

预热温度对激光熔凝 RuT300 气门座 残余应力场的影响研究

庞铭, 谭雯丹

(中国民航大学, 天津 300300)

摘 要: **目的** 为了突破激光熔凝蠕墨铸铁 RuT300 气门座裂纹抑制技术的瓶颈, 研究了预热温度对激光熔凝 RuT300 气门座残余应力场的影响, 从而为工程上抑制裂纹的参数优选提供支撑。**方法** 基于热弹塑性理论, 建立了激光熔凝 RuT300 气门座残余应力场分析的数学物理模型, 模型中考虑了预热温度、激光熔凝参数、材料性能参数的变化对残余应力的影响。**结果** 预热温度对激光熔凝 RuT300 气门座残余应力场的影响与熔池冷却速度、峰值温度等密切相关: 当预热温度在 25~150 °C 时, 随着预热温度的升高, 冷却速度下降对激光熔凝 RuT300 气门座热膨胀变形引起的应力降低起主要作用, 导致气门座环向残余应力值随预热温度的升高而减小; 当预热温度在 150~250 °C 时, 随着预热温度的升高, 峰值温度上升诱发的热膨胀变形加剧所引起的应力增加起主要作用, 导致气门座环向残余应力值随预热温度的升高而增大。**结论** 预热温度的变化影响气门座的冷却速度和峰值温度, 而残余应力值的变化是气门座冷却速度和峰值温度等综合影响的结果, 通过合理的调控预热温度, 可以使激光熔凝 RuT300 气门座的残余应力值降低到最低, 从而减小气门座激光熔凝形成裂纹的倾向。

关键词: 激光熔凝; 预热温度; RuT300; 气门座; 残余应力; 裂纹抑制

中图分类号: TG174.4; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0296-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.039

Effect of Preheating Temperature on Residual Stress Field of Laser Melting RuT300 Valve Seats

PANG Ming, TAN Wen-dan

(Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of preheating temperature on residual stress field of laser melting RuT300 valve seats, so as to break through the bottleneck of crack suppression technology of laser melting valve seats made of vermicular graphite cast iron RuT300 and provide support for parameter optimization of crack suppression in engineering. Based on the thermal elastoplastic theory, a mathematical and physical model for residual stress field analysis of laser melting RuT300 valve seats was established. The effects of preheating temperature, laser melting parameters and changes of material performance parameters on residual stress were considered in the model. The effect of preheating temperature on residual stress field of laser melting RuT300 valve seats was closely related to the cooling rate of molten pool, the peak temperature, etc. When the preheating temperature was between 25 °C and 150 °C, stress reduction due to the mismatch of thermal expansion deformation

收稿日期: 2018-11-23; 修订日期: 2019-06-29

Received: 2018-11-23; Revised: 2019-06-29

作者简介: 庞铭 (1980—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为结构强度以及激光与材料的相互作用。邮箱: pangming1980@126.com

Biography: PANG Ming (1980—), Male, Doctor, Professor, Research focus: structural strength and interaction between laser and material.
E-mail: pangming1980@126.com

in space of laser melting RuT300 valve seats caused by the decrease of cooling rate with the increase of preheating temperature played a major role, thus decreasing circumferential residual stress value of valve seats with the increase of preheating temperature. When the preheating temperature was between 150 °C and 250 °C, the increase of stress caused by the intensified thermal expansion deformation induced by the peak temperature rise with the increase of preheating temperature played a major role, resulting in the increase of circumferential residual stress value of valve seats with the increase of preheating temperature. The variation of preheating temperature affects the cooling rate and the peak temperature of valve seats, and the variation of residual stress value is the result of the combined effect of cooling rate and peak temperature of valve seats. By adjusting and controlling the preheating temperature reasonably, the residual stress value of laser melting RuT300 valve seats can be reduced to the minimum, thus reducing the tendency of crack formation of laser melting valve seats.

KEY WORDS: laser melting; preheating temperature; RuT300; valve seats; residual stress; crack suppression

蠕墨铸铁具有高强度、高韧性以及优良的导热性能, 且力学性能介于灰铸铁和球墨铸铁之间, 在工程上经常用于制造高热负荷零部件, 如发动机气缸盖^[1]。在新型动力高强度和高紧凑的发展趋势下, 为了提高结构的紧凑性, 气缸盖和气门座采用整体成形技术, 由于气缸盖和气门座的使用环境不同, 在满足气缸盖可靠性需求的条件下所设计出的气缸盖和气门座整体成形零件, 其硬度不能满足耐高温和耐冲击磨损的使用条件。工程上根据气门座的使用温度范围选用不同的热处理工艺: 在使用温度低于 400 °C 条件下, 采用相变硬化形成马氏体来提高其耐磨性; 在使用温度 500 °C 条件下, 采用激光熔凝的方法, 对气门座表面进行细晶化, 形成细晶莱氏体, 满足其高温下的耐磨性。

由于激光熔凝是一个快速加热和冷却的过程, 在材料表面会形成高的时间和空间温度梯度, 导致材料在高温下形成大的压应力, 在低温下形成高的拉伸残余应力, 在激光熔凝区域形成微观裂纹。因此, 如何抑制 RuT300 气门座激光熔凝所形成的裂纹, 已成为新型动力急需突破的关键技术。为了突破这一发展瓶颈, 作者研究团队先后开展了有关结构约束、优化工艺参数的实验研究, 在实验研究的过程中, 发现合适的预热温度可以降低激光熔凝过程后形成的残余应力, 从而控制裂纹的形成。

目前国内外的许多学者也开展了一些有关预热对温度场和应力场影响的研究。李美艳等^[2]分析了基板预热对激光熔覆陶瓷涂层温度梯度和应力分布的影响, 结果表明, 预热可以显著降低涂层的冷却速度及内应力, 有效抑制裂纹的产生。吴东江等^[3]证明了基板预热可以显著降低激光熔覆 Al_2O_3 陶瓷涂层冷却阶段的温度梯度, 且预热温度越高, 梯度降低越明显, 因此预热可以抑制裂纹产生。丁林等^[4]通过模拟验证了基体预热能使激光熔覆 Co 基合金的残余应力和变形均明显减小, 说明对基体适当预热能有效降低熔覆层的开裂倾向。Hu 等^[5]通过实验得到了激光复合焊接 10Ni3CrMoV 钢的最佳预热温度, 并且在该温度下获得的焊接接头具有良好的机械性能, 可以实现冷裂纹的消除。Xiong 等^[6]对不同基体预热温度下基于气

体保护金属电弧焊的增材制造过程进行有限元分析和实验验证, 结果表明, 基板预热可以使热循环曲线更加平滑, 降低熔池的冷却速度, 并且熔池中的最高温度梯度随着预热温度的升高而降低。Liu 等^[7]研究表明, 在选择性激光熔化钕稳定氧化锆陶瓷材料时, 对陶瓷粉末的高温预热可以减少激光加工过程中陶瓷材料连续较长裂纹的产生。

现有文献关于预热对温度和应力的影响规律主要是, 随着预热温度的升高, 残余应力降低, 而作者研究团队经研究发现, 预热在其所引起的冷却速度降低与峰值温度上升之间存在一个竞争关系, 选用适当的预热温度可以降低残余应力。本文建立了激光熔凝 RuT300 气门座残余应力场仿真数学物理模型, 分析了不同预热温度对残余应力的影响规律, 提出了预热温度的临界值, 其研究结果为工程上工艺优化提供了理论依据。

1 数学物理模型的建立

1.1 物理模型

根据实际气门座尺寸建立气门座有限元仿真物理模型, 如图 1 所示。模型的内外直径分别为 32、48 mm; 锥面所对应的外直径为 40 mm, 母线长为 5.66 mm;

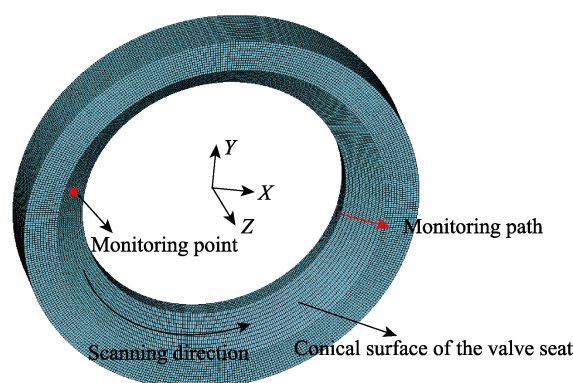


图 1 气门座有限元仿真物理模型
Fig.1 Physical model for finite element analysis of the valve seat

z 方向为气门座的高度方向,模型高度为 6 mm。激光沿着锥面中线进行扫描,扫描方向为环向,由于模型的尺寸较小,所以对整个模型采用整体划分网格,以提高计算精度。划分原则为网格变得更为密集时,模拟结果几乎没有变化。

1.2 数学模型

激光熔凝 RuT300 气门座由于激光的快速加热和冷却,在熔凝过程中,不仅有弹性变形,而且有塑性变形,高温下的塑性变形区域在低温时,不能恢复到没有变形时的状态,在气门座中就会形成残余应力。气门座残余应力计算的温度载荷是其在不同预热温度情况下,激光熔凝气门座有限元计算的瞬态温度为温度边界,其中瞬态温度数据的提取包括:气门座从激光熔凝开始到激光熔凝结束,再到其整体温度冷却到室温 25 °C 期间的瞬态温度场。然后结合有限元分析的间接耦合方法,从而获得气门座激光熔凝的残余应力。由于在激光熔凝实验过程中,气门座底面放置在工作台面,因此进行应力分析时,对气门座底面施加 z 方向的位移边界约束条件。力学分析模型采用热弹塑性理论,伴随激光熔凝过程的进行,气门座所产生的应变包括弹性应变、塑性应变以及由体积变化和相变塑性引起的应变。综合考虑温度对应力-应变本构关系的影响,热弹塑性本构关系如(1)式所示^[8-9]。其中, $[D^{\text{ep}}]$ 为弹塑性刚度矩阵; $[C^{\text{th}}]$ 为热刚度矩阵; $[M]$ 为温度形函数; $[\Delta T]$ 为温度变化量; $d\sigma$ 为应力增量; $d\varepsilon$ 为应变增量。

$$\{d\sigma\} = [D^{\text{ep}}]\{d\varepsilon\} - [C^{\text{th}}][M][\Delta T] \quad (1)$$

激光熔凝 RuT300 气门座包括未预热和预热两种状态,未预热时气门座的初始温度为室温,激光熔凝

过程的工艺参数如表 1 所示。

表 1 激光熔凝工艺参数
Tab.1 Parameters of laser melting process

| Laser power/W | Laser scanning velocity/(mm·s ⁻¹) | Laser spot radius/mm | Preheating temperature/°C |
|---------------|---|----------------------|---------------------------|
| 1600 | 5 | 1.5 | 25 |
| 1600 | 5 | 1.5 | 100 |
| 1600 | 5 | 1.5 | 150 |
| 1600 | 5 | 1.5 | 180 |
| 1600 | 5 | 1.5 | 250 |

1.3 材料热物性与力学性能参数

激光熔凝 RuT300 气门座的数值模拟需要确定蠕墨铸铁 RuT300 材料随温度变化的热物性和力学性能参数,在低温下的数据参考文献[10]和[11],其高温下的性能参数采用插值和外推的办法得到,其中材料部分热物性参数的推导以及其在高温下的变化趋势参考文献[12]。

在温度达到熔点附近时,材料已经不属于弹性变形范围,此时的弹性模量和屈服强度等力学性能参数已经失去其物理内涵,应该设置为零。但由于激光熔凝过程的数值模拟是以弹塑性理论为基础的,材料的参数必须是非零值,且取值不能过小,否则会导致模拟计算收敛的困难。因此当温度在熔点附近及熔点以上时,经过大量的应力模拟试算和对比分析,设置弹性模量和屈服强度为一个合理且较小的值^[13-15]。

蠕墨铸铁 RuT300 材料的热物性与力学性能参数如表 2 所示,材料密度为 7086 kg/m³,泊松比为 0.26,熔点为 1200 °C。

表 2 蠕墨铸铁 RuT300 材料的热物性与力学性能参数

Tab.2 Thermophysical and mechanical property parameters of vermicular graphite cast iron RuT300 material

| Temperature/°C | Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | Specific heat capacity/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | Elastic modulus/GPa | Yield strength/MPa | Thermal expansion coefficient/(×10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹) |
|----------------|--|---|---------------------|--------------------|--|
| 25 | 42.370 | 465 | 145 | 240 | 10.6 |
| 200 | 43.339 | 555 | 140 | 221 | 11.5 |
| 400 | 41.025 | 645 | 135 | 200 | 12.5 |
| 600 | 38.022 | 787 | 129 | 178 | 13.5 |
| 800 | 37.290 | 871 | 124 | 157 | 14.5 |
| 1000 | 35.690 | 978 | 100 | 40 | 15.5 |
| 1200 | 34.890 | 938 | 80 | 20 | 15.7 |
| 1400 | 34.090 | 898 | 60 | 20 | 15.9 |
| 1600 | 33.290 | 888 | 60 | 20 | 16.1 |
| 1800 | 32.490 | 884 | 60 | 20 | 16.3 |

2 模拟结果与分析

图 2a、b、c 分别为未预热状态下的环向、径向以及轴向的气门座残余应力场分布云图。从图 2 可以

观察到,气门座锥面的激光熔凝区域主要为残余拉应力,基体以及热影响区主要为残余压应力。这是由于激光熔凝过程中,熔凝区域过高的温度所产生的瞬时应力超过了材料的屈服极限,材料发生塑性变形;熔

凝结束后, 工件开始冷却, 已经发生塑性变形的区域不能恢复至原来的形状, 而发生弹性变形的区域有恢复至原状的倾向, 这就导致了各区域产生了不同的残余应力状态。同时从图 2 还可以看出, 在激光熔凝的收尾阶段, 残余应力值会有一个较大的提高。这是因为激光扫描过程中, 前面时刻对后面时刻有预热作用, 导致收尾区域的温度大幅度上升, 发生塑性变形的高温区域材料受到周围的约束力增大, 最终产生的残余应力值变大。

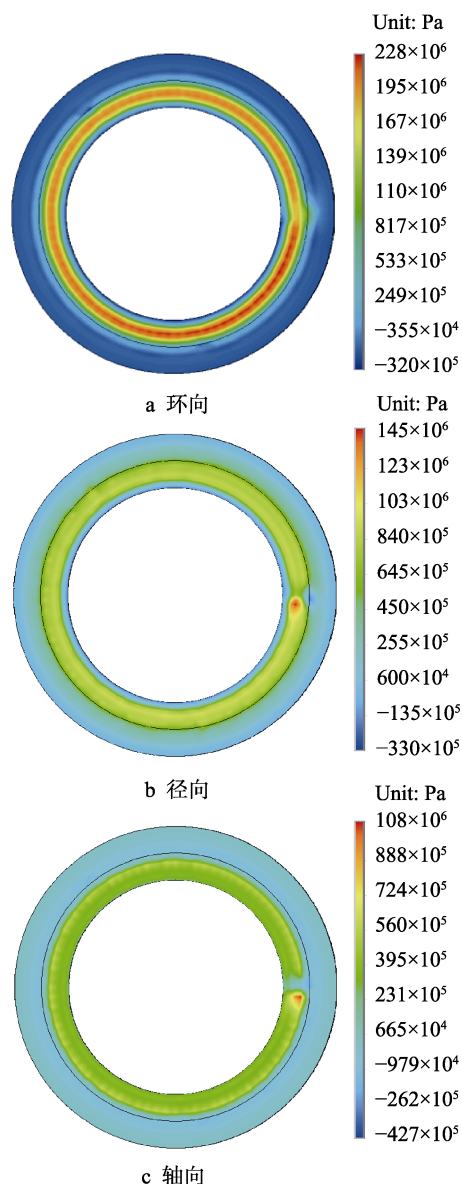


图 2 气门座残余应力场分布云图

Fig.2 Residual stress field distribution of the valve seat: a) circumferential; b) radial; c) axial

另外, 环向残余应力值大于径向和轴向残余应力值。这是因为随着激光熔凝过程的进行, 熔凝层变长, 沿激光扫描方向, 工件受热膨胀的变形阻力较大, 所产生的残余应力也相对较大^[16]。这也与激光熔凝实验相符: 实际实验过程中的裂纹大多出现在垂直于激光扫描方向。说明环向残余应力是熔凝区域裂纹产生的

主要原因, 所以本文接下来主要讨论激光熔凝蠕墨铸铁 RuT300 气门座环向残余应力的分布和变化情况。

取图 1 所示各预热温度下, 残余应力峰值点所在的垂直于激光扫描方向的路径, 分析气门座环向残余应力的分布情况, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 不同的预热温度没有改变残余应力的分布趋势, 各预热温度在所定义路径上具有相似的残余应力分布; 环向残余应力峰值均出现在激光熔凝区域, 且该区域的残余应力值整体较高, 随着与熔凝区距离的不断增大, 两侧的残余应力值迅速下降。说明气门座激光熔凝所形成的裂纹会在激光熔凝区域出现。

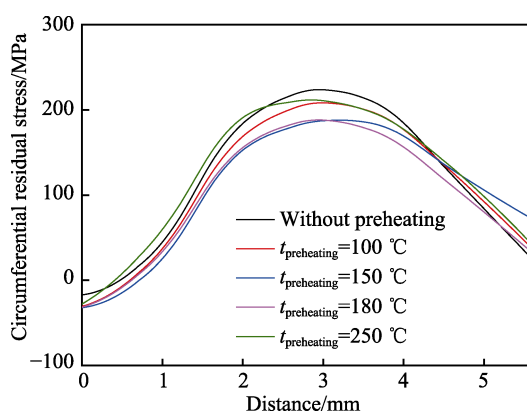


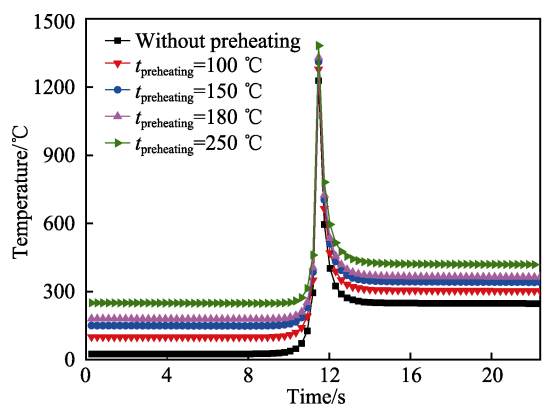
图 3 监测路径环向残余应力分布

Fig.3 Circumferential residual stress distribution on the monitoring path

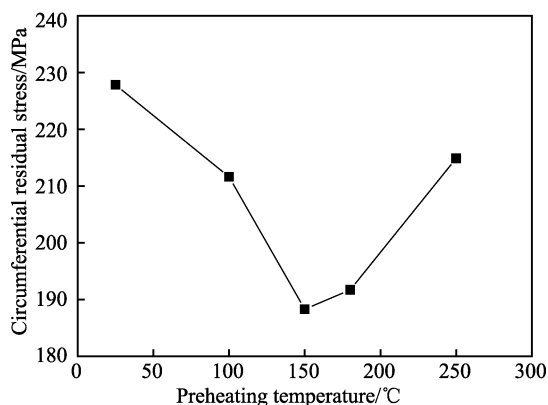
图 4a 为不同预热温度下, 图 1 所示残余应力监测点的热循环曲线。可以看出, 激光熔凝是对局部区域的快速加热和冷却, 由于加热速度快, 在加热瞬间, 激光热源主要影响的是激光辐照区域附近的温度; 当激光离开辐照区域, 该区域通过气门座的热传导和与外界的换热, 使温度降低。随着预热温度的升高, 监测点峰值温度出现小幅度上升, 而冷却速度降低, 这是因为监测点的冷却速度和气门座与外界的换热速度以及监测点所在区域的能量扩散(通过气门座的热传导)速度密切相关, 虽然对气门座预热提高了温度, 使气门座与外界的换热速度增加, 但同时也降低了温度梯度^[17], 使气门座通过热传导扩散能量的速度减小, 二者的综合作用最终导致监测点冷却速度随预热温度的升高而降低。

图 4b 为不同预热温度下的气门座环向残余应力曲线, 从图中可以观察到, 环向残余应力没有一直随预热温度的增加而降低, 而是在预热温度达到 150 °C 时, 激光熔凝气门座的残余应力值降到了最低, 之后随预热温度的上升, 气门座环向残余应力增加。激光熔凝属于急热急冷过程, 当材料在高温下受热膨胀被约束形成的热应力大于材料的屈服极限时, 材料产生塑性变形, 随着冷却过程的进行, 温度降低到室温, 高温下未发生塑性变形的区域有恢复到原来形状的倾向。由于不能恢复到原状的已发生塑性变形的高温

区域受到周边材料的拉伸作用,因此在激光熔凝区域,高温下的热应力转变为常温下的残余拉应力。而热应力的形成和冷却速度、峰值温度以及结构约束等密切相关。冷却速度的变化会改变气门座时间和空间的温度分布,由于温度分布的差异,高温区域热膨胀变形大,低温区域热膨胀变形小,由于变形不匹配引起的约束产生了应力。当预热温度增加时,在激光工艺参数和结构约束相同的条件下,气门座的峰值温度会上升,导致高温区域增加,热膨胀变形加剧,在相同的约束条件下,气门座应力增加。当预热温度在 25~150 °C 时,气门座环向残余应力随预热温度的升高而减小。这是因为预热导致的冷却速度下降,改变了气门座时间和空间的温度梯度,其对应力的影响大于气门座峰值温度上升导致的高温区域增加对应力的影响;当预热温度在 150~250 °C 时,气门座环向残余应力随预热温度的升高而增大,这是因为预热导致的高温区域增加,对应力的影响大于冷却速度下降对应力的影响。



a 监测点热循环曲线



b 气门座环向残余应力曲线

图4 不同预热温度下的热循环曲线和环向残余应力曲线
Fig.4 Thermal cycling curves and circumferential residual stress curve at different preheating temperature: a) thermal cycling curves at the monitoring point; b) circumferential residual stress curve of the valve seat

3 结论

1) 激光熔凝蠕墨铸铁 RuT300 气门座所产生的

环向残余应力,由于工件受热膨胀的变形阻力较大,其值要大于径向和轴向残余应力,导致激光熔凝所产生的裂纹一般垂直于激光扫描方向。

2) 激光熔凝区域主要为残余拉应力,且熔凝区的残余拉应力大于非熔凝区的残余拉应力,因此裂纹出现在激光熔凝区域。

3) 当预热温度在 25~150 °C 时,伴随预热温度的增加,气门座环向残余应力降低;当预热温度在 150~250 °C 时,伴随预热温度的增加,气门座环向残余应力升高。

参考文献:

- [1] 陶栋. 高性能蠕墨铸铁强韧性与导热性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
TAO Dong. Strength-toughness properties and thermal conductivity research of high-performance compacted graphite iron[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014.
- [2] 李美艳, 蔡春波, 韩彬, 等. 预热对激光熔覆陶瓷涂层温度场和应力场影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(12): 197-203.
LI Mei-yan, CAI Chun-bo, HAN Bin, et al. Numerical simulation of preheating on temperature and stress fields by laser cladding Ni-based ceramic coating[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2015, 36(12): 197-203.
- [3] 吴东江, 吴楠, 杨策, 等. 预热对 Al_2O_3 陶瓷激光熔覆层温度梯度影响的模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2039-2042.
WU Dong-jiang, WU Nan, YANG Ce, et al. Simulation of effect of preheating on temperature gradient of laser cladding layer of Al_2O_3 ceramics[J]. Rare metal materials and engineering, 2013, 42(10): 2039-2042.
- [4] 丁林, 蒋红云. 预热温度对激光熔覆 Co 基合金数值模拟的影响[J]. 南阳理工学院学报, 2013, 5(3): 95-100.
DING Lin, JIANG Hong-yun. Effect of preheating temperature on numerical simulation of laser cladding Co-based alloy[J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2013, 5(3): 95-100.
- [5] HU L H, HUANG J, LI Z G, et al. Effects of preheating temperature on cold cracks, microstructures and properties of high power laser hybrid welded 10Ni3CrMoV steel[J]. Materials & design, 2011, 32(4): 1931-1939.
- [6] XIONG J, LEI Y Y, LI R. Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures[J]. Applied thermal engineering, 2017, 126: 43-52.
- [7] LIU Q, DANLOS Y, SONG B, et al. Effect of high-temperature preheating on the selective laser melting of yttria-stabilized zirconia ceramic[J]. Journal of materials processing technology, 2015, 222: 61-74.

- [8] 文舒, 董安平, 陆燕玲, 等. GH536 高温合金选区激光熔化温度场和残余应力的有限元模拟[J]. 金属学报, 2018, 54(3): 393-403.
WEN Shu, DONG An-ping, LU Yan-ling, et al. Finite element simulation of the temperature field and residual stress in GH536 superalloy treated by selective laser melting[J]. Acta metallurgica sinica, 2018, 54(3): 393-403.
- [9] 李亚娟, 李午申. X80 管线钢环焊缝接头残余应力的数值模拟[J]. 焊接学报, 2010, 31(6): 97-100.
LI Ya-juan, LI Wu-shen. Numerical simulation of residual stress in X80 pipeline steel ring welded joints[J]. Transactions of the China welding institution, 2010, 31(6): 97-100.
- [10] 谭雯丹, 庞铭, 江国业, 等. 高强度柴油机气门座激光相变硬化温度场的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111601.
TAN Wen-dan, PANG Ming, JIANG Guo-ye, et al. Numerical simulation of temperature field in laser phase-transformation hardening of highly-enhanced diesel engine valve seats[J]. Laser & optoelectronics progress, 2018, 55(11): 111601.
- [11] GB/T 26655—2011, 蠕墨铸铁件[S].
GB/T 26655—2011, Compacted (vermicular) graphite iron castings[S].
- [12] 郭广文, 马惠霞, 张健. 铸铁的热物性测定及其与显微组织的关系[J]. 理化检验·物理分册, 2005, 41(1): 13-16.
GUO Guang-wen, MA Hui-xia, ZHANG Jian. The measurement of thermophysical properties of cast iron and the relationship to its microstructure[J]. Physical testing and chemical analysis part A: physical testing, 2005, 41(1): 13-16.
- [13] 刁旺战. 铝合金双光束激光填丝焊温度场与应力场数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
DIAO Wang-zhan. Numerical simulation of temperature and stress field of double laser welding with filler wire[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [14] 蒋秀晔. SUS430 铁素体不锈钢激光焊接热应力场数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
JIANG Xiu-ye. Research on thermal-stress numerical simulation of laser welding for SUS430 ferritic stainless steel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [15] 金亮. Ta/Mo 异种金属激光焊工艺研究及数值模拟[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
JIN Liang. Study on Ta/Mo dissimilar metal laser welding process and numerical simulation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [16] 顾建强. 激光熔覆残余应力场的数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
GU Jian-qiang. Numerical simulation of residual stress in laser cladding[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.
- [17] 庞铭, 张啸寒, 刘光, 等. 预热温度对激光熔凝 RuT300 温度场的影响规律[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071601.
PANG Ming, ZHANG Xiao-han, LIU Guang, et al. Effect of preheating temperature on temperature field of laser melting RuT300[J]. Laser & optoelectronics progress, 2019, 56(7): 071601.

(上接第 285 页)

- [9] 焦阳, 何卫峰, 罗思海, 等. 无保护涂层激光冲击提高 K24 合金高周疲劳性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 100302.
JIAO Yang, HE Wei-feng, LUO Si-hai, et al. Study of microscale laser shock processing without coating improving the high cycle fatigue performance of K24 simulated blades[J]. Chinese journal of lasers, 2015, 42(10): 100302.
- [10] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册(第二版)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
《Chinese aviation material manual》editorial board. China aviation materials manual second volume[M]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [11] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Journal of applied physics, 1990, 68(2): 775-784.
- [12] 周建波, 崔春翔, 李殿国. 镍基高温合金长期时效处理中碳化物的析出行为[J]. 热加工工艺, 2006, 35(18): 33-34.
ZHOU Jian-bo, CUI Chun-xiang, LI Dian-guo, et al. Carbide precipitating behavior of Ni-based superalloy by long time aging heat treatment[J]. Hot working technology, 2006, 35(18): 33-34.
- [13] 朱伟, 周建忠, 黄舒, 等. 微尺度激光喷丸纯铜数值模拟和统计优化分析[J]. 中国激光, 2011, 38(S1): 103005.
ZHU Wei, ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, et al. Study on the numerical simulation and statistical optimization of micro-scale laser shock peening[J]. Chinese journal of lasers, 2011, 38(S1): 103005.
- [14] 徐士东, 仁旭东, 周玉凡, 等. GH2036 合金激光冲击胞晶细化与位错强化机理研究[J]. 中国激光, 2016(1): 40-45.
XU Shi-dong, REN Xu-dong, ZHOU Yu-fan, et al. Research of cell-grain refinement and dislocation strengthening of laser shock processing on GH2036 alloy[J]. Chinese journal of lasers, 2016(1): 40-45.
- [15] 李伟, 李应红, 何卫峰, 等. 激光冲击强化技术的发展和应用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15-19.
LI Wei, LI Ying-hong, HE Wei-feng, et al. Development and application of laser shock processing[J]. Laser & optoelectronics progress, 2008, 45(12): 15-19.