

高性能金属材料的制备工艺与性能研究

林授权

海河检测技术（天津）有限公司 天津 300000

摘要：高性能金属材料通过成分优化与组织调控实现优异综合服役性能，制备工艺是决定其性能的核心因素。本文系统梳理了熔炼铸造、粉末冶金、塑性变形强化三类主流制备工艺的技术原理与控制要点。熔炼铸造工艺成熟、成本低、可制备大尺寸坯料，但存在晶粒粗大、成分偏析等缺陷；粉末冶金工艺组织均匀、无偏析、精度高，适配中小型高精度构件与多组分复合材料；塑性变形强化可显著提升强度与韧性，是性能优化的关键精加工工序。三类工艺在力学性能、微观组织、耐蚀耐磨性能方面的影响机制各有差异，实际应用中需依据工况需求选择或组合使用，以实现材料综合性能的最优匹配。

关键词：高性能金属材料；制备工艺；性能研究

引言：随着航空航天、高端装备、新能源等领域对金属材料服役性能要求持续提升，高性能金属材料已成为先进制造的核心基础。与传统金属材料相比，高性能金属材料通过成分优化与组织调控，突破了强度与韧性难以兼顾、高低温性能差、易磨损腐蚀等性能短板，能够适配重载、高速、高温、腐蚀等复杂工况。制备工艺直接调控材料微观组织与缺陷状态，是决定材料力学性能、耐蚀耐磨性能及综合服役能力的关键因素。本文系统梳理熔炼铸造、粉末冶金、塑性变形强化三类主流制备工艺的技术原理与控制要点，分析其对材料性能及微观组织的影响机制，并对比各工艺的优缺点与适配场景，为高性能金属材料的工艺选型提供理论参考。

1 高性能金属材料概述

高性能金属材料是相较于普通碳素钢、常规合金等传统金属材料，具备更优异综合服役性能的一类金属基材料的统称，核心特征为结构稳定性强、力学性能优异、环境适应性好。与传统金属材料相比，高性能金属材料通过成分优化和组织结构调控，突破了常规材料强度与韧性无法兼顾、高低温性能差、易磨损腐蚀等性能短板，能够适配重载、高速、高温、腐蚀等复杂服役工况。从材料体系来看，现阶段应用广泛的高性能金属材料主要包括高强铝合金、钛合金、高强耐磨合金钢、镍基高温合金及金属基复合材料等。不同材料体系的核心性能优势存在明显区别，铝合金侧重轻量化与高强韧性，钛合金兼具高强度与耐腐蚀性，镍基合金主打高温力学稳定性，耐磨合金钢则具备优异的抗磨损、抗冲击性能。各类高性能金属材料的性能优势均依赖专属的制备工艺实现，未经精准工艺调控的金属坯料，普遍存在

晶粒粗大、组织不均匀、内部气孔夹杂缺陷多等问题，无法体现高性能特性。因此，科学的制备工艺是挖掘金属材料性能潜力、实现材料高性能化的核心关键^[1]。

2 高性能金属材料主流制备工艺

2.1 熔炼铸造制备工艺

熔炼铸造是高性能金属材料最基础、应用最广泛的成型制备工艺，通过高温将金属原料熔融为均匀液态，去除杂质与气体后经浇注成型、冷却凝固获得金属坯料，是绝大多数合金材料的前置制备工序。该工艺主要分为真空熔炼、电弧熔炼、感应熔炼三类。（1）真空熔炼主要用于钛合金、镍基高温合金等易氧化、高纯度要求的材料，在真空密闭环境中完成熔融，避免熔体与氧气、氮气反应，消除氧化夹杂、气孔等缺陷，提升熔体纯净度。电弧熔炼依靠电极电弧高温熔化金属，升温快、效率高，适合高熔点金属制备，但熔体均匀性不足，需配合搅拌优化。感应熔炼利用电磁感应使金属自发热熔，温度均匀、成分一致性好，多用于高强钢、铝合金等中低熔点合金制备。（2）该工艺核心控制要点为熔炼温度、保温时间、冷却速度及浇注速率。温度过高致晶粒过度长大、韧性下降，温度过低则出现熔融不充分与成分偏析；冷却速度直接决定凝固晶粒尺寸，快速冷却可细化晶粒、提升强度，慢速冷却则晶粒粗大、塑性更优。该工艺成本可控、可制备大尺寸坯料，但传统铸造易存在缩孔、疏松等内部缺陷，需结合后续工艺优化^[2]。

2.2 粉末冶金制备工艺

粉末冶金是一种近净成型的先进制备工艺，核心流

程为金属粉末制备、配比混合、压制成型、高温烧结、致密化处理,最终获得高性能金属构件。该工艺适用于高熔点、难熔炼、多组分复合的高性能金属材料,也是金属基复合材料的核心制备工艺。(1)粉末制备是核心前置环节,常用雾化法、机械球磨法制备高精度金属粉末,可精准控制粒径、形貌与纯度。配比混合阶段可实现多种金属粉末与增强相粉末的均匀混合,精准调控材料成分,解决传统熔炼中高熔点组分难以均匀融合的难题。压制成型通过高压将粉末压制成型预设形状坯体,保障尺寸精度;高温烧结通过原子扩散使粉末颗粒紧密结合,消除颗粒间隙,提升致密度。(2)相较于熔炼铸造,粉末冶金制备的材料无成分偏析,组织均匀、晶粒细小可控、内部缺陷极少,可显著提升强度、耐磨性与尺寸稳定性。同时材料利用率高、成型精度高,可直接制备复杂结构构件。但该工艺在制备大尺寸、厚壁构件时易出现致密度不足,生产效率低于铸造,更适配中小型高精度构件制备。

2.3 塑性变形强化制备工艺

塑性变形强化工艺是在金属坯料成型后,通过外力作用使材料发生塑性变形,改变内部晶粒形态、晶界分布和缺陷结构,实现材料性能强化的后续制备工艺,主要包括轧制、锻造、挤压、超塑性成型等方式,是提升金属材料力学性能的关键工艺。(1)该工艺的强化原理为:金属坯料在外力作用下,内部粗大晶粒被挤压、破碎为细小均匀晶粒,同时晶粒取向趋于规整,内部疏松、微小气孔等缺陷被压实闭合,位错密度显著提升,基于细晶强化、位错强化机制,大幅提升材料的强度、硬度和致密性。其中,锻造工艺适用于高强结构钢、钛合金等重载构件,通过反复锻打实现晶粒细化,消除铸造缺陷,提升材料抗冲击、抗疲劳性能;轧制工艺多用于板材、带材类高性能金属材料,可实现厚度均匀性控制和组织细化;挤压工艺适合型材类构件,能够提升材料组织各向同性,降低性能差异性。(2)塑性变形工艺的核心控制参数为变形量、变形温度、变形速率。合理的变形量可充分细化晶粒,变形量不足则强化效果有限,变形量过大会导致晶粒破碎过度、产生残余应力;温热变形可降低金属变形抗力,避免低温变形产生的微裂纹缺陷,保障材料塑性与韧性。该工艺需依托成型坯料开展,常与铸造、粉末冶金工艺配合使用,实现材料性能的二次优化。

3 制备工艺对高性能金属材料性能的影响

3.1 对力学性能的影响

力学性能是高性能金属材料的核心服役性能,包括

强度、硬度、塑性、韧性、抗疲劳性等,制备工艺通过调控微观组织直接决定各项力学指标。不同工艺在晶粒细化、缺陷控制、组织均匀性方面的差异,导致力学性能显著区别。(1)熔炼铸造中,快速冷却坯料晶粒细小,抗拉强度与硬度更高;缓慢冷却坯料晶粒粗大,强度偏低但塑性与韧性更优。真空熔炼制备的合金因杂质与气孔缺陷极少,力学均匀性远优于普通空气熔炼材料,抗疲劳性能提升显著。粉末冶金制备的材料晶粒细小均匀、无成分偏析,硬度、耐磨性与抗拉强度整体优于铸造材料,但烧结致密度不足时,塑性与冲击韧性明显下降。(2)塑性变形工艺强化效果最为显著,经锻造、挤压处理后内部缺陷完全压实,晶粒大幅细化,位错密度提升,强度、硬度、抗冲击性能可提升30%以上。但过度变形致残余应力累积,塑性与韧性下降,出现加工硬化,需匹配合理变形参数实现强度与韧性平衡。精细化制备工艺可有效优化力学性能配比,避免单一性能突出而综合性能不足^[3]。

3.2 对微观组织结构的影响

微观组织结构是决定金属材料宏观性能的本质因素,包含晶粒尺寸、形貌、相组成、晶界结构、内部缺陷等,不同制备工艺形成的微观组织特征存在明显差异。(1)传统普通铸造制备的材料微观组织以粗大树枝晶为主,晶粒尺寸差异大,存在明显成分偏析、缩孔、疏松缺陷,晶界杂乱无序,组织均匀性极差。真空精准熔炼可有效抑制晶粒异常长大,减少杂质相析出,晶粒形貌趋于规整,缺陷数量大幅降低。粉末冶金制备的材料微观组织为均匀等轴晶,晶粒细小且分布均匀,无树枝晶结构,成分偏析完全消除,仅烧结不充分时存在少量微小孔隙。(2)塑性变形工艺可彻底改变铸态、烧结合态材料的微观组织,破碎粗大晶粒,消除树枝晶结构,使晶粒细化为均匀等轴晶,同时压实内部孔隙与微裂纹,规整晶界分布。变形温度越高,晶粒长大趋势越明显;变形量越大,晶粒细化效果越显著。微观组织的规律性变化直接对应宏观性能优化,实现工艺、组织、性能的精准对应。

3.3 对耐腐蚀与耐磨性能的影响

耐腐蚀、耐磨损性能是高性能金属材料在复杂环境下的关键服役性能,制备工艺通过影响材料表面状态、内部致密性、杂质分布及第二相析出行为,调控材料的耐磨、耐腐蚀性能。(1)耐磨性能方面,材料的硬度、组织均匀性、第二相颗粒分布是核心影响因素。粉末冶金工艺可均匀分布硬质增强相颗粒,提升材料整体硬度和抗磨损能力,相较于铸造工艺,耐磨性能提升显著;

塑性变形细化晶粒后,材料表面抗切削、抗剥落能力增强,磨损速率大幅降低。铸造工艺若存在组织偏析、疏松缺陷,磨损过程中易出现局部应力集中,产生剥落磨损,耐磨性能较差。(2)耐腐蚀性能方面,金属材料的腐蚀多起始于气孔、夹杂、晶界缺陷位置,制备工艺越精准,内部缺陷越少、组织越均匀,材料耐腐蚀性能越优异。真空熔炼工艺去除了材料中的氧化夹杂、气体杂质,减少了腐蚀活性位点;均匀的细晶组织可形成稳定的钝化膜,抑制腐蚀介质渗透。而工艺控制不当导致的晶粒粗大、成分偏析、孔隙缺陷,会大幅加速电化学腐蚀进程,降低材料服役寿命。

4 不同制备工艺的优缺点及适配性分析

4.1 熔炼铸造工艺优缺点与适配场景

熔炼铸造工艺的核心优势在于工艺成熟度高、生产效率高、生产成本低,可制备大尺寸、大吨位的高性能金属坯料与构件,材料成型整体性好,适配绝大多数金属与合金材料体系。同时,该工艺可通过调整熔炼温度、冷却方式、合金成分,实现基础性能的初步调控,是工业量产中应用最广泛的制备工艺。其核心缺点为工艺可控精度有限,铸态材料普遍存在晶粒粗大、成分偏析、缩孔疏松等固有缺陷,材料综合性能上限较低,无法满足超高精度、超高强度的极端工况需求;普通熔炼工艺易产生氧化、氮化夹杂,降低材料纯净度和性能稳定性。该工艺主要适配大型结构构件、常规重载零部件的坯料制备,适合对材料精度、极致性能要求不高的规模化量产场景,通常需配合后续热处理、塑性变形工艺优化性能^[4]。

4.2 粉末冶金工艺优缺点与适配场景

粉末冶金工艺的核心优势为组织可控性强、材料均匀性好、无成分偏析,可实现多组分、难熔金属材料的复合制备,能够精准调控材料微观组织与性能;材料利用率高、成型精度高,可直接制备复杂异形构件,无需大量后续加工;制备的材料晶粒细小、缺陷极少,耐磨、高强度性能突出。该工艺的局限性主要体现在生产成本偏高、生产周期长,难以制备超大尺寸、厚壁整体构件,构件易存在烧结孔隙,致密度难以达到100%,部分材料塑性、韧性不足。该工艺主要适配中小型高精度构件、金属基复合材料、难熔合金构件的制备,广泛应用

于精密机械、高端装备、电子精密零部件等对材料均匀性、尺寸精度要求较高的场景。

4.3 塑性变形强化工艺优缺点与适配场景

塑性变形强化工艺的核心优势为性能强化效果显著,可有效消除铸造、烧结材料的内部缺陷,细化晶粒、优化组织,大幅提升材料强度、韧性、抗疲劳和耐磨性能,能够实现材料综合性能的全面优化,是提升金属材料服役性能的核心精加工工艺。该工艺适配性广,可与铸造、粉末冶金工艺结合,实现坯料性能的二次升级。其缺点为单独使用无法完成材料成型,仅能作为后续改性强化工艺;工艺参数控制难度较高,参数偏差易引发加工硬化、残余应力、微裂纹等问题,影响材料使用稳定性;复杂结构构件难以实现均匀塑性变形,强化效果存在局部差异。该工艺主要适配各类高性能金属结构件的性能强化处理,多用于高强、高韧、高抗疲劳要求的核心零部件加工,是高端高性能金属构件制备不可或缺的工序。

结束语

制备工艺是高性能金属材料性能实现的核心环节,熔炼铸造、粉末冶金、塑性变形强化三类工艺各具优势与局限。熔炼铸造适配大尺寸构件量产,但组织均匀性不足;粉末冶金满足高精度、多组分复合需求,但受限於构件尺寸与成本;塑性变形强化性能提升最为显著,但需依托前序工艺开展。实际工程中,单一工艺难以兼顾强度、韧性、耐蚀耐磨等全部性能指标,多工艺协同是提升材料综合性能的必然趋势。未来研究应进一步深化工艺-组织-性能的精准映射关系,推动制备工艺向精细化、智能化方向发展,为航空航天、高端装备等领域提供更优材料支撑。

参考文献

- [1] 李岩. 热处理工艺优化在金属材料性能提升中的应用研究[J]. 模具制造,2026,26(5):147-149.
- [2] 薄俊兴. 高性能阻燃环保电线电缆材料的制备与阻燃机理研究[J]. 新潮电子,2026(2):103-105.
- [3] 许凯淇. 电镀铬工艺对金属材料表面抗腐蚀性能的影响分析[J]. 科技创新与应用,2026,16(13):68-71.
- [4] 林小茗. 高性能烧结钕铁硼磁体制备工艺优化设计研究[J]. 冶金与材料,2026,46(4):37-39.