

文章编号: 1001-3806(2004)05-0472-04

辊面激光强化过程的瞬态应力分析

张建宇¹, 高立新¹, 杨久霞²

(1. 北京工业大学 先进制造技术重点实验室, 北京 100022; 2. 北京京东方股份有限公司, 北京 100016)

摘要: 轧辊表面在激光扫描过程中经历剧烈的热循环, 由温度场的集中效应造成辊面应力呈现动态变化的趋势, 扫描瞬时的光斑内部应力场以压应力为主。由于组织比容的变化, 辊面处理后的残余应力分布更加复杂, 采用实验手段测量应力分布状况的难度较大, 因此, 利用数值分析方法是合理的选择。

关键词: 轧辊; 激光强化; 瞬态应力; 数值模拟

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

The transient stress analysis of the roll surface during laser strengthening

ZHANG Jianyu¹, GAO Li-xin¹, YANG Jiu-xia²

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Beijing BOE Corporation, Beijing 100016, China)

Abstract The roll surface experiences severe thermal circulation during the laser strengthening. Due to the concentration of the temperature field, the stress on the roll surface changes dynamically, and the transient distribution within the laser spot is mainly compressive. Furthermore, as the change of the specific volume of the micro structure, the residual stress distribution after the laser treatment is very complicated. As a result, it is very difficult to measure the stress distribution experimentally. So it is a reasonable choice to simulate the distribution with the numerical method.

Key words: roll; laser strengthening; transient stress; numerical simulation

引 言

激光表面改性是近几十年新兴的一项强化工艺, 目前在机械、航天等许多领域都已得到广泛应用。光斑扫描过程中工件表面经历复杂的热循环, 不但温度变化剧烈, 而且由于光斑辐照面积微小, 高温影响区的范围也很小, 从而造成激光扫描时的温度梯度和热循环速度都变化剧烈^[1]。其结果是工件表面形成非常复杂的应力状态, 而且激光辐照的瞬时温升足以使材料达到屈服极限。

半钢轧辊是型钢生产中常用的材料, 其含碳量介于钢和铸铁之间。因此, 机械性能也表现出较大差异: 韧性较差, 而硬度较高。激光扫描半钢材料时温度及应力变化规律直接决定了轧辊的使用效果。

1 轧辊力学性能的温变效应

温度变化对弹性模量 E , 塑性模量 H' 影响比较

作者简介: 张建宇(1975), 男, 讲师, 研究方向为设备故障诊断和激光加工技术。

E-mail: zhjy1999@bjpu.edu.cn

收稿日期: 2003-12-08; 收到修改稿日期: 2004-02-13

大, 而对泊松比 μ 影响较小, 因此, 一般来说, μ 可认定为常数, 而 T 对 E, H' 的影响必须加以考虑^[2]。在高温条件下, 材料的变形机制增多, 塑性变形易于进行, 表现为强度降低, 形变强化系数和形变强化指数下降^[3]。

材料在激光加热时的力学性质往往与不均匀温度场、高升温率和高应变率相联系。大量试验数据表明, 升温率对材料力学性能, 尤其是对宏观屈服强度有明显影响^[4]。

图 1 为采用 $10\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的矩形光斑在材质为 180CrNiMo 的半钢轧辊上进行扫描时, 光斑附近温度梯度的分布曲线(计算结果)。图 1a 为光斑两侧的温度梯度分布, 可见在光束边沿位置, 温度梯度值接近 $750^\circ\text{C}/\text{mm}$ 。图 1b 为光束前进方向的温度梯度分布, 可见光斑前沿位置的值要高于两侧, 其最大值接近 $1200^\circ\text{C}/\text{mm}$ 。

图 2 为同种参数条件下的热循环速度分布曲线。横坐标表示在激光扫描路径上取的 5 个点, 其中曲线 1~6 分别代表试样由表层到内部不同深度处的热循环曲线。图 2a 为加热速度分布, 图 2b 为冷却速度。可见, 在该参数作用下, 热循环速度可以

达到 $10^3 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 数量级。如果激光的功率和扫描速度提高,热循环速度可达 $10^4 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 量级。

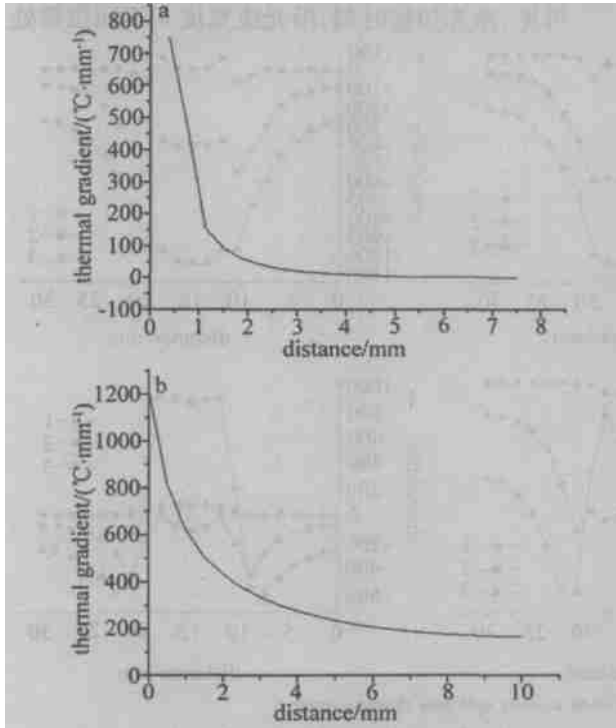


Fig. 1 Distribution of thermal gradient near the laser spot

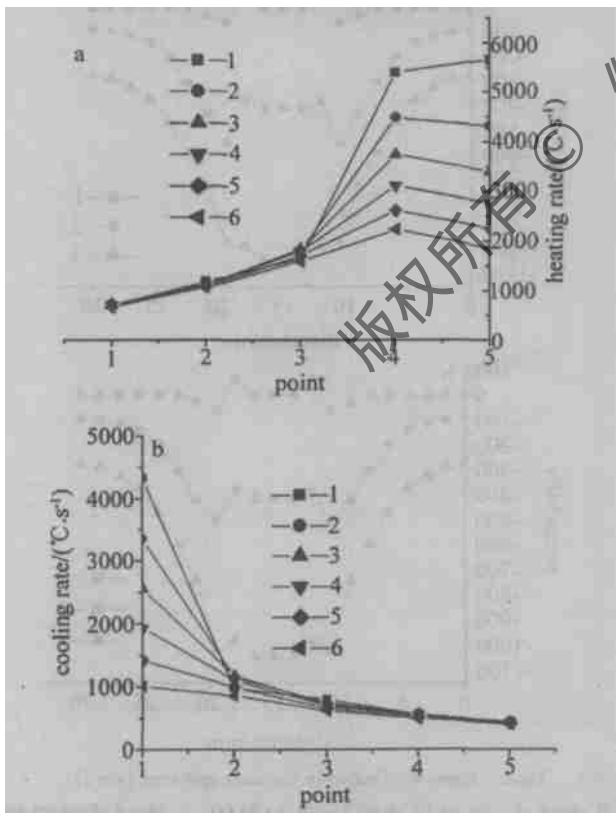


Fig. 2 Rate of the thermal cycle during the laser scanning

因此,由于激光能量的高度集中,光斑附近存在剧烈变化的温度场。材料的屈服强度与温度、升温率和温度历史有关,也与应变率和应变历史有关。

严格来说,材料的当前屈服强度应与试样材料的整个升温及变形历史有关,在数学上可表述为材料的当前屈服强度是温度和变形历史的泛函^[5]。

2 有限元模型的处理方法^[6]

FEM 分析软件 ANSYS 为耦合场分析提供两种途径:直接方式(direct)和顺序方式(sequential)。

温度-热应力是单向耦合场,因此,计算热应力的有限元模型可以采用与温度场相同的单元划分方式。只需重新定义模型的边界条件,之后将前一过程计算的温度场结果作为应力场计算的初始条件加以处理即可。

3 激光处理瞬态应力仿真结果

激光扫描升温过程只考虑热弹塑性状态,忽略掉奥氏体化可能引起的应力变化,若讨论在光斑掠过后的残余应力,则除了热应力影响,还必须考虑由于马氏体相变产生的组织应力^[7]。

分析矩形光斑扫描的情况,激光能量以均匀分布考虑,形状为 $10\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。图 3 是进行应力场仿真的有限元模型,单元网格采用不同疏密度处理。

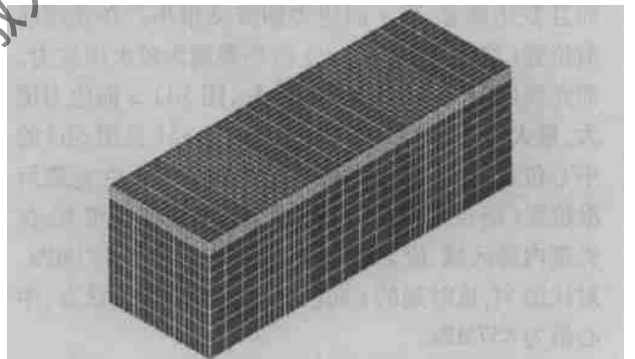


Fig. 3 FEM model for the calculation of the stress

激光扫描应力场随着光束的移动而变化,同样是时、空坐标的双重函数。图 4 是激光扫描带的平

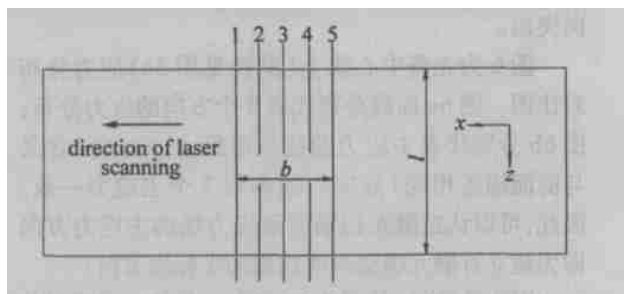


Fig. 4 2-D sketch of laser scanning

面示意,其中 l 为光斑的长度, b 为宽度。沿扫描带宽方向选取 5 条路径,研究扫描瞬时光斑内部的应力分布状态,另外在刚刚经历扫描的位置选取 1 条

分析路径与之对比。

(垂直扫描方向) 3 个方向。图 5f 是光束掠过位置的应力曲线。

图 5 中为上述 5 条路径上的应力分布规律。其中 1, 2, 3 分别代表 x (扫描方向)、 y (深度方向)、 z

可见, 激光扫描时刻, 沿光斑宽度 b 不同位置处

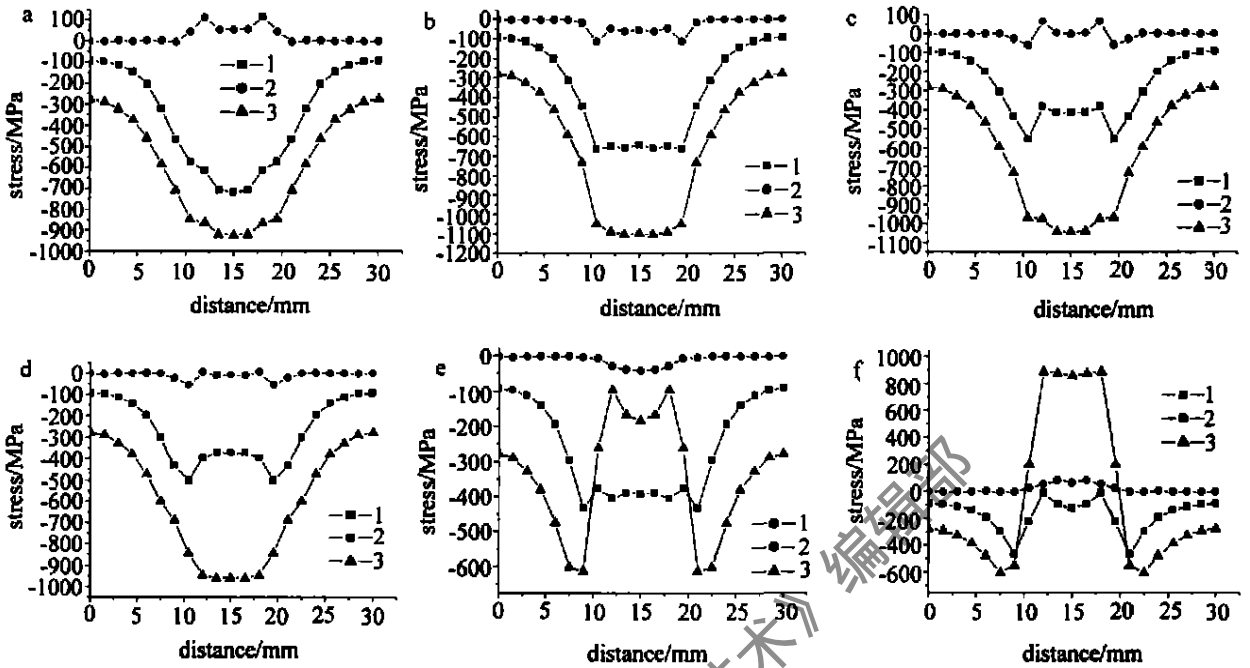


Fig. 5 Distribution of the stress on the different route in laser spot area during scanning

的应力状况存在差别。其中, 以 z 向应力最为突出, 而且变化显著, 而 y 向应力则波动很小。在光斑前沿位置(路径见图 5a), x, z 向均表现为较大压应力。而光斑内部(路径见图 5b, 图 5c, 图 5d) z 向应力增大, 最大值达到 1100MPa, 出现在路径(见图 5b)的中心位置; 而 x 向应力则小于光斑前沿。在光斑后沿位置(路径见图 5e), z 向应力值变化幅度很大, 在光斑内部区域, 应力已大为减小, 中心值为 183MPa。对比图 5f, 该时刻的 z 向已经转变为拉应力状态, 中心值为 857MPa。

激光强化温度场和瞬态应力场计算结果表明, 虽然轧辊试件上温度场只局限于光斑附近, 但由其所致热应力影响区却可以波及到边界位置, 尤以 z 向突出。

图 6 为光斑中心线上(路径见图 5c)应力分布对比图。图 6a 曲线分别代表 3 个方向的应力分布, 图 6b 分别代表主应力曲线。可见, x, y, z 向(含义与前面描述相同)分应力基本与 3 个主应力一致。因此, 可以认定激光扫描所致应力场的主应力方向即为建立有限元模型时所选取的坐标轴方向。

图 7 是路径(见图 5c)上 Mises 等效应力瞬时分布状态, 可见, 其分布沿光斑中心线对称。由于激光作用剧烈的升温速度和较高温度梯度, 等效热应力最大值出现在光束中心位置。在光斑外部, 应力值

迅速减小, 至试件边缘达到 243MPa。该材质常温屈服极限为 600MPa, 根据 Mises 屈服条件, 可见, 激光处理过程中轧辊表面局部区域已经发生了塑性变形, 处理之后的辊面必有残余应力保留下来。

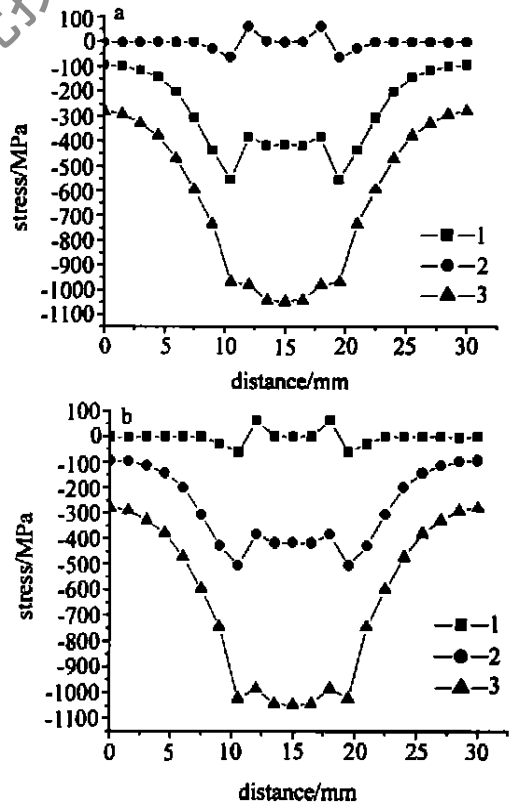


Fig. 6 Stress distribution in the laser spot area (dir z)

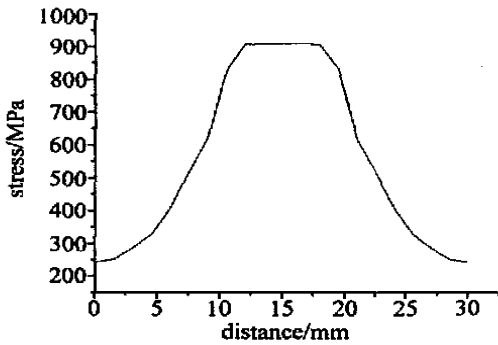


Fig. 7 Mises equivalent stress in the laser spot area

4 结论

激光扫描过程中, 光束辐照区域经历非常剧烈的热循环, 在光斑附近积聚较高能量, 因此, 形成超过半钢材质相变点的高温区, 其热影响区内的分布规律及瞬态热应力分布规律为: (1) 与高温热影响区对应, 在光斑附近存在一个剧烈变化的温度梯度区, 其中以光斑前进方向的数值最为突出, 最大值可达 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, 在光斑外部, 此值迅速衰减; (2) 光斑附近区域的热循环速度也呈现剧烈的变化规律, 在光斑内部其数量级可达 $10^3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s} \sim 10^4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 此值

与激光功率和扫描速度成正比; (3) 扫描瞬时光斑内部出现压应力, 其中以 z 向应力最为突出, 在扫描过后残余热应力表现为拉应力; (4) 激光处理残余应力除了考虑热影响外, 必须结合相变过程中因比容变化引起的组织应力。

参 考 文 献

- [1] YANEZ A, ALVAREZ J C. Modeling of temperature evolution on metals during lasers hardening process [J]. Applied Surface Science, 2002, 186: 611~ 616.
- [2] de la CRUZ P. Effect of laser hardening on the fatigue strength and fracture of a B Mn steel [J]. Int J Fatigue, 1998, 20(5): 389~ 398.
- [3] 游 敏, 郑小玲. CO_2 激光焊接残余应力测试与分析 [J]. 焊接技术, 2002, 31(3): 17~ 18.
- [4] van BRUSSEL B A, de HOSSON J T M. Residual stresses in the surface layer of laser treated steels [J]. Materials Science and Engineering, 1993, 161: 83~ 89.
- [5] WABG H G, GUAN Y H. A study of thermal stresses during laser quenching [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997 (63): 550~ 553.
- [6] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 120~ 356.
- [7] HU D Y. Simulation of thermo-mechanical behavior and interfacial stress of metal matrix composite under thermal shock process [J]. Composite Structure, 2000, 48: 113~ 118.
- [8] 干涉法 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 254~ 256.
- [9] 向 勇, 袁晓东, 徐 冰 *et al.* 用于激光等离子体诊断实验的二倍频探针光系统 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(s1): 201~ 204.
- [10] 王成程, 陈清海, 邓 武 *et al.* 用于 ICF 基准物理实验的子束激光系统优化设计 [J]. 光学与光电技术, 2003, 1(5): 35~ 38.
- [11] 力一峥, 周丕璋, 薛锡钢 *et al.* 强激光能源系统预电离实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 178~ 180.
- [12] 周丕璋, 郭良福, 陈德怀 *et al.* 激光聚变主放大器能源系统述评 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(4): 178~ 180.
- [13] 克希奈尔 W. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 39~ 54.
- [14] 吕百达. 固体激光器件 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 180~ 200.

(上接第 471 页)

- [3] ERLANDSON A C, ALGERT, HORVATH J *et al.* Flashlamp pumped Nd:glass amplifiers for the national ignition facility [J]. Fusion Technology, 1988, 34: 1105~ 1111.
- [4] 王成程, 郑万国, 於海武 *et al.* 两种新型不同泵浦腔构型片状激光放大器性能分析 [J]. 激光与红外, 2002, 32(6): 397~ 399.
- [5] 郑万国, 魏晓峰, 张小民 *et al.* 高功率激光的三倍频高效转换实验 [J]. 强激光与粒子束, 1995, 7(3): 417~ 421.
- [6] 郑志坚, 曹磊峰, 张保汉 *et al.* X 光 Cabor 波带片编码成像技术实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 759~ 763.
- [7] 曹磊峰, 郑志坚, 丁永坤 *et al.* X 光环孔编码成像技术研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 764~ 768.
- [8] 彭能岭, 李文洪, 江少恩 *et al.* 等离子体电子密度诊断的全息