

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0582-03

激光在圆柱形工件上产生的热场和激光淬火模拟

陈庆华¹ RAISSI Kadour² VAGLIO Patrick² DEVOT Katy²

(¹ 昆明理工大学材料与冶金工程学院材料系, 昆明 650093)
(² 巴黎高等机械工程学院(ENSAM de Paris, FRANCE))

摘要 运用差分法建立了圆柱体表面激光产生热场的计算,对不同的激光分布进行了模拟研究,给出了不同尺寸圆柱形物体的热场模拟,结果表明,激光在圆柱体、管状物体上产生的热场与激光分布形式、圆柱体半径大小有关,在圆柱体半径较小(或管状物半径较小、壁厚较薄)时,激光热处理的自冷却条件不成立。

在模拟的同时,用相关尺寸的圆柱形和圆管形试样进行了热处理研究,试验结果和模拟结果进行了比较,充分肯定了模拟结果的正确性。同时,从模拟结果和实验结果的误差分布可以看出,激光热处理时,如果吸收层的不稳定会带来模拟和试验控制的困难,因此,除了研究模拟问题外,必须解决激光在试样表面的稳定吸收问题,否则,模拟结果和实验结果是不可预计的。

关键词 激光热处理,热场模拟,差分法,表面吸收

中图分类号 TN249 文献标识码 A

Modelling of Thermal Field Induced by Laser on the Surface of Cylinder

CHEN Qing-hua¹ RAISSI Kadour² VAGLIO Patrick² DEVOT Katy²

(¹ Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)
(² Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, France)

Abstract The finite difference method was used to calculate the thermal field induced by laser beam with different power repartitions on the surface of cylindrical body with different radius. It shows that the induced thermal field is related to the laser repartition as well as radius of cylinders. It is important to note that there is a critical radius for a cylinder to be self-quenched by a laser beam. Otherwise, the assisted cooling will be inevitable. For the tubes, the same scene happens when a critical radius and thickness is reached.

The experiments were performed to verify the validity of the modelling. Comparison between experiments and theoretical calculation confirms the validity of the finite difference calculations. It is evident that the absorption at the surface is also an important factor in the laser heat treatment. Therefore the appropriate method of modelling as well as the stable absorption is the key to predict the laser induced thermal effects.

Key words laser heat treatment, thermal modelling, finite difference method, absorption

1 引言

从 70 年代以来,国内外已有不少研究人员对激光和物质相互作用及热传导过程进行了深入研究,基本解决了导热系数为常数、热扩散系数为常数的均匀或各向异性无限大介质的导热方程的稳态和非稳态解,对简单的高斯形激光束、均匀分布的方形激光束得到了形为单积分的简单解^[1~3];对任意分布的激光束还可以通过快速傅里叶变换进行快速求解^[4,5];同时,也可以用有限差分法或有限元法对一些复杂的问题求出导热方程的数值解^[6~8]。

激光热处理特别适用于复杂工件的局部热处理,但是有关这个问题的模拟报道较少,因此有必要进行模拟和实验研究。本文研究圆柱体在激光作用下的热场和相应的热处理效果。

2 微分方程及其差分解

激光作为一种高强度的热源,作用于圆柱表面,该问题的微分方程可以写成如下形式

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{H}{k_1} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

边界条件可写成

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial n} = q_c + q_r \quad (2)$$

以上两式中, H 为圆柱内内热源的强度函数, k_1 为圆柱的导热系数, α 为圆柱的热扩散系数, T 为研究点 (r, φ, z) 的温度, q_c 为表面对流传热的热流, q_r 为表面辐射传热的热流。

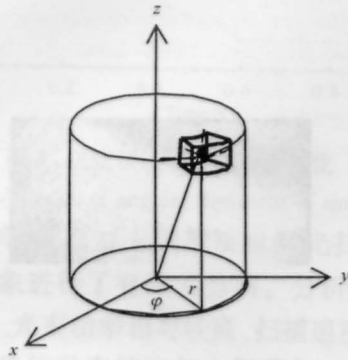


图1 柱坐标微元示意图

Fig.1 Differential elemental volume in the cylindrical coordinates

用显格式差分法, 采用均匀网格(见图2)对圆柱进行分割, 网格点 $P(i, j, k)$ 的坐标定义如下

$$r(P) = (i - 1) \cdot \Delta r + R_1 \quad i \in [1; p + 1] \quad (3)$$

$$\varphi(P) = (j - 1) \cdot \Delta \varphi \quad j \in [1; q] \quad (4)$$

$$z(P) = (k - 1) \cdot \Delta z \quad k \in [1; r + 1] \quad (5)$$

$$\Delta r = (R_2 - R_1) / p \quad (6)$$

$$\Delta \varphi = 2\pi / q \quad (7)$$

$$\Delta z = L / r \quad (8)$$

其中 R_2 为圆柱体外半径, R_1 为圆柱体内半径, L 为柱体长度。

如果圆柱体是被沿轴向切开的圆柱体, 那么角分度 $\Delta \varphi$ 略有不同, 其余相同。

很显然圆柱体被分割成了 $(p + 1) \times q \times (r + 1)$ 个点形成的差分网格, 对各个网格点必须列出它的差分方程。需要注意的是 $T_{i,j,k}^{(n)}$ 是任一点 $P(i, j, k)$ 在 t 时刻的温度, 而 $T_{i,j,k}^{(n+1)}$ 是该点在 $t + \Delta t$ 时刻的温度。由以上分割可列出圆柱内结点的显示差分方程

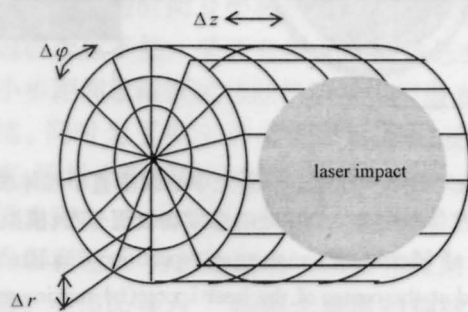


图2 圆柱体网格分割示意图

Fig.2 Finite differences mesh applied to deal with the cylindrical body problem

$$T_{i,j,k}^{(n+1)} = T_{i,j,k}^{(n)} k_1 + \alpha \Delta t \left[\frac{T_{i+1,j,k}^{(n)} - 2T_{i,j,k}^{(n)} + T_{i-1,j,k}^{(n)}}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \frac{T_{i+1,j,k}^{(n)} - T_{i-1,j,k}^{(n)}}{2\Delta r} + \frac{T_{i,j+1,k}^{(n)} - 2T_{i,j,k}^{(n)} + T_{i,j-1,k}^{(n)}}{(r\Delta \varphi)^2} + \frac{T_{i,j,k+1}^{(n)} - 2T_{i,j,k}^{(n)} + T_{i,j,k-1}^{(n)}}{(\Delta z)^2} \right] + \frac{\alpha \Delta t H}{k_1} \quad (9)$$

对表面外结点, 在忽略辐射传热和对流传热, 同时只考虑激光表面吸收的情况下可将差分方程写成

$$T_{i,j,k}^{(n+1)} = T_{i,j,k}^{(n)} + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r} \left(\frac{2}{\Delta r} - \frac{1}{R_2} \right) [T_{i-1,j,k}^{(n)} - T_{i,j,k}^{(n)}] + \frac{\alpha \Delta t}{R_2^2 (\Delta \varphi)^2} [T_{i,j+1,k}^{(n)} - 2T_{i,j,k}^{(n)} + T_{i,j-1,k}^{(n)}] + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2} [T_{i,j,k+1}^{(n)} - 2T_{i,j,k}^{(n)} + T_{i,j,k-1}^{(n)}] + \frac{2\alpha \Delta t}{k_1 \Delta r} Pr(r, \varphi, z, k_1, t) \quad (10)$$

其中 Pr 为激光功率分布函数, 考虑到其它内外结点情况, 即可以列出相应的差分方程^[8], 因此, 通过计算机编程就可计算激光在圆柱内部产生的温度场。

3 计算结果和实验结果的讨论

对 45# 钢制成的圆柱试样进行了模拟, 图 3(a) 所示的是在一个直径为 10 mm 的圆柱表面用激光以均匀的角速度扫描一周并在激光束中心处切开圆

柱看到的温度极值分布假彩图。由图中可见, 激光扫描初期和结束时的温度场极值相差较大, 开始时表面温度较低, 处理深度较浅; 到扫描后期处理深度较深, 表面温度相应提高, 可能即将达到钢的熔点, 此时, 表面奥氏体晶粒可能长大; 从整个过程中可见, 到扫描后期, 由于热量的堆积, 冷却条件变差, 因此, 必然影响自冷却效果。由于以上两点, 从模拟的角度和实验都表明, 激光处理圆柱体形状的工件直径为 10 mm 时, 如果扫描速度比较慢, 已经较难获

得满意的处理效果,但是,如果提高扫描速度,又可能导致处理深度减小,因此,圆柱体的激光处理受到一个临界尺寸的限制。同理,对于管状柱体,激光处理受到直径大小和壁厚的限制,存在一个客观的临界尺寸。

为了验证模拟的正确性,进行了如图 3(b)和(c)所示的模拟和实验,激光为国产 HJ-3 千瓦横流

CO₂ 激光,输出功率为 1000 W,激光束经过焦距为 200 mm 的透镜的聚焦,样品位于焦点下方,离焦量为 80 mm。其余参数和前模拟相同,在圆柱的端面处的热场模拟结果如图 3(b)所示,可见模拟和实验符合较好(误差小于 10%)。经过若干实验和模拟的比较,都证明模拟的正确性,因此,可以用模拟的方法来预计实验结果。

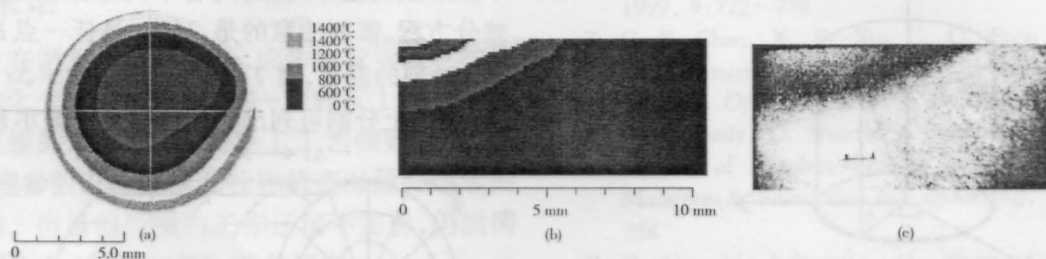


图 3 (a)激光扫描圆柱体时沿激光中心线垂直于柱体轴的横断面上的温度场极值分布;(b)用激光进行热处理时,圆柱体端面 $\varphi=280^\circ$ 处的温度场极值分布(模拟);(c)圆柱体端面 $\varphi=280^\circ$ 处实验所得宏观金相图

Fig.3 (a) Maximum temperature repartition simulated in the cross section perpendicular to the axe of the cylinder and at the center of the laser spot; (b) maximum temperature repartition simulated at the cross section at $\varphi=280^\circ$; (c) photo of quenched zone at the cross section at $\varphi=280^\circ$

大量的模拟证实,如果激光的强度在 $30 \sim 100 \text{ W/cm}^2$ 时,可被激光淬火的钢材圆柱体的临界直径约为 10 mm,同样管状钢材的临界半径和管壁厚度,可以在对不同条件的圆柱体进行模拟后获得。

同时需要指出的是,以上的模拟结果都是建立在表面激光吸收是稳定的,并且假定钢材的热物性系数为常数的基础上获得的,因此必须要有一种稳定的吸收涂料和适当的平均导热和热扩散系数。

4 结 论

总结以上论述,我们可以得出以下一些结论:

1) 用均匀网格差分法可以得出圆柱体试样的差分方程组,应用计算机数值计算的方法可以求出激光照射下圆柱形钢铁试样的温度场分布,设定一定的等温线可以较为准确地模拟圆柱形钢铁试样的淬火区域的大小(在以上的模拟中取钢材的奥氏体化温度 $A_{c1} \sim 800^\circ\text{C}$,用以界定钢材的淬火区边界);

2) 从模拟和实验结果都可以证明,对应于一定的激光功率密度,都有一定的一个临界圆柱体半径或对应于管状钢材都有一个临界半径和临界壁厚;

3) 如果要保证模拟结果和实验结果的吻合,必须恰当地选择稳定的激光吸收层和恰当的平均热物

性系数;

4) 通过模拟计算可以较准确地预计淬火区域的尺寸和淬火的自冷却条件是否具备,从而可以较准确地控制热处理结果。

参 考 文 献

- 1 H. E. Miller, J. A. Wineman. *Metal Progress*, 1977, (5)
- 2 M. Lax. Temperature rise induced by a laser beam. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(9):3919~3924
- 3 D. J. Sanders. Temperature distribution produced by scanning gaussian laser beam. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(1): 30~35
- 4 J. C. Li, Q. H. Chen, J. Merlin. Rapid evaluation of the temperture field and the geometry of the hardened zone induced by a high power laser beam on the surface of metallic materials. *J. Phys.* III, 1996, **6**:1293~1306 (in Franch)
- 5 S. D. Gnanamuthu. *Laser surface treatment. in Application of Laser in Materials Processing*, 1979
- 6 S. Kou, D. K. Sun, Y. P. Le. A fundamental study of laser transformation hardening. *Metall. Trans. A.*, 1983, **14A**:643~653
- 7 李俊昌. 激光热处理控制研究. 北京:冶金工业出版社,1995
- 8 陈庆华. 激光热处理区的几何形貌和金相学特征的模拟. 法国里昂应用科学学院博士论文. 1995. 95ISAL0082