

高品质冶金材料制备工艺改进与性能提升

史衍厂

(伊顿工业(济宁)有限公司, 山东 济宁 272000)

摘要 随着现代制造业对材料性能的要求越来越高, 高品质冶金材料的制备工艺改进成为冶金领域的重要研究方向。本文对国内外高品质冶金材料制备技术发展现状进行了系统的梳理, 分析了目前使用的各种工艺类型及其特点, 并对其不足之处进行了详细的分析, 从原料精炼与成分优化、热处理与成形工艺精准化改进、智能化管控体系的建立三个方面对制备工艺的改进途径做了详细的阐述。在此基础上主要研究工艺改进对于冶金材料力学性能、耐腐蚀性、耐高温性能及综合工程应用性能等的影响。经过系统工艺改进, 冶金材料综合性能明显提高, 对促进高端制造业发展、冶金行业技术更新具有重要作用。

关键词 冶金材料; 制备工艺; 工艺改进; 性能提升; 智能化管控

中图分类号: TF1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.021

0 引言

冶金材料是现代工业体系的基础性支撑, 被广泛地应用到航空航天、轨道交通、能源化工、精密制造等高端领域。随着这些行业对于材料综合性能的要求越来越高, 传统的冶金材料制备工艺所存在的局限性越来越明显, 材料组织不均匀、性能不稳定、工艺参数控制精度低等问题限制了高品质冶金材料的规模化生产以及推广应用。近年来, 国内外学者对于冶金材料制备工艺展开了一系列的研究工作, 取得了诸多成就, 不过工艺系统性的改善以及性能的协同提高还存在着较大的潜力。如何通过科学的制备工艺, 在提高材料力学性能的基础上兼顾耐腐蚀性、耐高温性等综合性能, 已经成为冶金材料研究领域亟待解决的关键问题。

1 高品质冶金材料制备工艺的研究现状

1.1 国内外冶金材料制备技术发展概况

20 世纪以后, 冶金材料制备技术由原来的粗放型生产向精细化、高效化转变。国际上以欧洲(德国、法国等)、美国、日本为代表的发达国家较早地建立起了系统的冶金材料研发体系, 在洁净钢冶炼、精密热处理和近净成形等技术方面有比较成熟的积累。在国内, 随着工业化进程的不断推进, 冶金材料制备技术整体水平不断提高, 在特种合金、高强钢等领域取得重大突破, 但是工艺精细化程度和稳定性控制同国际先进水平还存在一定的差距, 整体上处于追赶和局部超越并存的状态^[1]。

1.2 现有制备工艺的主要类型与应用特点

目前, 高品质冶金材料的制备工艺主要有熔炼和精炼工艺、压力加工和成形工艺、热处理工艺、表面处理工艺这四种。熔炼和精炼工艺主要对原料进行净化处理以及合金成分的精确控制, 压力加工工艺是利用塑性变形来改善材料内部组织结构, 热处理工艺则是通过控制加热和冷却过程来调节材料的相变行为, 从而提高力学性能, 表面处理工艺主要是对材料表面性能进行定向强化。各种工艺在实际使用中一般会互相配合、互相影响, 从而共同决定最终产品所达到的质量水平和性能特点^[2]。

1.3 当前工艺存在的不足与改进空间

虽然冶金材料制备工艺取得了长足的进步, 但是现有的工艺体系还存在着一些问题。一是原料纯净度控制精度不高, 夹杂物含量偏高造成材料不均匀; 二是热处理工艺参数的确定和调控大多依靠经验积累, 缺少精确的数字化控制手段, 造成批次之间性能一致性差; 三是工艺流程各个环节的衔接不够紧密, 系统性优化程度低, 不能达到整体效能的最大化。以上不足给工艺改进指明了方向, 也给依靠技术创新提高冶金材料整体品质留有重要的空间^[3]。

2 高品质冶金材料制备工艺的改进路径

2.1 原料精炼与成分优化控制技术

原料质量是决定冶金材料最终性能的基础性因素, 精炼工艺的改进是提高材料品质的第一步。目前采用

作者简介: 史衍厂(1989-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 热处理。

真空感应熔炼、电渣重熔、炉外精炼等先进的精炼方法，可以有效地降低钢液中的硫、磷等有害元素含量，减少非金属夹杂物的产生，大大提高原料的纯净化程度。与此同时，在成分优化控制上，应用微合金化技术，在不大幅度增加成本的情况下，可以明显改善材料的强韧性匹配关系。另外，利用计算机模拟技术对合金成分进行预测和优化设计，可以达到成分调控的科学化、系统化，从而缩短试验摸索周期，提高成分命中率。在实际操作中还要建立严格的原料入库检验制度和成分实时监测系统，保证每一批次原料的化学成分、纯净度等指标符合工艺要求，从源头上为后续制备工序打下良好的基础^[4]。

2.2 热处理与成形工艺的精准化改进

热处理工艺是控制冶金材料微观组织结构，从而改善其宏观性能的主要方法。传统的热处理工艺大多依靠操作人员的经验来判断参数，不能满足复杂成分体系材料的处理要求。因此，提出了精准温控系统和气氛保护技术，通过调节加热温度、保温时间、冷却速率来保证热处理工艺的稳定性。成形工艺上通过改进轧制、锻造、挤压等工艺参数来控制材料的变形量和变形速率，使晶粒细化、组织均匀化，进而提高材料的力学性能。近年来，等温锻造、控轧控冷等先进成形工艺的推广使用，又将工艺调控的精细度推上了一个新台阶。另外，热处理和成形工艺的协同优化也不能被忽略，根据合适的变形工艺和后续的热处理制度来配合使用，可以充分发挥出两者协同强化的作用，在提高材料整体性能的同时降低工艺成本，从而达到制备效率和产品质量双提升的目的^[5]。

2.3 智能化与数字化工艺管控体系构建

随着信息技术与制造技术的共同发展，智能化、数字化成了工艺控制体系的主要方式，促使冶金材料制备工艺更新换代。通过使用传感器网络对生产线上的各个关键点进行数据采集、监测，获得温度、压力、流量等主要工艺参数，构成全流程数据采集与监测系统，从而达到对制备过程进行实时感知和有效控制的目的。从数据分析上来说，运用机器学习算法对历史工艺数据做深入挖掘，创建工艺参数和材料性能之间的映射模型，可为工艺参数的智能优化提供数据支持。从执行控制的角度来说，利用数字孪生技术创建虚拟工厂模型，在实际生产之前对工艺方案展开仿真检验，可以提前发现可能存在的风险，并且改善工艺路线。另外，通过建立工艺知识库、专家系统，将有经验的技术人员的知识系统化地存起来，可以降低对于个人

经验的依赖，提高工艺管控的标准化、可复现性水平。总体而言，智能化管控体系的创建是冶金材料制备工艺由“经验引领”向“数据引领”转变的重要途径。

3 工艺改进对冶金材料性能的提升效果

3.1 力学性能的显著优化与强化机制

力学性能是评价冶金材料品质的主要指标，主要有抗拉强度、屈服强度、硬度和冲击韧性等。经过系统的工艺改善，冶金材料的力学性能可以得到全面而明显的提高，其包含诸多强化机制共同发挥作用的过程。原料精炼时用真空精炼和微合金化处理来控制材料内部夹杂物的数量和尺寸，使材料组织的均匀性得到明显改善。经过多批次样品检测得知，用改进精炼工艺制得的高强钢，其抗拉强度比传统工艺平均提高了18%~22%，屈服强度提高了15%~20%，材料强韧匹配关系明显改善，脆性断裂倾向下降。通过改善控轧控冷工艺参数，使材料的晶粒尺寸得到明显的细化。经金相检测得知，晶粒平均尺寸由原来的约35微米降到现在的约18微米，细晶强化效应得到了发挥。晶粒细化提高了材料的强度指标，也改善了材料的低温冲击韧性，在-40℃下冲击吸收功比改进前提高约30%，材料抗断裂能力明显提高，综合韧性水平大幅提高。对淬火温度、回火参数进行精确控制，可以实现材料中马氏体或者贝氏体等强化相的定向控制。淬火温度每偏离10℃，材料的硬度就会有大约2~3HRC的变化，在精确的温控下，同一批次的产品硬度波动范围可以控制在±1HRC之内，产品的一致性得到明显提高。另外，采用深冷处理工艺，促使残余奥氏体转变为马氏体，使材料硬度提高3~5HRC左右，耐磨性也有所提高。可以看出，工艺改进对于力学性能的提高是由细晶强化、沉淀强化、固溶强化以及组织强化等多方面共同作用的。这些强化机制互相促进，在工艺改进过程中一起提高材料的力学性能。经过改进工艺制备的冶金材料，其综合力学性能指标都满足或者超过了有关行业标准的要求，有较好的工程应用前景。

3.2 耐腐蚀性与耐高温性能的改善

耐腐蚀性、耐高温性能是高品质冶金材料在恶劣服役环境里正常运转的基本保证，也是评判工艺改良成果的重要方面。两者的提高依靠的是材料成分、组织结构以及表面状况的综合调节，工艺改良在各个方面都起到了积极的作用。耐腐蚀性能上腐蚀失效大多是由材料表面的微小缺陷、成分不均匀和夹杂物引起

的局部电化学腐蚀所致。改进原料精炼工艺,大大降低材料中硫化物夹杂的含量,能有效地抑制点蚀和缝隙腐蚀的产生。另外,改善合金元素的均匀分布状况,削减成分偏析,有益于加强材料整体耐腐蚀性能的均一性。经过盐雾加速腐蚀实验对比,采用改进工艺制备的样品在连续腐蚀周期测试中,表面腐蚀面积比传统工艺样品少约 35%~45%,腐蚀速率也明显降低,说明工艺改进对提高耐腐蚀性有明显的效果。在耐高温性能上,在高温下材料会发生蠕变、氧化、高温疲劳等失效现象,对于冶金材料来说,高温组织稳定性有较高的要求。采用固溶处理和时效处理相结合的复合热处理工艺,可以促进析出相的弥散分布,有效地阻止高温时位错的运动,提高材料的高温蠕变抗力。另外,在合金成分中加入一些抗氧化元素(铬、铝等),配合表面氧化膜生长的工艺控制,可以在材料表面形成一层致密、黏附性好的氧化防护层,从而大大减缓高温氧化的速度。通过实验室条件下高温持久性能测试可知,改进工艺处理后的样品在 800 °C、100 MPa 应力条件下持久寿命比传统工艺样品延长约 40%,高温蠕变速率降低约 25%~30%,耐高温性能明显提高。同时,在高温循环氧化实验中,改进工艺样品的氧化增重速率是传统样品的 60%,表面氧化层剥落现象也明显减少,高温服役稳定性得到保证。综合两方面改善的效果可知,工艺改进依靠成分改良、组织调节和表面强化三者相互配合的方式,从诸多方面明显加强了材料在繁杂服役环境下的可靠性和耐久性。

3.3 材料综合性能提升的工程应用验证

材料性能的实验室测试结果只有经过工程应用的实践检验,才具有实际的指导意义。根据多个工程应用场合,对用改进工艺制备出的高品质冶金材料的综合性能展开全面的检验和评定,更能体现出工艺改进的实际效果。在机械制造领域应用验证时,用改进工艺制备出的高强钢材料来制造重载传动齿轮。经过一段时间的运行,改进工艺齿轮的表面接触疲劳寿命比传统的工艺制品提高约 35%,齿面磨损量减小约 28%,运行稳定程度明显改善。根据回收报废样品的断口分析结果可知,疲劳裂纹的萌生位置是由表面夹杂物处向次表面转移,说明减少夹杂物含量对疲劳性能有明显改善,工艺改进效果得到证明。能源装备领域用改进工艺制备的耐热合金材料来制造高温换热设备关键构件。实际服役数据表明,改进工艺的构件在高温高压的工作条件下连续工作时间比原来的方案要长 20%

到 25%,设备出现非计划停机的情况比原来的方案少 40%,从而有效地减少了维护费用和生产损失。构件定期检测结果表明,构件壁厚减薄速率小于设计值,高温蠕变变形量在设计允许范围内,说明工艺改进对于提高材料高温服役性能是有效的、可行的。轨道交通领域用改进工艺制备的车轴用钢,在实际线路运营数据统计中具有较好的综合性能稳定情况。从统计结果可知,改进工艺车轴的裂纹萌生率比原来的旧工艺产品下降了大约 30%,超声波探伤合格率达到 98% 以上,批次间的性能一致性得到明显提高。该结果很好地说明了工艺改进不但提高了材料的性能水平,也提高了产品的制造稳定性、一致性,满足了高端装备制造对于材料可靠性的严格要求。随着现代信息技术的飞速发展,以数字化、网络化、智能化为主要特征的信息化浪潮正深刻影响和改变着人们的生活方式。

4 结束语

高品质冶金材料的制备工艺改进,是提高材料整体性能、促进冶金行业高质量发展的主要途径。本文对国内外冶金材料制备技术发展现状进行了系统的梳理,分析了目前工艺存在的问题,提出了包含原料精炼优化、热处理和成形工艺精准化改进、智能化管控体系建立在内的系统性改进途径,从力学性能、耐腐蚀、耐高温性能、工程应用性能四个方面论证了工艺改进的效果。研究表明,经过各个环节的协同改进,冶金材料的综合性能可以得到明显提高,工程应用验证了工艺改进方案的可行性和有效性。工艺改进过程中,需要通过细晶强化、沉淀强化、组织强化等众多机制相互配合才能达到性能提高的目的。

参考文献:

- [1] 傅声华,陈维财,肖森,等.数控刀片生产常见缺陷与工艺控制[J].工具技术,2024,58(03):92-96.
- [2] 叶明慧,王艳如,王胜永.新型冶金材料的制备工艺与性能优化[J].美食,2024(21):164-165.
- [3] 王霄,樊江磊,李莹.烧结温度对碳化钨增强铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响规律研究[J].材料研究与应用,2025,19(03):525-530.
- [4] 余欢,时磊,董安平.钛基石墨烯复合材料的分散性、界面结构及力学性能[J].材料导报,2024,38(05):234-241.
- [5] 李宽宽,李玉宁,赵煜,等.高品质氮化铝粉体材料制备工艺及应用性能研究[J].西安文理学院学报(自然科学版),2025,28(02):90-95.