

文章编号: 1001-3806(2005)04-0370-03

激光扫描搭接区内的热循环与应力变化规律分析

张建宇¹, 高立新¹, 崔玲丽¹, 王会刚², 杨久霞³

(1. 北京工业大学 先进制造技术重点实验室, 北京 100022; 2. 唐山学院 机械系, 唐山 063000; 3. 北京京东方有限公司, 北京 100016)

摘要: 由于搭接扫描的影响, 激光扫描带内的不同区域之间存在着硬度落差, 并且搭接区极易出现裂纹。通过数值模拟方法可以精确给出光束移动过程中搭接区内的温度和应力变化规律, 从而给出激光扫描形成回火区和二次淬火区的理论解释。仿真结果表明, 选取不同的搭接参数对于该区域的温度变化规律影响不大, 但从改善表面硬度不均和搭接区裂纹的角度出发, 搭接参数不宜过大。

关键词: 激光强化; 搭接区; 热循环; 残余应力

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

Analysis on the variation principle of thermal cycle and stress in the laser overlapping area

ZHANG Jian-yu¹, GAO Li-xin¹, CUI Ling-li¹, WANG Hui-gang², YANG Jiu-xia³

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Mechanical Department, Tangshan Institute, Tangshan 063000, China; 3. BOE Corporation, Beijing 100016, China)

Abstract: It is unavoidable that the hardness in the laser scanning area is not uniform due to the laser overlapping. Furthermore, the crack is apt to appear in the overlapping area. Firstly, the varying principles of the thermal cycle and stress during the laser scanning can be explained through the numerical methods. As a result, the theoretical explanations of the formation of the tempering and second quenching area are shown. The simulation results indicate that different overlapping parameters have little influence on the temperature-varying principles. On the other hand, the parameters should not set too large in order to reduce the ununiformity of the hardness and crack in the area.

Key words: laser strengthening; overlapping area; thermal circulation; residual stress

引 言

激光表面强化技术利用激光束高达 $10^3 \text{W}/\text{cm}^2 \sim 10^4 \text{W}/\text{cm}^2$ 的功率密度, 使被加工件在扫描瞬间完成组织转变, 从而达到淬火的目的。

由于激光束形状相对于工件来说, 尺寸很小, 因此, 要在表面实现完整淬火, 在整个扫描区内必定存在着搭接现象。要分析搭接区内的组织变化以及激光淬火效果, 必须借助实验和理论分析双重手段。

1 激光搭接区裂纹形态

由于经历两次激光扫描, 其内部的温度和应力变化过程都不同于非搭接区, 而且通过实验手段, 在金相显微镜和扫描电镜下可以明显观察到裂纹存在, 如图 1 所示。

作者简介: 张建宇 (1975-), 男, 讲师, 博士, 现从事激光表面强化技术研究。

E-mail: zhjy_1999@bjut.edu.cn

收稿日期: 2004-05-21; 收到修改稿日期: 2004-08-13

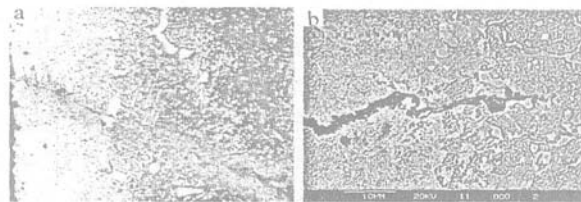


Fig 1 Crack formation in the overlapping area

图中所示试样取自材质为半钢的型钢轧辊, 半钢的含碳量介于钢和铸铁之间, 因此其硬度、耐磨性优于碳钢, 而强度、韧性好于铸铁。所以, 半钢材质对裂纹的敏感性也介于二者之间。

图 1a 是金相显微镜下所能观察到的搭接区裂纹形态, 图 1b 是同一试样在扫描电镜下的照片。

对于工件扫描后裂纹的形成有诸多影响因素, 从图 1a 可见, 轧辊的原始组织成分是珠光体 + 渗碳体, 在基体中夹杂着大量的莱氏体组织, 这种组织的不均匀性是造成裂纹的一个原因。

另一方面, 激光扫描过程中工件的极表层经历异常剧烈的热循环和应力循环过程, 在骤冷骤热作用下, 裂纹的敏感性增加。

2 搭接区内温度与应力循环的理论分析

图 2 描述了在两条激光扫描带之间所形成的搭接

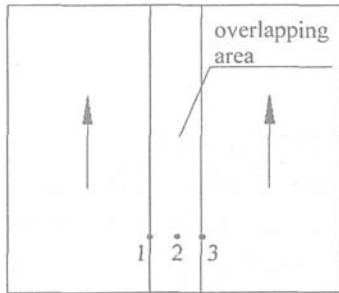


Fig 2 Sketch of the laser overlapping scanning

区。为了分析这种特殊区域内的各种变化规律,在搭接区的边界和内部共选取 3 个点作为分析对象。

2.1 搭接区内热循环规律探讨

由于采用实验手段获得激光作用下温度和应力循环规律的难度较大,理论上可以采用数值模拟方法对激光扫描过程进行分析^[1]。

利用有限元法^[2],图 2 中 3 点经历的热循环规律可以通过图 3 进行表述,其中 1 和 3 表示搭接区域的边界点,而 2 则表示搭接区中心线上的一点,其搭接率取 20%^[3]。

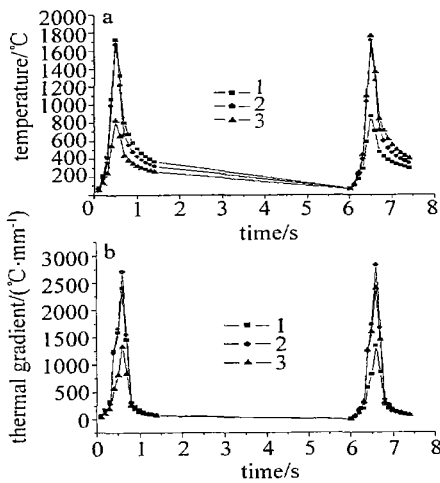


Fig 3 Thermal varying principle in the overlapping area

图 3a 描述的是搭接区内的温度变化规律。可见,在第 1 次激光扫描过程中,1 点经历的热循环规律与光束扫描中心点类似;而在做第 2 次扫描时(此时,1 点恰巧处于光斑边缘位置),最高温升只有几百度。类似地,3 点也基本经历相近的过程,只是次序与 1 点相反。对于 2 点,由于在两次扫描时,既非束斑边缘点,也不是处于中心位置,所以它的两次热循环几乎相同,所能达到的瞬时高温也相差不过几十度(分别为 1674 °C 和 1717 °C)。

图 3b 显示的是在两次扫描进程中前述 3 点的热梯度变化规律,绘制曲线的数据是总温度梯度,而未考

虑方向问题,因而从曲线形状看,与热循环曲线类似。

由上述分析可知,在搭接区中心位置,材料相当于经历了 2 次淬火的过程,而搭接区内靠近第 2 道扫描带边缘的区域则经历回火过程,结果造成工件表面存在硬度分配不均的现象,最终导致磨损差异。

需要指出,上面只是基于光斑内部能量均匀分布的假设得出的结论,而实际的光束能量分布形式多种多样,但搭接区内的温变规律是类似的,只不过形成的 2 次淬火区以及回火区域的宽度和深度不同而已。

2.2 搭接率对热循环规律的影响

激光处理搭接区宽度与搭接区内的组织性能有很大关系。因此搭接率的选择也是影响最终淬火性能的一个重要参数^[4]。

图 4 是选取 40% 搭接率后的热循环曲线分布图。同样,沿搭接区的宽度方向均匀选取了 5 个点,其中,

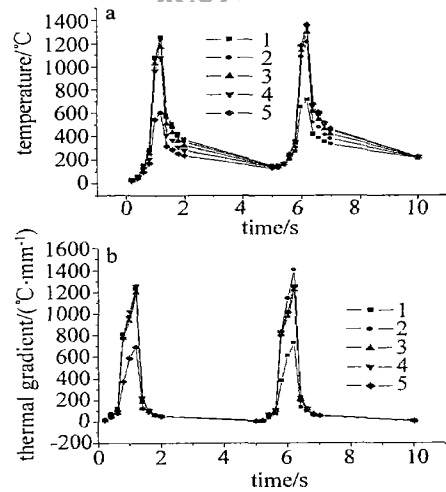


Fig 4 Thermal cycle principle with 40% overlapping rate

1 和 5 分别是搭接区边界点,3 是搭接区中心点。可见,对于能量均布的矩形光斑来说,搭接区内部各点都要经历类似的热循环过程,而搭接区的两条边界经历的循环过程恰好相反,因此也形成了回火区。

光束边缘点在两次热循环过程中产生的热梯度分布存在差异,而搭接区中心则大致相同,温度梯度数值高意味着由其造成的热应力也会显著,所以搭接区内最容易出现裂纹的位置是产生 2 次淬火效果的搭接中心区。温度梯度的这种分布趋势是不能改变的,只能通过调整工艺参数,使其数值尽量减小^[5]。

2.3 扫描搭接区内的应力循环特征

搭接区是激光处理中的敏感区域,而且搭接区内中心位置经历 2 次淬火,而在靠近前一道扫描位置则存在回火效应。这个区域不但容易出现硬度下降的现象,而且 2 次淬火作用使其开裂敏感性提高。

图 5 是未考虑相变条件下搭接区在两道扫描情况下的应力变化情况,图 5a 是扫描瞬时沿整个路径的应

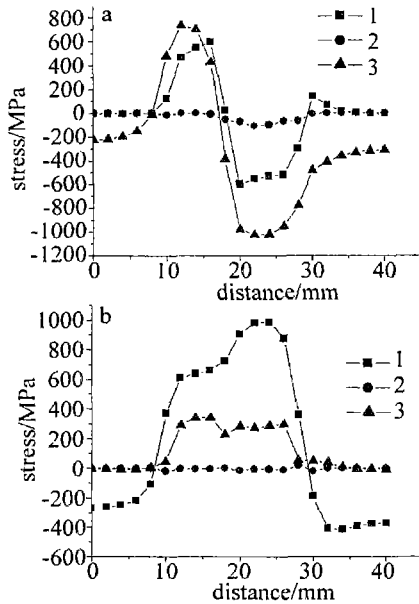


Fig 5 Distribution of the thermal stress in the overlapping area

力分布,图中的拉应力区对应的位置即为前一道扫描带,在激光相邻扫描条件下,该拉应力极值减小,并从拉应力迅速过渡到压应力。图5b是激光处理结束,沿 z 向路径的应力分布。两条扫描带内应力分布稍有差别,在同未计入组织应力的前提下,新扫描带的应力大于前一道。如果综合考虑激光扫描过程中的相变应力影响,在搭接区内将呈现极为复杂的残余应力分布^[6]。本文中在这方面进行了一定假设。

2.4 搭接区裂纹的抑制措施

由上述理论分析,材料在激光扫描过程中经历异常剧烈的热循环和应力变化,因此搭接区对裂纹的敏感性很高,为了有效抑制这种情况出现,可以考虑从以下几点加以解决:(1)在保证淬火质量的前提下,尽量

采用低功率+低扫描速度的方式,因为材料表面的能量密度越高,热循环越剧烈;(2)搭接率不宜过大,此值越大,搭接边沿越接近扫描带中部的2次淬火区,因此裂纹越容易萌生。

3 结论

(1)激光处理过程中必然存在搭接现象,搭接区内由于特殊的温变过程而导致其循环规律与其它区域不同,最终搭接区表面硬度呈现不均匀分布的特点。

(2)激光处理搭接区内存在2次淬火区和回火区,其位置分别位于搭接中心区和搭接区边界。

(3)只考虑热应力的情况下,由于光束搭接作用,第2道扫描对前一道扫描区内部的拉应力有降低的作用。

参考文献

- [1] 史晓强,王大承. 激光相变硬化处理的模拟 [J]. 应用激光, 2001, 21(3): 172~174.
- [2] 李俊昌. 激光热处理优化控制研究 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1995: 130~186.
- [3] 刘怀喜,张三川. 综合工艺参数对常用钢铁材料的激光淬火特性的影响 [J]. 激光杂志, 2001, 22(1): 33~34.
- [4] GARNOV S V, KONOV V I. Experimental study of temperature dependence of reflectivity and heat capacity of steels and alloys at continuous wave Nd:YAG laser heating [J]. SPIE, 1996, 3093: 160~175.
- [5] BOHOTA A, ISKIERKA S. Numerical prediction of the hardened zone in laser treatment of carbon steel [J]. Acta Mater, 1996, 44(2): 445~450.
- [6] TEJERA V, ANDRITSCHKY M. Analysis of residual stresses in thermal barrier coatings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92(93): 209~216.

(上接第357页)

SBR进行锁模,使 Cr^{4+} YAG激光器的激光腔结构简洁紧凑。文中的分析对研制 Cr^{4+} YAG孤子激光器具有理论指导意义。

参考文献

- [1] TAKARA H, KAWANISHI S. Generation of highly stable 20GHz transform limited optical pulses from actively mode locked Er-doped fiber lasers with an all polarization maintaining ring cavity [J]. Electron Lett, 1992, 28(22): 2095~2096.
- [2] SMITH K, GREER E J, WYTTOR. Totally integrated erbium fiber soliton laser pumped by laser diode [J]. Electron Lett, 1991, 27(3): 244~246.
- [3] HAUSE H A, MECOZZIA. Long-term storage of a bit stream of solitons [J]. Opt Lett, 1992, 17(2): 1550~1552.
- [4] FONTANA F, BORDOGNA G, FRANCO P *et al*. Condition for soliton generation in harmonically mode-locked erbium-doped fiber lasers [J]. Electron Lett, 1993, 29(18): 1652~1654.
- [5] COLLINGS C, BERGMAN K. True fundamental solitons in a passively mode-locked short-cavity Cr^{4+} YAG laser [J]. Opt Lett, 1997, 22(14): 1098~1100.
- [6] THEMER J, HAYDUK M, KROL M F *et al*. Mode-locked Cr^{4+} YAG laser: model and experiment [J]. Opt Commun, 1997, 142: 55~60.
- [7] ELLERS H, DENNIS W M, YEN W M *et al*. Performance of a Cr:YAG laser [J]. IEEE J Q E, 1993, 29(9): 2508~2512.
- [8] FORK R L, MARTNEZO E. Negative dispersion using pairs of prisms [J]. Opt Lett, 1984, 9(2): 150~152.
- [9] 余先伦,曹轶乐,杨伯君 *et al*. 锁模元件 SBR 用于飞秒固体激光器中的分析 [J]. 激光技术, 2004, 28(4): 397~400.