

文章编号: 0258-7025(2010)10-2642-06

# 浸没式介质环境对基体表面激光热加工的影响

伊 鹏 刘衍聪 石永军 伦冠德 任红伟

(中国石油大学机电工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要** 考虑材料热物性参数和对流换热系数的非线性,以空气、纯水和 2# 分级油为介质环境,采用连续气流保护熔池,建立基体浸没式激光动态热加工过程的三维数值模型,对不同自然冷却介质中基体热响应温度场及残余应力场进行对比研究。结果表明,三种环境中的温度场规律基本一致,空气中基体温度最高。表面高温区域油冷效果明显,低温区水冷效果明显;油冷环境可有效控制重熔区和热影响区深度,而水冷环境材料表面可获得更大的温度梯度和冷却速度。不同介质环境对残余应力分布影响显著:空冷基体内部应力过大,且在两端应力有集中,整体以拉应力为主,而水、油环境中的热应力得到了及时释放,其中水冷环境对降低残余应力更为有效。

**关键词** 激光技术; 浸没式; 激光热加工; 介质环境; 温度场; 残余应力分布

中图分类号 TG174; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2642

## Influence of Immersion Medium Surroundings on Laser Heat Processing on Substrate Surface

Yi Peng Liu Yancong Shi Yongjun Lun Guande Ren Hongwei

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

**Abstract** Under the consideration of the nonlinearity of the material thermal parameters and heat convective transfer coefficient, a validated three-dimensional numeric modal of laser heat dynamic process was established with base body immersed in the medium surroundings such as air, pure water and 2# martempering oil using air stream for protecting the melten pool, the field of temperature and residual stress of thermal response within different natural cooling media were studied comparatively. The results showed that, the law of the temperature field is essentially consistent with three kinds of surroundings, and the substrate highest temperature appeared in the air. The surface high and low temperature region were effected obviously by oil-cooling and water-cooled respectively; the remelting and heat-affected depth could be controlled effectively by oil-cooled, while larger temperature gradient and cooling rate would be gained within water. Residual stress distribution was affected significantly by medium surroundings. Internal stress of substrate was too large with air-cooled and there was stress concentration at both ends and the tensile stress was main. While substrate thermal stress had been released timely in water and oil surroundings, and water-cooled environment was more effective in reducing the residual stress.

**Key words** laser technique; immersion model; laser heat processing; medium surrounding; temperature field; residual stress distribution

## 1 引 言

激光热加工是“绿色”加工领域的一个重要组成

部分,由于激光束单色性好、能量密度高、可控性好等优点,激光加工技术在成型制造及表面改性等

收稿日期: 2010-01-26; 收到修改稿日期: 2010-03-13

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09A104)、山东省自然科学基金(Y2007F76)和新疆克拉玛依市科技攻关项目(SK2008-52)资助课题。

作者简介: 伊 鹏(1983—),男,博士研究生,主要从事机械装备的激光热处理及修复等方面的研究。

E-mail: yipupc@163.com

导师简介: 刘衍聪(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事绿色循环再制造及特种加工等方面的研究。

E-mail: liuyc@upc.edu.cn

方面得到了广泛的研究应用。加工过程中介质环境以空气为主且研究较为充分,席明哲等<sup>[1~4]</sup>分别对空气中激光热加工温度场、应力应变场和熔池行为进行了较深入的研究;陈瑞芳等<sup>[5]</sup>对激光冲击下的残余应力场进行了三位数值模拟;洪蕾等<sup>[6]</sup>分析了底部辅助气流对激光切割硅钢的质量影响。液体中激光热加工的研究起步较晚,以激光切割、冲击成型和表面去除为主,对激光焊接、熔覆和热处理研究较少<sup>[7,8]</sup>。徐荣青等<sup>[9,10]</sup>对空气及水环境中激光打孔进行了实验研究;凌磊等<sup>[11,12]</sup>分别研究水浴条件和水下激光切割硅片的工艺过程;张华等<sup>[13]</sup>实验研究了中性盐溶液中的辅助激光加工过程;Guo 等<sup>[14]</sup>应用仿生耦合激光熔融加工致密石墨铸铁并对比不同介质环境的影响;K. Amikura 等<sup>[15]</sup>对氧化铜颗粒的水中激光烧蚀制备进行了分析。以上众多研究描述了各种激光加工的热响应过程,温度场决定了加工后热影响区范围及其组织结构,而残余应力应变场则影响着材料在该区域的机械性能,同时还表明了介质环境对激光加工效果有较大影响,对加工区进行冷却的同时利用热传导和对流及时带走热量和材料熔渣,控制再铸层的形成,因此,对残余应力的研究也非常重要。

对现有研究总结可知,一方面研究的液体加工环境主要为水,作为热处理常用冷却介质,2# 分级

油的影响研究少有涉及且缺乏不同介质的对比分析;另一方面目前主要通过实验对加工后微观组织进行观察研究,而对加工后基体机械性能有较大影响的温度、应力场分布的考察及对比分析鲜见报道。本文通过数值模拟方法,考虑工艺较为简单常用的基体浸没式加工过程,建立空气、纯水和 2# 分级油环境中的钢表面激光热加工过程的数值模型,通过模拟分析明确不同介质环境对热加工过程温度、应力场的影响以及各自分布规律,为进一步提高激光热加工基体的机械性能提供参考。

## 2 浸没式激光热加工模型

材料内部热传导是主要的热传递方式,与介质环境的对流、辐射是主要热损失方式。为提高计算精度,分别考虑材料热物性参数、表面辐射和介质环境的对流传热随温度变化的非线性影响,同时对模型进行适当简化以保证计算效率,认为辐照区材料瞬时达到热饱和状态并形成稳定熔池,假设环境温度恒定且材料各向同性。

### 2.1 热作用机理

激光束扫描 2~3 个光斑直径距离时加热区温度场基本达到准稳态<sup>[2]</sup>,由能量守恒得到三维瞬态热传导的等效积分式

$$\int_{\Psi} \left[ \delta T \left( \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \frac{\partial \delta T}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial \delta T}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial \delta T}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \delta T \rho Q \right] d\varphi - \int_{\Gamma_1} \delta T q d\tau - \int_{\Gamma_2} \delta T h (T - T_0) d\tau - \int_{\Gamma_3} \delta T \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_0^4) d\tau = 0, \quad (1)$$

式中  $\Psi$  为材料的积分求解区域; $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$  为三种热边界条件,即热流载荷、热传导和热辐射的积分区域; $T, T_0$  分别为瞬时、介质温度; $t$  为时间; $Q$  为单位质量热源, $c$  为材料比热容, $\rho$  为材料密度, $k_x, k_y, k_z$  分别为材料沿物体三个主方向的导热系数, $q$  为热流密度; $h$  为环境对流换热系数, $\varepsilon$  为表面热辐射系数,液体介质中取为 0; $\sigma_0$  为 Stefan-Boltzmann 常量,取  $5.670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

考虑对流和辐射边界区域相同,可对(1)式的边界积分式进行简化得到

$$\int_{\Gamma_1} \delta T q d\tau + \int_{\Gamma_2} \delta T h (T - T_0) d\tau + \int_{\Gamma_3} \delta T \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_0^4) d\tau = \int_{\Gamma_1} \delta T q d\tau + \int_{\Gamma_2} \delta T [h + \varepsilon \sigma_0 (T^2 + T_0^2)] (T - T_0) d\tau, \quad (2)$$

同时可对空气介质中的对流辐射项进行修正,令  $h^* = h + \varepsilon \sigma_0 (T^2 + T_0^2) (T + T_0)$  为修正换热系数,则(1)式可表示为

$$\int_{\Psi} \left[ \delta T \left( \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) + \frac{\partial \delta T}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial \delta T}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial \delta T}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \delta T \rho Q \right] d\varphi - \int_{\Gamma_1} \delta T q d\tau - \int_{\Gamma_2} \delta T h^* (T - T_0) d\tau = 0. \quad (3)$$

为了得到瞬态温度场的有限元格式,将空间域  $\Psi$  离散为有限个单元体,单元内温度  $T$  可近似用节点温度  $T_i$  和空间域的差值函数  $N_i$  得到。

### 2.2 模型描述及边界条件

参考 C. Barnes 等<sup>[16]</sup> 实验模型建立浸没式激光热加工模型如图 1 所示,基体置于耐火砖上浸没于介质环境中,液态环境时材料表面覆盖有液体,激光束能量衰减可以忽略。激光热加工熔池中存在多种冶金反应,各部位分别熔化、凝固再结晶,发生显微组织转变,为避免该区域熔融态金属与液体介质接触,保证熔池熔化和凝固过程顺利进行,采用同轴连续气流保护,在材料表面光斑附近排开液体并形成稳定的干燥区域。

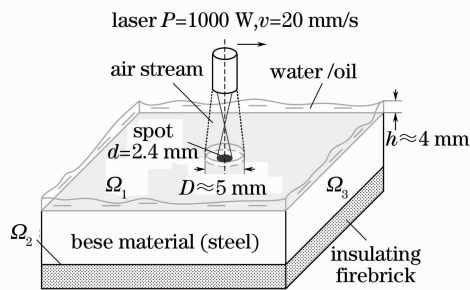


图 1 浸没式激光热加工模型

Fig. 1 Immersed hot working model by laser

热传导方程配合一定的初始和边界条件成为定解方程,数值模型中采用第二、三类边界条件,分别为热流输入和对流换热输出,基体底面为绝热状态,激光热流密度载荷施加于光斑区域。图 1 中各区域热边界条件如表 1 所示,计算热应力场时模拟实际加工中夹具作用,将平行于扫描方向的两个底边施加全约束,防止整体刚性位移,同时使基体上部热应力得到充分释放。

表 1 热边界条件

Table 1 Thermal boundary conditions

Regions, $\Omega$	Boundary conditions, $\Gamma$
Top surface, $\Omega_1$	$\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$
Bottom surface, $\Omega_2$	(Adiabatic) $q=0, h=0, \varepsilon=0$
Other surface, $\Omega_3$	$\Gamma_2 + \Gamma_3$

(3)式中热流量  $q$  以高斯分布热流密度的形式加载,表达式为

$$q = \frac{2PA}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right), \quad (4)$$

式中  $P$  为激光输出功率; $R$  为光斑半径; $r$  为考察点至光斑中心的距离; $A$  为材料表面激光能量吸收率,随时间和温度不断变化。由于热作用区域接受能量后极短时间即达到准稳态熔融,取文献<sup>[17]</sup>中熔池

内液态金属的能量吸收率

$$A = \frac{\mu_0 c_0 q_0^2}{48\pi^2 m \Omega} \left[ 1 + \coth\left(\frac{h\omega}{2k_B T}\right) \right], \quad (5)$$

式中  $m$  为材料的离子质量; $q_0$  为离子电量; $\Omega$  为材料的原胞体积; $c_0$  为光速; $T$  为材料熔点; $\mu_0$  为真空磁导率, $\omega$  为辐照激光圆频率; $k_B$  和  $h$  分别为玻尔兹曼和普朗克常数。

另外考虑保护气流的冷却作用,取与光斑同心的 5 mm 直径圆形范围内的对流换热系数为常值 459.21 W/(m<sup>2</sup> · K),随光斑同步移动。试件初始温度为环境温度 293 K,环境温度保持恒定,则节点温度可表达为

$$T(x, y, z, t) |_{t=0} = T_0. \quad (6)$$

激光热作用过程中,材料的热物性参数随温度非线性变化,是影响热传导方程求解精度的重要参数。其特征值分为随温度变化的瞬时值和一定范围内的平均值,前者更适合于有限元分析,采用内插和外推法确定不同温度下材料的热物性参数。根据以上激光热作用机理、物理模型及边界条件,以 ANSYS 有限元分析软件为仿真平台建立系统有限元模型。

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 有限元模型可靠性验证

以 45# 钢材料为例对该计算模型进行验证,根据文献<sup>[1]</sup>中的实验参数,线切割法制备尺寸为 50 mm × 5 mm × 10 mm,试样置于耐火砖上,连续 CO<sub>2</sub> 激光器在试样表面直线扫描,自然空气环境中,  $P=1000$  W,  $v=3$  mm/s,  $r=1.5$  mm,沿垂直于扫描方向的  $y-z$  截面切开,研磨金相试样,熔池边界计算值与实验值如图 2 所示,实际熔化区深度比计算值稍大,主要原因是热源模型的简化及材料热物

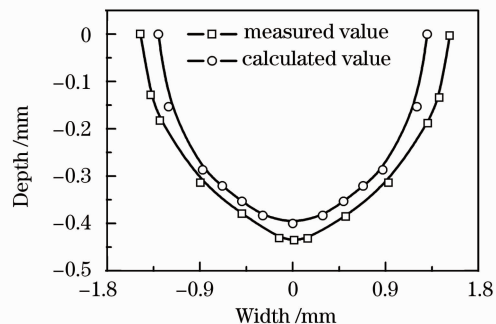


图 2 熔池边界计算值与实验值对比

Fig. 2 Comparison between calculated and measured result of molten pool boundary

性参数的取值误差,总体来说熔池尺寸计算值与实验值吻合较好,因此认为该模型是可靠的。

下面对不同加工介质环境下瞬时温度场和残余应力场计算结果进行分析。取图 1 中模型参数,激光功率  $P=1000\text{ W}$ ,扫描速度  $v=20\text{ mm/s}$ ,光斑直径  $d=2.4\text{ mm}$ ,基体上表面覆盖液体厚度  $h\approx 4\text{ mm}$ ,干燥区域直径  $D\approx 5\text{ mm}$ ,基体尺寸为  $40\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。其上不同测试取值位置如图 3 所示,A 点为某时刻激光扫描位置,距离上表面 B,截面 C 点  $0.3\text{ mm}$  且处于同一截面,为便于分析,取激光扫描方向为  $x$  向, $A\rightarrow B$ , $A\rightarrow C$  向分别为  $y,z$  方向。

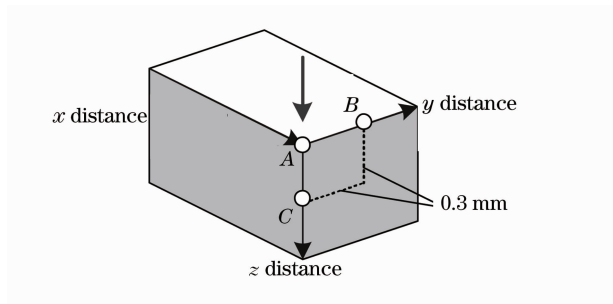


图 3 取值位置示意图

Fig. 3 Illustration of dereferencing positions

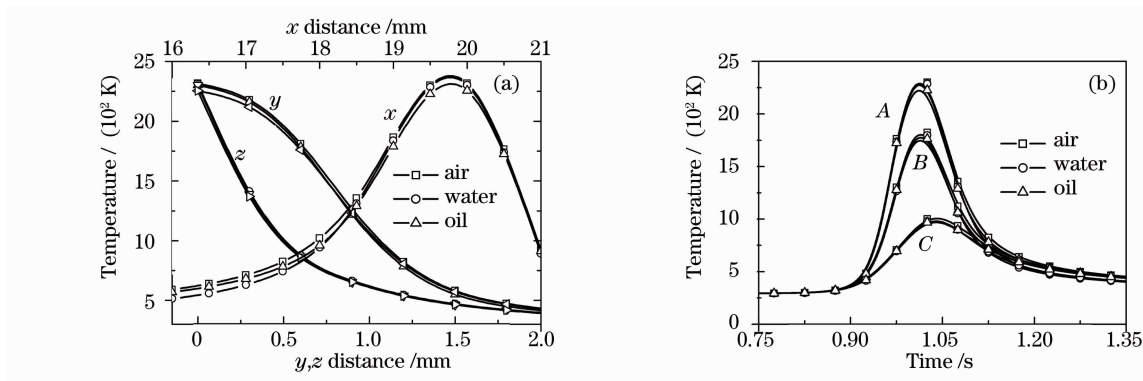


图 4 不同介质环境中 (a) 熔池附近温度场分布, (b) 定点热循环曲线

Fig. 4 (a) Temperature field distribution nearby molten pool,

(b) thermal circulation curves of points within different medium surroundings

### 3.3 不同介质环境中的应力场

模型采用间接耦合法,读入温度场结果作为边界条件对热应力分布进行求解,首先提取不同介质环境中基体 A 点的热应力时程曲线如图 5 所示,与图 4(b) 相对应  $0.96\sim 1.06\text{ s}$  内光斑扫描经过 A 点,该处材料在熔化和凝固阶段分别出现应力突变,其中熔化过程的瞬态应力变化较剧烈,且几乎不受介质环境的影响;凝固阶段则受影响较大,纯水介质中应力突变峰值略高,但之后迅速降低并保持较低的热应力值。 $t=2\text{ s}$  时

### 3.2 不同介质环境中的温度场

图 2 中不同介质环境熔池附近  $x,y,z$  方向的温度场分布曲线如图 4(a) 所示,三种环境中的温度场分布规律基本一致,由于自然空气对流换热能力较差,激光加工过程中基体温度始终最高,纯水和 2<sup>#</sup> 分级油中热加工温度分布略有差异。随着  $x$  向的距离增大,水中加工温度与油中相比由较低变化为较高,该处位于熔池附近温度约为  $1300\text{ K}$ ,基体  $y,z$  向温度仅在高温区域略有差异,空冷、水冷环境中的熔池尺寸大于油冷环境;由图 4(b) 三点热循环曲线可知各位置处受影响规律相似,升温阶段三种介质环境中的基体温度变化一致,而冷却阶段水介质中基体冷却速度最大。

其主要原因是基体表面温度较低时,纯水的对流换热系数最大,随温度迅速上升,其表面对流换热经过核态沸腾和膜态沸腾阶段,换热系数迅速降低,而该温度段 2<sup>#</sup> 分级油的对流换热能力逐渐增强,因此基体表面高温区域油冷效果明显,在低温区水冷效果明显,基体内部受影响不大;同时可知油冷环境可以更有效地控制重熔区和热影响区深度。而在水冷环境中基体表面可获得更大的温度梯度和冷却速度,有助于抑制晶体生长以获得细小枝晶,且二次枝晶间距也随冷却速度的增大而减小,硬度随之提高。

加工完成,不改变介质环境进入自然冷却阶段,由图 5 可知冷却至  $1450\text{ s}$  时热应力得到充分释放并已趋于稳态,因此取自然冷却至  $1500\text{ s}$  时的基体应力分布作为激光热加工的残余应力分布进行分析。

三种介质环境中基体沿不同方向的残余应力分布如图 6 所示,与温度场分布规律不同,应力分布差异均较为明显,空气环境中残余热应力值最大,三个方向上最大值为液体环境中应力分布的  $3\sim 5$  倍,纯水中加工应力值最小。图 6(a) 中沿扫描方向基体两端  $5\text{ mm}$  距

离内应力值绝对值及波动均较大,空冷环境中尤为明显,呈 U 型分布,基体中部较两端应力降低 30% 以上,水、油中基体两端应力略有增大但分布总体均匀;基体沿垂直于扫描方向的横、纵向应力分布如图 6(b), (c) 所示,各环境中两方向应力变化平稳,图 6(b) 空冷和油冷基体沿横向的应力下降趋势呈近似线性分布,水冷环境中距扫描轨迹 1 mm 内应力值大幅降低,之后应力分布则保持较低水平并基本不变,图 6(c) 中纵向应力分布同图 6(b) 呈近似线性,基体沿纵向 1 mm 内应力大幅下降,后空冷、油冷应力略有上升,而水环境中保持不变。

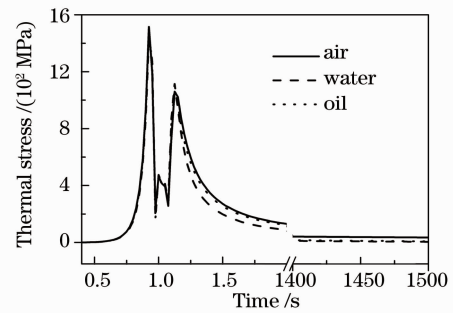


图 5 不同介质环境中基体上 A 点热应力的时程曲线  
Fig. 5 Thermal stress curves over time of point A on substrate within different medium surroundings

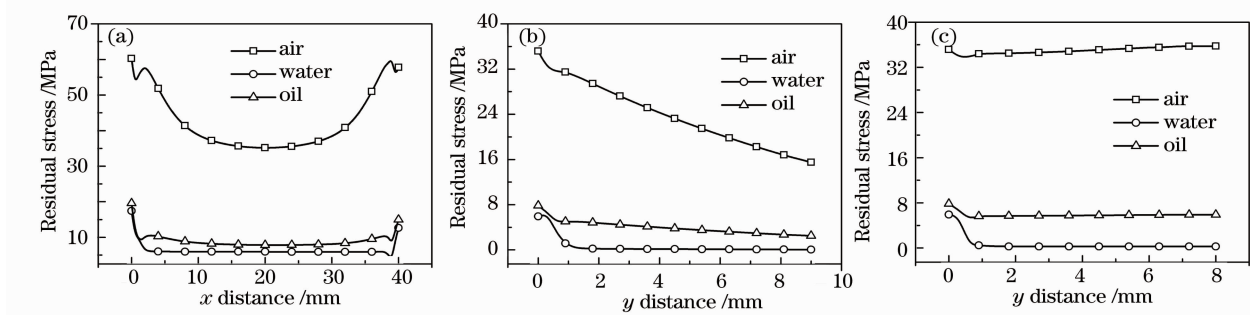


图 6 不同介质环境中基体沿 (a)  $x$ , (b)  $y$ , (c)  $z$  方向残余应力分布

Fig. 6 Residual stress distribution on substrate along (a)  $x$ , (b)  $y$ , (c)  $z$  direction within different medium surroundings

由此可知不同热加工介质环境对基体残余应力分布情况影响显著:空气中加工虽然工艺简单成本低,但加工后基体内部应力值过大且波动剧烈,尤其是沿激光扫描方向,影响其后续加工同时基体产生非期望的微小应变降低了机械性能;水、油环境中热应力得到及时释放,有效降低了基体残余应力,且分布均匀变化平稳,其中水冷环境对残余应力的控制更为有效,仅在距激光扫描处约 1 mm 范围内存在一定应力集中,但由于绝对值较小对材料性能影响有限,同时由于水介质很好的淬透性,基体热影响区可获得更大的硬度。

图 7 是不同介质环境中基体表面沿扫描方向 ( $x$  向) 残余应力分布的  $x$ ,  $y$  和  $z$  方向分量,各向分

量在基体两端 3 mm 内存在应力集中,扫描起始段主要为拉应力,易成为裂纹生成及扩展的驱动力,结束段主要为压应力,对材料影响较小,中部变化不大。由图 7(a) 可知,空气中基体热应力以沿扫描方向的拉应力为主,最大可达 40 MPa,对材料表面性能影响较大,激光熔覆及焊接加工的重熔区易产生裂纹;图 7(b), (c) 中水、油环境对拉应力的降低作用明显,虽然在扫描起始段仍有一定的应力集中,但绝对值较小,最大值仅为 14 MPa,对材料性能影响有限,水冷环境较油冷更为有效,尤其在占工件长度 85% 的热加工中间部分,各向应力分量差最小,可有效抑制裂纹等缺陷的产生,保证基体机械性能。

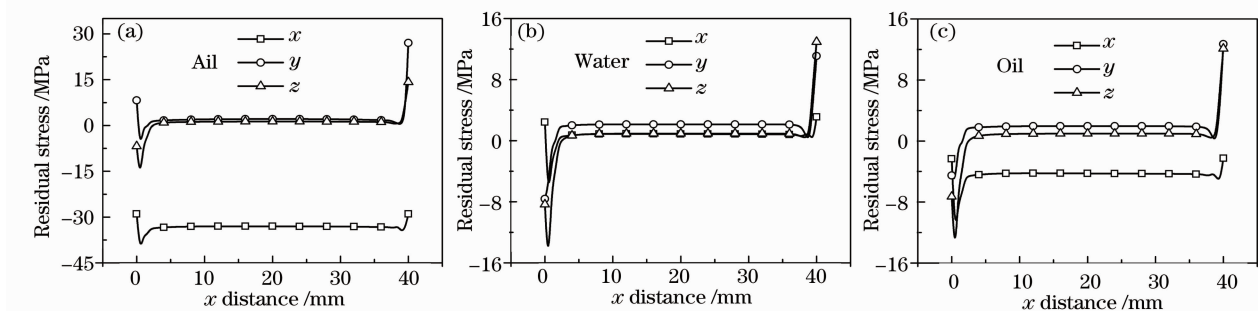


图 7 (a) 空气, (b) 纯水, (c) 2# 分级油中基体沿扫描方向的残余应力分量

Fig. 7 Residual stress component on substrate along scan direction within (a) air, (b) pure water, (c) 2# martempering oil

## 4 结 论

考虑材料热物性参数和对流换热系数随温度的非线性变化,分别以空气、纯水和 2# 分级油为介质环境,建立了基体浸没式激光动态热加工过程的三维有限元模型,经验证模型可靠,对不同自然冷却介质中基体热响应温度场及残余应力场进行对比研究,得出以下结论:

1) 三种环境中的温度场规律基本一致,空气中基体温度最高,表面高温区油冷效果明显,低温区水冷效果明显,基体内部受影响不大;油冷环境可更有效地控制重熔区和热影响区深度,而水冷环境中材料表面可获得更大的温度梯度和冷却速度;

2) 扫描起始段主要为拉应力,结束段主要为压应力,不同热加工介质环境影响显著,空冷基体内部应力大,且沿扫描方向基体两端 3 mm 存在应力集中,整体以拉应力为主;水、油环境中的加工热应力得到及时释放,其中水冷对降低残余应力尤其是拉应力更为有效。

因此自然冷却条件下对熔池采取保护措施,液体中尤其是在水环境中的激光热加工工件较空冷性能更为优良,2# 分级油也是一种较理想的激光热加工介质,但由于成本较高其应用更有针对性,介质环境的强制对流如何影响工件温度应力场将是下一步的研究重点。

## 参 考 文 献

- 1 Xi Mingzhe, Yu Gang. Numerical simulation for the transient temperature field of 3D moving laser molten pool [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1527~1532  
席明哲, 虞 钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1527~1532
- 2 Shi Yongjun, Yang Min, Yun Pingli *et al.*. Numerical investigation on undesirable deformation of metal plate in laser forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1825~1829  
石永军, 杨 民, 俞平利等. 金属板材激光热成形非期望变形的数值模拟研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1825~1829
- 3 Y. J. Shi, Z. Q. Yao, F. Liu *et al.*. Temperature gradient mechanism in laser forming of thin plates [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(4): 858~863
- 4 K. Abderrazaka, W. Kriaaa, W. B. Salem *et al.*. Numerical and experimental studies of molten pool formation during an interaction of a pulse laser (Nd:YAG) with a magnesium alloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, **41**(4): 470~480
- 5 Chen Ruifang, Guo Naiguo, Hua Yinqun. Numerical simulation of effects of laser shock parameters on residual stress field induced by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 931~936  
陈瑞芳, 郭乃国, 花银群. 激光冲击参数对残余应力场影响的三维数值模拟 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 931~936
- 6 Hong Lei, Mi Chenglong, Li Lijun. Influence of gas flow under workpiece during CO<sub>2</sub> laser cutting silicon steel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 522~527  
洪 蕾, 米承龙, 李力钧. 底部气流对 CO<sub>2</sub> 激光切割硅钢切口质量的影响 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 522~527
- 7 A. Kruusing. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1—general features, steam cleaning and shock processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**(2): 307~327
- 8 A. Kruusing. Underwater and water-assisted laser processing: Part 2—etching, cutting and rarely used methods [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**(2): 329~352
- 9 Xu Rongqing, Chen Xiao, Shen Zhonghua *et al.*. Mechanisms of laser processing in water and air [J]. *J. Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2004, **28**(3): 248~252  
徐荣青, 陈 笑, 沈中华等. 激光对水和空气中靶材的作用机制研究 [J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2004, **28**(3): 248~252
- 10 Xu Rongqing, Chen Xiao, Shen Zhonghua *et al.*. Mechanical effects during pulsed laser and metals interaction in water [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(5): 599~603  
徐荣青, 陈 笑, 沈中华等. 激光水下打靶力学效应的测试与分析 [J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(5): 599~603
- 11 Ling Lei, Lou Qihong, Li Shuzhi *et al.*. Microcutting Si wafer in water bath by the second and third harmonic output of YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 340~342  
凌 磊, 楼祺洪, 李抒智等. 水浴条件下 YAG 倍频-三倍频激光切割 Si 片比较 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 340~342
- 12 Yang Wei, Peng Xinhan, Zhang Jun. Study of laser cutting technology for silicon wafer under water [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3064~3067  
杨 伟, 彭信翰, 张 骏. 水下激光切割硅片的工艺研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3064~3067
- 13 Zhang Hua, Xu Jiawen, Wang Jiming. Experimental study of neutral salt solution assisted laser machining [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1836~1840  
张 华, 徐家文, 王吉明. 中性盐溶液辅助激光加工试验研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1836~1840
- 14 Q. C. Guo, H. Zhou, C. T. Wang *et al.*. Effect of medium on friction and wear properties of compacted graphite cast iron processed by biomimetic coupling laser remelting process [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(12): 6266~6273
- 15 K. Amikura, T. Kimura, M. Hamada *et al.*. Copper oxide particles produced by laser ablation in water [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**(21): 6976~6982
- 16 C. Barnes, P. Shrotriya, PalMolian. Water-assisted laser thermal shock machining of alumina [J]. *International J. Machine Tools*, 2007, **47**(12): 1864~1874
- 17 Liu Jinshou, Qiu Ruiqin, Xu Guochang. Theoretical and experimental studies on the characteristics of the energy absorption of the metal in laser processing [J]. *Laser Journal*, 1994, **15**(1): 29~32  
刘金授, 邱瑞钦, 徐国昌. 激光加工中金属能量吸收特性的理论与实验研究 [J]. *激光杂志*, 1994, **15**(1): 29~32