

基于振镜变速扫描的激光淬火光学系统

车昕¹, 柳洁², 秦庆全¹, 秦应雄^{1*}

¹华中科技大学光学与电子信息学院激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074;

²武汉武钢华工激光大型装备有限公司, 湖北 武汉 430223

摘要 为了提高激光淬火硬化层形貌的均匀性,提出了一种基于振镜变速扫描的激光淬火光学系统。系统由 QBH(quartz block head)、准直聚焦一体镜、单轴振镜和振镜变速扫描控制系统等组成。通过设定振镜扫描系统的变速区域宽度和变速系数,可实现能量中间低、两端高的“鞍形”光场分布。建立了重复变速扫描系统的等效热作用光场模型,并通过 ANSYS 软件模拟了 45 钢激光淬火过程中的温度场。重点分析了振镜扫描系统的变速系数和变速区域宽度对淬火后相硬化层均匀性的影响。仿真结果表明,变速系数或变速区域的增大改善了硬化层的均匀性。采用千瓦级光纤激光器作为光源,进行了等变速区域不同变速系数的激光淬火实验。取硬化层深度降低至最大值 90% 的位置作为匀化区域的边界,变速系数为 0.8 时获得的硬化层的匀化区域宽度为 5.1 mm,比振镜匀速扫描的匀化效果提升了约 42%,实验结果与仿真结果吻合较好。

关键词 激光技术; 激光淬火; 振镜变速扫描; 光场调控; 温度场仿真; 光学系统

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2202005

1 引言

激光淬火表面处理技术是利用高能激光束照射工件表面,在极短时间内将工件加热至相变温度以上,再通过基体热传导实现快速冷却,从而获得高硬度淬火组织^[1-2]。在航天、汽车工业及铁路运输中,常见的零部件由于长期在恶劣工况下运作,极易以磨损、剥离、疲劳裂纹等形式失效^[3],激光淬火热处理工艺可以很好地提高器件表面的硬度和抗疲劳特性,从而降低工件的磨损率。同时,运输过程的高速化和重载化也对激光淬火后器件表面硬化层的均匀性提出了高要求。

激光淬火后表面的硬化效果与光束的强度分布密切相关。将传统圆形高斯分布的光束应用于激光淬火中,加工形成的相硬化层呈现中间深、两端浅的“月牙”形分布,降低了淬硬层的均匀性。因此众多学者提出了积分镜法、衍射光学法等光束变换方案^[4-6],将圆形高斯分布的光斑变换为平顶矩形光斑以用于加工,从而改善硬化层的均匀性^[7]。然而,平顶矩形光束作用于材料时,光斑边缘由于横向热传导会产生能量损耗,硬化层分布仍然呈现中心厚、边缘薄的特征^[8-9]。为了增大边缘的硬化层深度,需要特定的光场分布以增大光斑两侧的注入能量,使激光作用下的温度场尽量均匀。李俊昌^[10]在宽带光斑的基础上通过增大边

缘区域的功率密度,得到了“马鞍”形光斑,改善了硬化层的均匀性。何芳等^[11]提出了采用曲边和矩形光斑进行激光淬火的方法,理论和软件模拟结果显示,在硬化层深度一定的情况下曲边光斑比矩形光斑均匀性更好。

进一步开发光强分布可调的宽带激光光学系统,实现特定光强分布的宽带光束实时输出,是提升淬火质量的有效途径。振镜系统能够承受千瓦级激光功率,并且可以自由调整加工平面内光斑的运动路径、扫描速度、线间距等参数^[12],因此振镜扫描式的激光淬火方案具有很好的灵活性。郑寅岚^[13]提出了通过振镜往复偏转实现对试样重复扫描的激光淬火方法,并分析了重复扫描增加激光淬火深度的机理。

本文设计开发了一种基于振镜变速扫描的激光淬火光学系统,通过调控光斑在不同位置的扫描速度,实现了能量中间低、两端高的“鞍形”光场分布,将更多能量注入到扫描光场的两端,可达到改善硬化层均匀性的目的。建立了振镜重复变速扫描系统的等效热作用光场模型,通过 Matlab 和 ANSYS 软件分别仿真模拟了变速扫描激光淬火过程中的光场和温度场,重点分析了振镜扫描系统的变速区域宽度和变速系数对硬化层形貌特征的影响规律,并进行了等变速区域不同变速系数的激光淬火实验。

收稿日期: 2021-12-22; 修回日期: 2022-01-23; 录用日期: 2022-03-01

基金项目: 湖北省科技重大专项(2020AAA03)、国家重点研发计划(2016YFB1100302)

通信作者: *qyx@hust.edu.cn

2 系统结构

基于振镜变速扫描的激光淬火光学系统的光路如图 1 所示,包括 QBH(quartz block head)、准直聚焦一体镜、单轴振镜等光学部件。光束由激光器发出,通过 QBH 进入系统,依次经过准直聚焦一体镜聚焦、单轴振镜反射后到达加工平面。为了调控振镜的变速扫描运

动,开发了一套专用的控制系统,控制系统可设定振镜扫描系统的变速区域宽度和变速系数。变速区域宽度是指两端变速扫描的区域宽度,变速系数是指匀速区域的扫描速度相对端点位置的最小扫描速度的变化率。通过设定振镜在对应偏转位置的响应角速度,实现了工作面上光斑的扫描速度两端慢、中间快,从而获得能量中间低、两端强的“鞍形”光场以用于加工,如图 2 所示。

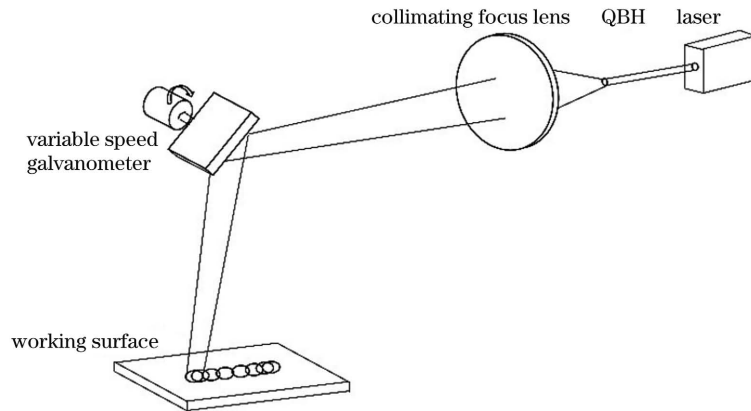


图 1 振镜变速扫描光学系统的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of optical system based on variable speed scanning of galvanometer

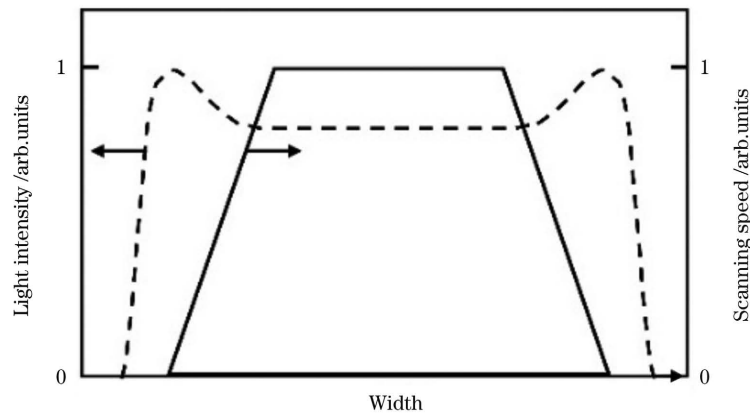


图 2 振镜变速扫描过程中的速度及光场分布示意图

Fig. 2 Schematic of speed and light field distribution in variable speed scanning process of galvanometer

系统结构如图 3 所示。准直聚焦一体镜采用焦距为 100 mm 的组合透镜,固定在 QBH 出光口后方 125 mm 的位置,实现振镜前光路聚焦,焦点位于透镜后 500 mm 处。系统根据实际所需光斑大小,通常采用负离焦的方式工作。选用的振镜最大通光直径为 30 mm。选用的光纤激光器单模光束参数积(BPP)为 0.45 mm·mrad。在实验室原有的可变光斑激光加工控制系统^[14]上进行改进,增设了调控振镜变速扫描的功能,如图 4 所示。利用控制系统中的“扫描宽度”和“匀速宽度”功能设定淬火区域及变速区域的宽度,利用“调整比例”功能设定变速系数值。利用控制系统中的“焦点高度”设定振镜中心到加工平面的工作距离,以确保振镜的偏转全角与预设定的扫描宽度相匹配。

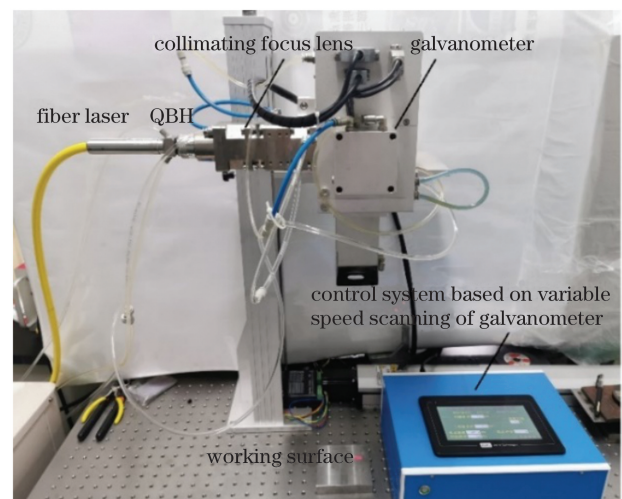


图 3 基于振镜变速扫描的激光淬火光学系统

Fig. 3 Laser quenching optical system based on variable speed scanning of galvanometer



图 4 控制界面

Fig. 4 Control interface

3 激光淬火的数值模拟

3.1 激光淬火的传热学基础

在激光淬火的过程中,激光能量以热源的边界形式作用于试样表层,如图 5 所示。由于不发生表面熔化,材料基于固体热传导机制将热量由表面向内部传递。因此,当一束功率为 P 的激光以速度 v 沿 x 方向扫描时,其瞬态温度场遵守固体导热微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T'}{\partial z} \right) + \Phi = \rho c \frac{\partial T'}{\partial \tau}, \quad (1)$$

式中: x, y, z 为三维空间坐标; λ 为材料导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$; ρ 为材料密度 (kg/m^3) ; c 为材料比热

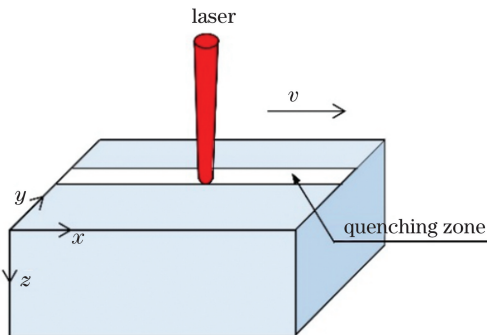


图 5 激光淬火过程的示意图

Fig. 5 Diagram of laser quenching process

容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$; T' 为瞬态温度场分布函数; τ 为时间; Φ 为金属材料的相变潜热为材料的热物性参数,易受温度影响。

结合激光扫描实际工况的初始条件及边界条件,可以将激光淬火过程中的温度场求解问题转化为热物理求解问题。为了准确建立仿真模型,对淬火过程作出以下假设:忽略热辐射传热,仅考虑零件表面与空气的热对流;忽略流动产热及材料表面的折反射影响。

3.2 建立有限元模型

本文利用 ANSYS 有限元分析软件,模拟激光淬火的相变过程及温度场分布。以 45 钢为试样基材建立模型,选择含有六面体八节点的 SOLID70 作为热分析单元。对于网格单元尺寸,划分的单元数越多,求解精度就越高,但会出现计算量太大、求解时间过长的问題。综合考虑求解精度及有限的计算机资源,在激光淬火区域选取六面体单元进行扫描网格划分,其余区域选用四面体单元进行自由划分。

由于 45 钢的密度受温度的影响较小,取常值 $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$;采用工程中实际测定的比热容,其值随温度变化,可量化材料的相变潜热、晶格热容、电子热容等的热影响。此外,导热系数 λ 对温度场分布的影响大,且随温度的变化明显。因此,设定的不同温度 T 下材料的热物性参数如表 1 所示^[15]。

表 1 不同温度下 45 钢的比热容和导热系数

Table 1 Specific heat capacities and thermal conductivities of 45 steel at different temperatures

$T / ^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	755	800	900	1000
$c / [\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$	480	498	524	560	615	700	854	1064	806	637	602
$\lambda / [\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$	43.5	40.4	38.1	36.0	34.2	32.0	28.7	25.1	26.5	25.9	24.0

激光的能量通过热流加载实现。光斑呈常见的高斯分布,振镜变速扫描系统的热流分布为

$$I = \frac{2\eta P}{\pi R^2} \exp \left\{ -\frac{2[(x-vt)^2 + y^2]}{R^2} \right\}, \quad (2)$$

$$v = \begin{cases} \frac{v_0}{1+q} + \frac{qv_0}{(1+q)a}x, & 0 \leq x \leq a \\ v_0, & a \leq x \leq a+b \\ v_0 - \frac{qv_0}{(1+q)a}(x-a-b), & a+b \leq x \leq 2a+b \end{cases}, \quad (3)$$

式中： η 为激光的吸收率； R 为光斑的外半径； t 为时间； v_0 为匀速扫描速度； a 为两端变速扫描区域的宽度； b 为中间匀速扫描区域的宽度； q 为振镜扫描系统的变速系数，可表示为

$$q = \frac{v_0 - v_1}{v_1}, \quad (4)$$

式中： v_1 为淬火区域端点的扫描速度。变速系数直接决定扫描光场的相对能量分布。

材料表面与周围空气发生对流换热。已知环境温度和表面对流换热系数，故设定第三类边界条件，界面对流传热的热流密度表示为

$$I' = -h(T_s - T_0), \quad (5)$$

式中： h 为对流换热系数 [$W/(m \cdot ^\circ C)$]； T_s 和 T_0 分别为材料表面温度和环境温度。环境温度设定为室温 $20^\circ C$ ，不考虑材料的各向异性，本文设定对流换热系数为 $30 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

为了实现马氏体转化，需要在加热和冷却阶段分别达到材料奥氏体转变的相变温度 (T_{ac1}) 和临界冷却速度。设定 45 钢相变温度为 $850^\circ C$ ，熔化温度为 $1650^\circ C$ 。由于激光淬火过程中的温度梯度大，金属材料的自激冷却速度足以满足相变临界冷却速度的要求，故依据相变温度的等温线确定硬化层分布。

3.3 动态扫描系统的等效热作用光场模型

在振镜扫描频率很高的情况下，可以将其扫描形成的矩形带看作是一个矩形光斑^[16]。为了验证小光斑重复扫描和矩形大光斑静态加热下温度场的等效性，在 ANSYS 软件上分别对功率相同的两种激光淬火方式进行温度场模拟。在基板表面选取尺寸为 $15\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的区域作为激光淬火区域，划分网格单元边长为 0.5 mm 。重复扫描的小光斑是边长为 3 mm 的平顶方形光斑，扫描速度分别设定为 $10、5、2\text{ m/s}$ ，对应的振镜扫描频率分别为 $667、333、133\text{ Hz}$ ，光斑移动步长等于一个网格单元边长；矩形大光斑的尺寸与淬火区域相同，光场是一个扫描周期内不同位置小光斑光场的叠加。光功率均为 2200 W ，作用时间为 0.1 s 。

两种淬火方式作用后，在基板表面和距离表面 0.5 mm 处，沿扫描方向的最高温度分布如图 6 所示。在淬火表面上，振镜扫描速度为 $10、5、2\text{ m/s}$ 时表面最高温度分别为 $1606、1622、1673^\circ C$ ，相较矩形大光斑作用后的最高温度分别高出约 $1\%、2.1\%、5.2\%$ 。在淬火区域的中心位置，沿工件深度方向取表面和距离表面 0.5 mm 处的网格节点，记录的升温过程如图 7 所示。小光斑重复扫描后升温曲线始终围绕静态矩形光斑作用后的升温曲线波动，最大温度波动差为 $\pm 16、\pm 33、\pm 83^\circ C$ 。在距离淬火表面 0.5 mm 深度处，两种方式的最高温度分布和升温曲线基本重合。这是由于表层区域与激光的热作用效率高，在一个光斑扫描周期内，热传导效应随着光斑扫描位置的变化而变化。

当光斑移动到中心区域时，热传导效应最强，表面温度升至最高；当光斑移动到端点时，沿横向温度梯度方向传递至中心区域的能量很弱，与周围空气的热对流导致中心节点的温度下降至最低，因而出现温度波动。由于振镜扫描频率很高时，热源移动周期很短且温度波动差值较小，因此不考虑扫描加热时波动降温过程的影响。而在基材内部区域，由于温度梯度下降，因此瞬时的热传导效应差异不大。

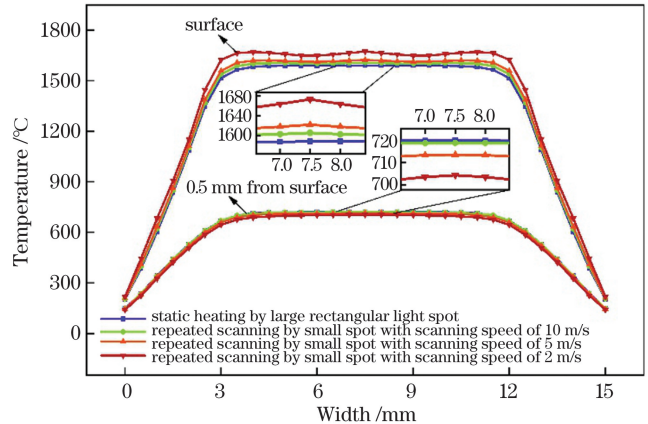


图 6 扫描方向上的最高温度分布

Fig. 6 Maximum temperature distributions along scanning direction

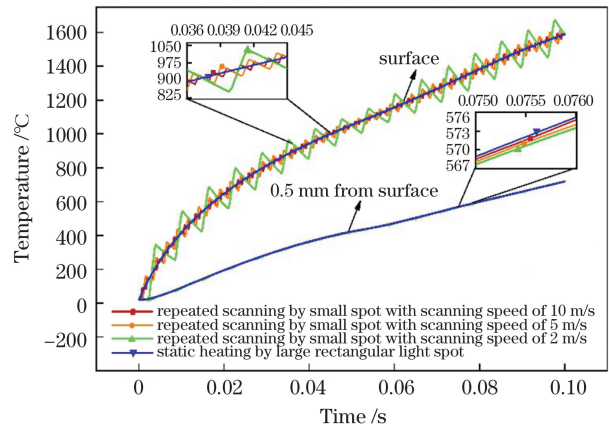


图 7 中心节点处的升温曲线

Fig. 7 Temperature rise curves at central nodes

由以上分析可以验证，当振镜扫描频率达到 333 Hz 以上时，两种激光淬火方式下的表面温度分布和循环升温过程基本相同，具有等效的温度场特性。为了简化光场函数和计算过程，本文在接下来的仿真中将采用等效矩形大光斑静态加热替换小光斑重复扫描。

3.4 镜扫描系统的变速系数对相变硬化层的影响

扫描振镜变速系数的设定会对淬火后相变硬化层的形貌产生直接影响。在仿真中，等效矩形大光斑的尺寸为 $10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ，即淬火区域尺寸。振镜变速扫描区域宽 2.5 mm ，匀速扫描区域宽 5 mm ，扫描区域简化为坐标形式 $(2.5, 5.0, 2.5)$ ，振镜扫描频率为 400 Hz 。光斑的功率均为 850 W ，作用时长为 3 s ，设

定材料对激光的吸收率 η 为 80%。Matlab 仿真变速系数 q 分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 时的振镜扫描光场如图 8 所示。模型划分网格边长为 0.5 mm, 设定相

同的边界条件, 分别求解不同变速系数 q 下光场作用后的温度场分布, 根据材料的相变温度拟合等温线, 获得的硬化层分布如图 9 所示。

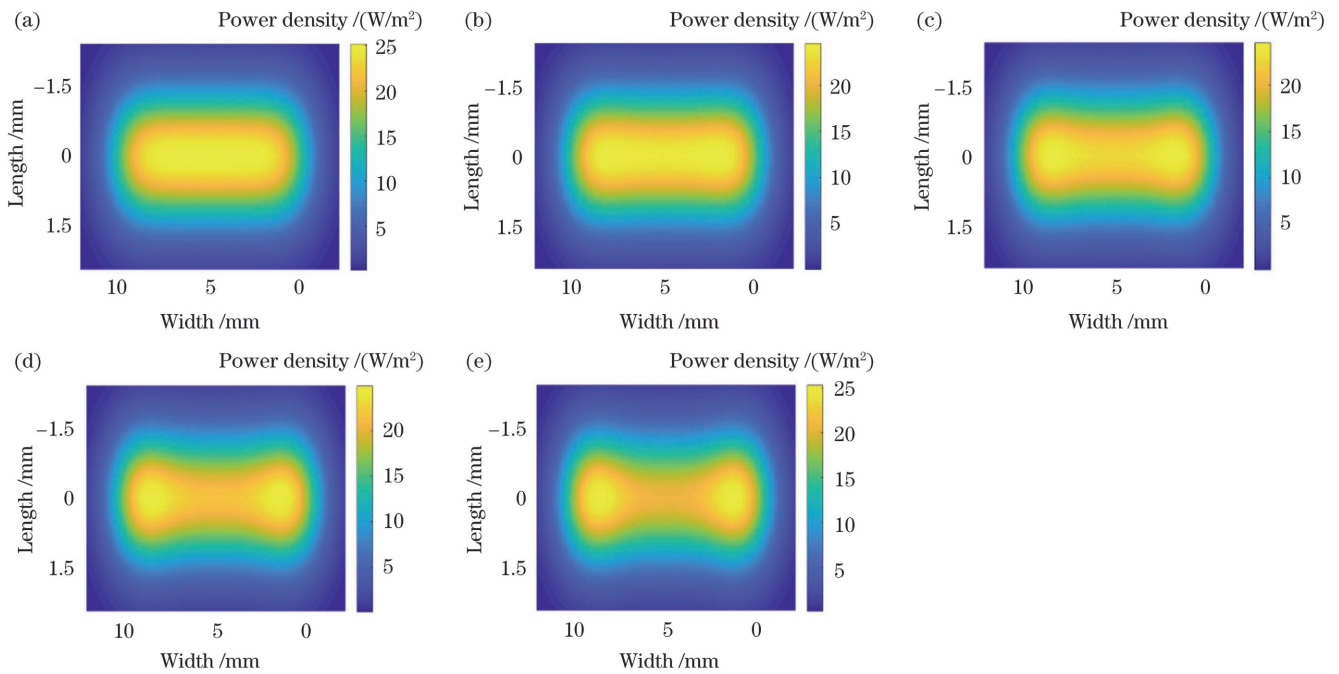


图 8 不同变速系数下的光场分布。(a) $q=0$;(b) $q=0.2$;(c) $q=0.4$;(d) $q=0.6$;(e) $q=0.8$

Fig. 8 Light field distributions under different variable speed coefficients. (a) $q=0$; (b) $q=0.2$; (c) $q=0.4$; (d) $q=0.6$; (e) $q=0.8$

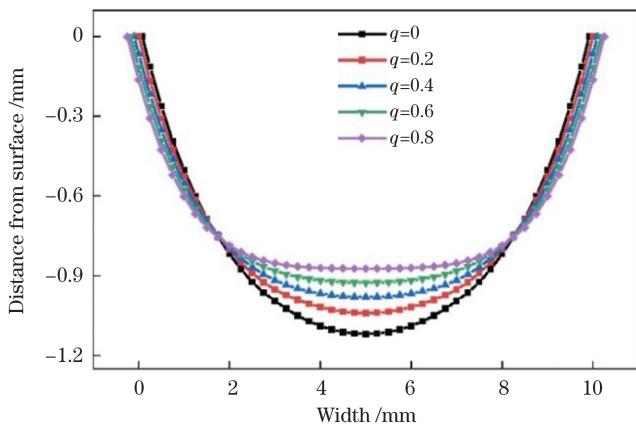


图 9 不同变速系数下扫描后的硬化层分布

Fig. 9 Hardened layer distribution after scanning under different variable speed coefficients

取硬化层深度降低至最大值 90% 的位置作为匀化区域的边界, 相变硬化层是均匀分布的。在匀速扫描和变速系数分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 的变速扫描下, 对应的匀化区域宽度分别为 3.8、4.3、4.7、5.2、6.0 mm。当变速系数增大时, 变速扫描的淬火区域吸收的激光辐照能量增多, 补偿了热量沿横向传导的热损耗, 故热量沿纵深方向传递得更深, 匀化区域宽度呈现增大的趋势。可见, 增大振镜扫描系统的变速系数, 可以改善淬硬层的均匀性。

3.5 振镜扫描系统的变速区域对相变硬化层的影响

将扫描振镜的变速系数 q 设定为 0.6, 模型尺寸

和淬火区域同上, 分别选取扫描宽度为 0.5、1、2、4 mm 的光场进行淬火模拟, 将扫描区域简化为坐标形式(0,10,0)、(0.5,9.0,0.5)、(1,8,1)、(2,6,2)、(4,2,4), 仿真得到的光场分布如图 10 所示。光斑功率均为 850 W, 考虑材料表面对激光的吸收率, 在相同的模型加载条件下, 求解不同变速系数下光场作用后的温度场分布, 计算得到的相变硬化层分布如图 11 所示。

与上节匀速区域宽度的计算方法相同, 当变速区域坐标为(0,10,0)、(0.5,9.0,0.5)、(1,8,1)、(2,6,2)、(4,2,4)时, 仿真获得的相变硬化层的匀化区域宽度分别为 3.8、4.1、4.3、4.8、5.8 mm。可见, 当变速扫描区域的宽度增大时, 边缘区域同样可以获得更多热流的注入, 可补偿热量横向传递的损耗, 改善硬化层的“月牙”形貌。

4 实验方案及结果

4.1 激光淬火实验方案

为了验证系统对硬化层形貌均匀性的改善效果, 依照等淬火区域、等功率、变扫描方式的原则设计实验。选定淬火区域尺寸为 10 mm × 3 mm, 中间匀速扫描区域宽为 5 mm, 两端的变速扫描区域宽为 2.5 mm, 分别在匀速扫描和变速系数 q 为 0.2、0.4、0.6、0.8 的变速扫描下进行激光淬火实验。实验中, 通过调整工作面的离焦量, 获得了直径为 3 mm 的光

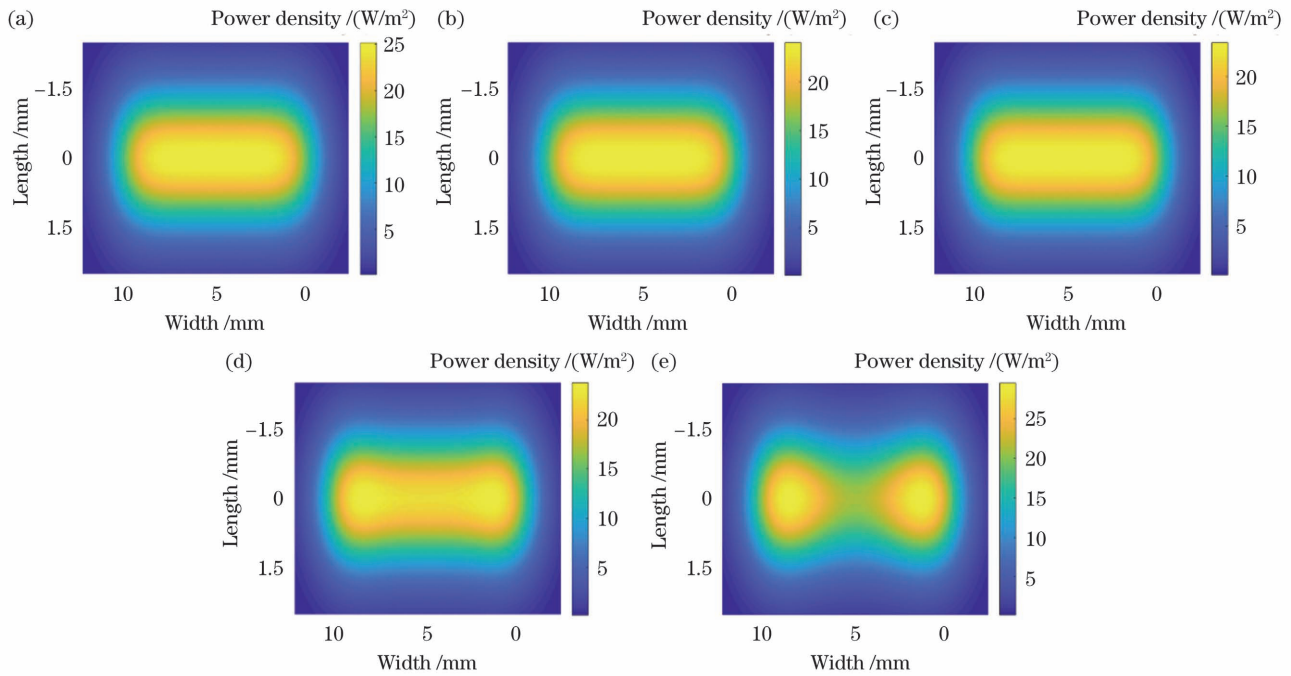


图 10 不同扫描区域的光场分布。(a) (0,10,0); (b) (0.5,9.0,0.0,0.5); (c) (1,8,1); (d) (2,6,2); (e) (4,2,4)

Fig. 10 Light field distributions in different scanning areas. (a) (0,10,0); (b) (0.5,9.0,0.0,0.5); (c) (1,8,1); (d) (2,6,2); (e) (4,2,4)

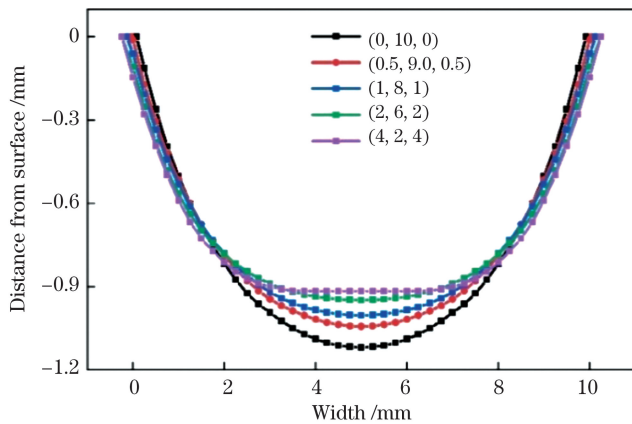


图 11 不同扫描区域的硬化层分布

Fig. 11 Hardened layer distributions in different scanning areas

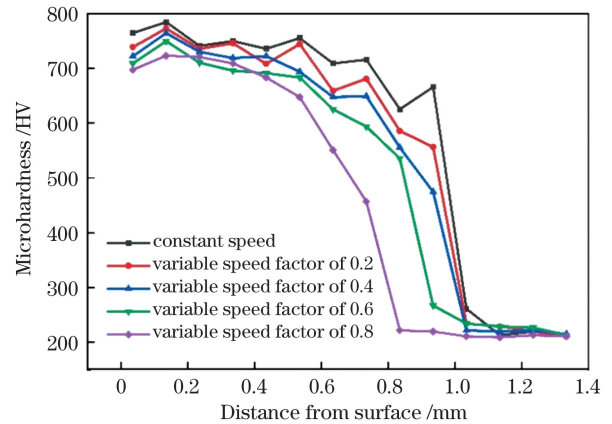


图 12 激光淬火后硬化层的显微硬度曲线

Fig. 12 Microhardness curves of hardened layers after laser quenching

斑,控制系统中对应输入的焦点高度为 300 mm,系统的扫描频率设定为 400 Hz。以 45 钢作为基体材料,激光器输出功率均设定为 850 W,作用时长为 3 s。

4.2 结果分析

各试样淬火后,分别在激光扫描方向的中心截面上以线切割方式取样,经过镶样、打磨、抛光后,利用显微维氏硬度计检测淬硬层在纵深方向上的硬度变化,结果如图 12 所示。在激光淬火过程中,试样由表及里发生了复杂的微观组织转变,硬度相较基体有了显著提高。在贴近表面的区域内,显微硬度随着纵向深度的增加先上升后下降。这是由于表面与激光的热作用效率高,冷却速度慢,有部分奥氏体组织残余,其硬度不能达到最高^[17]。随着纵向深度的增加,芯部区域的热影响减弱,加热温度低于 T_{ac1} ,未发生有效的奥氏体

转变,因此显微硬度下降明显。

为了进一步评价淬硬层的均匀性,取硬化层深度降低至最大值 90% 的位置作为匀化区域的边界,利用光学显微镜测量硬化层的深度和匀化区域宽度,如图 13 所示。经匀速扫描及变速系数为 0.2、0.4、0.6、0.8 的变速扫描后,硬化层深度分别为 1.10、1.00、0.90、0.85、0.80 mm,匀化区域宽度分别为 3.6、3.8、4.3、4.8、5.1 mm。相较匀速扫描,变速系数为 0.8 的变速扫描获得的匀化区域宽度提高了约 42%。变速扫描后的相变硬化层的均匀性得到明显提高,实验结果与仿真结果基本一致。此外,由于变速扫描中更多光场能量被注入到两端淬火区域,硬化层深度有所下降。在实际淬火应用中,可以适当增加激光功率,进一步提高淬硬层的深度。

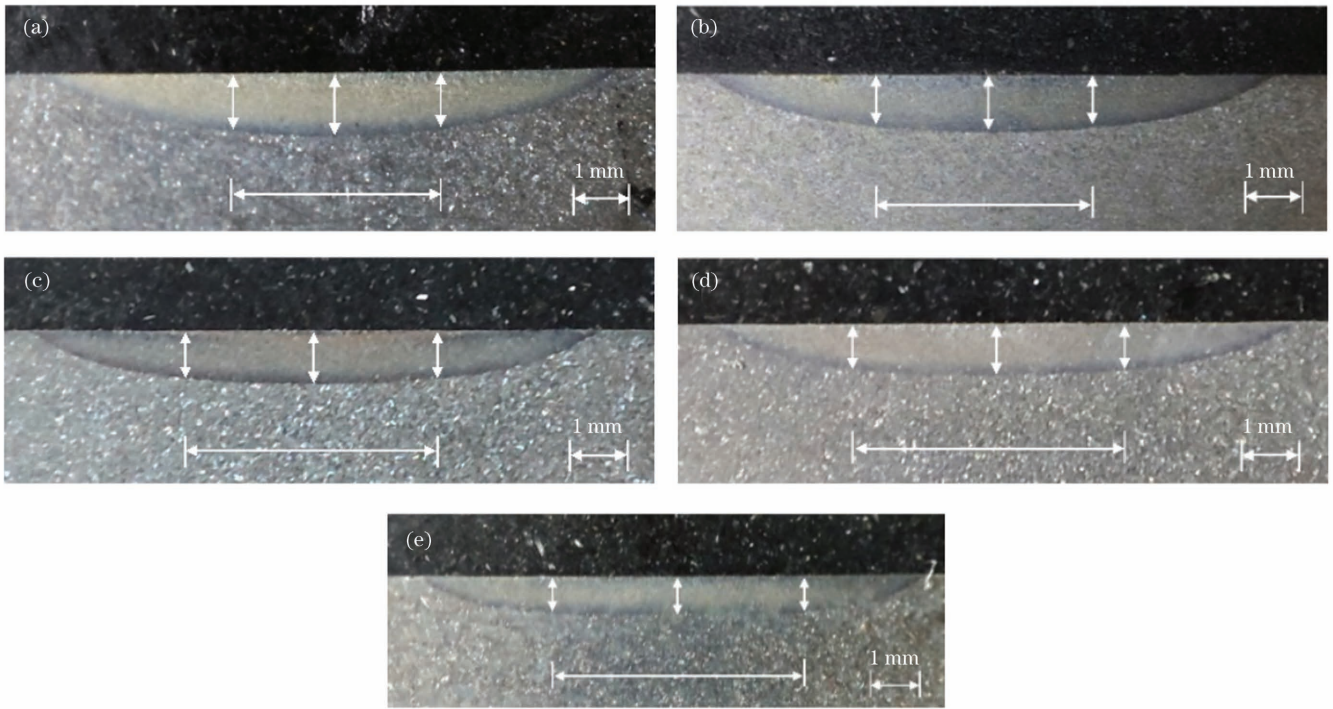


图 13 激光淬火后的硬化层匀化区域。(a) $q=0$;(b) $q=0.2$;(c) $q=0.4$;(d) $q=0.6$;(e) $q=0.8$

Fig. 13 Homogenization areas of hardened layers after laser quenching. (a) $q=0$; (b) $q=0.2$; (c) $q=0.4$; (d) $q=0.6$; (e) $q=0.8$

5 结 论

研发了一种由 QBH、准直聚焦一体镜、单轴振镜等组成的激光淬火光学系统,并开发了专用的振镜变速扫描控制系统。通过仿真分析了振镜扫描的变速系数和变速区域对淬硬层形貌的影响规律。结果表明,通过增大变速系数和变速区域,可以提升淬硬层的均匀性。利用系统进行了重复变速扫描的激光淬火实验,淬火区域宽为 10 mm,光功率为 850 W。当两端变速区域宽为 2.5 mm、变速系数为 0.8 时,获得的硬化层的匀化区域宽度为 5.1 mm,相较匀速扫描提升了约 42%,硬化层均匀性得到改善明显。

参 考 文 献

- [1] 郭卫, 张汉杰, 柴蓉霞. 27SiMn 钢表面激光淬火数值模拟及实验验证[J]. 应用激光, 2019, 39(3): 482-489.
Guo W, Zhang H J, Chai R X. Numerical simulation and experimental verification of laser quenching on 27SiMn steel surface[J]. Applied Laser, 2019, 39(3): 482-489.
- [2] 张群莉, 林坚, 陈智君, 等. 基于 MSC.Marc 软件的电磁感应复合激光淬火相变研究[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1103002.
Zhang Q L, Lin J, Chen Z J, et al. Phase transformation process of electromagnetic induction assisted laser quenching based on MSC. marc software[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1103002.
- [3] 韩东序, 赵秀娟, 潘金芝, 等. CL60 车轮钢喷丸强化的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(5): 78-81.
Han D X, Zhao X J, Pan J Z, et al. Shot peening strengthening of CL60 wheel steel [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(5): 78-81.
- [4] 余金清, 尹韶云, 殷智勇, 等. 高均匀长工作深度激光整形系统设计[J]. 光电工程, 2014, 41(8): 80-84.
Yu J Q, Yin S Y, Yin Z Y, et al. High uniform long working
- depth laser shaping system design [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(8): 80-84.
- [5] 李党娟, 王佳超, 陈阳, 等. 大功率长焦深高斯光束整形设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2129-2137.
Li D J, Wang J C, Chen Y, et al. Design of high power long-coke deep-gaussian beam shaping system [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2129-2137.
- [6] 刘晓东, 秦应雄, 柳洁, 等. 高功率激光大宽度矩形光束抛物带式积分镜研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 191403.
Liu X D, Qin Y X, Liu J, et al. Research on parabolic band integrating mirror for high-power large-width rectangular laser beams[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 191403.
- [7] 尹燕, 陈燕, 郑祥超, 等. 轧辊表面激光淬火的研究现状[J]. 甘肃科技, 2012, 28(3): 88-90.
Yin Y, Chen Y, Zheng X C, et al. Research status of laser quenching on roll surface [J]. Gansu Science and Technology, 2012, 28(3): 88-90.
- [8] 虞钢, 王恒海, 何秀丽. 具有特定光强分布的激光表面硬化技术[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 480-486.
Yu G, Wang H H, He X L. Laser surface hardening using determined intensity distribution [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 480-486.
- [9] 冯树强, 孙荣敏, 李宝灵, 等. 改善激光淬火硬化层均匀性的研究进展[J]. 电加工与模具, 2010(4): 48-51.
Feng S Q, Sun R M, Li B L, et al. Enhance the hardened level uniform discussion [J]. Electromachining & Mould, 2010(4): 48-51.
- [10] Li J C. Research on optimal control of laser heat treatment [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
李俊昌. 激光热处理优化控制研究 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [11] 何芳, 吴钢, 宋光明. 曲边矩形光斑激光淬火的理论研究[J]. 天津工业大学学报, 2003, 22(5): 17-20.
He F, Wu G, Song G M. Study on laser hardening with curved rectangular beam [J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 2003, 22(5): 17-20.

- [12] 陈凯焯, 王晔, 吴国龙, 等. 基于扫描振镜的激光淬火温度特性模拟与实验研究[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 251-258.
Chen K Y, Wang Y, Wu G L, et al. Simulation and experiment of laser quenching temperature characteristics based on galvanometer scanning[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 251-258.
- [13] 郑寅岚. 提高钢轨使用寿命的激光表面复合化技术与机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
Zheng Y L. Study of technology and mechanisms of laser surface compositing to enhance railway service life [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [14] 秦应雄, 张怀智, 昌思怡, 等. 基于自适应镜的可变圆光斑激光熔覆光学系统[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302007.
Qin Y X, Zhang H Z, Chang S Y, et al. Laser cladding optical system with variable circular light spot based on adaptive mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302007.
- [15] 范文. 45 钢激光淬火的模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
Fan W. Simulation study on laser quenching of steel 45 [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [16] 郑启光, 辜建辉. 激光与物质相互作用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
Zheng Q G, Gu J H. Laser-matter interaction [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996.
- [17] 杨振, 樊湘芳, 邱长军, 等. 40CrNiMoA 钢表面激光淬火后的组织和性能[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011405.
Yang Z, Fan X F, Qiu C J, et al. Microstructure and properties of 40CrNiMoA steel surface after laser quenching [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011405.

Laser Quenching Optical System Based on Variable Speed Scanning of Galvanometer

Che Xin¹, Liu jie², Qin Qingquan¹, Qin Yingxiong¹

¹ National Engineering Research for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

² Wuhan WISCO Huagong Laser Large Equipment Co., Ltd., Wuhan 430223, Hubei, China

Abstract

Objective Due to the high friction and wear caused by the development of high-speed and heavy-duty railway transportation, parts and components are prone to failure in the forms of wear, peeling, fatigue cracks, and so on. Higher requirements for the uniformity of the work piece's hardened layer after laser quenching are put forward to improve the wear resistance and service life of the surface of parts and components. The surface hardening effect of laser quenching is closely related to the light intensity distribution of the beam. When the commonly used flat-top rectangular light spot acts on the material, the topography of the hardened layer presents a "crescent" shape, deep in the middle and shallow at both ends, as the consequence of the obvious lateral heat loss at the edge of the light spot. To increase the depth of the hardened layer at the edge, a specific light field distribution is required to increase the energy injection on both sides of the spot, so that the temperature field under the action of the laser is as uniform as possible. As a result, developing a broadband laser optical system with adjustable light intensity distribution to realize the real-time output of a broadband beam with a specific light intensity distribution is an effective way to improve quenching quality. We present a laser quenching optical system based on galvanometer variable-speed scanning in this paper. The light field and temperature field distributions in the quenching process are regulated by changing the variable-speed scanning mode of the galvanometer, so that more heat is injected into the quenching regions at both ends to overcome the energy loss caused by lateral transfer, improving the uniformity of the phase transformation hardened layer. This study provides a reference for the high-quality surface strengthening of high-end equipment parts under heavy load conditions.

Methods The ANSYS software is used to establish the thermophysical model of the laser quenching process, and the initial conditions and boundary conditions are set according to the working conditions. A static rectangular light field with an equivalent thermal effect is established in the simulation model as a result of the complex calculation of the moving heat source model scanned by the galvanometer. The heating curve at the characteristic point and the maximum surface temperature distribution confirm the equivalence of temperature field evolutions in the two laser quenching methods. The 45 steel is selected as the base material, and the model considers the thermophysical parameters of the material at different temperatures. Because the temperature gradient in the laser quenching process is large enough to meet the cooling rate requirements of self-cooling quenching, the hardened layer distribution can be obtained by making isotherms based on the material's phase transition temperature. The effects of the variable speed coefficient and variable speed range of galvanometer scanning on the uniformity of the phase transformation hardened layer are investigated, and a quenching experiment is performed using the equal power, equal quenching area, and variable scanning mode scheme.

Results and Discussions When the scanning frequency of the galvanometer is above 333 Hz, the surface temperature field distribution and cyclic heating process after repeated scanning by a small spot are essentially the same as those after

static heating by an equivalent rectangular large spot (Figs. 6 and 7). Two types of laser quenching modes have equivalent temperature field characteristics. The light field distribution and hardened layer distribution after galvanometer scanning with different variable speed coefficients are simulated (Figs. 8 and 9), and the light field distribution and hardened layer distribution after galvanometer scanning with different variable speed ranges are simulated (Figs. 10 and 11). The variable-speed coefficient or variable-speed area in the galvanometer variable speed scanning is increased, allowing more heat flow into the two-stage quenching area, compensating for the loss of heat transfer in the lateral direction, and improving the hardened layer uniformity. A laser quenching experiment with the same quenching parameters as the simulation ones is carried out using the developed system device. Taking the position where the depth of the hardened layer is reduced to 90% of the maximum value as the boundary of the homogenization area, the quenching area width is 10 mm, and the homogenization area width after galvanometer scanning at constant speed is 3.6 mm. When the variable-speed area at both ends is 2.5 mm wide and the variable-speed coefficient is 0.8, the homogenization area width in the hardened layer is 5.1 mm, which is approximately 42% higher than the homogenization area width (Fig. 13).

Conclusions In the present study, a laser quenching optical system based on variable speed scanning of a galvanometer is proposed. The system consists of a QBH (quartz block head), a collimating and focusing integrated mirror, a single-axis galvanometer, and a galvanometer variable-speed scanning control system. The “saddle” shape light field with low energy in the middle and high energy at both ends is realized by setting the widths of the galvanometer variable-speed scanning areas at both ends and the width of the galvanometer constant speed scanning area in the middle, as well as the variable-speed coefficient. The laser quenching process based on galvanometer variable-speed scanning is studied, and the equivalent thermal light field model based on repeated variable-speed scanning is established. The simulation is used to examine the effects of the variable-speed coefficient and galvanometer variable-speed scanning area on the morphology of the hardened layer, and the laser quenching test based on repeated variable speed scanning is performed through the system. The results show that increasing the variable-speed coefficient and galvanometer variable-speed scanning area can improve hardened layer uniformity, which can be used to guide high-quality quenching of equipment parts under heavy load conditions.

Key words laser technique; laser quenching; variable speed scanning of galvanometer; light field control; temperature field simulation; optical system