基于扫描振镜的激光淬火温度特性模拟与实验研究

陈凯烨[a,b]，王晔[a,b]，吴国龙[a,b]，王淼[a,b]，张群莉[a,b]，姚建华[a,b]

（浙江工业大学 a.激光先进制造研究院 b.高端激光制造装备省部共建协同创新中心，杭州 310023）

摘 要：目的 与传统激光淬火（CLQ）进行对比研究，获得使用飞行光路的振镜扫描式激光淬火（GLQ）的温度变化特性和规律。**方法** 使用两种淬火方式对 45 钢进行表面处理，将组织形貌和硬度分布进行比较，并结合数值模拟，研究两种激光淬火方式的温度变化特性和规律。**结果** 在相同的总能量输入、扫描区域和扫描时间下，两种淬火方式硬化层横截面形貌呈现巨大差异：CLQ 试样硬化层深度为 753.66 μm，宽度为 3787.21 μm，横截面形貌为“月牙形”；GLQ 试样硬化层深度为 256.61 μm，宽度为 5808.77 μm，形貌为“均匀性更好的近似月牙形”。截面硬度分布相似：均为中间主体区域高（GLQ 试样硬度 810~900HV，CLQ 试样硬度 790~830HV），两侧边缘区域低（均约为 760HV）。模拟结果表明，CLQ 试样特征点激光辐照时长共 1.25 s，温度从 508 ℃变为 1063 ℃，奥氏体相变时间为 1.17 s；GLQ 试样特征点激光辐照时长共 0.628 s，温度从 500 ℃变成 718 ℃，其波峰温度奥氏体相变时间为 0.38 s，波谷温度均保持在马氏体转变温度以上。沿激光扫描方向，GLQ 的温度变化率比 CLQ 大 1 个数量级；垂直激光扫描方向，GLQ 温度变化率比 CLQ 大 2 个数量级。**结论** GLQ 具有温度变化率更大、升降温多次循环、热处理相变时间更短、热积累更小等特点，有望在薄层大面积淬火上获得应用。

关键词：激光淬火；振镜扫描；温度场；数值模拟；相变；45 钢

中图分类号：TG156.33 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2020)05-0251-08

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.030

Simulation and Experiment of Laser Quenching Temperature Characteristics Based on Galvanometer Scanning

CHEN Kai-ye[a,b], *WANG Ye*[a,b], *WU Guo-long*[a,b], *WANG Miao*[a,b], *ZHANG Qun-li*[a,b], *YAO Jian-hua*[a,b]

(a.Institute of Laser Advanced Manufacturing, b.Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

ABSTRACT: The work aims to study characteristics and mechanism of temperature variation in the process of the galvanometer-based laser quenching (GLQ) with laser on fly by comparing the conventional laser quenching (CLQ). The surface of 45 steel

收稿日期：2019-10-22；**修订日期：**2020-03-29

Received: 2019-10-22; **Revised:** 2020-03-29

基金项目：国家重点研发计划课题（2018YFB0407301）；国家自然科学基金（51975533）；省属高校基本科研业务费项目（RF-C2019003）

Fund: Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFB0407301), National Natural Science Foundation of China (51975533), the Fundamental Research Funds for the Provincial Universities of Zhejiang (RF-C2019003)

作者简介：陈凯烨（1995—），男，硕士研究生，主要研究方向为材料表面改性及防护。

Biography: CHEN Kai-ye (1995—), Male, Master, Research focus: surface modification and protection of materials.

通讯作者：吴国龙（1983—），男，博士，讲师，主要研究方向为材料表面改性及防护。邮箱：glwu@zjut.edu.cn

Corresponding author: WU Guo-long (1983—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: surface modification and protection of materials. E-mail: glwu@zjut.edu.cn

引文格式：陈凯烨，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 Kai-ye, WANG Ye, WU Guo-long, et al. Simulation and experiment of laser quenching temperature characteristics based on galvanometer scanning[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 251-258.

was treated by two quenching methods and the morphology and hardness distribution were compared. Combined with numerical simulation, the characteristics and mechanism of temperature variation by two quenching methods were studied. There was large difference in the cross-sectional morphology of the hardened layers by two quenching methods under the same total energy input, scanning area and scanning time. The thickness and width of the hardened layer of CLQ sample were 753.66 μm and 3787.21 μm respectively. The thickness and width of the hardened layer of the GLQ one were 256.61 μm and 5808.77 μm respectively. Meanwhile, the hardened area of GLQ sample presented "approximating crescent shape with better uniformity" looks, while the other one presented "crescent" looks. From the cross-section hardness, the hardness distribution of the two samples was similar, which was high in the middle body zone (hardness of sample treated by GLQ was 810~900HV and that of CLQ sample was 790~830HV) and low in the edge zones (about 760HV). From the simulated results, it took 1.25 s for the temperature of CLQ sample to change from 508 ℃ to 1063 ℃ at the feature point during the laser irradiation process and the austenite transformation was 1.17 s, while it took 0.628 s for the temperature of the other to change from 500 ℃ to 718 ℃ at the same feature point and the time of peaks temperature above the austenite transformation was 0.38 s and the troughs temperature was kept above the martensite transformation temperature. Along the laser scanning direction, the temperature change rate of GLQ was one order of magnitude higher than that of CLQ, perpendicular to the laser scanning direction. The temperature change rate of GLQ was two orders of magnitude higher than that of CLQ. GLQ has the characteristics of greater temperature change rate, multiple cycles of heating and cooling process, shorter heat treatment time for phase transitions, as well as less heat accumulation. Therefore, it is expected to be used in thin-layer and large-area quenching.

KEY WORDS: laser quenching; galvanometer scanning; temperature field; simulation; phase transformation; 45 steel

激光淬火技术是一种具有生产效率高、无需淬火介质、对环境无污染、变形小等独特优点的绿色表面强化技术，金属零件经表面激光淬火强化处理后，其表面硬度、耐磨性及耐蚀性均可获得较大的提高[1]。目前，研究人员已对激光淬火的工艺参数影响[2-3]和数值模拟仿真进行了大量的研究[4]，通过参数敏感性规律[5]和预测模型，提出了优化工艺参数[6]，获得较好的淬火效果，达到控制相变硬化质量的目的[7]。但是，当前激光淬火的研究主要使用固体激光、CO_2 激光和半导体激光，一般将激光头与机器臂或机床相连，通过控制机器臂或机床调整光路，使激光束按照规划的路径依次对工件激光强化。当待处理区域形状复杂时，激光淬火需要使用配套的运动控制系统，从而在激光加工过程中不断进行精确的调整，这导致了复杂区域激光淬火的高成本和低效率问题。而在振镜扫描式激光淬火（GLQ）中，由于其利用飞行光路技术，能快速精准地控制激光光路，并且使用计算机图形软件对图形进行处理，能快速绘制不同矢量图形，能很好地完成复杂表面的激光淬火热处理，解决复杂区域激光淬火热处理的成本问题。同时，振镜系统更长的工作距离（通常高于 200 mm）允许远离待处理区域工作，使得工件体积限制更小，能完成远距离复杂曲面的激光热处理。

此外，在传统激光淬火（CLQ）中，激光束尺寸限定了待硬化区域的宽度，没有修改激光束尺寸的可能性。当淬火区域宽度大于光斑直径时，需要将激光淬火硬化带进行搭接，此时搭接处存在高温回火软化现象[8]，对此有学者建立搭接区硬度的预测模型来减小回火软化的影响[9]，但该现象的出现始终难以避免[10]。而 GLQ 技术通过控制软件，改变扫描区域的宽度，并通过改变光束运动轨迹、扫描速度、激光功率、线间距等参数，来调整激光能量密度在处理区域中的分布。因此，振镜扫描式淬火方式更具有柔性。

作为一项新颖独特的技术，GLQ 技术相关文献较少，目前已有的文献主要侧重于工艺和形貌研究。贺长林[11]对 45 钢和 40Cr 进行 GLQ 处理，验证了 GLQ 方式的可行性，但并未深入分析。Martinez 等[12-13]对 GLQ 过程中 45 钢表面的温度变化进行了实验研究，认为该方式能很好地控制淬火过程中的表面质量，硬化层均匀性更好，热变形也较小，但并未进一步对温度变化特性和独特的截面形貌进行深入分析。郑寅岚[14]通过规划扫描单元进行 GLQ 处理，通过叠加扫描单元增加硬化层深度，并通过数值模拟对扫描单元不同叠加次数进行研究，但只进行了不同叠加单元的温度场对比，并未对扫描过程中温度场的变化特征进行分析。

本文以 45 钢为研究对象，采用 GLQ 方式进行实验研究，并使用 COMSOL 软件建立与实验相符的温度场仿真模型，研究了 GLQ 过程中独特的温度场变化规律，并与 CLQ 进行了对比研究，发现温度变化特性对截面形貌、硬度分布等均具有重要影响。

1 实验和模拟

1.1 实验

采用 CLQ 方式和 GLQ 方式分别对试样表面进行淬火处理，其扫描原理和扫描区域如图 1 所示。振镜式激光实验平台包含光路控制系统、水冷装置、激光器等。激光器为 IPG 振镜式连续光纤激光器，额定功率 500 W，激光波长为 1060~1090 nm，焦点处光斑

直径为 120 μm。光路控制系统能绘制不同图形，通过控制振镜的偏转，达到控制光路的目的。在 30 mm×5 mm 区域内进行 GLQ 处理，实验工艺参数为：功率 500 W，扫描速度 100 mm/s，线间距 0.2 mm，负离焦 40 mm。对比实验为 CLQ 实验，激光器为半导体激光器，最高激光输出功率为 6 kW，光斑为圆形光斑，直径 5 mm。激光束位置由机械臂等运动机构控制，为保证相同扫描区域和能量输入，设计对比实验工艺参数为：激光功率 500 W，扫描速度 4 mm/s。两种淬火实验材料均为 45 钢。通过线切割将获得的淬火试样沿短边进行切割取样，将样品镶嵌后，分别用 240、400、800、1200、2000 目砂纸粗精磨，再用试样抛光机进行抛光。试样经清洗后，用 4%硝酸酒精溶液腐蚀。用 ZEISS 光学显微镜（OM）对显微组织进行观察，运用 RigakuUltima IV 型 X 射线衍射仪（XRD）进行物相表征，用 HMV-2TADWXY 型自动式维氏硬度计进行硬度测试。

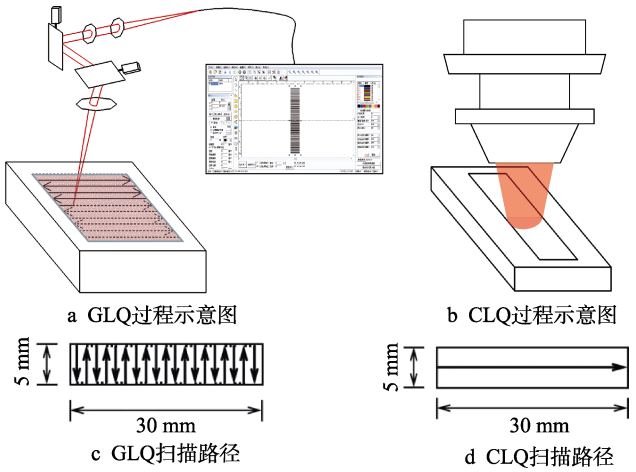

图 1　两种激光淬火方式示意图及扫描路径示意图
Fig.1 Schematic diagram (a) and scanning path (c) of GLQ, schematic diagram (b) and scanning path (d) of CLQ

1.2　模拟

在 COMSOL 软件上对两种激光淬火方式进行模拟，基板尺寸设定为 60 mm×30 mm×10 mm，在表面选取 30 mm×5 mm 区域作为激光淬火区域，并进行网格加密，有限元模型如图 2 所示。材料的热物性是关于温度和组织成分的函数，在激光淬火过程中，包含极大温度跨度和组织成分变化。为了仿真模拟模型得到更精准的结果，需要建立热物性关于温度的函数，热物性参数通过 JMatPro 计算获得，以插值函数形式导入 COMSOL，图 3 为计算得出的 45 钢热物性参数。45 钢密度为 7840 kg/m^3，熔点为 1493~1530 ℃。

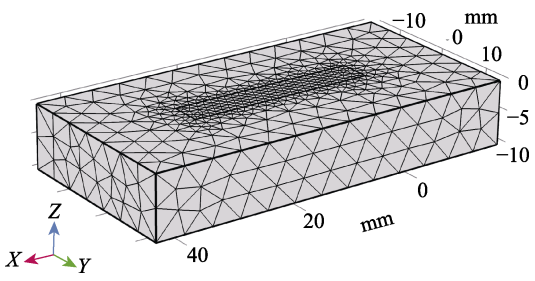

图 2　有限元几何模型建立和网格划分
Fig.2 Establishment of finite element geometric model and mesh generation

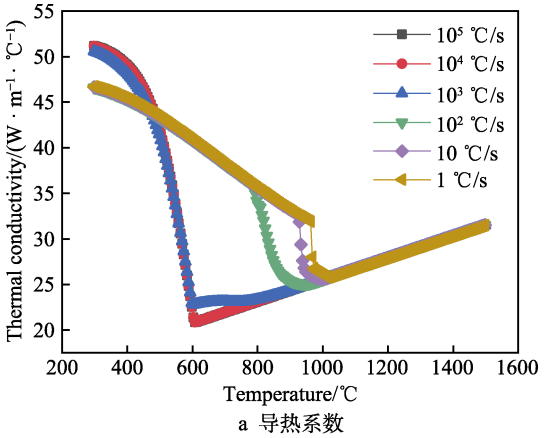

图 3　材料热物性参数
Fig.3 Thermal properties of material: a) thermal conductivity; b) specific heat

建立两种激光淬火方式的热源模型。$q_1(x,y)$为 GLQ 的高斯热源模型，满足公式（1）；$q_2(x,y)$为 CLQ 的均匀热源模型，满足公式（2）。

$$\begin{cases} q_1(x,y)=\dfrac{2PA_1}{\delta\pi r_1^2}\mathrm{e}^{-\frac{2\left[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\right]}{\delta r_1^2}} \\ x_0(t)=s\cdot\mathrm{int}\left(\dfrac{tv}{b+s}\right) \\ y_0(t)=\left(\dfrac{-b}{2}+vt_1\right)\cdot\left(0\leqslant t_1<\dfrac{b}{v}\right)+\dfrac{b}{2}\cdot\left(\dfrac{b}{v}\leqslant t_1<\dfrac{b+s}{v}\right)+ \\ \quad\left(\dfrac{3b}{2}-vt_1+s\right)\cdot\left(\dfrac{b+s}{v}\leqslant t_1<\dfrac{2b+s}{v}\right)+ \\ \quad\dfrac{-b}{2}\cdot\left(\dfrac{2b+s}{v}\leqslant t_1<\dfrac{2b+2s}{v}\right), \\ t_1=t-k\dfrac{2b+2s}{v},k=0,1,2,\cdots,\mathrm{int}\left(\dfrac{a}{2s}\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中，P 为激光功率，A_1 为激光吸收率，δ 为离焦后光斑放大倍数，r_1 为焦点处光斑半径，x_0、y_0 为光斑中心位置，s 为线间距，v 为激光扫描速度，a 为扫描区域长边，b 为扫描区域短边。

$$q_2(x,y)=\frac{A_2P}{\pi r_2^2}\left(\left((x-v_2t)^2+y^2\right)\leqslant r_2^2\right) \tag{2}$$

式中，P 为激光功率，A_2 为激光吸收率，r_2 为光斑半径，v_2 为激光扫描速度。

本文将激光作为一种载能流，将其对模拟件的热作用看作是一种外加的热通量 q，即在三维模型试样的激光扫描区域满足第二类边界条件：

$$q=-k\frac{\partial T}{\partial n} \tag{3}$$

式中，q 为边界输入的热通量，$\partial T/\partial n$ 为 n 方向温度偏导数，k 为材料的导热系数。

在直角坐标系中，激光作用过程的三维导热微分方程为：

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=k\nabla^2T+Q(x,y,z,t) \tag{4}$$

式中，c 为比热容，k 为导热系数，$Q(x,y,z,t)$为相变潜热。由于热物性参数比热容为随温度变化的函数，已经包含了相变潜热带来的影响，因此模拟中此项为零。

材料设为各项同性，初始环境温度设定为 20 ℃。为了简化模拟分析，相变产生的体积变化、热变形等热物理过程未被纳入有限元模拟。激光淬火过程中金属材料的 Ac_1 线有所上升，相变温度大约比平衡态下高 50~200 ℃。本文旨在通过模拟研究 GLQ 过程中的温度变化特征，并与 CLQ 进行对比，Ac_1 线的高低并不会对热传导的特征产生影响，因此参考相关文献[15]，将两个模型的相变温度定为同一数值 850 ℃。

2　结果与分析

2.1　横截面形貌比较和温度场模型对比

45 钢试样经过激光扫描（扫描区域均为 30 mm×5 mm），其金相组织如图 4 所示。GLQ 试样（图 4a）

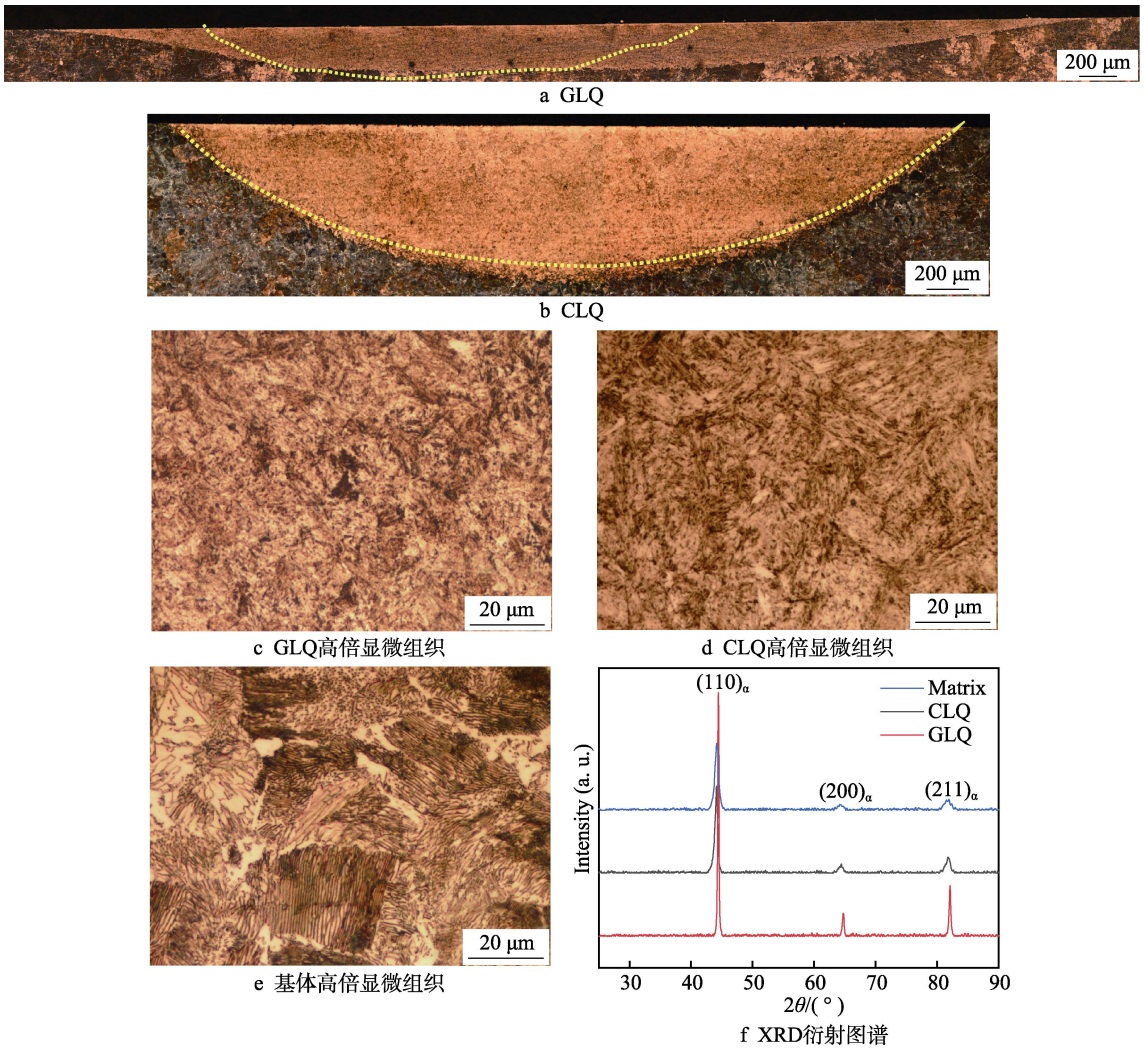

图 4　横截面淬火组织形貌和 XRD 衍射图谱

Fig.4 Microstructure and XRD diffraction pattern of cross section by quenching: a) GLQ; b) CLQ; c) high power microstructure of GLQ; d) high power microstructure of CLQ; e) high power microstructure of matrix; f) XRD diffraction pattern

为“均匀性更好的近似月牙形”，CLQ 试样（图 4b）的硬化层形貌为“月牙形”。与 CLQ 试样硬化层的深度（753.66 μm）和宽度（3787.21 μm）相比，GLQ 试样硬化层深度（256.61 μm）更浅，宽度（5808.77 μm）更宽。45 钢基体显微组织（图 4e）为珠光体加铁素体，经激光淬火后，两者组织（图 4c、d）主要为细化的板条状马氏体。这是由于 45 钢在激光束的快速加热作用下，迅速升温达到 45 钢的相变点，进而奥氏体化，因为加热和冷却的速度非常快，使超细晶奥氏体来不及长大，急冷过程中，组织细化，形成高位错密度马氏体。通过对比可以发现，GLQ 马氏体组织相比 CLQ 略有细化，这是由于 GLQ 淬火过程中冷却速率更大。由图 4f 可知，45 钢基体和淬火试样三者 X 射线衍射峰重合，相组成主要为 α-Fe 相，分别对应为基体组织中的铁素体和珠光体里的铁素体，以及淬火试样组织中的马氏体。另外，XRD 衍射图谱中并未观察到淬火试样有残余奥氏体的存在。

CLQ 的热传导如图 5b 所示，光斑中心处热传导方向主要沿深度方向，因此中心处相变区比较深，硬化层深度相对较深。而随着远离光斑中心，热传导方向发生偏转，横向传递的热量越来越大，使热量严重散失，纵向传递的热量越来越小，相变区逐渐变浅，这使得硬化层越来越浅。在靠近光斑边缘位置，由于热传导导致热量损失，使得该区域无法达到相变温度，因此实际相变区域宽度要小于光斑直径。GLQ 的热传导如图 5a 所示，任意时刻光斑位置热传导类似 CLQ，奥氏体化区域为中间深、两边浅，同时由于激光束扫描具有连续性，上一时刻的奥氏体化区域与下一时刻的奥氏体化区域存在连续的变化过程，因此最后获得的硬化层区域可以认为是这些区域的叠加。

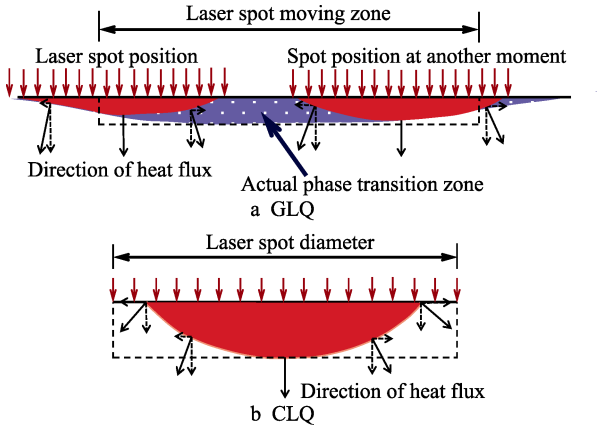

图 5　热传导对横截面形状的影响

Fig.5 Effect of heat conduction on shape of cross section

将横截面 850 ℃温度线（图 4a、b 中黄色虚线）提取出来放入横截面，进而对有限元模拟结果和实验结果的准确性进行比较验证，模拟的横截面温度场如图 6 所示。验证表明，模拟结果与实验结果相符，这能在一定程度上反映两种激光淬火方式的温度变化特征。

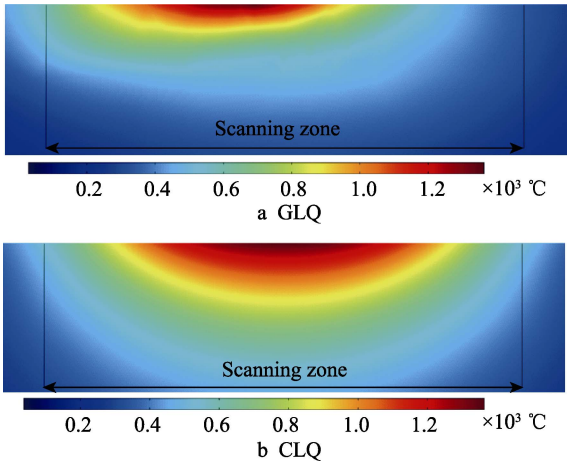

图 6　横截面温度场(t=5.85 s)

Fig.6 Temperature field distribution of cross section (t=5.85 s)

2.2　两种激光淬火的温度变化特性

如图 7 所示，GLQ 模型上选取了往复扫描过程中的某一单道扫描。可以发现，该单道扫描过程中，峰值温度先增加后减小，这可能是由于热积累以及散热共同作用的结果。由于光斑尺寸比扫描间距大一个数量级，因此可以将这一道激光扫描的位置和前一道扫描的位置认为在同一个位置。该单道扫描开始位置距离前一次被扫描的时间相对较短，热量损失较少，可以认为热积累占主要地位，热损耗处于次要地位，因此峰值温度持续上升。随着扫描的进行，光斑所在区域距离前一次被激光辐照的时间间隔变大，更长的冷却时间使得热量损失更大，此时热损耗占主要地位，因此峰值温度减小。在整个扫描过程中，峰值温度在某一基准温度呈现上下波动，并且由于热积累，该基准温度会随扫描的进行而有所上升。而在 CLQ 过程中，由于其为单道扫描，一般认为随着扫描的进行，由于热积累，其峰值温度会越来越高。

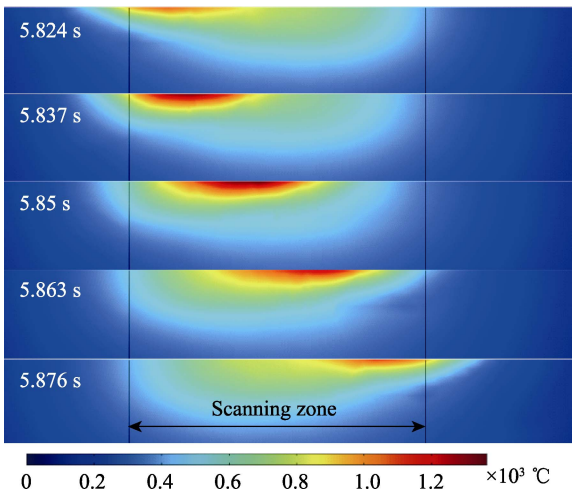

图 7　GLQ 单道扫描过程中表面的温度场分布

Fig.7 Temperature field distribution of GLQ

为了进一步探究两种淬火方式温度随着时间变化的特征，在淬火区域表面选取了一个特征点进行分析（图 8a），该特征点为试样取样位置中心。图 8b、c 分别是该特征点在两种激光淬火方式下的温度变化曲线。通过对比可以发现，经过激光辐照，GLQ 过程中特征点温度从 500 ℃（t=5.536 s）变成 718 ℃（t=6.164 s）；CLQ 过程中温度从 508 ℃（t=5 s）变成 1063 ℃（t=6.25 s），其辐照时长为前者的 1.99 倍，温度变化量是前者的 2.55 倍。可见，在 GLQ 过程中热积累更小。同时，GLQ 过程中该特征点波峰温度处于奥氏体化温度（850 ℃以上）的时间为 0.38 s，波谷温度均未达到 850 ℃，但始终保持在马氏体转变温度以上（45 钢马氏体开始转变温度为 332.3 ℃，由 JMatPro 计算获得）。CLQ 该点处于 850 ℃以上的时间为 1.17 s，可见 CLQ 实际相变时间是 GLQ 实际相变时间的 3.08 倍。

在特征点处深度方向进行分析，如图 9a、b 所示，两种激光淬火方式下，材料奥氏体化时间均随着深度的增加而减少。与 CLQ 的温度变化曲面相比，GLQ 的温度变化曲面呈现锯齿形变化，相变区更浅，相变硬化时间更短。离表面越近，温度变化幅度越大，其波峰温度和波谷温度最大相差 530 ℃，离表面越远，温度变化幅度越小，在距离表面 0.5 mm 处，其波峰温度和波谷温度仅相差 60.8 ℃。

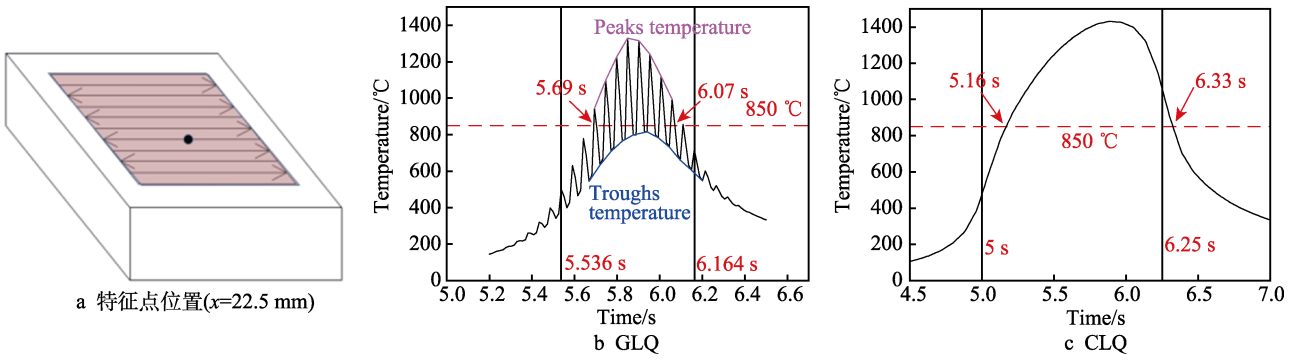

图 8　温度随时间的变化曲线

Fig.8 Temperature versus time curve: a) location of feature point (x=22.5 mm); b) GLQ; c) CLQ

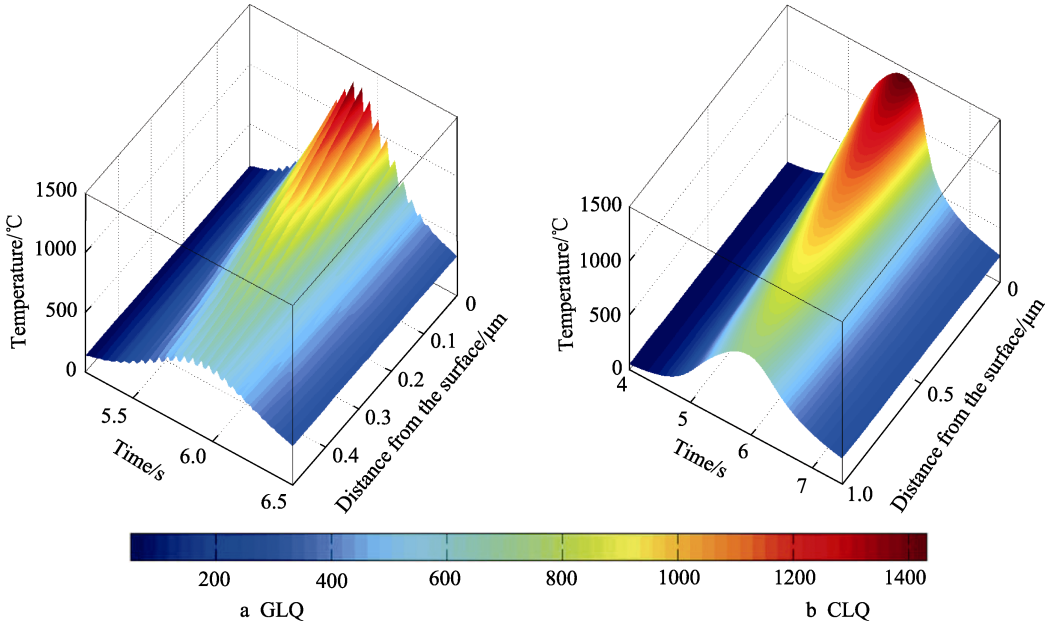

图 9　特征点处温度随时间和深度的变化

Fig.9 Variation of temperature of feature point with depth and time

两种激光淬火方式的温度变化率（t=5.85 s）如图 10、图 11 所示。沿激光扫描方向，GLQ 模型的温度变化率（图 10a）比 CLQ 模型（图 11b）大 1 个数量级；垂直激光扫描方向，GLQ 模型的温度变化率（图 10b）是 CLQ（图 11a）的 2 个数量级，且 GLQ 在两个截面上温度变化率为同一数量级。

在图 10a 中，GLQ 激光束光斑处于扫描区域中心位置（B 区域），并从左往右移动。其中，B3 区域基体在激光作用下，温度急速上升，温度变化率最高。B2 区域为激光峰值温度所在区域，此处激光输入的能量和基材热传导流出的能量接近。B1 区域温度变化率为负值，此处激光输入的能量小于热传导流出的

能量。A 区域为已扫描区域，温度变化率为负值，并随着远离光斑，冷却速度变小。C 区域为待处理区域，其靠近光斑区域，由于热传导作用而开始升温，升温速度较小，远离的区域温度几乎不变。CLQ 的光斑在从左往右移动过程中（图 11b）也存在类似现象，通过对比可以发现，CLQ 的 B2 区域更大，而 B1、B3 区域更小，C 区域靠近光斑位置而升温速率更大。这是因为 CLQ 扫描速度较小，有更多的时间进行热量的传导，较远区域也能明显产生升温。

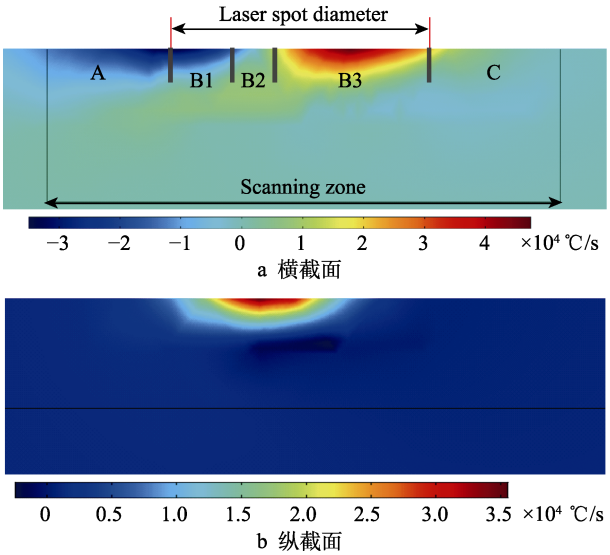

图 10　GLQ 温度变化率(激光焦点处 t=5.85 s)

Fig.10 Temperature change rate of GLQ (at laser focus t=5.85 s): a) cross section; b) longitudinal section

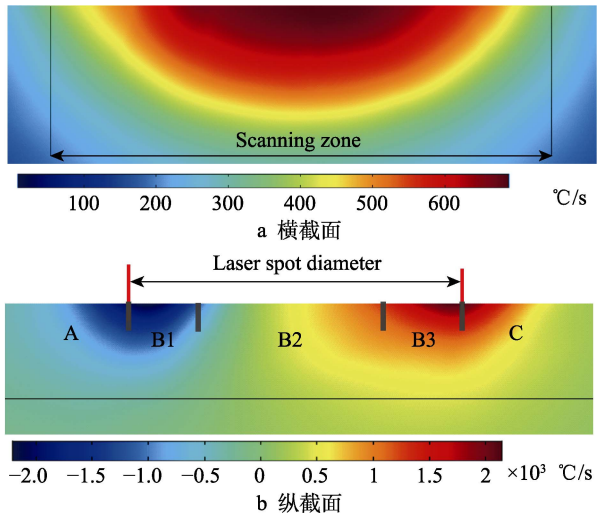

图 11　CLQ 温度变化率(激光焦点处 t=5.85 s)

Fig.11 Temperature change rate of CLQ (at laser focus t=5.85 s): a) cross section; b) longitudinal section

GLQ 扫描过程中，较大的温度梯度导致较快的扩散速率，较长的辐照间隔时间导致散热充足，更快的扫描速度使得相变区域的热量更趋向于富集在表层，不易深入，而 CLQ 由于扫描速度慢，有充足的时间完成热量的传导，因此 GLQ 获得的硬化层深度比 CLQ 要小。

2.3　硬度分析

45 钢基体组织主要为珠光体和铁素体，激光淬火处理过程中，由于急热急冷的过程中温度梯度很大，时间很短，转变的奥氏体中含有的碳来不及扩散而滞留，同时，极短的时间使转变的奥氏体晶粒来不及长大，就转变成了细小的位错马氏体，因此淬火后，硬度大大提升[16-17]。在横截面上，距离中心位置每隔 0.8 mm，进行一次深度方向的显微硬度测试，其硬度分布如图 12 所示，两种淬火方式在横向硬度分布上呈现相似分布，均为中间主体区域硬度高（GLQ 试样硬度约为 810~900HV，CLQ 试样硬度约为 790~830HV），两侧边缘区域硬度低（约为 760HV）。在纵向硬度分布上看，GLQ 试样硬度相对 CLQ 试样硬度波动更大。

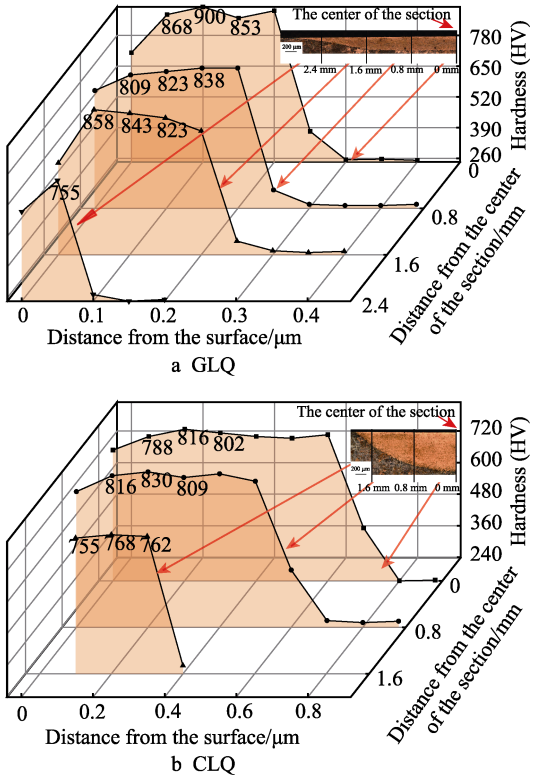

图 12　横截面硬度分布

Fig.12 Hardness distribution of cross section

其中 GLQ 试样主体部分拥有更高的硬度，是由于其淬火过程中冷却速度更大，获得的马氏体晶粒尺寸略有减小。两侧边缘区域硬度低于主体部分可能是由于，淬火过程中温度值由表及里呈梯度递减，边缘区域的温度处于 Ac_1~Ac_3 之间，短时间内原子迁移和扩散不明显，相变不充分，不能完全奥氏体化，因此相比完全奥氏体化区域，硬度有所下降。GLQ 试样在横向上呈现出中间高、两侧低的硬度分布可能还有其他原因：GLQ 激光扫描过程中，当光斑移动到边缘区域时，光斑处温度峰值相对较低，冷却速度相对

较慢，使得相变区硬化后整体硬度略有下降。同时，某一时刻光斑在主体区域产生的不完全奥氏体化区域会被另一时刻的光斑覆盖，使得主体区域无法产生低硬度区域。GLQ 试样拥有更大的纵向硬度波动可能是由于，更短的淬火时间使得碳及其他合金元素扩散更不充分，同时锯齿变化的温度使得碳及其他合金元素产生了不均匀扩散，对马氏体转变产生了差异化影响，造成组织不均匀性，表现为硬度波动更大。

总的来说，GLQ 试样硬化层硬度更大，硬度波动也更大，但其硬度最小值仍然处于 CLQ 硬度波动范围之内。考虑到 CLQ 光斑无法改变大小，进行硬化层搭接必将出现回火软化现象；而 GLQ 方式由于扫描尺寸可调，温度到达马氏体转变温度后，无需进行搭接扩大扫描区域，因此并未出现该现象。同时，更小的热积累将导致更小的热变形。因此在实际激光淬火应用过程中，对于薄层大面积淬火，为了避免硬化层搭接过程中出现回火软化，并减小热变形，使用 GLQ 技术可能会达到更好的效果。

3 结论

本文采用振镜扫描式激光对 45 钢进行了淬火实验与温度场特性数值模拟研究，并与 CLQ 方式进行对比，主要得到以下结论：

1）GLQ 具有温度变化率更大，升降温多次循环、相变热处理时间更短和热积累更少等特点。

2）GLQ（深度更浅，宽度更大，形貌为均匀性更好的近似月牙形）异于 CLQ（形貌为月牙形）的横截面形貌，是由其淬火过程中独特的温度场特性引起的。

3）GLQ 硬化层整体硬度比 CLQ 硬化层大，纵向硬度变化波动大，两者横向硬度分布相似，均为中间主体区域高，两侧边缘区域低。

参考文献：

[1] 何强, 苏华礼, 刘宏昭, 等. 高速主轴用 40Cr 钢的激光相变硬化工艺[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2192-2196.
HE Qiang, SU Hua-li, LIU Hong-zhao, et al. Research on 40Cr steel for high-speed spindle laser transformation hardening technics[J]. Chinese journal of lasers, 2009, 36(8): 2192-2196.

[2] HWANG Jonghyun, LEE Yunsig, KIM Daeyoung, et al. Laser surface hardening of gray cast iron used for piston ring[J]. Journal of materials engineering and performance, 2002, 11(3): 294-300.

[3] 符轲, 张修庆, 续晓霄, 等. 45 钢激光淬火工艺优化及性能[J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 154-158.
FU Ke, ZHANG Xiu-qing, XU Xiao-xiao, et al. Process optimization and property analysis of 45 steel by laser quenching[J]. Heat treatment of metals, 2017, 42(1): 154-158.

[4] 汪舟, 姜传海, Volker Schulze, 等. 不同光束移动速度下的激光淬火有限元分析[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(4): 95-102.
WANG Zhou, JIANG Chuan-hai, VOLKER S, et al. FEM analysis of laser hardening with different laser moving velocities[J]. Materials science and technology, 2011, 19(4): 95-102.

[5] 吴钢, 宋光明, 黄婉娟. 激光淬火工艺参数对层深及硬度影响敏感性研究[J]. 激光技术, 2007(2): 163-165.
WU Gang, SONG Guang-ming, HUANG Wan-juan. Influence of laser processing parameters on the case-depth and the hardness[J]. Laser technology, 2007(2): 163-165.

[6] KOMANDURI R, HOU Z B. Thermal analysis of laser surface transformation hardening-optimization of process parameters[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2004, 44(9): 991-1008.

[7] 郭怡晖, 刘继常, 卢远志, 等. 球墨铸铁 QT600-3 激光相变硬化数值模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1755-1760.
GUO Yi-hui, LIU Ji-chang, LU Yuan-zhi, et al. Numerical simulation of laser transformation hardening of ductile cast iron QT600-3[J]. High power laser and particle beams, 2010, 22(8): 1755-1760.

[8] 苏超然, 吕长乐, 师陆冰, 等. 激光离散淬火对球墨铸铁磨损与损伤性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 85-90.
SU Chao-ran, LV Chang-le, SHI Lu-bing, et al. Effect of laser dispersed quenching on wear and damage property of ductile iron[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 85-90.

[9] CORDOVILLA F, GARCIA-BELTRAN A, SANCHO P, et al. Numerical/experimental analysis of the laser surface hardening with overlapped tracks to design the configuration of the process for Cr-Mo steels[J]. Materials & design, 2016, 102: 225-237.

[10] YAO Cheng-wu, XU Bin-shi, HUANG Jian, et al. Study on the softening in overlapping zone by laser-overlapping scanning surface hardening for carbon and alloyed steel [J]. Optics and lasers in engineering, 2010, 48(1): 20-26.

[11] 贺长林, 张弓, 王映品, 等. 基于扫描振镜的激光淬火的实验研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(10): 211-213.
HE Chang-lin, ZHANG Gong, WANG Ying-pin, et al. Experiment study of laser quenching based on resonant scanner[J]. Hot working technology, 2014, 43(10): 211-213.

[12] MARTINEZ S, LAMIKIZ A, TABERNERO I, et al. Laser hardening process with 2D scanning optics[J]. Physics procedia, 2012, 39: 309-317.

[13] MARTINEZ S, LAMIKIZ A, UKAR E, et al. Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process [J]. Optics and lasers in engineering, 2017, 90: 72-80.

[14] 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 Yin-lan. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.

[15] 刘政, 沈俊波, 张伟, 等. 45 钢激光束扫描数值模拟与组织性能[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(3): 193-202.
LIU Zheng, SHEN Jun-bo, ZHANG Wei, et al. Numerical stimulation and microstructure properties of 45 steel during laser beam scanning[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(3): 193-202.

[16] 姚建华, 于春艳, 孔凡志, 等. 汽轮机叶片的激光合金化与激光淬火[J]. 动力工程, 2007(4): 652-656.
YAO Jian-hua, YU Chun-yan, KONG Fan-zhi, et al. Laser alloying and quenching of steam turbine blades[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2007(4): 652-656.

[17] CHEN Zhao-yun, ZHOU Gui-juan, CHEN Zhong-hua. Microstructure and hardness investigation of 17-4PH stainless steel by laser quenching[J]. Materials science and engineering: A, 2012, 534(1): 536-541.