

文章编号: 0258-7025(2008)04-0625-06

42CrMo 钢表面单道激光宽带处理后熔凝层的残余应力

占焕校^{1,2} 王 勇¹ 韩 涛¹ 韩 彬¹

(¹ 中国石油大学(华东) 机电工程学院材料科学与工程系, 山东 东营 257061; ² 大庆石油管理局, 黑龙江 大庆 163453)

摘要 基于有限元软件 SYSWELD 平台, 建立激光熔凝三维有限元模型, 编制宽带热源的 FORTRAN 子程序, 采用不同的工艺参数对 42CrMo 钢表面的单道激光宽带熔凝区的组织和残余应力进行数值计算与分析。测定了激光熔凝表层的热循环曲线, 利用扫描电镜(SEM)观察熔凝区相变。结果表明, 工艺参数对熔凝区残余应力分布状态影响较大, 激光能量密度(ρ_E) 过高或过低, 均影响熔凝层的表面成型质量; 当激光束输出功率为 3500 W, 扫描速率在 600~1000 mm/min 时(即 $\rho_E = 20.9 \sim 35.0 \text{ J/mm}^2$), 熔凝区可获得有利的残余应力分布。42CrMo 钢母材组织为铁素体+珠光体, 经激光处理后, 熔凝区组织转变生成的马氏体相比例高达 95% 以上。

关键词 激光技术; 激光熔凝; 宽带热源; 热循环; 残余应力; 马氏体相变

中图分类号 TG 156.99 文献标识码 A

Residual Stress Analysis of the Remelting Zone on 42CrMo Steel Plate in Single-Pass Laser Wide-Band Treatment

Zhan Huanxiao^{1,2} Wang Yong¹ Han Tao¹ Han Bin¹

(¹ College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

² Daqing Petroleum Administrative Bureau, Daqing, Heilongjiang 163453, China

Abstract Based on SYSWELD finite element code, a three-dimensional finite element model for laser remelting process was created, the wide-band heat source model implemented by a FORTRAN subroutine was developed to simulate the single-pass laser wide band remelting process on 42CrMo steel, and predict residual stresses of the remelting zones with different technological parameters were estimated and analyzed. The thermal cycle was measured by temperature measuring equipment and phase transformation was observed by scanning electron microscopy (SEM). The results showed that technological parameters has a great influence on the residual stress distribution of the remelting zone, the superficial processability of the laser remelting zone is bad whether the laser energy input density is too high or too low. The favorable residual compressive stress in the remelting zone can be achieved when the laser output power is 3500 W, the scanning rate is ranged from 600 mm/min to 1000 mm/min, that is, the energy input density is within $20.9 \sim 35.0 \text{ J/mm}^2$. After the processing, the initial ferrite-pearlite microstructure of the matrix is transformed to martensite phase with the proportion higher than 95%.

Key words laser technique; laser remelting; wide band heat source; thermal cycle; residual stress; martensite transformation

1 引 言

激光熔凝技术在工业生产中得到了广泛应用, 如轧辊、模具等工件表面经过激光熔凝强化及修复

后, 使用性能和寿命均显著提高。与其他表面强化技术相比(如热喷涂、堆焊、镀合金等), 能量有效利用率较高, 热影响区和热变形更小, 耐腐蚀性能和硬

收稿日期: 2007-08-12; 收到修改稿日期: 2007-11-07

基金项目: 山东省自然科学基金(Y2006F64)和中国石油大学研究生科研创新基金(S2007-5)资助项目。

作者简介: 占焕校(1983—), 男, 江西人, 硕士研究生, 主要从事材料失效与防护、激光加工及数值模拟方面的研究。

E-mail: J_ever@163.com

导师简介: 王 勇(1964—), 男, 山东人, 教授, 博士生导师, 主要从事金属失效分析与材料的表面喷焊、电弧喷涂、激光熔敷等表面改性等方面的研究。E-mail: wangyong@hdpu.edu.cn

度均大幅度提高,且涂层因冶金焊合而结合强度更高^[1~6]。因此,激光熔凝工艺在新材料制备、工件表面强化、零件修复等领域具有广阔的应用前景。

在激光熔凝过程中产生了一系列复杂的传热、传质现象,如与温度有关的材料相转变(如熔化、挥发、组织转变),瞬态激光束吸收和反射,在迅速加热和快速冷却过程中,激光熔凝层产生大量的残余应力,其中变形、裂纹引起的失效问题是制约激光加工技术应用的瓶颈^[7,8]。因此,选择最佳的激光熔凝工艺参数和方法获得熔凝区有利的残余应力分布尤为重要。传统的试错法在优化激光熔凝工艺参数中遇到了很多困难,无法预测残余应力。通过借助数值模拟方法得到的结果可以解释激光加工中一些复杂的物理现象,同时可以作为工艺参数优化的基础。目前的研究主要基于高斯热源的激光窄带熔凝过程的分析^[9~13],而对于基于宽带热源的高效激光处理过程的研究甚少。本文基于修正后的激光宽带热源模型,建立激光宽带熔凝的三维有限元板材计算模型,对 42CrMo 钢熔凝层的残余应力分布规律进行了研究,分析了不同的工艺参数对熔凝区残余应力分布的影响。

2 分析与计算模型

激光宽带熔凝过程如图 1 所示,激光束扫描速度 v 沿 y 轴方向。在激光辐照区域,材料发生的作用机制不同。激光束作用的狭窄区域被迅速加热,产生了局部材料蒸发和熔化,远离光束作用区则仍处于冷态。熔融材料经熔凝冷却后,获得最终的熔凝工件。熔凝区在加热和冷却过程中产生的极大的温度梯度以及加热过程中材料力学性能的急剧降低,导致熔凝后在该区产生了非均匀的永久变形和残余应力。

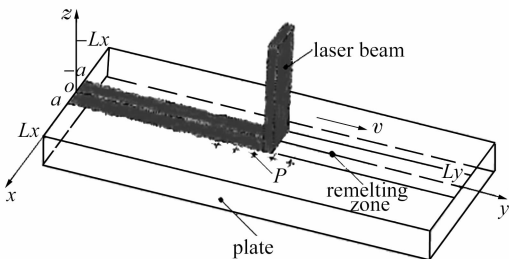


图 1 激光宽带熔凝示意图

Fig. 1 Laser wide-band remelting processing diagram

2.1 模型网格

在有限元 SYSWELD 软件中建立了三维有限元模型模拟激光宽带熔凝过程。工件的几何体模型

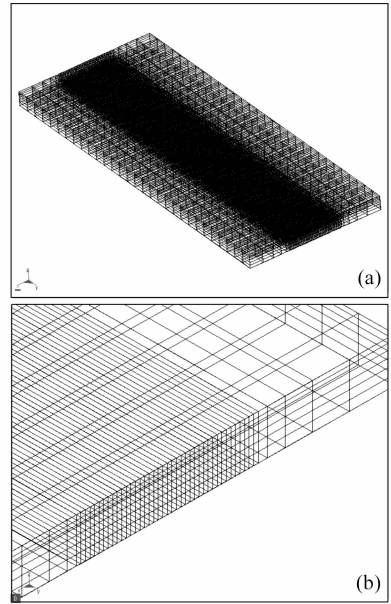


图 2 模型网格。(a) 体网格;(b) 熔凝区网格

Fig. 2 Meshes of (a) the model and (b) the remelting zone

如图 2(a) 所示,模型尺寸为 $120 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。网格模型使用了两种类型单元,即八结点的三维体单元和四结点的面单元。其中,三维体单元用于基本体单元,二维面单元用于模拟工件和环境的边界条件。在熔凝区沿光束扫描方向使用了加密网格(如图 2(b)),其他地方网格划分较疏。最终网格划分受到计算时间、精度和平台支持能力因素的影响。

2.2 热源定义

热输入分布函数决定熔池的大小和形状,因此有必要创建反映热流分布的激光宽带热源函数。为了模拟激光宽带熔凝过程沿扫描方向的热分布和热流,需要建立三维宽带激光束热源模型。工业中广泛应用的矩形激光光斑经带式积分镜变换得到,矩形内光束强度分布较均匀,但只能获得一个方向的匀束效果^[14]。验证表明,单向近高斯分布的热流函数^[15]能够较好地反映宽带激光能量分布规律,修正后的热流密度分布为

$$q(x, y, z) = C_0 \exp \left\{ - \left[\left(\frac{x - x_0}{a} \right)^{100} + \left(\frac{y - v \cdot t - y_0}{b} \right)^{50} + \left(\frac{z - z_0}{c} \right)^{100} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 C_0 为热源体积因子,取决于激光输出功率 P ; 系数 a, b, c 由熔池空间尺寸决定。

2.3 边界条件的确立

熔凝过程一般无需外力固定试样,可视为自由

约束条件。散热条件主要考虑与周围空气的热交换以及外加的强制冷却作用

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z = \alpha(T_a - T_s), \quad (2)$$

式中 α 为表面换热系数; T_a 为周围介质温度; T_s 为已知边界温度; n_x, n_y, n_z 为边界外法线方向余弦。

2.4 残余应力判据

将热分析的结果(温度分布)结合材料力学性能随温度的变化及约束条件进行力学性能分析。采用热-弹塑性材料的 Von-Mises 屈服判据公式分析材料的非线性硬化行为及残余应力^[16]

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (3)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力, 与动态硬化定律相耦合。

此外, 由于平均应力 σ_m 是影响构件疲劳失效及裂纹扩展的重要因素之一^[17,18], 在此利用该判据对激光熔凝层的残余应力状态进行分析

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2, \quad (4)$$

表1 42CrMo 合金钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 42CrMo steel (mass fraction, %)

C	Cr	Mn	Mo	Si	S	P	O	N	Al
0.41	1.05	0.75	0.20	<0.40	<0.035	<0.035	0.0004	0.007	0.025

表2 激光宽带熔凝工艺参数

Table 2 Parameters of laser wide-band remelting process

	I	II	III	IV	V	VI
Output power P/W	3500	3500	3500	3500	3500	3500
Scanning rate $v/(mm/min)$	300	600	1000	1200	1500	2000
Energy input density $\rho_E/(J/mm^2)$	70.0	35.0	20.9	17.5	14.0	10.5

4 结果分析与讨论

在有限元软件 SYSWELD 中建立了平板模型, 开发描述热流分布的 FORTRAN 子程序, 利用软件提供的 42CrMo 材料的热-力学性能参数和边界条件及工艺参数, 进行热分析、力学分析和相变分析, 并进行相关的实验验证。

4.1 热循环

图 3(a) 是模型中间激光熔凝区节点的热循环曲线分布, 分别距离激光熔凝中心点 0.0 mm, 2.5 mm, 5.0 mm。可见, 在短短 0.2 s 时间内, 熔凝区中心的最高峰值温度高达 2410.4 °C, 试样表面升温速率达 1.2×10^4 °C/s, 材料迅速达到奥氏体化温度。离熔凝中心点越远, 峰值温度降低, 但冷却速率越快, 这与靠近基体, 热传导速率大有关; 工件在高

温阶段的冷却速率高于 1.5×10^3 °C/s; 在 600 °C 以下时, 材料冷却速率减缓, 最终缓慢冷却至室温。图 3(b) 将热循环的有限元计算结果与实际测量值进行了对比。计算值和测量结果基本一致, 保证了模型温度场以及应力场计算结果的精度。

3 实验条件

在复合轧辊钢材料 42CrMo 表面进行宽带激光熔凝实验, 其化学成分见表 1。基于碳当量计算得到材料的初始组织成分为: 铁素体 0.47, 珠光体 0.53。使用的连续 CO₂ 激光器最大功率为 5 kW。选用激光加工中普遍使用的激光输出功率 $P = 3500$ W 进行宽带激光熔凝分析。试块表面的宽带激光光斑尺寸为 10 mm × 1 mm。实验前在试样表面预涂覆吸光涂料以提高光吸收率。

选用的宽带激光熔凝工艺参数值以及各实验方案的定义如表 2。当激光扫描速率 $v = 600$ mm/min 时, 用 Ni/Cr-Ni/Si 热电偶测温系统测定工件横截面上距离光斑扫描中心约 6.5 mm 点处(即图 1 中的 P 点)的热循环曲线。激光熔凝处理后, 从试块的熔凝区切取一小块制备试样, 经抛光、腐蚀后在扫描电子显微镜(SEM)、光学显微镜下分别观察熔凝区组织和测定熔凝区截面尺寸。

表1 42CrMo 合金钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 42CrMo steel (mass fraction, %)

C	Cr	Mn	Mo	Si	S	P	O	N	Al
0.41	1.05	0.75	0.20	<0.40	<0.035	<0.035	0.0004	0.007	0.025

表2 激光宽带熔凝工艺参数

Table 2 Parameters of laser wide-band remelting process

	I	II	III	IV	V	VI
Output power P/W	3500	3500	3500	3500	3500	3500
Scanning rate $v/(mm/min)$	300	600	1000	1200	1500	2000
Energy input density $\rho_E/(J/mm^2)$	70.0	35.0	20.9	17.5	14.0	10.5

温阶段的冷却速率高于 1.5×10^3 °C/s; 在 600 °C 以下时, 材料冷却速率减缓, 最终缓慢冷却至室温。图 3(b) 将热循环的有限元计算结果与实际测量值进行了对比。计算值和测量结果基本一致, 保证了模型温度场以及应力场计算结果的精度。

4.2 应力分布

4.2.1 沿熔凝层横截面的应力分布

宽带激光熔凝的处理区域较大, 激光处理后金属表层结构的均匀性也比高斯激光束处理效果好。不同实验条件下, 熔凝区横截面的残余应力分布如图 4 所示。在熔凝区与基体的边界(即热影响区)均存在着应力突变, 材料表层和内部总体上存在力学平衡。采用 Von Mises 应力判据得到的残余应力计算结果如图 4(a) 所示, 随着扫描速率增大, 熔凝

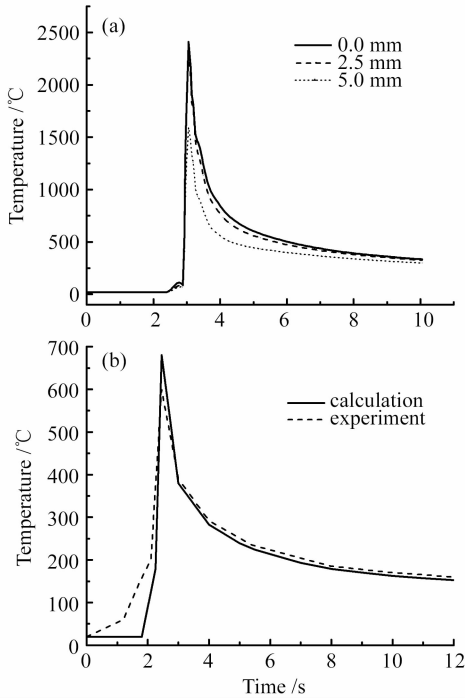


图3 热循环曲线。(a) 熔凝区;(b) 比较图

Fig. 3 Thermal cycle curves of the remelting zone (a) and comparison between calculation and experimental results (b)

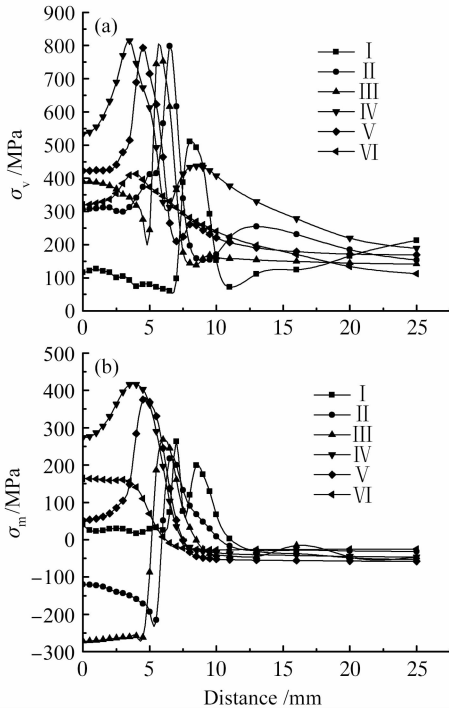


图4 熔凝表层横截面方向的残余应力分布
(a) Von Mises 应力;(b) 平均应力

Fig. 4 Cross-sectional residual stress distribution on top surface of the remelting zone. (a) Von Mises stress; (b) mean stress. I: 300 mm/min; II: 600 mm/min; III: 1000 mm/min; IV: 1200 mm/min; V: 1500 mm/min; VI: 2000 mm/min

区呈变窄趋势;扫描速率过大 ($v = 2000$ mm/min) 或者过小 ($v = 300$ mm/min), 应力幅值均大幅降低。图 4(b) 是基于平均应力判据得到的残余应力分布图。当扫描速率 $v = 600$ mm/min 和 $v = 1000$ mm/min 时, 熔凝区获得残余压应力分布, 有利于提高工件接触面的使用性能。众所周知, 当工件在承受磨损、冲击条件下服役时, 压应力的存在有利于抑制萌生裂纹^[7,8,11]。

4.2.2 沿熔凝层深方向的应力分布

图 5 为在不同条件下沿熔凝层深方向上的残余应力分布。如图 5(a), 熔凝层深方向上的 Von Mises 应力峰值相对熔凝表层较低; 当扫描速率处于过块、过低两个极端情况时 (即 $v = 300$ mm/min, 2000 mm/min), 熔凝区的 Von Mises 应力值显著低于其他工艺参数下的计算值。同样地, 当扫描速率 $v = 600$ mm/min 和 $v = 1000$ mm/min 时, 在熔凝区获得了较宽的残余应力区 (如图 5(b)), 这与熔凝表层的残余应力分布状态相一致。

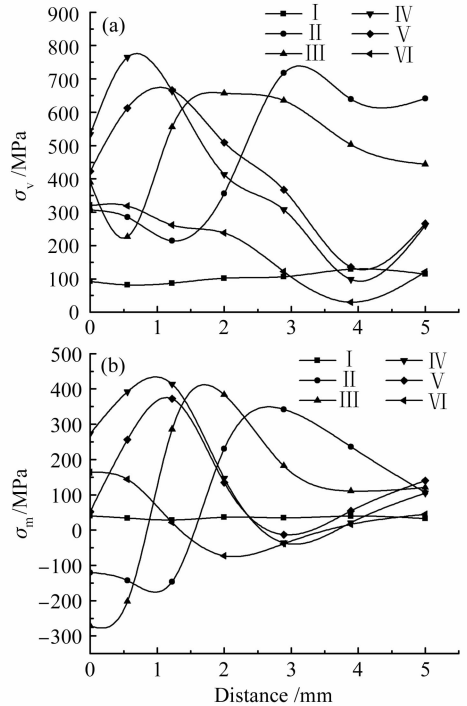


图5 熔凝层深方向的残余应力分布
(a) Von Mises 应力;(b) 平均应力

Fig. 5 Depth directional residual stress distribution of the remelting zone. (a) Von Mises stress; (b) mean stress. I: 300 mm/min; II: 600 mm/min; III: 1000 mm/min; IV: 1200 mm/min; V: 1500 mm/min; VI: 2000 mm/min

在相同条件下, 工件表面的应力分布状态主要与激光输出功率 P , 扫描速度 v 和光斑面积 S 相关,

采用激光能量密度 ρ_E 可将三者进行综合分析

$$\rho_E = \frac{P}{S} \cdot \frac{L}{v}, \quad (5)$$

式中 L 为光斑在移动方向上的长度。表 2 列出了不同工艺参数下对应的激光能量密度值。实验表明, 过高或过低的线能量密度值都对熔凝层表面质量产生不利影响: 当扫描速率过低, 线能量密度过大时(即 $v \leq 300 \text{ mm/min}$, $\rho_E \geq 70.0 \text{ J/mm}^2$), 激光熔凝后得到的熔凝层表面存在着较大起伏, 影响表面质量, 这可能与熔池内液态金属产生的不均匀流动有关; 而扫描速率过高, 线能量密度过小时(如 $v \geq 1500 \text{ mm/min}$, $\rho_E \leq 14.0 \text{ J/mm}^2$), 激光辐照区仅出现部分重熔甚至只发生固相淬火过程, 即激光相变硬化, 难以达到要求的激光熔凝强化效果。当激光扫描速率在 $v = 600 \sim 1000 \text{ mm/min}$, $\rho_E = 20.9 \sim 35.0 \text{ J/mm}^2$ 时, 熔凝表层具有均匀结构和表面质量, 且在熔凝区获得有利的残余应力分布, 这类熔凝层残余应力分布特点已有文献报道^[2,11,19], 残余应力能够提高材料接触面的疲劳强度、防止裂纹扩展。

4.3 相变

材料表面激光强化的主要特征之一是获得高硬度、高强度的马氏体, 即由高温的奥氏体快速冷却转变为常温下的马氏体组织, 所以在对工件的激光熔凝处理残余应力分析时, 因相变产生的组织应力是主要影响因素之一。在无外应力作用下, 马氏体相变膨胀系数与温度的关系为^[20]

$$\beta_M^T = \beta_M^0 + (\alpha_M - \alpha_A)T, \quad (6)$$

式中 β_M^T , β_M^0 分别为温度 T 和 0°C 下马氏体相变的相变膨胀系数; α_M , α_A 分别为马氏体及奥氏体的热膨胀系数, $\alpha_M > \alpha_A$ 。

图 6(a) 是计算得到的沿熔凝层深方向各单元结点的组织分布图, 显然, 熔凝区内组织分布均匀, 主要以马氏体为主。其中, 熔凝区内的马氏体相体积分数高达 95% 以上, 而残余奥氏体、贝氏体相的最大体积分数仅为 3.3% 和 0.1016%。表明表层材料经激光急剧加热和快速冷却作用后, 熔凝区组织大量转变, 几乎全部转变为马氏体; 由于马氏体比奥氏体的比容大, 在冷却过程中, 奥氏体向马氏体转变时发生体积膨胀和尺寸增大现象, 并且碳原子在内部的挤压作用可能使体积膨胀率进一步增大, 大量马氏体的生成无疑促使了工件熔凝表层的残余应力分布。图 6(b) 是激光熔凝区的扫描电子显微形貌图, 熔凝区组织主要为针状马氏体。显然, 模型计算结果能够准确地反映材料相变, 并且熔凝区冷却过程

中, 伴随高温奥氏体向常温马氏体转变而产生的体积膨胀效应对熔凝区的残余应力分布有着重要影响。

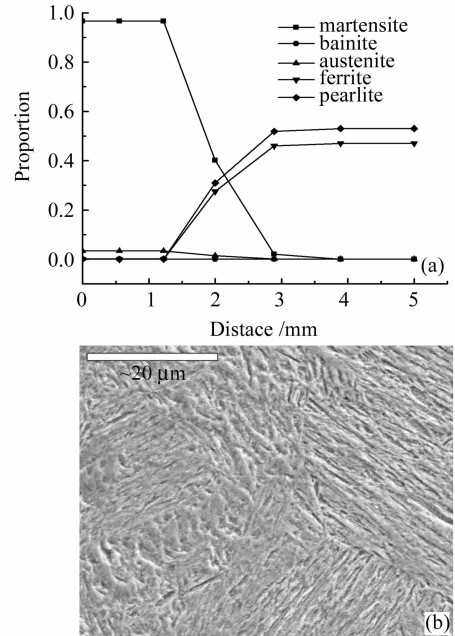


图 6 熔凝区相变。(a) 相含量; (b) 针状马氏体
Fig. 6 (a) Phase proportions and (b) acicular martensitic structure of the remelting zone

5 结论

基于宽带热源和三维有限元模型, 考虑了材料热物性参数(如热传导系数、比热、潜热、相变等)随温度的变化, 针对 42CrMo 板材表面激光宽带熔凝区的残余应力参数以及组织转变进行了分析。结论如下:

1) 激光熔凝加工过程是一个急剧加热、快速冷却的过程。熔凝区的升温速率和冷却速率分别达到 $10^4 \text{ }^\circ\text{C/s}$, $10^3 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的数量级; 最大峰值温度在熔凝区中线处, 且越靠近热影响区, 冷却速率越大。

2) 宽带激光熔凝工艺参数对熔凝层的表层质量和残余应力分布有很大影响。激光能量密度在 $\rho_E = 20.9 \sim 35.0 \text{ J/mm}^2$ (即对应 $P = 3500 \text{ W}$, $v = 600 \sim 1000 \text{ mm/min}$) 范围内, 熔凝区可获得残余应力分布, 有利于提高材料接触表面的使用性能; 而过高或者过低的线能量密度, 均对熔凝层的表层质量产生不利影响。

3) 激光熔凝区在冷却过程中, 发生由高温奥氏体向常温马氏体的组织转变。熔凝区内的马氏体相比例高达 95% 以上; 大量马氏体的生成对熔凝区的残余应力分布状态有很大影响。

4) 采用模拟分析的方法可以定量描述激光加工过程中组织转变程度以及残余应力的大小和分布。可以通过此方法控制和优化工艺参数,提高产品的质量。

参 考 文 献

- J. Grum, J. M. Slabe. A comparison of tool-repair methods using CO₂ laser surfacing and arc surfacing [J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2003, **208-209**:424~431
- Xu Youyi, Zhou Ming. Study on surface hardness and residual stress of 40Cr steel modified by laser rapid solidification [J]. *Applied Laser*, 2002, **23**(4):401~404
许友谊,周明. 全20CrMnTi表面激光重熔的组织与性能研究[J]. *应用激光*, 2002, **23**(4):401~404
- Cui Zhenduo, Zhu Shengli, Han Yajing *et al.*. Microstructure and corrosion behavior of laser surface re-melted NiTi alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2005, **28**(2):4~9
崔振铎,朱胜利,韩雅静等. 激光重熔NiTi合金表面组织与腐蚀性能[J]. *兵器材料科学与工程*, 2005, **28**(2):4~9
- Wang Gui, Wang Jianguo, Zhou Xinchu *et al.*. Study on microstructure and mechanical properties of laser melted roller steel [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, (3):35~37
王贵,王建国,周新初等. 轧辊钢激光熔凝处理组织及性能研究[J]. *金属热处理*, 2001, (3):35~37
- Wang Yunshan, Zhang Xingquan, Lei Jianbo *et al.*. Processing of laser quenching crankshaft [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):574~576
王云山,张兴泉,雷剑波等. 曲轴激光淬火工艺[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):574~576
- Gao Yali, Wang Cunshan, Liu Hongbin *et al.*. Microstructure and properties of AZ91HP magnesium alloy treated by high power laser melting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):1019~1024
高亚丽,王存山,刘红宾等. 高功率激光熔凝AZ91HP镁合金组织和性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):1019~1024
- J. Grum, J. M. Slabe. Effect of laser-remelting of surface cracks on microstructure and residual stresses in 12Ni maraging steel [J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2006, **252**(13):4486~4492
- Zhang Gang, Wu Yingna, Liang Yong *et al.*. Research on laser remelting of plasma sprayed thermal barrier coatings [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(5):334~337
张罡,武颖娜,梁勇等. 激光重熔工艺参数对热障涂层热震性能的影响[J]. *激光技术*, 2002, **26**(5):334~337
- Bekir Sami Yilbas. Theoretical and experimental investigation into laser melting of steel samples [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, **27**:297~307
- L. X. Yang, X. F. Peng, B. X. Wang. Numerical modeling and experimental investigation on the characteristics of molten pool during laser processing [J]. *Internat. J. Heat and Mass Transfer*, 2001, **44**(23):4465~4473
- Yao Guofeng, Chen Guangan. Numerical simulation of transient thermal field and residual stress in laser melting process [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2):241~244
姚国风,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*, 2003, **22**(2):241~244
- Chen Jing, Tan Hua, Yang Haiou *et al.*. Evolution of molten pool shape in the process of laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):442~446
陈静,谭华,杨海鸥等. 激光快速成形过程中熔池形态的演化[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):442~446
- X. F. Wang, X. D. Lu, G. N. Chen *et al.*. Research on the temperature field in laser hardening [J]. *Optics & Laser Technology*, 2006, **38**(1):8~13
- Wang Yunshan, Yang Xichen, Liu Yajun. Temperature field of laser scanning line facula [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):981~986
王云山,杨洗陈,刘亚君. 激光扫描光斑温度场[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):981~986
- Zhan Huanxiao, Wang Yong, Han Tao *et al.*. FEM simulation of broad-band laser remelting process on 42CrMo steel surface [J]. *Hot Working Technology*, 2007, **36**(12):64~68
占焕校,王勇,韩涛等. 42CrMo钢表面激光宽带熔凝有限元模拟[J]. *热加工工艺*, 2007, **36**(12):64~68
- Ahmet N. Eraslan. Von mises yield criterion and nonlinearly hardening variable thickness rotating annular disks with rigid inclusion [J]. *Mech. Res. Commun.*, 2002, **29**(5):339~350
- T. Mann. The influence of mean stress on fatigue crack propagation in aluminium alloys [J]. *Inter. J. Fatigue*, 2007, **29**(8):1393~1401
- Geng Liyan, Yang Xinqi, Xu Haisheng *et al.*. Fatigue assessment of aluminium welded joints by the stress averaging approach [J]. *J. Mechanical Strength*, 2006, **28**(2):266~270
耿立艳,杨新岐,许海生等. 铝合金焊接接头疲劳评定的应力平均法[J]. *机械强度*, 2006, **28**(2):266~270
- Cai Weiping. Surface residual stress of martensite stainless steel treated by LSM [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(3):228~229
蔡伟平. 马氏体不锈钢激光表面熔化处理后的表层残余应力[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(3):228~229
- Song Guangsheng, Liu Xianghua, Wang Guodong *et al.*. Numerical simulation on the effect of phase transformation on quenching stress of 22CrMo steel [J]. *J. Plasticity Engineering*, 2006, **13**(2):75~79
宋广胜,刘相华,王国栋等. 相变对22CrMo钢淬火应力影响的数值模拟[J]. *塑性工程学报*, 2006, **13**(2):75~79