

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0404-04

# 38CrMoAlA 钢激光相变硬化的正交试验设计

李永法 王东锋 陶 盛

(空军第一航空学院, 河南 信阳 464000)

**摘要** 为研究激光功率、扫描速度和光斑直径等因素对 38CrMoAlA 钢激光相变硬化效果影响的主次程度并对工艺参数进行优化,依据三因素三水平  $L_9(3^3)$  正交试验表对该钢的激光相变硬化进行了正交试验,采用双立方二维插值法预测了激光功率和扫描速度对激光相变硬化后表面硬度的影响。结果发现,各因素对表面硬度影响程度的主次顺序为扫描速度、激光功率和光斑直径,其对应的最优水平分别为 30 mm/s, 1.6 kW 和 3.5 mm。在上述参数下,激光相变硬化的深度可达 0.5 mm 以上,其硬化层由表及里可分 4 层,其中第 2 层几乎全为马氏体,硬度最高;第 4 层为马氏体和铁素体混合物,且发生组织粗化,硬度最低。

**关键词** 激光技术; 激光相变硬化; 正交试验; 参数优化; 表面硬度; 马氏体

中图分类号 TN249; TG156.99 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0404

## Normal Experiment Design of Laser Phase Transformation Hardening on 38CrMoAlA Steel

Li Yongfa Wang Dongfeng Tao Sheng

(The First Aeronautic Institute of Air Force, Xinyang, Henan 464000 China)

**Abstract** In order to research the effects of laser power, scan velocity and beam diameter on the primary and secondary degree that affect the 38CrMoAlA steel's laser phase transformation hardening, and optimize the technical parameters, the normal experiment was conducted by three factors and three level  $L_9(3^3)$  normal experiment table. The effect of laser power, scan velocity on the surface hardness was predicted on the basis of two dimension bicubic interpolatio. Results show that the primary and secondary sequence affecting surface hardness is scan velocity, laser power and beam diameter, and their optimized level are 30 mm/s, 1.6 kW and 3.5 mm respectively. Under the three parameters, the hardened depth of laser phase transformation can reach over 0.5 mm. The hardened layer can be divided into four parts. Almost all of the second layer is martensite and this layer has the highest hardness. The structure coarsening happened to the fourth layer, which is the mixture of martensite and ferrite and has the lowest hardness.

**Key words** laser technique; laser phase transformation hardening; normal experiment; parameter optimizing; surface hardness; martensite

## 1 引 言

激光相变硬化以其快速加热、硬化层深度精确可控、硬化效果好、无需淬火介质及易于自动控制等优点获得了广泛的应用<sup>[1~4]</sup>。例如,自 1997 年以来,美国 GE 公司已将激光相变硬化技术应用于航空发动机叶片、转子、齿轮等重要零部件的制造,产品寿命比传统硬化技术提高 4 倍以上<sup>[5]</sup>。近年来,

激光相变硬化技术在我国汽车发动机缸体、纺织机锭杆等的制造方面也得到了成功推广<sup>[6,7]</sup>,但在国内各型航空零部件制造方面的应用仍为空白。为促进激光相变硬化技术在航空零部件制造方面的应用,本文选择了在航空工业中广泛用于制造重要齿轮、螺栓、轴、转子等的 38CrMoAlA 钢进行了激光相变硬化试验。虽然该钢的激光相变硬化研究国内

**基金项目:** 武器装备军内科研项目(KJ08068)资助课题。

**作者简介:** 李永法(1966—),男,副教授,硕士,主要从事航空装备的维修与管理等方面的研究。

E-mail: liyongfa6292@sina.com

已有报道,但是由于影响硬化效果的因素较多,如光斑直径、激光功率和扫描速度等多个因素对硬化效果均具有重要影响<sup>[8,9]</sup>,如何确定这些因素对硬化效果影响的主次程度和影响因素的最优水平,及如何对多个给定工艺参数下的硬化效果进行预测,国内相关报道较少。基于此,本文对该钢的激光相变硬化进行了正交试验,并根据试验结果对硬化后的表面硬度进行了二维插值预测,以期对该钢激光相变硬化工艺的制定提供参考依据。

## 2 试验材料与方法

试验用 38CrMoAlA 为国产供应态  $\phi 18$  mm 圆钢,加工成  $\phi 15$  mm  $\times$  25 mm 的圆柱试样。其原始组织为珠光体(P)和铁素体(F)。试样的激光表面相变硬化在功率为 5 kW 的 CO<sub>2</sub> 激光器上进行。试样的显微组织分析在日产 JSM-5610LV 型扫描电镜上进行。在 HVS-1000 数字型显微硬度计上测量硬度,测量结果取 4 次测量的平均值,其测量误差 < 5%。激光表面相变硬化前先将试样一个端面磨光,并喷涂一层 86-1 黑漆,以增强激光的吸收率。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 相变硬化工艺参数的正交优化

实验表明,激光功率、光斑直径和扫描速度是影响相变硬化效果最为显著的工艺参数。为此,本文选用表 1 所示的 L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>) 正交优选方案对 38CrMoAl 合金的激光相变硬化工艺进行了三因素三水平正交试验,结果如表 2 所示。

由表 2 所示的极差分析可见:1)激光功率、扫描速度光斑直径对表面硬度影响的极差分别为 27.46 和 10。根据正交试验理论,各因素对表面硬度影响程度的主次顺序为:扫描速度、激光功率、光斑直径;2)各因素的最优水平分别为 1.6 kW,30 mm/s 和 3.5 mm,即当激光功率为 1.6 kW、扫描速度为 30 mm/s、光斑直径为 3.5 mm 时,相变硬化后可获得最高的表面硬度。

表 1 影响激光相变硬化效果的因素

Table 1 Factors affecting the effect of laser phase transformation hardening

Level	Laser power /kW	Scan velocity /(mm/s)	Light spot diameter/mm
1	1.0	6	2.0
2	1.6	18	3.5
3	2.2	30	5.0

表 2 正交试验方案与试验结果

Table 2 Results and procedure of normal experiment

Experimental number	Laser power /kW	Scan velocity (mm/s)	Light spot diameter /mm	Surface hardness /(HV)
1 <sup>#</sup>	1.0	6	2.0	723
2 <sup>#</sup>	1.0	18	3.5	769
3 <sup>#</sup>	1.0	30	5.0	784
4 <sup>#</sup>	1.6	6	3.5	773
5 <sup>#</sup>	1.6	18	5.0	779
6 <sup>#</sup>	1.6	30	2.0	807
7 <sup>#</sup>	2.2	6	5.0	751
8 <sup>#</sup>	2.2	18	3.5	775
9 <sup>#</sup>	2.2	30	2.0	794

	Surface hardness /(HV)			Variance R
Level K <sub>1</sub>	758	786	773	27
Level K <sub>2</sub>	749	774	795	46
Level K <sub>3</sub>	768	778	771	10

### 3.2 激光相变硬化效果预测

为研究扫描速度和激光功率这两个较重要因素对相变硬化效果的影响规律,并实现给定参数下硬化效果的预测,本文将光斑直径固定为 3.5 mm,在激光功率为 1.0 ~ 2.2 kW 和扫描速度为 6~30 mm/s 的试验条件下,测定了激光相变硬化后的表面硬度,并根据该试验结果对给定参数下的相变硬化效果进行了二维插值预测。

首先分别构建给定参数的扫描速度和激光功率的坐标矩阵 **X** 和 **Y**,再根据试验结果构建该参数下的表面硬度矩阵 **Z**,即可对一定工艺参数下的相变硬化效果进行二维插值预测,其插值方法为

$$Z_i = \text{interp2}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, X_i, Y_i, \text{method})$$

式中 **X** 为扫描速度矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 6 & 12 & 18 & 24 & 30 \\ 6 & 12 & 18 & 24 & 30 \\ 6 & 12 & 18 & 24 & 30 \\ 6 & 12 & 18 & 24 & 30 \\ 6 & 12 & 18 & 24 & 30 \end{pmatrix},$$

**Y** 为功率矩阵

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.3 & 1.3 & 1.3 & 1.3 & 1.3 \\ 1.6 & 1.6 & 1.6 & 1.6 & 1.6 \\ 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 & 1.9 \\ 2.2 & 2.2 & 2.2 & 2.2 & 2.2 \end{pmatrix},$$

**Z** 为试验参数下测得的表面硬度矩阵

$$Z = \begin{pmatrix} 736 & 758 & 769 & 776 & 784 \\ 759 & 767 & 779 & 794 & 803 \\ 779 & 786 & 792 & 806 & 824 \\ 766 & 775 & 784 & 794 & 812 \\ 743 & 755 & 765 & 771 & 779 \end{pmatrix},$$

$X_i, Y_i$  为所需预测的工艺参数,  $Z_i$  为预测值; method 为所采用的具体插值方法。本文采用的是双立方插值法(bicubic), 图 1 为该算法的预测结果。

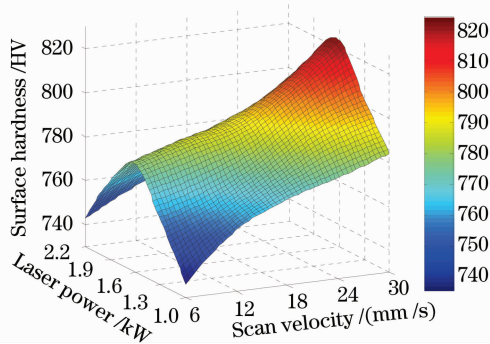


图 1 激光功率和扫描速度对相变硬化后表面硬度的影响  
Fig. 1 Effect of laser power and scan velocity on surface hardness after phase transformation hardening

由图 1 可看出, 激光相变硬化后的表面硬度将随着扫描速度的提高而上升。这是由于如果扫描速度太慢, 使得热量向光束移动方向的反向传导, 致使冷却速度变慢, 而使表面出现回火甚至熔融现象, 使表面硬度降低<sup>[10,11]</sup>。所以在一定范围内, 扫描速度的加快将使表面硬度升高。由图 1 还可看出, 在扫描速度一定的条件下, 在激光功率 1.6 kW 时, 表面硬度达到峰值。这是由于如果激光功率较低, 则试样被处理表面平均功率密度也较低, 使得金属表面输入的能量不足, 照射区内达不到完全淬火温度, 会使表面硬度降低; 如果激光功率较高, 则试样被处理表面过高的平均功率密度会使金属表面出现回火现象, 也会使表面硬度降低<sup>[12]</sup>。

### 3.3 激光相变硬化的显微组织分析

在优化后的工艺参数下, 即激光功率为 1.6 kW, 扫描速度为 30 mm/s 和光斑直径为 3.5 mm 时, 38CrMoAlA 钢的激光相变硬化层的显微硬度分布曲线如图 2 所示, 可以看出, 随着与表面距离的加大, 硬化层的显微硬度先略微升高后, 又开始迅速下降, 最后在距离表面 0.5 mm 以上的区域, 保持基本恒定。

上述显微硬度的变化是由激光相变硬化后的显微组织所决定的。图 3 为 38CrMoAlA 钢间隔激光

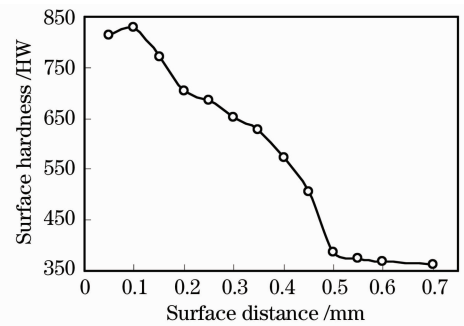


图 2 38CrMoAlA 钢的相变硬化层显微硬度分布曲线  
Fig. 2 Distributing curving of micro-hardness of the 38CrMoAlA steel hardened by phase transformation

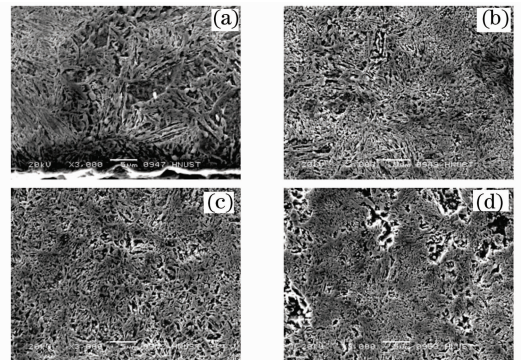


图 3 激光相变硬化区显微组织(3000×)  
(a)第 1 层; (b)第 2 层; (c)第 3 层 (d)第 4 层

Fig. 3 Micro-structure in laser phase transformation hardening zone(3000×). (a) the first layer; (b) the second layer; (c) the third layer; (d) the fourth layer

相变硬化区的显微组织, 由表及里可将其组织分为 4 层, 以下逐层分析其性能变化的微观组织原因。

图 3(a)为第 1 层, 对应深度约 0.05 mm, 组织为白亮的细长板条马氏体和残余奥氏体; 显微硬度可达 HV 810, 比常规淬火硬度可高出 100 HV 以上。由于在该层, 试样表面直接与激光作用, 因而表面温度最高, 作用时间最长, 激光加热时能够得到尺寸较大的、均一的奥氏体组织, 在随后急速冷却过程中容易形成含碳较低的细长板条马氏体和较多的残余奥氏体。而残余奥氏体的存在, 势必要略微降低相变硬化效果<sup>[13]</sup>, 所以在第 1 层不能获得最高硬度。

图 3(b)为第 2 层, 对应深度约 0.1 mm, 组织几乎全部由马氏体组成, 残余奥氏体极少, 且马氏体明显细化; 显微硬度可达 HV824。由于该层距表面较近, 仍具有很大的加热速度和较大的过热度, 铁素体仍能通过无扩散切变转变为贫碳奥氏体组织, 但与

表层相比,该区域加热温度较低,作用时间较短,冷却速度较快,碳和合金元素在奥氏体中的扩散不充分,致使快速冷却后形成贫碳马氏体和高碳马氏体组织,同时残余奥氏体含量也显著减少<sup>[14]</sup>。所以,第2层可以获得略高于第1层的显微硬度。

图3(c)为第3层,对应深度约为0.15~0.35 mm,组织是马氏体加网状屈氏体,再加少量铁素体;显微硬度约770~630 HV。由于该区域加热温度进一步下降,激光加热期间,只能形成奥氏体和铁素体的混合物,奥氏体化过程不能完全进行,结果冷却后形成上述混合组织<sup>[15]</sup>。所以,该层显微硬度相对于第2层必然出现较大幅度的下降。

图3(d)为第4层,对应深度约0.4~0.55 mm,该层为相变硬化层和未硬化层的过渡区(0.55 mm以上为未硬化区),组织为马氏体和铁素体;显微硬度下降至约570~500 HV。相对于第3层,该层的加热更不充分,甚至不能发生奥氏体化过程(加热温度低于 $A_{c1}$ ),所以还要发生晶粒长大和碳化物粗化现象,因而显微硬度将持续明显下降,直至和未相变硬化的内部区域相同。

## 4 结 论

1) 对38CrMoAlA钢进行激光相变硬化时,各因素对表面硬度影响程度的主次顺序为:扫描速度、激光功率、光斑直径。扫描速度、激光功率和光斑直径的最优水平分别为30 mm/s, 1.6 kW和3.5 mm。

2) 基于双立方二维插值可对一定参数下的激光相变硬化效果进行预测,所得预测曲面表明,表面硬度在激光功率为1.6 kW时可达硬化峰值。

3) 38CrMoAlA钢经激光表面相变硬化后,由表及里可分为4层组织:第1层为低碳马氏体和较多残余奥氏体组成的混合组织;第2层为高碳马氏体和极少的残余奥氏体,硬度最高;第3层为马氏体和屈氏体,硬度较前两层有显著降低;第4层为马氏体和铁素体组成的过渡区,硬度介于硬化区和未硬化区之间。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yunshan, Zhang Xingquan, Lei Jianbo *et al.*. Processing of laser quenching crankshaft[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 574~576  
王云山, 张兴泉, 雷剑波等. 曲轴激光淬火工艺[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 574~576
- 2 Li Feng, Wang Dacheng, Zhang Yongjun. Study on the laser surface strength of inoculated cast iron HT300 [J]. *Applied*

- Laser*, 2005, **25**(5): 303~305  
李 风, 王大承, 张永俊. HT300 孕育铸铁激光表面改性研究[J]. *应用激光*, 2005, **25**(5): 303~305
- 3 Luo Youdong, Feng Aixin. Study on the experiment of laser transformation hardening for QT600-3 camshaft [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(3): 23~25  
骆有东, 冯爱新. QT600-3 凸轮轴表面激光相变硬化的实验研究[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(3): 23~25
- 4 W. Wu, N. G. Liang, C. H. Gan *et al.*. Numerical investigation on laser transformation hardening with different temporal pulse shapes [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, **200**(8): 2627~2633
- 5 Yan Biao, Tang Renjian, Wang Jun *et al.*. Advanced Preparation Technology of Metallic Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 124~127  
严 彪, 唐人剑, 王 军等. 金属材料先进制备技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 124~127
- 6 Yin Chen. Study on mechanical properties of phase transformation layer in QT600 nodular cast iron by CO<sub>2</sub> laser quench [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(4): 74~75  
尹 晨. QT600 球墨铸铁激光淬火相变层机械性能的研究[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(4): 74~75
- 7 Xi Shoumou, Zhang Jianguo, Sun Xiaoyan *et al.*. Laser quenching + nitriding compound treatment of 38CrMoAlA steels [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 761~764  
席守谋, 张建国, 孙晓燕等. 38CrMoAlA 钢激光淬火+氮化复合处理[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 761~764
- 8 Ye Yunxia, Fu Yonghong, Yang Guocheng *et al.*. Study on laser phase transformation hardening of HT250 by high speed axis flow CO<sub>2</sub> laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10): 945~949  
叶云霞, 符永宏, 杨国成等. 快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器激光相变硬化处理 HT250 的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10): 945~949
- 9 Zou Xiangjun, Fan Xiangfang, Shi Shihong *et al.*. Laser hardening process for tablet punch pin [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(1): 68~70  
邹湘军, 樊湘芳, 石世宏等. 圆片冲头零件激光淬火工艺实验[J]. *激光技术*, 2002, **26**(1): 68~70
- 10 Chen Ruifang. Study on laser quenching of crankshaft [J]. *Machine Manufacturing and Automatization*, 2001, (6): 24~25  
陈瑞芳. 曲轴激光淬火处理方法的研究[J]. *机械制造与自动化*, 2001, (6): 24~25, 27
- 11 Ouyang An, Huang Anguo, Wang Yutao *et al.*. Study on laser phase transformation hardening of high-C-Cr roller steel [J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(4): 66~67  
欧阳安, 黄安国, 王玉涛等. 高碳高铬轧辊用钢激光相变强化研究[J]. *激光杂志*, 2007, **28**(4): 66~67
- 12 Zhang Guangjun, Xing Qi, Wu Xiaohui. The study of the gradient structure of 45 steel by laser transformation hardening (the influence of original microstructure) [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(1): 13~18  
张光钧, 邢 琪, 吴晓晖. 45 钢激光相变强化梯度组织的研究[J]. *应用激光*, 2004, **24**(1): 13~18
- 13 Cheng Yuanying, Liu Shunhong, Wang Hansheng *et al.*. Complete equipment of on-line laser quenching for automobile engine cylinder [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(3): 223~224  
程愿应, 刘顺洪, 王汉生等. 汽车缸体激光淬火生产线成套设备[J]. *激光技术*, 2002, **26**(3): 223~224
- 14 T. L. Chen. A study on austenite transformation during laser heating [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 1997, **63**: 546~549
- 15 A. A. Peligrade. A melt depth prediction model for quality control of laser surface glazing of inhomogeneous materials [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2001, **33**: 7~13