描等先进的表征技术(如双球差校正透射电子显微镜、原子探针断层扫描等),在微观尺度上深入揭示了微合金元素在钢中的赋存状态及其作用机制^[35-36]。其次,新型微合金化体系不断涌现,多元微合金化体系的开发满足了高端钢材的需求。除了传统的铌-钒-钛体系,正在探索加入稀土元素等新型微合金化元素组合。最后,计算材料科学为微合金化研究提供了重要支持。利用第一性原理计算^[27],可以预测微合金元素在不同基体材料中的溶解能、扩散系数以及与其他元素的相互作用能等。

3.2 合金低密度化(Low-density)设计

Köster 和 Ton 基于高锰钢体系,在1933年首次通过添加轻质元素 Al 和 C 提出 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢概念,开创了轻量化钢种的先河^[37]。20世纪50年代,科学家们采用 Fe-Mn-Al-C 钢代替昂贵的 Fe-Cr-Ni 不锈钢^[38]。进入21世纪,伴随汽车行业轻量化与碳中和需求,通过成分优化(如 Al 含量调控、微合金化)推动低密度钢性能升级。因其具有优异的力学性能、疲劳性能、抗氧化性和轻量化潜力,成为近20年来钢铁领域的研究前沿和热点之一^[39]。浦项钢铁公司从2015年率先开始进行低密度钢试生产,命名为高比强度钢(HSSS, High Specific Strength Steel)。

轻量化是低密度钢发展的主要驱动力,Mn、Al、Si、C等元素加入钢材中一方面使晶格膨胀,一方面降低了原子质量。Mn元素调控层错能和相变机制,Al元素具有最佳的降低密度效果,每添加1%的 $w[Al]$ 钢材密度降低约1.4%。因此,Mn、Al成了

低密度钢中的主要元素。根据合金元素 C、Mn、Al 含量导致的基体组织差异,见表2,低密度钢分为奥氏体低密度钢、铁素体低密度钢、奥氏体基双相低密度钢、铁素体基双相低密度钢^[40]。

铁素体基低密度钢中大量的 Al 导致无奥氏体相区且提高了铁素体再结晶温度,因此,常规热轧工艺中的再结晶被严重抑制,冷却过程中易出现沿晶界析出的粗大碳化物^[41]。双相低密度钢中,奥氏体与铁素体之间扩散系数的差异引起了高度的宏观偏析和微观偏析。而奥氏体低密度钢中,1 100~1 250 °C保温一段时间后,可以均匀化铸态组织中的元素偏析,热轧后可以得到含有退火孪晶的等轴奥氏体组织。由于奥氏体低密度钢在热加工性能和力学性能方面具有显著优势,目前,国内外的研究主要集中在奥氏体低密度钢领域。

奥氏体低密度钢表现出了超高的强度和伸长率匹配,突破了传统高强钢“强度-韧性”不可兼得的瓶颈,其优异的力学性能归因于析出强化机制与层错能调控的形变机制。复杂的金属间化合物、碳化物竞争析出机制使其具有广阔的力学性能范围,传统理论认为脆性金属间化合物(如B2相)无法被位错切过,但有学者发现,通过引入局部化学有序结构和固溶强化效应,位错可在低温下剪切硬脆B2相,缓解界面应力集中,抑制裂纹萌生,在液氮温度下强塑积达到44 384 MPa%,且相较9Ni钢等传统低温钢密度降低约17%^[42]。高锰铝的加入使奥氏体低密度钢层错能增加^[43],位错平面滑移成为其主要变形机制^[44]。通过微带诱导塑性与平面滑移动态硬化机制,结合高层错能与Al合金化优势,实现了

S600E具有高强韧、抗震、高耐蚀、易焊接等优异综合性能,实现了不锈钢向结构钢的跨越,可以广泛应用于海洋工程、海洋运输设施等领域。

3.4 合金归一化设计

通用汽车中国科学研究院、东北大学、南京理工大学、育材堂(苏州)材料科技有限公司和香港大学的材料科学家们另辟蹊径,提出了以单一钢铁合金成分取代已有繁多的汽车钢种成分,即UniSteel概念^[52]。通过巧妙设计UniSteel的合金成分,单一成分的钢种可以通过已有的成熟生产工艺获得不同的显微组织,从而提供比现有钢种更加优异的机械性能,实现钢质白车身的轻量化。UniSteel概念从根本上挑战了“合适材料用于合适的零件”这个传统认知,体现了一种崭新的技术路径,可以极大地简化钢质白车身的设计、制造与回收等系统性问题。有望革新全球汽车行业的车身制造模式,降低钢质白车身生产和制造的复杂性。

鞍钢提出了“基于废钢易循环跨级别汽车钢合金归一化技术”,入选中国科协发布的2023年“科创中国”先导技术榜。该技术意在双向解决品类繁杂汽车高强钢产品混浇坯次比例高导致的“高成本、低效率、高能耗、高C排放”的“痛点”问题与汽车主机厂废钢分类难、回收利用成本高的难点问题。充分聚焦汽车高强钢零部件成形、焊装、涂装等应用特点,突破“组态异构”机理,形成“取向附生铁素体调控”、“贝氏体预处理调控”、“残余奥氏体稳定性调控”三大关键工业化生产调控技术。实现跨级别汽车生产制造,其中跨级别实现780 MPa-980 MPa-1180 MPa三个级别产品成分归一化,同时同级别产

品实现高扩孔型、高延展性与均衡型等多应用维度。镀层产品覆盖连退、热镀锌合金化镀锌产品,真正实现三维(强度、成形、表面)一体化设计初衷,设计商标“EasyCircular®”;依托该产品形成汽车零部件总成设计方案,如钢质电池包、座椅总成及门环等,实现“EasyCircular®”产品废钢易循环理念下的总成化设计。

3.5 合金素化(Plain)设计

21世纪,卢柯院士^[53]提出缺陷像合金元素一样能够用来调控材料的性能,在不改变材料成分的前提下,通过调控材料不同尺度的缺陷来制造出可持续发展的“素材料”,可以实现不或少依赖合金化并大幅度提高材料的综合性能,其原理如图3(a)所示^[6]。通过用更少或没有合金元素来定制稳定的界面,从而提高资源的可持续性。He等^[54]通过热轧、温轧、两相区退火、冷轧加低温回火等工艺调控中锰钢的微观组织结构,实现了高位错密度诱导大塑性变形超高强度钢,通过调控位错等缺陷工程实现了低合金2.2 GPa超高强度钢的开发。Niu等^[55]通过冷轧、退火等热处理工艺,使钢中出现了由高密度位错的逆转变奥氏体和亚微米级部分再结晶奥氏体片层组成的片层结构,其中,位错细胞作为裂纹扩展的软屏障,钝化了裂纹尖端。同时大量晶界阻碍了裂纹的扩展,实现了1.5 GPa屈服强度下,断后伸长率可达37%。

发展“材料素化”技术,既可以降低材料资源依赖性,也会促进材料的回收再利用。一方面因为各类缺陷强化的“素材料”避免了合金元素在回收过程中的损耗问题,另一方面减少制造业中所使用材

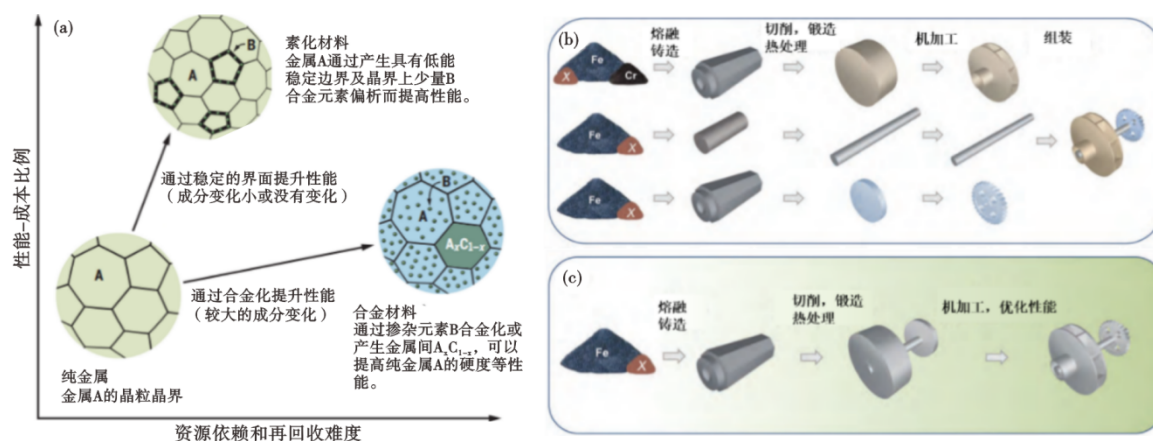


图3 素化理念(a)、传统方法(b)和素化材料技术(c)制备传动部件工艺流程

Fig. 3 Manufacturing process flow of transmission parts prepared by plain concept (a), traditional method (b) and elemental material technology (c)

料的种类将有助于回收过程中材料的分离和分类,最终降低回收再利用的成本^[56]。发展“材料素化”将促使材料制备与装备制造进一步融合,传统技术与素化材料技术制备传动部件简易工艺流程如图 3(b)(c)所示^[8]。随着单一化学成分材料性能变化范围的拓宽,一种材料就有可能满足制造业不同零部件的性能要求。从而在材料遴选中将更多地考虑制造加工工艺和回收再利用等环节对材料的要求。

4 结语

钢铁材料合金化技术历经两个多世纪的发展,已从经验探索迈入基于物理冶金学与计算设计的精准调控阶段。其中,微合金化通过 0.005%~0.10%V、Nb、Ti 等元素的“四两拨千斤”效应实现减量增效;低密度化以 Fe-Mn-Al-C 体系突破轻量化与强塑性倒置关系的物理极限,高锰钢在汽车领域的应用使得零部件减重 15%~20%;混杂设计与归一化

技术通过成分体系重构推动“一钢多用”与循环经济深度融合;素化设计则颠覆传统合金化逻辑,通过缺陷工程开辟资源节约新维度。这些技术共同指向“性能突破-资源节约-低碳循环”的协同目标,为钢铁行业碳中和、绿色化发展提供了多尺度解决方案。

当前,“双碳”目标驱动钢铁工业加速转型,大比例添加废钢甚至全废钢冶炼正成为大幅度降碳的主要技术路径。而废钢中不断富集的、耦合作用复杂的残余元素成为废钢高质化利用的重大挑战。因此,钢铁材料合金化设计需要考虑残余元素的影响,研究残余元素容忍极限,开发残余元素无害化调控技术。未来,合金化技术将朝着深度挖掘微合金元素协同效应、解决残余元素无害化调控、结合机器学习加速成分设计等方向演进。作为全球世界钢铁产业中心,中国必将在钢铁行业绿色化、低碳排创新发展中承担关键角色,并作出突出贡献。

参考文献

- [1] 比尔·盖茨(Bill Gates 著,陈召强 译). 气候经济与人类未来[M]. 北京:中信出版集团,2021,120.
- [2] 董瀚. 2020年:合金钢200周年——“合金钢专刊”前言[J]. 金属学报,2020,56(4):381-384.
- [3] 郭可信. 金相学史话(4):合金钢的早期发展史[J]. 材料科学与工程,2001,19(3):2-9.
- [4] 罗海文,沈国慧. 超高强度高韧化钢的研究进展和展望[J]. 金属学报,2020,56(4):494-512.
- [5] 郝士明. 材料图传:关于材料发展史的对话[M]. 北京:化学工业出版社,2014.
- [6] Li X Y, Lu K. Improving sustainability with simpler alloys[J]. Science, 2019, 364(6442): 733-734.
- [7] 徐匡迪. 低碳经济与钢铁工业[J]. 钢铁,2010,45(3):1-12.
- [8] 杨乐,李秀艳,卢柯. 材料素化:概念、原理及应用[J]. 金属学报,2017,53(11):1413-1417.
- [9] 牛艳娥,赵芃沛,李宁,等. 国内外超高强度钢的研究现状及应用[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(7):274-279.
- [10] 汪杨鑫,胡春东,董瀚. 侵略战斗部壳体用超高强度钢的研发评述[J]. 钢铁研究学报,2024,36(9):1099-1109.
- [11] 倪冰,林晓萍,上官方钦,等. 氢冶金工艺的技术成熟度分析[J]. 中国冶金,2024,34(12):91-101.
- [12] 魏炜,周佃民.“双碳”目标下,我国钢铁工业发展现状与展望[J]. 中国能源,2023,45(Z1):59-66.
- [13] Raabe D, Jovičević-Klug M, Ponge D, et al. Circular steel for fast decarbonization: Thermodynamics, kinetics, and microstructure behind upcycling scrap into high-performance sheet steel[J]. Annual Review of Materials Research, 2024, 54: 247-297.
- [14] Baker T N. Microalloyed steels[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 43(4): 264-307.
- [15] 钢铁研究总院结构材料所. 中国含铌钢技术发展30周年国际研讨会. 北京,2009:101.
- [16] 毛新平. 钛微合金钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2016.
- [17] Baker T N. Processes, microstructure and properties of vanadium microalloyed steels[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(9): 1083-1107.
- [18] Rune Lagneborg, Bevis Hutchinson, Tadeusz Siwecki, 等. 钒在微合金钢中的作用[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.
- [19] 韩成,曹睿. 硼在钢中的作用及表征方式[J]. 材料导报,2022,36(S1):459-462.
- [20] 王龙妹. 稀土元素在新一代高强韧钢中的作用和应用前景[J]. 中国稀土学报,2004,22(1):48-54.
- [21] Xiong Z P, Timokhina I, Pereloma E. Clustering, nano-scale precipitation and strengthening of steels[J]. Progress in Materials Science, 2021, 118: 100764.
- [22] 杨才福. 钒微合金化钢的技术进展与应用[J]. 钢铁研究学报,2020,32(12):1029-1043.
- [23] Kawahara Y, Tokuhisa A, Maeda T, et al. Formation of core-shell structured carbides via interphase precipitations in V-Nb microalloyed steels[J]. Scripta Materialia, 2024, 249: 116169.
- [24] Zhou F, Liu L, Chu X H, et al. Study on the evolution of multi-stage and multiscale Ti-bearing precipitation and microstructure in ultrahigh-strength titanium microalloyed weathering steels[J]. Materials Characterization, 2024, 217: 114368.
- [25] He P, Hu H J, Wang W, et al. On the correlation among isothermal transformation, interphase precipitation behaviour and elements partitioning in Ti - Mo microalloyed steel[J]. Journal of

- Materials Research and Technology, 2024, 29: 1901-1910.
- [26] Tian Y, Yu H, Zhou T, et al. Revealing morphology rules of MX precipitates in Ti-V-Nb multi-microalloyed steels [J]. Materials Characterization, 2022, 188: 111919.
- [27] Qiu N S, Shen Z, Zuo X W, et al. Tailoring co-precipitation behavior by molybdenum microalloying in high-strength steels [J]. Materials Characterization, 2021, 182: 111568.
- [28] Pereloma E, Wang J T, Beladi H, et al. Solute segregation, clustering and interphase precipitation in Ti-Mo-Nb microalloyed steel studied by correlated electron backscattering diffraction and atom probe tomography [J]. Materials Characterization, 2024, 216: 114273.
- [29] Li Y, Feng Q S, Cui S H, et al. Effect of Mo microalloying on impact toughness of X80 pipeline steel in SCGHAZ [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 2648-2659.
- [30] Liu N F, Xu X Y, Wang Z F, et al. Effect of tellurium on sulfide inclusion, microstructure and properties of industrial bars of a medium-carbon microalloyed steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 2226-2238.
- [31] Yin F X, Wang L, Xiao Z X, et al. Effect of titanium and rare earth microalloying on microsegregation, eutectic carbides of M2 high speed steel during ESR process [J]. Journal of Rare Earths, 2020, 38(9): 1030-1038.
- [32] Graux A, Cazottes S, Fabrègue D, et al. An alternative method for the measurement of precipitate volume fractions in microalloyed steels by the means of atom probe tomography [J]. Materials Characterization, 2020, 164: 110308.
- [33] 张朝磊, 邵洙浩, 李 戡, 等. 钕微合金化技术在中高碳钢中的应用现状与发展 [J]. 材料导报, 2021, 35(5): 5102-5106.
- [34] Zhao J W, Jiang Z Y. Thermomechanical processing of advanced high strength steels [J]. Progress in Materials Science, 2018, 94: 174-242.
- [35] Singh N, Casillas G, Wexler D, et al. Application of advanced experimental techniques to elucidate the strengthening mechanisms operating in microalloyed ferritic steels with interphase precipitation [J]. Acta Materialia, 2020, 201: 386-402.
- [36] Sun L Y, Liu X, Xu X, et al. Review on niobium application in microalloyed steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(10): 1513-1525.
- [37] 陈兴品, 李文佳, 任 平, 等. C含量对Fe-Mn-Al-C低密度钢组织和性能的影响 [J]. 金属学报, 2019, 55(8): 951-957.
- [38] Chen S P, Rana R, Haldar A, et al. Current state of Fe-Mn-Al-C low density steels [J]. Progress in Materials Science, 2017, 89: 345-391.
- [39] 马 涛, 霍力图, 董鑫平, 等. 中锰Fe-Mn-Al-C钢强化机制研究进展与Q&P处理应用展望 [J]. 中国冶金, 2025, 35(2): 1-12.
- [40] Frommeyer G, Drewes E J, Engl B. Physical and mechanical properties of iron-aluminium-(Mn, Si) lightweight steels [J]. Revue de Métallurgie, 97(10): 1245-1253.
- [41] Rana R, Liu C, Ray R K. Low-density low-carbon Fe-Al ferritic steels [J]. Scripta Materialia, 2013, 68(6): 354-359.
- [42] Wang F, Song M, Elkot M N, et al. Shearing brittle intermetallics enhances cryogenic strength and ductility of steels [J]. Science, 2024, 384(6699): 1017-1022.
- [43] Geng X X, Gao J H, Huang Y H, et al. A novel dual-heterogeneous-structure ultralight steel with high strength and large ductility [J]. Acta Materialia, 2023, 252: 118925.
- [44] Ley N A, Young M L, Hornbuckle B C, et al. Toughness enhancing mechanisms in age hardened Fe-Mn-Al-C steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 820: 141518.
- [45] Yoo J D, Park K T. Microband-induced plasticity in a high Mn-Al-C light steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 496(1-2): 417-424.
- [46] Kawajiri K, Kobayashi M, Sakamoto K. Lightweight materials equal lightweight greenhouse gas emissions?: A historical analysis of greenhouse gases of vehicle material substitution [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119805.
- [47] Liu C, Li Y L, Cheng X Q, et al. Recent advances on the corrosion resistance of low-density steel: A review [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35(7): 1055-1067.
- [48] Jan-Erik A, Lindberg F, Patrik Ö. Hybrid steel enhances component performance at reduced weight [J]. Lightweight Design Worldwide, 2019, 12(1): 34-39.
- [49] Pan X K, Huang B Y, Zhang C L, et al. Strengthening mechanism and precipitate evolution of a multi-application special engineering steel designed based on a hybrid idea [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 942: 169053.
- [50] 王 庆. 国内自主研发索氏体高强不锈钢 [J], 中国冶金报, 2017-12-19(001).
- [51] 马潇磊, 张成成, 张朝磊, 等. 基于“混杂”设计的索氏体新型不锈钢的组织 and 性能 [J]. 材料导报, 2020, 34(4): 4103-4107.
- [52] Lu Q, Lai Q Q, Chai Z S, et al. Revolutionizing car body manufacturing using a unified steel metallurgy concept [J]. Science Advances, 2021, 7(49): eabk0176.
- [53] Li X Y, Lu K. Playing with defects in metals [J]. Nature Materials, 2017, 16(7): 700-701.
- [54] He B B, Hu B, Yen H W, et al. High dislocation density-induced large ductility in deformed and partitioned steels [J]. Science, 2017, 357(6355): 1029-1032.
- [55] Niu G, Zurob H S, Misra R D K, et al. Superior fracture toughness in a high-strength austenitic steel with heterogeneous lamellar microstructure [J]. Acta Materialia, 2022, 226: 117642.
- [56] Lu K. Stabilizing nanostructures in metals using grain and twin boundary architectures [J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1: 16019.