

激光金属沉积制备TiC/316L复合材料的组织及力学性能研究

李亚杰, 张爽, 秦凤明, 李亚菲

太原科技大学 山西太原 030024

摘要: 激光金属沉积 (LMD) 技术可同时实现输送粉末和聚焦激光能量, 材料成形率高, 能够显著提升材料性能和降低制造成本, 具有广泛的应用前景。采用LMD技术制备TiC含量为0%、0.5%、1%和2%的TiC/316L不锈钢复合材料, 研究了增强体含量对复合材料组织和力学性能的影响。结果表明: 通过金相技术观察样品微观结构发现, 熔池形貌呈鱼鳞状形貌, 中心区域主要为等轴晶粒, 熔池边缘区域主要以柱状晶粒为主, 相邻熔池之间的柱状晶粒呈外延生长关系, 等轴晶粒尺寸分布在10~50 μm , 而大多数柱状晶粒尺寸超过100 μm 。随着TiC颗粒含量的增加, 复合材料的抗拉强度显著提升, 当添加量达到1%时, 试样的抗拉强度由623MPa提高至679MPa, 且保持30.42%的良好伸长率; 然而, 当添加量增至2%时, 伸长率下降至5.1%, 组织中出现了TiC颗粒的团聚现象。

关键词: 激光金属沉积; TiC/316L复合材料; 组织结构; 拉伸性能

Microstructure and tensile properties of TiC/316L composites fabricated by laser metal deposition

LI Yajie, ZHANG Shuang, QIN Fengming, LI Yafei

Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract: Laser Metal Deposition (LMD) technology allows for simultaneous powder delivery and focused laser energy application, resulting in high material forming efficiency. This approach enhances material properties, reduces manufacturing costs, and shows wide application prospects. TiC/316L stainless steel composites with reinforcement contents of 0%, 0.5%, 1%, and 2% were fabricated using LMD technology to investigate the effects of reinforcement content on the microstructure and mechanical properties. Metallographic analysis revealed a fishscale morphology in the melt pool. Equiaxed grains dominated the central region, while columnar grains were prevalent at the edges. Columnar grains between adjacent melt pools exhibited epitaxial growth, with equiaxed grain sizes ranging from 10 μm to 50 μm , and most columnar grains exceeding 100 μm . With increasing TiC content, the tensile strength of the composites improved significantly. At 1% TiC, the tensile strength rose from 623MPa to 679MPa, maintaining an elongation of 30.42%. However, at 2% TiC, the elongation dropped to 5.1%, with agglomeration of TiC particles observed in the microstructure.

Keywords: laser metal deposition; TiC/316L composites; microstructure; tensile properties

基金项目: 中央引导地方科技发展资金资助 (YDZJSX20231A045); 上海热制造工程研究中心开放课题 (18DZ2253400)。

第一作者: 李亚杰, 副教授, 主要从事金属增材制造、金属材料成形理论及技术研究, E-mail: liyajie1207@126.com。

1 序言

随着我国科学技术和经济的迅速发展，不锈钢凭借其优异的性能，已成为应用最为广泛的工程材料之一。目前，全球不锈钢的年产量已超过4000万t^[1]，人们对不锈钢各方面性能的要求也日益提升。但是，传统工艺在不锈钢制造中普遍存在原材料利用率低、生产周期长、力学性能差，以及难以制备复杂精密零部件等问题。尤其是316L奥氏体不锈钢的强度与延展性的平衡发展，已成为众多科研人员的研究重点^[2, 3]。

316L不锈钢因其无磁性、高延展性、优良的焊接性能和生物相容性，被广泛应用于航空航天、石油化工、机械制造、医疗器械及食品加工等众多领域^[4]。然而，普通316L不锈钢存在强度和硬度较低的问题，且无法通过热处理调整材料组织和改善力学性能，限制了其更广泛的应用^[5]。随着先进制造技术和工艺的不断进步，研究人员致力于将具备高强度、高硬度、低密度和优良热稳定性的陶瓷颗粒添加至不锈钢基体中，以期使复合材料能够兼具基体材料和增强相材料的优异性能^[6, 7]。

激光金属沉积（LMD）技术是增材制造中定向能量沉积（DED）工艺的一种^[8, 9]。LMD通过高能量密度的激光作为热源，按照预定的轨迹将粉末材料或金属丝材进行熔融沉积，形成所需零部件^[10]。与传统制造技术相比，LMD具有制造成本低、加工周期短、零件致密性高且能够满足复杂结构要求的优势，已广泛应用于航空航天、模具制造、国防、工业和医学等诸多领域。

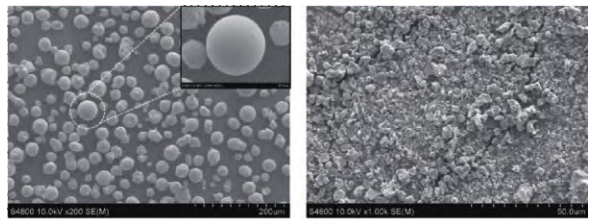
在综合对比分析了增强体颗粒的自身性能、增强效果及其与基体材料之间的相容性和化学稳定性，发现TiC颗粒的综合性能优良，能均匀分布于不锈钢基体中，且具有良好的化学相容性，在提高不锈钢基体强度的同时，还能增强其耐蚀性。本试验以不同含量的TiC颗粒和316L不锈钢粉末为原料，采用激光金属沉积技术制备颗粒增强复合材料，并深入研究其组织结构及力学性能。

2 试验部分

2.1 试验材料

本试验采用的原材料为商用气雾化316LASS金属粉末，购自浙江亚通新材料股份有限公司，粒径

为15~53μm，具体化学成分见表1。316L粉末流动性好、氧含量低、颗粒圆整度较好，如图1a所示。选择上海阿拉丁生化科技有限公司生产的非球形TiC颗粒作为增强相，平均粒径为2~4μm，部分物理性能参数见表2。TiC颗粒的形貌如图1b所示。在试验开始前，采用低能球磨工艺将316L粉末与TiC颗粒均匀混合，将混合粉末经干燥箱在120℃下充分烘干4h。试验用316L不锈钢圆柱体作为基板，尺寸为φ80mm×200mm，用砂纸打磨表面，并用酒精清洗，去除表面油污和杂质。



a) 316L粉末形态 b) TiC颗粒

图1 扫描电镜显微照片显示

表1 316L不锈钢粉末主要化学成分（质量分数）（%）

Cr	Ni	Mo	Si	Mn	C	Fe
17.93	12.01	2.46	0.46	0.012	0.0092	余量

表2 TiC颗粒的部分物理性能参数

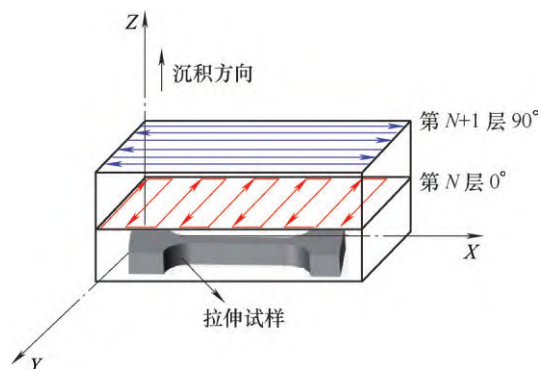
密度/（g/cm ³ ）	分子量	沸点/℃	熔点/℃
4.93	59.88	4820	3140

2.2 试验方法

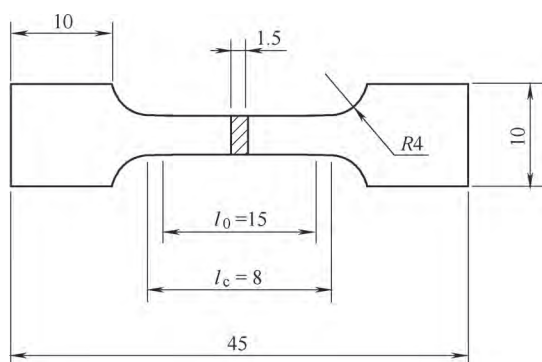
本试验采用商用RC-LMD4030（NC300，南京）同轴送粉设备打印复合材料，该系统配备最大功率为2kW的光纤激光器，激光光斑直径固定在2.5mm，激光头下沿距沉积平台12mm。纯度为99.999%的氩气用作载气和保护气。在两个相邻层之间采用了90°层间旋转的沉积策略（见图2a），搭接率为50%，选用统一的送粉气流量为4.8L/min，粉盘转速0.6r/min。试验前期优化工艺参数，确定激光功率为700W，扫描速度为420mm/min。不同添加量的复合粉末通过球磨工艺制得，试验制备了4种不同TiC含量的样品，分别为0%、0.5%、1%和2%（体积分数，下同）。

采用超景深光学显微镜（OM）对样品进行微观结构观察；采用场发射扫描电子显微镜（SEM）在10 kV的加速电压下观察样品的显微组织和断口形貌，并对试样进行能谱（EDS）分析；在室温下，

采用电子万能试验机以1mm/min的拉伸速度测试复合材料的拉伸性能，拉伸试样如图2b所示。



a) LMD制样的沉积策略、位置 and 方向



b) 拉伸试样尺寸示意

图2 激光金属沉积重要参数

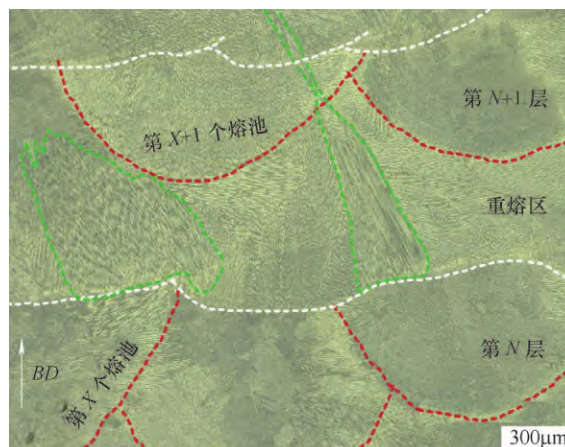
3 结果与讨论

3.1 组织结构分析

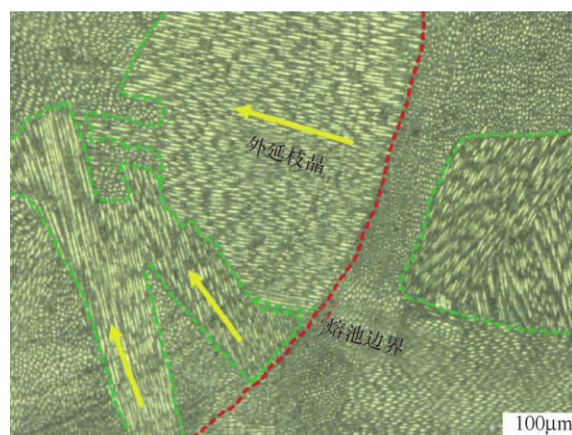
激光金属沉积在成形的过程中受粉末状态、激光功率、扫描速度、粉盘转速及沉积策略等多因素影响，这些因素将直接影响材料的微观组织和力学性能。本试验在明确单道沉积成形规律的基础上，选取最优参数打印块体材料，以保证打印效率和成形质量。

图3所示为复合材料的微观组织。通过金相观察发现，添加量对鱼鳞状的熔池形貌影响较小。由于逐层打印的沉积策略，熔池呈现规律排列，相邻道次之间存在较大程度的堆叠，保证了材料的致密性和冶金结合的质量。熔池内部主要由大量胞状晶粒组成，而熔池边界和重熔区以柱状晶粒为主。图3b中的黄色箭头标示了典型的晶粒外延生长，表明TiC的加入并未阻碍晶粒的外延生长。柱状枝晶外延生长的方向指向熔池中心，即沉积方向。在熔池内的胞状晶粒中，存在大量不规则六边形胞状亚结构

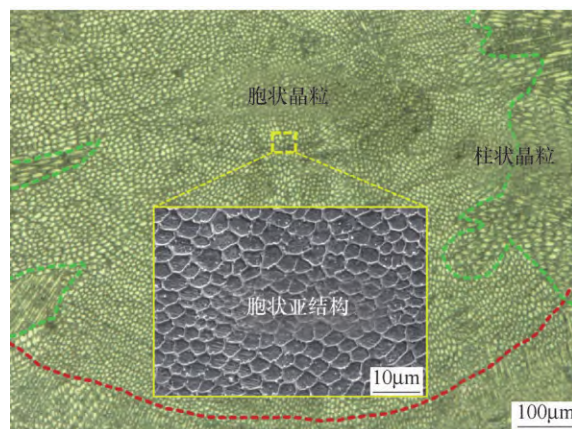
构，尺寸 $2\sim 5\mu\text{m}$ ，如图3c所示。这种结构的形成与LMD工艺下的温度梯度（G）和凝固速率（R）密切相关，两者的微小变化决定了凝固组织的形态和尺寸。



a) 沉积层、熔池及重熔区



b) 熔池边界柱状晶外延生长



c) 熔池中心胞状亚结构

图3 TiC/316L不锈钢复合材料的微观形貌

使用Image J软件对不同含量的TiC/316L不锈钢复合材料试样的晶粒尺寸进行统计，其平均晶粒

尺寸如图4所示。结果表明,随着TiC含量的增加,复合材料的平均晶粒尺寸逐渐减小,表明TiC的加入会导致显著的晶粒细化。等轴晶粒尺寸分布在10~50 μm ,而大多数柱状晶粒的尺寸超过100 μm 。值得注意的是,随着TiC含量的不断增加,柱状晶粒的数量在逐渐减少。分布在晶界处的微小TiC颗粒会阻碍柱状枝晶的生长,从而形成晶粒细化强化。

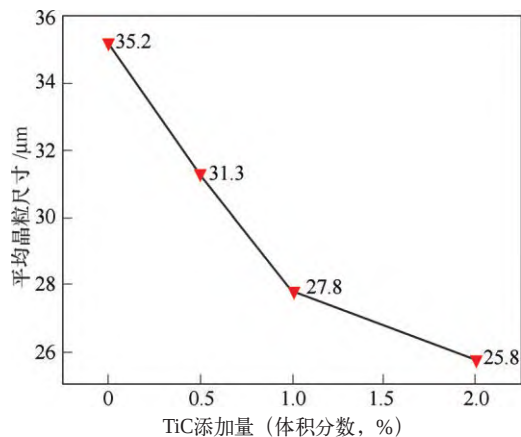


图4 TiC/316L不锈钢复合材料的平均晶粒尺寸

3.2 拉伸性能分析

图5所示为复合材料的拉伸性能测试结果。由图5可看出,随着TiC含量的增加,复合材料的抗拉强度不断提升,在TiC添加量为2%时,抗拉强度达到最大值689MPa,表明TiC颗粒对复合材料有显著的强化作用。同时,复合材料的伸长率则随着TiC含量的增加而不断降低,且在添加量为2%时降至最低,原因是增强相TiC颗粒在塑性变形时通过钉扎位错的方式阻碍其移动,在硬质相颗粒处形成高位错密度区域,导致裂纹的形成并终止塑性变形过程,因此过高的添加量会影响复合材料的塑性性能。

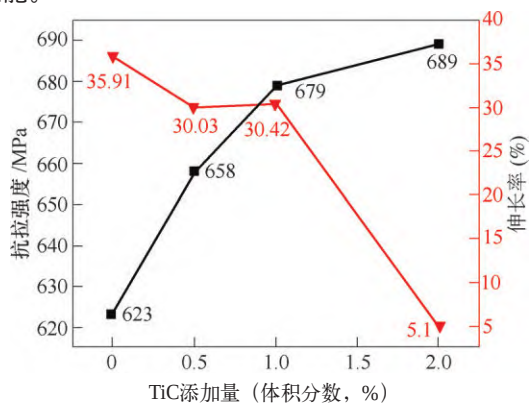
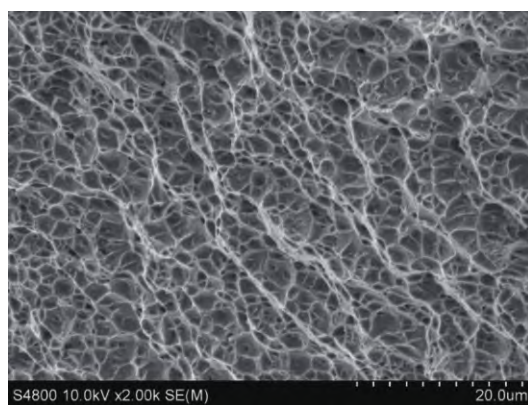
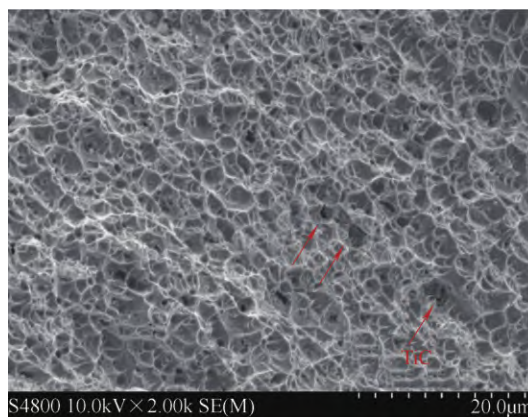


图5 TiC/316L 不锈钢复合材料的拉伸性能

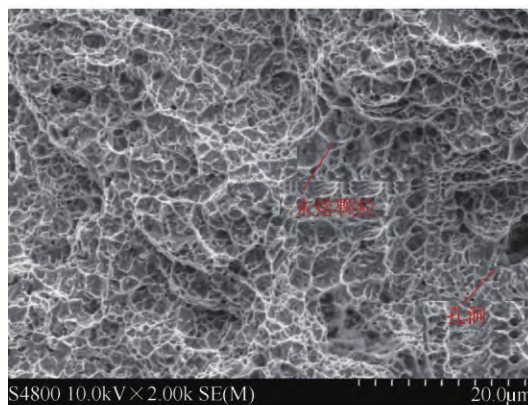
图6所示为复合材料拉伸断裂的SEM显微照片。由图6可观察到,复合材料的断裂表现为典型的凹坑韧性断裂。随着TiC含量的增加,凹痕数量增加且凹坑直径减小。断裂面存在许多细小的凹坑,且凹坑中存在TiC颗粒,因其结合较弱,所以拉伸时首先在此处断裂,且断裂后的TiC颗粒并没有脱黏基体,说明TiC颗粒与基体形成了良好的冶金结合。此外,在TiC含量为2%的样品断口中,观察到



a) 0.5%TiC



b) 1% TiC



c) 2% TiC

图6 TiC/316L 不锈钢复合材料的断口形貌

了未熔颗粒和孔洞缺陷, 这些缺陷导致了材料伸长率的进一步下降。

为了进一步提升LMD TiC/316L不锈钢复合材料的力学性能的稳定性,应兼顾添加量和伸长率的平衡,在高材料抗拉强度的基础上,还要考虑塑性性能的损失。

3.3 TiC分布情况

通过对复合材料进行EDS元素映射,发现不同的TiC颗粒添加量对元素的均匀分布没有显著影响,Fe、Cr、Ni、Mn等元素没有明显的偏析,这些元素的均匀扩散有利于熔覆层和基体的结合。根

据图7面扫结果进行定量分析, Ti含量与TiC颗粒的添加量几乎相同, 且分布较为均匀, 但TiC添加量为2%时发生了不同程度Ti元素聚集, 这些团聚态的TiC颗粒在拉伸变形过程中, 会在界面处形成高应力场, 降低界面结合能, 进而促进裂纹的萌生并加快断裂, 使材料的伸长率降低。

由图7d可看出,微小的TiC颗粒随机分布在胞状亚结构内部,在TiC添加量为0.5%试样的胞壁处发现析出物,点扫描发现富集Cr和Ni元素,而Ti含量(体积分数,下同)仅有0.15%。在TiC添加量为2%试样内发现了团聚的TiC大颗粒,点扫发现Ti含

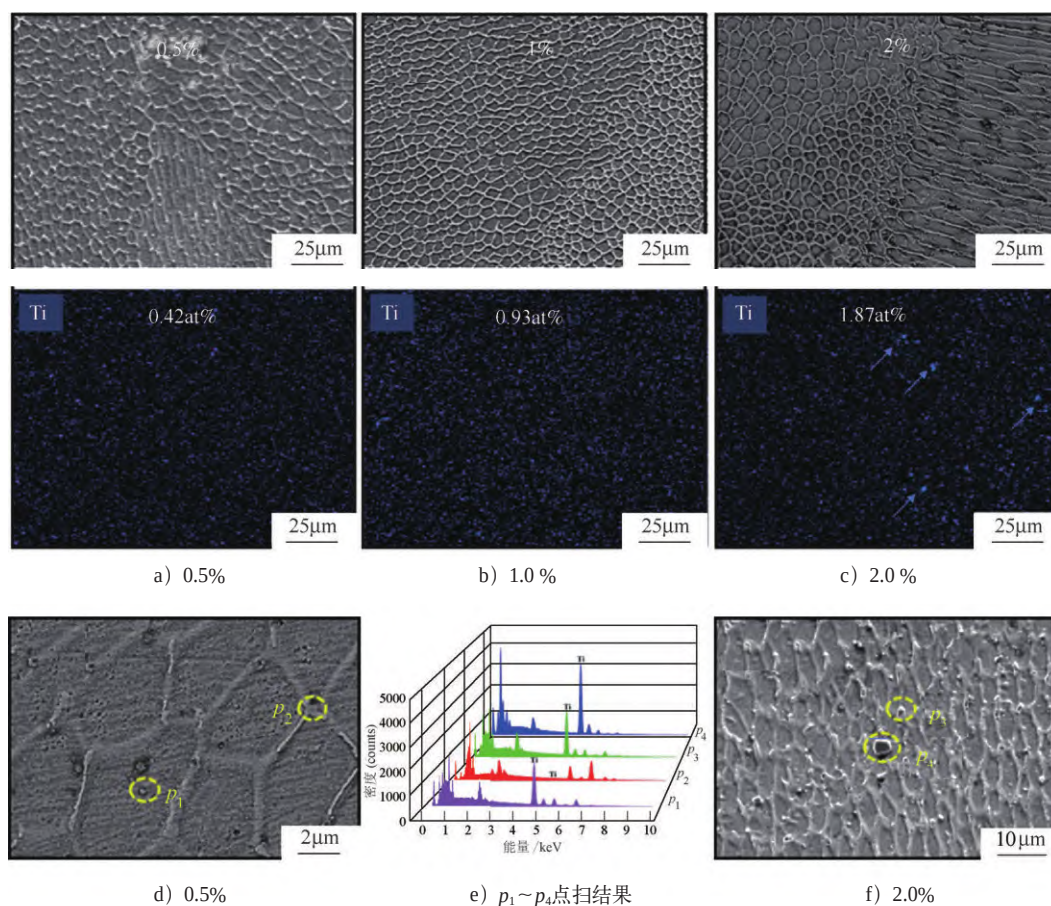


图7 EDS分析316L-TiC复合材料样品中的主要元素组成

量高达43.15%，且颗粒大小能达到2~3 μm 。

4 结束语

1) 金属激光沉积制备的复合材料样品熔池呈现鱼鳞状形貌, 中心区域以等轴晶粒为主, 边缘区域则以柱状晶粒为主, 相邻熔池的柱状晶粒呈现外延生长。等轴晶粒尺寸分布在 $10\sim 50\mu\text{m}$, 而大多数柱状晶粒尺寸超过 $100\mu\text{m}$ 。

2) 随着TiC颗粒含量的增加, 复合材料的抗拉强度显著提升。当TiC添加量达到1%时, 抗拉强度从623MPa提高至679MPa, 且保持了30.42%的良好伸长率; 然而, 当添加量增加至2%时, 伸长率下降至5.1%。

3) 通过EDS面扫描结果发现, Ti含量与TiC颗粒的添加量几乎相同, 且分布较为均匀, 而TiC添加量为2%时发生了不同程度Ti元素的聚集, 导致材

(下转第27页)



a) 池底水下0.3MPa环境金相组织

a) 池壁水下0.3MPa环境金相组织

图12 池壁和池底覆板金相组织 (10×)

5 结束语

本文针对核电厂乏燃料水池钢覆面缺陷结构特征,采用补板修复形式进行了局部干法焊接修复技术研究。研制了一套水下运载机器人+头部组件设备,经模拟结构试验后,验证了该设备相关功能,在多种压力条件下完成焊接测试,且焊后成形良好,经检测满足相关要求,为核电结构的水下局部干法焊接工程应用提供了技术基础和设计思路。

参考文献:

- [1] 韩雷刚, 钟启明, 陈国栋, 等. 局部干法水下焊接技术的发展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53 (7): 1252-1264.
- [2] 朱加雷. 核电厂检修局部干法自动水下焊接技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [3] TAKESHI O, YASUMITSU H, TOSHIHIRO O, et al. Development of maintenance technology with underwater TIG welding for spent fuel storage pool[J]. Welding International, 2009, 23 (5): 382-396.
- [4] HAN L G, WU X M, CHEN G D, et al. Local dry underwater welding of 304 stainless steel based on a microdrain cover[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 268: 47-53.
- [5] 焦向东, 朱加雷. 海洋工程水下焊接自动化技术应用现状及展望[J]. 金属加工(热加工), 2013 (2): 24-26, 32.
- [6] 沈相星, 程方杰, 邸新杰, 等. 水下局部干法焊接预热技术及专用排水罩的研制[J]. 焊接学报, 2018, 39 (3): 112-116, 134.

MW 20240713

(上接第21页)

料伸长率降低。

参考文献:

- [1] 世界不锈钢协会. 2022年前3季全球不锈钢粗钢同比下降5.1%[J]. 中国钨业, 2022, 46 (6): 40.
- [2] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [3] LI WQ, MENG LX, WANG SH, et al. Plastic deformation behavior and strengthening mechanism of SLM 316L reinforced by micro-TiC particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 884: 145557.
- [4] LI YJ, MA CHR, QIN FM, et al. The microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel prepared by forge and laser melting deposition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 870: 144820.
- [5] 蔺绍江, 熊惟皓, 瞿峻, 等. TiC/316L 复合材料的致密化和力学性能试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39 (1): 50-53.
- [6] 张洪涛, 陈晓秋, 尚峰, 等. TiC/316L 复合材料粉末注射成形工艺研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (10): 61-64.
- [7] JIAN Z, ZHONG Y P, SHI Y L, et al. Investigation of wear behavior of graphite coating on aluminum piston skirt of automobile engine [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 408-415.
- [8] SUN G F, SHEN X T, WANG Z D, et al. Laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel: Influence of feeding powder compositions on microstructure and mechanical properties[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 109: 71-83.
- [9] 王晓东, 刘奋成, 吕诗劼, 等. 超声振动对激光熔化沉积GH3536高温合金摩擦磨损性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2024 (8): 25-30.
- [10] ZHANG C H, ZHANG H, WU C L, et al. Multi-layer functional graded stainless steel fabricated by laser melting deposition[J]. Vacuum, 2017, 141: 181-187.

MW 20240505