

近 10 余年来, 激光表面热处理技术不仅在研究和开发方面发展迅速, 在工业应用方面也取得了长足进步, 成为表面处理和表面工程界一个十分活跃的新兴领域。本文对激光表面热处理技术近年来的新进展及其应用作一简介。

1 激光表面非熔加工新进展(能量密度范围 < 20 J/mm²)

1.1 激光相变硬化(Laser Transformation Hardening, LTH)

激光相变硬化加工方法早在 70 年代就已在美国通用汽车公司 Saginaw 工厂的转向器生产线上得到应用^[1], 是现有各种激光表面处理技术中研究和应用得最多的一种方法。例如, 用于处理各类轴体(碳钢和球墨铸铁)、齿轮(铁素体铸铁和碳钢)、阀门(灰口铸铁和碳钢)、垫圈(可锻铸铁)、凸轮轴凸角(铸钢)、活塞环(铸铁和钢)、手制动棘轮(低碳钢)、辊槽拱顶(钢)、缸筒和缸套(铸铁和钢)、轴瓦(合金铸铁)和气轮机叶片缘口(马氏体不锈钢)等零件, 均能取得良好的强化效果^[1~9]。但是, 已有的 LTH 研究结果和应用数据多是零散的和经验性的。Ion 于近年提出建立 LTH 工艺图的新概念, 对于从深层次理解 LTH 的机制, 促进其工程应用或许有所帮助^[10, 11]。

图 1 给出了一个实际材料的 LTH 处理工艺图^[11]。该图是根据给定光束尺寸和材料(亚共析钢 V2906, 相当我国 45 钢), 以考察吸收功率和扫描速度对硬化层深度的影响为目标建立的。图中熔化线和硬化线(均为实线)以及 A₁ 和 A₃(均为虚线, 分别是 Ac₁ 和 Ac₃ 的等温深度曲线)系通过对加工区温度场进行热物理分析和数值模拟计算得到的; 熔化线的左上部为熔化区, 硬化线的右下部为非硬化区, 两实线的中间区域即为 LTH 加工参数的选择区。图中数据点来自试验结果, 不难看出理论计算值与试验结果的吻合程度还是相当不错的。

采取同样的办法, 我们可以建立一系列不同的工艺图来分别反映工艺条件与处理硬度和原始材料性质的关系以及工艺参数变化的影响。我们可以根据这些图选择 LTH 工艺参数、优化加工方案, 进行经济效益分析(如图 2 所示^[11])。

1.2 激光成形(Laser Bend Forming LBF)

将一束聚焦激光以一定速度扫描金属片表面(扫描速度应足够快, 如采用功率为 2kW 的光束, 速度为 4m/min, 以防

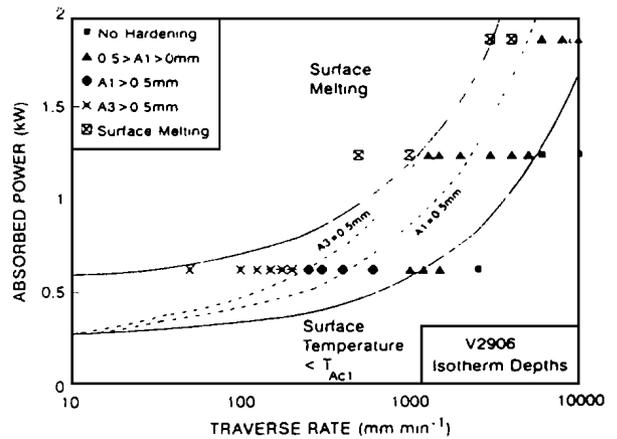


图 1 亚共析钢 LTH 工艺与硬化层深度的关系图

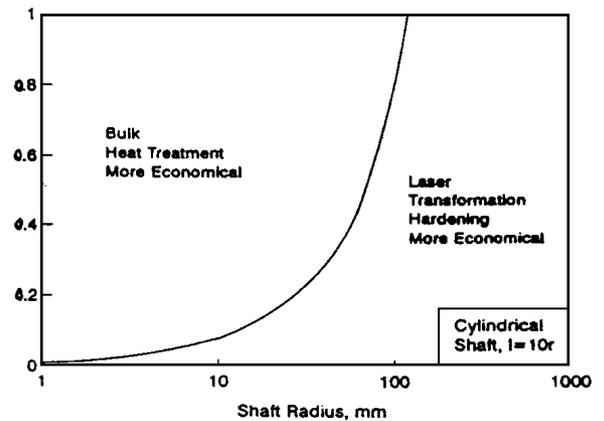


图 2 圆轴工件表面整体热处理与 LTH 处理成本比较(防止表面熔化), 作用区内的材料会因受热膨胀产生压应力; 一旦这一应力超过材料的屈服强度就会导致塑性流变。停止加热后, 随着作用区热量向周围迅速扩散, 塑性流变也随之停止。这种利用局部加热使材料发生受控变形的加工方法, 就是所谓的激光弯曲成形, 也叫激光成形(如图 3 所示^[12])。材料受激光作用时在其厚度方向形成的温度差愈大, 产生的变形就愈大, 弯曲效果也就愈显著。弯曲成形的变形量大小可通过调整工艺参数精确控制。试验表明, 激光每扫描一道次, 金属片可弯曲约 $\rho \sim 5^\circ$ 。

假设起始热应力完全转变成了塑性流变并且受辐照材料可看成为一个双层弯曲梁(上层产生弯曲力, 下层发生弯曲), Vollertsen^[13]计算了激光弯曲成形时的弯曲量:

$$\theta_b = 3 \frac{\alpha_{th} PA}{\rho c_p v} \frac{1}{t^2}$$

式中 θ_b ——每一加工道次产生的弯曲角度, $^\circ/\text{pass}$;
 α_{th} ——热导率, mm^2/s ; ρ ——密度, g/mm^3 ; c_p ——比热, J/g

陈光南: 男, 49 岁, 博士, 中国科学院力学研究所材料工程研究中心主任、研究员、博士生导师; 主要从事材料力学性能和激光表面改性方面的基础研究及推广应用工作; 已发表论文 50 余篇, 有 7 项国家专利; 有多项成果获省部级以上奖励, 其中, 作为主要研究人员完成的“轧辊激光毛化技术及其在冷轧薄钢板(带)生产中的应用”成果 1994 年获中国科学院科技进步一等奖, 1997 年被国家专利局和世界知识产权组织授予中国发明专利金奖。收稿日期: 1997 年 12 月

• C ; P —— 入射功率, W; A —— 吸收率; v —— 扫描速度, mm/s; t —— 弯曲板的厚度, mm。实际上, 影响激光成形效果的因素远不止此^[12]。例如, 涉及材料的有: 弹性模量、热膨胀系数、热导率、热容量、强度和残余应力等; 涉及激光的有: 吸收系数、输出功率、能量密度和强度分布等。涉及工件的有: 厚度、宽度、弯曲边长度和弯曲缘的形状等。

值得注意的是, 由于薄板弯曲时变形区会产生加工硬化, 其厚度也会发生变化, 这使得弯曲角度与激光扫描道次之间的关系曲线往往呈非线性。

激光弯曲成形的用途是显而易见的, 如可以明显改善焊接作业时, 尤其是焊接船板和车体时的配合程度; 无法应用重型设备或者批量小的零件, 采用这种方法进行空间(无模具)弯曲成形应是一种值得考虑的选择; 该方法也可用于小型钣金零件的快速制模以及编织针和细轴类工件的非接触高精度校直加工。

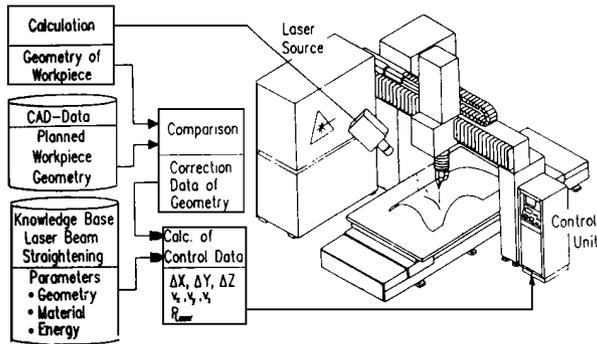


图3 激光弯曲成形装备示意^[12]

1.3 表面磁畴细化(Laser Domain Refinement, LDR)

硅钢片(电工钢)是制造变压器、继电器等机电和电子产品的重要材料。仅在美国, 其市场需求每年高达35亿美元^[14]。不断降低硅钢片的铁损, 对于提高其能量转换效率、节省能源具有重要意义, 因而一直是硅钢片产品的生产者 and 使用者孜孜以求的目标。研究表明, 采用激光划线的方法可以通过精确有效的细化磁畴来降低硅钢片的铁损并改善其磁性。图4表明了准分子(KrF)激光划线对3%硅钢磁矫顽力的影响。

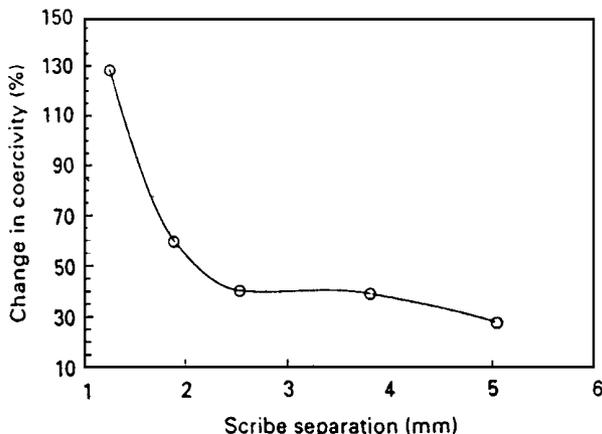


图4 准分子激光划线间距对3%硅钢磁矫顽力的影响

响。

为了不影响硅钢片的表面质量, 激光划线时, 聚集光束必须保持足够高的扫描速度(譬如: 10~100m/s), 以防止出现熔化现象。激光划线改善硅钢片磁性的原理是: 激光划过硅钢片表面时, 形成的热应力能在作用区内局部产生滑移和位错塞积, 形成新的畴壁, 原有的磁畴因此得到细化, 而细化磁畴有效减小硅钢片的涡流损失。显然, 磁畴细化的程度, 也即硅钢片的磁性能, 是可以通过调整光束质量和扫描间隔来精确控制的。研究表明, 用这种硅钢片制造交流变压器能有效降低磁滞损耗, 功率损失可减小10%^[15]。对3%硅钢片用准分子(KrF)、CO₂和Nd:YAG等3种激光进行的划线研究表明^[14]: 准分子和CO₂激光在降低硅钢片的功率损失或磁滞损耗(W_c)方面效果更佳; 而Nd:YAG激光则在提高硅钢片的导磁率(μ)和减小其剩磁(B_r)方面显得更为有效。激光划线能有效改善材料磁学性能的3种机制是: 细化磁畴、松弛内应力和制约畴壁运动。

2 激光表面熔化加工新进展(20J/mm² < 能量密度范围 < 2000J/mm²)

2.1 激光毛化(Laser Texturing, LT)

所谓激光毛化, 是将高能量密度和高重复频率的脉冲激光, 按一定方式编组(采用单脉冲或者多脉冲), 等间隔作用于工件表面并使之熔化; 同时, 用具有一定成分、压力和流量的辅助气体, 以一定的入射角吹动熔融物, 将其搬运并按指定要求堆积到溶池边缘, 形成均匀分布的精细凹坑与凸包结构(见图5)。

用脉冲激光取代传统的喷丸方法毛化加工冷轧工作辊以生产优质薄钢板, 可以获得如下优良效果: ①提高轧辊使用寿命(见图6)。其机制有三^[16,17]: 激光快速熔凝能高度细化晶粒, 其平均晶粒尺寸可小至微米或纳米量级, 甚至可获非晶组织; 显微结构的离散分布有利于改善辊面润滑条件、减小磨损; 熔凝加工产生的压应力能有效改善冷轧表面层的韧性(见图7)。④优化轧辊使用效果。主要体现在3个方面: 改善轧制时的咬入条件, 防止辊板打滑; 改善产品表面质量和板形, 防止板卷退火粘结; 赋予薄板表面指定形貌和粗糙度, 制造异步轧制效果^[18]。④改善薄板使用性能。其主要体现也在3个方面: 冲压流动性好(图8); 漆面光亮度高(图9); 均匀塑性变形能力强(图10)。

2.2 仿形激光加工(Selective Laser Sintering, SLS)^[22]



图5 激光毛化轧辊表面形貌

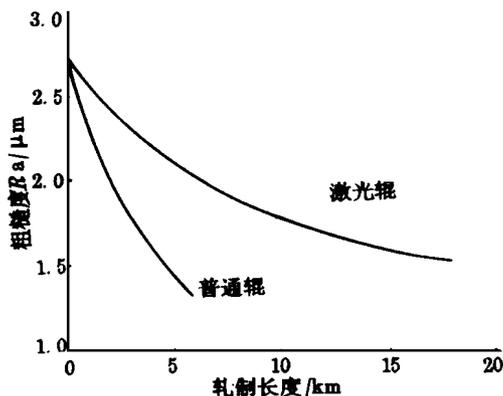


图6 激光毛化轧辊与其它轧辊使用寿命对比

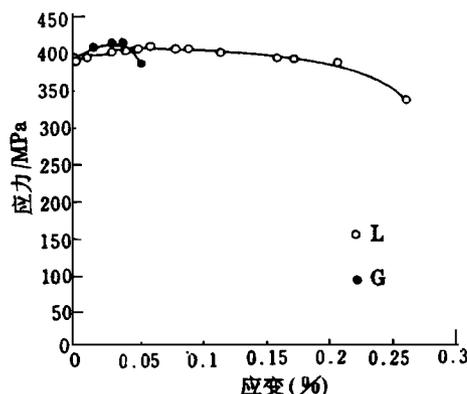


图10 激光板与光面板拉伸性能对比^[21]

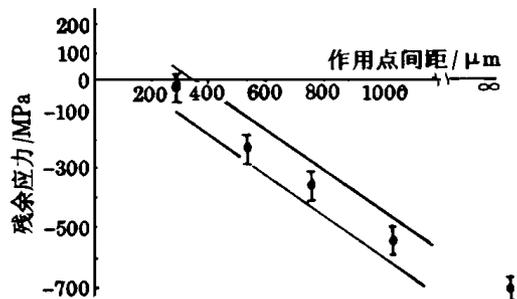


图7 激光加工参数对辊面残余应力的影响

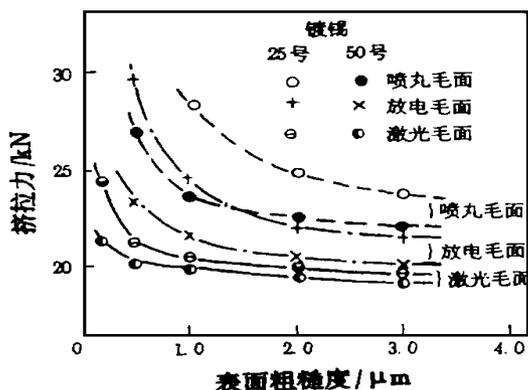


图8 不同毛面钢板(薄壁罐)成形力对比^[19]

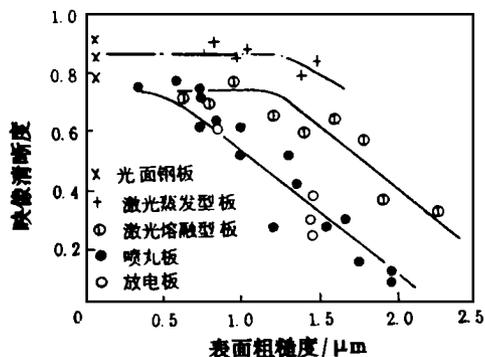


图9 不同钢板漆面光亮对比^[20]

这是一种由德克萨斯奥斯汀 DTM 公司开发的、用计算机程序控制、逐层熔化烧结以制造三维模型的快速制模工艺。例如:为了制造人造肢体或者工程模型,可以用激光逐层烧结尼龙或聚碳酸酯粉末。当然,也可以采用金属粉末来制造模型,但这种模型往往是多孔的。对于小批量工件来说,在已有的大约 30 种不同的快速制模方法中,SLS 正逐渐成为主要的设计工具甚至制造方法。

2.3 表面合金化和熔敷(Laser Surface Alloying/Cladding, LSA/LSC)

这是目前国内外激光加工界的研究热点,实验研究报告很多,但工业应用尚少。近两年我们在利用激光毛化技术有效地提高了冷轧工作辊的使用寿命和使用效果的基础上,将热轧辊作为攻关目标开展了一系列研究工作。所采用的主要方法就是激光表面合金(高速钢)化和激光熔敷原位生成陶瓷颗粒增强涂层并已取得了关键性进展。磨损试验结果表明:激光处理组织的高温耐磨损能力提高了 3 倍以上。原位生成的陶瓷(TiC)颗粒细小(纳米至微米量级)、分布均匀(如图 11 所示),显示了良好的性能特征。用热轧线材辊进行了 LSA/LSC 处理并在生产线上试用,效果良好。

3 激光气化加工新进展(能量密度范围 > 2000 J/mm²) 激光雕刻与精细制版(Laser Engraving/Microlithography, LE/LML)

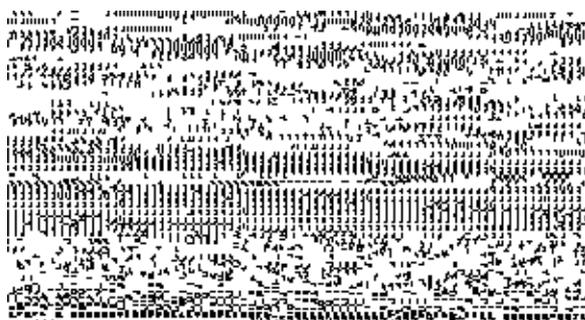


图11 激光熔敷原位生成的陶瓷(TiC)颗粒形态

1995年,我们研制成一套计算机图形处理 YAG 激光数控辊版雕刻系统^[23]。该系统可用来雕刻制作合金钢和陶瓷类辊版。其特点是,图形生成方式多样、编辑方便、精度和自动化程度高、工艺简单、加工周期短和无污染,明显优于传统的腐蚀方法。用其雕刻的合金钢辊版已在花纹双金属片冷轧生产中得到成功应用。该工艺也可用于印刷、印染和皮革等行业的辊版制作。

国外近年也开发了 CO₂ 激光制版装备及其工艺,用于制作彩印橡胶版。进一步发挥其立体印刷效果是这一工艺发展目标。

4 其它激光加工工艺

另外一些不属于热加工范畴的激光加工工艺,有兴趣者可参阅 STEEN 的综述^[24, 25]。

参考文献

- 1 Miller J E. and Wineman J A. Laser hardening at saginaw steering gear. *Metal Progress*, 1977, 111: 38~ 43
- 2 Ready J F. *Industrial Application of Lasers*. Academic Press, New York, 1978
- 3 Stanford K. Laser in metal surface modification. *Metallurgia*, 1980, 47 (3): 109~ 116
- 4 Sandven O. Laser surface transformation hardening, in *Metals Handbook*, 9th edn. American Society for Metals, Ohio, 1981, 4: 507~ 515.
- 5 Bresden A S, Gazzade S T, Inwood B C and Megaw J H P C. Laser hardening of ring groove in medium speed diesel engine pistons. *Surface Engineering*, 1988(2): 107~ 113.
- 6 Camoletto A, Molino G, Talention S. *Material and Manufacturing Processes*, 1991, 6(1): 53~ 65.
- 7 房为捷. 金属表面激光相变硬化的研究. *金属热处理*, 1982(6): 12~ 20
- 8 姚善长. 激光表面相变硬化. *金属热处理*, 1987(2): 39~ 43
- 9 王家金等. *激光加工技术*. 北京: 中国计量出版社, 1992
- 10 Ion J C. Modeling of laser material processing, in D. Belforte and M. Levitt(eds), *The Industrial Laser Handbook*. Springer-Verlag, New York, 1992: 39~ 47.
- 11 Ion J C. Process diagrams for laser transformation hardening. *Laser*

Processing: Surface Treatment and Film Deposition, J. Mazumder et al. (eds.): Kluwer Academic Publishers 1996: 587~ 612.

- 12 Geiger M, Vollertsen F and Deinzer G. Flexible straightening of car body shells by laser forming, SAE paper No. 930279. 1993
- 13 Vollertsen F. An analytical model for laser bending, in *Laser in Engineering*, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1994, 2: 261~ 272.
- 14 Patri S, Gurusamy R, Molian P A and Govindaraju M. Magnetic domain refinement of silicon-steel laminations by laser scribing. *Journal of Materials Science*, 1996, 31: 1693~ 1702.
- 15 Gällner A, Wissenbach K, Beyer E and Vitr G. Reducing core loss of high grain oriented electrical steel by laser scribing, in H. Hugel(ed), 5th Int. Conf. On Laser Manufacturing (LIM5), IFS Publishers, Stuttgart, Germany, 1988
- 16 陈光南. 毛化轧辊新方法及其应用. *应用激光*, 1997, 16(4): 155~ 158
- 17 陈光南, 沈 还等. 轧辊表面脉冲激光点状加工的强化作用研究. 94 秋季中国材料研讨会论文集: 新型材料与表面技术. 北京: 化学工业出版社, 1995: 34~ 39.
- 18 高 宏, 陈光南. 激光毛化技术产生的不对称摩擦机制研究. *中国有色金属学报*, 1997, 7(Mar.): 278~ 281.
- 19 Shen H, Chen G N and Lee G C. The plastic instability behavior of laser-textured steel sheets. *Material Science and Engineering A*, 1996 MSA 219/1~ 2, 30: 156~ 161
- 20 和久井等. 中国专利, 审定号: CN10089720. B, 公告日期: 1990年7月11日。
- 21 特开昭 64-57905(日本专利)。
- 22 Pera L and Marinsek G. The role of the laser in rapid prototyping, in S. Martelucci, A. N. Chester and A. M. Scheggi (eds), in *Proc. NATO ASI Laser Applications for Mechanical Industry*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht 1993, 238, Series E, 293~ 303.
- 23 陈光南, 于 可等. 中国专利(1996年批准)。审定号: ZL95227602. X, 公告日期: 1997年2月
- 24 Steen W M. *Laser Processing: Surface Treatment and Film Deposition*, J. Mazumder. et al. (eds.), Kluwer Academic Publishers 1996: 1~ 19.
- 25 Steen W M. *Laser Material Processing*, publ Springer-Verlag, London, Berlin, Heidelberg, 1991

〔编者按〕在《金属热处理》杂志创刊40周年之际,编辑部收到了许多通讯员和热心读者的来信,有的在信中介绍阅读《金属热处理》杂志的收获,有的为进一步办好杂志提出了宝贵的建议,还有的为本刊设计了刊徽,大家对编辑部的工作给予了肯定和赞誉,并对今后工作寄予厚望。看了大家的来信,编辑部全体工作人员受到极大的鼓舞,并对多年来给予本刊大力支持的广大读者、作者、通讯员、编委表示衷心感谢!今后本刊将恢复“读者来信”栏目,对提出有益建议者,编辑部将给予一定的酬谢。

由于版面限制,除了本期已刊出的和今后准备陆续刊出的以外,编辑部还收到了以下各位的来信,在此一并致谢。

- 宣天鹏 (合肥工业大学)
- 赵曰桂 (青岛市机械研究所)
- 沈思特 (四川工业学院)
- 孟晋辰 (牡丹江第一机床厂)

- 赵振东 (长工集团长江挖掘机厂)
- 沈长安 (上海飞人机械总公司)
- 李贤宁 程定宇 (贵州兴红机械厂)
- 许雄成 (杭州市1501信箱)
- 罗义山 (中国一拖(集团)公司)
- 远立贤 (哈尔滨石油机械配件厂)
- 刘益武 (湖南津市市湖澧盐矿)
- 韩光瑶 (天津梅塞尔凯德气体系统有限公司)
- 周 霖 (江苏扬州亚星一奔驰有限公司)
- 谭昌瑶 (四川工业学院材料系)

与此同时,编辑部全体工作人员决心进一步强化精品意识,练好内功,围绕提高期刊质量努力搞好内部管理和自身建设。依靠全行业的支持,不断开拓进取,努力创造条件,力争使刊物质量在“九五”时期再上一个台阶,早日使《金属热处理》走向世界。