

激光与光电子学进展

激光增材制造合金材料残余应力及应力腐蚀研究现状

张兴寿¹, 王勤英^{1*}, 郑淮北^{2,4}, 刘庭耀⁴, 董立谨¹, 西宇辰¹, 张进¹, 白树林³

¹西南石油大学新能源与材料学院, 四川 成都 610500;

²海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009;

³北京大学工学院, 北京 100871;

⁴成都先进金属材料产业技术研究院有限公司, 四川 成都 610303

摘要 激光增材制造技术广泛应用于石油化工、航空航天及海洋装备的制造及修复领域。然而,激光增材制造合金材料制备内部由于急热急冷造成的残余应力在苛刻腐蚀环境中服役时,易引起材料的重大应力腐蚀开裂风险。本文首先综述了激光增材制造合金材料中残余应力的产生机理。其次,总结了材料中残余应力的主要测定方法和消除方法。此外,概述了激光增材制造合金材料应力腐蚀开裂的试验方法以及主要机理。最后,基于激光增材制造合金材料残余应力和应力腐蚀开裂的研究现状,总结了该领域目前尚待解决的关键问题及未来的主要发展趋势。

关键词 激光技术; 激光增材制造; 残余应力; 应力测定; 应力腐蚀开裂; 腐蚀机理

中图分类号 V261.8

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1300002

Residual Stress and Stress Corrosion of Alloy Materials in Laser Additive Manufacturing

Zhang Xingshou¹, Wang Qinying^{1*}, Zheng Huaibei^{2,4}, Liu Tingyao⁴, Dong Lijin¹,
Xi Yuchen¹, Zhang Jin¹, Bai Shulin³

¹School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;

²State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application,
Anshan 114009, Liaoning, China;

³College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

⁴Chengdu Advanced Metal Materials Industry Technology Research Institute Corporation,
Chengdu 610303, Sichuan, China

Abstract Laser additive manufacturing is widely used in the manufacturing and repairing of petrochemical, aerospace, and marine equipment. However, the residual stress caused by the rapid heating and cooling in the preparation of alloy materials via laser additive manufacturing likely poses a major risk of stress corrosion cracking of the material in harsh environments. This study first reviews the mechanism of residual stress in alloy materials produced via laser additive manufacturing. Second, the main measurement and elimination methods of residual stress in materials are summarized. In addition, the test methods and the mechanism of stress corrosion cracking in alloy materials caused by laser additive manufacturing are summarized. Finally, based on the research status of residual stress and stress corrosion cracking of alloy materials in laser additive manufacturing, the key problems that need to be solved in this field and future development trends are summarized.

Key words laser technique; laser additive manufacturing; residual stress; stress testing; stress corrosion cracking; corrosion mechanism

收稿日期: 2021-06-29; 修回日期: 2021-07-27; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(52174007, 51801167)

通信作者: *wangqy0401@126.com

1 引 言

激光增材制造是将粉体原料逐层堆叠,形成实体工件的技术。一般具有较高的功率、较低的稀释率、较优的界面和较小的热影响区等优点^[1]。然而,激光增材制造技术也存在一定不足,主要表现在由于温度梯度导致材料内部较高的残余应力方面。而残余应力是材料在无外部因素作用时,材料内部平衡存在的应力^[2-4]。当外部应力与残余应力之和大于临界应力值时,激光增材制造合金材料将发生应力腐蚀开裂(SCC)。其中应力腐蚀开裂是指承受应力的材料在腐蚀介质中由于裂纹的扩展而发生失效破坏^[5]。随着金属表面技术的不断发展,激光增材制造技术受到广泛关注。其中增材制造方法因具有能够制造复杂产品,且生产周期短,以及产品多样化不增加成本等优势而受到广大学者的关注。目前已发展了梯度材料、不锈钢材料和合金材料^[6-9]。通过该方法制备的合金材料可广泛应用在石油化工、航空航天和海洋装备等的制造及修复领域,其中在石油化工领域该技术主要用于聚晶金刚石复合片(PDC)钻头模具制造、井下无磁外筒部件的再修复和井下复杂结构的三维(3D)打印。然而,激光增材制造过程中,局部的热量输入会产生不均匀的温度场,进而导致材料内部存在残余应力,残余应力对材料的静载荷强度和抗应力腐蚀开裂性能都有影响,而较大的残余应力甚至导致裂纹缺陷的产生^[10]。本文主要综述了近年来激光增材制造合金材料残余应力和应力腐蚀的研究成果,并对未来的发展研究做出了展望。

2 激光增材制造材料残余应力的研究现状

2.1 残余应力的产生

激光增材制造过程中由于温度不均匀造成局部塑性变形,从而在激光增材制造合金材料内部产生了残余应力^[11]。当移动热源与激光增材制造合金材料形成的熔池经历快速冷却时,激光增材制造合金材料不同部位收缩和膨胀趋势不一致^[12]。因此,激光增材制造合金材料产生了残余应力。Inconel 718 镍基高温合金用于制作钻头、接箍等部件,广泛应用于石油输送和石油钻采等领域,其中 Liu 等^[13]研究了 Inconel 718 镍基高温合金激光快速成型后的组织和残余应力,发现激光快速成型后材料内部产生了残余应力。通过进一步分析发现产生残余应力的原因是快速加热和冷却。另外,在激光增材制造过程中不同部位的温度差异造成物相变化不一致,进而产生了残余应力。目前,王梦瑶等^[14]对选区激光熔化 Al-Si 合金裂纹进行研究,发现材料成形过程中的温度梯度导致了残余应力,进而使 Al-Si 合金在应力集中处产生裂纹。另外, Pilloz 等^[15]发现激光熔覆引起的热梯度会导致熔覆层产生残余应

力,并且热收缩效应和受热区蠕变会导致熔覆层产生开裂。然而,赵忠兴等^[16]分析了激光熔化处理球墨铸铁的残余应力,发现球墨铸铁表面残余应力的产生是热梯度和相转变综合作用的结果。

综上所述,激光增材制造合金材料残余应力的产生原因是:1) 局部热输入引起材料内部温度分布不均匀,使熔池与熔池边缘之间产生束缚,进而在激光增材制造合金材料内部产生了残余应力。2) 激光增材制造过程的冷却速率不一致,使熔池在凝固过程中相变的体积发生变化导致不均匀塑性变形,进而激光增材制造合金材料内部产生了残余应力。

2.2 残余应力的测定方法

国内外测试激光增材制造合金材料表面残余应力的研究较多。目前,残余应力的测量由机械法和物理法两种^[17]。机械法的原理是使用机械的方式进行应力释放,并通过材料的屈服强度、弹性模量、泊松比等参量对释放的应力大小进行确定^[18]。物理法则是通过对晶格应力状态进行检测,从而得到残余应力的大小^[19]。

机械法包括钻孔法、纳米压痕法等。其中钻孔法是对钻孔附近表面的局部区域应变进行测量。该方法 Mathar^[20]于 1934 年提出,其通过使用机械引伸仪测试得到钻孔处的残余主应力。残余应力的计算公式表示为

$$\sigma_{\max} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{4\bar{A}} \pm \frac{\sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2}}{4\bar{B}}, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \right], \quad (2)$$

式中 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 是应变数; σ_{\max} 是残余主应力; β 是残余主应力 σ_{\max} 与应变数 ϵ_1 之间的夹角; \bar{A} 和 \bar{B} 是释放系数。该方法是一项比较成熟的技术,已在激光增材制造合金材料表面残余应力的测定中受到关注。其中傅卫等^[21]采用钻孔法分析了激光熔覆 Co 基涂层的残余应力,发现垂直激光扫描方向的残余应力小于平行激光扫描方向的残余应力且两种方式产生的残余应力均为拉应力。另外,孙洪吉等^[22]采用激光增材制造技术制备沉积件,并用钻孔法对扫描面的残余应力进行测量,得出基材与沉积层相交界面存在残余压应力,其余区域是残余拉应力。上述学者使用钻孔法测试了激光增材制造合金材料的二维残余应力。但是,无法给出激光增材制造合金材料的三维残余应力,因而赵宇辉等^[23]改进了钻孔法,改进的钻孔法是以钻孔法为基础,在相同的工艺条件下,采用激光增材制造技术打印两块相同的试样,并从两个方向钻孔测试残余应力,将测量的结果进行分析组合,最终得到工件的三维残余应力。

经过研究发现,钻孔法具有精度高、易于现场操作等优点。但是,钻孔易引起材料的损伤,而纳米压痕法对材料的损害极小,有学者通过有限元分析发现该方

法具有较高的准确性,并且广泛用来描述材料的机械性能^[24]。基于纳米压痕技术,Suresh等^[25]发现了一种材料表面残余应力测试的方法。当增材制造材料中存在残余拉应力时,载荷大小恒定和压痕深度恒定条件下,计算残余应力分别为

$$\sigma = H \left(1 - \frac{h_0^2}{h^2} \right), \quad (3)$$

$$\sigma = H \left(\frac{A_0}{A} - 1 \right). \quad (4)$$

当增材制造材料内部存在残余压应力时,载荷大小恒定和压痕深度恒定条件下,计算残余应力分别为

$$\sigma = \frac{H}{\sin \alpha} \left(\frac{h_0^2}{h^2} - 1 \right), \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{H}{\sin \alpha} \left(1 - \frac{A_0}{A} \right), \quad (6)$$

式中: H 代表材料的硬度; h_0 和 h 代表无残余应力和存在残余应力时的压痕深度; A_0 和 A 代表无残余应力和存在残余应力时的压痕面积; α 代表锥形压头与接触材料之间的夹角。该方法已应用于激光增材制造合金材料残余应力的测试。Tao等^[26]采用纳米压痕法测量了TiNi/Ti2Ni基激光熔覆层残余应力的大小,发现随着环境温度的升高,激光熔覆层中的平均残余应力逐渐下降。另外,来佑彬等^[27]利用纳米压痕法测量了激光增材制造TA15钛合金材料的残余应力,发现了激光增材制造试样的残余应力明显小于试样的屈服强度。该方法也可以应用于等离子喷涂涂层残余应力的测试。Zhu等^[28]通过纳米压痕法确定等离子体喷射FeCrBSi涂层的残余应力,发现FeCrBSi涂层中的残余应力是753 MPa。另外,王海斗等^[29]采用纳米压痕法分析了铁基涂层等离子喷涂后的残余应力,对比分析铁基涂层的载荷-位移曲线,发现铁基涂层表面存在残余拉应力。纳米压痕法具有很高的分辨率,在不剥离涂层与基底材料的情况下,直接得到涂层材料的许多力学性质。因此,纳米压痕法属于无损或微损的方法且操作简单方便快捷。综上所述,机械法是测量材料内部残余应力的方法之一,其实质是采用不同的释放方法对材料内部的应变进行测试。

物理法包括X射线衍射法、中子衍射法等,其中X射线衍射法具有较高的可靠性。经历一百余年的发展,X射线衍射法在材料科学与工程中得到了广泛应用,其原理是材料内部残余内应力的存在使晶面间距发生改变,并且产生了衍射峰的偏移,而偏移的距离与残余内应力的大小有关^[30]。X射线应力测定如图1^[31]所示,残余应力的计算公式^[32]为

$$\sigma_\psi = - \frac{E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \frac{\pi}{180^\circ} \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2 \psi)}, \quad (7)$$

式中: E 、 ν 代表材料的弹性模量和泊松比; θ_0 、 θ 代表晶面无应力和有应力的衍射角; ψ 代表材料表面法线与

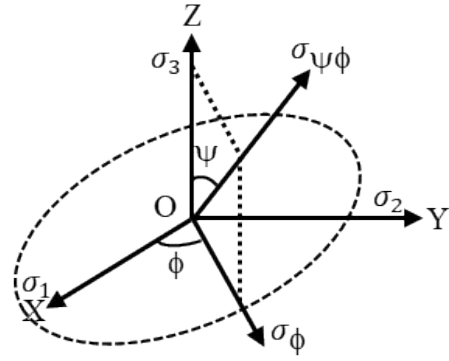


图1 涂层中的应力和应变系统^[31]
Fig. 1 Stress and strain system in coating^[31]

衍射晶面法线的夹角。X射线衍射法可以测量激光增材制造合金材料残余应力大小。刘延辉等^[33]通过X射线衍射法测量了激光增材制造TC4钛合金表面的残余内应力,发现残余应力的最小值在工件顶面的中心位置,最大值在工件侧面的中心位置。此外,孙杰等^[34]通过X射线衍射法和电解腐蚀法对Inconel718熔覆层进行深度方向的残余应力测试,发现电磁辅助激光熔化沉积能较好地改善材料内部残余应力。此外,也有研究者测量了不锈钢基底激光熔覆Ni60A的残余应力,发现熔覆层表面的残余正应力大于残余切应力^[35]。该方法也可以研究激光增材制造合金材料表面残余应力分布。章媛洁等^[36]采用X射线衍射法测试了激光选区熔化增材AISI 420不锈钢的残余应力,发现增材AISI420不锈钢水平方向的残余应力大幅降低,并且残余应力由压应力变为拉应力。与此同时,朱允明等^[37]研究了45号钢基底熔覆Ni基材料后的残余应力分布,发现激光熔凝处理后熔覆层处于拉应力状态。为了进一步研究基底到熔覆层的应力分布,Suárez等^[38]在304不锈钢表面激光熔覆Co合金,通过X射线衍射法测量基底到熔覆层的应力分布,另外,张净宜等^[39]采用X射线衍射法研究了不同Ni含量铁基激光熔覆层的残余应力分布特征,发现随着Ni含量的降低,铁基激光熔覆层的残余应力从拉应力转变为压应力。经过研究发现,X射线衍射法具有测试速度快、数据重现性强、测量精度高等优点^[40]。但是,X射线法使用的测试仪器十分昂贵且对激光增材制造合金材料的穿透性十分有限。

随着中子衍射技术的发展,国内外开始采用中子衍射法分析激光增材制造合金材料的残余应力分布。中子衍射法的原理与X射线衍射法的原理基本一致,都是测量晶格之间的距离,根据晶格距离的变化分析激光增材制造合金材料的残余应力分布^[41]。李峻宏等^[42]通过中子衍射法分析了激光成形低碳钢残余应力分布,发现激光扫描路径的左右残余应力场对称分布,扫描路径的正下方纵向应力分量为拉应力。此外,为了研究不同熔覆层和基底界面的残余应力分布,

Köhler 等^[43]使用中子衍射法测试了激光熔层 X5CrNi18-10 和热处理钢 42CrMo4 的残余应力,发现在熔覆层和基底的界面下方,前者显示压应力,后者显示拉应力。此外, Cottam 等^[44]通过中子衍射法测量 AA7075 粉末熔覆层和基底界面的残余应力,发现界

面处为拉应力。以上研究发现中子衍射法能测试激光增材制造合金材料的三维应力分布。目前,激光增材制造合金材料残余应力的测试方法有很多并且各种测试方法的优缺点各有差异。表 1 总结了激光增材制造合金材料残余应力测试方法的优缺点。

表 1 残余应力测试方法比较
Table 1 Comparison of residual stress testing methods

| Method | Technology | Advantage | Disadvantage |
|-------------------|----------------------------|--|--|
| Mechanical method | Drilling method | Simple principle, cheap equipment, easy to operate | Damage to the material, measurement accuracy is not high |
| | Nanoindentation method | High resolution, make the material deform in a very small range without destroying the structural integrity of the material, high measurement efficiency | Measurement result is not unique, the measurement accuracy is not high |
| Physical method | X-ray diffraction method | The measurement result is more accurate, the material is not damaged, the strain field distribution on the surface of the material can be measured | Can only measure near-surface information, testing instruments are expensive |
| | Neutron diffraction method | Large penetration depth, three-dimensional stress field distribution can be obtained | Experimental equipment is expensive |

2.3 残余应力的消除

合理的处理方法可以有效地改善激光增材制造合金材料的残余应力,目前主要包含预热处理、工艺参数的改善和超声冲击或震荡等^[45-46]。表 2 总结了激光熔覆层改善残余应力的主要方法。对激光增材制造的基底材料进行预热可以有效改善熔覆过程中的温度梯度,从而降低内应力^[47]。1989 年 Cooper 等^[48]采用 Inconel625 合金为基底, WC 为熔覆层,研究了预热处理对熔覆层残余应力的影响,发现适度的预热处理可以消除熔覆层的热应力。另外, Buchbinder 等^[49]研究了预热处理后选区激光熔覆试样的残余应力状况,发现预热处理可以避免部件的变形并且也可以改善试样的内应力。在激光增材制造过程中,工艺参量往往对材料内部的残余应力有一定影响。龚丞等^[50]发现适当的送粉量有利于降低激光增材制造熔覆层的残余应

力,而选择合适的扫描速率也可以有效降低激光增材制造熔覆层的残余应力。另外,孙洪吉等^[22]研究了熔覆工艺路径对激光熔覆层残余应力的影响,发现层与层之间垂直交叉的熔覆工艺可以降低熔覆层的残余应力。传统消除激光增材制造合金材料残余应力的措施主要以热处理为主。然而,对于大型构件来说热处理操作很难完成。因此,李伟等^[51]采用表面冲击处理来改善大型构件的残余应力。此外,闫世兴等^[52]对表面冲击处理后的 Fe314 合金熔覆层进行分析,发现 Fe314 合金熔覆层发生了微塑性变形,从而有效地改善了熔覆层的残余应力。为了研究冲击处理后激光熔覆层的残余应力变化,张颖等^[53]研究了冲击处理后激光熔覆层的应力场变化,发现冲击处理后激光熔覆层的残余应力明显降低并且局部区域的残余内应力全部消除。

表 2 激光熔覆层改善残余应力的主要方法
Table 2 Main method of laser cladding layer to improve residual stress

| Method | Scope of application |
|-------------------------------|--|
| Preheating | Suitable for key components of high-value and high-precision equipment, not suitable for industrialized mass-produced products |
| Ultrasonic shock or vibration | Suitable for improving small size and relatively large size components |
| Laser process control | Suitable for laser additive manufacturing of workpieces and laser cladding layers |

3 激光增材制造合金材料的应力腐蚀研究现状

3.1 应力腐蚀的试验方法

激光增材制造合金材料内部易形成残余应力,在苛刻的环境下使用会有应力腐蚀开裂的风险,为了明确应力腐蚀开裂机理,已发展了多种应力腐蚀的方法^[54]。其中恒载荷法是施加不变的载荷给试样进而完

成应力腐蚀试验的方法^[55]。该方法初始应力明确、试验方法简单、对试样类型和尺寸无限制,因此,受到了许多学者的关注。为了明确应力腐蚀开裂的机理, Nikulin 等^[56]采用恒载荷的方法研究了管道壁熔覆层的应力腐蚀特征,发现熔覆层在碘的腐蚀介质中出现应力腐蚀开裂,其原理是晶粒的破裂和晶粒间的化学溶解。另外,为了研究熔覆层的硫化氢应力腐蚀,有学者针对当前石油化工生产中的硫化氢应力腐蚀开裂问

题,采用恒载荷拉伸应力腐蚀试验测定了试样的断裂时间并用以表征热喷涂试样抗应力腐蚀开裂性能^[57]。而为了研究激光增材制造合金材料的应力腐蚀裂纹扩展,Lou等^[58]通过恒载荷的方法,分析了激光增材制造316L不锈钢的裂纹扩展方式,发现经过适当的高温退火后增材制造316L不锈钢的应力腐蚀裂纹扩展与锻造后的结构类似。虽然,恒载荷的试验方法简单、对试样类型和尺寸无限制,但是,裂纹扩展减小了试样的有效承载面积,最终导致试样过快断裂。因此,该方法无法获得裂纹扩展速率等信息。

恒位移法是通过加载使试样发生变形,并用框架或螺栓维持这种变形,从而保证恒定的变形量^[59]。这种加载方式是用来模拟增材制造合金材料的加工制造应力状态,可以对试样进行三点弯曲、四点弯曲以及U形弯曲,常用来分析增材制造合金材料在给定环境下的应力腐蚀破坏敏感性。由于恒位移法的装置简单而且易于实现。所以,恒位移法可以应用在不同的高温高压环境中。另外,该方法可以对多个试样同时进行测试。魏仁超等^[60]采用恒位移法测定了镍基激光熔覆层的应力腐蚀特性,发现激光熔覆层的临界应力高于火焰重熔层的临界应力。目前,恒位移法的应力状态

尚不明确,不能定量研究材料的应力腐蚀敏感性。

慢应变速率试验(SSRT)是以相当缓慢的速率给试样加载,进而强化应变状态来加速应力腐蚀开裂^[61]。缓慢加载的原因是让腐蚀介质与加载材料充分反应。因此,慢应变速率的值对试验极其重要,太快或者太慢均不适宜。如果过快,则会导致试样表面与腐蚀介质无法充分反应,而过慢则影响试验效率。为了在较短时间内研究激光增材制造合金材料的应力腐蚀敏感性。贺星等^[62]采用激光熔覆技术制备了Al-Ni-TiC-CeO₂涂层,通过慢应变速率法研究了基体和熔覆层的应力腐蚀敏感性,发现基体的应力腐蚀敏感性为35.01%,激光熔覆层的应力腐蚀敏感性为17.69%。因此,激光熔覆层的存在降低了材料的应力腐蚀开裂倾向。另外,为了分析涂层应力腐蚀开裂的断口形貌,章岳等^[63]采用KSM慢应变速率试验机研究了921高强度钢在锌、铝涂层保护下的应力腐蚀特征,发现铝涂层是韧性断裂,并且又有大量韧窝存在。而锌耦合试样的断口不但有平坦的解理晶面而且可以观察到准解离断裂。该方法虽然试验周期短,但是确定应变速率较难。因此,研究者需要依据自己的试验方案找到合适的应力腐蚀试验方法。表3对比了各应力腐蚀方法的优缺点。

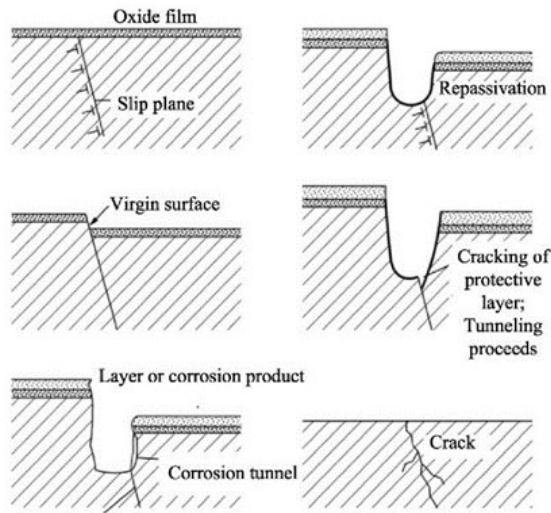
表3 应力腐蚀试验方法的比较
Table 3 Comparison of stress corrosion testing methods

| Method | Evaluation index | Advantage | Disadvantage | Applicability |
|------------------------------|---|--|--|-------------------------------|
| Constant load method | Time to break, percentage of breaking elongation | Initial stress determination, simple test method, no restriction on sample type and size | Unable to obtain crack growth information | Cladding layer, bulk material |
| Constant displacement method | Time to break | Device is simple and easy to implement, and can obtain crack growth parameters | Unclear stress state, long test period | Cladding layer, bulk material |
| Slow strain rate method | Time to break, percentage of breaking elongation, section shrinkage | Short test period, high sensitivity to stress corrosion cracking | Complex equipment and strain rate have a significant impact on the results | Cladding layer, bulk material |

3.2 激光增材制造合金材料的应力腐蚀机理

应力腐蚀机理的研究是应力腐蚀研究的核心问题,研究者从未停止对应力腐蚀机理的探讨。目前,已经有许多理论被提出,并且从不同方面去阐述应力腐蚀开裂的过程,其中包括滑移溶解模型^[64]、裂尖氧化溶解模型^[65]以及由于氢作用的模型^[66]。其中滑移溶解模型应力腐蚀开裂的过程主要是由于增材制造合金材料表面存在一层致密的钝化膜,当材料受到应力的作用下,增材制造合金材料内部的位错运动到表面时会形成滑移台阶,滑移台阶的存在会使钝化膜破裂从而露出新鲜的基底。因为基底的平衡电极电位低于膜处的平衡电极电位,所以基底处易做阳极,当钝化膜的溶解速率比再钝化速率低时,增材制造合金材料的裂尖会形成新的钝化膜,从而导致裂纹尖端应力集中,再钝化膜通过位错运动再一次破裂,进而产生了裂纹的扩展。

裂尖氧化溶解模型主要是由于增材制造合金材料中发生的沿晶或穿晶开裂,先前形成的氧化膜发生局部开裂,从而导致不连续裂纹的产生。其中增材制造合金材料中氧化膜破裂易形成点蚀,在膜致应力和外力的共同作用下,点蚀底部的氧化膜发生局部开裂,此时在裂尖的晶界氧化膜中出现不连续的微裂纹。氢作用的模型主要是由于吸附的氢原子可以进入增材制造合金材料中,并且氢原子可能会扩散到晶界或位错的位置,当达到局部氢含量,应力应变达到临界值时,就会在增材制造合金材料中出现裂纹。而材料应力腐蚀已有很多机理。图2^[67]是应力腐蚀的膜破裂理论机制,当有钝化膜的镍基激光熔覆层在稀的氯化物介质中且材料受到一定的拉应力作用时,材料内部的位错在滑移面上发生滑移,而位错滑移到表面形成滑移台阶露出无保护的金属,由于无保护的金属易发生腐蚀,导致金属

图 2 膜破裂理论机制^[67]Fig. 2 Mechanism of the theory of film breaking^[67]

溶解了相对较大的区域,在此过程中形成了“隧洞”。当“隧洞”表面形成保护膜时,材料的腐蚀受到抑制。但是在力的作用下,位错将发生滑移再次形成滑移台阶并产生无保护区,而无保护区将发生腐蚀又一次形成“隧洞”。周而复始,形成了裂纹的扩展。林成福等^[68]研究了熔覆层试样在海水中的腐蚀特性,发现熔覆层发生缝隙腐蚀,空隙部位发生溶解,增加了腐蚀介质的连通渠道,加速空隙处的腐蚀。结果导致颗粒间结合力下降,熔覆层变脆。同时,缝隙处急剧增多的腐蚀产物使熔覆层内部产生膨胀应力,并且膨胀应力与残余应力共同作用使熔覆层出现鼓泡。另外, Nikulin 等^[56]研究了铝熔覆层应力腐蚀开裂,发现铝熔覆层应力腐蚀开裂是由于晶粒破裂的吸附和晶界的化学溶解。为了进一步研究材料的应力腐蚀机理, Galvele^[69]发现材料表面的原子活性提高是由于应力和腐蚀介质的存在并且过饱和空位也出现在表面,由于过饱和空位的存在使得裂纹发生扩展。此外,腐蚀介质与材料发生反应在表面形成低熔点的化合物从而促进空位的产生。Sieradzki 等^[70]通过理论计算发现 Galvele 的低熔点化合物是不存在的。Sieradzki 等通过研究发现材料表面钝化膜的存在阻止了裂纹尖端处位错的发射,裂纹尖端位错无法发射导致材料变脆。综上所述,阳极溶解型应力腐蚀是外应力以及增材制造合金材料在介质中发生化学反应溶解共同作用的结果。而氢致开裂型应力腐蚀则是由于氢原子扩散进入基体中使增材制造合金材料基体脆性升高,继而在应力作用下产生脆性裂纹,其中阳极溶解型应力腐蚀和氢致开裂型应力腐蚀并不是孤立存在的,这两类机理往往处于并存竞争关系。

3.3 激光增材制造合金材料应力腐蚀开裂的消除

应力腐蚀开裂发生没有任何迹象,通常会造成严重后果。因此,有必要进一步了解激光增材制造合金

材料抗应力腐蚀开裂。残余应力的存在是诱发应力腐蚀开裂的原因,上文已论述消除残余应力的方法,此处不再论述。目前,控制应力腐蚀的方法包括应力、环境和材料三方面。首先应力方面,采取热处理工艺改善材料中重位点阵晶界组分从而有效控制应力腐蚀。Liu 等^[71]通过塑性变形-高温退火方法,将材料中的低指数重位点阵晶界组分提高至 75% 以上,明显提升了合金在高温水中的抗应力腐蚀性能。其次环境方面,根据前人研究发现,应力腐蚀开裂只在特定环境中对特定材料才产生应力腐蚀。例如,低碳钢会在氢氧化钠水溶液中发生应力腐蚀开裂。因此在环境一定时,为了降低应力腐蚀开裂的风险可以替换使用其他材料或者在材料表面熔覆一层能抑制该环境下发生应力腐蚀开裂的材料。最后材料方面,在已定环境介质条件下应尽量选择在该环境中尚未发生过应力腐蚀破裂的材料。另外,还应通过试验选用研制成功的新型耐应力腐蚀的材料品种。向超等^[72]研究了几种高熵合金在核电高温高压水中的应力腐蚀,发现高熵合金材料有较好的耐应力腐蚀能力。目前仍有其他的应力腐蚀开裂的消除方法,其中 Xing 等^[73]研究了超声喷丸处理后选区激光熔覆制成的铝合金试样的抗应力腐蚀性能,发现超声喷丸处理能够提高试样表面的硬度并且将试样表面的拉应力转变为压应力。另外,超声喷丸处理降低了试样的孔隙率,提高了材料的密度,从而改善了试样的抗应力腐蚀性能。此外,在材料的设计方面要尽量避免和减少局部应力集中,如采用流线型设计,选用较大的曲率半径,将缝合孔置于低应力和压应力区,防止可能造成腐蚀液残留的死角并且尽量避免缝隙。

4 结束语

激光增材制造合金技术(3D 打印)是一种将合金材料逐层构建的高新技术^[74-75]。在激光增材制造过程中,激光增材制造合金材料容易产生残余应力。目前,很多学者也研究了激光增材制造合金材料的残余应力分布和应力腐蚀开裂机理。但是,仍有很多问题未解决,包括:1) 大型部件在熔覆过程中由于刚性拘束较大,会产生残余应力。当大型部件应力过大时会发生变形和开裂,因此,目前大型部件残余应力的控制还有待研究。2) 激光增材制造的质量控制标准还未建立,所以需要加快制定激光增材制造残余应力的标准。3) 目前,对熔覆层的裂纹扩展缺乏微观分析且难以取得符合现场应力腐蚀开裂实际规律的裂纹扩展速率数据。因此,未来需要在微纳米尺度研究应力腐蚀开裂的裂纹扩展。4) 目前,还没有一种能够彻底消除应力腐蚀的方法,所以寻找有效、可靠的抑制应力腐蚀的措施仍然是研究重点。5) 目前,对激光增材制造合金材料残余应力的产生、测试方法和数值模拟研究较多。但是,激光增材制造合金材料残余应力与应力腐蚀失效的关联性研究仍是不清楚的,并且对于应力腐蚀机

理的研究至今还没有统一的表述。因此,研究激光增材制造合金材料的应力腐蚀机理仍然是一项重要任务。

参 考 文 献

- [1] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1-11.
Zhang J C, Shi S H, Gong Y Q, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [2] 杜畅, 张津, 连勇, 等. 激光增材制造残余应力研究现状[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 200-207.
Du C, Zhang J, Lian Y, et al. Research progress on residual stress in laser additive manufacturing[J]. Surface Technology, 2019, 48(1): 200-207.
- [3] 樊鹏, 潘家腾, 葛一铭, 等. 激光增材制造 TC4/TC11 钛合金梯度材料残余应力的有限元分析[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802012.
Fan P, Pan J T, Ge Y M, et al. Finite element analysis of residual stress in TC4/TC11 titanium alloy gradient material produced by laser additive manufacturing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802012.
- [4] 郭相忠, 刘伟, 范佳斐, 等. 完全熔透和部分熔透搭接激光焊接残余应力和变形对比[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0502005.
Guo X Z, Liu W, Fan J F. A comparative study on welding residual stress and deformation in laser welded lap joint of full and partial penetration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0502005.
- [5] Parkins R N. Stress corrosion cracking[M]//Latanision R M, Pickens J R. Atomistics of fracture. Boston: Springer, 1983: 969-995.
- [6] 袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(3): 112-116.
Yuan Q L, Feng X D, Cao J J, et al. Research progress in laser cladding technology[J]. Materials Review, 2010, 24(3): 112-116.
- [7] 胡木林, 谢长生, 王爱华. 激光熔覆材料相容性的研究进展[J]. 金属热处理, 2001, 26(1): 1-8.
Hu M L, Xie C S, Wang A H. Development of material consistency of laser cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2001, 26(1): 1-8.
- [8] 邱星武, 张云鹏, 刘春阁. 激光熔覆法制备 $Al_2CrFeCo_2CuNiTi$ 高熵合金涂层的组织与性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18(5): 735-740.
Qiu X W, Zhang Y P, Liu C G. Microstructure and properties of $Al_2CrFeCo_2CuNiTi$ high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2013, 18(5): 735-740.
- [9] 齐振佳, 张晓星, 王豫跃, 等. B 对激光增材制造 TC4 微观组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602002.
Qi Z J, Zhang X X, Wang Y Y, et al. Effect of B on microstructure and properties of laser additive manufactured TC4 alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602002.
- [10] 龚丞, 王丽芳, 朱刚贤, 等. 激光增材制造 316L 不锈钢熔覆层残余应力的数值模拟研究[J]. 应用激光, 2018, 38(3): 402-408.
Gong C, Wang L F, Zhu G X, et al. Numerical simulation of residual stress in 316L stainless steel cladding layer by laser additive manufacturing[J]. Applied Laser, 2018, 38(3): 402-408.
- [11] Şirin T B, Kaynak Y. Prediction of residual stress and distortion in laser powder bed fusion additive manufacturing process of Inconel 718 alloy[J]. Procedia CIRP, 2021, 99: 330-335.
- [12] Fang Z C, Wu Z L, Huang C G, et al. Review on residual stress in selective laser melting additive manufacturing of alloy parts[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106283.
- [13] Liu F C, Lin X, Yang G L, et al. Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 208-213.
- [14] 王梦瑶, 朱海红, 祁婷, 等. 选区激光熔化成形 Al-Si 合金及其裂纹形成机制研究[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 219-222.
Wang M Y, Zhu H H, Qi T, et al. Selective laser melting Al-Si aluminum alloy and the crack formation mechanism[J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 219-222.
- [15] Pilloz M, Pelletier J M, Vannes A B. Residual stresses induced by laser coatings: phenomenological analysis and predictions[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(5): 1240-1244.
- [16] 赵忠兴, 穆光华, 孙保纯, 等. 球墨铸铁激光表面熔化处理层残余应力分析[J]. 热加工工艺, 1992, 21(4): 32-34.
Zhao Z X, Mu G H, Sun B C, et al. The surface treatment of spheroidal graphite cast iron by laser and the residual stress state of melted layer[J]. Hot Working Technology, 1992, 21(4): 32-34.
- [17] Gautam N, Anand K S, Mondi P R. Evaluation methods for residual stress measurement in large components[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44: 4239-4244.
- [18] 印兵胜, 赵怀普, 王晓洪. 残余应力测定的基本知识: 第七讲 机械法测残余应力[J]. 理化检验(物理分册), 2007, 43(12): 642-645, 641.
Yin B S, Zhao H P, Wang X H. Basic knowledge of residual stress determination: lecture no.7 residual stress determination by mechanical method[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2007, 43(12): 642-645, 641.
- [19] 沈军, 林波, 迟永刚, 等. 残余应力物理法测量技术研究状况[J]. 材料导报, 2012, 26(S1): 120-125.
Shen J, Lin B, Chi Y G, et al. Research status of residual stress physical method measurement techniques [J]. Materials Review, 2012, 26(S1): 120-125.
- [20] Mathar J. Determination of inherent stresses by measuring deformations of drilled holes[J]. Technical Report Archive & Image Library, 1934, 56(2): 249254.
- [21] 傅卫, 方洪渊, 白新波, 等. 工艺路径对多层多道激光

- 熔覆残余应力的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 29-33, 162.
- Fu W, Fang H Y, Bai X B, et al. Effect of process paths on residual stress of multi-layer and multi-pass laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 29-33, 162.
- [22] 孙洪吉, 韦靖, 郑兆宏, 等. 激光工艺参数对激光熔化沉积纯钛样品残余应力的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302014.
- Sun H J, Wei J, Zheng Z H, et al. Effects of laser process parameters on residual stress of pure titanium samples prepared by laser melting deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302014.
- [23] 赵宇辉, 赵吉宾, 王福雨, 等. 一种激光增材制造零件内部三维残余应力的测试方法: CN104792440A[P]. 2015-07-22.
- Zhao Y H, Zhao J B, Wang F Y, et al. Method of testing three-dimensional residual stress inside laser material increase manufacturing part: CN104792440A [P]. 2015-07-22.
- [24] 李果, 巩建鸣, 陈虎. 基于有限元法和纳米压痕技术的 SS304/BNi-2/SS304 钎焊接头残余应力分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 79-82, 86, 117.
- Li G, Gong J M, Chen H. Finite element analysis and nanoindentation-based experiment of residual stress of SS304/BNi-2/SS304 stainless steel brazed joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(7): 79-82, 86, 117.
- [25] Suresh S, Giannakopoulos A E. A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation[J]. Acta Materialia, 1998, 46(16): 5755-5767.
- [26] Tao Y F, Li J, Lü Y H, et al. Residual stress distribution in different depths of TiNi/Ti₂Ni-based laser clad coating prepared at different environmental temperatures[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(9): 2043-2054.
- [27] 来佑彬, 刘伟军, 赵宇辉, 等. TA15 粉末激光成形基板应力影响因素的试验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(7): 1605-1609.
- Lai Y B, Liu W J, Zhao Y H, et al. Experimental research on influencing factors of the residual stress of substrate in Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr Powder laser shaping [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 1605-1609.
- [28] Zhu L N, Xu B S, Wang H D, et al. On the evaluation of residual stress and mechanical properties of FeCrBSi coatings by nanoindentation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 536: 98-102.
- [29] 王海斗, 朱丽娜, 徐滨士. 纳米压痕法测量等离子喷涂铁基涂层表面的残余应力[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 1-4.
- Wang H D, Zhu L N, Xu B S. Measurement of residual stress of plasma sprayed Fe-based coating by nanoindentation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 1-4.
- [30] 李晨, 楼瑞祥, 王志刚, 等. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(S2): 153-158.
- Li C, Lou R X, Wang Z G, et al. Research progress of measuring residual stresses techniques[J]. Materials Review, 2014, 28(S2): 153-158.
- [31] 施新华, 武立宏, 栗春. 欧美最新 X 射线衍射残余应力测定标准介绍[J]. 理化检验: 物理分册, 2011, 47(10): 623-628.
- Shi X H, Wu L H, Li C. Introduction to the latest European and American standard test methods for residual stress measurement by X-ray diffraction[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2011, 47(10): 623-628.
- [32] 孙光爱, 陈波, 黄朝强, 等. X 射线衍射残余应力分析方法与 J75 抗氢钢实验[J]. 中国核科技报告, 2008(2): 133-142.
- Sun G G, Chen B, Huang C Q, et al. Residual stress analysis and J75 stainless steel experiment by X-ray diffraction[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 2008(2): 133-142.
- [33] 刘延辉, 瞿伟成, 朱小刚, 等. 激光 3D 打印 TC4 钛合金工件根部裂纹成因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2016, 52(10): 682-685.
- Liu Y H, Qu W C, Zhu X G, et al. Causes analysis on root cracks of TC4 titanium alloy parts formed by laser 3D printing[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2016, 52(10): 682-685.
- [34] 孙杰, 赵剑峰, 谢娜, 等. 电磁辅助激光熔化沉积的残余应力[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(6): 805-811.
- Sun J, Zhao J F, Xie N, et al. Residual stress of laser melt cladding assisted by electromagnetic field[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(6): 805-811.
- [35] 许明三, 戴腾运, 江吉彬, 等. 不锈钢基体激光熔覆 Ni60A 的残余应力研究[J]. 福建工程学院学报, 2016, 14(6): 557-562.
- Xu M S, Dai T Y, Jiang J B, et al. Research of residual stress in laser cladding of Ni60A on stainless steel[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2016, 14(6): 557-562.
- [36] 章媛洁, 宋波, 赵晓, 等. 激光选区熔化增材与机加工复合制造 AISI420 不锈钢: 表面粗糙度与残余应力演变规律研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 170-178.
- Zhang Y J, Song B, Zhao X, et al. Selective laser melting and subtractive hybrid manufacture AISI420 stainless steel: evolution on surface roughness and residual stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(13): 170-178.
- [37] 朱允明, 张人佶, 窦建清, 等. 激光熔凝镍基热喷涂层残余应力的 X 射线衍射分析[J]. 中国激光, 1993, 20(7): 530-535.
- Zhu Y M, Zhang R J, Dou J Q, et al. Residual stress analysis for Ni-base thermal sprayed coatings with laser melting and consolidation[J]. Chinese Journal of Lasers, 1993, 20(7): 530-535.
- [38] Suárez A, Amado J M, Tobar M J, et al. Study of residual stresses generated inside laser clad plates using FEM and diffraction of synchrotron radiation[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(12/13):

- 1983-1988.
- [39] 张净宜, 邱长军, 贺沅玮, 等. 不同 Ni 含量铁基激光熔覆层组织和性能的研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 221-225.
Zhang J Y, Qiu C J, He Y W, et al. Microstructure and properties of Fe-based laser cladding with different Ni content[J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 221-225.
- [40] Morin L, Braham C, Tajdary P, et al. Reconstruction of heterogeneous surface residual-stresses in metallic materials from X-ray diffraction measurements[J]. Mechanics of Materials, 2021, 158: 103882.
- [41] Guo J, Fu H Y, Pan B, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: a review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 54-78.
- [42] 李峻宏, 高建波, 李眉娟, 等. 激光成形样品残余应力分布的中子衍射研究[C]//中国晶体学会第五届全国会员代表大会暨学术大会(粉末衍射分会场)论文摘要集. 北京: 中国晶体学会, 2012: 17-17.
Li J H, Gao J B, Li M J, et al. Neutron diffraction study on residual stress distribution of laser formed samples [C]//Abstracts of the Fifth National Member Congress and Academic Conference of Chinese Crystallographic Society (Powder Diffraction Branch Venue). Beijing: Chinese Crystallographic Society, 2012: 17-17.
- [43] Köhler H, Partes K, Kommeier J R, et al. Residual stresses in steel specimens induced by laser cladding and their effect on fatigue strength[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 354-361.
- [44] Cottam R, Luzin V, Liu Q, et al. Investigation into heat treatment and residual stress in laser clad AA7075 powder on AA7075 substrate[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2013, 2(4): 205-212.
- [45] 赵凯, 梁旭东, 王伟, 等. 基于 NSGA- II 算法的同轴送粉激光熔覆工艺多目标优化[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102004.
Zhao K, Liang X D, Wang W, et al. Multi-objective optimization of process parameters for laser coaxial powder feeding repair based on NSGA- II [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102004.
- [46] 苏昊, 石拓, 石世宏, 等. 自由曲面等搭接率算法及激光熔覆工艺实现[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402008.
Su H, Shi T, Shi S H, et al. Algorithm and implementation of laser cladding with equal overlapping ratio on free-form surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402008.
- [47] 庞铭, 谭雯丹. 预热温度对激光熔凝 RuT300 气门座残余应力场的影响研究[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 296-301.
Pang M, Tan W D. Effect of preheating temperature on residual stress field of laser melting RuT300 valve seats [J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 296-301.
- [48] Cooper K P, Slebodnick P. Recent developments in laser melt/particle injection processing[J]. Journal of Laser Applications, 1989, 1(4): 21-29.
- [49] Buchbinder D, Meiners W, Pirch N, et al. Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting[J]. Journal of Laser Applications, 2014, 26(1): 012004.
- [50] 龚丞, 王丽芳, 朱刚贤, 等. 激光增材制造工艺参数对熔覆层残余应力的影响[J]. 激光技术, 2019, 43(2): 263-268.
Gong C, Wang L F, Zhu G X, et al. Influence of process parameters on the residual stress of cladding layers by laser additive manufacturing[J]. Laser Technology, 2019, 43(2): 263-268.
- [51] 李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15-19.
Li W, Li Y H, He W F, et al. Development and application of laser shock processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15-19.
- [52] 闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. Fe314 合金熔覆层残余应力激光冲击消除机理[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1003004.
Yan S X, Dong S Y, Xu B S, et al. Mechanics of removing residual stress of Fe314 cladding layers with laser shock processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(10): 1003004.
- [53] 张颖, 戚永爱, 梁绘昕, 等. 超声冲击激光熔覆层的应力场数值模拟[J]. 应用激光, 2015, 35(3): 288-294.
Zhang Y, Qi Y A, Liang H X, et al. The numerical simulation analysis of laser cladding layer stress field with UIT[J]. Applied Laser, 2015, 35(3): 288-294.
- [54] 陈滋鑫, 周后明, 徐采星. 激光熔覆裂纹研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0700006.
Chen Z X, Zhou H M, Xu C X. Cladding crack in laser cladding: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0700006.
- [55] 孙耀峰, 郝晓华, 王暮, 等. 热喷涂镀锌铝复合涂层的耐硫化物的应力腐蚀行为[J]. 北京工业大学学报, 2000, 26(4): 40-42, 46.
Sun Y F, Hao X H, Wang M, et al. Performance of sulfide stress corrosion resistance of Zn-Al two-layer coating and Al coating[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2000, 26(4): 40-42, 46.
- [56] Nikulin S A, Rozhnov A B. Corrosion cracking of zirconium cladding tubes. (A review). I. Methods of study and mechanisms of fracture[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2005, 47(1/2): 71-79.
- [57] 张亦良, 王慕, 孙耀峰, 等. 用热喷涂技术防止湿硫化氢应力腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(4): 243-247.
Zhang Y L, Wang M, Sun Y F, et al. Study on thermal spraying technique used for resistance to wet H₂S sulphide stress cracking[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2003, 23(4): 243-247.
- [58] Lou X Y, Song M, Emigh P W, et al. On the stress corrosion crack growth behaviour in high temperature water of 316L stainless steel made by laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Corrosion Science, 2017, 128: 140-153.
- [59] 陈华, 宫文彪, 刘睿, 等. 激光熔覆镍基合金的耐磨耐蚀性研究[J]. 金属热处理, 2001, 26(3): 25-27.
Chen H, Gong W B, Liu R, et al. Study on wear resistance and corrosion resistance of laser cladding nick

- based alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, 26(3): 25-27.
- [60] 魏仁超, 陈学东, 范志超, 等. 湿 H₂S 及 Cl⁻ 环境下 FV520B 不锈钢的应力腐蚀行为研究[J]. *流体机械*, 2017, 45(1): 1-7.
Wei R C, Chen X D, Fan Z C, et al. Stress corrosion cracking behavior of FV520B stainless steel exposed to aqueous H₂S + Cl⁻ environment[J]. *Fluid Machinery*, 2017, 45(1): 1-7.
- [61] 钟文飞, 魏安安, 王友华. 电弧喷涂铁基镍铬合金涂层的耐碱脆性能[J]. *腐蚀与防护*, 2012, 33(2): 104-105, 143.
Zhong W F, Wei A A, Wang Y H. Caustic embrittlement resistance of arc sprayed iron-based Ni-Cr coatings[J]. *Corrosion & Protection*, 2012, 33(2): 104-105, 143.
- [62] 贺星, 孔德军, 宋仁国. 激光熔覆 Al-Ni-TiC-CeO₂ 复合涂层的组织与耐腐蚀磨损性能[J]. *材料工程*, 2019, 47(10): 68-75.
He X, Kong D J, Song R G. Microstructure and corrosion-wear resistance of laser cladding Al-Ni-TiC-CeO₂ composite coatings[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(10): 68-75.
- [63] 章岳, 王体权, 俞宏英. 喷涂锌、铝对 921 船用高强度钢应力腐蚀断裂的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1990, 10(1): 79-84.
Zhang Y, Wang T Q, Yu H Y. Effect of thermal-sprayed zinc and aluminum on the stress corrosion cracking of 921 high-strength steel for ship building[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 1990, 10(1): 79-84.
- [64] Cui C J, Ma R J, Martínez-Pañeda E. A phase field formulation for dissolution-driven stress corrosion cracking[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, 147: 104254.
- [65] Was G S, Andresen P L. Mechanisms behind irradiation-assisted stress corrosion cracking[M]//Nuclear corrosion. Amsterdam: Elsevier, 2020: 47-88.
- [66] Turnbull A. Stress corrosion cracking in metals-mechanisms[M]//Reference module in materials science and materials engineering. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [67] Woodtli J, Kieselbach R. Damage due to hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2000, 7(6): 427-450.
- [68] 林成福, 闻立时, 钱声伟, 等. 火焰喷涂 Zn-Al15 涂层的海水腐蚀失效分析[J]. *金属学报*, 1990, 26(2): 116-119.
Lin C F, Wen L S, Qian S W, et al. Corrosion failure analysis of flame sprayed Zn-Al15 coating in sea water[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1990, 26(2): 116-119.
- [69] Galvele J R. Enhanced surface mobility as the cause of stress corrosion cracking[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1986, 133(5): 953-954.
- [70] Sieradzki K, Newman R C. Brittle behavior of ductile metals during stress-corrosion cracking[J]. *Philosophical Magazine A*, 1985, 51(1): 95-132.
- [71] Liu T G, Bai Q, Ru X K, et al. Grain boundary engineering for improving stress corrosion cracking of 304 stainless steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2019, 35(4): 477-487.
- [72] 向超, 王家贞, 付华萌, 等. 几种高熵合金在核电高温高压水中的腐蚀行为研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(2): 107-112.
Xiang C, Wang J Z, Fu H M, et al. Corrosion behavior of several high-entropy alloys in high temperature high pressure water[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2016, 36(2): 107-112.
- [73] Xing X D, Duan X M, Jiang T T, et al. Ultrasonic peening treatment used to improve stress corrosion resistance of AlSi₁₀Mg components fabricated using selective laser melting[J]. *Metals*, 2019, 9(1): 103.
- [74] 王宣平, 段合露, 孙玉文, 等. 增材制造金属零件抛光加工技术研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(4): 1-10.
Wang X P, Duan H L, Sun Y W, et al. Advances in the research of polishing technologies for additive manufacturing metal parts[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(4): 1-10.
- [75] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.