

冷喷涂增材制造高强金属的强化机理及微观结构演变研究

陈 文

重庆键合科技有限责任公司 重庆

【摘要】冷喷涂增材制造作为一种新兴的金属制造技术，展现出优异的材料性能和成形效率。本文系统研究了冷喷涂过程中高强金属的强化机理，重点分析喷涂材料在高速撞击与沉积过程中微观结构的演变规律。通过实验与表征手段揭示了颗粒变形、晶界重组及缺陷消除等关键过程对材料力学性能的影响。微观结构的优化是实现高强度和高韧性的关键，有助于推动冷喷涂技术在航空航天、汽车等高端制造领域的应用。本文为冷喷涂高强金属的工艺优化和性能提升提供了理论支持和实验依据。

【关键词】冷喷涂增材制造；高强金属；强化机理；微观结构演变；材料性能

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日

【出刊日期】2025 年 4 月 18 日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250025

Study on strengthening mechanism and microstructure evolution of high-strength metals via cold spray additive manufacturing

Wen Chen

Chongqing Bonding Technology Co., Ltd., Chongqing

【Abstract】 As an emerging metal manufacturing technology, cold spray additive manufacturing demonstrates excellent material properties and forming efficiency. This paper systematically investigates the strengthening mechanism of high-strength metals during the cold spraying process, with a focus on analyzing the evolution rules of the microstructure of sprayed materials during high-velocity impact and deposition. Through experimental and characterization methods, the effects of key processes such as particle deformation, grain boundary reconstruction, and defect elimination on the mechanical properties of materials are revealed. The optimization of microstructure is crucial for achieving high strength and toughness, which helps promote the application of cold spray technology in high-end manufacturing fields such as aerospace and automotive. This paper provides theoretical support and experimental basis for process optimization and performance improvement of cold-sprayed high-strength metals.

【 Keywords 】 Cold spray additive manufacturing; High-strength metals; Strengthening mechanism; Microstructure evolution; Material properties

引言

冷喷涂增材制造技术因其低温沉积和高效率的特点，成为提升高强金属性能的重要途径之一。高强金属材料在航空航天、汽车及国防领域中有着广泛的应用需求，而传统制造方法往往难以兼顾材料强度和韧性的平衡。冷喷涂过程中的高速颗粒撞击不仅促进了材料的致密化，还引发了复杂的微观结构变化，这些变化直接影响着最终材料的力学性能。深入理解冷喷涂增材制造中强化机理及微观结构演变，对于优化工艺参数、提升材料综合性能具有重要意义。本文基于实验和表征技术，系统探讨了高强金属

在冷喷涂过程中的强化机制及其微观结构的动态演变，为相关领域的研究和应用提供了新的视角。

1 冷喷涂增材制造中高强金属强化机理的提出与分析

冷喷涂增材制造技术作为一种通过高速固体颗粒喷射实现材料沉积的新兴工艺，其强化机理具有独特的物理和冶金特点。高强金属在冷喷涂过程中并未经过传统熔融再凝固，而是依赖高速颗粒与基底的塑性变形和机械嵌合完成沉积，这一过程导致了材料的显著强化^[1]。强化效应主要源于喷涂颗粒在撞击时产生的高度塑性变形，形成细晶结构和晶

界强化。冷喷涂的低温特性有效抑制了晶粒长大及热影响区的形成,确保了材料内部微结构的稳定性,这对于高强金属的力学性能提升起到了关键作用。

在颗粒高速撞击过程中,材料的强化不仅体现在宏观力学性能的提升,更与微观结构的演变密切相关。塑性变形导致大量位错密度增加,形成密集的位错墙和胞式结构,这些缺陷的累积强化了材料的屈服强度。晶界数量的增加和晶粒细化促进了阻碍位错运动的效应,进一步提高了材料的强度和硬度。微观层面上,部分区域还会发生亚晶形成和孪生结构,这些微结构特征共同构建了复杂而稳定的强化网络。与传统高温制造工艺相比,冷喷涂的非熔融机制避免了材料中的第二相粗化和有害组织生成,从而提升了材料的整体力学表现。

高强金属冷喷涂强化机理的深入理解还需结合工艺参数的调控。喷射速度、颗粒温度、喷涂角度等因素均对颗粒的变形程度和沉积质量产生显著影响。提高颗粒速度能够增强冲击能量,促进更充分的塑性变形和晶界再结晶,从而提升强化效果。喷涂过程中颗粒的加热处理虽不及熔融温度高,但适度的温度提升有助于减少残余应力和改善颗粒间结合。通过合理优化工艺参数,能够有效控制微观结构的形成和演变,进而实现高强金属材料力学性能的最大化,推动冷喷涂增材制造技术在工业应用中的突破。

2 高强金属在冷喷涂过程中的微观结构演变规律

高强金属在冷喷涂过程中经历了复杂的微观结构演变,这一过程决定了材料最终的力学性能和应用潜力。喷涂颗粒在极高速度下与基底及已沉积层发生碰撞,产生剧烈的塑性变形,导致晶格扭曲和位错密度迅速增加。塑性变形不仅促使晶粒显著细化,还引发晶界的迁移和重排,形成高密度的亚晶结构。这些微观结构变化极大地增强了材料的强度和硬度。由于冷喷涂过程温度较低,材料没有经历熔融状态,从而避免了晶粒粗化和有害相的析出,保持了金属的细微均匀组织。

沉积层的逐渐累积使微观结构在不同层间表现出显著的差异性。每一层颗粒高速撞击基底或先前沉积层时,都会引发局部应力场的复杂重组,导致晶界形态和位错结构不断发生动态调整。应力集中区域容易形成孪晶和亚晶界,这些微结构对增强材料的变形协调性具有重要意义^[2]。局部塑性变形过程伴随着残余应力的积累与释放,有助于微裂纹的闭合及缺陷的

自愈合,显著提升沉积层的致密性和抗疲劳性能。这种逐层叠加的微观结构演变构建了稳定且持续的强化机制,赋予高强金属优异的综合力学性能。

微观结构的演变不仅取决于喷涂颗粒自身的物理特性,还深受多种工艺参数的影响。喷射速度的提升带来了更高的颗粒动能,促使颗粒在撞击过程中产生更大程度的塑性变形,这一过程有助于晶粒进一步细化并促进亚晶结构的形成,从而强化材料的机械性能。喷涂角度对颗粒撞击的方向和能量传递方式起到关键调控作用,不同角度会显著影响沉积层内部的应力分布及其梯度,进而影响晶界的迁移速度和位错的交互复杂性。基底温度的变化同样重要,适当的预热能够改善沉积层与基底之间的结合质量,减少残余应力,促进微观结构的稳定发展。通过对这些工艺参数的精细调控,可以实现对微观组织演变的精准管理,进而在保证高强度的同时提升材料的韧性和耐腐蚀性,满足航空航天、汽车等高端领域对材料性能的严格需求。

3 工艺参数对强化效果及微观结构的影响机制

工艺参数在冷喷涂高强金属的强化过程中起着核心作用,其中喷射速度尤为关键。高速喷射赋予颗粒更大的动能,使其在撞击基底时产生更强烈的塑性变形,促进晶粒的细化和位错密度的提升,这不仅增强了材料的硬度,还显著提高了强度。更高的动能还增强了颗粒之间的机械结合力,减少了沉积层中的孔隙和缺陷,从而提升了整体致密性和力学性能。反之,喷射速度不足会导致颗粒变形不充分,强化效果减弱,微观结构缺陷增多,材料性能受到限制。合理调控喷射速度是确保冷喷涂高强金属制品优异性能的关键步骤。

颗粒温度对冷喷涂高强金属的微观结构演变和力学性能具有重要影响。虽然冷喷涂强调低温沉积以防止热损伤,但适当的颗粒预热能够显著降低材料的屈服强度,使颗粒在撞击过程中更容易发生塑性变形,从而提升沉积层的致密性和结合强度。适度的温度提升还有助于缓解沉积过程中产生的残余应力,减少微裂纹和内部缺陷,提高材料的整体韧性和强度。相反,如果颗粒温度过低,颗粒变形不足,导致界面结合质量下降,出现弱结合区,影响强化效果。通过精准控制颗粒温度,不仅可以优化晶粒细化和位错结构,还能实现微观组织的均匀性,提升高强金属冷喷涂件的综合性能。

喷涂角度和基底条件在冷喷涂高强金属强化机制中占据关键地位。喷涂角度直接影响颗粒与基底表面的撞击方式,只有在接近理想角度时,颗粒才能最大限度地释放动能,实现充分的塑性变形和优良的沉积致密性。角度偏离理想范围则导致颗粒撞击能量降低,变形不充分,沉积层可能出现缺陷和孔隙,影响材料性能。基底的温度和表面状态同样重要,较高的基底温度不仅促进了颗粒与基底间的机械结合,还加快了界面原子的扩散,提高结合强度^[3-6]。表面粗糙度和清洁度则影响接触面的紧密程度,决定了沉积层的稳定性和微观结构的均匀性。通过合理调整喷涂角度和基底条件,可以有效优化微观结构演变过程,提升材料的整体性能,满足高强金属冷喷涂件在航空航天、汽车等高端制造领域的应用需求。

4 高强金属冷喷涂件力学性能的提升与机制探讨

高强金属冷喷涂件的力学性能提升,依赖于多重微观强化机制的协同作用及工艺参数的精准调控。冷喷涂过程中,颗粒以极高速度撞击基底,产生剧烈的塑性变形,导致晶粒细化和高密度位错的形成。晶粒细化增强了材料的屈服强度,位错强化则有效阻碍了位错的运动,两者共同提升了材料的强度和硬度。冷喷涂技术独特的低温沉积特性抑制了晶粒的过度长大和第二相的粗化,保持了材料微观结构的稳定性,这为高强金属材料的综合性能提供了保障。沉积层内形成的细小亚晶结构和孪晶不仅改善了塑性变形能力,还在一定程度上提升了材料的韧性和疲劳性能。

残余应力的分布和控制对冷喷涂高强金属力学性能提升中起到了关键作用。高速撞击引发的局部应力场促进了材料内部位错密度的累积,这不仅强化了金属组织,也带来了潜在的应力集中风险^[7]。合理调控喷涂速度和颗粒温度能够缓解过度的残余应力,防止微裂纹的形成和扩展,从而提升材料的断裂韧性和耐疲劳性能。喷涂层与基底间的结合界面质量直接影响复合材料整体性能。通过优化喷涂角度和基底预处理,能够增强界面结合强度,减少界面缺陷,提升力学性能的均匀性和稳定性,使得高强金属冷喷涂件在实际应用中展现出优异的承载能力和耐久性。

力学性能的提升还与冷喷涂过程中微观组织的演变密切相关。高密度的位错网络和细晶结构在阻碍塑性变形时,同时促进了材料的应变硬化效应,使得冷喷涂件具备较高的强度同时兼具一定的延展性。

微观结构中的孪晶和亚晶界为应变分散提供了路径,减缓了裂纹的扩展速度,提高了断裂韧性^[8]。材料的疲劳性能亦因微观缺陷的减少和界面结合的增强而显著改善。通过精准控制工艺参数,不断优化微观结构特征,冷喷涂制备的高强金属件能够实现强度、韧性和耐疲劳性的良好平衡,满足航空航天、汽车和国防等高端领域对材料性能的苛刻要求。

5 结语

冷喷涂增材制造技术为高强金属材料的性能提升提供了新的路径。通过深入研究其强化机理和微观结构演变,明确了塑性变形、晶粒细化及位错密度增加在力学性能提升中的核心作用。工艺参数的优化有效促进了微观结构的稳定形成和应力分布的合理调整,显著增强了材料的强度、韧性及疲劳性能。未来,结合多尺度表征和先进模拟技术,冷喷涂高强金属的性能提升将更加精准,为其在航空航天等领域的广泛应用奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 黄继波,张科杰,兰海明,等.冷喷涂增材制造技术研究进展与应用现状[J].有色金属工程,2024,14(12):108-121+128.
- [2] 甘雨禾,王骏,雒晓涛,等.冷喷涂增材制造铝系金属间化合物研究进展[J/OL].中国表面工程,1-12[2025-05-19].
- [3] 王康.冷喷涂增材制造 7075 高强铝合金强化工艺及性能研究[D].中国科学技术大学,2024.
- [4] 吴应东,卢静,孙澄川,等.冷喷涂增材制造技术应用研究进展[J].表面技术,2024,53(16):19-34+67.
- [5] 叶东明.冷喷涂摩擦复合增材制造 CoCrFeNi/6061Al 疲劳行为研究[D].西安建筑科技大学,2023.
- [6] 董一萱.面向冷喷涂增材制造的沉积建模与路径规划研究[D].沈阳工业大学,2023.
- [7] 用冷喷涂固态增材制造,铜材料强塑性获突破[J].润滑与密封,2022,47(09):98.
- [8] 刘志浩.冷喷涂摩擦复合增材制造 6061 铝合金疲劳行为研究[D].西安建筑科技大学,2022.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS