

激光熔覆合金涂层抗空蚀和抗冲蚀性能研究进展

张哲¹, 张舒研², 王拓¹

(1. 新疆大学 材料科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

(2. 杭州极弱磁场国家重大科技基础设施研究院, 浙江 杭州 310051)

摘要: 水力机械是水电站和泵站的核心装备, 主要包括水轮机和水泵, 而在水轮机上发生的空蚀和冲蚀是使过流部件失效的主要形式。自20世纪60年代以来, 一直是困扰水力机械发展的关键难题。众多学者不断研究发现, 在基体材料表面制备一层致密的涂层, 可有效防止空蚀和冲蚀给水力机械带来的危害。激光熔覆技术作为一种新型表面改性方法, 为涂层在工业上的应用拓展了新的领域。通过对现有研究归纳, 本文将综合分析空蚀和冲蚀的作用机理、影响因素及预测方法, 包括粉末成分和工况因素等对激光熔覆合金涂层抗空蚀和抗冲蚀性能的影响。在此基础上根据目前材料在空蚀、冲蚀性能上存在的弊端, 总结了截至目前所存在的问题, 展望了未来激光熔覆合金涂层材料的发展方向和趋势, 为开发性能优异的激光熔覆涂层材料提供参考。

关键词: 激光熔覆; 空蚀; 冲蚀; 合金涂层

中图分类号: TG174.2^{†1}

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)09-2411-10

1 引言

在现代化工业体系中, 能源与资源的不合理配置和低效利用已成为制约经济和社会可持续发展的关键瓶颈。具体而言, 工业生产过程中普遍存在的能源过度消耗、原材料利用率低下以及废弃物排放超标等问题, 不仅造成了巨大的经济损失, 更对生态环境造成了不可逆转的破坏。而在水力机械领域, 上述问题也不断威胁着水利水电设施的安全^[1-3], 例如, 在过饱和蒸汽环境中, 水轮机叶片表面微区频繁发生气泡溃灭现象和泥沙冲击磨损现象, 这种现象与电化学腐蚀协同作用, 导致叶片材料呈现指数级损耗, 进而造成设备的性能下降, 最终使工作效率显著降低, 运行成本大幅提升。针对这一工程难题, 表面涂层技术展现出独特的防护优势。

近年来, 为了改善材料的抗空蚀、冲蚀性能, 开发了多种表面处理技术, 主要包括等离子喷涂^[4-5]、热喷涂^[6-8]、电化学沉积^[9]和激光熔覆^[10-11]等。其中, 激光熔覆是通过激光快速将表面薄层熔化并依靠金属本体的快速热传导而急速冷却, 最大程度上保留熔覆材料固有的优异性能, 该技术制备的涂层更加致密且结合强度更强, 使涂层的抗空蚀性能和抗冲蚀性能更加优异。目前, 激光熔覆制备的合金涂层被广泛应用于水轮机等过流部件的防护^[12]。

截至目前, 基于激光熔覆技术制备具有抗空蚀或抗冲蚀性能的涂层研究很少。本文将基于激光熔覆技术制

备抗空蚀、抗冲蚀合金涂层, 综合分析空蚀和冲蚀的作用机理、影响因素和预测方法, 综述国内外的相关研究成果, 进一步对研究方向进行展望。

2 空蚀的作用机理和影响因素

2.1 作用机理

当空泡在固体表面附近崩溃时, 会释放出具有高能量密度的微射流和冲击波。无数空泡的连续崩溃对材料表面施加反复的应力, 引起局部疲劳, 进而导致表面材料的磨损和剥落。这种现象, 即为空蚀。往往在水力机械领域, 螺旋桨叶片背面或边缘存在显著吸力等部位易发生空蚀效应^[13]。

空蚀所导致材料失效分为3个阶段, 在空蚀的早期阶段, 空泡溃灭产生的微射流和冲击波在涂层表面引发局部塑性变形(如位错堆积、孪晶)。同时涂层中的初始缺陷, 比如气孔或者未熔颗粒的周围形成微应力集中区, 导致空蚀效应的产生。在这种情况下一般无质量损失, 处于损伤孕育阶段。第二, 加速损伤阶段, 经过气泡的反复冲击导致表面涂层加工硬化, 且涂层变得更脆, 微裂纹在晶界缺陷处不断萌生、扩展并连接, 形成网状裂纹, 导致材料大面积剥落。在气泡不断的作用下表面还可能产生局部的温度升高, 致使涂层的氧化物剥落后加速侵蚀。第三, 稳定损伤阶段, 长时间受到空泡的作用, 裂纹不断向深扩展, 涂层大面积剥落后, 在此阶段材料的损伤速率

收稿日期: 2025-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(52461031, 52401202); 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2024D01C13)

作者简介: 张哲, 男, 2001年生, 硕士生, 新疆大学材料科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017, E-mail: 15655502873@163.com

保持平稳的状态。部分涂层中的硬质相和较软的合金化物剥落。若涂层较薄,冲击可能涉及基体界面,导致不同程度的失效^[14-15]。

2.2 影响因素

材料的空蚀作用往往伴随着多种物理场耦合的复杂过程,影响因素如表 1 所示。在水力机械领域最主要的作用包括空泡溃灭产生的机械冲击、局部高温高压效应以及涂层材料的动态响应产生的不同程度的损伤^[16]。

激光熔覆技术形成的涂层与基体之间的结合为冶金结合,相较于传统的机械结合方式,结合强度显著提升,可有效避免涂层剥落问题^[17]。此外,激光熔覆制备的表面涂层致密度更高,可避免因表面大量的裂纹或气孔加速空蚀损伤,此技术制备的涂层被广泛应用于零部件的空蚀防护^[18-20]。

高熵合金因其独特的性质,常被用作原材料制备涂层以提高材料表面的抗空蚀性能。Xie 等^[21]研究了激光熔覆高熵 $\text{FeCoCrNiMo}_x\text{B}_{0.2}$ 涂层的抗空蚀性能。实验发现,在最初的几个小时内,涂层的质量损失速率几乎没有增加,证明处于空蚀损伤孕育阶段。随着时间不断延长,失重量逐渐增加,进入加速期和稳定期。此外,实验发现 Mo 含量的提高使得高熵合金涂层硬度和稳定性提高,降低涂层表面的耐腐蚀性,提高涂层的抗空蚀性能。Wang 等^[22]分析了 CoCrFeNiMnTi_x 高熵合金涂层的空蚀和腐蚀-空蚀协同行为。 $x=1.0$ 的样品由于具有较低的失重量,表现出最好的抗空蚀性能。随着 Ti 含量的增加,钝化膜的保护能力也呈现先提升后降低的趋势。总体而言, $x=1.0$ 的样品在腐蚀-空化协同作用下的抗空蚀性能最佳。Yu 等^[23]采用激光熔覆技术在 304 不锈钢表面制备了 CoCrFeNiMnW_x 高熵合金涂层。并且详细分析了 W

添加量对涂层抗空蚀性能的影响。结果表明 CoCrFeNiMnW_x 高熵合金涂层的相结构为 fcc 结构,微观组织为典型的枝晶形貌。随着 W 含量的增加, CoCrFeNiMnW_x 高熵合金涂层的平均晶粒尺寸逐渐减小。 CoCrFeNiMnW_x 高熵合金涂层的显微硬度先增大后减小,这是由于 W 元素的过量添加导致了涂层的脆性开裂。此外, $x=1$ 时, CoCrFeNiMnW_x 高熵合金涂层显示出最高的抗空蚀能力,适当添加 W 元素可以有效提高 CoCrFeNiMnW_x 高熵合金涂层的耐磨性和抗空蚀性能。Zhao 等^[24]采用同轴送粉激光熔覆技术在 304 不锈钢表面制备了 CoCrFeNiMn 高熵合金涂层。对高熵合金的耐腐蚀性和抗空蚀性能展开研究。经过 10 h 空蚀作用后,高熵合金涂层的钝化膜中电流密度比 304 不锈钢基体材料的要低得多。其优异的抗空蚀性能归因于其晶粒可以有效抵抗塑性变形,且表面钝化膜在长期空蚀后可以保持相对较高的完整性,极大程度上改善材料的抗空蚀性。Yin 等^[25]发现抗空化腐蚀涂层是解决空化腐蚀问题的绝佳方案。采用激光熔覆技术在 AISI304 钢上制备了 $\text{AlCoCr}_x\text{CuFe}$ 高熵合金涂层,并探究其抗空蚀性能。结果表明, $\text{AlCoCr}_x\text{CuFe}$ 由 bcc 和 fcc 双相组成。微观结构显示出典型的树枝晶结构。20 h 涂层质量损失随着 Cr 含量的增加而降低。当 $x=0.5$ 时,高熵合金涂层在所有样品中显示出最佳的空化腐蚀抵抗能力。经过 20 h 空化腐蚀测试后的表面暴露出 bcc 相的树枝晶结构,这是由于空化冲击破坏了枝晶间结构所致。

高熵合金可以通过设计包含 Cr、Mo、Ni 等元素获得良好的耐腐蚀性,甚至在某些特定环境下超越传统合金。然而,其耐腐蚀性高度依赖于具体的成分组合和微观结构。这种不确定因素意味着需要针对特定服役环境进行

表 1 导致空蚀失效的影响因素
Table 1 Influencing factors of cavitation-induced failure

Influencing factor		Specific effect
Environmental factor	Medium properties	Liquid viscosity, density, and gas content all affect cavitation resistance of the material.
	Temperature	High temperatures may accelerate material softening or chemical reactions, while low temperatures may affect fluid cavitation behavior.
	Impurities and particles	The characteristics of the fluid, such as sediment concentration, bubble count, and abrasive particles like SiO_2 , significantly reduce cavitation resistance of the material.
Material factor	Mechanical properties	The mechanical properties of the coating influence its resistance to plastic deformation and its ability to absorb elastic energy under cavitation conditions.
	Microstructure	The finer the grain size and the more appropriately balanced the soft/hard phases, the better the cavitation resistance.
	Surface characteristics	Residual stress and chemical stability of the surface may induce cavitation effects.
External factor	Loading state	Different loading conditions result in varying degrees of cavitation.
	Coating protection	Coating can significantly reduce cavitation damage on the material surface.
Synergistic factor	Cavitation-corrosion	In marine environments, the synergistic effect of corrosion and cavitation makes coatings more vulnerable in NaCl solution than in freshwater.
	Cavitation-erosion	Surfaces subjected to erosion wear are highly susceptible to cavitation effects.

设计和验证,其抗空蚀性能不一定能稳定地超越成熟的Co基合金。相比于高熵合金,高Cr含量的Co基合金(Stellite系列合金)含有大量的Cr,能形成非常致密且稳定的 Cr_2O_3 钝化膜,提供优异的抗空蚀性能。

Zhang等^[26]采用激光熔覆技术在316不锈钢基材上制备了一种Co基涂层,主要分析了不同砂粒尺寸的砂水混合物中涂层的空化侵蚀的孕育阶段、加速阶段和稳定阶段,以解决含沙河流中液压机械面临的空化侵蚀和磨损问题。随着添加的砂粒尺寸的增加,涂层的侵蚀损伤也增加。在两种不同砂粒尺寸的溶液中,涂层的质量损失率显著低于316基材的质量损失率。表明其对空化侵蚀具有优越的抵抗力。孙景勇等^[27]对比了相同时间下超音速激光沉积和激光熔覆两种技术制备的Stellite 6涂层的空蚀机制。经过分析得出,前者所制备涂层空蚀后,通过微观组织分析可以观察到,表面出现大量微小的点蚀坑,如图1a;而后者制备的涂层空蚀后,整体呈现均匀空蚀现象,如图1b。其原因为超音速激光沉积是一种基于材料塑性变形实现沉积的过程,粉末颗粒与颗粒之间的结合机制主要为机械结合,而非激光熔覆技术的冶金结合,在结合过程中的存在的气孔在空蚀作用下极易形成点蚀坑。

Wang等^[28]采用激光熔覆技术在马氏体不锈钢表面制备了Stellite 728试样。研究了在3.5wt% NaCl溶液中的空蚀行为,并将CoCr合金Stellite 728涂层和抗空蚀涂层Stellite 6合金进行了比较,探究试样的空蚀机理。实验结果表明,激光熔覆Stellite 728在3.5wt% NaCl溶液中具有比激光熔覆Stellite 6合金更好的抗空蚀性能,这是

由于合金中形成了大量的富Mo金属间化合物,有效阻碍空泡溃灭产生的微射流和冲击波,减少塑性变形与材料剥落。Singh等^[29]在不锈钢13Cr-4Ni上采用激光熔覆技术制备了Stellite 6涂层,并研究了涂层在固体颗粒侵蚀和空化侵蚀下的性能。结果表明,Stellite 6涂层的抗空蚀性能显著高于不锈钢基体。此外,在3.5wt% NaCl溶液中Stellite 6涂层抗空蚀性能相比于基体材料提高90%。杨聃等^[30]为解决水轮机耐空蚀问题,采用激光熔覆技术在0Cr13Ni4Mo不锈钢表面制备Co基涂层,并对比基体材料的抗空蚀性能。实验发现,在空蚀损伤孕育阶段,二者空蚀失重量很小,甚至未发生失重。随着时间的延长,进入加速损伤阶段,10 h后,基体失重量为Co基涂层失重量的3倍。分析空蚀后涂层表面的微观组织结构,发现涂层具备较高的硬度和分布均匀的枝晶结构,这极大程度上缓解了空化侵蚀损伤。路鑫杰^[31]研究了Mo含量对激光熔覆Stellite 31合金涂层空蚀性能的影响。试验表明,随着Mo含量的增加,涂层中硬质相的形核率逐渐增大。显微组织分析发现硬质相颗粒主要分布在晶界处,对晶界的移动起到阻碍作用,抑制晶粒的长大,同时提高涂层的抗空蚀能力。但是Mo含量的提高也增加了裂纹萌生的风险。

迄今为止,有许多Ni基合金表面改性的研究^[32]。Ni基与Co基合金涂层作为抗空蚀领域的两大主流材料体系,在微观组织、力学响应和环境适应性方面存在显著差异。鄂猛等^[33]采用激光熔覆技术在16Mn钢表面制备了Co基和Ni基合金涂层,并分析两者的抗空蚀性能。图2为空蚀累积质量损失曲线。实验结果表明,Co基涂层比Ni基涂层抗空蚀性能更强,其原因为Co基涂层在激光熔覆过程中,快速冷却会形成致密的枝晶状结构,而枝晶状组织可以细化晶粒,减少涂层缺陷,增强涂层的致密性,从而提高其抗空蚀能力。张松等^[34]采用激光熔覆技术在Monel合金表面制备Ni基稀土合金涂层,研究了涂层的组织形貌和抗空蚀性能。实验表明,添加稀土元素的合金涂层与基体冶金结合良好且晶粒组织更加致密,无明显的裂纹和孔洞,涂层耐腐蚀性能约是基材的8.7倍,抗空蚀性能也显著提高。与未添加稀土元素的涂层相比,Ni基稀土合金涂层抗空蚀性能是其1.29倍。实验发现,在空蚀对比试验中,由于枝晶干区域主要由较软的基体相组成,枝晶干优先发生空蚀剥落。该区域与涂层其他组织相比,在空泡溃灭冲击力的作用下更容易发生塑性变形,从而发生破坏和剥落。 Y_2O_3 稀土氧化物的加入,对涂层起到了细晶强化作用,提高了涂层的强度和显微硬度,抑制了空蚀过程中塑性变形趋势;熔覆过程中部分 Y_2O_3 分解释放的亲氧性元素Y大大减少了Ni基合金涂层中的杂质数量,改善了组织的致密性。此外,制备的涂层呈现细小枝晶呈网状结构分布,空蚀过程裂纹沿晶

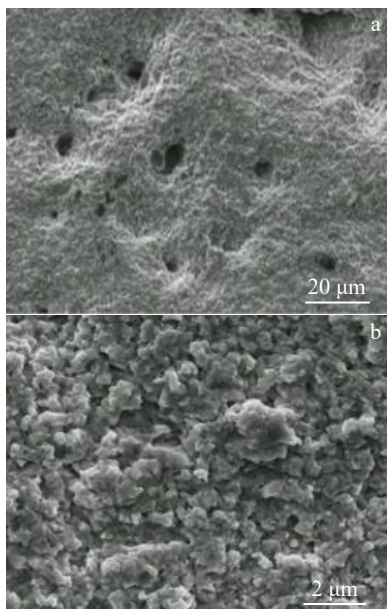


图1 不同表面处理技术制备的Stellite 6涂层显微形貌

Fig.1 Microscopic morphologies of Stellite 6 coating prepared by different surface treatment techniques^[27]: (a) supersonic laser deposition and (b) laser cladding

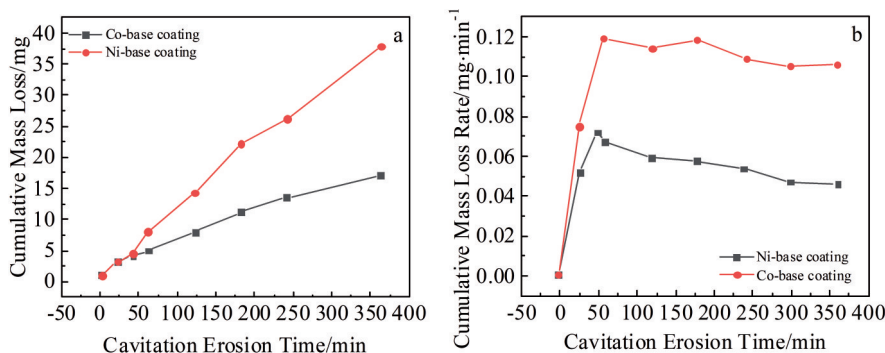


图2 空蚀累积质量损失曲线和损失率曲线

Fig.2 Cumulative mass loss curves (a) and cumulative mass loss rate curves (b) of cavitation erosion^[33]

界的扩展被阻断,提高了涂层的耐空蚀性能。Zhang等^[35]采用激光熔覆的方法在Monel 400上制备了Ni基改性层,以提高其抗空蚀性能。分别对改性后的涂层和基体材料进行空蚀测试。实验结果表明,Ni基合金涂层的显微组织为细胞状枝晶、片状枝晶和多重共晶相。改性层主要由 γ -Ni固溶体、碳化铬(Cr_7C_3 和 Cr_{23}C_6)和 Ni_3B 组成。这种独特的显微结构可细化晶粒,提高涂层致密性,减少空蚀过程中的裂纹萌生点,使涂层的抗空蚀性能和耐腐蚀性能均有提高。在空化侵蚀试验中,Ni基涂层的空蚀质量损失比基材低一个数量级,极大程度上提高了抗空蚀性能。

其它合金涂层相关抗空蚀性能的研究相对较少。Zhang等^[36]采用激光熔覆技术在304不锈钢基体上制备了TiC陶瓷颗粒改性的Fe基复合涂层,对其抗空蚀性能进行了系统的测试。结果表明,涂层主要由 $\alpha\text{-Fe}$ 、 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 和TiC组成。TiC颗粒的引入细化了枝晶内部的组织,同时不同形态的TiC颗粒弥散分布在复合涂层中;引入TiC使得涂层显微硬度提高,有利于增强涂层的耐磨性能。与基体和一些常见的工程材料相比,虽然没有观察到明显的钝化区,但仍表现出优越的电化学性能。结合涂层优异的力学性能,使复合涂层的抗空蚀性能得到了显著增强。Wu等^[37]通过激光熔覆技术制备了一种新型的 $\text{FeNiCoCrMo}_{0.3}\text{Nb}_{0.5}$ 亚共晶高熵合金涂层。在固溶强化和第二相强化的共同作用下,Mo和Nb的添加显著增强了FeNiCoCr基高熵合金涂层的硬度、承载能力和抗塑性变形能力。此外, $\text{FeNiCoCrMo}_{0.3}\text{Nb}_{0.5}$ 亚共晶高熵合金涂层表现出优异的耐腐蚀性能。Mo和Nb的存在增强了钝化膜的致密性,减少了腐蚀离子的渗入,从而提高了涂层的耐蚀性。与316不锈钢基体相比, $\text{FeNiCoCrMo}_{0.3}\text{Nb}_{0.5}$ 亚共晶高熵合金涂层在空蚀后仍保留大面积的Laves相原始表面。相比于基体材料,抗空蚀性能显著提高。

3 冲蚀的作用机理和影响因素

3.1 作用机理

在海洋等腐蚀性环境中,空蚀还可以与其他类型的

材料损伤产生协同效应。例如,空蚀和泥沙冲蚀的结合效应可以显著损害材料,因为空蚀磨损可以破坏材料结构的完整性并加速泥沙侵蚀。冲蚀是指流体中携带的固体颗粒对材料表面产生撞击,进而导致材料逐渐损耗和破坏的现象。在水轮机运行过程中,这种磨损主要由泥沙颗粒引发。当含有泥沙的流体流经水轮机过流部件时,泥沙颗粒之间的相互碰撞会加剧水流的湍流效应,不仅增强了颗粒的撞击动能,还使其撞击角度发生变化^[38-39]。随着泥沙颗粒对材料表面的持续冲击,材料表面会发生塑性变形,最终因疲劳而剥落。截止目前,抑制泥沙冲蚀带来的危害最有效的手段是在材料表面制备一层耐磨损的涂层^[40-41]。在水力机械领域,材料的冲蚀作用主要分为3个阶段。在初始的表面损伤过程中,水流中的泥沙、碎石在材料表面产生的冲击导致表面发生局部磨损,形成不同程度的划痕和孔洞^[42]。流体速度和颗粒硬度是导致初始表面损伤最主要的影响因素。随着冲蚀时间延长,进入材料均匀损失阶段,部分的表面材料剥离,表面损伤区域逐渐扩大,形成均匀的材料流失层,单位时间内的失重量趋于稳定。经过持续的冲刷腐蚀,表面的点蚀坑和涂层的腐蚀脱落进一步恶化材料的损失,暴露的基体材料通过电化学腐蚀和机械磨损耦合作用致使材料破坏速率非线性上升^[43-44]。

3.2 影响因素

自1974年激光熔覆表面处理技术问世以来,众多学者致力于用此技术开发耐冲蚀性能优异的涂层。图3为激光熔覆示意图。

涂层材料的冲蚀性能受多因素耦合影响。其中合理选用激光熔覆材料是决定材料抗冲蚀的主要因素。合适的硬度可以有效抵抗微观切削作用和塑性挤压,还可以有效抵抗颗粒压入,减少材料剥离体积。其次,良好的韧性可以有效地吸收冲击带来的能量,有效抑制裂纹的萌生和扩展。最后,工况因素也制约着材料的抗冲蚀性能,包括冲蚀角度、泥沙特性和泥沙浓度等。截至目前,对于激光熔覆合金涂层抗冲蚀性能的研究相对较少,典型的

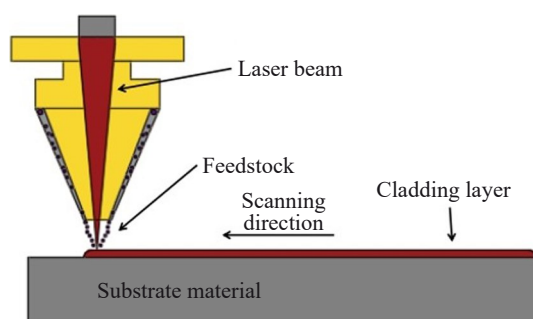


图3 激光熔覆示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser cladding

激光熔覆合金涂层抗冲蚀性能研究如表2所示^[45-57]。

合理选取熔覆材料是制备抗冲蚀性能涂层的关键^[58-59]。3种最常见的激光熔覆抗泥沙冲蚀涂层的粉末原料为自熔性合金、陶瓷类型粉末和复合型粉末。在自熔性合金类别中,以Fe基、Co基、Ni基材料为主要成分。相比Fe基和Co基性能,Ni基合金展现出更优异的抗冲蚀性能,其特有的固溶强化效应赋予涂层良好的韧性,与基材的热膨胀系数匹配度较高,有效抑制了界面剥离风险,同时通过碳化物原位生成机制显著提升耐磨性,使其在成本与性能间达到平衡,成为制备抗冲蚀涂层的优选材料。此外,Wc的热稳定性和硬度均高于其它常见碳化物,能更有效抵抗冲蚀过程中的微切削和塑性变形。结合Ni基粘结剂可以在极端工况下保持长效耐磨性。Khodabakhshi等^[60]采用激光熔覆技术在低碳钢基体上制备了NiCrBSi-WC涂层,并对其显微组织、抗冲蚀性能和耐磨性能进行了对比研究。实验结果表明,未添加WC的涂层主要由fcc结构的 γ -Ni相和少量硼化物相组成,而复合涂层主要由金属碳化物相组成,如图4所示。在复合涂层中,激光熔覆过程中WC颗粒的部分熔化导致了扩散区以及针状和块状碳化物析出相的形成。

由于硬质颗粒的分布、部分溶解以及二次硬质相的形成都提高了涂层的整体硬度,提高耐冲蚀性能。Goyal等^[61]研究在SS410钢表面激光熔覆NiCr-WC陶瓷涂层后的抗冲蚀磨损性能,系统地研究了复合涂层在泥浆中的冲蚀性能,测试了一定范围的冲击角度、速度和泥浆浓度对抗冲蚀性能的影响。NiCr-WC涂层的抗冲蚀性能提高了6倍,最小质量损失为0.0125 g,分析证实了冲击速度是对冲蚀抗力影响最大的因素。宫成等^[62]研究了激光熔覆技术制备添加WC的Ni基合金涂层的抗冲蚀性能。实验发现在冲蚀磨损下,添加的硬质相颗粒明显地改善涂层的抗冲蚀性能,微小的WC颗粒均匀分布在粘结相中,有效地抵抗泥沙的冲蚀。何群等^[63]采用激光熔覆技术在15Cr1Mo1V钢表面制备Ni包WC的Fe基涂层,研究WC对Fe基涂层显微组织抗冲蚀磨损性能的影响。实验发现,随着Ni包WC的质量分数逐渐增加,大部分

WC颗粒与Fe等合金元素发生明显的化学反应,并且形成网络状结构,使晶粒细化,抗冲蚀性能逐渐提升。

Huang等^[64]在316不锈钢基体表面制备Ni60-WC复合涂层,并分析WC含量对Ni基合金涂层的性能影响。实验发现随着WC含量的增加,涂层的显微组织逐渐变为胞状晶,如图5所示,导致硬度逐渐提升,抗冲蚀性能也随之升高。

Fordyce等^[65]研究了碳化物和冲蚀粒子大小对直接激光沉积制备 $\text{Fe}_{28}\text{Cr}_{2.7}\text{C}$ 合金抗冲蚀磨损性能的影响。结果表明,亚微米尺寸的碳化物能有效阻碍位错运动,这些碳化物分散在涂层中,提升涂层的硬度和耐磨性。当冲击粒子直径较大时,则会导致涂层表面碳化物的断裂,降低抗冲蚀性能;而当冲击粒子直径较小时,基体和碳化物之间存在明显的相互作用,从而减缓磨损,提升材料的使用寿命。

泥沙含量、泥沙特性和水流速度这些因素都制约着材料的抗冲蚀性能,而泥沙的含量是影响材料使用寿命的最主要因素。李守彪等^[66]采用激光熔覆技术在04Cr钢表面制备Ni基纳米复合涂层,模拟海洋中泥沙的冲蚀工况,探究含沙量和时间对涂层抗冲蚀性能的影响,如表3。实验表明,时间一定时,随着含沙量的上升,样品损失质量逐渐增加,前96 h含沙量越大损失越严重,其归因于无沙环境下的样品与海水中的氧气反应形成了一层保护性氧化膜。然而,随着含沙量的增加,样品表面受到的机械作用力不断提高,导致氧化膜不断剥落,从而引发质量损失。此外,随着含沙量的进一步增加,沙粒间的碰撞频率和强度也随之增大,进一步加剧了质量损失的过程。班傲林^[67]研究了陶瓷颗粒增强高熵合金陶瓷组织及其抗冲蚀性能分析,随着冲蚀时间增加,涂层的质量损失呈现近似线性的上升趋势。相同冲蚀时间内,涂层失重量远低于基体的失重量。此外,还分析了不同的冲蚀角度的影响,实验结果表明,高熵合金涂层在冲蚀角度为45°时,质量损失最大;冲蚀角度为30°时,涂层质量损失最小。

4 空蚀和冲蚀的预测方法

空蚀与冲蚀的预测方法是机理研究的直接应用和量化体现,而对机理的深入理解又持续推动着预测模型向更精确、更可靠的方向发展。这两者相互促进,共同为解决实际工程中的磨损问题提供了坚实的理论基础和强大的工具支持。

空蚀是水动力系统中最为关键的损伤机制之一,而泥沙冲蚀是材料失效最主要的因素。二者的相互耦合作用决定材料的使用寿命。近年来,随着机器学习和人工智能技术的发展,基于数据驱动的空蚀和冲蚀预测方法逐渐兴起。这些方法通过训练算法识别相关特征,能够处理复杂的非线性关系,并在一定程度上克服传统模型

表 2 典型激光熔覆合金涂层的抗冲蚀性能

Table 2 Anti-erosion performance of typical laser cladding alloy coatings

Coating material	Substrate material	Hardness/ HV	Performance	Ref.
Ni-based alloy	15CrMo	328	After erosion at 600 °C, the nickel-based alloy coating exhibited significantly lower volume loss compared to the 15CrMo substrate, with a reduction of approximately 63%, demonstrating excellent erosion resistance.	[45]
AlCoCrFeNi	0Cr13Ni5Mo	545	The heat-treated coating exhibited less mass loss under both low and high erosion angles.	[46]
Ni60-WC	Q345	860–940	The erosion rate of the composite coating first decreased and then increased with the increase in WC content. When the WC content reached 20%, the composite coating exhibited the lowest erosion rate and optimal erosion-wear resistance.	[47]
$\text{CrFe}_4\text{Co}_4\text{Ni}_4\text{Cr}_{2.6-x}\text{-Al}_x\text{Mo}_{0.4}$	904L	-	Under solid-particle erosion conditions, the HEA coating exhibited a hybrid erosion mechanism combining micro-cutting/plowing and erosion pit formation. The $\text{Al}_{0.8}$ coating demonstrated superior erosion resistance with the lowest erosion rate.	[48]
$\text{Al}_x\text{CoCrFeNiSi}$	304SSl	711	The coating exhibited characteristic brittle erosion behavior, with fracture toughness deteriorating progressively with the increase in Al content. At elevated temperatures of 700 °C, however, the erosion rate decreased due to combined precipitation strengthening and oxide layer effects.	[49]
$\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$	AlCoCrFeNi	-	The mass loss showed a progressive decline with the increase in $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ content, demonstrating that the incorporated $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ particles effectively enhanced the erosion resistance of the coating.	[50]
Hoganas-WC	304SS	-	The Hogonas-WC cladding specimen demonstrated superior erosion-wear resistance compared to the substrate material, effectively avoiding the hybrid failure mode combining ductile and brittle mechanisms.	[51]
$\text{Ni-Cr}_3\text{C}_2$	2Cr13	380–480	The rate of erosive wear decreased by 50% compared to the substrate material.	[52]
Inconel 625-VC	316L	1000	The coating hardness increased linearly with higher reinforcement phase content. However, excessive reinforcement led to dominant brittle fracture behavior of primary vanadium carbide particles, ultimately degrading the erosion resistance.	[53]
CoCrFeNi-NbC	316SS	458.5	The 10wt% NbC-reinforced HEAs composite coating exhibited optimal microhardness homogeneity and reinforcement phase distribution, resulting in the lowest cumulative mass loss. In contrast to predominant ductile fracture mode of the substrate, the NbC-containing coating demonstrated a hybrid failure mechanism combining brittle and ductile characteristics.	[54]
$\text{Al}_x\text{CoCrFeNiTi}_{0.5}$	35CrMo	-	The composite coating demonstrated significantly superior erosion resistance compared to the metallic coating at both 30° and 90° impact angles. Notably, its anti-erosion performance remained comparable under normal and oblique impact conditions.	[55]
CoCrFeNiTi	304SS	568	The CoCrFeNiTi HEA coating exhibited significantly reduced erosion rate compared to the substrate material at both 30° and 90° impact angles. Under oblique impact conditions, the removal mechanism of coating material was primarily characterized by micro-plowing and micro-cutting.	[56]
Colmonoy-6-WC	410SS	1800	Compared to SS410 steel, the Colmonoy-6+50% WC coated specimens demonstrated superior erosion resistance across all test conditions. Impact velocity was identified as the dominant factor influencing slurry anti-erosion performance.	[57]

的局限性。在空蚀研究领域,研究人员已提出多种理论模型。每种模型基于其特定的假设和物理机制,衍生出独特的预测技术。为了评估整体压力对试样空蚀效应的影响,方海渊等^[68]采用了 Sauer 空化模型和 SST 湍流模型对材料空化进行数值计算,分析了均时压力场和瞬时压力场对于壁面空蚀强度预测的影响。分析瞬时壁面空蚀

强度,试验表明,回射流向上游发展期间片状空穴尾部不稳定,存在小尺度的空穴结构连续溃灭,导致材料中部区域发生不规则侵蚀。李林敏等^[69]基于流体体积法和 Schnerr-Sauer 空化模型,分析了空泡溃灭产生的势能造成空蚀效应恶化原理和在工况上的风险预测。实验发现,空蚀主要集中在叶片的尾部,表明空蚀主要是由脱落

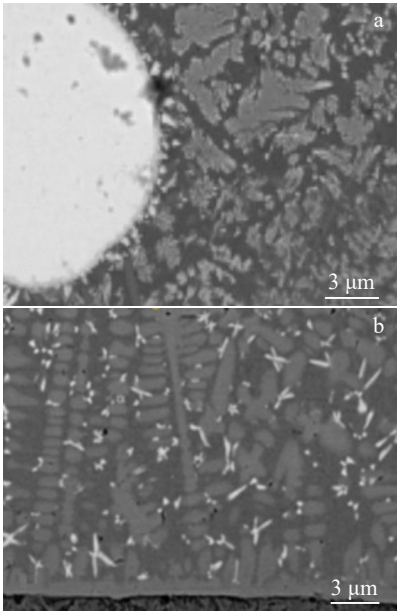


图4 NiCrBSi-WC的显微组织
Fig.4 Microstructures of NiCrBSi-WC^[60]

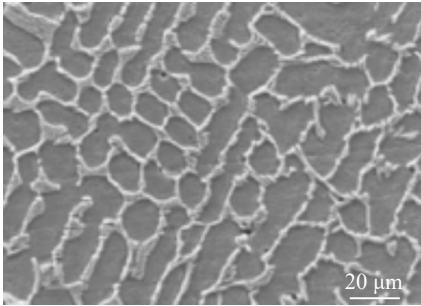


图5 Ni60-6%WC的显微组织
Fig.5 Microstructure of Ni60-6%WC^[64]

表3 含沙量对涂层抗冲蚀性能的影响
Table 3 Influence of sediment concentration on anti-erosion performance of coatings (g/mm³)^[66]

Time/h	Sand content/%		
	0	0.2	0.3
48	-2.77	6.91	18.93
96	-6.36	12.00	26.44
144	-1.77	69.69	73.71

的空泡溃灭引发。高空蚀风险区域沿叶片向下游扩展，空蚀风险区域明显增加。相比前盖板表面的空蚀风险，叶片表面的空泡溃灭冲击能量更大，因此更容易发生空蚀。随后 Li 等^[70]利用该方法对 NACA 0018-45 翼型的预测，实验对比表明，采用压力变化累积速率比单一压力变化率更能准确预测易蚀区的空泡溃灭能量传递。

不同的冲蚀理论模型及其衍生方法各具优势与局限，研究人员通常根据具体问题和可用资源选择合适的

方法，以实现更准确和可靠的冲蚀预测^[71]。孙晓阳等^[72]使用 Eulerian-Lagrangian 方法进一步研究了气固两相流中固体颗粒间碰撞对冲蚀的影响，实验发现，结合直接模拟蒙特卡罗和计算流体力学技术对冲蚀预测更符合实际工况。Wang 等^[73]结合失效模型 Johnson-Holmquist 和 Johnson-Cook 方程系统分析了各种冲蚀影响因素对材料表面性能的影响。结合材料表面的冲蚀破坏机制，大量的实验研究表明，模型整体预测结果与实验的数据吻合。Arabnejad 等^[74]补充了 Co 基合金在固体颗粒冲蚀方面的研究数据，并根据冲蚀导致的质量损失建立经验方程。实验发现，在较小冲击角度下，Co 基合金的硬度和抗冲蚀性能显著优于钢。该方程对小颗粒低冲击速度下的冲蚀破坏预测较为准确，但在其他条件下与实验结果存在较大偏差。孙国勇等^[75]采用 SST k- ω 湍流模型和 Tabakoff 冲蚀模型，对渭河流域魏家堡水电站水轮机内部的多相流动及其冲蚀现象进行了数值模拟，成功识别了易发生冲蚀的区域，并深入探讨了冲蚀的成因。发现数值模拟在预测冲蚀位置和严重程度方面具有较高的准确性，能够有效捕捉冲蚀的关键特征，为后续优化设计提供了可靠依据^[76-77]。

5 结论与展望

激光熔覆技术的出现拓宽了工程材料使用的可选择范围，替代了传统电镀和热喷涂，实现高效、绿色制造，此外在材料潜能开发上也具备广阔的应用前景，解决了传统合金性能的瓶颈，实现涂层耐磨性能和耐腐蚀性能协同提升。此外在关键部件再制造与修复上也有很大潜能，如一些关键部件的修复与强化，可以使经济效益显著提高。

作为一种面向海洋极端环境的新型表面处理技术，所制备涂层的性能要求极为严苛。为确保其在高压、高流速、温度变化及复杂化学介质等恶劣条件下能够长效服役，涂层不仅需要具备卓越的抗空蚀与抗冲蚀性能，还应拥有良好的机械强度与结构稳定性，以应对海水冲击、压力波动等动态载荷的长期作用。这些高性能需求既增加了涂层材料的研发难度，也推动了表面处理工艺的持续创新与优化。尽管目前在涂层的空蚀与冲蚀行为研究方面已取得一定进展，但仍存在若干潜在问题亟待解决。

在抗空蚀涂层方面，目前面临多重挑战。首先，无论是高熵合金还是 Ni/Co 基多元合金体系，其相平衡规律与凝固路径预测仍缺乏准确的理论模型支撑。特别是在激光熔覆技术所特有的快速凝固与非平衡条件下，传统相图的适用性显著受限，使得难以有效预测和控制涂层微观组织，从而制约了其抗空蚀能力的提升。其次，空蚀破坏本身是一个跨尺度的动态过程，涉及从纳米尺度下的位错运动到宏观尺度材料剥落的连续演变，而现有研

究多聚焦于单一尺度,缺乏系统性跨尺度关联分析。此外,高熵合金在工程化应用中仍面临成本控制难题;Ni基合金中相变行为与空蚀损伤机制的耦合作用尚不明确;Co基合金涂层与基体界面在动态载荷下的空蚀行为机制仍较为模糊,这些均为该领域当前亟待突破的关键问题。

在抗冲蚀涂层方面,Ni基合金涂层凭借其可调控的微观结构和优异的综合性能,展现出显著的应用潜力,然而其进一步发展仍存在若干瓶颈。首要问题在于,Ni基复合涂层中陶瓷增强相的均匀分散及其与金属基体的界面结合质量仍难以有效控制。尽管引入高比例硬质相可显著提升涂层硬度与耐冲蚀性,但此类硬质相易诱发微裂纹萌生与扩展,成为激光熔覆抗冲蚀涂层设计中亟待解决的关键矛盾。其次,针对特定海洋工况,实现涂层高硬度与高韧性的协同提升仍具挑战,性能平衡点的把握极为困难。最后,现有研究多局限于单一因素或静态环境下的性能评价,缺乏对实际工程中复杂动态工况的有效模拟手段,难以真实反映涂层的服役行为与失效机理。

参考文献 References

- [1] Zhang G, Wu G L, Tao S Y *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2025, 512: 132444
- [2] Rai A K, Kumar A, Staubli T. *Wear*[J], 2019, 436-437: 203003
- [3] Yue Jianfeng(岳建锋), Li Yong(李勇), Yang Dong(杨冬). *Thermal Spray Technology*(热喷涂技术)[J], 2020, 12(3): 81
- [4] Wen J, Song C, Liu T K *et al. Coatings*[J], 2019, 9(11): 717
- [5] Yang Jun(杨均), Yao Qing(姚青), Li Huaifeng(李怀峰) *et al. Electroplating & Finishing*(电镀与涂饰)[J], 2024, 43(2): 76
- [6] Qi Yanfei(齐艳飞), Ren Xiqiang(任喜强), Zhou Jingyi(周景一) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(2): 735
- [7] Dangi S, Chaudhary S, Karloopia J *et al. Tribology International* [J], 2025, 212: 110999
- [8] Zhou S F, Huang Y J, Zeng X Y. *Applied Surface Science*[J], 2008, 254(10): 3110
- [9] Ashraf M A, Mazouni N E, Martinovic M *et al. Applied Surface Science*[J], 2025, 701: 163209
- [10] Wang Y Y, Li A J, Shu L S *et al. Materials Today Communications*[J], 2025, 46: 112515
- [11] Lian G F, Chen J B, Lu H *et al. Ceramics International*[J], 2025, 51(10): 13135
- [12] Yuan Xuan(袁轩), Liu Wei(刘伟), Wei Xin(魏鑫) *et al. Materials Reports*(材料导报)[J], 2024, 38(S1): 572
- [13] Brennen C E. *Cavitation and Bubble Dynamics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [14] Gohil P P, Saini R P. *Ocean Engineering*[J], 2022, 263: 112230
- [15] Lin J R, Hong S, Zheng Y *et al. Journal of Marine Science and Engineering*[J], 2022, 10(10): 1341
- [16] Krell A, Czyniewski A. *Wear*[J], 2006, 260(11-12): 1324
- [17] Guo Yiqian(郭义乾), Guo Zhenghua(郭正华), Li Zhiyong(李智勇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(8): 2965
- [18] Trethewey K R, Haley T J, Clark C C. *British Corrosion Journal*[J], 2013, 23(1): 55
- [19] Miah M H, Chand D S, Malhi G S. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*[J], 2023, 5(5): 1805
- [20] Ma X J, Huang B, Zhao X *et al. Ultrasonics Sonochemistry*[J], 2018, 43: 80
- [21] Xie B Q, Bao Y F, Zhong C H *et al. Surface Engineering*[J], 2021, 37(12): 1606
- [22] Wang D C, Wu C L, Zhang C H *et al. Corrosion Engineering, Science and Technology*[J], 2023, 58(8): 766
- [23] Yu D T, Wang R, Wu C L *et al. Materials Chemistry and Physics*[J], 2025, 329: 130122
- [24] Zhao T, Wang L, Zhang S *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2023, 472: 129940
- [25] Yin D Q, Liang G B, Fan S *et al. Materials*[J], 2020, 13(18): 4067
- [26] Zhang J, Xu Q, Xing L W *et al. Materials Today Communications*[J], 2025, 45: 112395
- [27] Sun Jingyong(孙景勇), Yan Yuliang(晏宇亮), Li Bo(李波). *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2021, 48(10): 182
- [28] Wang L, Mao J Z, Xue C G *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2023, 158: 108761
- [29] Singh R, Kumar D, Mishra S K *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2014, 251: 87
- [30] Yang Dan(杨聃), Li Dehong(李德红), Chen Zhixiong(陈志雄) *et al. China Rural Water and Hydropower*(中国农村水利水电)[J], 2022(4): 229
- [31] Lu Xinjie(路鑫杰). *Effect of Mo Content on Wear and Cavitation Properties of Cobalt-Based Alloy Laser Cladding Layers*(钼含量对钴基合金激光熔覆层磨损与空蚀特性的影响研究)[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2024
- [32] Luo X, Li J, Li G J. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 626: 102
- [33] Er Meng(鄂猛), Hu Hongxiang(胡红祥), Guo Xuming(国旭明). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2018, 39(1): 90
- [34] Zhang Song(张松), Wu Shiqi(武世奇), Cui Wendong(崔文东). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(5): 1517
- [35] Zhang C H, Wu C, Zhang S *et al. Rare Metals*[J], 2016, 41(12): 130122
- [36] Zhang H F, Wang L, Zhang S *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 26: 8440
- [37] Wu H, Wang M S, Zhang S *et al. Wear*[J], 2025, 572: 206043
- [38] Wang S R, Li J K, Cao J C *et al. Composites Part B: Engineering*[J], 2025, 300: 112459

- [39] Ananya L, Patel V K. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*[J], 2025, 47(3): 115
- [40] Pandey A, Kumar D, Goyal R *et al.* *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*[C]. London: Institute of Physics (IOP) Publishing, 2024: 012003
- [41] Wang Y F, Gang Y Y, Su L *et al.* *Water*[J], 2024, 16(19): 2764
- [42] Poudyal A, Neopane P H, Chitrakar S *et al.* *Journal of Physics: Conference Series*[J], 2024, 2854(1): 012085
- [43] Hong S, Wu Y P, Wang Q *et al.* *Surface Engineering*[J], 2013, 29(8): 588
- [44] Kumar R K, Kamaraj M, Seetharamu S *et al.* *Materials & Design*[J], 2017, 132: 79
- [45] Li Yong(李 勇), Liu Fuguang(刘福广), Chang Zhe(常 哲) *et al.* *Foundry*(铸造)[J], 2025, 74(3): 335
- [46] Wei Xinlong(魏新龙), Dai Fanchang(戴凡昌), Fu Erguang(付二广) *et al.* *Materials Reports*(材料导报)[J], 2024, 38(14): 201
- [47] Fan Shuaiqi(樊帅奇). *Study on Laser Cladding Ni60-WC Composite Coating Technology and Erosion Wear Properties of Q345 Steel*(Q345 钢表面激光熔覆 Ni60-WC 复合涂层工艺及冲蚀磨损性能的研究)[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023
- [48] Shang X J, Wang Z L, Wu X H *et al.* *Intermetallics*[J], 2023, 156: 107847
- [49] Zhang S Y, Han B, Zhang T M *et al.* *Intermetallics*[J], 2023, 159: 107939
- [50] Wei X L, Dai F C, Ban A L *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2023, 32(7): 2123
- [51] Sarpreet S, Anuj B, Parladd K *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2023, 115: 106326
- [52] Pan Xiaoming(潘晓明), Zhang Dawei(张大伟), Cao Yu(曹 宇) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2014, 43(24): 133
- [53] Davide V, Rocio C, Grace T *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2024, 476: 130282
- [54] Wu H, Zhang S, Zhang H *et al.* *Tribology International*[J], 2024, 193: 109405
- [55] Janicki D. *Optics and Laser Technology*[J], 2017, 94: 6
- [56] Zhang S Y, Han B, Li M Y *et al.* *Intermetallics*[J], 2021, 131: 107111
- [57] Sarpreet S, Parladd K, Deepak K G *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2021, 98: 105573
- [58] Lu P, Lewis S R, Fretwell S *et al.* *Wear*[J], 2019, 438: 203045
- [59] Li F F, Ma N N, Chen J *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2022, 58: 102994
- [60] Khodabakhshi A, Eslami A, Ashrafizadeh F *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2025, 56(6): 2005
- [61] Goyal K D, Singh S, Kumar P *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2025, 34: 110039
- [62] Gong Cheng(宫 成), Liu Ze(刘 泽), Ma Xiaoyan(马晓燕) *et al.* *Coal Mine Machinery*(煤矿机械)[J], 2022, 43(2): 47
- [63] He Qun(何 群), Guo Yan(郭 岩), Wu Shengfa(吴胜法) *et al.* *Physical Testing and Chemical Analysis*(理化检验)[J], 2025, 61(1): 15
- [64] Huang J, Zhu Z K, Shi W Q *et al.* *Heliyon*[J], 2024, 10(2): 24494
- [65] Fordyce I, Annasamyn M, Fabijanec D *et al.* *Wear*[J], 2020, 203: 410
- [66] Li Shoubiao(李守彪), Wan Mingqi(万明奇), Shen Liang(沈 亮) *et al.* *Equipment Environmental Engineering*(装备环境工程)[J], 2019, 16(4): 119
- [67] Ban Aolin(班傲林). *Research on Slurry Erosion Performance of Ceramic Particle Reinforced High Entropy Alloy Coating Prepared by Laser Cladding*(激光熔覆陶瓷颗粒增强高熵合金涂层泥沙冲蚀性能研究)[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022
- [68] Fang Haiyuan(方海渊), Zhang Ruijie(张睿杰), Cao Yantao(曹彦涛) *et al.* *Journal of Hydrodynamics (A)*(水动力学研究与进展 A 辑)[J], 2024, 39(5): 696
- [69] Li Linmin(李林敏), Ning Wanghui(宁望辉), Yang Shunying(杨顺银) *et al.* *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*(排灌机械工程学报)[J], 2024, 42(12): 1203
- [70] Li Z R, Pourquie M, Van Terwisga T. *Journal of Fluids Engineering*[J], 2014, 136(4): 041101
- [71] Wang Jian(王 健), Tian Wenhui(田文慧), Zhao Jiaqing(赵嘉卿) *et al.* *Journal of Ship Mechanics*(船舶力学)[J], 2020, 24(4): 536
- [72] Sun Xiaoyang(孙晓阳), Cao Xuewen(曹学文), Xie Zhenqiang(谢振强) *et al.* *Surface Technology*(表面技术)[J], 2020, 49(9): 274
- [73] Wang Y F, Yang Z G. *Wear*[J], 2008, 265(5-6): 871
- [74] Arabnejad H, Uddin H, Panda K *et al.* *Powder Technology*[J], 2021, 394: 1186
- [75] Sun Guoyong(孙国勇), Zhang Yijun(张逸军), Zhang Runqiang(张润强) *et al.* *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*(排灌机械工程学报)[J], 2022, 40(12): 1197
- [76] Deng D W, Li T S, Huang Z Y *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2022, 153: 108259
- [77] Zhu L D, Xue P S, Lan Q *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2021, 138: 106915

Research Progress on Anti-cavitation and Anti-erosion Performances of Laser Cladding Alloy Coatings

Zhang Zhe¹, Zhang Shuyan², Wang Tuo¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

(2. National Institute of Extremely-Weak Magnetic Field Infrastructure, Hangzhou 310051, China)

Abstract: Hydraulic machinery serves as the core equipment in hydropower stations and pumping stations, primarily encompassing turbines and pumps. Cavitation and erosion occurring on turbines stand out as the main causes of failure in flow-passing components, which have remained a critical challenge hindering the development of hydraulic machinery for over six decades. Numerous researchers have consistently found that applying a dense coating on the surface of the substrate material can effectively mitigate the damage to hydraulic machinery caused by cavitation and erosion. As an advanced surface modification technique, laser cladding has opened up new avenues for the industrial application of such coatings. By summarizing existing studies, this review comprehensively analyzed the mechanisms, influencing factors, and prediction methods of cavitation and erosion. It specifically summarized the impact of powder composition and operating conditions on the anti-cavitation and anti-erosion performances of laser cladding alloy coatings. Based on the above analysis, the review addressed the current drawbacks of materials in terms of anti-cavitation and anti-erosion performances, summarized the existing problems to date, and outlined the future development directions and trends of laser cladding alloy coatings. This work aimed to provide valuable references for the development of high-performance laser cladding coatings.

Key words: laser cladding; cavitation; erosion; alloy coating

Corresponding author: Wang Tuo, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, P. R. China, E-mail: wangtuo@xju.edu.cn; Zhang Shuyan, Ph. D., Associate Researcher, National Institute of Extremely-Weak Magnetic Field Infrastructure, Hangzhou 310051, P. R. China, E-mail: zsy19930524@sina.com