

# 激光诱导温度场对38CrNi3MoV 淬火组织转变及性能影响研究\*

孔宪俊<sup>1</sup>,王明海<sup>1</sup>,王 奔<sup>1</sup>,郑耀辉<sup>1</sup>,王 扬<sup>2</sup>,杨立军<sup>2</sup>

(1. 沈阳航空航天大学机电工程学院, 沈阳 110136;

2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

**[摘要]** 为提高炮管管线阴阳线硬度及抗摩擦磨损能力,对炮管管线阴线和阳线进行激光淬火试验研究。建立连续半导体激光加热 38CrNi3MoV 温度场的有限元预测模型,仿真分析激光参数对炮管管线温度场的影响规律。结合温度场仿真结果,对炮管管线开展激光淬火试验研究,探究激光功率、激光光斑直径、扫描速度等工艺参数对淬硬层硬度以及深度的影响规律。结果表明:激光淬火后平均硬度由 400HV 提高到 710HV,增加 43.66%;阳线、阴线硬化层深度分别达到 1.22mm 和 0.61mm。淬火后阳线表面粗糙度  $R_a$  由 0.548 $\mu\text{m}$  增加至 0.700 $\mu\text{m}$ ,阴线表面粗糙度  $R_a$  由 4.424 $\mu\text{m}$  降低至 3.804 $\mu\text{m}$ ,均在允许的变化范围之内,满足使用要求。通过光学显微镜对淬火后阴阳线组织转变进行观察分析,探究激光淬火后组织转变规律。

**关键词:** 激光; 温度场; 38CrNi3MoV; 淬火组织; 力学性能

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.23/24.052



孔宪俊

博士,讲师,研究方向为激光微细加工、激光复合机械切削。

火炮身管内表面具有膛线,由凹凸的结构组成,突出部分称为阳线,凹下部分称为阴线。膛线分阴阳是为了增加炮弹出膛后的稳定,炮弹出膛后的螺旋飞行,使得炮弹飞行时间更长、打得更远。炮弹在高速通过身管时,弹丸定心处和弹带对身管内表面的阳线、阴线和导转侧都会产生强烈的烧蚀磨损,导致火炮身管的使用寿命受到了限制<sup>[1-3]</sup>。对于内膛镀铬的炮管,炮管内膛的镀铬层经过激光淬火强化后,与铬层相连接的基体硬度增加,抗热冲击性能增加,并且能够抑制铬层表面的原始裂纹扩展,从而提高炮管的耐烧蚀磨损能力<sup>[4-5]</sup>。

激光表层淬火技术具有淬火后

性能优越、操作简单灵活、适应复杂形状零件硬化处理等优点<sup>[6-7]</sup>,非常适合航空领域具有复杂结构、特殊型面、深孔、微细孔等部件,美国已经将激光表层淬火技术广泛应用于航空领域里的高精齿轮、发动机汽缸、电动机马达轴、油泵、花键等重要零件<sup>[8]</sup>。

激光表层淬火技术具有淬火后性能优越、操作简单灵活、适应复杂形状零件硬化处理等优点,已经被众多学者、工程技术人员应用于不同材质、形状零件的表面层强化试验研究中,结果发现激光表面层淬火能够明显提高零件硬度、抗疲劳及抗磨损性<sup>[6-8]</sup>。激光淬火原理与常规淬火原理基本一

\* 基金项目: 科技部国家重点基础研究发展计划(2018YFB1107603); 辽宁省博士启动基金(20180540039); 校启动基金(18YB17); 先进航空发动机结构件数字化加工技术辽宁省科技创新团队项目(LT 201608); 沈阳市先进航空难加工结构数字化制造技术重点实验室项目(1801713)。

致,在淬火的过程中,加热速度和冷却速度均远大于普通淬火,工件表层材料经历更大的温度梯度,使激光淬火层具有比常规淬火层更高的硬度与耐磨性。60年代开始,德国学者首次提出利用激光束对材料进行热处理加工,随后美国通用公司成功使用CO<sub>2</sub>激光器开展了激光淬火试验研究,淬火试验件包括发动机缸盖、摇臂、活塞等,取得了较好的结果<sup>[9]</sup>。各国开始提出各种激光加工研究计划,我国对此也非常重视,相继成立了多个国家级研究中心,开展了数个国家级项目,取得了重要的研究成果,尤其在齿轮、活塞表面硬度和强度的提高上,获得了较好的应用<sup>[10-11]</sup>。

本文目的在于根据目前工业上对管材内表面硬化处理的迫切要求,克服目前管材内表面传统硬化处理方法中存在的硬度不高以及抗磨损性低的问题,采用激光淬火技术对38CrNi3MoV炮管内膛线开展表面硬化处理,首先开展高斯激光淬火温度场仿真及红外测温试验研究,基于建立的温度场模型作为淬火温度选取依据,针对激光淬火组织进行观察、分析转变机理,利用显微维氏硬度计进行淬火层硬度及深度的测量,激光淬火处理火炮身管不仅能够提高身管内表面的硬度、耐磨损性、疲劳强度,而且可以延缓材料裂纹的扩展,该项技术有望较大幅度提高火炮身管的使用寿命,但对于烧蚀磨损是炮管失效主要因素的大口径火炮而言,激光淬火处理提高寿命的幅度,还有待于进一步开展火炮寿命试验来检验。

## 试验方法和试验方案

### 1 试验材料

激光淬火试验所用材料为38CrNi3MoV合金钢,炮管供货为最终热处理状态,具有良好的综合性能,化学成分如表1所示。

### 2 试验方案

图1为激光淬火试验原理示

意图,试验采用Laserline半导体连续激光器,激光波长为1064nm。38CrNi3MoV淬火温度范围(820℃以上),利用红外测温仪对淬火区阳线和阴线进行温度测量,阳线和阴线硬化层深度示意图如图2所示,其中, $h_1$ 代表阳线硬化层深度; $h_2$ 代表阴线硬化层深度,选择适宜的淬火温度进行淬火试验,选择激光功率范围600~1000W,激光扫描速度2~6mm/s,激光光斑形状为圆形光斑。

为了检测淬火后材料的性能,利用线切割机将淬火后的阴线和阳线区域切下,利用镶嵌机进行镶嵌,经砂纸打磨、抛光、最后用3%硝酸酒精溶液腐蚀,观察不同激光参数淬火后材料的组织变化,分析淬火区、过渡区以及热影响区组织变化,以及淬火区有无过热、过烧、熔化等缺陷。利用显微维氏硬度计进行淬火后截面的硬度试验,每间隔20μm打一个

表1 38CrNi3MoV化学成分(质量分数)  
Table 1 Mass percentage of 38CrNi3MoV chemical composition %

| C    | Si   | Mn   | Cr   | Ni   | Mo   | V   |
|------|------|------|------|------|------|-----|
| 0.38 | 0.22 | 0.35 | 1.35 | 3.10 | 0.35 | 0.2 |

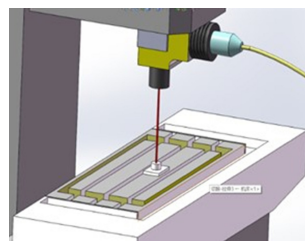


图1 激光淬火试验原理示意图  
Fig.1 Schematic diagram of laser quenching test

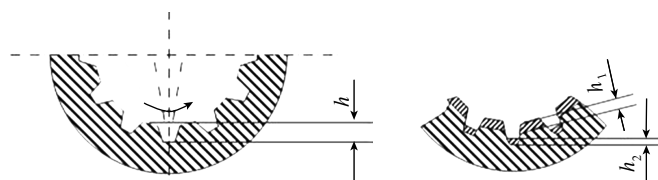


图2 火炮身管内表面激光硬化层深度示意图  
Fig.2 Schematic diagram of depth map of laser hardened layer on the inner surface of gun barrel

点,每个试样测试5次,取平均值,加载载荷0.49N,保载时间15s。采用光学显微镜对淬火后金相组织及压痕点形貌进行观察分析。

## 结果与讨论

### 1 建立激光加热温度场有限元模型

激光淬火硬化层的形成与淬火过程的温度场密切相关,由于激光加热和冷却速度快,淬火过程中温度场难以准确在线测量,故本文开展激光淬火温度场仿真研究,从而准确得出淬火过程中温度场变化规律。激光加热38CrNi3MoV过程中发生热传导、热辐射、热对流等物理现象,这些热物理过程对于激光淬火温度场有着非常大的影响,激光淬火典型热物理过程主要包括<sup>[12-14]</sup>:(1)激光作为表面热源对于工件的辐射传热及表层吸热后向内部的扩散;(2)被淬火工件沿径向/轴向与周围介质的热对流;(3)被淬火件向周围介质的热辐射;(4)工件与夹具之间的热传导,由上述分析可知,本文采用有限元的方法对该温度场进行仿真求解分析,预测的温度场能够帮助初选激光参数以及切削参数,大大降低试验成本和缩短试验周期。本文考虑了激光作为表面热源对工件表面进行热传导,工件与周围介质的热对流、热辐射几个最主要的热物理过程,根据傅立叶热传导方程<sup>[15-17]</sup>,如式(1)所示:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为材料导热系数;  $\rho$  为材料密度;  $C_p$  为材料比热容。激光为基膜高斯光束, 吸收率为 0.16, 其功率密度分布如式 (2) 所示:

$$I = \frac{2AP_1}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \quad (2)$$

式中,  $P_1$  表示激光功率 (W);  $A$  表示激光吸收率;  $r$  表示距光斑中心的距离 (m);  $R$  表示激光半径 (m)。

为了方便计算, 将激光加热切削时温度场简化为激光热流密度、表面对流及扩散所控制, 边界条件如式 (3) 所示:

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_{ls} q_1''(\varphi, z, t) \quad (3)$$

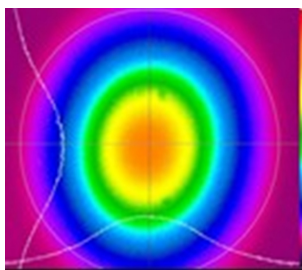
其中,  $\alpha_{ls}$  为热扩散系数;  $q_1''$  为总热量。

当工件表面材料处于激光光斑辐照区域时:

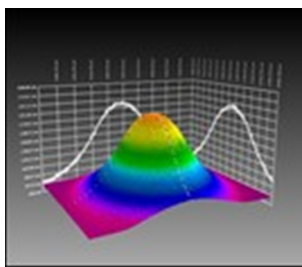
$$k \frac{\partial T}{\partial r} = q_{l,abs} - q_c - q_{rad} \quad (4)$$

式中,  $q_{l,abs}$  为工件表面吸收的激光热量 ( $W/m^2$ );  $q_c$  为工件表面的对流换热 ( $W/m^2$ );  $q_{rad}$  为工件表面的辐射换热 ( $W/m^2$ )。

激光器输出光束能量分布形式对于激光加热时的温度场有较大的影响, 进而影响加工效率和加工质量。试验前使用 Spricon SP620 激光光束



(a) 二维



(b) 三维

图3 激光光束能量分布

Fig.3 Laser beam energy distribution

质量仪对激光光束质量进行检测, 首先将激光光束垂直照射进入光探测器, 高能激光束经过探测器内衰减片后进入 Spricon SP620 激光光束质量仪, 检测到激光光束能量分布如图 3 所示, 发现激光光束呈均匀的高斯分布, 光束能量分布均匀性良好。

通过有限元仿真方法建立了激光加热 38CrNi3MoV 的温度场预测模型, 如图 4 所示。网格划分采用均匀化网格划分方法, 所用材料参数分别为: 导热系数  $\lambda$  为  $53W/(m \cdot K)$ ; 热扩散系数  $\beta$  为  $8.1 \times 10^{-6} m^2/s$ ; 吸收系数  $A$  为 0.16; 奥氏体化温度  $T_1$  为 1287K; 奥氏体化

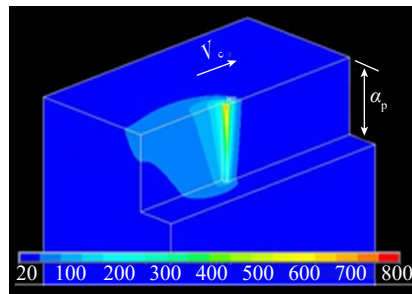


图4 温度场预测模型

Fig.4 Model of temperature field prediction

结束温度  $T_2$  为 1073K, 为了简化模型, 对整个激光加热过程做以下假设:

- (1) 加工过程所用激光为基膜高斯光束;
- (2) 热物理性能不随温度变化;
- (3) 38CrNi3MoV 对于激光的吸收率不随温度发生变化;
- (4) 未受激光加热工件两面假设为绝热条件;
- (5) 忽略工件与卡具的热传导。

## 2 激光加热温度场修正试验

采用 FLIRFDPS-150 型红外热像仪进行工件表面温度的测量, 红外热像仪放置于水平处与工件在一个平

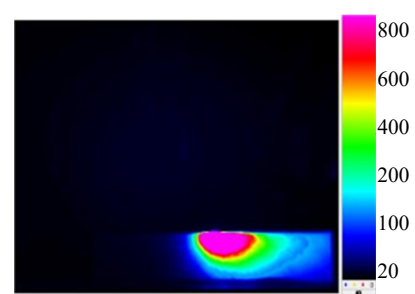
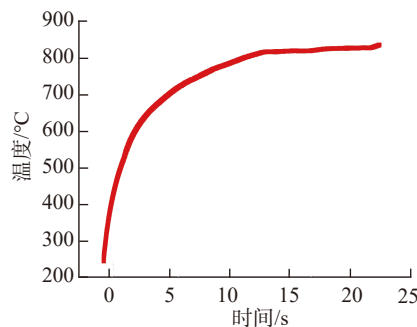
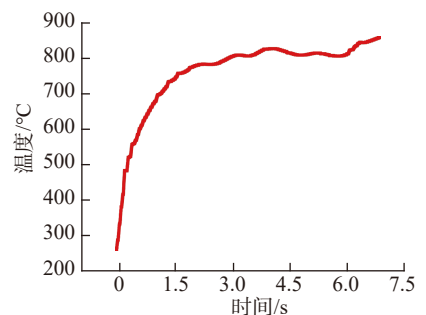


图5 红外测温试验温度场结果

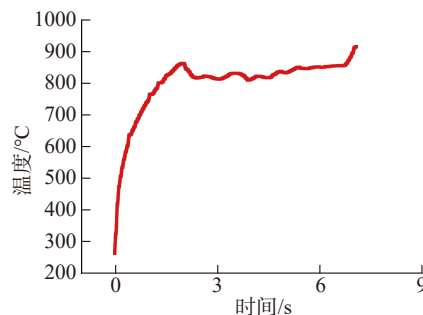
Fig.5 Temperature field results of infrared temperature measurement



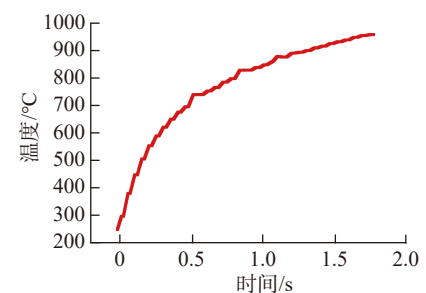
(a) 600W



(b) 700W



(c) 800W



(d) 900W

图6 光斑中心温度随激光功率变化曲线

Fig.6 Laser center temperature as a function of laser power

面,红外测温温度场结果如图5所示,依据有限元仿真模型模拟了工件表面温度随激光功率以及激光束光斑直径的变化曲线,如图6所示。有限元仿真所用参数与试验一致如表2所示。

## 淬火试验结果与讨论

### 1 淬火组织宏观形貌

图7为38CrNi3MoV激光淬火前组织,可以看出组织为针状马氏体,此时材料的硬度为42HRC,不能很好地满足炮管使用要求。

### 2 激光淬火组织转变机理

图8为38CrNi3MoV钢在激光功率 $P$ 为900W下淬火后的阳线组织形貌,激光直径3mm,运动速度5mm/s。可看出38CrNi3MoV激光淬火后截面出现月牙弯区域,该区域为淬火相转变区,从上到下分为3个区域,月牙弯内为相转变区,月牙弯边界与基体交界处为过渡区,月牙弯边界外区域为基体。淬火硬化区主要由马氏体组织构成,该区域经历了激光快速加热历程,在大的过热度相变驱动力的作用下先后发生奥氏体化和马氏体相转变,激光加热过程由于极快的加热

速率导致奥氏体来不及长大就开始发生马氏体相变,细小均匀的马氏体组织相转变后形成细小的马氏体组织。图8马氏体转变区的表层、中间和底层部分中,表层奥氏体组织由于其冷却速度最大,导致生成的针状马氏体组织较粗大,随着距表面距离的增加,过冷度越来越小,生成的马氏体组织越来越细化,硬度也较高。

图9为38CrNi3MoV钢在激光功率 $P$ 为900W下淬火后的阴线组织形貌,激光直径3mm,运动速度5mm/s。从图9中发现淬火后的组织晶界完整,淬火后晶粒未发生融化,阴线激光淬火过程中温度较阳线低,降低了碳原子扩散及迁移能力,此外铁素体向奥氏体发生转变及碳化物的溶解均不充分,导致晶粒较粗大。

图10为淬火后阳面的金相组织,淬火条件为激光功率950W,激光直径3mm,运动速度5.5mm/s,由马氏体、残留奥氏体、铁素体和碳化物组成<sup>[10]</sup>,随着功率的增加,淬火后马氏体组织开始长大,由淬火区、热影响区及基体构成,淬火区与热影响区交界

明显,该交界区域有一定宽度并不是一条直线,淬火区与热影响区互相渗透交织,主要受温度梯度影响较大。

### 3 淬火层硬度及深度影响因素

#### 3.1 激光功率

激光的输出功率对硬化层的性能影响很大,开展激光功率对硬化层性能影响的试验研究,结果如表3所示。在其他激光参数一定的情况下,激光功率的变化能够改变激光功率密度,直接影响激光作用区温度的高低,同时影响硬化层的深度和硬度,为了得到最佳的硬化层硬度和深度,对于激光功率进行优化,其他参数不变,只改变激光功率(600~1000W),找出激光功率与硬化层硬度和深度的关系,随着激光功率的增加,硬度值先降低后升高,其中淬硬表层显微硬度值变化较小,平均显微硬度值为710.5HV,高于常规淬火硬度(600HV),在离焦激光束辐照下,材料表面温升速率最高,铁原子、碳原子在高温情况下的扩散能力最强,易形成均匀的奥氏体组织,在随后的快速冷却过程中形成均匀细小的马氏体

表2 试验参数

Table 2 Experiment operating conditions

| 参数 | $P_i/W$ | $L/mm$ | $V_i/(mm \cdot s^{-1})$ | $D_i/mm$ | $T_p/s$ |
|----|---------|--------|-------------------------|----------|---------|
| 基准 | 600     | 5      | 0.33                    | 3        | 8       |
| 变量 | 300     | 3      | 0.27                    | 3        | 12      |
| 变量 | 800     | 7      | 1.05                    | 4        | 6       |
| 变量 | 1000    | 9      | 2.50                    | 5        | 5       |

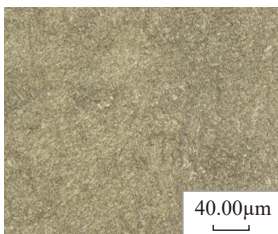


图7 38CrNi3MoV淬火前基体金相组织  
Fig.7 Metallographic structure of matrix before quenching of 38CrNi3MoV

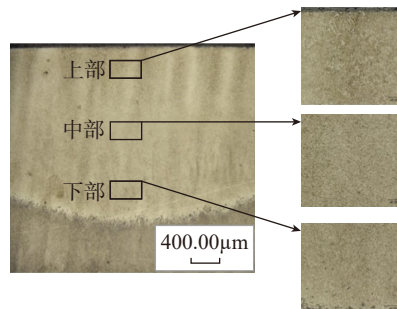


图8 阳线淬火区域放大图  
Fig.8 Yang line quenching area enlarged view

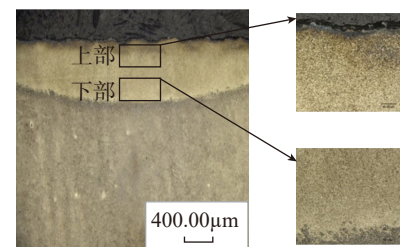


图9 阴线淬火区域放大图  
Fig.9 Yin line quenching area enlarged view

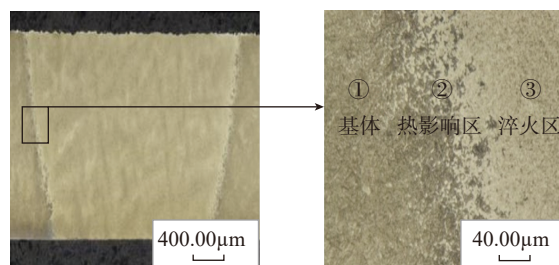


图10 淬火后阳面金相  
Fig.10 Metallographic surface after the quenching

组织,因此该区硬度值波动较小。随着距表面距离的增加,显微硬度值波动变大,主要由于随着距表面距离的增加,加热温度降低,碳原子在奥氏体中的扩散不充分,形成高碳马氏体和低碳马氏体的混合组织,过渡区(距表面0.65~0.8mm)的加热温度更低,铁素体向渗碳体的溶解更不充分,冷却后形成马氏体、铁素体和渗碳体的混合体,使得该区平均硬度值更低。

### 3.2 光斑直径d

开展激光光斑直径对硬化层性

能影响的试验研究,结果如表4所示。当激光功率一定的情况下,光斑尺寸越大,则激光功率密度越低,反之则功率密度越大。对一定的聚焦激光束而言,处于焦点的光斑尺寸最小,离焦量越大,激光作用点处的光斑直径越大,功率密度 $q_0$ 越小,表面温度越低,硬化层深度越浅。此外,聚焦激光束的类型不同(如圆形或线形),也影响到激光硬化效果。为了得到最佳的硬化层硬度和深度,对于光斑直径进行优化,本试验选择激光直径3mm、4mm、

5mm,其他参数不变,只改变光斑直径,找出光斑直径与硬化层硬度和深度的关系。通过测温试验发现随着激光直径的增加,温度下降剧烈,当激光直径选择4mm、5mm时,不能满足阴阳线的淬硬层深度的要求,因此,试验选择激光直径为3mm。

### 3.3 激光扫描速度 $V_L$

开展激光扫描速度对硬化层性能影响的试验研究,结果如表5所示。在其他激光参数一定的情况下,激光扫描速度直接影响激光作用区

表3 激光功率对淬硬层硬度以及深度的影响结果

Table 3 Effect of laser power on hardness and depth of hardened layer

| 激光扫描速度 / ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 激光功率 / W | 激光光斑直径 / mm | 阳线硬化层深度 / mm | 阴线硬化层深度 / mm | 淬火温度(阳 / 阴) / $^{\circ}\text{C}$ | 有无棱边熔化 |
|--|----------|-------------|--------------|--------------|----------------------------------|--------|
| 2  | 600      | 3.0         | 1.02         | 0.33         | 1060/820                         | 无      |
| 4  | 700      | 3.0         | 0.65         | 0.36         | 940/830                          | 无      |
| 5  | 800      | 3.0         | 0.74         | 0.24         | 864/614                          | 无      |
| 5  | 850      | 3.0         | 0.83         | 0.36         | 920/660                          | 无      |
| 5  | 900      | 3.0         | 1.07         | 0.41         | 1060/1010                        | 无      |
| 5.5  | 950      | 3.0         | 1.22         | 0.52         | 1110/1014                        | 无      |
| 6  | 1000     | 3.0         | 1.06         | 0.61         | 1064/810                         | 无      |

表4 淬硬层硬度以及深度随光斑直径变化结果

Table 4 Hardened layer hardness and depth as a function of spot diameter

| 激光扫描速度 / ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 激光功率 / W | 激光光斑直径 / mm | 阳线硬化层深度 / mm | 阴线硬化层深度 / mm | 淬火温度(阳 / 阴) / $^{\circ}\text{C}$ | 有无棱边熔化 |
|--|----------|-------------|--------------|--------------|----------------------------------|--------|
| 2  | 600      | 3.0         | 1.02         | 0.33         | 1060/820                         | 无      |
| 4  | 700      | 3.0         | 0.65         | 0.36         | 940/830                          | 无      |
| 5  | 800      | 3.0         | 0.74         | 0.24         | 864/614                          | 无      |
| 5  | 850      | 3.0         | 0.83         | 0.36         | 920/660                          | 无      |
| 5  | 900      | 3.0         | 1.07         | 0.41         | 1060/1010                        | 无      |
| 5.5  | 950      | 3.0         | 1.22         | 0.52         | 1110/1014                        | 无      |
| 6  | 1000     | 3.0         | 1.06         | 0.61         | 1064/810                         | 无      |
| 3  | 900      | 4.0         | 无淬硬层         | 无            | 650/530                          | 无      |
| 4  | 900      | 4.0         | 无淬硬层         | 无            | 550/410                          | 无      |
| 3.5  | 1000     | 4.0         | 0.46         | 0.21         | 815/730                          | 无      |
| 5  | 1000     | 4.0         | 无淬硬层         | 无            | 630/545                          | 无      |
| 3  | 1000     | 5.0         | 无淬硬层         | 无            | 温度太低                             | 无      |

温度的高低,同时影响硬化层的深度和硬度,为了得到最佳的硬化层硬度和深度,对于激光扫描速度进行优化,其他参数不变,只改变激光扫描速度(2~6mm/s),找出激光扫描速度与硬化层硬度和深度的关系。激光扫描速度对淬火温度的影响较大,但没有激光直径对于淬火温度的影响大,随着激光扫描速度的增加,淬火的温度降低,激光淬火扫描区域变窄,扫描区域宽窄依据淬火后材料的性能而定。

#### 4 淬火后表面粗糙度

表6为激光淬火试验前后阴阳线表面粗糙度值的变化,可见,选择适当的激光淬火条件,激光处理后的表面粗糙度与处理前的表面粗糙

度的差别很小,淬火后的阳线较淬火前表面粗糙度略有增加,主要是由于淬火温度较高,导致发生马氏体相变,相转变后生成的马氏体体积较原奥氏体和铁素体大,引起表面微观不平整度增加。淬火后的阴线较淬火前阴线的表面粗糙度略有降低,由于阴线淬火温度较低,淬火后组织由马氏体、残留奥氏体和铁素体组成,体积变化较小,微观平整度较高,总体来说,淬火前后表面粗糙度的变化不大,不影响工件的正常使用。

### 结论

(1) 基于傅立叶热传导理论,建

立了连续半导体激光加热管线温度场的有限元预测模型,仿真分析了激光参数对管线温度场的影响规律。

(2) 通过优化激光淬火参数,得到火炮材料的硬度由激光淬火前的400HV提高到淬火后的710HV,增加43.66%,激光淬火后阳面的淬硬度层深度超过1.0mm,阴面淬硬度层深度大于0.5mm,淬火区材料没有出现过烧、过热,以及熔化等缺陷。

(3) 淬火后阳线材料表面粗糙度由0.548 $\mu\text{m}$ 增加至0.7005 $\mu\text{m}$ ,阴线材料表面粗糙度由4.424 $\mu\text{m}$ 降低至3.804 $\mu\text{m}$ ,均在允许的变化范围之内。

表5 激光扫描速度对淬硬层深度的影响结果

Table 5 Effect of laser scanning speed on depth of hardened layer

| 激光扫描速度 / ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 激光功率 / W | 激光光斑直径 / mm | 阳线硬化层深度 / mm | 阴线硬化层深度 / mm | 淬火温度(阳 / 阴) / $^{\circ}\text{C}$ | 有无棱边熔化 |
|--|----------|-------------|--------------|--------------|----------------------------------|--------|
| 2  | 600      | 3.0         | 1.02         | 0.33         | 1060/820                         | 无      |
| 4  | 700      | 3.0         | 0.65         | 0.36         | 940/830                          | 无      |
| 5  | 800      | 3.0         | 0.74         | 0.24         | 864/614                          | 无      |
| 5  | 850      | 3.0         | 0.83         | 0.36         | 920/660                          | 无      |
| 5  | 900      | 3.0         | 1.07         | 0.41         | 1060/1010                        | 无      |
| 5.5  | 950      | 3.0         | 1.22         | 0.52         | 1110/1014                        | 无      |
| 6  | 950      | 3.0         | 0.98         | 0.43         | 860/710                          | 无      |
| 6  | 1000     | 3.0         | 1.06         | 0.61         | 1064/810                         | 无      |

表6 激光淬火前后阴阳线表面粗糙度值 ( $R_a$ ) 变化

Table 6 Surface roughness value change of yin and yang lines before and after laser quenching

| 激光扫描速度 / ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 激光功率 / W | 激光光斑直径 / mm | 阳线表面粗糙度 / $\mu\text{m}$ | 阴线表面粗糙度 / $\mu\text{m}$ | 淬火温度(阳 / 阴) / $^{\circ}\text{C}$ |
|--|----------|-------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 0  | 0        | 0           | 0.548                   | 4.424                   | 0/0                              |
| 5  | 850      | 3.0         | 0.719                   | 3.807                   | 920/660                          |
| 5  | 900      | 3.0         | 0.716                   | 3.901                   | 1060/1010                        |
| 5.5  | 950      | 3.0         | 0.624                   | 3.904                   | 1110/1014                        |
| 6  | 1000     | 3.0         | 0.743                   | 3.605                   | 1064/810                         |

参考文献

[1] 陈永才, 宋迺志, 王建中. 国内外火炮身管延寿技术研究进展 [J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 330-334.  
 CHEN Yongcai, SONG Qiuzhi, WANG Jianzhong. Research progress on artillery life extension technology at home and abroad[J]. Journal of Ordnance Engineering, 2006, 27(2): 330-334.  
 [2] 王道宏. 现代火炮工程实践 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.  
 WANG Daohong. Modern practice of gun[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997.  
 [3] 陈永才, 王兴贵, 薛德庆, 等. 火炮身管采用激光淬火工艺的应用研究 [J]. 兵工学报, 1999, 20(2): 168-170.  
 CHEN Yongcai, WANG Xinggui, XUE Deqing, et al. A study on the use of laser quenching technology on gun barrels[J]. Acta Armamentarii, 1999, 20(2): 168-170.  
 [4] LIU Z P, SONG Y P, CHEN Y X, et al. Research progress on effect of surface nanocrystallization of steel on chemical heat treatment process[J]. Heat Treatment Technology & Equipment, 2016, 37(2): 10-14.  
 [5] 唐仁奎, 廖丽, 杜华. 机械臂用不锈钢热处理及其组织与性能研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39(1): 182-185.  
 TANG Renkui, LIAO Li, DU Hua. Heat

treatment of stainless steel for manipulators and its microstructure performance study[J]. Casting Technology, 2018, 39(1): 182-185.  
 [6] TRILLAUD F, AYELA F, DEVRED A, et al. Quench propagation ignition using single-mode diode laser[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 3648-3651.  
 [7] GUREEV D M, MEDNIKOV S I. Combination of laser quenching and tempering for hardening tool steels[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1988, 18(8): 1054-1057.  
 [8] WANG L, SPEER J G. Quenching and partitioning steel heat treatment[J]. Metallurgy, Microstructure, and Analysis, 2013, 2(4): 268-281.  
 [9] LIU D, PONS D J. Development of a unified creep-fatigue equation including heat treatment[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2018, 41(1): 170-182.  
 [10] GONG Z H, YANG G, DING W, et al. Effect of heat treatment process on precipitation behavior and mechanical properties of 1Cr11Co3W3NiMoVnNB[J]. Journal of Iron & Steel Research, 2018, 30(4): 315-321.  
 [11] FENGZE H U, ZHU Y, HAIFENG L I, et al. Effect of Si and heat treatment on microstructure and mechanical properties of low temperature QT400-18L at -40°C[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(7): 89-91.  
 [12] CHEN Z Y, ZHOU G J, CHEN Z H.

Microstructure and hardness investigation of 17-4PH stainless steel by laser quenching[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 534(2): 536-541.  
 [13] YAN M F, WANG Y X, CHEN X T, et al. Laser quenching of plasma nitrided 30CrMnSiA steel[J]. Materials & Design, 2014, (6): 154-160.  
 [14] MAKAROV A V, KORSHUNOV L G, MALYGINA I Y, et al. Effect of laser quenching and subsequent heat treatment on the structure and wear resistance of a cemented steel 20KhN3A[J]. The Physics of Metals and Metallography, 2007, 103(5): 507-518.  
 [15] KONG D J, ZHANG L. Effects of laser quenching on impact toughness and fracture morphologies of 40CrNiMo high strength steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(10): 3695-3702.  
 [16] WU Y C, JIAN H, LEI Z P, et al. Tempering softening of overlapping zones during multi-track laser quenching for carbon steel and alloy steel[J]. Transactions of Materials & Heat Treatment, 2009, 30(5): 131-135.  
 [17] KONG D J, XIE C Y. Effect of laser quenching on fatigue properties and fracture morphologies of boronized layer on Cr<sub>12</sub>MoV steel[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 80: 391-396.  
 通讯作者: 孔宪俊, E-mail: kongxianjun.2008@163.com.

## Effect of Laser Heating Temperature Field on 38CrNi3MoV Quenching Microstructure and Properties

KONG Xianjun<sup>1</sup>, WANG Minghai<sup>1</sup>, WANG Ben<sup>1</sup>, ZHENG Yaohui<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, YANG Lijun<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;  
 2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China )

**[ABSTRACT]** In order to improve the hardness and anti-friction wear performance of the barrel, the finite element predictive model of the temperature field of the continuous semiconductor laser heating pipe line was established, and the effect of laser parameters on the temperature field of the pipe line was simulated. Combined with the simulation results, the mathematical relationship between the depth of the quenching layer and the peak temperature of the temperature field was calculated. The laser quenching test was carried out and the effect of laser power, laser diameter and laser scanning speed on the hardness and depth of the hardened layer was investigated. The microstructure change after quenching was observed by using optical microscope. The results showed that the average hardness after laser quenching was increased from 400HV to 710HV, which is increased by 43.66%, and the depth of the hard line of yin and yang lines was 1.22mm and 0.61mm, respectively. After quenching, the surface roughness of the yang line material increased from 0.548μm to 0.7005μm, and the surface roughness of the yin line material decreased from 4.424μm to 3.804μm, respectively, which is meeting the requirements of use. The microstructure transformation of the yin and yang lines after quenching was observed and analyzed using optical microscope, and the transformation rules after laser quenching was explored.

**Keywords:** Laser; Temperature field; 38CrNi3MoV; Quenching microstructure; Mechanical property

(责编 阳光)