

文章编号:1671-6833(2004)03-0085-05

# 激光表面强化相关问题的研究进展

巴发海<sup>1</sup>, 宋巧玲<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 郑州测绘学校, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 针对激光表面强化相关问题的研究现状作了介绍和展望. 主要内容包括: 激光表面强化工艺及其控制研究. 利用光束变换形成光束的特定阵列或周期分布是一种非常具有发展前途的先进工艺; 数值模拟、强化工艺的优化与评价. 半解析和轴对称(有限元)模型可对强化过程参数与结果进行半定量的计算和分析, 而对实际材料整个强化过程的温度场、多次相变、组织演化、最终的相组成以及力学性能的计算和预测仍将是今后数值模拟的研究重点; 光束质量与时空变换. 光束质量对应着强化工艺的可重复性. 激光束的时间空间分布研究可充分挖掘激光表面强化工艺的潜力以最大限度满足材料性能对强化工艺的特定要求.

**关键词:** 表面强化; 激光; 相变强化

**中图分类号:** TG 665 **文献标识码:** A

## 0 引言

激光相变强化具有超快加热相变特征, 因此与常规热处理技术相比有许多优点, 如可获得极细的强化层组织, 耐磨性好; 硬化层深度可以控制; 表层性能的改善不影响基体的性能; 具有较高的可控性和加工效率等. 尽管目前设备价格较高, 但由于上述特点和优势使得激光表面强化在我国汽车制造业和模具行业得到了长足的发展<sup>[1,2]</sup>.

激光表面强化涉及范围非常广, 本文仅就激光表面强化过程的强化工艺与影响因素、激光束质量控制、光束变换与应用、强化过程与结果的数值模拟以及优化与评价等相关问题进行分析.

## 1 强化工艺及参数控制

激光强化工艺的研究目的就是通过实验的研究和结果分析获得比较理想的激光加工参数组合, 以获得良好的表面强化效果. 国内外在激光表面强化工艺方面进行了大量卓有成效的研究工作, 揭示了加工参数如激光的峰值功率、光束的扫描速度等对材料的微硬度分布和力学性能的影响

规律<sup>[3]</sup>.

激光淬火的效果主要取决于作用于材料表面的功率密度和激光作用时间, 因而, 功率密度和激光作用时间是影响表面硬化质量的决定性因素<sup>[2]</sup>. 激光功率密度越大, 激光作用时间越长, 材料得到的能量越多, 硬化深度越大.

激光束直径即光斑直径是影响功率密度和激光作用时间的重要因素<sup>[4]</sup>. 翁铸<sup>[5]</sup>的研究认为, 影响激光硬化的决定性因素虽然是激光功率密度和激光作用时间, 但它们却不宜作为控制激光硬化的工艺参数. 从实际控制的角度出发, 将激光器输出功率、扫描速度和光斑直径作为工艺参数是适宜的.

林子光<sup>[6]</sup>提出一种小斑点快扫描的网纹状激光淬火工艺(图1), 不仅避免了激光淬火引起缸体的大变形及由此引起的大量的研磨工作量, 而且这种网纹淬火在缸壁表面形成了以激光带为骨架的储油池, 提高了活塞环与汽缸壁间的润滑性能. 实践应用证明这种工艺具有一定的优越性. 但是激光网纹状淬火在其网纹交叉处会产生重复激光淬火, 因而会在交叉处产生退火现象, 致使硬度降低.

收稿日期: 2004-04-06; 修订日期: 2004-06-11

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX1-11)

作者简介: 巴发海(1966-), 男, 河南省新密县人, 中国科学院副研究员, 博士, 主要从事激光材料相互作用方面的研究.

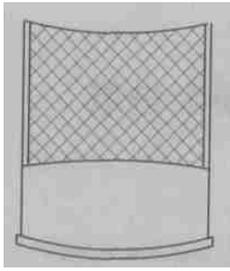


图1 汽缸 YAG激光网纹状淬火

Fig.1 Cylinder modified by YAG laser in gridding shape

中科院力学所针对典型的汽车冲压模具材料在无吸收涂层和保证其工作表面粗糙度的条件下采用单脉冲和多脉冲激光表面强化处理工艺,通过二元光学变换高斯光束在焦平面上形成微阵列周期分布,结合五轴框架式机器人数控系统实现了材料表面宏观和微观的周期强化轨迹(图2)<sup>[7~9]</sup>,大大提高了大型模具的综合力学性能.

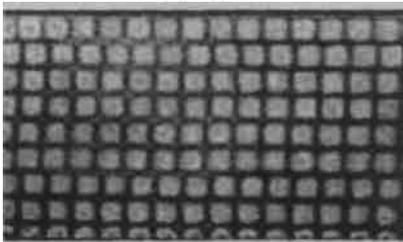


图2 微点阵激光处理后的表面形貌

Fig.2 Surface profile treated by a single pulse laser with array distribution

## 2 数值模拟、优化与评价

我国学者李俊昌<sup>[10]</sup>等将处理材料视为半无限大介质的一部分,将材料界面视为半无限大介质接受外部热能的窗口,将表面视为绝热界面提出了包含非完整光束辐照过程以及适用于任意给定光束分布的激光非熔凝热处理瞬态温度场的半解析计算方法(图3).

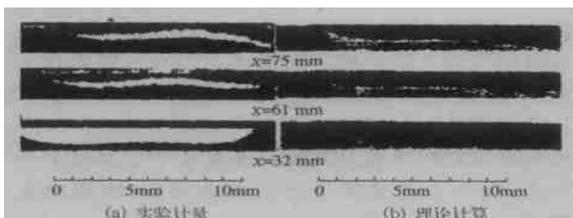


图3 不同位置的相变硬化带

Fig.3 Case depth of experimental result and calculation result

Roy<sup>[3]</sup>等采用 Ashby 和 Fasterling 模型融入碳的扩散理论,对激光强化过程中石墨的熔化现象

进行了计算分析,计算结果能够预测石墨周围熔化的宽度.

虞钢等<sup>[11]</sup>基于焓方法发展的二维轴对称数学模型,进一步考虑了激光束能量的时间和空间分布以及材料的变热物性的影响,模拟了激光加工中材料的传热和相变过程,并分别计算了高斯光束及平面圆形光束作用于纯铁时材料内部的气液及固液界面随时间的发展及非稳态温度场演化,如图4所示.

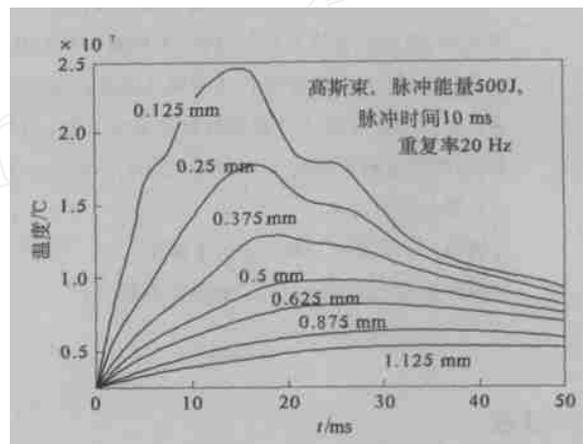


图4 温度随时间的演化

Fig.4 Temperature evolution with time

吴炜等<sup>[12]</sup>建立了三维轴对称有限元方法,结合激光的时间和空间分布对温度场的演化进行了计算.结果表明,矩形匀强光束强化效果优于高斯束,三角波激光有较高的加工效率.计算和试验证实,材料的均匀性如球铁中微区内石墨球体积分数对强化层深度和马氏体的分布有较大的影响.

管一泓的模型<sup>[13]</sup>利用了 M.J. Avrami 的相变计算方法,从相变理论和热弹塑性理论出发,并结合激光淬火实验资料,建立了考虑相变过程、温度场和变物性系数的非线性耦合热传导方程,然后用有限元法进行了温度场、相变组织分布、材料性能的数值模拟,如图5、图6所示.在获得激光淬火最佳工艺参数、预测材料性能方面有一定的实际应用和理论研究价值.

J. Woelke, J. Zielnica<sup>[14]</sup>在热传输方程中把研究点的温度作为二维坐标(x, y)、时间和无量纲 Biot 数的函数,结合相转变的基本方程分析了珠光体、马氏体的重量分数随时间坐标的变化.不同坐标处 Biot 数并不相同,那么温度随时间的变化不同,上述相变重量分数随时间和坐标位置的变化也不同.他的计算中同时考虑了应力对体积分数变化的影响,对参数选择有很好的参考作用.

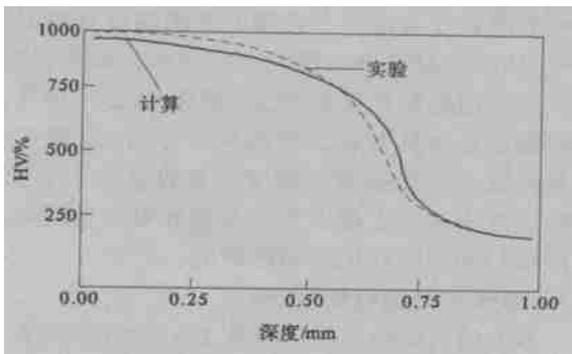


图5 硬度 - 深度计算曲线 (加载值为 50 g)

Fig.5 Hardness - depth case curve calculated (load 50 g)

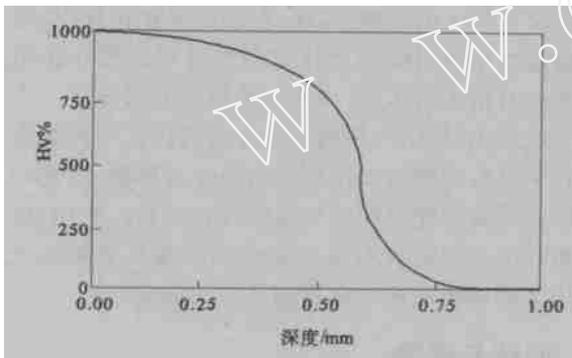


图6 马氏体沿淬硬层深度的分布

Fig.6 Martensite distribution along the case depth of hardened layer

对钢激光表面强化质量提出明确的优化和评价方法的是 S.L. Chen 和 D. Shen<sup>[15]</sup>,他们采用“越小越好、越大越好和越突出越好”的评价基本原则对试验过程采用正交试验设计,然后采用 Takuchi 和 fuzzy 方法对实验结果进行数学计算和分析.运用该方法可以同时多个参数同时进行优化和评价,不涉及强化过程相变本身的计算,简单、实用.

过程与结果的计算预测、优化与评价是激光表面强化的核心问题.许多计算结果表明,数值模拟可在一定程度上定量分析材料在激光作用过程中的温度和相变历史,激光扫描加热区和热影响区的形状和大小,硬化区随时间的变化曲线等,从而为预测激光处理后材料的硬化和强化范围以及组织和性能打下了基础,但这些研究所开发的数值方法对实际模具材料在脉冲激光作用下发生的多次相变过程(如加热和冷却过程的连续相变)还不能进行计算和预测,已有的数值模拟算法也不能对微结构演化的动态过程、相结构演化、晶粒度和宏观性能进行定量预测.

### 3 光束质量及时间和空间变换

#### 3.1 光束质量

研究表明,不同的激光器输出的激光模式并不相同,比如有基模、环形模、低阶模、多模等等.基模的激光能量集中在光班的中央,能量分布不均,一般应用于切割.而多模的能量分布相对要均匀些对激光表面强化有利.所以激光相变硬化时对模式要有选择.

光束质量对激光淬火影响的实验研究表明,不同的激光设备不同输出功率时,无论功率密度或是光斑外轮廓均会发生明显变化<sup>[16]</sup>,激光模式结构的差异必然引起热作用的差异.因此,采用一定的方法评判激光束的光束质量稳定性,获得大功率激光光束的尺寸、模结构、束腰位置、焦点大小、聚焦光斑形态、强度截面分布等测量参数有时候也是必要的<sup>[17]</sup>.

激光强化工艺很难存在一种简单的移值关系,甚至对于同一台设备,由于作用光束的功率密度分布在形式及范围上都随光束功率发生变化,因此,在工艺研究中首要前提是必须控制光束的质量一致性,只有这样才能保证工艺的可重复性,这一点对工业应用非常重要.

#### 3.2 空间分布

光束能量的空间分布和光斑形状与大小是影响激光加工过程的一个很重要的因素.研究表明大多数情况下为混合模或准基模<sup>[18]</sup>.随着功率的变化,光斑上的功率密度及其分布也随之发生变化,这就不可避免地造成激光加工参数的通用性差、质量不稳定,因此光束变换具有非常重要的意义.通常可通过光束变换的方法把光斑形状、大小和功率密度分布按工艺要求进行转换.比如把近似于圆形光斑变成相同面积的长方形光斑,这样处理的结果使光束在能量密度不变的情况下,增加扫描带的宽度,提高加工效率,在大面积淬火时减少淬火硬化带之间搭接次数,减少淬火带之间硬度的不均匀性.所以,激光相变硬化时常用多模激光束和宽带扫描方法.目前常用的光束处理方法有积分镜法、振镜法、转镜法和二元光学法等.通过光束变换,可形成线形、矩形等光斑,二元光学法还可实现能量的空间点阵、网格等分布.清华大学、中科院物理研究所、中国大恒等单位通过光束的二元光学变换把 CO<sub>2</sub> 激光的圆形光束转变成了线形均匀光束,并成功应用于齿轮和凸轮的表面强化<sup>[19]</sup>.虞钢课题组通过把 YAG 激光束

经过扩束镜扩束和二元光学转换转变成能量分布均匀的多种空间二维点阵(图7),并已成功应用于上海大众大型冲压模具的激光表面强化<sup>[20]</sup>.

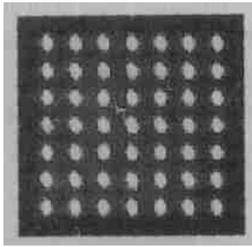


图7 激光束的空间二维点阵分布(7×7)

Fig.7 Two dimensional array distribution of laser power

对激光相变硬化带进行分析可以发现<sup>[16]</sup>,经同一功率而功率密度分布不同的光束作用后,相变硬化带形貌及力学性能可能有明显的差别.一般来说,利用直接来自激光器的或者通过简单聚焦系统的光束,对材料进行激光表面热处理后相变硬化带的形貌为中央较深的月牙形,与通常情况下希望经过热处理后获得一个均匀硬化带的愿望有较大的距离.从准确控制激光作用区域观点而言,具有整齐边界的光束无疑是一种较好的光束,但是很容易证实,即便是一个简单的平面边界工件,如果期望获得一个均匀的淬火层,事实上需要在作用光斑边缘有能量突起的光束(参见图8).如果考虑到被处理工件的特殊形状,理想的矩形均匀光斑事实上可能导致很不理想的热作用结果.材料的相变问题与材料所经历的热循环相关,工件边界对热传导的影响必然对激光淬火的结果发生影响.因此,即使是同种材料制造的工件,要获得同样的相变硬化层,对作用光束的功率密度分布在不同的部位将有不同的要求,甚至要求光束的功率及功率密度的空间分布能在表面强化过程中实时变化.

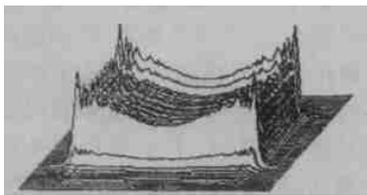


图8 矩形光斑变换系统获得的典型激光功率密度分布

Fig.8 Type power distribution obtained from rectangle transformation system

在激光表面强化过程中,首先要保证模具表面的粗糙度,即表面熔化的程度在可接受的限度内.强化层足够深,硬度分布合理,且尽可能保证

硬化区有一定的韧性配合.因此采用光束变换,使光束的能量分布在一个光斑的范围内具有特定的分布,从而在材料表面形成特定的强化效果.如表面强化采用周期强化的概念,使光斑之间及光斑内的微束之间具有合理的周期分布等,这样在宏观和微观上都能够兼顾硬度和韧性需求.当前的结构研究中基本上都没有涉及到光束的空间分布对微结构和力学性能影响的研究.

### 3.3 激光的时间特性(波形)

激光的时间特性(波形)是YAG激光器的重要特点之一,这一特性已经被尝试用于激光打孔和焊接中<sup>[21]</sup>.采用合理的激光打孔脉冲波形,能更合理地对打孔加工的各个阶段注入能量,以提高打孔特别是深孔加工的质量.同样,在表面强化过程中,激光峰值功率随时间的变化对激光材料的相互作用过程也有很大的影响.如在能量相同的前提下一个脉宽范围内,峰值功率的波形变换直接影响到激光作用下材料的微结构相变和强化区的形貌.激光的时间特性对强化层深度和耐磨性有明显的作用.目前激光的时间特性对微结构影响以及在表面强化当中的应用研究还没有得到足够的重视.

## 4 问题与展望

激光表面强化技术的关键问题之一是激光加工工艺,正确合理的激光加工工艺的制定前提应基于激光材料相互作用完整过程的研究.因为这些研究是过程参数选择、工艺优化、模型检验和工程应用的基础.尽管国内外在与激光强化的相关问题上进行了大量卓有成效的研究工作,并取得了丰硕的研究成果.但是,若把这些研究成果真正从理性高度上予以应用从而产生一个切合实际的合理的工艺方案,还有许多技术问题需要进一步研究和探索.

工艺方案的标准问题如何确定,这是工艺研究和过程控制的前提.应该指出,这主要应该从力学性能如强化层深、硬度分布和耐磨性等指标并结合数值模拟结果来综合考虑.

光束变换对充分发掘激光强化潜力、开发新的强化工艺有着非常重要的意义,显然,光束的时间空间特性对材料显微结构和性能的影响规律等还有待于进行必要的、比较深入的研究.

如何建立完整的数学模型来描述激光和材料的相互作用过程的温度场、多重相变以及最终的相组成和力学性能是目前和今后的一个重要研究内容.同时,该模型应该包含光束分布的时间和空间信息.

对整个强化过程进行评价必须建立相应的材料激光表面强化评价体系. 一个完整的评价体系应包括评价指标体系和力学性能评价函数. 如何利用上述研究结果建立评价指标以及激光多参数、过程和力学性能之间的函数关系, 对于激光表面强化的综合评价和预测都有重要的现实意义和理论意义.

### 参考文献:

- [1] 虞 钢, 虞和济. 集成化激光智能加工工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001. 1~9.
- [2] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998. 210~212.
- [3] ROY A, MANNA I. Mathematical modeling of localized melting around ground graphite nodules during laser surface hardening of austempered ductile iron[J]. Optics and Laser in Engineering, 2000, 34:369~383.
- [4] 周建忠, 杨继昌. 齿轮激光淬火工艺及性能研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(5):93~96.
- [5] 翁 铸, 陆文雄, 伍丽峰. 激光表面硬化处理工艺参数的确定[J]. 广西机械, 2002, 3:18~20.
- [6] 林子光. 发动机汽缸 YAG 激光网状淬火[J]. 金属热处理, 1999, (3):26~28.
- [7] 巴发海, 甘翠华, 虞 钢. 球铁材料激光表面强化的试验研究[J]. 中国激光, 2003, 30(7):663~667.
- [8] 高春林, 虞 钢. 具有特殊衍射强度分布的二元位相光栅设计[J]. 中国激光, 2001, 28(4):365~369.
- [9] BA Fa-hai, GAN Cui-hua, YU Gang. Microstructure Evolution of Laser Pulse Modified Ductile Iron Surfaces[C]. Beijing: SPIE, 2002. 679~682.
- [10] 李 昌, 陈庆华, MERLIN J. 合非完整光束辐照过程的激光热处理瞬态温度场半解析计算[J]. 中国激光, 1998, 25(8):753~758.
- [11] 虞 钢, 安永强, 胡幼娟. 激光加工中传热相变问题的焓解法[J]. 中国激光, 2000, 27(10):931~936.
- [12] WU Wei, LIANG Nai-gang, Ba Fa-hai. Numerical Simulation of Microstructure Evolution during Laser Transformation Hardening[C]. Osaka: third AHS, 2002.
- [13] ZIELNICA J, WOELKE J. The influence of cooling rates on the distribution of the structure and phases in hardened cylindrical elements[J]. Archive of Applied Mechanics, 1997, 67:422~432.
- [14] CHEN S L, SHEN D. Optimisation and quantitative evaluation of the qualities for Nd - laser transformation hardening[J]. Int J Adv Manuf Technol, 1999, 15:70~78.
- [15] 李俊昌. 激光热处理现状分析[J]. 昆明理工大学学报, 1997, 22(1):146~153.
- [16] 李 强, 雷 匏. 大功率激光光束聚焦光斑功率密度分布直接测量仪的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(3):257~263.
- [17] 雷 匏, 左铁钊. 集中典型大功率激光的功率密度分布及其应用[J]. 激光杂志, 2001, 22(5):64~65.
- [18] LIU Weir-jin, LI Yan-xiang. Binary optics beam mode transformer and its application in high power laser processing[A]. 7<sup>th</sup> Nordic laser Material Processing conference [C], Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 1999. 185~189.
- [19] 巴发海, 鄢国强. 点阵分布激光表面强化球铁材料的力学性能表征[J]. 中国激光, 2004, (5):20~24.
- [20] 李汉生, 许 晓. 激光打孔脉冲波形探讨[J]. 激光与红外, 1997, 27(6):340~342.

## Recent Research and Development on Laser Modification Concerned

BA Fa - hai<sup>1</sup>, SONG Qiao - ling<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China; 2. Zhengzhou Mapping School, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In this paper, research progresses on Laser-concerned surface modification is reviewed, which include: Technology and factors control. Beam spot transformation with specified array or periodicity distribution is a kind of advanced technology in the future; Numerical simulation, optimization and evaluation for technology. Semi-analytic and axis-symmetrical (FEM) model may be used to calculate the parameters and results in semi-quantitatively. The numerical simulation should focus on computation and forecasting of the temperature field, multi-phases change, microstructure evolution, final phase composition and mechanical properties for processing practical materials in the future; Laser beam quality and time-space transformation. Beam quality should correspond with the technology reproduction. On the other hand, the study on time and space distribution of beam spot will further develop new technology to satisfy the specific requirements of the modification process. Finally, further development direction on laser modification research is proposed.

**Key words:** surface modification; laser; modification on phase transformation