

文章编号: 1001-3806(2011)02-0206-04

球墨铸铁激光表面淬火硬化深度的解析计算

颜丙功¹, 刘继常^{1*}, 郭怡晖²

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082; 2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 为了简单快速地得到激光表面淬火的硬化深度, 利用激光加热过程中的半无限体表面点热源热扩散公式, 在分析激光表面淬火相变硬化基本规律的基础上, 对激光表面淬火硬化层深度的解析计算公式进行了推导和试验验证, 并取得了较为理想的数据。结果表明, 在现有试验条件下该计算方法是高效和正确的。

关键词: 激光物理; 硬化层深度; 解析计算; 球墨铸铁

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.018

Analytical calculation of the hardening depth of laser surface hardening ductile cast iron

YAN Bing-gong¹, LIU Ji-chang¹, GUO Yi-hui²

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to obtain the hardening depth that treated with laser surface hardening simply and immediately, the process of laser surface hardening was analyzed and an analytical equation was concluded based on the semi-infinite surface point heat thermal diffusion equation, at the same time the experiment was conducted and ideal results were obtained. The method is right and efficient verified by the experimental results under existing experimental conditions.

Key words: laser physics; hardening depth; analytical calculation; ductile cast iron

引言

激光表面淬火又称激光相变硬化, 是一种利用高能激光束进行表面热处理的激光加工工艺。激光表面淬火的热影响区小, 工件无热变形, 便于自动化控制, 与常规表面淬火相比, 淬火硬度可高出 15% ~ 20%, 硬化深度可达 0.5mm ~ 2mm, 且工件耐磨性和耐腐蚀性显著提高。

目前, 关于激光表面淬火研究的很大一部分是关于淬火过程的数值模拟^[1,4], 即运用有限元分析软件, 通过设定相应的材料参量、边界条件、加载方式等进行淬火过程的模拟与计算。这种计算模拟方式的计算结果比较准确, 可进行动态演示, 直观性强, 但是它所需查找参量较多, 计算量较大, 且涉及网格畸变引起的无法收敛等问题, 如果只是进行简单的硬化深度预测, 不仅使问

题变得复杂, 时间上也是一种浪费。解析计算所需参量较少, 计算简单, 计算速度快, 实际应用价值较高。LI 等人基于无限体的热传导方程, 推导出了半无限体表面点热源的扩散公式以及矩形光斑、不规则光斑等的热扩散解析方程, 并进行了试验验证^[5]; MAIER 等利用格林函数进行了矩形均匀功率密度分布的光斑在静止、连续、脉冲形式作用下的热扩散解析方程的推导^[6]; BOKOTA 等人推导出了高斯功率密度分布的圆形光斑作用下的温度场计算解析方程^[7]。这些解析方程的推导和试验验证, 显示了解析计算在激光表面淬火工艺中的有效应用及潜力。作者在对激光表面淬火过程进行分析简化的基础上, 讨论了基于半无限体表面点热源热扩散公式^[5]的均匀功率密度分布的圆形光斑作用下的硬化层深度的解析计算方法, 并对 QT600-3 的硬化深度进行了计算预测, 编写了函数的估算程序 *ierfc(x)*, 并利用现有试验条件进行了试验验证, 试验结果较好地验证了该计算方法的正确性。

1 硬化深度的解析计算公式

激光表面淬火的硬化深度是由材料表面相变后生成的马氏体组织的深度决定的, 马氏体层越厚, 硬化层

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2007BAF29B01); 广东省教育部产学研结合项目资助项目(2008A090400017); 粤港关键领域重点突破项目资助项目(2007Z002)

作者简介: 颜丙功(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光表面淬火方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liujichang2003@sohu.com

收稿日期: 2010-03-31; 收到修改稿日期: 2010-04-12

越深。一般来说,为获得尽量多的马氏体,加热温度比 A_c 临界点越高越好,降温速度越快越好。对于后一点在激光表面淬火中是很容易通过基体自冷淬火实现的,对于前一点却必须要保证其低于基体的熔化温度。当光斑照射到工件表面时,光子与工件表面极薄层的自由电子相互作用产生热量,工件表面即开始受热,并同时热量传向基体,一定时间后,工件表层开始熔化,假定光束此时刚好离开该辐射区域,则最大硬化深度可定义为光斑中心处由工件表面至温度降低到 A_c 临界点处的深度。

由参考文献[5]中得半无限体表面点热源的热扩散公式为:

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \frac{P}{2\pi\kappa r} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \right] \quad (1)$$

式中, P 为功率(W), κ 为热导率(W/(m·K)), r 为光斑半径(m), $\alpha = \frac{\kappa}{\rho c}$ 为热扩散系数。

若将光斑视为由无限点热源组成的面,则根据温度场的线性叠加性,在光斑面积内依功率密度对(1)式积分即可得到面热源下的温度场计算公式。

考虑到涂层的作用,实际高斯分布的功率密度,在到达基体表面时将以均匀功率密度的形式进行热交换和热传递,因此功率密度可以表示为:

$$P(x, y) = \frac{\beta P_0}{\pi r^2} \operatorname{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r}\right) \quad (2)$$

式中, $P(x, y)$ 为功率密度(W/m²), P_0 为激光器输出功率(W), β 为吸收率。

将(2)式代入(1)式可得:

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \iint_{x^2+y^2 \leq r^2} \frac{P(x, y)}{2\pi\kappa r} \times \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \right] dx dy \quad (3)$$

进行相关积分运算后可得:

$$\theta_{z,t} = \frac{2\beta P_0}{\pi r^2} \frac{\sqrt{\alpha t}}{\kappa} \left\{ \operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} - \operatorname{ierfc} \frac{\sqrt{z^2 + r^2}}{2\sqrt{\alpha t}} \right\} \quad (4)$$

式中, $\theta_{z,t}$ 表示以光斑中心轴为 z 轴,忽略相变潜热及热辐射损失,假定光斑功率密度呈均匀分布时,加热时间为 t ,深度为 z 处的温度。

由于 $\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \gg 1$, (4)式中括号内的第2项比第1项要小很多^[8],可以忽略不计,则有:

$$\theta_{z,t} = \frac{2\beta P_0}{\pi r^2} \frac{\sqrt{\alpha t}}{\kappa} \operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (5)$$

对于工件表面的极薄受热层, $z = 0$, $\operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} =$

$\operatorname{ierfc}(0)$,

$$\theta_{0,t} = \frac{2\beta P_0}{\pi r^2} \frac{\sqrt{\alpha t}}{\kappa} \operatorname{ierfc}(0) \quad (6)$$

由(5)式、(6)式可得:

$$\frac{\theta_{z,t}}{\theta_{0,t}} = \frac{\operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}}{\operatorname{ierfc}(0)} \quad (7)$$

即有:

$$\operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} = \frac{\theta_{z,t}}{\theta_{0,t}} \operatorname{ierfc}(0) = \frac{\theta_{z,t}}{\theta_{0,t}} \times \frac{1}{\sqrt{\pi}} = A \quad (8)$$

对于(8)式,结合基体材料的热物性参量,可直接计算得到 $A = \frac{\theta_{z,t}}{\theta_{0,t}} \times \frac{1}{\sqrt{\pi}}$ 的值,通过对函数 $\operatorname{ierfc}(x) = A$ 求反,

可解得 $x = \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}$ 的值,进而得到激光表面淬火的硬化深度 $z = 2x\sqrt{\alpha t}$ 。

函数 $\operatorname{ierfc}(x)$ 的直接求反计算比较困难,本文中利用参考文献[9]中给出的函数 $\operatorname{ierfc}(x)$ 的逼近公式,用C语言进行了编程求解:

$$\operatorname{ierfc}(x) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[1 - x\sqrt{\pi} + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i x^{2(i+1)}}{(2i+1)(i+1)!} \right], & (x \leq 2) \\ 0, & (x > 2) \end{cases} \quad (9)$$

2 硬化深度的解析计算

2.1 函数 $\operatorname{ierfc}(x)$ 的求反计算

基于(9)式,作者编写如下C语言程序对函数 $\operatorname{ierfc}(x)$ 中的 x 值进行近似计算:

```
#include <math.h>
main()
{
    double A;
    double x = 0.001;
    double sum = 0;
    int m, i;
    double C[100];
    double B;
    char ch;
    printf("Please enter the value of A: \n");
    scanf("%lf", &A);
    for(x = 0.001; x <= 2; x += 0.001)
    {
        for(i = 1; i <= 1000; i++)
        {
            m = 1;
            m = (i + 1);
            C[i] = (pow(x, 2 * i + 2)) / ((2 * i + 1) * m);
            if(i % 2 == 0)
                C[i] = -1 * C[i];
```

```

sum + = C[i];
|
B=0.5643341 * (1 - 1.172 * x + (sum + x * x));
if(B - A < =0.04)
|
printf ("B(x = %f) = %f\n", x, B);
ch = getch();
break;
| | |
    
```

运行程序后,输入A值,便可求得相应的x值。为了验证程序的可靠性,这里用两组数据进行了测试: A=0.13, x=0.45; A=√1/π, x=0, 测试结果良好,证明了该程序计算结果可靠。

2.2 硬化深度计算

QT600-3 材料的基本成分如表 1 所示。

Table 1 Composition analysis of experimental ductile cast iron

element	C	Si	S	Mn	P
mass fraction	0.0277	0.00022	0.0324	0.0047	0.00041

根据商业软件 ProCAST 中的 Material Data 提供的数据, QT600-3 淬火时奥氏体化开始温度为 1053K (780℃), 熔点为 1421K (1148℃), 热导率 κ = 33.44W/(m · K), 密度 ρ = 7.3 × 10³kg/m³, 比热容 c = 0.836 × 10³J/(kg · K)。

将以上参量代入(8)式得: $ierfc \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} = \frac{1053}{1421} ierfc(0) =$

$\frac{1053}{1421} \times \frac{1}{\sqrt{\pi}} \approx 0.42 = A$, 将 A = 0.42 输入 2.1 节中函数

ierfc(x) 的反求计算程序, 得到运行结果 x = 0.2, 即有

$x = 0.2 = \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}$, 则 $z = 2x\sqrt{\alpha t} = 2 \times 0.2\sqrt{\alpha t}$, 其中 $\alpha =$

$$\frac{\kappa}{\rho c} = \frac{33.44}{7.3 \times 10^3 \times 0.836 \times 10^3} \approx 5.48 \times 10^{-6}$$

根据试验数据计算可得 $t = \frac{2r}{v} = \frac{3.5}{1.5} = 2.3s$, 即加

热时间在 0s ~ 2.3s 内变化。考虑到实际试验中的激光功率密度分布的不均匀性, 以及所用涂层的较低热传导率和较大涂敷厚度(约为 0.5mm), 这里取加热时间为 1s。将 α 和 t 代入可得: $z = 2 \times 0.2 \times \sqrt{5.48 \times 10^{-6} \times 1} \approx 0.94 \times 10^{-3} (m)$ 。即硬化深度为 0.94mm。

3 试验验证

试验用激光器为 PHC-1500 折叠式准封离型 CO₂ 激光器, 工作台为北京卓立汉光公司生产的 TSA-200 精密电控平移台, 工件尺寸为 150mm × 50mm × 7.2mm, 工件表面经除锈抛光处理后, 表面均匀涂覆吸收层, 并将其平置于盛有少许冷却水的器皿中, 以便实现基体的急速自冷淬火。试验数据如表 2 所示, 其中光斑直径经整合后近似取为硬化带宽。

Table 2 Process parameters

No.	power/W	velocity/(mm · s ⁻¹)	diameter/mm	macrohardness/HRC
1	720	1.2220	3.5	51.5
2	740	1.4513	3.5	53.1
3	760	1.9860	3.5	57
4	760	1.6040	3.5	47
5	760	1.4513	3.5	56
6	760	1.2220	3.5	54.1
7	780	1.4513	3.5	58.3

试验结果中的第 2、第 3、第 5、第 6、第 7 道的金相照片分别如图 1 中各个小图所示。从图中可以大体看出硬化层的深度, 这里的硬化层包括硬化区和热影响

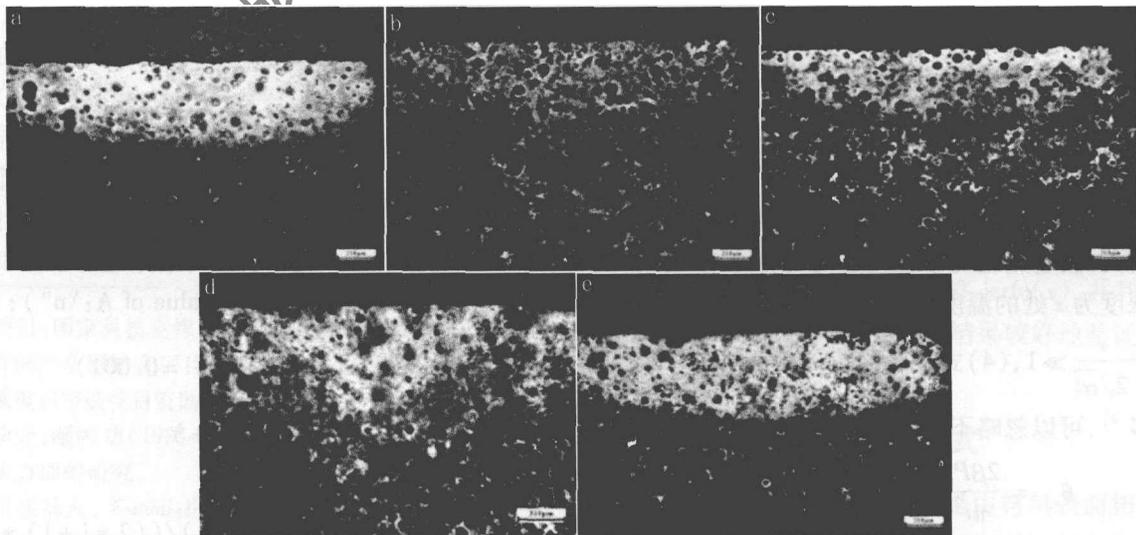


Fig. 1 Macrography

a—the second b—the third c—the fifth d—the sixth e—the seventh

区两部分,其中硬化区的主要组织为针状马氏体、残余奥氏体和石墨球,热影响区在激光淬火时的温度比硬化区低,冷却速度慢,转变后的主要组织为残余奥氏体,石墨球和屈氏体。热影响区以下即为原始基体组织,主要成分为铁素体、珠光体和石墨球。图2中描述

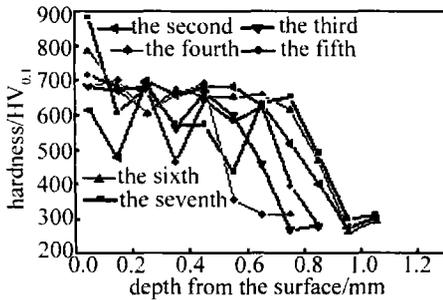


Fig.2 Hardness gradient

了第2、第3、第5、第6和第7道的硬度随硬化层深的变化规律。

微观硬度大于400的区域可视为硬化区域^[10]。由硬度梯度图可得各道硬化层的深度分别为:第2道约0.85mm,第3道约0.7mm,第4道约0.55mm,第5道约0.75mm,第6道约0.9mm,第7道约0.92mm,这与计算结果是基本吻合的。试验结果偏低是因为吸收层的热阻作用迟滞了热量的传输,以及工艺参量的选择不佳造成的光斑在定区域的停留时间不足,奥氏体来不及形核长大或者奥氏体化不充分,保留了加热前的组织。

4 结论

使用层深预测公式进行球墨铸铁 QT600-3 硬化深度的解析计算预测,所需材料参量较少,容易查询,函

数 $\text{ierfc}(x)$ 的估算程序简化了相应的计算过程,使计算过程更加简单,从而可以快速得到激光表面淬火后的硬化深度值。试验结果较好地验证了这种计算方式的正确性。

参 考 文 献

- [1] FAN X Y, WU G, SHI J. Analysis of the energy transfer coefficients associated with laser quenching using ANSYS software [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 546-548 (in Chinese).
- [2] PATWA R, SHIN Y C. Predictive modeling of laser hardening of Al-Si150H steels [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 307-320.
- [3] ZHANG L W, PEI J B. Numerical analysis and technical parameter optimization system of laser transformation hardening process [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2001, 24(3): 42-44 (in Chinese).
- [4] ZHAN H X, WANG Y, LI Ch W. Computational and experimental study of a melt-hardened zone on a roller modified by wide-band laser treatment [J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(3): 251-257.
- [5] LI J Ch. Diffraction of laser and calculation on thermal acting [M]. Beijing: Science Press, 2002: 341-432 (in Chinese).
- [6] MAIER C. Calculation of the temperature profile for laser treatment of metallic samples [J]. Materials Science and Engineering, 1992, 150(2): 271-280.
- [7] BOKOTA A. Numerical prediction of the hardened zone in laser treatment of carbon steel [J]. Acta Materialia, 1996, 44(2): 445-450.
- [8] LI Zh Zh. Laser surface hardening [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1992: 41-46 (in Chinese).
- [9] SULITAN, SONG Y D, GULIMEILA. Reckoning of $\text{erfc}(\lambda)$ and $\text{ierfc}(\lambda)$ approximation formula in non-stable groundwater flows and their application in tarim river watershed [J]. Arid Land Geography, 2003, 26(4): 323-328 (in Chinese).
- [10] BA F H, YAN G Q, WU W, et al. Microhardness distribution of ductile iron modified by laser with space array [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(2): 287-291 (in Chinese).

(上接第195页)

体激光器的实验研究打下基础。

参 考 文 献

- [1] MASAMORI E. Optical characteristics of Cr^{3+} and Nd^{3+} codoped $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramics [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(4): 610-616.
- [2] TAKU S, KAZUO I, MOTOKOSHI S, et al. Disk-type Nd/Cr:YAG ceramic lasers pumped by arc-metal-halide-lamp [J]. Optics Communications, 2006, 268(1): 155-159.
- [3] PAYZIYEV S, BAKHRAMOV S, YAGI H, et al. Ceramic Nd^{3+} :

Cr^{3+} :YAG laser pumped by high power concentrated solar flux [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6871: 687126/1-687126/8.

- [4] YAGI H, YANAGITANI T, NUMAZAWA T, et al. The physical properties of transparent $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ Elastic modulus at high temperature and thermal conductivity at low temperature [J]. Ceramics International, 2007, 33(5): 711-714.
- [5] MA H X, LOU Q H, QI Y F, et al. Spectrum characteristics of the polycrystalline transparent ceramic [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 488-490 (in Chinese).
- [6] HE J W. Study of solar pumped solid state laser [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009: 42-45 (in Chinese).