

基于光束离散的激光相变硬化蠕墨铸铁 应力场数值模拟

庞铭*, 谭雯丹

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 为了研究基于光束离散的激光相变硬化蠕墨铸铁 RuT300 材料的应力分布状态, 构建了离散激光相变硬化 RuT300 弹塑性本构模型, 分析温度对热应力和残余应力的影响。结果表明: 材料表面较大的热压应力分布与二维离散点阵光斑相对应, 激光快速加热引起的材料各部分温度差异使得模型 X 轴路径上的热应力呈波浪形分布, 离散光斑加载区域的 X、Y 方向热应力峰值为 -635 MPa, 约为 Z 方向的 1.8 倍, 随着深度的增加, 模型截面热应力逐渐降低; 材料表面激光加载区域的残余应力大于非加载区域, X、Y 方向的残余拉应力为主要残余应力, 应力值在 200 MPa 左右, X 轴路径上 X 方向的残余应力最大; 随着激光功率的增加, 残余应力峰值增大, 材料受较大残余应力影响的区域扩大, 延长激光加热时间时, 加载区域残余应力峰值的变化幅度在 2.4 MPa 内。

关键词 激光技术; 光束离散; 相变硬化; 应力场; 蠕墨铸铁; 数值模拟

中图分类号 TG156.33

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.231403

Numerical Simulation of Stress Field of Laser Phase Transformation Hardening Vermicular Graphite Cast Iron Based on Beam Discretization

Pang Ming*, Tan Wendan

Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract Herein, the stress distribution state of laser phase transformation hardening vermicular graphite cast iron RuT300 is studied based on beam discretization using a constructed elastic-plastic constitutive model of the discrete laser phase transformation hardening RuT300. Additionally, the model considers the effect of temperature on thermal stress and residual stress. The results demonstrate that the large thermal stress on the material's surface corresponds to a two-dimensional discrete lattice spot. Since rapid laser heating causes each part of the material to experience a different temperature, the thermal stress distribution is wavy along the X-axis path of the model. The maximum thermal stress in the X and Y directions of the discrete spot loading region is found to be -635 MPa, which is 1.8 times that found in the Z direction. In each section of the model, the thermal stress decreases gradually with an increase in the depth; the residual stress value in the laser loading region on the surface of the material is larger than that in the nonloading region. The residual tensile stresses in the X and Y directions of the model constitute the primary residual stress, with a value of approximately 200 MPa. The residual stress in the X direction along the X-axis path is the largest among the three directions. As the laser power increases, the peak residual stress value increases, and the area of the material affected by large residual stresses increases. However, when the laser heating time is prolonged, the change in the peak residual stress value in the loading region is within the range of 2.4 MPa.

Key words laser technique; beam discretization; phase transformation hardening; stress field; vermicular graphite cast iron; numerical simulation

OCIS codes 140.3460; 140.3300; 140.3538

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(U1633111, 51206179)、内蒙古自然科学基金(2017MS0540)、中央高校基本科研业务费资助项目(201911)、中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122018D020)、中国民航大学蓝天青年科研资金资助

* E-mail: pangming1980@126.com

1 引言

蠕墨铸铁(RuT300)具有优良的高温力学性能,但硬度低、不耐磨^[1-2],为了提高蠕墨铸铁在特定工况下的耐磨性,工程上采用表面改性工艺提高其表面硬度,现有的工艺方法主要有高频感应相变硬化、电子束相变硬化和激光相变硬化等。高频感应适合对工件整体进行相变硬化;电子束需要使用真空箱,对相变硬化的试样大小有限制;激光具有功率密度高、能量时间和空间分布可控的优点,适合对硬化区域质量进行精确控制^[3-6]。现有的硬化工艺主要对材料表面进行整体硬化,特定使用环境下的蠕墨铸铁不仅要求其表面具有一定的硬度以抵抗冲击磨损,同时要求其表面具备一定的韧性以承受较大的冲击,因此,可以通过二元光学元件对激光束进行整形和变换。

在激光相变硬化过程中,激光束经变换后可以形成二维离散点阵及功率密度均匀分布的光斑^[7-8],与连续激光扫描方式不同,采用激光束经离散整形后的相变硬化工艺,可使硬化区表面具有强韧结合性,提高蠕墨铸铁在高冲击磨损下的使用寿命。然而,离散激光束对材料表面进行改性处理会对裂纹的形成产生影响。李正阳等^[9]对42CrMo钢基体材料进行激光点状合金化,该工艺从总体上提高了材料的疲劳寿命,降低了疲劳裂纹的扩展速率;王海龙^[10]采用激光点状合金化处理球墨铸铁表面,分析了材料表面裂纹以及裂纹萌生和扩展能够得到阻滞的原因;Spranger等^[11]首先在AISI D2工具钢表面预涂覆TiB₂涂层,通过离散激光辐照材料表面,发现在特定的激光参数范围下存在裂纹区域。

目前,针对工程上采用离散相变硬化方法对蠕墨铸铁 RuT300 材料强化时出现的裂纹敏感性等问题的研究鲜有报道。因此,本文通过研究离散相变硬化参数对蠕墨铸铁 RuT300 相变硬化热应力和残余应力的影响规律,为工程上参数的优选提供参考。

2 有限元模型

2.1 有限元网格模型

激光相变硬化应力场数值模拟模型的材料为 RuT300 蠕墨铸铁,其屈服强度、弹性模量、泊松比以及热膨胀系数如表 1 所示^[12]。

表 1 RuT300 的力学性能参数

Temperature / °C	25	200	400	600	800	1000
Yield strength / MPa	240	221	200	178	157	40
Elastic modulus / GPa	145	140	135	129	124	100
Poisson ratio	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
Thermal expansion coefficient / (10 ⁻⁶ · °C ⁻¹)	10.6	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5

三维有限元仿真模型的尺寸为 6 mm × 6 mm × 3 mm,采用离散小光斑直径为 0.5 mm,光斑间距为 0.1 mm 的二维点阵激光束在模型上表面进行相变硬化处理,激光热源为平顶热源,每个子光斑内的功率密度^[13]为

$$q = \frac{\eta P}{25\pi R^2}, \quad (1)$$

式中: q 为激光光子光斑功率密度; η 为材料对激光的吸收率; P 为激光功率; R 为子光斑半径。

选用尺寸为 0.1 mm 的网格进行模型整体划分,有限元模型及网格划分结果如图 1 所示。

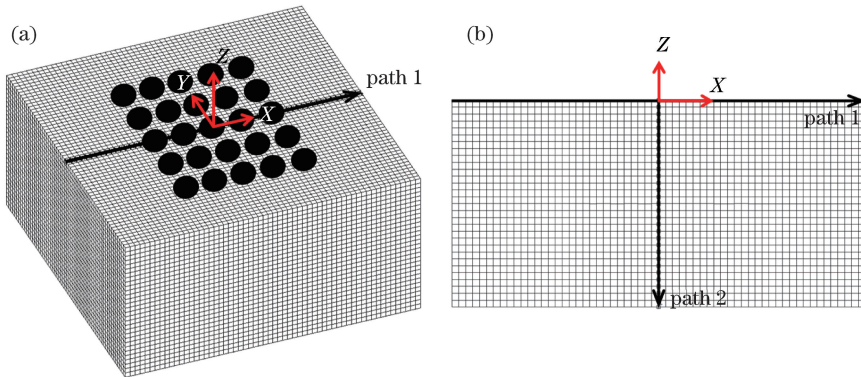


图 1 有限元网格模型。(a)三维模型;(b) X-Z 截面

Fig. 1 Finite element mesh model. (a) Three-dimensional model; (b) X-Z section

2.2 数学模型

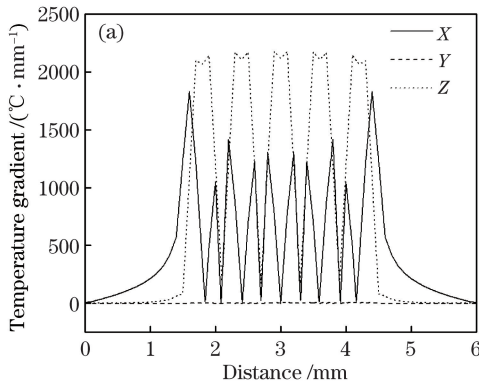
激光相变硬化过程中产生的应力主要有热应力

和相变应力,激光热作用引起的温度变化会产生热应力,相变硬化处理过程中的组织转变会产生相变应

力,热应力和相变应力共同决定材料的残余应力分布^[14-15]。应力会引起材料发生弹塑性变形,当材料受力超过其屈服强度时,就会发生塑性变形,因此对基于激光光束离散的相变硬化应力场模型进行求解时,需要引入结构单元内的弹塑性本构平衡方程^[16-17]。

2.3 边界条件

取激光相变硬化过程的环境温度为 25 °C,将有限元模型各节点在整个相变硬化过程及模型整体冷却至室温过程中的瞬态温度场结果^[13]作为边界载荷,通过温度场和应力场的间接耦合,计算激光相变硬化 RuT300 热应力场和残余应力场。数值模拟时,根据蠕墨铸铁试样实际激光相变硬化的实验情



况对有限元模型施加位移边界条件,在模型的底面约束其沿 Z 方向的位移。

3 模拟结果分析与讨论

3.1 温度梯度分布

基于光束离散的激光相变硬化 RuT300 应力场的数值模拟采用的激光参数如下:功率为 5000 W,加热时间为 0.1 s,各离散光斑内的功率密度相同且均匀分布。在激光加载结束时,图 1 中 2 条选取路径上的温度梯度分布如图 2 所示,分析路径 1 和路径 2 上 X、Y、Z 方向的温度梯度,其中 X、Y 方向的温度梯度取绝对值。

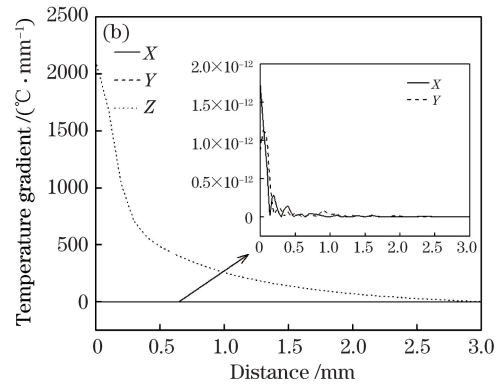


图 2 2 条路径上的温度梯度分布。(a)路径 1;(b)路径 2

Fig. 2 Temperature gradient distributions on two paths. (a) Path 1; (b) path 2

从图 2 可以看到,路径 1 和路径 2 激光加载区域 Z 方向的温度梯度最大,最大值约为 2150 °C/mm,说明温度沿模型截面深度方向的变化剧烈,这是因为激光表面加载区域在 X、Y 方向存在离散光斑温度场的叠加,且 Z 方向温度梯度较大区域主要为离散激光束的加载区域及模型表面。由于路径 1 沿 X 轴,故该路径 Y 方向的温度梯度几乎为 0,且各小光斑中心点与其周围区域相比,温度最高,在该点附近热量传导迅速,各中心点的 X 方向温度梯度非常小,几乎为 0。路径 1 上距离坐标原点最远的两个光斑的中心点与其外侧材料受温度场叠加的影响最低,导致某一位置的温度变化最大, X 方向温度梯度最大,达到 1833.9 °C/mm,如图 2(a)所示;图 2(b)中,路径 2 的 X、Y 方向温度梯度较大值同样出现在激光加热表面区域,且随着深度的增加,温度变化趋于平缓,温度梯度迅速减小。

3.2 热应力分布

图 3 为激光加载结束时刻模型 X、Y、Z 方向的瞬时(0.1 s 时刻)热应力分布云图。从图 3 可以看

到,离散光斑加载区域及附近区域的热应力为压应力,较大的压应力呈现离散的点阵分布状态, X、Y 方向的热应力分布大体相似,只是方向不同, X 方向的热应力在 X 轴上下两侧, Y 方向的热应力在 Y 轴左右两侧均存在一小部分拉应力,这是因为激光加载区域材料受到高温快速加热后,与周围区域温度差异较大,各区域材料热膨胀变形不一致,在模型内部各区域之间的相互约束以及模型整体结构约束的综合影响下,加载区域产生较大的离散压应力,而拉应力的出现遵循力学平衡原理。

在模型热应力分布云图的基础上,进一步分析图 1 中 2 条所选路径上的热应力分布,结果如图 4 所示。由图 4(a)可知,路径 1 上的热应力分布整体与图 3 相对应,由于各激光相变硬化区域温度的差异, X、Y、Z 方向的热应力大体呈现波浪形分布,激光加载区域的 X、Y 方向热压应力值较大,应力峰值均为 -635 MPa,为 Z 方向应力值的 1.8 倍,这是因为在数值模拟中,模型底面受位移约束,但上表面在 Z 轴方向上处于自由状态,所以材料 Z 方向热膨胀变形所受的阻力相对较小,受模型结构约

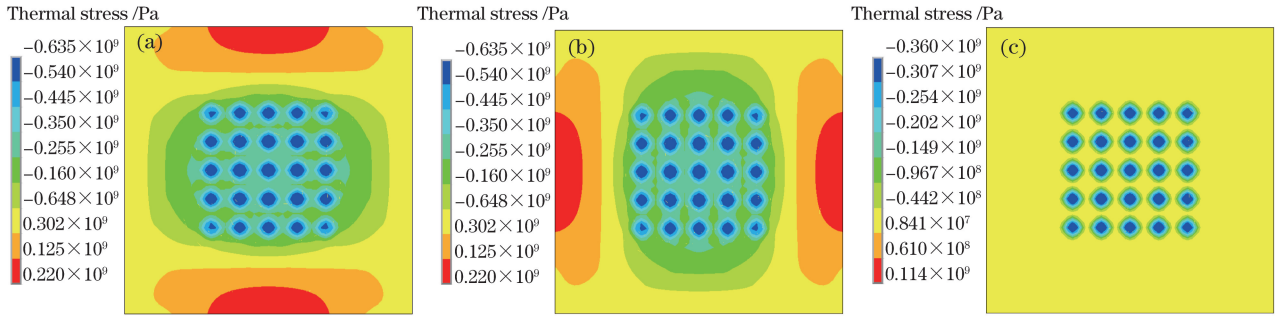


图 3 3 个方向的热应力分布云图。(a) X 方向;(b) Y 方向;(c) Z 方向

Fig. 3 Thermal stress distribution nephograms in three directions. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

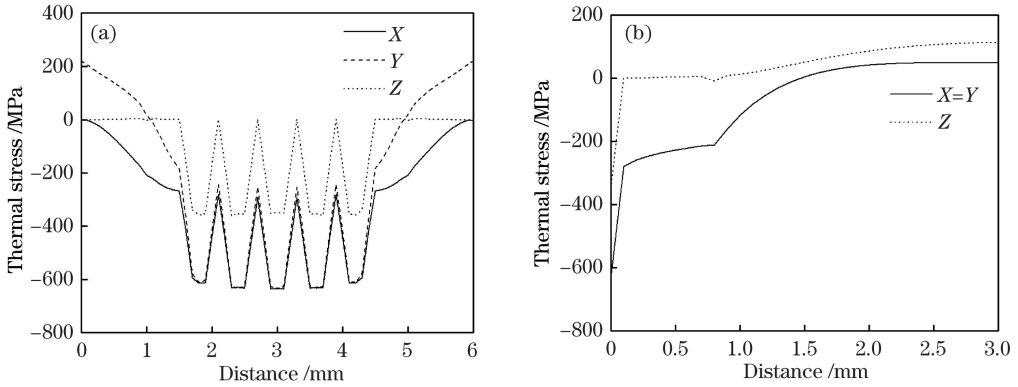


图 4 2 条路径上的热应力分布。(a) 路径 1;(b) 路径 2

Fig. 4 Thermal stress distributions on two paths. (a) Path 1; (b) path 2

束的影响,X、Y 方向的热应力高于 Z 方向。由图 4(b) 可知,模型 Z 轴沿截面深度方向上,X、Y 方向的热应力相等,大于 Z 方向的热应力,且材料表面热应力较大,随着深度的增加,应力逐渐减小并趋于平缓。

3.3 残余应力分布

由高温、高温度梯度和材料相变等引起的过大残余应力是材料表面经激光改性处理后产生变形裂

纹的主要原因之一,研究激光相变硬化残余应力分布可以预测硬化区域的裂纹敏感性^[18-19]。图 5 为模型冷却后得到的 X、Y、Z 方向的残余应力分布云图,可以看出,残余应力主要为拉应力,激光加载区域及其周围区域的应力值较大,这是因为激光加载结束后,材料快速冷却过程中该区域发生了较大塑性变形,难以恢复至原状,并在附近弹性变形材料的作用下,产生较大的残余拉应力。

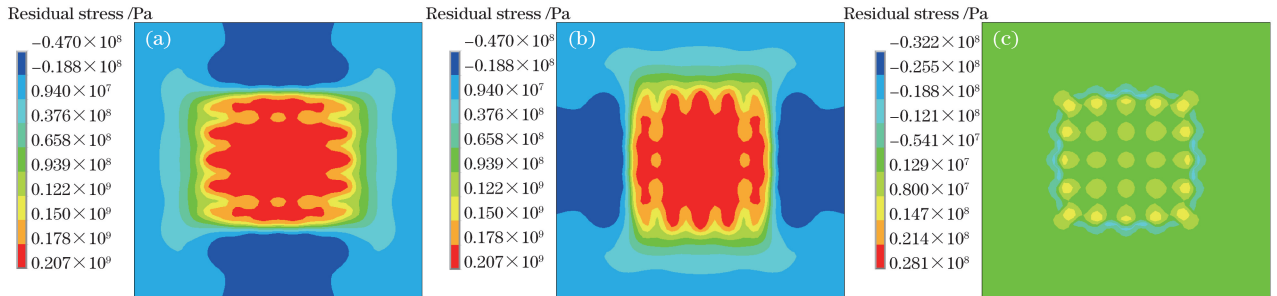


图 5 3 个方向的残余应力分布云图。(a) X 方向;(b) Y 方向;(c) Z 方向

Fig. 5 Residual stress distribution nephograms in three directions. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

沿图 1 中 2 条路径的残余应力分布如图 6 所示,可以看到,激光加载区域的 X、Y 方向残余拉应力值(约 200 MPa)远大于 Z 方向残余拉应力值(约

10 MPa)。从图 6(a)可以看出,路径 1 的 3 个方向残余应力分布左右对称,随着两侧与激光加载区域距离的不断增大,残余应力迅速降低,Y、Z 方向残

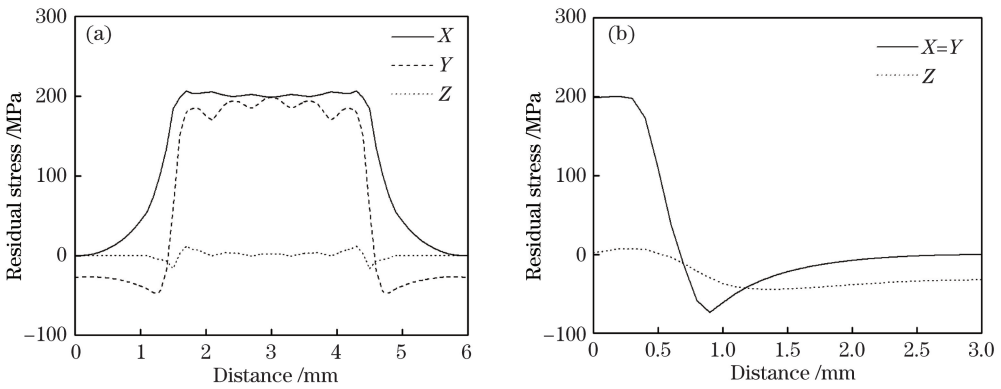


图 6 2 条路径上的残余应力分布。(a) 路径 1; (b) 路径 2

Fig. 6 Residual stress distributions on two paths. (a) Path 1; (b) path 2

余应力甚至出现压应力。总体来看,受温度、温度梯度、模型结构以及材料组织转变的影响,该路径上激光加载区域的残余拉应力变化幅度较小。图 6(b) 所示为模型截面深度方向残余应力的分布情况,可以看出, X、Y 方向的残余应力完全相等,且在材料表面存在较大的残余拉应力,随着与表面距离的不断加大,截面上拉应力减小,距离表面 1 mm 附近区域的应力变为残余压应力,符合力的平衡原则,即材料表面残余拉应力和材料内部残余压应力达到相互平衡^[20],随着深度的增加,应力值趋于零。

3.4 激光参数对残余应力分布的影响

通过改变激光工艺参数可以改变残余应力的分布。在对基于光束离散的激光相变硬化 RuT300 残余应力场进行分析后发现,路径 1 上的

X 方向残余应力值最大,因此,可以讨论激光参数的变化对路径 1 的 X 方向残余应力的影响。图 7 所示为不同激光功率(加热时间为 0.1 s)和不同加热时间(激光功率为 4500 W)下路径 1 上的残余应力分布。随着激光功率的增加,残余应力峰值增大,这是因为当激光功率较大时,热量输入增多,材料塑性变形量增加, X 方向残余应力增大;同时,加载区域的应力分布逐渐变得平滑,峰值应力位置也由靠近中部区域向两侧区域过渡,并逐渐向外扩展,说明材料受激光作用影响的区域扩大^[21]。随着激光加热时间的增加,激光作用区域的残余应力峰值变化很小,仅在 2.4 MPa 范围内波动,但整个路径的中间区域应力值随加热时间的延长而逐渐降低。

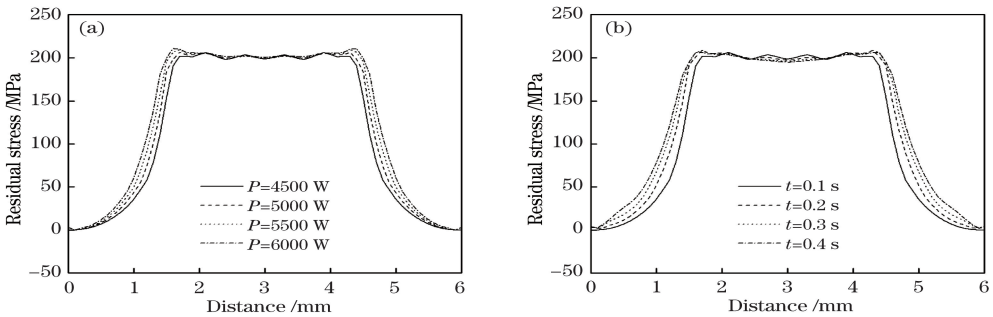


图 7 不同激光参数下路径 1 上的残余应力分布。(a) 变激光功率; (b) 变激光加热时间

Fig. 7 Residual stress distributions on path 1 under different laser parameters. (a) Different laser power; (b) different laser heating time

4 结 论

利用激光束经二元光学元件变换后形成的二维离散点阵圆形光斑,对蠕墨铸铁 RuT300 材料进行相变硬化处理,将温度场模拟结果加载到有限元模型中,分析了材料的应力场分布情况。结果表明,模型的 Z 方向温度梯度在 3 个方向中最大,达到

2150 °C/mm 左右,平行于 X 轴的 X 方向温度梯度在两个外侧光斑的外边缘存在最大值;受模型整体结构约束的影响, X、Y 方向的热应力和残余应力均大于 Z 方向,材料经激光加热后,表面的热应力处于离散分布状态且主要为压应力,各光斑所在区域的热应力较大,材料冷却后形成残余应力,在温度、温度梯度、材料相变和结构约束的综合作用下,激光

加载区域出现较大的残余拉应力;提高激光功率会使材料表面的峰值残余应力增加,受较大应力影响的区域扩大,而随着激光加热时间的增加,较大残余应力的激光加载区域应力峰值的变化范围很小。

参 考 文 献

- [1] Pina J C, Shafqat S, Kouznetsova V G, *et al.* Microstructural study of the mechanical response of compacted graphite iron: an experimental and numerical approach [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 658: 439-449.
- [2] Kim S, Cockcroft S L, Omran A M, *et al.* Mechanical, wear and heat exposure properties of compacted graphite cast iron at elevated temperatures [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 487 (1/2): 253-257.
- [3] Tan W D, Pang M, Jiang G Y, *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.
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.
- [4] Wu W P, Liu J W, Wang H, *et al.* Microstructure and tribological performance of NiAl-SiC composite coating by laser cladding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091406.
吴王平, 刘剑文, 王辉, 等. 激光熔覆 NiAl-SiC 复合涂层的组织与摩擦性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091406.
- [5] Wang H J, Li Y L, Li P. Orthogonal experiment on laser cutting of AZ31B magnesium aluminum alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55 (10): 101405.
王洪建, 李永亮, 李平. 激光切割 AZ31B 镁铝合金正交实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55 (10): 101405.
- [6] Liu Y N, Sun R L, Zhang T G, *et al.* Effect of CeO₂ content on microstructure and properties of laser clad self-lubricant coatings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 111401.
刘亚楠, 孙荣禄, 张天刚, 等. CeO₂ 含量对激光熔覆自润滑涂层微观组织和性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 111401.
- [7] Yu G, Nie S Z, Zheng C Y, *et al.* Beam transformation technology of pixellated Dammann grating in laser processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(11): 1841-1847.
虞钢, 聂树真, 郑彩云, 等. 用于激光加工中的矩形孔径 Dammann 光栅光束变换技术[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1841-1847.
- [8] Ba F H, Gan C H, Wu W, *et al.* Study of surface modification by pulse laser of ductile iron [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(7): 663-667.
巴发海, 甘翠华, 吴炜, 等. 球铁材料脉冲激光表面强化的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(7): 663-667.
- [9] Li Z Y, Zhong M L, Zhang H J, *et al.* Effect of laser spot alloying 42CrMo steel on the fatigue crack growth rate [J]. *Applied Laser*, 2007, 27(1): 1-4.
李正阳, 钟敏霖, 张红军, 等. 激光点状合金化对 42CrMo 钢疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. *应用激光*, 2007, 27(1): 1-4.
- [10] Wang H L. The investigation on spot array laser alloying on nodular cast iron hot roller [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
王海龙. 球墨铸铁热轧辊表面激光点状合金化技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [11] Spranger F, Hilgenberg K. Dispersion behavior of TiB₂ particles in AISI D2 tool steel surfaces during pulsed laser dispersing and their influence on material properties [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 467/468: 493-504.
- [12] Pang M, Tan W D, Fu W, *et al.* Numerical simulation study on stress field of laser transformation hardening vermicular graphite cast iron valve seat [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(24): 218-222, 225.
庞铭, 谭雯丹, 付威, 等. 激光相变硬化蠕墨铸铁气门座应力场数值模拟研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(24): 218-222, 225.
- [13] Pang M, Tan W D. Numerical simulation of temperature field during laser transformation hardening vermicular graphite cast iron based on beam discretization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 191404.
庞铭, 谭雯丹. 基于光束离散的激光相变硬化蠕墨铸铁温度场数值模拟[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 191404.
- [14] Zhang Z. Numerical simulation of laser transformation hardening on the inner wall of pump barrel and study on the mechanism of rapid nitriding [D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2013.
张哲. 泵筒内壁激光相变硬化数值模拟及催渗机理

- 研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2013.
- [15] Zhang Z, Han B, Wang Y, *et al.* Effects of the shape of workpiece on temperature and stress field distribution during laser transformation hardening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0803001.
张哲, 韩彬, 王勇, 等. 工件形状对激光相变硬化温度场和应力场的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0803001.
- [16] 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.
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.
- [17] Bian H Y, Zhai Q X, Qu S, *et al.* The evolution of temperature field and stress field in laser deposition repair GH4169 with substrate preheating[J]. Applied Laser, 2017, 37(3): 327-332.
卞宏友, 翟泉星, 曲伸, 等. 基体预热下激光沉积修复 GH4169 合金温度场和应力场演变[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 327-332.
- [18] Yao G F, Chen G N. Numerical simulation of transient thermal field and residual stress in laser melting process [J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 241-243, 222.
姚国凤, 陈光南. 激光熔凝加工中瞬时温度场及残余应力数值模拟[J]. 应用激光, 2002, 22(2): 241-243, 222.
- [19] Li M Y, Han B, Cai C B, *et al.* Numerical simulation on temperature and stress fields of laser clad Ni-based coating [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(5): 25-28, 32, 114.
李美艳, 韩彬, 蔡春波, 等. 激光熔覆镍基合金温度场和应力场数值模拟[J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 25-28, 32, 114.
- [20] Gu J Q, Luo F, Yao J H. Numerical simulation of residual stress during laser cladding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(10): 101401.
顾建强, 骆芳, 姚建华. 激光熔覆过程残余应力的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(10): 101401.
- [21] Wen S, Dong A P, Lu Y L, *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.
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.