

文章编号: 1001-3806(2007)03-0326-04

## 应用 ABAQUS 模拟激光焊接温度场

胡增荣, 周建忠\*, 郭华锋, 杜建钧  
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了减小焊接变形, 优化焊接工艺, 需要准确预测激光焊接过程中温度场的分布情况, 使用有限元模拟来预测温度场的分布是一种较好的方法。通过分析和总结激光焊接过程有限元模拟和理论分析的研究现状, 以平板的焊接为例, 建立了物理模型, 并利用 ABAQUS 进行了激光焊接三维温度场的有限元模拟, 讨论了模型的网格划分、边界条件及其模拟结果的后处理。模拟结果可以给出试件上任意一点任意时刻的温度情况, 在激光功率为 2000W、焊接速度为 20mm/s 的参数下模拟焊接 2mm 厚的 A3 钢板。结果表明, 最高温度为 3100℃ 左右, 距焊接中心横向 4mm 处 A 点的最高温度为 150℃ 左右, 与相同参数条件下的实验结果基本一致, 说明有限元模拟可以准确预测焊接过程的温度场分布情况。

**关键词:** 激光技术; 激光焊接; 温度场; ABAQUS; 数值模拟

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A

### Simulation of temperature field of laser welding by ABAQUS

HU Zeng-rong, ZHOU Jian-zhong, GUO Hua-feng, DU Jian-jun  
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to reduce the deformation of welding parts, optimize welding technics, it is necessary to forecast the thermal field of welding process. It is proved the finite element analysis (FEA) is a good method to resolve the problem. After reviewing the present research of the finite element simulation and theoretical calculation of the laser welding, a physical model for plate welding was built and its temperature field was simulated based on ABAQUS, the modeling and meshing method, boundary conditions and the simulation result were discussed. The simulation results can tell us the temperature of any point of the workpiece at any time. For a 2mm thick A3 steel plate, the simulation results are the highest temperature is 3100℃, the temperature of the point A 4mm distant from the center point of the plate is 150℃ under the condition of 2000W laser power and 20mm/s welding speed, which are in good agreement with experimental results and prove that the FEA can be used to forecast the temperature field of welding process precisely.

**Key words:** laser technique; laser welding; temperature field; ABAQUS; numerical simulation

## 引 言

激光焊接由于其飞溅少、热影响区小、焊缝成形美观等优点, 在焊接领域得到越来越广泛的应用。目前焊接的模拟对象方面主要包括温度、位移、应变、应力等<sup>[1]</sup>。现在由于大型商业有限元软件的飞速发展, 对激光焊接过程有限元数值模拟的研究越来越多地借助于这些成熟的商业软件, 如 ANSYS, ABAQUS 等都能较为有效地处理激光焊接过程中的高能密度造成的焊缝及热影响区的网格尺寸小, 模型的自由度数目庞大, 高度的非线性导致求解过程收敛困难等问题, 而且这些软件的后处理器可以很方便地将计算结果进行彩色等值、矢量图和梯度等多种直观显示。

作者简介: 胡增荣 (1975-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事先进制造技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhoujz@ujz.edu.cn

收稿日期: 2006-01-04; 收到修改稿日期: 2006-03-07

## 1 激光焊接中传热模型与温度场的理论计算

### 1.1 传热模型及理论计算结果

当激光功率密度达到  $10^6 \text{W}/\text{cm}^2$  时, 激光能量向工件输入的速率远大于传导、对流、辐射散热的速率, 材料表面产生汽化而形成小孔, 激光能量是通过小孔而进行转换和传递的。激光焊接中熔池与小孔的几何特征如图 1 所示<sup>[2]</sup>。焊件表面被加热、熔化、蒸发, 在

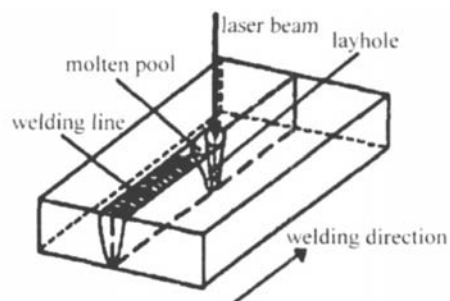


Fig 1 Geometric features of molten pool and lay hole in laser welding

蒸气压力的作用下形成小孔,当小孔产生的蒸气压力与熔池中液体金属的静应力达到平衡时,小孔是稳定存在的<sup>[31]</sup>。

对于无限扩展板上作匀速直线运动的热源(速度为  $v$ ,厚度方向的热功率为  $q/h$ )时,距移动热源  $r$  处的温度  $T$ (坐标  $x$  为热源移动方向)的理论计算式为<sup>[41]</sup>:

$$T - T_0 = \frac{q}{h2\pi\lambda} \exp(-v_r x/2a_0) K_0 \left[ r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{d}{a}} \right] \quad (1)$$

式中,  $h$  为板的厚度;  $K_0$  为第二类零阶修正贝塞尔函数; 传热系数  $d = 2(\alpha_c + \alpha_r) / c\rho h$ ;  $c$  为材料比热容;  $\rho$  为密度;  $q$  为激光功率密度;  $\alpha_c$  为对流换热系数;  $\alpha_r$  为辐射换热系数;  $\lambda$  为热导率;  $a$  为总换热系数;  $a_0$  为热流集中程度系数;  $T_0$  为初始时刻的温度。使用上式,代入材料特征参数,就可以计算出准稳态激光焊的温度场分布。代入相应的参数,用 MATLAB 计算出的理论平板焊接的温度场分布见图 2。

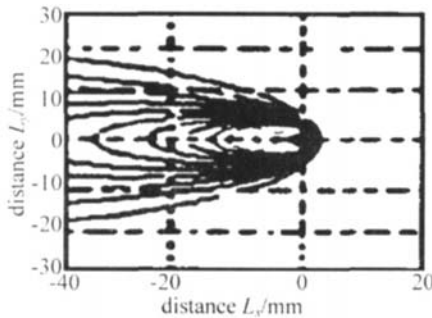


Fig 2 Calculation temperature distribution

### 1.2 基本热传导方程

在激光持续扫描过程中的某个时刻温度分布,可以用经典热传导方程来描述。在直角坐标系  $(x, y, z)$  中,经典热传导方程为<sup>[51]</sup>:

$$\kappa_c \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中,  $\kappa_c$  为有效导热系数;  $t$  为时间。

## 2 激光焊接的数值模拟分析

### 2.1 热物性参数及激光能量密度的确定

材料的比热容,传热系数等会随着温度的变化而

Table 1 Relative physical properties of the material

$T/K$	$\kappa/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$T/K$	$\kappa/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
273	74.7	435.1	1173	28.2	656.9
473	62.1	518.8	1273	29.3	569.0
573	55.55	552.3	1373	32.2	606.7
673	49.2	602.5	1473	32.2	640.2
773	43.0	661.1	1573	32.2	736.4
873	38.2	753.1	1773	32.2	836.8
1073	29.4	832.6			

变化,材料温度相关的比热容与导热系数如表 1 所示,表中  $T$  为温度;  $\kappa$  为导热系数;  $c$  为比热容。

材质密度为  $7800\text{kg/m}^3$ ,熔点为  $1493\text{C}$ ,熔化潜热为  $281400\text{J/kg}$ ,激光热源的功率为  $2\text{kW}$ ,光斑直径为  $0.3\text{mm}$ ,热源移动速度为  $20\text{mm/s}$ ,初始温度为  $20\text{C}$ 。在焊接中,一般近似认为激光束是基模高斯光束,功率为  $P$ ,光斑半径为  $w$  的基模高斯光束,其功率密度分布可表示为<sup>[61]</sup>:

$$q(x, y) = \frac{2P}{\pi w^2} \exp\left[-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2}\right] \quad (3)$$

室温时多数金属对  $10.6\mu\text{m}$  波长的  $\text{CO}_2$  激光的反射率都超过  $90\%$ ,但是当焊接正常进行,形成的小孔稳定存在时,对光速的吸收率都急剧增加<sup>[71]</sup>。在此考虑到激光传输过程的损耗等取稳定时的吸收率为激光功率的  $0.75$  倍。

对于激光束的移动,如图 3 所示。假设  $t = 0$  时刻

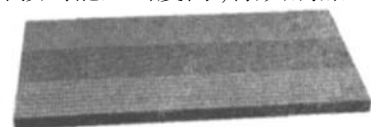


Fig 3 The coordinate systems of laser beam

在坐标系  $x-y-z$  中的  $0(0,0,0)$  点引入一个以速率  $v$  沿  $x$  轴正方向匀速运动的激光束,其功率密度为  $q(x, y)$ 。为便于分析,建立坐标原点位于光斑中心,且与激光束一起运动的动坐标系  $x'-y'-z'$ 。在图 3 所示的情形下,  $y' = y, z' = z$ ,动坐标系可用  $x'-y'-z$  表示。静坐标系的  $x$  与动坐标系的  $x'$  的关系为  $x = x' + vt$ 。

### 2.2 模型的建立和网格的划分

对平板三维激光焊接有限元模拟,建模如图 4 所示。激光焊接的能量密度高,有效加热区域非常小,因



而为了获得较为精确的解,在网格划分时要求在焊缝附近采用很小的网格尺寸,一般单元大小应该和光斑大小相当或更小,而为了减小计算成本,在远离焊缝的区域可以选择较大的网格尺寸<sup>[81]</sup>。模型尺寸为  $50\text{mm} \times 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ ,板中间焊缝附近区域单元格  $0.5\text{mm} \times 0.25\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ,外围区域单元格  $0.5\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 。单元类型为热传导单元 DC3D8。

### 2.3 边界条件的处理

初始条件是材料的初始温度,假设其为:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (4)$$

边界条件考虑激光的加热作用,焊接表面的对流换热与辐射换热:

$$-\kappa_e \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} + h(T_s - T_{ext}) + \sigma \epsilon (T^4 - T_{ext}^4) = q \quad (5)$$

式中,  $T_s$ 为材料表面温度;  $T_{ext}$ 为环境温度;  $h$ 为对流换热系数;  $\sigma$ 为 Stefan Boltzmann 常量;  $\epsilon$ 为热辐射系数。在焊接过程中,当能量密度很高的激光辐照材料表面时,由于作用时间极为短暂,激光能量被迅速吸收并转换成热能,产生瞬时高温区,使金属迅速熔化。材料从激光获得的热能远大于材料因温度升高而向外释放的热能,近似计算可以不考虑散热情况。另外,相变潜热对温度分布也有很大的影响,因此有必要考虑其影响<sup>[9]</sup>,要在 ABAQUS程序中计入相变潜热因素。

### 2.4 模拟结果及讨论

图 5与图 6分别是不同时刻的模拟温度场情况。图 7是焊接结束后沿焊接中心线的温度分布曲线。图 8是焊接板中心点的温度随时间变化的曲线,它清

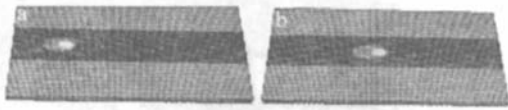


Fig. 5 Temperature distribution of workpiece at 0.6s and 1.2s

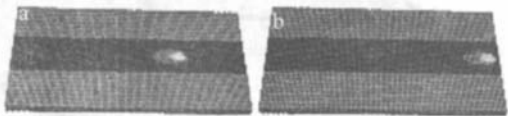


Fig. 6 Temperature distribution of workpiece at 1.8s and 2.4s

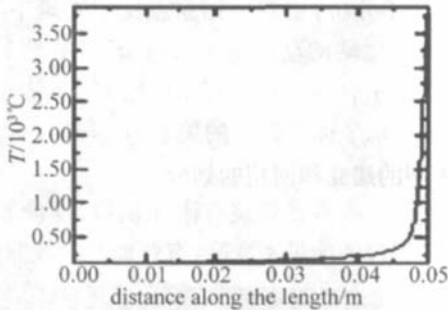


Fig. 7 Temperature curve along the center at the end of welding

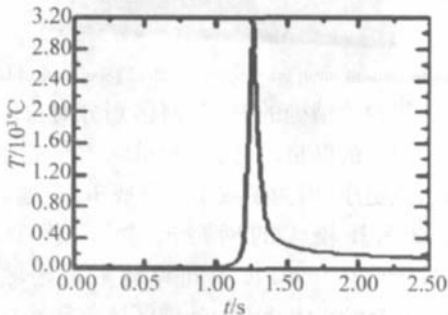


Fig. 8 Temperature vs. time curve of plate center

楚地表示了焊缝中心点的冷却速度以及所能达到的峰值温度。图 9是距板中心横向 4mm 处一点 (A 点) 的温度-时间曲线。由模拟结果可以看出,在以上参数条件下,激光光斑中心最高温度在 3100℃左右,距离光斑中心仅仅 4mm 远的一点最高温度只有 150℃左右,

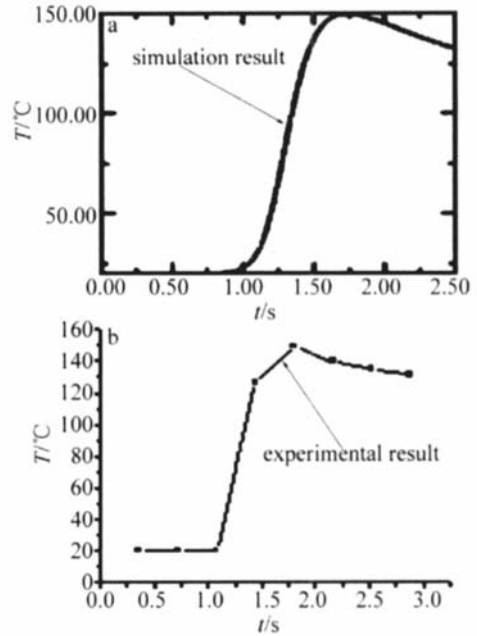


Fig. 9 Temperature vs time curve

说明激光焊接热影响区域小,但同时温度梯度也很大,光斑附近区域温度变化剧烈,远离光斑的区域温度变化极其平缓。

### 3 实验结果

为了验证有限元分析结果的合理性,进行了相关的实验。实验所用的设备是南京东方激光有限公司生产的 NEL-2000SM 高功率横流 CO<sub>2</sub> 激光器。采用对接焊接形式,两试件固定在专用夹具上,可以很方便的对中焊缝,使激光束可以准确重合缝隙,并安装在数控工作台上,工作台行程为 300mm,速度 0.1m/m in ~ 5m/m in 可调。为减少接缝的间隙,试件焊接面经过光整加工。焊接过程中,采用侧吹氩气作为保护气体<sup>[10]</sup>,气流量为 30kPa 左右,用来保护聚焦镜头及抑制光致等离子体的形成。

采用与模拟相同的 A3 钢板与工艺参数,板长为 50mm,板宽为 25mm,板厚为 2mm,其化学成分见表 2,

Table 2 Chemical element of A3

chemical element	C	Mn	Si	S	P
content	0.14~0.22	0.30~0.65	≤0.30	≤0.050	≤0.045

热物性参数见表 1。材质密度为 7800kg/m<sup>3</sup>,熔点为 1493℃,熔化潜热为 281400J/kg,激光热源的功率为 2kW,热源移动速度为 20mm/s,初始温度为 20℃,采用焦距为 127mm 的离轴抛物镜进行反射聚焦,离焦量为 -0.5mm。

激光焊接过程中激光功率、焊接速度、离焦量以及等离子体等工艺参数都对焊接质量有着显著的影响,合理选择工艺参数是焊接的关键之一<sup>[11]</sup>。激光焊接



是一个快速加热快速冷却的过程,这一过程必然对材料的显微组织有影响,反之从金相的变化情况也可以推测热作用的过程,为此研究了焊接后的焊缝金相,见图 10。从熔区的显微组织可看到,组织分布更加致

密、均匀,没有缺陷,呈现出枝条状组织结构,表明由于焊接过程中的快速加热和快速冷却,原基体组织纯化作用和重新结晶,有部分马氏体产生。由焊缝断面的照片看,激光焊接的热影响区很窄,并且由上到下逐渐

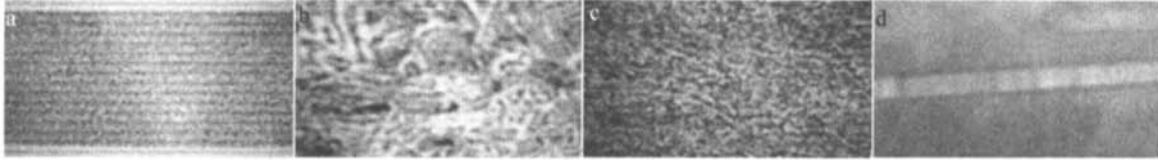


Fig 10 The photograph of microstructure

a—welding line section  $16\times$  b—transition zone  $2000\times$  c—welding line zone  $500\times$  d—welding line

减小,与模拟结果定性进行比较,可发现两者是一致的。

采用热电偶测量工件表面的瞬态温度值,选取实验板上的 A 点作为热循环测试点。限于实验条件,本实验中未能测出激光光斑中心处熔池的温度。如图 9 所示,图 9a 为模拟结果,图 9b 为实验中每隔 0.36s 采集一个数据所绘出的温度时间曲线,从图 9a、图 9b 对比可以看出,其走势和极值都较为一致,说明模拟结果与事实情况是符合的。对于实验结果与模拟结果的差异,主要有以下几方面的原因:模拟时材料是处于理想状态的,各相关参数都是理论值,没有能计入实际材料可能存在的偏差,如材料的密度不均匀,导热不是严格的各向同性,辐射与对流散热,材料对激光能量的吸收与时间和温度有关等情况,综合造成模拟结果与实验结果稍有差异。在以后的模拟工作中还需要在这些方面加以改进,以使模拟更贴近实际情况,得到更精确的模拟结果。

#### 4 结束语

借助于大型通用有限元软件 ABAQUS 对高斯分布热源作用下的激光焊接温度场进行了有限元分析。通过模拟值与实测值相比较,验证了运用 ABAQUS 对激光焊接温度场模拟的结果是正确的,可以将模拟结果用于指导实验与生产。

#### 参 考 文 献

[1] LID Q, MEN Q G, TAO J. Modeling and numerical simulation of dynamic displacement field of welding [J]. *Welding & Joining*, 2002

(2): 13~15 (in Chinese).

- [2] XUE Zh M, GU L, ZHANG Y H. Numerical simulation on temperature field in laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24 (2): 79~82 (in Chinese).
- [3] ZHANG W H, ZHOU J, TASHI L. Numerical modeling of keyhole dynamics in laser welding [J]. *Proc SPIE*, 2003, 4831: 180~185.
- [4] XU J H, LUO Y M, ZHANG J Zh. Numerical simulation and parametric study for the heat transfer in keyhole high power density welding process [J]. *Journal of Southeast University*, 1999, 29 (11): 62~67 (in Chinese).
- [5] BRUGGEMANN G, MAHRLE A, BENZIGER T. Comparison of experimental determined and numerical simulated temperature fields for quality assurance at laser beam welding of steel and aluminous alloys [J]. *Elsevier Science*, 2000, 10 (33): 453~463.
- [6] LI J Ch, LI X Y, CHEN Q H. Fast calculation of thermal action of actual beam during the laser heat treatment [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 1998, 12 (3): 262~266 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y K, ZHONG Zh J, YE Y X. *Laser processing technics* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 73~74 (in Chinese).
- [8] AMARA E H, MEBANIN, ALLALOU N *et al* Numerical thermodynamic field modeling of a metallic substance during laser welding [A]. *Proceedings of the CAOL 2005 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers* [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Place of Publication, 2005. 146~154.
- [9] LIU Sh H, WAN P T, HU L G. Study on numerical of the temperature field in laser welding of steel sheet [J]. *Electric Welding Machine*, 2001, 31 (8): 16~19 (in Chinese).
- [10] HUA Y Q, WANG Zh Sh, YANG J Ch. The research on the experiment of laser welding for A3 thick steel plate [J]. *Applied Laser*, 2005, 25 (4): 230~232 (in Chinese).
- [11] ZHOU Y Y, HU Ch K, CHEN P F. The laser welding of the double-linked gear in automobile gear-box [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (4): 445~448 (in Chinese).

(上接第 284 页)

[6] SHIMA A. Studies on bubble dynamics [J]. *Shock Waves*, 1997 (7): 33~42.

[7] CHEN X, XU R Q, SHEN Zh H *et al* Experimental and theoretical study of the oscillation of a laser-induced bubble [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32 (5): 331~335 (in Chinese).

[8] VOGEL A, BUSCH S, PARLITZ U. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown

in water [J]. *J Acoust Soc Amer*, 1996, 100 (1): 148~165.

- [9] XU R Q, CHEN X, SHEN Zh H. Dynamics of laser-induced cavitation bubbles near solid boundaries [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53 (5): 1413~1418 (in Chinese).
- [10] QID M, LU Ch J, HE Y Sh. Experimental investigation of cavitation collapse noise [J]. *Acta Acustica*, 2000, 25 (6): 532~536 (in Chinese).