

# 42CrMo 钢激光-感应复合淬火淬硬层几何特征及组织

唐泽浩<sup>1,2,3</sup>, 张群莉<sup>1,2,3</sup>, 黄 华<sup>1,2,3</sup>, 陈智君<sup>1,2,3</sup>, 曹军胜<sup>4</sup>, 姚建华<sup>1,2,3</sup>

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310023)

(2. 浙江工业大学 激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023)

(3. 高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 浙江 杭州 310023)

(4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 采用激光-感应复合淬火的新工艺, 将激光和电磁感应 2 种热源复合提高 42CrMo 钢激光淬火的淬硬层深度和均匀性。利用 COMSOL Multiphysics 5.5 软件对 42CrMo 复合淬火过程中温度场的演变过程进行分析, 通过淬火实验对模型进行了验证, 淬硬层深度模拟值与实验值一致性较高。采用该模型, 比较了复合淬火与单一激光淬火和单一感应淬火在同工艺下淬硬层的表面温度和深度, 分析了不同扫描速度和激光光斑尺寸对淬硬层深度的影响。通过实验对复合淬火的淬硬层深度、硬度、晶粒大小和显微组织进行分析。结果表明, 激光-感应复合淬火可以有效提高试样的表面淬火温度, 增大淬硬层宽度和深度, 弥补单一激光淬火激光功率不足的缺点, 通过模型预测了复合淬火最优扫描速度和光斑尺寸。相较于 2 种单一热源淬火, 复合淬火的晶粒度和显微组织形态在深度方向上的变化趋势与激光淬火相似, 但具有更高的淬硬层平均硬度。

**关键词:** 激光淬火; 电磁感应; 42CrMo 钢; 数值模拟; 几何特征; 组织

**中图分类号:** TG156.33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)07-2519-10

重载轴承作为现代工业中的一种重要基础件广泛应用于机械工程、冶金工程、交通运输工程等<sup>[1]</sup>, 具有负载大、制造成本高、冲击载荷大等特点。重载轴承的疲劳寿命将直接决定大型装备的使用寿命<sup>[2]</sup>。重载工况下工作的轴承常出现磨损、压溃、断裂等失效形式<sup>[3,4]</sup>。42CrMo 钢作为一种高强度的中碳低合金结构钢, 具有良好的淬透性, 同时淬火变形小, 具有较好的综合力学性能, 常被用作轴承原材料, 且一般采用淬火处理来增强 42CrMo 钢的表面性能<sup>[5,6]</sup>。

激光淬火技术是一种应用极广的表面处理技术, 可以在不影响材料整体组织和性能的情况下提高材料表面性能, 但往往得到的淬硬层深度较浅, 一般在 2 mm 以内<sup>[7-9]</sup>, 无法满足重载轴承长时间工作所需的淬硬层深度要求。利用电磁感应淬火技术可以获得较深的淬硬层, 但面临工件变形严重、环形零件存在软带、淬硬层易开裂等问题<sup>[10,11]</sup>。各国学者对于 2 种热源单一淬火已有大量实验和模拟研

究, 如雷声等<sup>[12]</sup>选用 CO<sub>2</sub> 激光器对 GCr15 钢轴承滚道表面进行表面强化, 淬硬层深度达到 0.9 mm, 表面最高硬度值 (HV<sub>0.1</sub>) 接近 9800 MPa, 相较于传统淬火试样耐磨程度提高 1 倍以上。刘杰等<sup>[13]</sup>对 45 钢在激光淬火和感应淬火下淬硬层组织进行分析, 发现感应淬火淬硬层组织相对弥散, 马氏体转化率低, 硬度及强度也相对较低。但是, 对于 2 种热源相复合的淬火却少有研究, 仅有 Doležel 等<sup>[14]</sup>提出了感应加热结合激光淬火减少淬火应力的模型, 采用感应器对淬火试样表面进行预热, 以减小激光淬火时过高的温度梯度及随后产生的残余应力, 但尚未开展进一步的实验研究分析。

本研究采用激光-感应复合淬火的新工艺, 在大幅提高材料表面淬硬层深度的同时减少试样的变形和开裂, 以期获得重载工况下优良的表面性能。利用 COMSOL Multiphysics 5.5 软件对 42CrMo 钢激光-感应复合淬火过程中温度场的演变过程进行分析。利用该

收稿日期: 2021-07-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0407301); 国家自然科学基金 (52035014); 浙江省属高校基本科研业务费项目 (RF-C2019003)

作者简介: 唐泽浩, 男, 1997 年生, 硕士生, 浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023, 电话: 0571-85290866, E-mail: zehao\_tang@foxmail.com

模型研究复合淬火与单一淬火温度场及淬硬层几何特征的区别, 以及工艺参数对复合淬火淬硬层尺寸的影响。对激光淬火、感应淬火、激光-感应复合淬火 3 种淬火方式下的晶粒度、显微组织和显微硬度进行分析, 以进一步揭示激光-感应复合淬火的作用机制。

## 1 激光-感应复合淬火温度场模拟研究

### 1.1 激光-感应复合淬火物理模型

激光-感应复合淬火系统主要由感应加热模块、激光发生器、运动控制模块以及冷却模块构成。在各个系统协同作用下, 将激光光束和感应热源同时作用于试样表面, 使基体迅速加热至奥氏体化温度以上, 随后立即通过冷却迅速降温, 获得淬火所需的马氏体组织并细化晶粒<sup>[15]</sup>。感应-复合激光淬火工艺过程如图 1 所示。

实验材料为经调质处理的 42CrMo 钢, 主要成分见表 1, 试样尺寸为 100 mm×50 mm×50 mm。实验使用的激光器为德国 Laserline 公司制造的 LDF 系列连续输出光纤传导半导体激光器, 最大激光功率 6000 W, 激光波长范围 940~1090 nm, 矩形光斑长宽可调, 调节范围为 15~80 mm。使用超声波感应加热设备, 电源最大输出功率为 80 kW, 振荡频率可调。感应线圈由铜管线圈和导磁体组成, 可以满足各类复杂形状工件表面的连续感应淬火要求。

在电磁场分析中, 主要考虑材料的相对磁导率和相对电导率; 在固体传热分析中, 主要考虑材料的热导率、比热容和密度。在淬火过程中, 试样温

度达到 800 °C 以上后, 材料的物理性能会发生较大的变化, 必须考虑材料物性参数受温度变化的影响<sup>[16]</sup>。因此本研究使用英国 Sente Software 公司开发的专业材料性能模拟软件 Jmatpro 6.0 对所需的材料属性进行计算, 定义 42CrMo 钢的物性参数, 如图 2 所示。

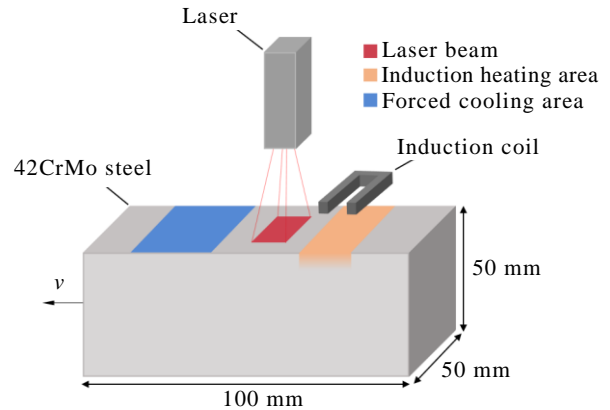


图 1 激光-感应复合淬火工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser-induction hybrid quenching process

表 1 实验用 42CrMo 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 42CrMo steel for experiment (ω/%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Ni	Fe
0.42	0.2	0.5~0.8	0.9~1.2	0.2	≤0.035	≤0.035	0.03	Bal.

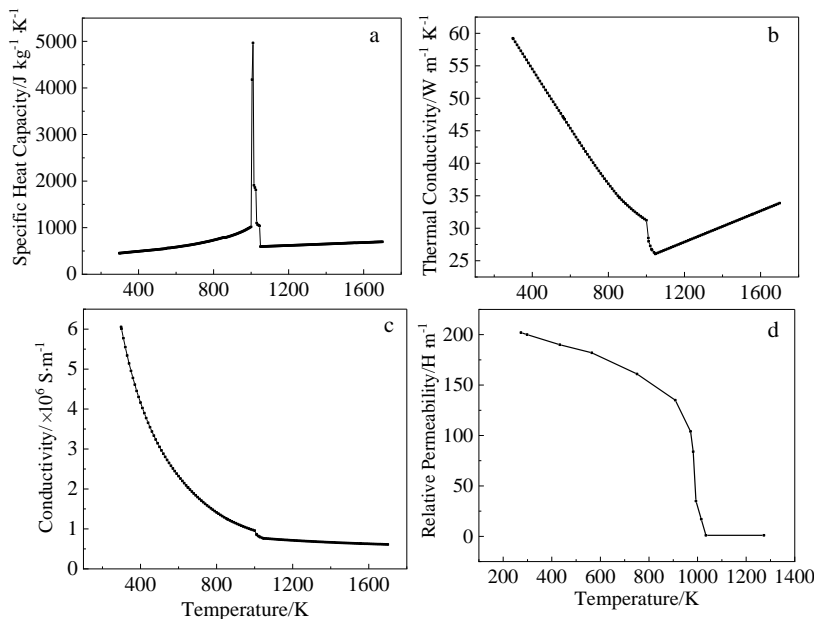


图 2 42CrMo 钢的物性参数

Fig.2 Physical parameters of 42CrMo steel: (a) specific heat capacity; (b) thermal conductivity; (c) conductivity; (d) relative permeability

## 1.2 复合淬火的有限元分析

COMSOL 软件以有限元法为基础, 通过求解偏微分方程组和双向实施耦合来实现真实物理现象的仿真和多物理场的耦合。本研究采用 COMSOL Multiphysics 5.5 软件对激光-感应复合淬火过程进行数值模拟。COMSOL 提供了基于麦克斯韦方程组控制的全耦合电磁场分析功能, 可用于二维和三维模型的电磁场分析<sup>[17]</sup>。其有限元方程为:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \\ \vec{E} = -\partial \vec{A} / \partial t \end{cases} \quad (1)$$

该方程用于感应线圈内的电磁场计算, 描述均匀各向同性材料的本构方程如下:

$$\begin{cases} \vec{J} = \sigma \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{cases} \quad (2)$$

电磁场产生的焦耳热由下式计算:

$$q_t = \frac{J^2}{\sigma} \quad (3)$$

式中,  $\vec{H}$  为磁场强度矢量,  $\vec{J}$  为电流密度矢量,  $\vec{B}$  为磁感应强度矢量,  $\vec{A}$  为矢量磁势,  $\vec{E}$  为电场强度,  $t$  为时间,  $\sigma$  为电导率,  $\mu$  为磁导率,  $q_t$  为瞬时焦耳热。

激光淬火以固体传热的形式实现, 且不考虑流动产热、压力产热、粘性发热等。激光热源主要作用于材料表面, 其作用区域包括直接吸收激光能量的加热区域和试样导热引起的加热区域, 因此将激光能量以边界热源的形式输入<sup>[18]</sup>。

设定激光热流密度为 Flux, 光斑为平顶型矩形光斑且各点能量密度均相同, 定义平行激光行进方向长度为  $a$ , 垂直行进方向长度为  $b$ , 设定经黑化处理后的 42CrMo 表面吸光率  $e=0.8$ , 表面辐射散热系数  $\varepsilon=0.8$ , 试样内部仅存在热传导, 其热传导控制方程如下:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k\nabla T) = Q \quad (4)$$

式中,  $C$  为比热容,  $\rho$  为密度,  $T$  为温度,  $t$  为时间,  $k$  为导热系数,  $Q$  为热源强度。

激光热流密度 Flux 定义如下:

$$\begin{aligned} \text{Flux} &= \frac{P}{ab} \text{ if } (\text{abs}(x-vt) \leq a) \\ &\text{and } (\text{abs}(y) \leq b) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $P$  为激光热源功率,  $v$  为激光扫描速度。

在电磁感应热源的定义上, 根据实际工况施加感应线圈, 且线圈周围被导磁体覆盖, 通过调整感应电压的大小调整感应器输出功率。

在边界冷却条件的定义上, 设定整个物理场被

空气域所包围, 且试样与空气存在强制对流换热, 空气强制对流换热系数为  $h_0=100$ , 设置强制冷却区域为水流强制对流换热, 对流换热系数为  $h_1=5000$ , 并考虑表面对环境辐射。

则试样表面边界控制方程如下:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T-T_a) - \varepsilon\sigma(T-T_a) \quad (6)$$

式中,  $n$  为试样表面的外法向;  $h$  为相应对流换热系数;  $T_a$  为环境温度 (293.15 K);  $\sigma$  为玻尔兹曼常数, 其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

网格划分方面, 对试样采用六面体单元扫掠网格划分, 温度影响较小的部分选择常规大小的网格以减少计算时间。由于需要进行电磁场计算, 设定整个工作域被空气所包围, 选用四面体网格对其余域进行网格划分。为了提高计算精度同时将计算时间控制在合理范围内, 对试样表面的部分网格进行了局部细化<sup>[19]</sup>。

## 1.3 淬硬层几何特征的判断条件

钢的淬火是将钢加热到材料奥氏体化温度以上并保温一定时间, 再以大于其临界冷却速度的冷却方式进行冷却至材料  $M_s$  点以下, 以获得所需的马氏体组织, 因此在判断淬硬层硬度和深度时考虑淬火温度和冷却速度这 2 个主要参数<sup>[20]</sup>。

根据《热处理手册》<sup>[21]</sup>, 42CrMo 钢加热过程中奥氏体转变开始温度  $A_{c1}$  约为 730 °C, 奥氏体转变终了温度  $A_{c3}$  温度约为 800 °C。综合相关文献, 本研究选取 800 °C 为材料相变温度。文献[22]以大量钢种的 CCT 曲线为依据, 求出其临界冷却速度并计算各个元素之间相互影响下的临界冷却速度变化规律, 建立了线性回归方程, 如式 (7) 所示:

$$\begin{aligned} \lg v &= 4.5 - 2.7w(C) - 0.95w(\text{Mn}) - 0.18w(\text{Si}) \\ &\quad - 0.43w(\text{Ni}) + 0.38w(\text{Cr}) - 1.17w(\text{Mo}) \\ &\quad - 1.29w(C)w(\text{Cr}) + 0.33w(\text{Mo})w(\text{Cr}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $w(C)$ 、 $w(\text{Mn})$  等分别对应各元素的含量,  $\lg v$  为材料临界冷却速度。

通过计算得到 42CrMo 的临界冷却速度约为 -28 °C/s。上述条件在模型中表示如下:

$$(1400[^\circ\text{C}] > T \geq 800[^\circ\text{C}]) \cap \left( \frac{dT}{dt} \leq -28[^\circ\text{C}/\text{s}] \right) \quad (8)$$

式中,  $T$  为准稳态下试样表面温度,  $\frac{dT}{dt}$  为冷却速度。

## 1.4 模拟结果

选取合适的工艺参数进行复合淬火模拟: 随着试样不断移动, 淬火逐渐进入准稳态, 选取此准稳态下的某一时间点的温度场模型, 按照淬硬层几何

特征判断条件对非淬硬层区域进行过滤，得到温度场结果如图 3 所示。由于激光照射高温区存在“拖尾效应”，最高温度出现在光斑中心偏左的位置，试样表面在激光和感应线圈双热源作用下达到 1300 °C 以上，随后快速冷却，完成淬火过程。

### 1.5 模型验证

在模型指导下进行激光-感应复合淬火实验，采用线切割机将淬火后的试样沿横截面切割，制备金相试样。采用型号为 Zeiss Axio Imager 2 的光学显微镜和型号为 EVO-18 的扫描电子显微镜 (SEM) 进行组织分析；采用型号为 HMV-2 的全自动显微硬度计进行维氏硬度测试，采用 0.3 kg 的实验力，加载时间 10 s。

为验证模型中磁热耦合温度场可靠性，选取试样表面感应线圈正下方的特征点 1、点 2 进行温度验证，使用单一的电磁感应加热。将热电偶测温计焊接于探测点上，所用热电偶每秒记录 10 条温度数据，使用相同的工艺参数进行模拟，将实验测量结果和模拟结果进行比较，结果如图 4 所示。结果表明中心测温点 1、外侧测温点 2 的模拟结果与实际测温结果平均相对误差分别为 4.64% 和 6.49%，表明模拟所得温度场与实际结果一致性较高，该模型可以较好地反映电磁感应加热作用下试样表面的温度场变化。

为验证模型中激光热源温度场可靠性，选取试样表面激光光斑边缘点 3、点 4 进行温度验证，使用单一的激光热源加热，结果如图 5 所示。由于激光热源温度极高，为了防止焊点因高温熔化，测温点需距离激光扫描路径一定距离，将热电偶测温计焊接于探测点上。将实验测量结果与模拟结果进行对比，结果如图所示。测量得到的点 3、点 4 的平

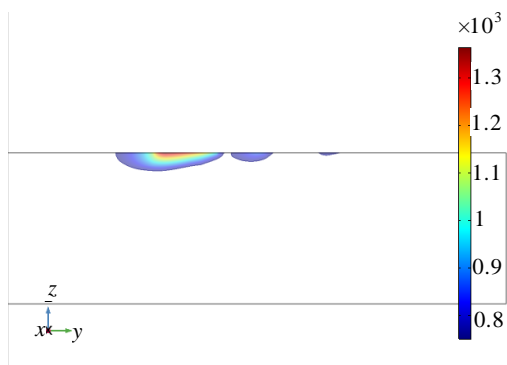


图 3 激光-感应复合淬火横截面温度场模拟结果

Fig.3 Simulation results of section temperature field in laser-induction hybrid quenching

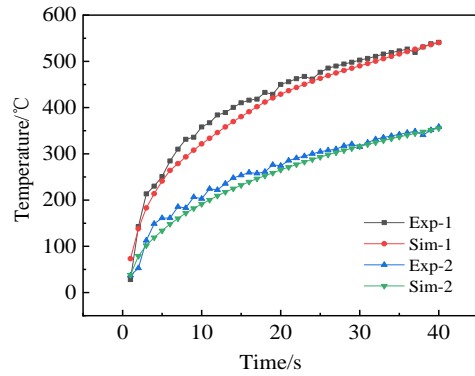


图 4 感应加热实验测温与模拟结果比较

Fig.4 Temperature comparison between experiment and simulation results in induction heating

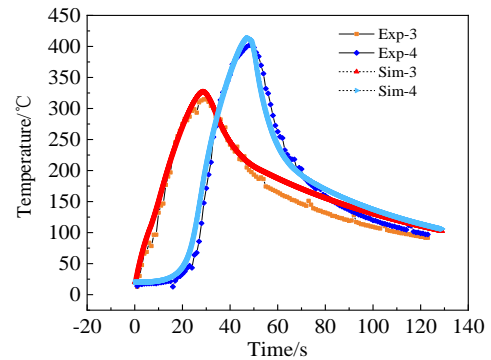


图 5 激光加热实验测温结果与模拟结果比较

Fig.5 Temperature comparison between experiment and simulation results in laser heating

均相对误差分别为 13.04%、12.62%，表明模拟所得温度场与实际结果一致性较高，该模型可以较好地反映激光加热作用下试样表面的温度场变化。

以所建立的数值模型为指导，选取与模型相同的工艺参数进行复合淬火实验，得到淬硬层横截面形貌如图 6 所示。淬硬层形貌为“平底形”，相较于单一激光淬火“月牙形”形貌更为均匀<sup>[23]</sup>。为保证实验结果准确性，对于试样共进行 3 次硬度测试取其平均值，结合金相法测定淬硬层深度为 5.3 mm。



图 6 复合淬火横截面形貌

Fig.6 Morphology of cross section hardened layer by hybrid quenching

为了进一步验证模型的准确性，将模拟所得的淬硬层曲线与实验所得曲线在 Origin 绘图软件中进行比较，如图 7 所示。选取淬硬层中心为横坐标原点，试样表面为纵坐标起点，建立直角坐标系。比较模拟结果和实验结果淬硬层深度差值，计算可得深度结果平均相对误差为 4.47%，表明模拟结果可以较好地反映实验所得淬硬层形貌，该模型准确可靠。

## 2 淬硬层几何特征研究

### 2.1 复合淬火与单一淬火淬硬层几何特征与温度场比较

选择相同的工艺参数对复合淬火、单一激光淬火和单一感应淬火进行数值模拟，比较其淬硬层几何特征，如图 8 所示。在单一激光淬火中，激光的最大功率是决定加工效率的重要因素，激光淬火扫描速度往往受限于设备功率而无法继续提高<sup>[24]</sup>；单一感应淬火可能受到设备功率不足、热输入量过大、材料冷却速度过慢等影响，工件易变形开裂<sup>[25]</sup>。

在实际热处理过程中，不仅要保证淬硬层具有一定的深度和硬度，同时还希望在满足力学性能要求的同时尽可能地提高加工效率、减少变形、避免开裂<sup>[26]</sup>。相较于 2 种单一热源作用，复合淬火可以有效提高试样表面淬火温度，从而提高淬硬层宽度

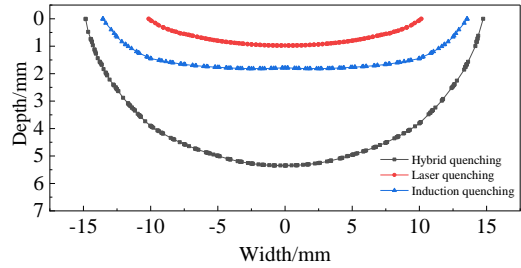


图 8 3 种淬火方式淬硬层形貌

Fig.8 Morphologies of hardened layer by three quenching methods

和深度，弥补单一激光淬火激光功率不足和单一感应淬火热输入过大、容易出现变形与裂纹等缺点，当设备功率受限时，复合淬火可以在提高扫描速度的同时保证淬硬层深度，从而提高加工效率。

图 9 为 3 种淬火方式在极限淬火温度下，试样沿深度方向上温度随时间变化曲线，设试样表面坐标为  $y=0$ ，深度方向为  $y$  轴正方向，取  $y=0, 1, 2, 3, 4, 5$  mm 这 6 个特征点。感应加热具有一定集肤深度，且沿深度方向上温度梯度更小；激光淬火和复合淬火都使得材料表面温度接近熔点，而复合淬火在 2 种热源共同作用下，更多的热量得以传递到试样表面更深处，减缓激光加热时的温度梯度，使得表面更深处能被加热到奥氏体化温度以上，大大提高淬硬层的深度。

### 2.2 扫描速度对淬硬层几何特征的影响

在激光-感应复合淬火中，扫描速度的快慢是决定加工效率、淬硬层深度及几何特征的重要因素。为探究其中影响规律，控制其他工艺参数不变，改变扫描速度  $v$  进行数值模拟，绘制所得到的淬硬层形貌，其结果如图 10 和图 11 所示。

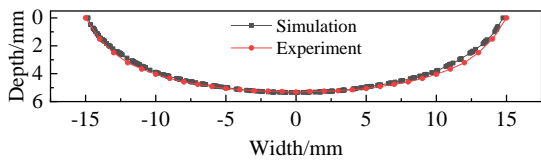


图 7 复合淬火实验所测淬硬层曲线与模拟结果比较

Fig.7 Comparison of hardened layer sketch between experiment and simulation results in hybrid quenching

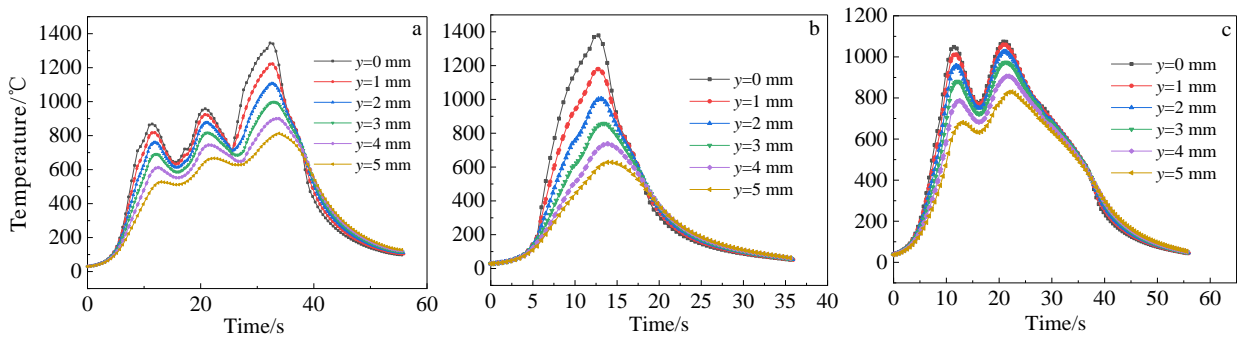


图 9 3 种淬火方式试样中部沿深度方向温度随时间变化曲线

Fig.9 Temperature versus time curves along the depth direction in the middle part of samples by hybrid quenching (a), laser quenching (b) and induction quenching (c)

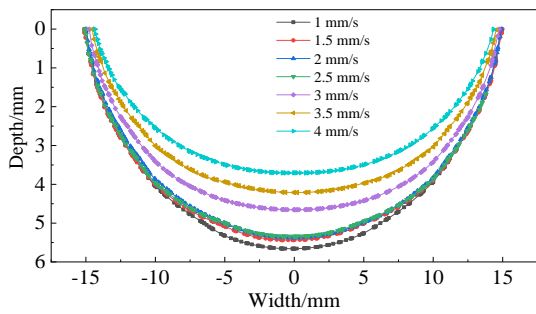


图 10 不同扫描速度下硬化层形貌

Fig.10 Morphologies of hardened layer at different scanning rates

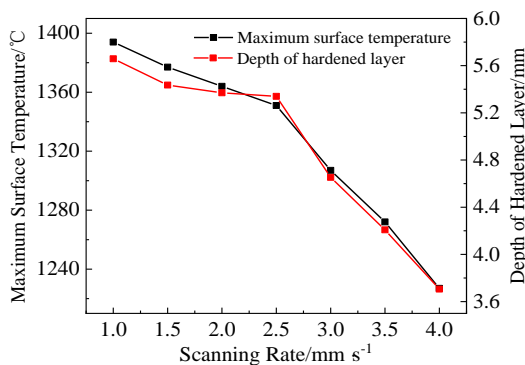


图 11 扫描速度对复合淬火表面温度和硬化层形貌的影响  
Fig.11 Effect of scanning rate on surface temperature and hardened layer morphology of hybrid quenching

随着扫描速度增加，淬硬层表面温度和深度逐渐减小，且当扫描速度在 1~2.5 mm/s 之间，减幅较小；而扫描速度超过 2.5 mm/s 后，表面温度和深度骤减。这是由于扫描速度越快，单位面积热输入量越少，表面平均温度降低使得更少的区域达到奥氏体化温度，淬硬层深度减小。从图 11 中可以看出，随着扫描速度的提高，淬硬层深度和试样表面最高温度逐渐减小且趋势相近。当试样表面超过 800 °C 后，由于温度到达居里点，其相对磁导率急剧下降，感应加热效率下降，此时感应加热温度对扫描速度敏感性降低；同时，当扫描速度较低时，表面温度接近熔点，此时对流散热效率达到最高，表面温度对扫描速度敏感性降低，因此很难通过减小扫描速度来进一步提高淬硬层深度。综上所述，对于 42CrMo 钢材料的复合淬火来说，在该实验条件下，2.5 mm/s 左右是较为适合的扫描速度，其保温时间可以确保热量传递到试样表层深处，同时兼顾一定的加工效率。

### 2.3 光斑尺寸对淬硬层几何特征的影响

在对重载工况下工件表面进行热处理时，希望获得深度更深、分布更均匀的“平底形”淬硬层形貌。设定激光光斑扫描方向上的长度为  $a$ ，垂直于扫描方向上的宽度为  $b$ ，控制激光功率密度不变，即激光功率和光斑面积不变，以光斑宽度  $b$  为变量进行模拟，将得到的淬硬层形貌进行绘制，如图 12 所示。

为了更加准确地描述淬硬层均匀性，引入淬硬层均匀系数  $R$ <sup>[24]</sup>，其表征意义如图 13 所示，其值为淬硬层月牙形淬硬区面积与包围淬硬层最小矩形的面积之比，均匀性系数  $R$  越大，表明淬火所得到的淬硬层越均匀，即

$$R = \frac{S_1}{S} = \frac{S_1}{LH} \tag{9}$$

其中， $S_1$  为淬硬层横截面面积， $S$  为包围淬硬层最小矩形的面积， $L$ 、 $H$  分别为矩形的长和宽。

利用图像处理软件 Image-Pro Plus 6.0 对截取的图像进行均匀性系数计算，绘制淬硬层宽度、淬硬层深度及均匀性系数随光斑宽度  $b$  的变化曲线如图 14 所示。随着光斑宽度的增大，淬硬层宽度增加，深度逐渐减小，淬硬层均匀性先增加后降低。这是由于光斑宽度决定了试样表面受激光辐照的宽度，

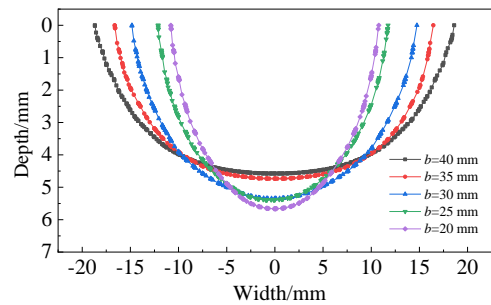


图 12 不同光斑宽度对淬硬层形貌的影响  
Fig.12 Effect of different laser spot width ( $b$ ) on the morphology of hardened layer

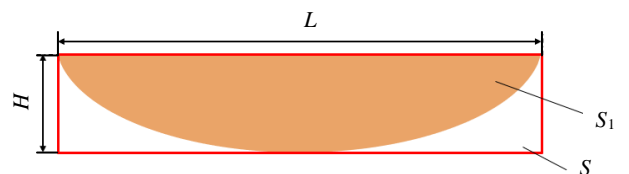


图 13 淬硬层均匀性系数的定义  
Fig.13 Definition of uniformity coefficient of hardened layer

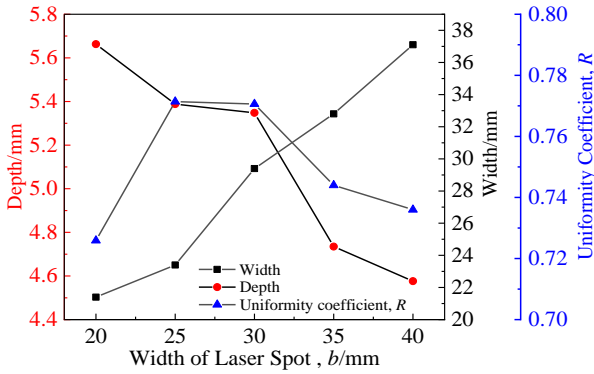


图 14 光斑宽度对淬硬层形貌及均匀性的影响

Fig.14 Effect of laser spot width on morphology and uniformity of hardened layer

当辐照宽度增加时, 淬硬层的宽度也会随之增大, 而此时行进方向上的长度减小, 单位面积上的激光辐照时间减小, 导致单位面积内的热输入总量减少, 淬硬层的深度降低。总体来看, 淬硬层深度随光斑宽度的变化影响较小, 且在在各光斑宽度下淬硬层均匀性系数均在 75%左右, 而单一激光淬火淬硬层均匀性系数仅在 55%左右。为了提高加工效率, 需要在保证一定淬硬层深度的情况下尽可能增大光斑宽度, 因此选择光斑宽度在 25~30 mm 之间较为合适, 可以在保证淬硬层深度的前提下提高加工效率, 同时具有良好的淬硬层均匀性。

### 3 淬硬层组织研究

#### 3.1 淬硬层奥氏体晶粒大小分析

采用晶粒度腐蚀剂分别对激光淬火、感应淬火和复合淬火试样进行晶粒腐蚀, 在光学显微镜下沿淬硬层深度方向进行奥氏体晶粒度测定, 采用《GB/T 6394-2017 金属平均晶粒度测定方法》中所规定的截点法进行测量, 其晶粒尺寸变化规律如图 15 和图 16 所示。激光淬火和复合淬火表面晶粒粗大, 复合淬火表面平均晶粒直径达到了 251 μm, 且晶粒大小沿深度方向从 2 级至 9 级梯度过渡, 越靠近热影响区晶粒越细, 激光淬火晶粒度从 3 级至 9 级梯度过渡。感应淬火的晶粒则相对均匀, 淬硬层平均晶粒直径为 17 μm, 晶粒度为 8 至 9 级。这是由于激光热源可以视为一种面热源, 加热时具有较大的温度梯度, 表层温度高且保温时间长导致晶粒粗大; 而感应热源可以视为体热源, 具有一定的集肤深度, 深度方向上温度梯度更小, 且由于材料温度到达居里点后感应加热效率降低, 不易过热, 因

此淬硬层的晶粒大小更加均匀。复合淬火的晶粒变化趋势与激光淬火更为相似, 进一步说明激光淬火在复合淬火中起着主导作用。

#### 3.2 淬硬层硬度分析

采用维氏硬度计分别对单一激光、单一感应和复合淬火的试样进行硬度测试, 结果如图 17 所示。复合淬火淬硬层深度达到 5.3 mm, 平均硬度 (HV<sub>0.3</sub>) 为 7722 MPa, 激光淬火淬硬层深度为 3.6 mm, 平均硬度 (HV<sub>0.3</sub>) 为 7369 MPa, 感应淬火淬硬层深度为 4.4 mm, 平均硬度 (HV<sub>0.3</sub>) 为 7212 MPa。复合淬火同时结合了感应淬火和激光淬火的优点, 在大幅提升淬硬层深度的同时大幅提高了淬硬层的平均硬度。尽管感应淬火硬度均匀性较好, 但整体硬度低于复合淬火和激光淬火, 这可能是因为感应淬火热输入量大, 温度梯度小, 热影响区域大, 淬火冷却速度较慢导致马氏体含量降低, 对硬度产生较大影响。

#### 3.3 淬硬层显微组织形貌

通过扫描电镜对 3 种淬火方式试样的淬硬层进行观察, 其显微组织形貌如图 18 所示。淬硬层可大致分为表面过热区、中部淬硬区和底部过渡层, 将复合淬火与激光淬火各区域组织进行对应比较。结合晶粒度曲线图比较图 18a 和 18d 可知, 为获得更深的淬硬层, 试样表面被加热至接近熔点, 过热会导致表面脱碳和氧化, 复合淬火和激光淬火试样上表面均为板条状马氏体, 且复合淬火所获得的马氏体晶粒更为粗大。这是由于在复合淬火中, 感应输入的热量具有一定保温作用, 材料表面保持相变温度 Ac<sub>3</sub> 以上的时间是激光淬火的 3~5 倍, 促进了碳原子的扩散和迁移, 加速了奥氏体均匀化, 表层形

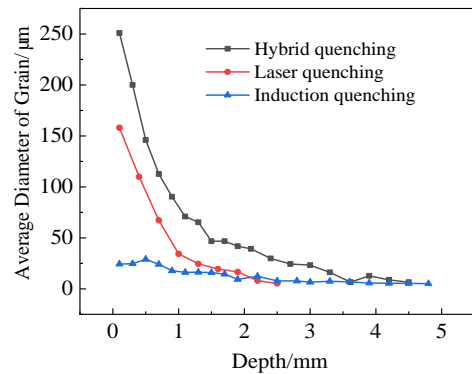


图 15 3 种淬火方式淬硬层沿深度方向平均晶粒直径对比  
Fig.15 Comparison of average grain diameter of hardened layer along depth direction by three quenching methods

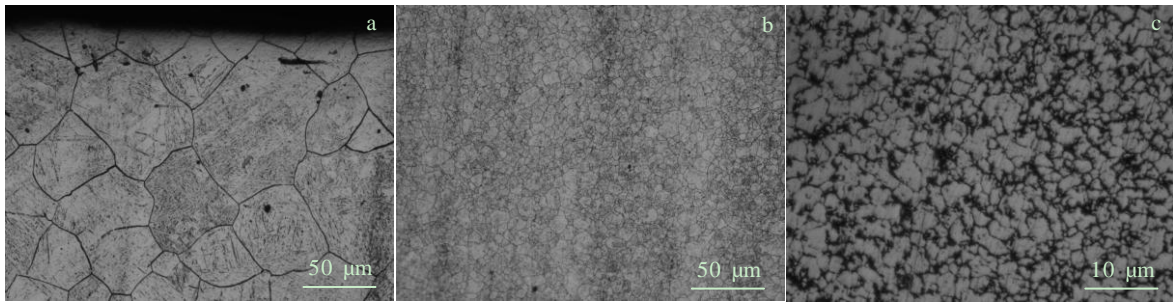


图 16 激光-感应复合淬火表层晶粒尺寸金相图

Fig.16 Metallographic diagrams of grain size in laser-induction hybrid quenching: (a) surface of hardened layer; (b) 1.5 mm from surface; (c) transition zone of hardened layer (5 mm from surface)

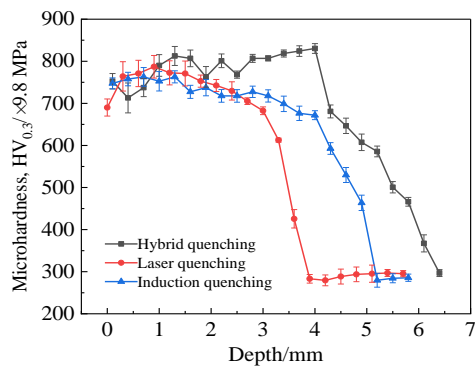


图 17 3 种淬火方式淬硬层沿深度方向显微硬度对比

Fig.17 Comparison of microhardness of hardened layer along depth direction by three quenching methods

成的粗状马氏体会对耐磨性产生影响，应机加工去除。通过比较图 18b 和 18e 可以看出，复合淬火淬硬区与激光淬火十分相似，可以获得晶粒度 3~4 级的高温马氏体且组织均匀，这种马氏体具有较高的耐磨性和强度。图 18c、18f 和 18i 为 3 种淬火淬硬层过渡层组织，由于该区域处于淬硬层边缘，加热温度在相变温度  $A_{c1}$  和  $A_{c3}$  之间，回火索氏体在保温时间内未能完全奥氏体化，因此该区域组织主要由板条马氏体、残余奥氏体、未溶解的碳化物和回火索氏体组成，且越靠近基体马氏体的含量越少，硬度越低。从图 18g 和 18h 中可以看出，感应淬火淬硬层组

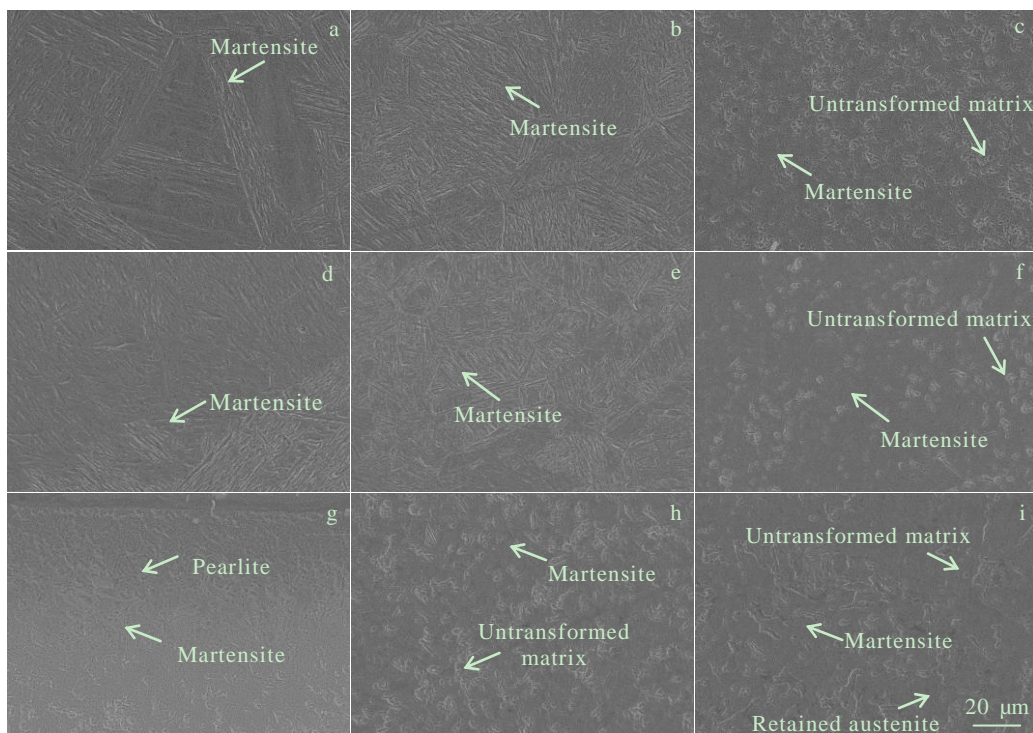


图 18 3 种淬火方式淬硬层显微组织

Fig.18 Microstructures of surface hardened layer (a, d, g), middle hardened layer (b, e, h), and transition layer (c, f, i) by hybrid (a~c), laser (d~f), and induction (g~i) quenching methods



织相对弥散, 这是由于感应淬火受磁性材料居里点影响, 温度相对较低, 冷却速度较慢, 在保温时间不足的情况下会有较多未转化的基体, 这会对材料的强度和硬度产生影响。

## 4 结 论

1) 模拟温度场与实测温度一致性较高, 淬硬层深度平均误差仅 4.47%, 建立的模型准确可靠。

2) 复合淬火相较于单一淬火有更高的表面温度, 可以提高淬硬层的深度。

3) 感应辅助加热可以减缓复合淬火中激光加热的温度梯度, 使得材料表面更深层被激光加热到材料奥氏体化温度以上, 大幅提高淬硬层深度和均匀性, 弥补单一淬火功率不足、加热不均等缺点。

4) 复合淬火晶粒度从表面沿深度方向从 2 级至 9 级梯度过渡。表面为过热生成的粗大板条状马氏体组织, 淬硬层为均匀的板条状马氏体, 过渡层由板条马氏体、残余奥氏体和回火索氏体组成。复合淬火的晶粒度和显微组织形态在深度方向上的变化趋势更接近激光淬火。激光淬火在复合淬火中起主导作用。复合淬火相较于 2 种单一热源淬火具有更大的淬硬层平均硬度。

## 参考文献 References

- [1] Han Jiahua(韩嘉华), Yan Wen(阎文), Cao Jinhua(曹进华). *Machinery Manufacturing*(机械制造)[J], 2017, 55(12): 85
- [2] Wu Zong(吴宗). *Coal Mining Machinery*(煤矿机械)[J], 2020, 41(10): 57
- [3] Guo L G, Wang F Q, Zhen P L *et al.* *Chinese Journal of Aeronautics*[J], 2019, 32(2): 531
- [4] Zhang S J, Yang M S, Lei T. *Materials Science Forum*[J], 2013, 2234(749): 484
- [5] Li Zhaokun(李昭昆), Lei Jianzhong(雷建中), Xu Haifeng(徐海峰) *et al.* *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2016, 28(3): 1
- [6] Su Hui(苏辉), Ma Bing(马冰), Yi Yinghui(依颖辉) *et al.* *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2011, 34(2): 84
- [7] Chen Z Y, Zhou G J, Chen Z H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 534: 536
- [8] Mart ínez Silvia, Lesyk Dmytro, Lamikiz Aitzol *et al.* *Physics Procedia*[J], 2016, 83: 1357
- [9] Basu A, Chakraborty J, Shariff S M *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2007, 56(10): 887
- [10] Xie Xuexing(谢学兴). *Machinist Metal Forming*(金属加工, 热加工)[J], 2013(S1): 124
- [11] Rong Linghua(戎玲华). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015
- [12] Lei Sheng(雷声). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010
- [13] Liu Jie(刘杰), Wang Cheng(王程), Zhong Jie(钟洁) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2018, 39(11): 58
- [14] Doležel I, Kotlan V, Hamar R *et al.* *Heat Treatment*(热处理)[J], 2015, 30(2): 14
- [15] Graf M, Kuntz M, Autenrieth H *et al.* *Applied Sciences*[J], 2020, 10(15): 5395
- [16] Gu Junjie(顾俊杰), Qing Youqiong(秦优琼), Chen Zhilin(陈志林) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2010, 39(22): 160
- [17] Biro O, Preis K. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 1989, 25(4): 3145
- [18] Yao Jianhua(姚建华). *Laser Surface Modification Technology and Application*(激光表面改性技术及其应用)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012
- [19] Li Tao(李涛), Zuo Zhengxing(左正兴), Liao Ridong(廖日东). *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2009, 45(6): 304
- [20] Jiang B, Wen X L, Zhou L Y *et al.* *Materials Science Forum*[J], 2015, 817: 109
- [21] Chinese Heat Treatment Society(中国机械工程学会热处理分会). *Heat Treatment Manual*(热处理手册)[M]. Beijing: China Machine Press, 2008
- [22] Zeng Qiyong(曾其英), Xu Kangyuan(徐康元). *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 1989(2): 12
- [23] Zhang Qunli(张群莉), Tong Wenhua(童文华), Chen Zhijun(陈智君) *et al.* *Surface Technology*(表面技术)[J], 2020, 49(1): 254
- [24] Sun P P, Li S X, Yu G *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 70(5-8): 787
- [25] Li Qilin(李奇林), Su Honghua(苏宏华), Xu Jiuhua(徐九华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(12): 3250
- [26] He Bolin(何柏林), Jiang Mingming(江明明). *Surface Technology*(表面技术)[J], 2016, 45(11): 180

## Geometric Characteristics and Microstructure of Laser-Induction Hybrid Quenching Hardened Layer on 42CrMo Steel

Tang Zehao<sup>1,2,3</sup>, Zhang Qunli<sup>1,2,3</sup>, Huang Hua<sup>1,2,3</sup>, Chen Zhijun<sup>1,2,3</sup>, Cao Junsheng<sup>4</sup>, Yao Jianhua<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

(2. Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

(3. Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment (National “2011 Plan”),  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

(4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** A new process of laser-induction hybrid quenching was adopted in this study, which combined the laser and electromagnetic induction heat source to improve the depth and uniformity of hardened layer of 42CrMo steel laser quenching. The COMSOL Multiphysics 5.5 software was used to analyze the evolution process of temperature field during hybrid quenching process of 42CrMo steel. The model was verified by quenching experiments and the simulated depth of hardened layer is in good agreement with the experimental one. The surface temperature and depth of hardened layer by the hybrid quenching, single laser quenching and single induction quenching were compared in the model, and the effects of different scanning speeds and laser spot sizes on the depth of hardened layer were analyzed. The depth, hardness, grain size and microstructure of hardened layer by hybrid quenching were analyzed by experiments. The results show that the hybrid quenching can effectively improve the surface quenching temperature of the workpiece, increase the width and depth of hardened layer, and make up for the shortage of the single laser quenching power. The optimal scanning speed and laser spot size of the hybrid quenching were predicted by the model. Compared with two single quenching processes, the change trend of grain size and microstructure in depth direction of the hardened layer by hybrid quenching is similar to that by laser quenching, but the average hardness of hardened layer is larger.

**Key words:** laser quenching; electromagnetic induction; 42CrMo steel; numerical simulation; geometric features; microstructure

---

Corresponding author: Zhang Qunli, Ph. D., College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, P. R. China, Tel: 0086-571-85290866, E-mail: zql@zjut.edu.cn