DOI: 10.3901/JME.2019.09.217

磨损轴面激光熔覆过程的数值模拟及试验*

舒林森^{1,2} 王家胜¹ 白海清¹ 何雅娟¹ 王 波¹

(1. 陕西理工大学机械工程学院 汉中 723001

2. 陕西理工大学陕西省工业自动化重点实验室 汉中 723001)

摘要: 为了避免激光熔覆过程产生微裂纹缺陷,对磨损轴面激光熔覆过程的热力耦合问题进行研究。根据磨损轴面激光熔覆试验建立其非线性瞬态分析数学模型,并引入有序网格离散算法进行轴面激光熔覆有限元建模,通过 ANSYS 参数化设计语言(APDL)和单元生死法编程实现金属粉末圆周堆积的瞬态热-力循环及其耦合问题求解,获得了熔覆过程的三维温度和热应力分布规律。结果表明,熔池的温度梯度较大且光斑中心靠后位置的温度最高(2 035.99 ℃),各节点瞬时温度衰变规律具有相似性和时间滞后性;热应力与温度梯度对应,冷却后的应力(约 279 MPa)集中于热影响区(HAZ)且靠近覆层材料边沿侧,这与试验获得的激光熔覆残余应力基本吻合,可用于优化损伤轴面激光熔覆工艺及质量。

关键词: 激光熔覆;轴面;数值模拟;热-力循环;试验验证

中图分类号: TG404

Numerical and Experimental Investigation on Laser Cladding Treatment of Wear Shaft Surface

SHU Linsen^{1,2} WANG Jiashen¹ BAI Haiqing¹ HE Yajuan¹ WANG Bo¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanxi University of Technology, Hanzhong 723001;

2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Shanxi University of Technology, Hanzhong 723001)

Abstract: In order to avoid the microcrack defects, the thermal-mechanical coupling problem is analyzed adopting a numerical approach during the wear shaft surface laser cladding. The mathematical model of nonlinear transient analysis is established based on the wear surface laser cladding experiment, then an ordered discrete grid algorithm is using to realize three-dimensional finite element model of the shaft surface laser cladding process. The transient thermal- mechanical cycle and its coupling problem during multi-tracks cladding metal powder ring deposition process are solved by a developed subprogram with ANSYS parametric design language (APDL) and the finite element kill and birth technique. The distribution of temperature and thermal stress are obtained in the cladding process. Simulation results indicate that temperature gradients of the molten pool are larger and the highest temperature is 2035.99℃ which located in the adjacent area of spot center location. Transient temperature variations of the nodes on different cladding tracts are similar and arrive behind the load time. The cladding residual stress associated with temperature gradient and the peak residual stress(about 279 MPa)occurs in substrate metal adjacent heat affected zone (HAZ), which are in a good agreement with experimentally obtained results. The paper has a guiding significance to process optimization of the wear shaft surface laser cladding.

Key words: laser cladding; shaft surface; numerical simulation; thermal-mechanical cycle; experiment verification

0 前言

磨损轴面激光熔覆是利用激光熔覆工艺在损伤轴面立体堆积形成基于冶金熔合的致密金属覆层,使其形状、尺寸以及性能得以复原的制造过程。激光熔覆过程受到时变高温热循环和异质材料(基材和粉末)热物理性能影响,其成形机理非常复杂,若

控制不当将影响制造质量,甚至产生微裂纹等缺陷。因此,研究磨损轴面激光熔覆过程是必要的。试验表明^[1-3],激光与工件基体、金属粉末直接作用的有限区域反应剧烈(如:传热、传质、相变以及弹塑性应变等),通过试验捕捉工件内部实时数据难度大、费用高。随着数值模拟技术的发展,利用连续过程的离散化处理可以重现激光熔覆过程,能够为激光熔覆实践提供重要理论依据。CALLEJA 等^[4]对燃气轮机叶片连续激光熔覆成形过程模拟,获得了工艺优化参数;ZHANG 等^[5]对圆形轨道熔覆过程仿真,获得了导致覆层开裂和基体变形的诱因;

* 国家自然科学基金(51505268)、陕西省教育厅专项科研计划(15JK 1142)和陕西理工大学人才启动基金(SLGKYQD2-26)资助项目。20180105 收到初稿,20180913 收到修改稿

PALUMBO 等^[6]对气缸环面的激光修复过程进行模拟, 获得了与试验吻合的熔池形态以及诱发性热塑性变形规律; TURŇA 等^[7]对 AISI 304 钢管 Nd: YAG 激光熔覆连接过程进行模拟, 获得了结构应变和热塑性应力; 任会芳^[8]对曲轴再制造温度场仿真, 获得了控制曲轴残余应力的参考温度; 贾文鹏等^[9-10]对 TC4 钛合金叶片的熔覆成形温度场进行模拟, 获得逐层连续叠加沉积过程的热演化规律。此外, 数值模拟的热源模型^[11]及各工艺参数^[12-14]也被国内外学者关注。

磨损轴面激光熔覆区发生着固-液-气多相反应, 试验观测较难。鉴于此, 对磨损轴面的激光熔覆试验方案设计, 建立激光熔覆过程分析模型和工艺过程有限元模型, 利用 ANSYS APDL 自编程序对模型中热力耦合问题进行求解, 结果获得了磨损轴面激光熔覆的过程温度和残余工艺应力数据, 并利用试验对模拟的残余应力进行验证, 这为轴类零件激光熔覆实践及工艺优化提供参考。

1 磨损轴面激光熔覆工艺方案设计

激光熔覆前对磨损轴进行加工、抛光和清洁等表面预处理, 获得轴面几何尺寸为: $\Phi=41\text{ mm}$; $L=30\text{ mm}$ 。图 1 为磨损轴的激光熔覆工艺方案, 使用

图 1 磨损轴面激光熔覆工艺方案

800 W 的 Nd: YAG 激光熔覆系统, 光斑直径为 2 mm, 设定激光头与工件相距 100 mm, 工件转速 0.24 rad/s, Fe 基合金粉末^[14]按照环形路径吹送到工件表面, 在激光热作用下产生 0.5 mm 厚的金属熔覆层结构, 随着工件旋转和激光束移动在损伤轴面逐渐形成新的熔覆层结构。

2 磨损轴面激光熔覆过程建模

2.1 非线性瞬态计算模型

激光熔覆区域的温度具有高度非线性和时变性, 热致应力受热循环、基体和粉末材料性能(如膨胀率、相变潜热、屈服强度等)等诸多因素影响, 建立完整的激光熔覆过程模难度大, 需要作如下假设。

(1) 粉末颗粒形状为等尺寸立方六面体, 熔覆层表面光整, 粉末和基体材料均为各向同性且随温度改变。

(2) 激光光柱穿透材料后衰减为三维圆锥体形状, 锥体内单元生热率相同。

(3) 忽略熔池金属内流动和压缩性, 不计算粉末吹送能耗影响, 仅考虑结构张力。

(4) 计算过程满足准稳态条件。

考虑到激光在熔覆区域的穿透性和热能衰退特性, 磨损轴面激光熔覆过程的热输入可等效为三维圆锥体热源作用, 其函数为^[15]

$$\begin{cases} q(r, z) = \frac{9\eta Q e^3}{\pi z_i (e^3 - 1)(r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \\ r_0(z) = f(z) = r_e - \frac{(z - z_e)}{z_i - z_e}(r_e - r_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $q(r, z)$ 是体热流密度; Q 是激光能量; η 是转换效率; r_e 和 r_i 是锥体热源顶端半径和底端半径; z_e 和 z_i 是方向 z 最大和最小值; $r_0(z)$ 是关于深度 z 的热分配系数。

为了对磨损轴面激光熔覆过程的三维非稳态温度场问题进行数学描述, 根据能量守恒定律与傅里叶热传导定律建立其三维非稳态导热微分方程, 在笛卡尔坐标系的形式为

$$\frac{\partial(\rho(T)C_p(T)T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \bar{q}_{laster}(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中, T 为温度坐标 x, y, z 和时间 t 的函数; K_i , C_p , 和 ρ 分别为材料在方向 i 上的热导率、比热容和密度; $\bar{q}_{laster}$ 为激光生热。

利用比热变化补偿流-固转换的相变潜热 C_p^m

$$C_p^m = \frac{L_f}{T_m - T_0} + C_p \quad (3)$$

式中, L_f 是熔化潜热; T_m 是熔化温度; T_0 是初始温度。

始末状态为

$$\begin{cases} T(x, y, z, t = 0) = T_0 \\ T(x, y, z, t = \infty) = T_0 \end{cases} \quad (4)$$

激光熔覆过程的热损失主要是热传导、热对流和热辐射, 故边界条件应为

$$\begin{aligned} K_x(T) \frac{\partial(T)}{\partial x} n_x + K_y(T) \frac{\partial(T)}{\partial y} n_y + \\ K_z(T) \frac{\partial(T)}{\partial z} n_z = \begin{cases} T_s(x, y, z, t) \\ q_s(x, y, z, t) \\ h(T_a - T_s) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, T_s 边界温度; q_s 外热源与表面的热流; T_a 是环境温度; h 是对流系数; n_x , n_y 和 n_z 边界外法线的方向余弦。

激光熔覆热应力的非线性本质是大温度梯度下的材料非均匀性热胀冷缩。根据假设, 在磨损轴面激光熔覆区域中任意点处的总应变 $\Delta\{\varepsilon\}$ 为

$$\begin{cases} \Delta\{\varepsilon\} = \Delta\{\varepsilon^e\} + \Delta\{\varepsilon^p\} + \Delta\{\varepsilon^{th}\} \\ \Delta\{\varepsilon^{th}\} = \alpha(T - T_{ref}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\Delta\{\varepsilon^e\}$ 、 $\Delta\{\varepsilon^p\}$ 和 $\Delta\{\varepsilon^{th}\}$ 分别为弹性应变、塑性应变和热应变; α 为膨胀系数; T 和 T_{ref} 分别为瞬时温度和参考温度。

轴上激光熔覆区域任意位置点处的塑性热应力 $\Delta\{\sigma\}$ 数学描述为

$$\Delta\{\sigma\} = [D]_{ep}(\Delta\{\varepsilon^{th}\} - \Delta\{\varepsilon^0\}) - \Delta\{\sigma^0\} \quad (7)$$

式中, $[D]_{ep}$ 是弹塑性矩阵; $\Delta\{\varepsilon^{th}\}$ 是材料热应变; $\Delta\{\varepsilon^0\}$ 是初始应变; $\Delta\{\sigma^0\}$ 是初始应力。激光熔覆轴的应力-应变关系为双线性随动强化模型。

2.2 激光熔覆过程有限元模型

激光熔覆轴由基体、过渡层和熔覆层组成, 其材料性能都与温度相关, 然而覆层材料 Fe 基合金粉末的高温性能参数缺少, 故粉末材料的性能参数通过 JMatPro 程序模拟获得, 如图 2 所示。其中材料密度 ρ 和泊松比 λ 受温度影响较小, 被简化为常值。

为了建立与实际工艺一致的有限元模型, 有限元网格分析采用了文献[16]的计算域虚拟规划策略及其算法对连续体离散分解, 并在熔覆层及热影响区利用双三角细化方法进行高密度的局部细化, 结果网格模型含 65 152 个单元, 如图 3 所示。此外, 为了满足粉末颗粒形状和覆层表面光整的假设, 模

图2 金属粉末材料的热物理性能参数

图3 激光熔覆轴的有序离散单元网格

型限定网格单元均为规则六面体单元(瞬态热分析用 SOLID70 单元, 非线性结构分析用 SOLID185 单元), 且排列与覆层形成过程匹配。

有限元模型的边界和载荷如下: ① 整体模型初始温度 T_0 为 20 °C; ② 热对流采用空气自然对流系数; ③ 热输入由圆锥体内的单元生热来模拟; ④ 右端装夹定位, 其节点自由度被全部约束。

设基体和粉末材料均满足双线性随动强化模型和屈服准则, 将瞬态温度场作为载荷进行非线性热耦合求解, 通过完全牛顿拉夫森平衡迭代及刚度矩阵修正法解析。多道覆层金属逐渐沉积过程的模拟是利用“单元生死法”按时序激活来实现的。

3 数值模拟结果与分析

3.1 温度场计算结果及分析

图 4 为磨损轴面激光熔覆过程的熔池温度及其形态。可见, 熔池温度和位置均随热源移动而变化, 半球形熔池区域逐渐演变为半椭球形区域, 且热源周围的等势线和温度梯度分布不平衡。在初始阶段 4.5 s 内, 熔池形状不稳定, 易导致基体金属未熔透现象, 宜采取热输入补偿来满足工艺要求。随着热循环在工件上累积热量, 熔池温度场分布达到平衡的准稳态, 激光照射区域的金属形成几乎不变的半椭球体熔池边界, 熔池温度梯度大、光斑中心位置

温度高达 2 000 °C, 熔池边界(1 350 °C)也透过了结合面。值得注意的是熔覆层始末端的几何边界对熔池形状产生影响, 有导致边界应力突变的可能。

图4 不同时刻的三维熔池的温度及其形态

为了获知熔覆区的冶金结合状态, 在界面上沿 Z 轴选取三个观测节点, 其瞬时温度如图 5 所示。可见, 激光照射到熔覆层某节点时, 熔覆层及基体被瞬时熔化, 即第一步 0.549 s 时光斑照射区的金属就被加热到 1 592.9 °C; 激光移开后该点快速冷却, 但测量点附近的结合界面最低温度却随着热循环有所增加, 热循环结束时工件急冷至室温。

图5 熔覆界面处节点的瞬时温度历程曲线

图 6 为磨损轴面激光熔覆过程的温度场。可见: ① 随着激光束移动, 熔覆层材料在磨损轴基体表面增材累积且温度场分布也随之改变; ② 模型的热影响区(HAZ)随着熔覆过程推进而逐步扩张, 基体的温度也被提高; ③ 进入冷却阶段, 模型的熔化区域迅速凝固并快速降温至室温。可知, 激光束持续热输入产生能量累聚使熔覆层金属和基体温度都得到

提升, 冷却阶段工件通过热传导、对流和辐射快速散热, 仅 0.1 s 后工件便从 2 035.99 °C 冷却至 1 341.76 °C, 熔池金属冷却至凝固态。

图6 磨损轴面激光熔覆过程的温度分布

3.2 热应力计算结果及分析

图 7 为第 1 道熔覆层与基体结合界面处节点 N_1 的等效应力历程曲线。可见: ① 激光熔覆热应力经历了先升后降的多次循环, 最后随着冷却逼近至某

图7 熔覆层界面上节点 N_1 的瞬时等效应力历程

数值范围; ② 在热应力循环演变过程中, 弹-塑性应力也不断转换, 形成约 290 MPa 的激光熔覆工艺应力。

图 8 为磨损轴面激光熔覆应力云图。可见激光熔覆开始时, 熔池的热应力较小, 随着金属粉末逐渐沉积到外圆柱面上, 整轴热应力不断演化且随着载荷步增加而增大, 热应力使材料发生部分屈服(≥ 385 MPa)。冷却后, 轴上熔覆层与基体结合区域的残余应力较大, 其最大主应力为 279 MPa, 应力周向分布差异小, 应力分布规律与瞬时熔覆温度梯度基本吻合。

图 8 激光熔覆过程应力及主应力分布云图

图 9 为激光熔覆轴上观测点 $N_x(x=0,1,\dots,4)$ 的残余应力统计结果。可知, 测量点的轴向、环向应力均表现为拉应力, 其原因在于冷却收缩受拉; 与靠近熔覆层边沿的基材相比, 熔覆层上轴向应力均较高且不相等, 两侧边沿的应力比中间部位高, 其原因在于熔覆层边沿材料和几何不连续, 这也是诱导熔覆层边沿产生微裂纹或者开裂的主因; 在受冷收缩时轴面环向也会产生拉应力, 但环向应力比轴向低, 环向最大应力在覆层中部, 其值为 146 MPa。

图 9 激光熔覆轴上观测点的残余应力

综上所述, 轴上的激光熔覆残余应力产生是复

杂的动态热应力演化的结果, 激光熔覆残余应力整体为拉应力, 熔覆层两端边沿比中间高。

4 激光熔覆残余应力验证试验

激光熔覆轴历经了复杂的热力耦合过程, 工艺残余应力形成过程复杂, 所以利用小孔法进行残余应力试验, 验证轴面激光熔覆残余应力模拟的准确性。试验过程中, 利用砂轮和金相砂纸对激光熔覆表面打磨并清洁处理, 将汉中精测电器公司生产的 BF 120-2CA-K 型 $0^\circ-45^\circ-90^\circ$ 三轴应变花(敏感栅长度 2 mm, 灵敏系数 $2.2\pm1\%$)贴于轴的熔覆层表面(SX-610 应变胶粘剂), 最后在检测点(N_0-4 ; P_1-4)位置钻削小孔 $\phi \times H=2.5$ mm $\times$ 2 mm, 瞬时钻深与应变值由自开发程序自动记录, 试验如图 10 所示。

图 10 激光熔覆残余应力验证试验

为了避免钻孔对应力的影响, 采用在远离激光熔覆部位钻孔获得的应变值来修正释放应变。根据应变片的结构和尺寸, 采用如下残余应力计算式

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{\max} &= \eta \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \nu \cdot K_2 / K_1} - \frac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2}}{1 + \nu \cdot K_2 / K_1} \right] \\ \sigma_{\min} &= \eta \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \nu \cdot K_2 / K_1} + \frac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2}}{1 + \nu \cdot K_2 / K_1} \right] \\ \beta &= 0.5 \arctan \left(\frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \\ \eta &= \frac{0.5E}{32.8 - 36.0\phi + 14.8\phi^2 - 2.15\phi^3} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中, $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 和 β 分别为最大应力、最小应力和应力夹角; ε_1 、 ε_2 和 ε_3 分别为应变片记录的释放应变; η 是与孔径 ϕ 有关的经验表达式, $\nu \cdot K_2 / K_1$

取 0.32。

将测量应变计算后获得的最大应力转换到轴向和环向两向应力, 计算公式如下

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{\max} \cos^2 \beta + \sigma_{\min} \sin^2 \beta \\ \sigma_y = \sigma_{\max} \sin^2 \beta + \sigma_{\min} \cos^2 \beta \end{cases} \quad (9)$$

图 11 为在检测点 $N_0(P_1)$ 处所获残余应力随钻孔深度变化曲线。可见, 随着钻孔深度增加残余应变逐渐被释放, 产生的残余应力逐渐增大。在钻孔深度小于等 0.6 mm 时轴向与环向应力值均低于 50 MPa, 增量较小; 深度大于 0.6 mm 时应力值快速增大, 并逐步稳定到 130~210 MPa 范围, 其中轴向拉应力比增环向拉应力增加更快。

图 11 $N_0(P_1)$ 点残余应力与钻孔深度的关系

图 12 为轴上测试点的残余应力曲线。受零件尺寸和应变花大小限制, 测试点无法均匀分布, 测试

图 12 测试点残余应力分布

点间距见图 10 所示。图 12a 为轴向 5 个检测点的残余应力分布。轴向拉应力成“M”形分布, 激光熔覆层起止两端的轴向应力较高(为 262 MPa 和 220 MPa), 熔覆层中部残余应力偏低(193 MPa), 基体靠近覆层附近存在低于 100 MPa 的残余应力; 环向应力表现为成“Λ”形分布的拉应力, 环向拉应力主要集中在熔覆层上, 基体应力较小。图 12b 为圆周 4 个检测点的残余应力分布。可见, 圆周检测点上的轴向和环向应力分布规律相似, 轴向拉应力高于环向拉应力, 但数值均低于 193 MPa; 综上可见, 激光熔覆残余应力约为 0.5 倍材料屈服应力。

为了验证激光熔覆残余应力数值模拟的准确性, 选取轴向 5 点的应力进行比较分析, 如图 13 所示。可见, 数值模拟和试验测量结果具有较好的一致性, 但模拟值比试验值略微偏高, 偏差值 10% 左右, 可能原因是应变片粘贴表面处理产生了局部应力释放和测量系统误差所致。

图 13 轴向 5 点残余应力模拟值与试验值的比较

5 结论

(1) 提出了一种磨损轴激光熔覆过程热力耦合问题分析的数值方法。该方法再现了磨损轴面激光熔覆生热及热应力产生过程, 通过瞬时熔池形态、节点温度和激光熔覆工艺应力模拟, 揭示了磨损轴面激光熔覆残余应力的产生机制及分布规律。

(2) 建立一种基于小孔法的磨损轴激光熔覆应力试验测试方法。该方法利用应变释放原理测得熔覆层的最大残余应力为 262 MPa, 并获得了熔覆层应力沿着轴向和环向的分布规律, 也证明了数值模拟的正确性。

(3) 在磨损轴面的熔覆层起止部位残余应力较大, 工艺控制不当容易造成端部产生微裂纹缺陷或开裂失效, 分析结果对轴类零件实际激光熔覆加工具有一定的指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- [1] 孔源, 刘伟军, 王越超, 等. 钛合金激光直接成形过程中热力耦合场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 74-82.
KONG Yuan, LIU Weijun, WANG Yuechao, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field of direct laser metal deposition shaping process of titanium alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 74 - 82.
- [2] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. An experimental numerical investigation of heat distribution and stress field in single-and multi-track laser cladding by a high-power direct diode laser[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 63: 154-168.
- [3] WANG Dengzhi, HU Qianwu, ZHENG Yinlan, et al. Study on deposition rate and laser energy efficiency of laser-induction hybrid cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 77: 16-22.
- [4] CALLEJA A, TABERNERO I, EALO J. Feed rate calculation algorithm for the homogeneous material deposition of blisk blades by 5-axis laser cladding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74: 1219-1228.
- [5] ZHANG Ping, MA Lin, YUAN Jin-ping. Analysis of stress and strain fields of laser cladding process on ring circular orbit[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 16(3): 296-301.
- [6] PALUMBO G, PINTO S, TRICARICO L. Numerical finite element investigation on laser cladding treatment of ring geometries[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 1443-1450.
- [7] TURŇA M, TARABA B, AMBROŽ P, et al. Contribution to numerical simulation of laser welding[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 638-645.
- [8] 任会芳, 任家隆, 王青仙. 柴油机曲轴裂纹激光熔覆修复材料选择的仿真研究[J]. 徐州工程学院学报, 2013, 28(3): 69-73.
REN Huifang, REN Jialong, WANG Qingxian. Simulation analysis on the laser cladding repair material selection of diesel engine crankshaft crack [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology, 2013, 28(3): 69-73.
- [9] 贾文鹏, 林鑫, 谭华. TC4 钛合金空心叶片激光快速成形过程温度场数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(7): 1193-1199.
JIA Wenpeng, LIN Xin, TAN Hua, et al. Numerical simulation for temperature field of TC4 titanium alloy hollow blade during laser rapid forming process[J]. Metal Materials and Engineering, 2007, 36(7): 1193-1199.
- [10] 李德英, 张坚, 赵龙志, 等. 超声辅助激光熔覆 SiC/316L 温度场和应力场分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(5): 35-39.
LI Deying, ZHANG Jian, ZHAO Longzhi, et al. Analysis on temperature and stress of SiC/316L coating by ultrasonic-assisted laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(5): 35-39.
- [11] 胥国祥, 武传松, 秦国梁. 铝合金 T 型接头激光+GMAW 复合热源焊温度场的有限元分析[J]. 金属学报, 2012, 48(9): 1033-1041.
XU Guoxiang, WU Chuansong, QIN Guoliang. Finite element analysis of temperature field in laser+GMAW hybrid welding for T-joint of aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 36(7): 1193-1199.
- [12] BRÜCKNER F, LEPSKI D, BEYER E. Modeling the influence of process parameters and additional heat sources on residual stresses in laser cladding[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(3): 355-373.
- [13] HUSSAM E, BRUNO C, SAMUEL B, et al. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 413-422.
- [14] 封慧, 李剑峰, 孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 1-5.
FENG Hui, LI Jianfeng, SUN Jie. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 1-5.
- [15] SIVA S N, BUVANASHEKARAN G, SANKARANARA Y K. Some studies on weld bead geometries for laser spot welding process using finite element analysis[J]. Mater Design, 2012, (34): 412-426.
- [16] 曹华军, 舒林森, 许磊, 等. 复杂机械零件的六面体有限元网格生成方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 113-118.
CAO Huajun, SHU Linsen, XU Lei, et al. Hexahedral mesh generation method for complex mechanical structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 113-118.

作者简介: 舒林森, 男, 1982 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为再制造工艺、结构可靠性分析。
E-mail: shulinsen19@163.com