

温度场耦合对圆柱圆周表面激光淬火温度场的影响

徐宏伟 闻德刚 刘耀 黄玉美

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 针对圆柱圆周表面激光淬火时出现的问题,提出了考虑激光淬火过程中已淬火区域残留温度场对淬火区域温度场形成产生的影响的圆柱圆周表面激光淬火温度场算法。在此算法中,假设激光光束为均匀能量分布,通过对基于半无限体移动面热源的瞬态温度场算法的改进,实现对圆柱圆周表面激光淬火瞬态温度场的计算。通过对不同直径的圆柱圆周表面激光淬火温度场进行计算,从而对温度场耦合对圆柱圆周表面激光淬火温度场形成所产生的影响进行分析。结果说明,圆柱直径的大小影响着温度场耦合的程度,进而影响着激光淬火温度场的形成。

关键词 激光技术;温度场耦合;圆柱;激光淬火;温度场

中图分类号 TN249; TG156.3 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.091407

Influence of Temperature Field Coupling on Temperature Field of Laser Quenching on Cylinder Circumferential Surface

Xu Hongwei Wen Degang Liu Yao Huang Yumei

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract In order to analyze the problem of laser quenching on the cylinder circumferential surface, we put forward an arithmetic model considering the influence of residual temperature field of quenched area on the formation of the temperature field of quenching area. A laser beam of uniform intensity is assumed in this arithmetic. Through improving the algorithm based on semi-infinite material under a moving surface heat source, an algorithm of temperature field of laser quenching on cylinder circumferential surface is implemented. And by calculating laser quenching temperature for circumferential surfaces of cylinders with different diameters, the impact of temperature field coupling on the formation of temperature field of laser quenching on the cylinder circumferential surface is analyzed. The result shows that the diameter influences the effect of the coupling of the temperature fields, and then affects the formation of laser quenching temperature field.

Key words laser technique; temperature field coupling; cylinder; laser quenching; temperature field

OCIS codes 140.3390; 120.6780; 140.6810

1 引言

激光淬火又称激光相变硬化,是指以高能密度的激光束照射工件表面,使其需要硬化部位瞬间温度急剧上升形成奥氏体,经随后的快速冷却,获得极细小马氏体和其他金相组织的高硬化层的一种热处理技术。

圆柱表面激光淬火在实际工程实践中用途很广。常见的轴类零件,如果利用激光淬火来对其进行热处理,不但可以得到较高的表面硬度,而且可以保证良好的韧性。在作为我国重要产业之一的纺织工业中,棉纺机所用的纺锭杆,由于其以顶尖为定位进行高速旋转,所以纺锭杆顶尖磨损是其失效的重要原因。顶尖的磨损会造成旋转时较大的振动,进而造成“断纱”等问题。原工艺采用传统淬火工艺,淬火后采用磨削来消除淬火变形。由于磨削后会产生较小的切屑,所以为磨粒磨损提供了可能。如果采用激光淬火,由于淬火变形小,淬火工艺可以作为最后一道工序,从而可以减小磨粒磨损的可能^[1]。所以研究圆柱圆周表面激光淬火具

收稿日期: 2013-05-17; 收到修改稿日期: 2013-05-20; 网络出版日期: 2013-08-02

基金项目: 陕西省教育厅科技研究计划项目(11JK0854)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2012JM7006)

作者简介: 徐宏伟(1968—),男,博士,副教授,主要从事激光淬火设备自动化控制及其淬火参数控制等方面的研究。

E-mail: xuhongwei@xaut.edu.cn

有实际意义。

相对于传统的淬火工艺来说,激光淬火具有很大的优越性。研究表明,激光淬火在提高材料性能、优化材料金相组织方面有着更为优越的作用^[2-3]。另外激光淬火工艺的燃料消耗定额是传统热处理工艺燃料消耗定额的0.9%~56.3%^[4],所以激光淬火的大规模应用可以弥补传统淬火工艺高能耗、高污染的缺陷,为我国节能减排、实施可持续发展战略做出贡献。

对激光淬火来说,需要0.01 s左右的时间段来对工件进行加热,所需要的激光束功率密度至少要在 10^3 W/cm^2 以上,扫描速度一般在 $5\sim 50 \text{ mm/s}$ ^[5]。在淬火的过程中一定要避免材料表面被烧熔,但是温度还必须超过材料的相变温度。所以在整个激光淬火过程中,温度的控制是个关键。例如,对于中碳钢来说,其淬火温度应高于 $780 \text{ }^\circ\text{C}$,而对高碳钢来说其相变温度要相对低一些。温度对淬火效果非常重要,所以预测激光淬火的温度场是很有必要的。

通过对激光淬火温度场的分析可以指导激光淬火工艺实践,确定相应的工艺参数以达到较好的淬火效果是这类研究的主要目的,因此建立激光淬火温度场计算模型是很多研究的中心任务。美国普渡大学机械工程学院的 Patwa 等^[6]建立了激光淬火模型,可以预测在一定的激光淬火工艺参数作用下的淬火效果。这个模型包括一个三维的回转体周向淬火的数值解析方法,可以给出相应的温度场等结果。美国密苏里大学航空和机械工程学院的 Zhou 等^[7]利用反问题法对高斯分布的激光光斑扫描淬火进行了温度场分析,得到实验数据的支持和验证。

以上的激光淬火温度场研究均是在半无限体假设下进行的分析。对于小尺寸的圆柱体圆周表面进行环向扫描所产生的温度场不可避免地受到已淬火区域温度场对淬火区域温度场的影响。本文着重分析对于圆柱圆周表面激光淬火时已淬火区域和淬火区域温度场耦合对淬火温度场形成的影响。

2 温度场分析的数学模型

进行温度场分析离不开对热传导方程的求解,对于激光淬火来说,其原理如前所述相当于移动面热源作用下产生的温度场。对于半无限体激光淬火的温度场来说,相当于一个正方形的热源在一个平面上以速度 v 移动所引起的温度分布,如图1所示。

Carslaw 等^[8]推导出了面热源作用下的半无限体升温解析式。假设热源从时间 $t>0$ 时开始作用,热流密度为 q ,均匀的热源以速度 v 沿 x 轴方向移动,则在固定点 (x, y, z) 以及时间 t 时的温升为

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{8\rho c (\pi\alpha)^{3/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^t \frac{q(x', y')}{(t-\tau)^{3/2}} \exp\{[x-x']^2 + (y-y')^2 + z^2\} d\tau dx' dy' \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (1)$$

式中 x' 是时间 t 和速度 v 的函数。

以(1)式为基础, Xu 等^[9]提出了利用傅里叶变换以及快速傅里叶逆变换的算法,建立了激光淬火的温度场算法。其具体算法如下。

对(1)式中的 x 和 y 进行二维傅里叶变换,可得

$$\tilde{T}(m, n, z, t) = \int_0^t \tilde{q}(m, n) \frac{1}{\sqrt{\pi(t-\tau)}} \exp\left[-\frac{z}{4(t-\tau)} - (t-\tau)\omega'^2\right] d\tau, \quad (2)$$

式中 $\omega' = \sqrt{\omega^2 + a^2}$ 并且 $\omega = \sqrt{m^2 + n^2}$, $a = i \cdot m \cdot Pe$,且 Peclet 系数 $Pe = vl/\alpha$; m 和 n 是与 x 和 y 轴对应的频域坐标, l 是工件沿淬火路径的长度, α 是工件材料的热扩散系数。式中每一个“ \sim ”代表一次傅里叶变换。瞬态温升的傅里叶变换相对于单位热源的傅里叶变换方程为

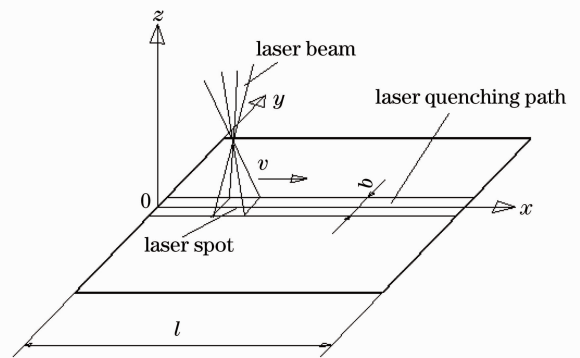


图1 半无限体的激光淬火示意图

Fig. 1 Semi-infinite space subjected to laser quenching

$$\tilde{G}(m, n, z, t) = \frac{\tilde{T}(m, n, z, t)}{\tilde{q}(m, n)} = \begin{cases} \frac{1}{2w'} \left[\exp(-w'z) \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{t}} - w'\sqrt{t}\right) - \exp(w'z) \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{t}} + w'\sqrt{t}\right) \right], & w' \neq 0 \\ 2 \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4t}\right) - z \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{t}}\right), & w' = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt$ 为补充误差函数。

因为我们主要关心的是工件表面的温度场,所以设定 $z=0$,则式(3)可以简化为:

$$\tilde{G}(m, n, 0, t) = \begin{cases} \frac{1}{2w'} [\operatorname{erfc}(-w'\sqrt{t}) - \operatorname{erfc}(w'\sqrt{t})], & w' \neq 0 \\ 2 \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}}, & w' = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Mazumder^[10]指出对于钢材的激光表面淬火来说,将激光光斑看作是能量均匀分布的,这点是可行的,因为多模激光光斑的能量分布也接近于均匀分布。所以在任意时间 t 时工件表面的热源可以设定为

$$q(x, y, t) = \begin{cases} \frac{Q}{b^2}, & vt - \frac{b}{2} \leq x \leq vt + \frac{b}{2}, \frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 Q 是激光光斑的能量功率, b 是激光光斑的边长。对于移动热源来说,半无限体在任一时刻和位置的温升为

$$T(x, y, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(x-x', y-y', t) q(x', y', t) dx' dy'. \quad (6)$$

利用连续卷积理论,则可得较简单的温升公式为

$$\tilde{T}(m, n, t) = \tilde{G}(m, n, t) \tilde{q}(m, n, t). \quad (7)$$

将(4)式相对于 x 和 y 坐标进行傅里叶变换,则 $\tilde{q}(m, n, t)$ 可表示为

$$\tilde{q}(m, n, t) = \frac{2Q \exp(\nu t)}{b^2 \pi m n} \sin \frac{bm}{2} \sin \frac{bn}{2}. \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式,可得

$$\tilde{T}(m, n, t) = \begin{cases} \frac{Q \exp(\nu t)}{w' b^2 \pi m n} \sin \frac{bm}{2} \sin \frac{bn}{2} [\operatorname{erfc}(-w'\sqrt{t}) - \operatorname{erfc}(w'\sqrt{t})], & w' \neq 0 \\ \frac{4\sqrt{t} Q \exp(\nu t)}{\sqrt{\pi^3} b^2 m n} \sin \frac{bm}{2} \sin \frac{bn}{2}, & w' = 0 \end{cases}. \quad (9)$$

由于直接通过对(9)式进行傅里叶逆变换得到相应的解析式很困难,所以这里将(9)式离散为位

$\{\tilde{T}_{ij}\}_{mn}$, 即

$$\{\tilde{T}_{ij}\}_{mn} = \begin{bmatrix} \tilde{T}_{1,1} & \tilde{T}_{1,2} & \tilde{T}_{1,3} & \cdots & \tilde{T}_{1,N} \\ \tilde{T}_{2,1} & \tilde{T}_{2,2} & \tilde{T}_{2,3} & \cdots & \tilde{T}_{2,N} \\ \tilde{T}_{3,1} & \tilde{T}_{3,2} & \tilde{T}_{3,3} & \cdots & \tilde{T}_{3,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{T}_{M,1} & \tilde{T}_{M,2} & \tilde{T}_{M,3} & \cdots & \tilde{T}_{M,N} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

对(10)式进行快速傅里叶逆变换,则在任一时刻任一位置由移动热源作用的半无限体表面温升可表示为

$$\{T_{ij}\}_{mn} = \begin{bmatrix} T_{1,1}(t) & T_{1,2}(t) & T_{1,3}(t) & \cdots & T_{1,N}(t) \\ T_{2,1}(t) & T_{2,2}(t) & T_{2,3}(t) & \cdots & T_{2,N}(t) \\ T_{3,1}(t) & T_{3,2}(t) & T_{3,3}(t) & \cdots & T_{3,N}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{M,1}(t) & T_{M,2}(t) & T_{M,3}(t) & \cdots & T_{M,N}(t) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

为了计算圆柱周向淬火的温度场分布,将圆柱表面沿周向展开并延伸长度为 $2\pi d$,如图 2 所示。激光光斑开始作用点为 $x = \pi d$,所以(9)式就变为

$$\tilde{T}(m,n,t) = \begin{cases} \frac{Q \exp(\pi d + vt)}{\omega' b^2 \pi m n} \sin \frac{bm}{2} \sin \frac{bn}{2} [\operatorname{erfc}(-\omega' \sqrt{t}) - \operatorname{erfc}(\omega' \sqrt{t})], & \omega' \neq 0 \\ \frac{4\sqrt{t} Q \exp(\pi d + vt)}{\sqrt{\pi^3} b^2 m n} \sin \frac{bm}{2} \sin \frac{bn}{2}, & \omega' = 0 \end{cases}. \quad (12)$$

通过(11)式可以得到在任一时刻 t 在任一点 x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, M$) 处的温度。因为我们主要关心的是淬火区域的最高温度,淬火路径的中心线处是观察的重点,所以可设 $y = b/2$ 。则在一系列点 x_i 处的温度 $\{T_i\}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, M$) 可表示为 $T(x_0, t), T(x_1, t), \dots, T(x_M, t)$ 。由于淬火路径实际上是一个圆,而淬火起始点为 $x = \pi d$,所以淬火区域一系列点 x_j ($j = M/2, M/2 + 1, \dots, M$) 的基温可以用 $T(x_0, t), T(x_1, t), \dots, T(x_{M/2-1}, t)$ 来表示。这里设实际的淬火温度场为

$T'(x_{M/2}, t), T'(x_{M/2+1}, t), \dots, T'(x_M, t)$, 则

$$\begin{cases} T'(x_{M/2}, t) = T(x_{M/2}, t) + T(x_0, t) \\ T'(x_{M/2+1}, t) = T(x_{M/2+1}, t) + T(x_1, t) \\ T'(x_{M/2+2}, t) = T(x_{M/2+2}, t) + T(x_2, t) \\ \dots \\ T'(x_M, t) = T(x_M, t) + T(x_{M/2-1}, t) \end{cases}. \quad (13)$$

在(13)式中,当 $t = 0$ 时, $T(x_i, 0) = T_0$, T_0 是工件表面的初始温度。

3 实例计算

根据平板表面激光淬火实验所得到的激光淬火工艺参数^[11],考虑到可能产生的温度场耦合影响,将淬火参数进行了适当的调整,即激光束功率设定为 $W = 1.0 \text{ kW}$,离焦量设为 60 mm ,经测量激光光斑的边长约为 $b = 4 \text{ mm}$,扫描速度为 $v = \frac{0.75 \times 1000}{60} = 12.5 \text{ mm/s}$ 。

利用上海华中雷欧激光设备有限公司生产的 HJ-400 型横流 CO_2 激光发生器进行淬火实验,实验样品是直径为 8 mm 的 GCr15 圆柱,圆周表面进行了磨削加工,粗糙度为 $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ 。淬火中发现,虽然在实验中相对于平板表面激光淬火的淬火工艺参数进行了相应的调整,激光束功率减低,扫描速度提高,但是工件在淬火后期还是发生了烧融现象,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在淬火开始的初期,这段区域表面淬火效果良好,表面光滑无烧熔现象,如图 3(a)所示。随着激光光斑的扫描,后期出现淬火区域烧熔现象,如图 3(b)所示。可见圆柱淬火依然采用基于半无限体理论的工艺参数恒定的方法是错误的,因为对圆柱淬火来说,其激光光斑的运动方向是逐渐接近刚淬过火的区域。这时刚淬火的区域对临近区域传热,使得邻近

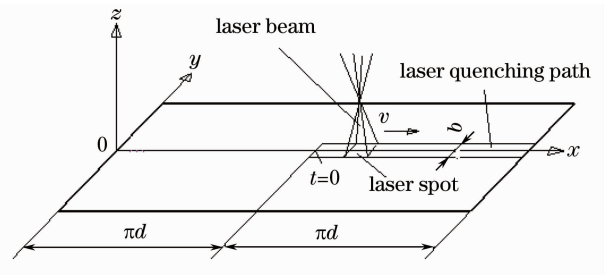


图 2 激光淬火工件表面展开示意图

Fig. 2 Unfolding the cylinder circumferential surface subjected to laser quenching

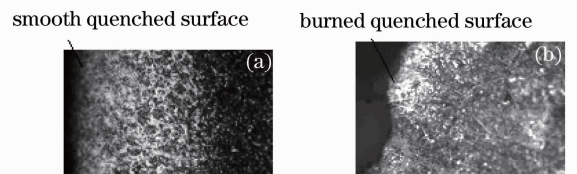


图 3 圆柱圆周表面激光淬火结果。(a)激光淬火初始表面;(b)激光淬火后期表面

Fig. 3 Results of laser quenching on cylinder circumferential surface. (a) Initial surface; (b) later stage of laser quenching

区域温度上升,这就使得后期区域的淬火温度过高而造成烧融。所以在对圆柱形工件进行圆周表面激光淬火时需考虑已淬火区域残留温度场的影响,这就使得对圆柱形工件进行激光淬火时的温度场分析显得非常重要了。

根据所建立的数学模型利用结构化编程软件 Fortran90 编制相应的软件,同时设激光光束的功率为 $W=1.0\text{ kW}$,光斑的边长为 $b=4\text{ mm}$,扫描速度为 $v=12.5\text{ mm/s}$,材料的热扩散系数为 $\alpha=4.66\text{ mm}^2$,初温为 $T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$,淬火路径长度为 $l=2\pi d$ 。激光光斑的能量分布设定为均匀分布,圆柱工件的直径分别为 $d=8,9,10,12,14\text{ mm}$ 。由于以前实验所使用的多功能激光加工机床光路较长,所以考虑到激光吸收的问题,通过反复计算假设吸收系数为 $\eta=0.45$,则当 $Q=W\eta=450\text{ W}$ 时,热流密度为 2.8 W/m^3 。将上述数值分别代入所编写的程序进行计算,得到不同直径圆柱表面淬火时沿淬火路径不同时刻的最高淬火温度和最低淬火温度,如图 4 所示。

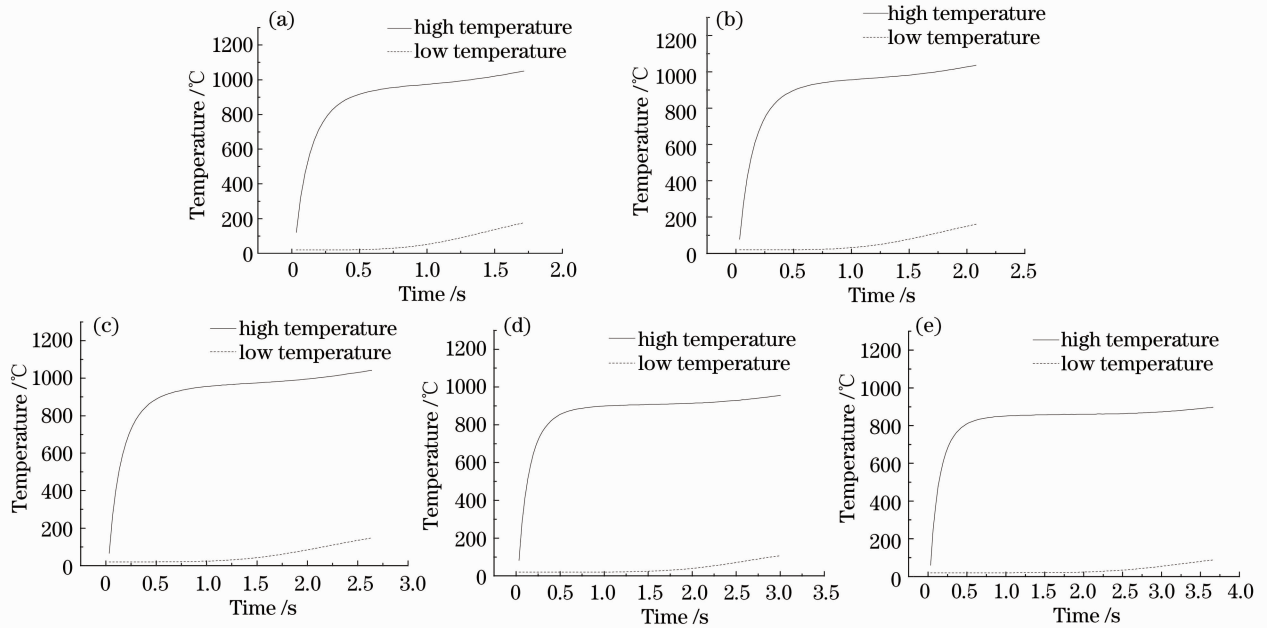


图 4 不同直径的圆柱表面激光淬火高低温模拟结果。(a) 8 mm; (b) 9 mm; (c) 10 mm; (d) 12 mm; (e) 14 mm

Fig. 4 High and low temperature simulation results of laser quenching on the surfaces of cylinders with different diameters. (a) 8 mm; (b) 9 mm; (c) 10 mm; (d) 12 mm; (e) 14 mm

从图 4 中明显可以看出随着圆柱直径的增大,淬火最高温度和最低温度趋于平稳。对于圆柱圆周表面激光淬火来说,其最低温度也就是淬火区域的基温。直径为 8 mm 的圆柱对应的基温在开始淬火时为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ (室温),淬火结束时为 $176.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。这说明在激光光斑移动到淬火路径末端时,开始淬火时产生的高温对其相邻的淬火路径末端区域产生影响而引起的温升降低得较少,从而造成淬火末端淬火时基温较高,从而也造成了淬火路径末端处淬火温度较高。

随着直径的增大,激光光斑到达淬火路径末端的时间变长。这样在开始淬火时对淬火路径末端造成的较高温度有更多的时间来降温,所以淬火路径末端淬火时其基温就会相应降低。通过图 4 可知,直径为 9、10、12、14 mm 的圆柱对应的淬火路径末端基温分别为 $160.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $148.1\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $107.4\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $87.9\text{ }^\circ\text{C}$,其开始淬火时的基温均为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。所以随着圆柱直径的增大,开始淬火时所产生的温度场对淬火路径末端淬火的温度场的影响将逐渐减弱。

4 结 论

利用移动点热源所引起的温度场格林函数,通过傅里叶变换简化激光光斑作用在半无限体材料上的温度场计算公式。利用快速傅里叶逆变换求得了移动激光光斑在半无限体材料上所引起的温度场分布。基于半无限体材料激光淬火的数学模型,将圆柱体周向激光淬火问题按照半无限体激光淬火方法来解决。将圆

柱工件沿周向展开并延伸至两倍周长,并设激光开始作用位置在淬火路径的中端。将激光光斑作用所引起的在中点以前位置的温度场作为基温相应地加在中点以后的温度场上来作为实际温度(考虑到圆柱的特点),以此来建立圆柱圆周表面激光淬火的数学模型,并进行了实例计算。

通过实例计算,明显看出圆柱直径对圆柱圆周表面激光淬火路径末端淬火基温有影响,这是由于已淬火区域残留温度场对淬火区域温度场进行耦合作用的缘故。由于是圆柱,所以激光光斑的移动方向是逐渐趋于淬火路径的初始端,而初始端由于进行了激光淬火,所以其区域的热量也逐渐向周围区域传导并向空间散热。当直径较小时,激光光斑扫描到淬火路径末端(紧邻淬火路径初始端)时所耗费的时间较少,所以受初始端激光淬火时所产生高温影响的淬火末端具有较高的温度,没有足够的时间降温,造成淬火路径末端基温较高,进而使得淬火路径末端的淬火温度较高。所以在实际针对圆柱圆周表面进行激光淬火时,应考虑温度场耦合作用对激光淬火基温的影响。针对不同直径的圆柱圆周表面激光淬火来说,其温度场耦合作用的程度是不同的,应具体问题具体分析,从而保证合适的淬火温度。

参 考 文 献

- 1 Xu Hongwei, Huang Yumei, Wang Zhaolong, *et al.*. Analysis on laser quenching technology of GCr15 hasp pole [J]. Laser Journal, 2008, 29(6): 70-71.
徐宏伟, 黄玉美, 王兆龙, 等. GCr15 纺锭杆激光淬火工艺研究[J]. 激光杂志, 2008, 29(6): 70-71.
- 2 R L McDaniels, S A White, K Liaw, *et al.*. Effects of a laser surface processing induced heat-affected zone on the fatigue behavior of AISI 4340 steel [J]. Mater Sci Eng A, 2008, 485(25): 500-507.
- 3 Chen Zhaoyun, Zhou Guijuan, Chen Zhonghua. Microstructure and hardness investigation of 17-4PH stainless steel by laser quenching [J]. Mater Sci Eng A, 2012, 534: 536-541.
- 4 Wu Peigui, Chen Yingying, Zhang Guangjun. Green heat treatment process—laser heat treatment [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(12): 29-33.
吴培桂, 陈莹莹, 张光钧. 绿色热处理工艺——激光热处理[J]. 金属热处理, 2010, 35(12): 29-33.
- 5 J C Conde, F Lusquinos, P Gonzalez, *et al.*. Temperature distribution in a material heated by laser radiation; modelling and application [J]. Vacuum, 2002, 64(3-4): 359-366.
- 6 R Patwa, Y C Shin. Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels [J]. Int J Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 307-320.
- 7 J Zhou, Y Zhang, J K Chen, *et al.*. Inverse estimation of front surface temperature of a plate with laser heating and convection-radiation cooling [J]. Int J Thermal Sciences, 2012, 52: 22-30.
- 8 H S Carslaw, J C Jaeger. Conduction of Heat in Solids [M]. London: Oxford University Press, 1959.
- 9 Xu Hongwei, Chen Wayne W., Zhou Kun, *et al.*. Temperature field computation for a rotating cylindrical workpiece under laser quenching [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2010, 47(5-8): 679-686.
- 10 J Mazumder. Laser heat-treatment—the state of the art [J]. J Metals, 1983, 35(5): 18-26.
- 11 Xu Hongwei, Liu Yao, Wen Degang, *et al.*. Experimental optimization of laser quenching process parameters [J]. China Printing and Packaging Study, 2013, 5(1): 44-48.
徐宏伟, 刘耀, 闻德刚, 等. 实验优化激光淬火工艺参数研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2013, 5(1): 44-48.