

金属表面激光热处理的理论计算和实验

解伯民 孙同坤 李旭昌

(中国科学院力学所)

阴仕健

(铁道科学院金化所)

提要: 用一台输出功率约2千瓦的横向流动CO₂激光器对碳钢、铸铁进行表面热处理。本文提出一个计算在激光扫描过程中金属温度变化的简便方法,得到的数据与实验结果相当符合。

Theoretical calculation and experimental observation of laser hardening of carbon steels

Xie Bomin, Sun Tongkun, Li Xuechang

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Yin Shijian

(Institute of Metal and Chemistry, Academy of Railway Sciences)

Abstract: We have used a transversely-excited flowing CO₂ laser with the output power of about 2kW for heat-treatment of the surface of carbon-steel. A simple method for calculating the temperature change during the scanning process is proposed. The obtained data of the hardened zone near the surface coincide with the theoretical predictions satisfactorily.

一、前 言

对激光加工的理论分析,目前许多资料^[1~8]都是直接引用了由固定光束非定常加热固体的结果,其加热过程是从 $t=0$ 开始到 $t=t_0$ 停止,这对于光源与工件是相对静止的情况来说无疑是正确的。对于与工件以某一

个恒定的速度 V 相对移动的连续光源,引用这个结果虽然在实际应用中不会带来很大的误差,但终究是与实际情况不相同的。例如在激光扫描之前及扫描之后温度就有所不同,因而使得加热速度、冷却速度有较大差别。

在过去的几年里,我们利用横向流动

收稿日期:1982年9月29日。

CO₂ 激光器, 热处理了几批表面加工精度很高的大型零件。结合实际需要对金属表面激光热处理问题进行了理论分析和实验观察, 从中找到一个计算激光热处理时温度变化的简便方法。

二、理论分析

当激光照射到金属表面时, 一部分被反射, 一部分进入金属内。进入金属的部分主要被电子吸收, 然后转化为晶格的热振荡, 形成热传导过程。

影响金属光反射率的因素很多。实践表明金属表面若有一层很薄的氧化层时, 可以提高吸收率。所以在激光热处理中常有意在金属表面上涂各种涂层以提高吸收率, 例如磷化、喷漆、涂石墨等。

当激光被金属表面吸收后形成“热层”, 我们把这“热层”作为热处理的热源。此热源形成的时间远远小于激光的照射时间, 其厚度也远远小于硬化深度。所以除了金属表面很薄的“热层”以外, 金属内部的温度变化都是依靠热传导方式进行的。因此可以把问题提炼为激光照射后金属中的热传导问题。

由于工件加工面的特征尺寸一般远远大于光斑尺寸, 而且厚度也较厚, 因此可以把工件视为半无限体。取坐标 \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} (见图 1), 设激光束以均匀速度 V 沿 \hat{x} 方向运动, 基本方程为

$$\frac{\partial}{\partial \hat{x}} \left(\hat{K} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \hat{y}} \left(\hat{K} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{y}} \right) + \frac{\partial}{\partial \hat{z}} \left(\hat{K} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{z}} \right) = \frac{\hat{K}}{k} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{t}} \quad (1)$$

其中 \hat{T} 是温度 (°C); \hat{K} 是热传导系数 (瓦/厘米·°C); k 是热扩散系数 (厘米²/秒); \hat{t} 是时间 (秒)。由于在热处理过程中, 温度变化由室温到 1000°C 左右, 范围相当大, 钢材的热学性质 \hat{K} 及 k 也随着有较大的变化。要严格考虑这些物理性质变化求解方程 (1), 只能用数值

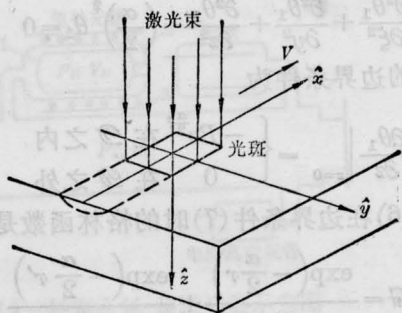


图 1 激光热处理坐标轴, 激光束沿 x 方向匀速扫描

计算方法。不过对碳钢在相变温度 A_1 附近, \hat{K} 的变化比较平缓, 可以近似地取为常数^[6]。因此我们也和大多数文献的作法一样, 把 (1) 式中的 \hat{K} 和 k 视为常数, 即取在相变温度 A_1 附近至熔点以下的平均值。这样得到的温度分布估计在我们最关心的相变硬化区及附近比较准确, 而在离相变硬化区较远的低温区域, 误差要大些。现将方程无量纲化, 令

$$\frac{\hat{T}}{T_0} = \theta \quad \frac{\hat{x} - V\hat{t}}{a} = \xi \quad (2)$$

$$\frac{\hat{y}}{a} = y \quad \frac{\hat{z}}{a} = z$$

其中 T_0 为相变温度, a 为方形光斑的半宽。按定常问题的提法, 应有 $\theta = \theta(\xi, y, z)$, 基本方程 (1) 可化为

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = 0 \quad (3)$$

其中 $\alpha = \frac{Va}{k}$, 至于边界条件, 根据前面所述, 由表面很薄的“热层”进入金属基体的热流应该是 $(-\hat{K} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{z}})$ 。因此当我们考虑激光束场强为均匀分布时, 边界条件可写为

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \begin{cases} -B = \text{常数} & \text{在光斑 } \mathcal{D} \text{ 之内} \\ 0 & \text{在光斑 } \mathcal{D} \text{ 之外} \end{cases} \quad (4)$$

若令

$$\theta = e^{-\frac{\alpha}{2}\xi} \theta_1(\xi, y, z) \quad (5)$$

则由 (3) 式可得 (自然假设 θ_1 也具有两阶微商)

$$\frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z^2} - \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \theta_1 = 0 \quad (6)$$

相应的边界条件为

$$\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \right|_{z=0} = \begin{cases} -B e^{\frac{\alpha z}{2}} & \text{在 } \mathcal{D} \text{ 之内} \\ 0 & \text{在 } \mathcal{D} \text{ 之外} \end{cases} \quad (7)$$

方程(6)在边界条件(7)时的格林函数是

$$G = \frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2} r\right)}{r} + \frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2} r'\right)}{r'} \quad (8)$$

其中

$$r = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

$$r' = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + z_0)^2}$$

而 (ξ_0, y_0, z_0) 是半无限体内任意点的坐标。应用熟知的格林函数方法^[7], 可得(6)、(7)的解

$$\theta_1(\xi_0, y_0, z_0) = \frac{B}{4\pi} \iint_{\mathcal{D}} \left(-\frac{\partial \theta_1}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} \times \left\{ \frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2} r\right)}{r} + \frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2} r'\right)}{r'} \right\} d\xi dy$$

$$= \frac{B}{2\pi}$$

$$\times \iint_{\mathcal{D}} \frac{\exp\left[\frac{\alpha}{2} \xi - \frac{\alpha}{2} \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2}\right]}{\sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2}} \times d\xi dy \quad (9)$$

对(9)式必须进行数值积分。结合我们的实验条件, 材料是共析钢, 其热物理参数根据合金钢手册^[6]。我们取700~1200°C之间的平均值得 $\hat{K} = 0.305$ 瓦/厘米·°C, $k = 0.0553$ 厘米²/秒。激光束照射的光斑呈方形, 边长0.5厘米。所以 $a = 0.25$ 厘米, 积分域 $\mathcal{D} = 4a^2$ 。上述参数确定后, 把 \mathcal{D} 分成100个 $\Delta\mathcal{D}$ 进行求和计算。 $\Delta\xi = \Delta y = 0.2$ 。

实践证明激光硬化区的边界是非常清晰的, 见照片。所以边界处的温度可以认为是相变温度 T_0 。另外在激光热处理中, 加热速度远远高于常规的加热速度, 因此相变点的温度应略高于相图中的相变温度。这里我们取 $T_0 = 760^\circ\text{C}$ 。所以当知道或者要求某个硬化深度 z_0 时。就可以求出(9)式中的 B , 然后计

算所需激光功率。再根据金属表面的吸收率及其他因素, 即可大体确定激光器输出功率。所需功率的表达式为

$$P = -\left(\hat{K} \frac{\partial T}{\partial z}\right) \mathcal{D} \quad (12)$$

由于 $\mathcal{D} = 4a^2$, 则

$$P = 4B\hat{K}T_0 a \quad (13)$$



照片 材料共析钢

$k = 0.0553$ 厘米²/秒; 光斑 0.5×0.5 厘米²;
扫描速度1.6厘米/秒; 功率920瓦; 硬化宽度0.461厘米; 深度0.055厘米; 硬化区硬度HV824~895

需要说明一点, 在进行数值计算时, 在 $\xi = \xi_0, y = y_0, z_0 = 0$ 处出现奇点。奇点虽然是可积的, 但容易引起较大的误差。我们用下面的方法予以处理。把含有该点 $\xi = \xi_0, y = y_0$ 的正方形面积元 $\Delta\mathcal{D} = \Delta\xi \Delta y$, 改为等面积的圆, 而圆心在 (ξ_0, y_0) 。引用极坐标 (ρ, φ) , 而

$$\rho = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

$$\rho \cos \varphi = \xi - \xi_0$$

因此该面积元的半径为 $\rho = \sqrt{\frac{\Delta\mathcal{D}}{\pi}}$ 。则(9)

式中在该面积元上的那部分积分 I 可写成

$$I = \int_0^{\rho} d\rho \int_0^{2\pi} \exp\left[\frac{\alpha}{2} (\xi_0 + \rho \cos \varphi) - \frac{\alpha}{2} \sqrt{\rho^2 + z_0^2}\right] \times \frac{\rho d\rho d\varphi}{\sqrt{\rho^2 + z_0^2}} \quad (14)$$

再令 $\sqrt{\rho^2 + z_0^2} = \eta$ 代入(14)式得

$$I = \exp\left(\frac{\alpha}{2} \xi_0\right) \int_{z_0}^{\sqrt{\rho^2 + z_0^2}} \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \eta\right) d\eta \times \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{\alpha}{2} \sqrt{\eta^2 - z_0^2} \cos \varphi\right) d\varphi$$

但根据

$$\int_0^{2\pi} \exp\left[\frac{\alpha}{2} \sqrt{\eta^2 - z_0^2} \cos \varphi\right] d\varphi$$

$$= 2\pi I_0\left(\frac{\alpha}{2} \sqrt{\eta^2 - z_0^2}\right)$$

其中 I_0 是标准第三类贝塞尔函数, 于是得

$$I = 2\pi \exp\left(\frac{\alpha}{2} \xi_0\right) \int_{z_0}^{\sqrt{\rho^2 + z_0^2}} \exp\left(-\frac{\alpha}{2} \eta\right)$$

$$\times I_0\left(\frac{\alpha}{2} \sqrt{\eta^2 - z_0^2}\right) d\eta \quad (15)$$

(15)式的数值积分很容易求出。

三、理论计算与实验 结果对比及讨论

我们就实验的典型情况进行了计算。取 $\frac{\alpha}{2} = \frac{Va}{2k} = 3.62$ (其中 $V=1.6$ 厘米/秒, $a=0.25$ 厘米, 共析钢 $k=0.0553$ 厘米²/秒)。中心轴的硬化深度 $Z_0=0.22$ (即 $\hat{Z}_0=0.055$ 厘米)时, 在扫描中线 $y=0$ 上, 沿 ξ 方向温度变化见图 2。与扫描速度 V 垂直的 y 方向上, 在 $\xi_0=-0.9$ (即在加热时间将结束时) 的温度分布见图 3。

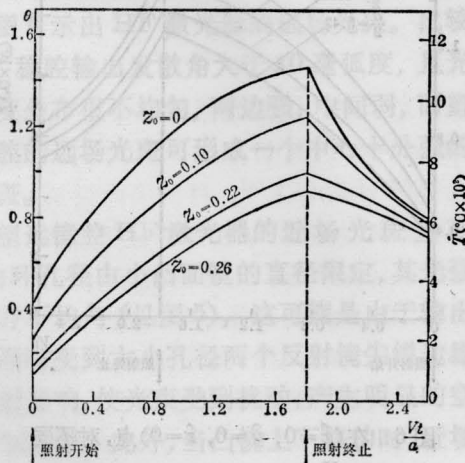


图 2 对 $(\hat{x}=0, \hat{y}=0)$ 点不同 z_0 的温度随时间的变化

共析钢 $k=0.0553$ 厘米²/秒; $a=0.25$ 厘米;

$V=1.6$ 厘米/秒; $\frac{\alpha}{2} = \frac{Va}{2k} = 3.62$

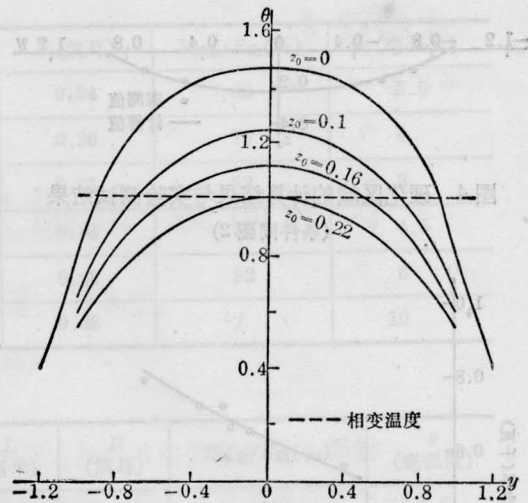


图 3 表面温度到最大值时 y^z 截面上的温度分布
(条件同图 2)

由图 2 可以看出无论在金属表面或内层, 均在加热时间快结束时温度达到最大值, 这与观察到的实验现象是相符合的。运动中的光斑前半部较暗淡, 后半部红亮, 即前面温度低, 后面温度高。

从图 3 中很清楚地看出横截面温度分布。达到相变温度 (即 $T_c=760^\circ\text{C}$) 的宽度约为光斑宽度的 90%, 而中心与边缘相变点处的温度梯度又不很大。就热处理而言, 光强均匀分布应该说比高斯型光束在能量利用上更优越些。高斯型光束中心与边缘的相变点处温度相比梯度比较大, 所以当中心温度相同时, 高斯光束的硬化范围要小些。对于激光切割、焊接若采用高斯型光束会更有利。

图 4 是硬化区的形状, 其中计算得到的硬化区是由图 3 中等温线 $T_c=760^\circ\text{C}$ 严格描绘出来的。实验得到的硬化区是由激光热处理后的试件经线切割、抛光后由投影仪放大实测出来的。从图中可以清楚地看出计算与实测的结果是相当吻合的, 具体数值见表 1。计算的表面硬化宽度是 0.45 厘米, 实测值是 0.461 厘米, 两者相差仅 2.4%。

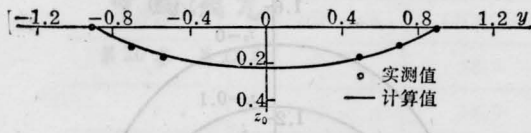


图4 硬化区域的计算结果与实验测试结果
(条件同图2)

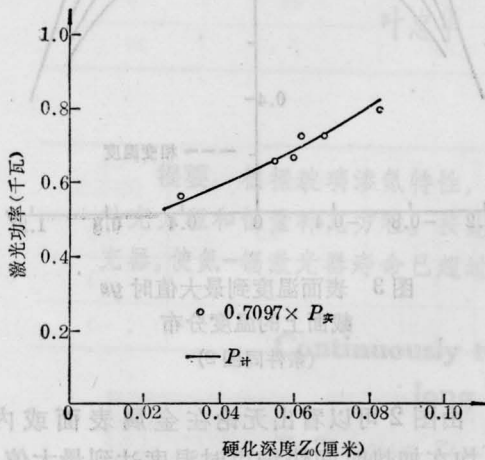


图5 激光功率与硬化深度的关系

表2及图5表示在 $\frac{\alpha}{2} = 3.62$ 时功率与硬化深度 \hat{z}_0 的关系。理论计算得到的功率 $P_{\text{计}}$ 自然只是被金属表面吸收了的功率,它不包括反射掉的和和其他损失,而实验实测的功率 $P_{\text{实}}$ 则是激光器总输出功率。

表1 横截面中 \hat{y} 方向不同位置的硬化深度计算值与实验值对比

\hat{y} 方向位置 (厘米)	\hat{z}_0 计算 (厘米)	\hat{z}_0 实验 (厘米)
-0.175	0.025	0.023
-0.130	0.040	0.037
0.130	0.040	0.043
0.175	0.025	0.028

扫描速度对表面温度的影响见图6。随着扫描速度增加,金属表面温度下降。从速度(即 α)变化的情况来看,它也影响金属表面的加热及冷却速度,结果见表3及表4。计算结果表明,激光照射金属时,冷却速度要

表2 不同硬化深度时,计算功率与实验功率对比

硬化深度 \hat{z}_0 (厘米)	功率 P (瓦)		$P_{\text{计算}}/P_{\text{实验}}$	平均
	$P_{\text{计算}}$	$P_{\text{实验}}$		
0.030	545	790	0.6899	0.7097 误差 2.8%
0.055	652	920	0.7088	
0.060	686	940	0.7298	
0.062	690	1015	0.6995	
0.068	740	1015	0.7291	
0.083	820	1115	0.7354	

表3 不同扫描速度的加热速度

扫描速度 V (厘米/秒)	$(T_{\text{max}} - T_0)^*$ (°C)	到达 T_{max} 时间 t (秒)	加热速度 (°C/秒)
1.3	818	0.3462	2360
1.6	772	0.2812	2744
2.0	739	0.2250	3284
2.4	706	0.1876	3765

* T_0 为照射开始温度

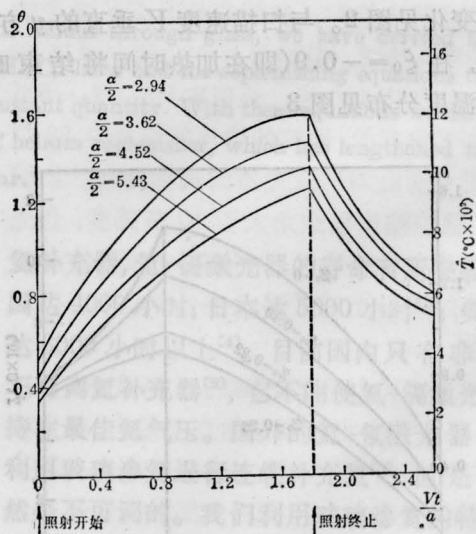


图6 在 $(\hat{x}=0, \hat{y}=0, \hat{z}=0)$ 点,对不同

$\alpha = \frac{V a}{k}$ 的温度随时间的变化

共析钢 $k=0.0553$ 厘米²/秒;
 $a=0.25$ 厘米; $P_{\text{计}}=652$ 瓦

(下转第764页)

不能得到均匀的淬火层,马氏体在淬火层中呈岛状分布。含碳量大于0.35%以上的钢由于铁素体的数量相对减少,晶粒度对硬度的影响也相应减小。由此可见,对于低碳钢,为了获得理想的淬火效果,必须对需要处理的零件提出晶粒度的要求。

我们还对T8A、45钢和10钢的淬火组织进行了回火处理,发现碳素钢激光淬火与常规淬火加回火后的硬度基本相同,碳素钢激光淬火零件的抗回火性并不优越。

对试样厚度造成的影响也进行了研究,发现各种不同钢材都有各自的临界厚度值,试样厚度小于它时,钢材的自冷速度会低于其临界冷却速度,影响激光淬火的效果。

三、结 论

1. 一般激光淬火较常规淬火提高硬度15~20%,特别是常规热处理难于淬火的低碳钢,硬度提高的幅度较大。

2. 在研究的几种钢中,淬火组织为马氏体,虽然放大3000×或5000×,但马氏体的形态仍很细小。

3. 在亚共析钢的不完全淬火区看到一

(上接第758页)

表4 不同扫描速度的冷却速度

扫描速度 V(厘米/秒)	ΔT (°C)	Δt (秒)	冷却速度 (°C/秒)
1.3	566	0.1588	3679
1.6	499	0.1246	3968
2.0	459	0.1000	4590
2.4	424	0.0833	5088

大于加热速度。无论是加热速度还是冷却速度都是常规热处理方法无法达到的,尤其是冷却速度,它较常规热处理淬火工艺高一个数量级。从图6也可知道,当 α 变小时金属表面温度要增高,若超过熔点金属表面要熔化,这是工艺规范不允许的。所以在实际应用中若激光器输出功率足够大,则尽量使扫

些异常现象:①原珠光体转变为马氏体,铁素体未发生相变,还是原来的硬度,马氏体呈岛状分布。②原珠光体区在加热过程中奥氏体化很不充分,有相当数量的残余碳化物没有溶入奥氏体,以致在淬火区还显示珠光体层片状痕迹。③激光淬火的热循环过程非常迅速。

4. 当含碳量小于0.3%时,原始晶粒度对激光淬火硬化有很大影响,只有当晶粒度小于7级时,才能获得理想的淬火效果。

参 考 文 献

- [1] 《激光热处理译文集》,湖南省机械局技术情报中心站,1980。
- [2] 《激光热处理专题译文集》,北京市机电研究院,1980,8。
- [3] 《钢铁热处理》编写组;《钢铁热处理-原理及应用》,上海科技出版社。
- [4] 河北工学院主编;《金属学与热处理》,机械工业出版社,1980。
- [5] 铁道科学研究院金属和化学研究所实验室编;《激光热处理》,国防工业出版社,1978,11。
- [6] John F. Ready; "Industrial Applications of Lasers", New York, Academic Pr., 1978。
- [7] "Application of Lasers in Material Processing", Ed. by E. A. Metzbow, 1979。

描速度快些。

在实验过程中曾得到陆显洁、孙传香、方慧英、杨开廷、曾跃新、杨克等同志的帮助,致以谢意。

参 考 文 献

- [1] レーザハンドブック,朝仓书屋,1973年。
- [2] Ф. Ф. 沃道瓦托夫等;“激光在工艺中的应用”,机械工业出版社,1980年。
- [3] D. T. Swift-Hook, A. E. F. Gick; "Penetration Welding With Lasers", Welding Research Supplement, 1973, 4925。
- [4] Cline H. E., Anthon T. R.; *J. Appl. Phys.*, 1977, 48, No. 9, 3895。
- [5] 川澄博通;“机械と工具”,1977, 23, No. 3。
- [6] “合金钢手册”(上册)第一分册,冶金工业出版社,1972年。
- [7] 斯米尔诺夫;高等数学教程,二卷三分册, p 198~199。