

激光相变硬化工艺参数的选择

任恩扬 陈铁力 林渝 李俊昌

(昆明理工大学激光应用研究所, 昆明, 650093)

摘要: 激光在工业应用中, 相变硬化是一个重要方面。其工艺选择直接影响着相变硬化层的深度和宽度。

从热传导基本方程出发, 得出了相变硬化过程中工艺参数(激光功率、光斑直径、离焦量、扫描速度)与硬化层深度、宽度之间的关系。用编制的工艺参数选择的计算机软件计算的结果与实验结果进行了比较, 其相对误差为: 硬化层宽度平均相对误差为 3.7%, 硬化层深度为 18.7%。

关键词: 激光 相变硬化 工艺参数

Selecting technological parameters from laser induced phase transformation hardening processes of materials

Ren Enyang, Chen Tieli, Lin Yu, Li Junchang

(Institute of Laser Application, Kunming Institute of Technology, Kunming, 650093)

Abstract: We solve the heat conduction equation with semi-infinite boundary condition and present a mathematical model to emulate the relationship of the technical parameters ω (beam radius), v (scanning speed) and P (laser power) of phase transformation processing to depth and width of the hardened region. The comparisons of emulation with tested results show that the average relative errors of width and depth of hardened region are 3.7% and 18.7%, respectively. This results are meaningful for better selection of technical parameter.

Key words: laser phase transformation hardening technological parameter

paraxial wave equation in free space. Fortunately, SG beams preserve their shape and order, while propagating through optical imaging systems, which would be useful for some practical applications. Finally, we would like to point out that the results in sections 3 and 4 are valid for the unapertured case. The propagation properties of apertured SG beams will be published elsewhere.

This work was supported by the National Hi-Tech Foundation of China.

References

1 Partent A, Morin M, Lavigne P. Opt & Quant Electron, 1992; 24: 1071~ 1079

2 Palma C, Bagini V. Opt Commun, 1994; 111: 6~ 10

* * *

作者简介: 吕百达, 男, 1943 年出生。教授, 博士生导师。主要研究方向为新型和高功率固体激光器件与技术, 光腔物理与光束传输变换。

收稿日期: 1995-12-03 收到修改稿日期: 1996-04-20

一、引言

在激光相变硬化工艺的研究中,曾提出过多种数学模型^[1~3],应用中与实际情况比较接近,但主要是经验结果,在理论上不够严格。因此,我们将从热传导理论出发,较严格地对激光热处理工艺进行较深入地探讨。

二、问题的提出

激光相变硬化是通过激光与材料的相互作用使材料表面发生相变而形成一硬化层,以提高材料的表面硬度和耐磨损性能。其过程是使激光束照射材料表面,材料表面在吸收了激光的能量后,温度迅速升高,表面温度高于金属的相变临界点温度而低于该金属的熔点;当激光束离开表面时,材料表面的能量迅速向内部传递,在表面层形成极高的冷却速度,从而在表面形成相变硬化带。

经激光表面相变硬化处理后,在材料表面形成截面为弯月形的硬化层,它的最大宽度为 $2K$, 中央处最大深度为 S , 见图 1。



Fig. 1 The profile of hardened region. The width and depth of the region are $2K$ and S

我们需要解决的问题是对于用某种材料做成的工件,在给定预期的 K , S 后,如何选择相变硬化工艺的参
数:激光输出功率、激光光束的等效直径、激光的扫描速度(或工件的移动速度),使激光作用的结果能达到预期的要求。

三、激光高斯光束半径的选择

设材料和激光的基本参数为: ρ (无量纲): 材料的吸收系数, k (W/m·K): 材料的导热系数, α (m/s): 材料的热扩散系数, T_{\max} (K): 材料的熔点, T_{Acl} (K): 材料的相变临界温度, K (m): 材料硬化带最大半宽度, S (m): 硬化层中央最大深度, t (s), τ (s): 激光的作用时间, P (W): 激光的平均输出功率, R (m): 激光的高斯光束半径, v (m/s): 激光光束的扫描速度, h (m): 激光光束的离焦量, f (m): 透镜的焦距, r (m): 未聚焦前的激光光束半径。

理论和实践证明,相变硬化带的最大宽度与激光高斯光束半径有关。根据经验公式,可以推得^[4]:

$$K = \left(2\pi \ln \frac{T_{\max} - T_0}{T_{\text{Acl}} - T_0} \right)^{1/2} R \quad (1)$$

式中, $R = hr/f$, T_0 为环境温度。

此外,激光高斯光束半径与激光输出功率有关^[9]:

$$P = \frac{\pi k R}{\sqrt{2\rho}} T_{\max} \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可以确定当相变硬化层的半宽度为 K 时的激光高斯光束半径 R (或离焦量 h) 和激光输出功率 P 。若 P 小于激光输出的最大功率 P_{\max} , 则按(1), (2)式所求得的 R , P 是有效的。若 P 大于激光输出的最大功率 P_{\max} , 则应调整 K 的数值,使其满足激光输出额定功率的限制,然后重新确定 R (或 h) 和 P 。

四、激光输出功率与扫描速度的关系

激光热处理是一个短暂的、快速的加热和冷却过程。热影响区被限制在激光光束直接照

射到的材料表面及其临近区域。因此,在求解热传导方程时,可将被处理的工件视为导热性能不变的、半无限大的均匀介质,将材料受到的激光照射的热作用视为在材料表面存在一个以速度 v 沿 x 轴方向移动的局部热源,如图 2 所示。建立并求解有局部热源的热传导方程可得出工件材料在激光作用区域附近的温度场。我们直接引用在激光光束照射下的材料表面($z=0$)的温度 T 的解析表达式^[5]

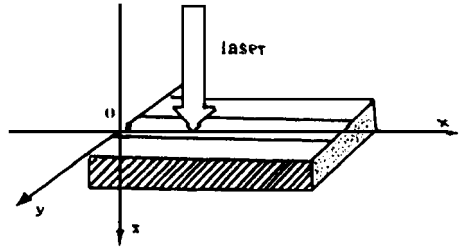


Fig. 2 The sketch of laser processing

$$T = \int_0^{\tau} dt \frac{2 \rho P_0 \sqrt{\alpha}}{k \pi^{3/2}} \frac{\exp\{-[2(x-vt)^2 + 2y^2]/[8\alpha(\tau-t) + R^2]\}}{\sqrt{\tau-t}[8\alpha(\tau-t) + R^2]} \quad (3)$$

$$\text{令: } \xi = \sqrt{\alpha(\tau-t)}, \quad d\xi = -\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha(\tau-t)}} dt$$

$$\text{且当 } t=0 \text{ 时: } \xi = \sqrt{\alpha\tau}$$

$$t = \tau \text{ 时: } \xi = 0$$

则(3)式变为:

$$T = \int_0^{\sqrt{\alpha\tau}} d\xi \frac{4 \rho P_0}{k \pi^{3/2}} \frac{\exp\{-[2[x - v(\tau - \xi^2/2)]^2 + 2y^2]/(8\xi^2 + R^2)\}}{8\xi^2 + R^2} \quad (4)$$

当 $dT/d\tau = 0$ 时, T 有极大值, 据此可求出材料表面温度达到极大值时的作用时间 τ 。即:

$$\int_0^{\sqrt{\alpha\tau}} d\xi \frac{8v[x - v(\tau - \xi^2/2)]^2}{(8\xi^2 + R^2)^2} \exp\left\{-\frac{2[x - v(\tau - \xi^2/2)]^2 + 2y^2}{8\xi^2 + R^2}\right\} = \frac{\sqrt{\alpha} \exp[-(2x^2 + 2y^2)/(8\alpha\tau + R^2)]}{\sqrt{\tau + (8\alpha\tau + R^2)}} \quad (5)$$

(5)式求出的是位置 x, y 和速度 v 的函数, 在不同的 x, y 位置, 对应于不同的扫描速度, 达到最高温度 T 的扫描时间。可见, 必须选择不同的位置来确定 τ 。

1. 激光光束扫过的中心线上(x 轴方向)激光功率与扫描速度的关系

由于热传导的滞后, 在工件表面上温度最高的点不在激光光束的中心位置, 而是在 $x = 4R, y = 0, z = 0$ 的位置, 将 $x = 4R, y = 0, z = 0$ 代入(5)式, 可以得到:

$$\tau_{\max}(4R, 0, 0) = \tau_0(v) \quad (6)$$

将(6)式代入(3)式, 可以求出在表面上达到的最高温度。这个最高温度应该在工件材料的相变临界点 T_{ACI} 和熔点 T_{\max} 之间, 由此可得:

$$T_{\max} = \int_0^{\xi(v)} dt \frac{2 \rho P_0 \sqrt{\alpha}}{k \pi^{3/2}} \frac{\exp\{-[2(x-vt)^2 + 2y^2]/[8\alpha(\tau-t) + R^2]\}}{\sqrt{\tau-t}[8\alpha(\tau-t) + R^2]} \quad (7)$$

得到扫描速度 v 与激光功率 P 之间的函数关系:

$$P = P_1 = P_{\max}(v) \quad (8)$$

同样可将 T_{ACI} 代入(3)式, 得:

$$T_{ACI} = \int_0^{(v)} dt \frac{2 \rho P_0 \sqrt{\alpha}}{k \pi^{3/2}} \frac{\exp\{-[2(x-vt)^2 + 2y^2]/[8\alpha(\tau-t) + R^2]\}}{\sqrt{\tau-t}[8\alpha(\tau-t) + R^2]} \quad (9)$$

$$\text{由(9)式求出: } P = P_2 = P_{\min}(v) \quad (10)$$

根据(8)式和(10)式可以作出功率 $P_{\max}(v)$ 和 $P_{\min}(v)$ 与扫描速度 v 的关系曲线(图 3)。 P_1, P_2 由(8)式和(10)式所定义。在 $P_1(v) \leq P \leq P_2(v)$ 区域中的任一点都可以使得处于激光光束扫过的中心线上的各点的材料产生相变硬化。

2. 材料表面硬化带边缘处($y=K$)激光输出功率与扫描速度的关系

在材料表面硬化带边缘,点的坐标为 $(4R, K, 0)$ 将其代入(5)式,可以求得该点达到最高温度的时间 $\tau_{\max}(v)$ 与扫描速度之间的关系:

$$\tau_{\max}(v)(4R, K, 0) = \tau_y(v) \quad (11)$$

将(11)式求得的 $\tau_y(v)$ 代入(3)式可求得在点 $(4R, K, 0)$ 达到的最高温度,这个温度应该高于材料的相变临界点 T_{ACI} , 故:

$$T_{ACI} = \int_0^{\tau_y(v)} dt \frac{2\theta P_y \sqrt{\alpha} \exp\{-[2(x-vt)^2 + 2y^2]/[8\alpha(\tau-t) + R^2]\}}{k\pi^{3/2} \sqrt{\tau-t}[8\alpha(\tau-t) + R^2]} \quad (12)$$

由(12)式可得到在材料的硬化带边缘,使得材料刚发生相变硬化所需的激光输出功率 $P_y(v)$ 与扫描速度之间的函数关系(见图 3)。

只要激光输出功率 P 对应于某一速度 v 时能满足:

$$P_2(v) \leq P \leq P_1(v) \quad (13)$$

就能保证在宽度 K 的范围内的表面产生相变硬化。

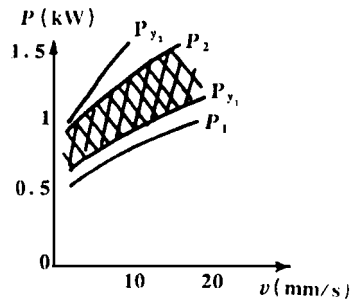


Fig. 3 Here show the calculated curves of the technical parameter P (laser power), v (laser scanning speed)

五、硬化层中央最大深度的确定

考虑到激光的能量不只是沿表面层传播,而且还有一部分沿深度方向传播,则温度场的分布为^[5]:

$$T_{ACI} = \int_0^{\tau_y(v)} dt \frac{2\theta P_y \sqrt{\alpha} \exp\{-[2(x-vt)^2 + 2y^2]/[8\alpha(\tau-t) + R^2] - z^2/[4\alpha(\tau-t)]\}}{k\pi^{3/2} \sqrt{\tau-t}[8\alpha(\tau-t) + R^2]} \quad (14)$$

令 $x=4R, y=0$, 并将由(11)式确定的功率 $P_y(v)$ 与速度 v 代入,积分限由 0 到 $\tau_y(v)$, 温度 T 恰等于相变温度 T_{ACI} , 则由(14)式即可确定硬化带中央的最大深度 Z_{\max} , 可将 Z_{\max} 与期望得到的硬化层深度 S 比较以判断选择的激光热处理工艺参数是否合理。

六、实验验证

为了验证上述理论,我们将实测的结果与之进行比较,为此选择 45# 钢在 HJ-3 千瓦横流 CO_2 激光器上进行激光表面相变硬化处理;试样外型尺寸: $200\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$, 沿长度方向扫描,用 HX-1000 显微硬度仪进行截面的硬度测试及 S, K 测量。45# 钢的有关热学参数为^[6]: 导热系数: $k=30\text{W}/(\text{mK})$; 比热容: $c=500\text{J}/(\text{kgK})$; 密度: $\rho=7.8 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$; 热扩散系数: $\alpha=k/(\rho c)=1.25 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 。

附表为理论计算与实测结果。

Table Comparison of theoretical calculation with measured results

No.	laser power (W)	scanning speed (mm/s)	width of harden layer(mm)			depth of harden layer(mm)		
			calculated	measured	error	calculated	measured	error
1	1200	9.0	4.44	4.38	1.1%	0.62	0.54	15.4%
2	1200	11.0	4.33	4.37	0.9%	0.53	0.54	1.1%
3	1300	11.0	4.25	4.42	3.8%	0.63	0.50	5.5%
4	1300	13.0	4.81	3.81	12.7%	0.56	0.53	5.5%
5	1400	14.4	4.10	4.27	4.4%	0.59	0.41	41.6%
6	1400	16.9	4.25	4.01	5.7%	0.53	0.51	5.9%
7	1500	14.4	4.22	3.93	7.2%	0.66	0.49	36.0%
8	1500	20.2	4.12	3.76	10.1%	0.53	0.45	18.8%
				average	3.7%		average	18.7%

七、结束语

以上的讨论,给出了选择激光相变硬化的工艺条件的基本方法。对于给定的材料的预期的相硬化层宽度 K 和最大深度 S ,可以根据(1)式求出激光高斯光束的半径 R ,根据(8)式,(10)式和(13)式确定激光的输出功率与扫描速度之间的函数关系;根据(14)式计算相硬化层的最大深度。并可以通过计算机反复调整参数进行验算,直到取得满意的参数为止。

激光相变硬化是激光与材料相互作用的复杂的过程,涉及到物理的、化学的和物相的复杂变化,而且作用时间短,要彻底了解这一变化过程的机理,需要多学科的结合和经过较长时间的深入细致的研究。几年来,我们在激光方面作了一些研究工作,也完成了一些有关的研究课题,但整个研究工作还是很深入的。本文仅是从温度场对激光相变硬化的影响方面进行一些讨论。

但是,任何实际过程都是非理想的和比较复杂的。激光输出的模式和功率大小的稳定性,被处理材料的有限的几何尺寸和它的非完全各向同性及热物性系数随温度的改变等,都会造成理论研究与实际结果之间存在着的比较大的差距。不过,给出一个数学模型,给出一个选择合理的物理参数的依据,对于实际工作者总是有用的。

参 考 文 献

- 1 Champe T, Mazmder J. Laser in Metallurgy. Soc of AIM E, 1981: 165
- 2 Dietz J, Merdin J. Rev Phys Appl, 1988; 23: 1781~ 1815
- 3 李俊昌. 昆明工学院学报, 1991; 16(4): 96~ 102
- 4 孙加林, 陈君才, 周 融 *et al.* 昆明工学院学报, 1993; 18(4): 25~ 31
- 5 Vannes A B. Laser et Industries de Transformation. Tec et Doc Lavoiser, 1986: 54
- 6 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册, 第一版. 北京: 新时代出版社, 1987: 9

作者简介: 任恩扬, 男, 1941年12月出生。研究员, 昆明理工大学激光应用研究所副所长。从事激光工业应用方面的研究。

收稿日期: 1996-02-05 收到修改稿日期: 1996-04-29