



激光加工技术论文集

COLLECTED PAPERS

on

Laser Processing Technology

中国光学学会激光加工专业委员会筹备组

首届全国激光加工技术交流会

激光加工技术论文集

中国光学学会激光加工专业委员会筹备组

一九八九年十月 北京

中国大恒公司简介

中国大恒公司 (CHINA DA HENG CORPORATION) 隶属中国科学院, 主要从事光电子方面的高技术开发、生产、销售、服务一体化经营。公司拥有外贸进出口权, 可独立对外开展各种方式的合作。

中国大恒公司目前承担了中国科学院重中之重点项目—激光加工技术。该项目的任务是: 以市场为导向、以产业为目标, 研制并生产各种实用化的激光加工机及激光加工生产线。激光加工项目已被国家科委以“千瓦级大功率激光加工系统”的题目列入1989年国家火炬计划。

除了激光加工技术以外, 中国大恒公司还致力于激光医疗仪器、激光检测仪器的研制开发。现已开发生产了He-Ne激光器、双频激光测量系统、电子散斑干涉仪等多种仪器设备。

中国大恒公司可提供多种激光加工机, 可用于激光热处理、激光切割、激光焊接、激光打标、激光打孔等, 并愿意就此领域与国内外同行合作。

地址: 北京中关村科学院南路

电话: 2561285 2561889

传真: 2561897

电传: 211192 CFSTD CN

电挂: 北京 2183

前 言

呈现在您面前的是首届全国激光加工技术学术交流会论文集。激光加工在国内应用虽然由来已久，但仍可谓方兴未艾。此次会议收到的论文，无论从数量上，还是从质量上都说明我国激光加工应用领域是宽广的，前途也是诱人的。

‘激光加工技术论文集’共收入论文39篇，范围包括：激光表面改性的理论研究，激光打孔、切割、焊接和刻划等的工艺研究；激光加工领域中的新方法、新技术和新应用；激光加工用器件及激光加工其他辅助设备的研究等，其中许多文章具有较高的学术水平和应用价值。

文集的编审工作是由首届全国激光加工技术交流会筹备组完成的，其中主要工作由中国大恒公司（中科院）、航空航天部625研究所共同承担。另外，中科院力学研究所、北京市机电研究院、机电部北京机床研究所也参加了部分工作。

文集在中国科协副主席王大珩教授的直接关怀和中国光学学会的领导与大力支持下，并承蒙各有关单位的大力协助，终于如期问世了。借此机会，对各界的关心、支持表示真诚的谢意；对承担文集编辑、出版工作的中科院安徽光机所深表感谢。

我们希望文集的出版能进一步增进激光加工技术的学术交流，推动其在工业生产中的应用，并对有关的应用研究起到促进作用，为激光加工技术开拓更新、更广的应用领域。

由于时间仓促，加之编辑者水平有限，文集中的错误在所难免，敬请读者批评指正。

首届全国激光加工技术交流会筹备组

一九八九年十月于北京

促进我国激光技术

发展国民经济建设

服务

王大珩
一九八九年
九月八日

中国科学技术协会副主席
中国光学学会理事长 王大珩题词

目 录

激光表面改性的理论和工艺

激光表面强化

- 激光辐照对超高强度钢疲劳裂纹扩展行为影响的研究……张世杰等 (1) (184)
- 激光微晶及非晶化的研究……郑启光等 (9) (184)
- 45# 钢激光表面合金化的实验研究……刘文昌等 (15) (185)
- 耐热铸铁激光表面Al-Y合金化研究……王茂才等 (21) (185)
- 激光硬化处理高速(W₁₈Cr₄V)组织结构及性能的研究…梁 勇等 (27) (186)
- 钢材激光表面硬化处理……张 汉 元 (32) (186)
- 模具用钢激光相变硬化的研究……刘永镇等 (35) (186)
- 低碳钢激光淬火研究……高彩桥等 (40) (187)
- 激光热处理对球墨铸铁耐磨性的影响……高彩桥等 (46) (187)

激光重融和合金化

- 激光处理镀铬钢的研究……王 茹等 (48) (188)
- 镀铬激光合金化层组织结构特征……曾晓雁等 (53) (188)

激光熔覆和喷涂

- 激光表面改性对合金及涂层高温氧化和腐蚀行动的影响…吴维安等 (57) (189)
- 硬质合金的宽带激光熔覆……阎毓禾等 (65) (189)
- M₁₇镍基合金的激光表面Y合金改性涂层的显微组织……付广艳等 (70) (189)
- 饲料粉碎机锤片的激光熔敷……杨洗陈等 (75) (190)
- 汽车内燃机排汽阀的激光熔敷涂层……肖 冰等 (79) (190)
- 激光扫描速度对铬钼涂层熔化截面和合金烧损的影响……梁 勇等 (84) (191)

激光打孔、切割、焊接及刻划

- 脉冲激光切割性能的研究.....李晓山等 (89) (191)
齿轮激光焊接的实验研究.....陈兰英等 (94) (191)
激光切割钛合金工艺试验.....陈和祥 (98) (192)
YAG激光用于Al₂O₃陶瓷基片的打孔和切割.....罗治江 (103) (192)
陶瓷和复合材料的激光加工技术.....季汉庭 (106) (192)

激光加工领域中的新方法、新技术

- 激光加工技术在高温超导和单晶纤维中的应用.....葛云龙等 (110) (193)
激光化学气相沉积及碳化硅薄膜研究*冯钟潮等 (113) (193)
软磁盘激光指纹加密系统 (LES) 的研制.....李春金等 (118) (194)

加工用激光器件和设备

- 加工用高功率CO₂激光器的发展及面临的潜在竞争.....寿涵奋 (123) (194)
实用型 5kW CW CO₂激光器的研制.....唐士清等 (131) (194)
工业用实用型亚千瓦级快轴流CO₂激光器.....杨和逸等 (136) (195)
高平均功率脉冲Nd : YAG激光器.....杨香春等 (141) (195)
可用于激光加工的脉冲预电离高功率CW CO₂激光器.....毛英立等 (143) (195)
微波激励千瓦级CO₂激光器.....张泽渤等 (148) (196)
微机控制小型CO₂激光打孔机.....李永正等 (152) (196)
激光微加工机及应用.....罗乃草等 (156) (197)
多用途激光加工机床.....单国友等 (158) (197)
激光加工机升降旋转处理系统.....柴洪钧等 (163) (198)

其 他

- CO₂激光器催化再生装置.....东继光等 (166) (198)
二氧化碳激光功率监测反馈控制仪.....孙学英等 (172) (198)
激光加工工艺数据库建立初探.....唐家鹏等 (176) (199)
CO₂激光辐射下金属的吸收.....孙书华 (179) (199)

激光辐照对超高强度钢疲劳裂纹扩展行为影响的研究

張世杰 杨怡生 余承业

(中航技深圳企业集团) (南京航空学院)

本文的研究证明,激光辐照是改善超高强度钢30CrMnSiNi2A疲劳裂纹扩展行为,提高疲劳裂纹扩展门槛值,降低疲劳裂纹扩展速率的一项有前途的表面强化工艺。

一、概 述

文献[1]~[12]的研究工作以及本报告作者的激光表面改性对30CrMnSiNi2A疲劳裂纹扩展行为影响的研究工作[13] [14]都证明,激光辐照相变硬化(激光辐照)能够改善金属材料的抗疲劳性能及疲劳裂纹扩展行为。

本文以航空结构细节与零部件的表面强化为目标,研究了激光辐照相变硬化对超强钢30CrMnSiNi2A疲劳裂纹扩展行为的影响。本文在采取有效措施提高对疲劳裂纹扩展长度进行计算机自动检测精度的基础上,在疲劳裂纹的中等速率扩展阶段,对两种不同的导光系统激光辐照工艺参数进行优选,确定其降低疲劳裂纹扩展速率 da/dN 及延寿效益;进行疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 的定量估算;探讨产生上述效益的宏、微观机制及其断口的形貌特征;探讨激光辐照热影响区的特征及对疲劳裂纹扩展速率的影响,并对采用这一工艺应注意的事项进行了初步的探讨。

二、试样材料、尺寸及激光辐照

2.1 试验材料及尺寸

试样材料为30CrMnSiNi2A,其原始状态为退火态的 $\phi 65$ 圆钢,由大连钢厂冶炼与轧制,其化学成分及力学性能见文献[14],试样尺寸见图1,由航空工业部陕西五七二厂加工。

本文采用厚度为5mm的试样是出于如下两方面的考虑:

(1) 在飞机结构和零部件中有不少薄壁件,如某型飞机主梁替损板、飞机起落架轮轴、作用筒等,5mm厚的试样有一定的代表性;

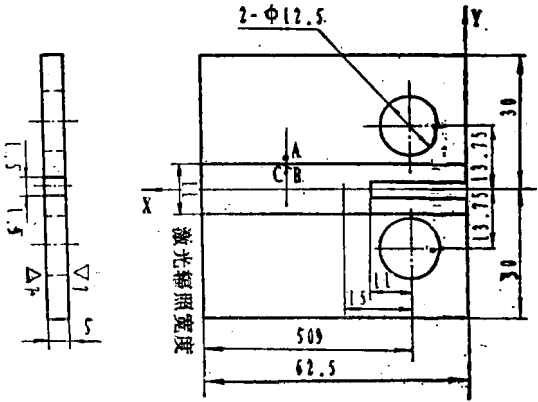


图1 紧凑拉伸 (CT) 试样及其加工尺寸

(2) 激光辐照工艺是一种表面处理工艺，试样厚度的选择须能够体现激光辐照工艺的特点。

2.2 试样的激光辐照

本报告试样的激光辐照在铁道部戚墅堰机车工艺所的HGL-81型2kW横流连续输出CO₂激光器上进行，表面的黑化采用86-1型黑化涂料，由中科院上海光机所研制。

三、试样的疲劳裂纹扩展试验

试样的疲劳裂纹扩展试验在Instron-1341上进行，裂纹扩展长度 a 的检测采用柔度法。为了保证柔度法的测试精度，本文采用实测 E 值代入柔度方程迭代修正 a 的初值误差，再用线性分配消除终值误差的方法来保证 a 的计算机自动检测精度，整个试验过程的控制及数据处理均用HP9000系列310计算机来完成。详细细节参见[15]、[16]。

四、激光辐照对30CrMnSiNi2A扩展速率影响的试验研究

4.1 激光辐照工艺参数的选择与FCPR的试验条件

本节的试验分别考察反射-聚焦导光系统与组合镜导光系统的激光辐照工艺参数对30CrMnSiNi 2A疲劳裂纹扩展速率的影响，并进行激光辐照工艺参数的优选。上述两种导光系统的示意图见图2、图3。

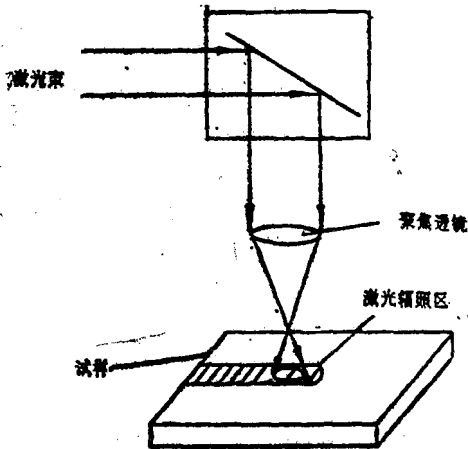


图2 反射-聚焦导光系统

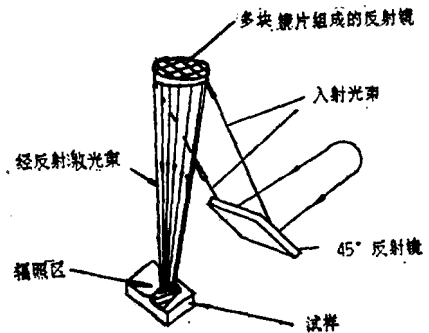


图3 组合镜示意图

考虑到激光辐照对金属表面性能的影响与激光辐照工艺参数有关，这些工艺参数是：激光束功率、激光束斑尺寸和激光束扫描速度等。本报告考虑到进行疲劳裂纹扩展试验光斑需一定的宽度，因此反射-聚焦导光系统光斑直径 D_b 取6.1mm(名义光斑直径)，组合镜导光系统光斑形状为 $11 \times 3\text{mm}^2$ 矩形斑。束斑尺寸固定，激光辐照工艺参数的优选就简化为一个二因素多水平的问题。本报告考虑四个水平，由正交试验法[17]排除使金属表面产生熔化与激光束功率密度不足使金属表层发生相变的参数组配及考虑经费的可能，安排如表1、表2所示的四组工艺参数进行两种导光系统的参数优选。

试验条件如下：

$P_{\max} = 4.22\text{KN}$ ； $P_{\min} = 0.422\text{KN}$ ；载荷比： $R = 0.1$ ；试验环境：大气；试验温

度：室温；试验波形：正弦波；试验频率，20Hz。

根据国标[16]的要求，每组试样不得少于三块，本文每组采用三~四块。

疲劳裂纹扩展速率对比试验采用DADN-DJ和DATA-ZSJ1软件进行数据采集与处理。在试验过程中，裂纹每扩展0.1mm，由打印机打印出相应的循环次数N、裂纹长度a、裂纹的拟合长度a、 ΔK 、da/dN等值，由计算机绘出da/dN- ΔK 、lg(da/dN)-lg(ΔK)数据点，并对后者进行线性拟合。对于每组试件获得的上述数据，本文采用G-IC软件在HP9000系列310计算机上进行所有数据点的曲线拟合，以获得平均的a-N, da/dN- ΔK 、lg(da/dN)-lg(ΔK)曲线[15]。

4.2 激光辐照工艺参数的优选

对于反射-聚焦导光系统所对应的激光辐照工艺参数(表1)的da/dN- ΔK 关系曲

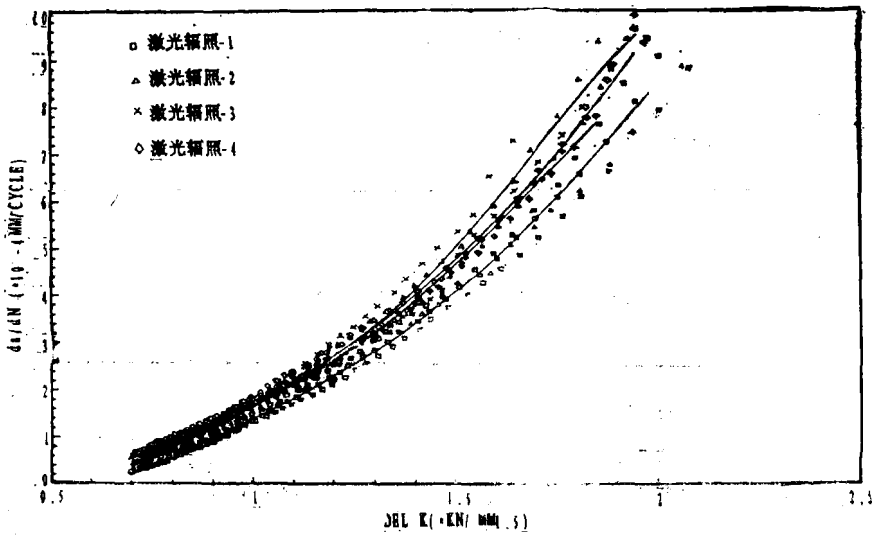


图4 da/dN与DEL K的关系曲线

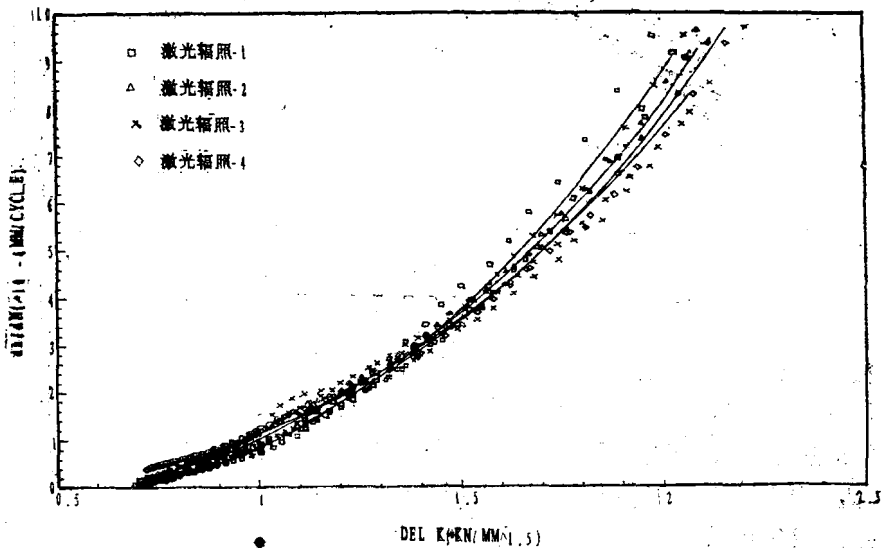


图5 da/dN与DEL K的关系曲线

线见图4，与组合镜导光系统所对应的工艺参数（见表2）的 $da/dN-\Delta K$ 关系曲线见图5。采用G-IC软件并用均方差控制拟合精度，拟合曲线见图4、图5中的实线。对比试验的结果表明，表1中的第一组参数，表2中的第三组参数为各自的最优工艺参数。

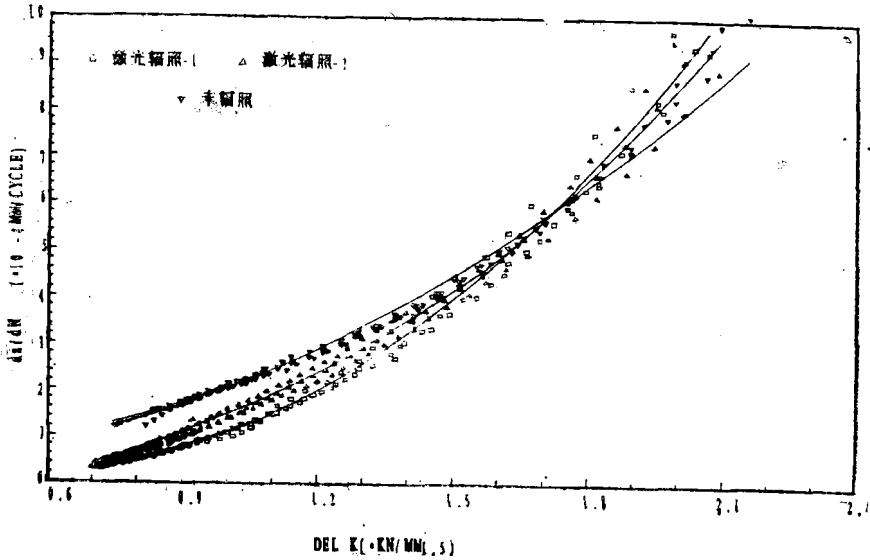


图6 da/dN 与DEL K的关系曲线

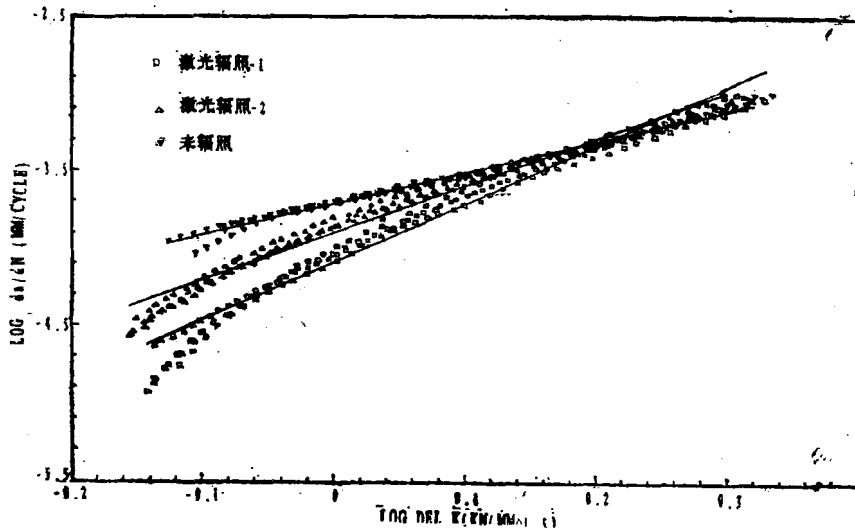


图7 LOG da/dN 与LOG DEL K的关系曲线

经优选的最佳工艺参数辐照试样与未辐照试样的 $da/dN-\Delta K$ 关系曲线, $\lg(da/dN) - \lg(\Delta K)$ 关系曲线及 $a-N$ 曲线分别见图6、图7、图8。上述图中激光辐照-1对应的是表2中的第三组参数、激光辐照-2对应的是表1中的第一组参数。

经两组优选出的工艺参数辐照试样，相对未辐照试样降低 da/dN 与提高剩余寿命 NR 的效益见表3与表4。表中降低或提高的幅度的计算方法及剩余寿命的估算方法见文献[13] [14]。

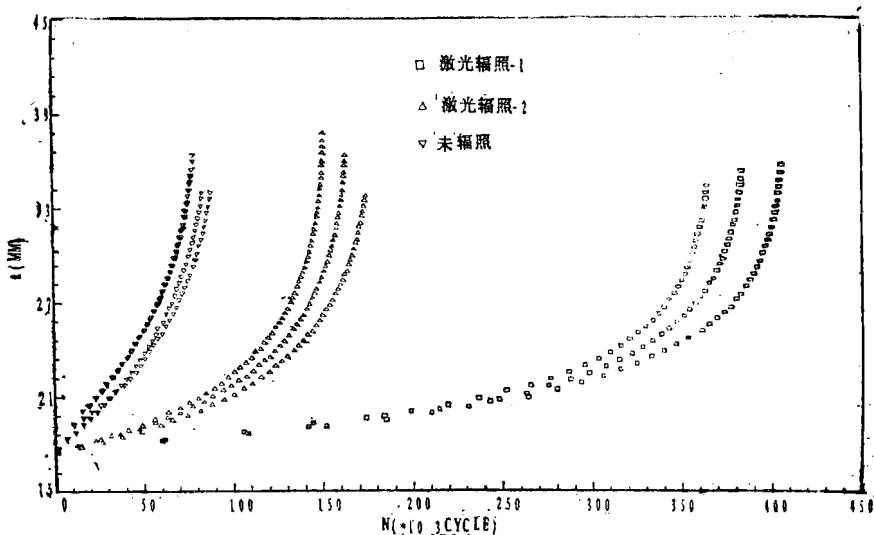


图8 a与N的关系曲线

由表3、表4可知，采用组合镜可以获得比采用反射-聚焦导光系统更好的降低 da/dN 与提高NR的效益，在 ΔK 为 $0.75 \sim 1.70 \text{ KN/mm}^{3/2}$ 的范围之内， da/dN 相对未辐照试样的降低幅度为 $83.7 \sim 83.6\%$ ，降低的幅度随 ΔK 的降低而提高，剩余寿命的提高幅度为 363.9% 。

4.3 激光束能量分布对 da/dN 与NR的影响

本报告研究了能量分布对 da/dN 与NR的影响，研究工作表明，在光束的名义能量分布相同的情况下，采用组合镜比采用反射-聚焦导光系统获得能量分布更均匀的光束，从而能获得宽而均匀的处理层。这样的处理层能获得较好的降低 da/dN 、提高NR的效益，图、表均略。

五、激光辐照对30CrMnSiNi2A近门槛区疲劳裂纹扩展速率的影响及对门槛值的估算

本报告用逐级降载法对经激光辐照与未辐照试样在近门槛区的疲劳裂纹扩展速率进行考察，其它的试验条件与4.1同。

采用表2中的第三组激光辐照工艺参数，即经4.2中进行优选出的参数与未经辐照试样在 $da/dN \leq 10^{-3} \text{ mm/cycle}$ 的范围内的 da/dN 与 ΔK 关系曲线见图9。在双对数坐标中 $\lg(da/dN)$ 与 $\lg(\Delta K)$ 的关系曲线见图10。

(1) 对图9中的曲线由国标[18]中规定的定义出发

$$\text{即: } da/dN \rightarrow 10^{-7} \text{ mm/cycle}, \Delta K \rightarrow \Delta K_{th}$$

对图9中的数据点进行多项式逼近的方法(da/dN 用 ΔK 的四次方程描述)进行求解，获得 ΔK_{th} 值。

(2) 对图10用Paris公式拟合 $da/dN \leq 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 的数据点，再进行外推获得 ΔK_{th} 值(与 $da/dN = 10^{-7} \text{ mm/cycle}$ 相对应)。

(3) 用文献[19]的方法对全部数据用非线性最小二乘法进行拟合来推算 ΔK_{th} 。

本报告的研究工作表明，本报告提出的多项式逼近法是可行的。通过用上述三种方法 ΔK_{th} 的估算与比较，试样经激光辐照后，其 ΔK_{th} 值相对未辐照试样可提高1.25倍。

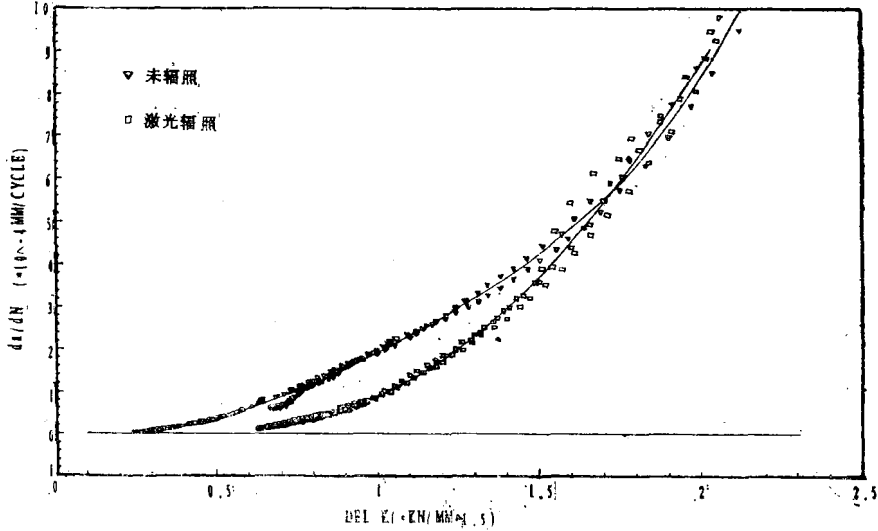


图9 da/dN与DEL K的关系曲线

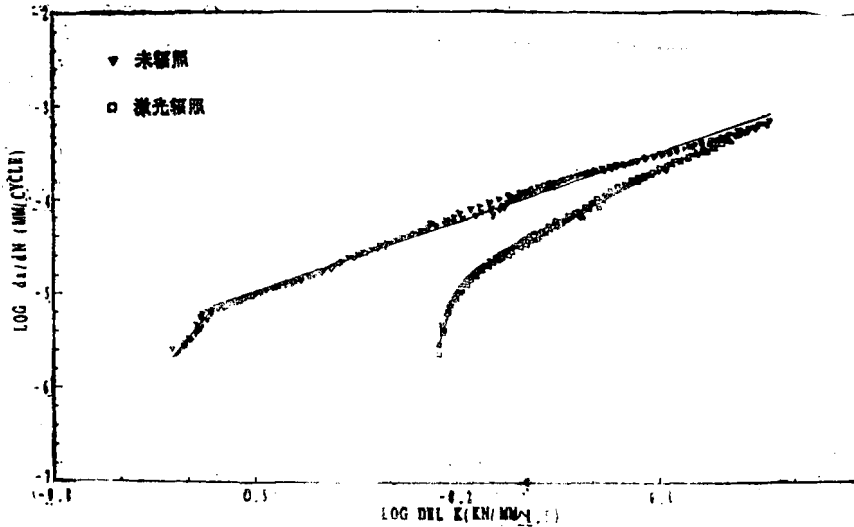


图10 LOG da/dN与LOG DEL K的关系曲线

六、激光辐照改善30CrMnSiNi2A 疲劳裂纹扩展行为的机制

对激光辐照区及基体的显微硬度进行了测试，见图11、图12、图13。测试结果表明，30CrMnSiNi2A经激光辐照后显微硬度在原有基础上获得提高，对于经等温淬火的基

体，提高幅度达 150~200Hv，经二次辐照的区域较一次辐照区域的显微硬度又有所提高，但提高的幅度不大。

对辐照区的残余应力测试表明，辐照区表面及沿层深方向都存在着残余压应力，测试结果见表5、表6。

对激光辐照区及基体的金相组织分析表明，辐照区的组织比未辐照区明显细化（照片，略）。

对断口的扫描电镜观察表明，辐照区的韧性比未辐照区的韧性有所提高，见图 14（照片，略）。

本节的研究工作表明，激光辐照区显微硬度的提高、残余压应力的存在、晶粒的明显细化及韧性的提高为改善30CrMnSiNi2A疲劳裂纹扩展行为做出了贡献。

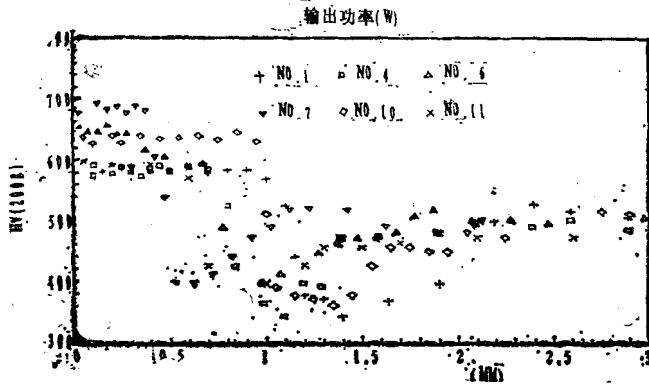


图11 沿试样深度方向显微硬度的分布

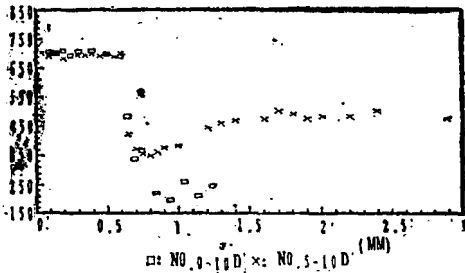


图12 沿试样宽度方向显微硬度的分布

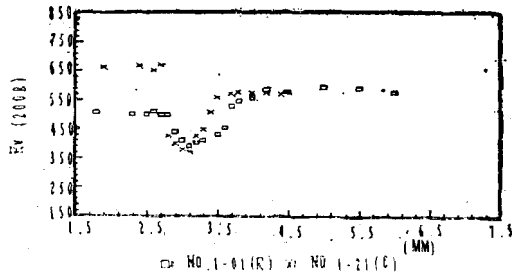


图13 沿试样宽度方向显微硬度的分布

七、激光辐照热影响区对疲劳裂纹扩展速率的影响

为考察激光辐照热影响区对疲劳裂纹扩展速率的影响，对CT试样进行图15所示的辐照，将其与未辐照试样的疲劳裂纹扩展速率相比，试验条件同 4.1。试验结果见图 16，对da/dN的影响见表7。

由表 7 可知疲劳裂纹在热影响区的扩展速率比未辐照区提高约 2.1~10.9%。但本节的研究工作表明，采用组合镜导光系统可获得宽而均匀的处理层，可有效地防止裂纹向热影响区扩展。

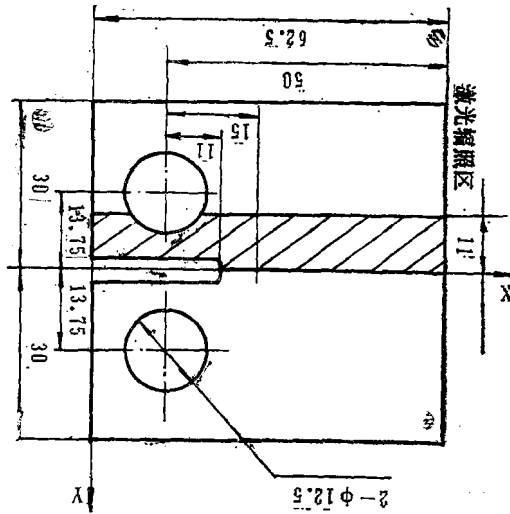


图15 热影响区疲劳裂纹扩展速率试样示意图

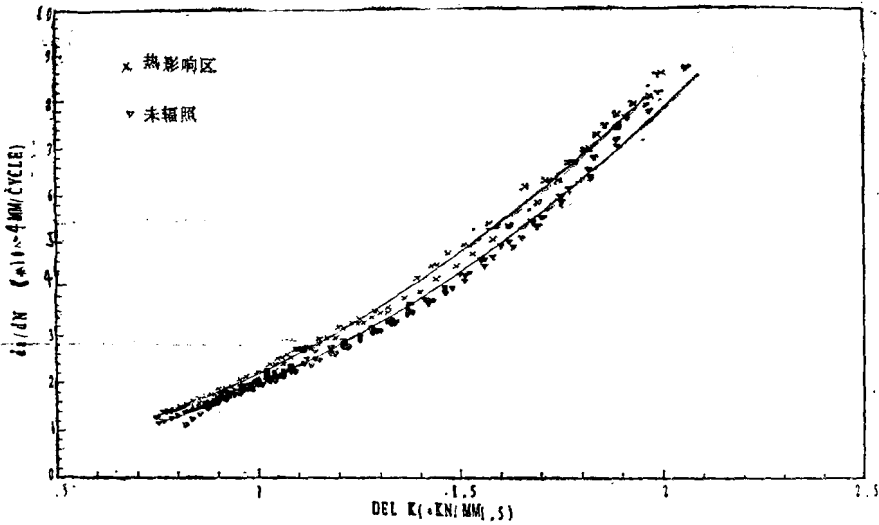


图16 da/dN 与 $DEL K$ 的关系曲线

八、本报告的主要结论

(1) 论文中用柔度法进行疲劳裂纹扩展长度的计算机自动检测。试验中采用实测的 E 值代入柔度方程迭代，消除初始误差，并用线性分配消除终值误差的方法是一种与现有裂纹扩展长度修正方法不同的方法。这一方法为用柔度法进行计算机裂纹扩展长度的自动检测，提高试验精度提供了新的途径。

(2) 论文的工作证明，激光辐照工艺是一项改善30CrMnSiNi2A疲劳裂纹扩展行为，提高疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} ，降低疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的有效的表面强化工艺。这一工艺可在不改变结构总体性能的条件下，大大提高航空薄壁结构的局部或结构细节的抗疲劳与断裂性能。本文建议，在目前的激光辐照工艺水平下，在多通道航空传力结构中可优先考虑使用这一工艺。

(3) 激光辐照工艺参数的改变会直接影响30CrMnSiNi2A抵抗裂纹扩展的能力。通过两种不同导光系统参数优化的对比试验表明,用组合镜导光系统优选出的工艺参数使30CrMnSiNi2A CT试样的剩余寿命最大可提高3.6倍;在 $\Delta K = 0.631 \text{KN/mm}^{3/2}$ 时,裂纹扩展速率的降低幅度为83.8%,疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 最大可提高1.25倍。本文的对比试验表明,在名义功率密度相同的条件下,采用组合镜导光系统可获得更高的降低 da/dN 与延寿的效益。上述数据已完全达到《AFFD》系统工程所提出的技术指标。

(4) 论文的工作表明,Paris公式即使在裂纹中等速率扩展阶段也不能精确描述裂纹在激光辐照区的扩展规律。通过用G-IC软件对试验数据拟合对比表明,采用 ΔK 的四次多项式可较精确地描述在辐照区的 da/dN 规律,并可避免繁复的材料常数确定。试样断口的SEM观察以及理论分析表明,裂纹扩展速率 da/dN 表达式的改变与延性断裂机制的参与有关。本文对裂纹扩展速率所采用的多项式描述方法对其他类型表面强化处理工艺也有参考价值。

(5) 激光辐照处理层具有比常规表面热处理更高的显微硬度、更细化的颗粒、马氏体与残留奥氏体的适宜组配、高位错密度等微观特征,并使处理层产生较高的残余应力。这些宏、微观特征所产生效益的叠加,为提高30CrMnSiNi2A疲劳裂纹扩展门槛值、降低裂纹扩展速率与延寿作出了贡献。

(6) 激光辐照工艺对经预先淬火、回火处理的30CrMnSiNi2A试样沿深度与沿表面都会产生热影响区。论文的研究工作表明,热影响区发生软化,残余压应力发生松弛,微观组织恶化,抗疲劳与断裂性能降低,从而使这一区域成为疲劳源,并使疲劳裂纹扩展速率加快。因此将这一工艺用于30CrMnSiNi2A止裂与降低 da/dN 时,除对构件的形式有所选择外,应采取恰当的工艺措施与光束的能量分布来防止裂纹向热影响区扩展。

参考文献(略)

激光微晶及非晶化的研究

郑启光 杨扬 李家镛 陶星芝 李再光

(华中理工大学激光所)

吴彤 胡汉起 王素晋

(北京科技大学) (四川石油勘察设计院)

本文研究采用高功率(5—10kW激光束)高速($50—527 \text{cms}^{-1}$)扫描铸态共晶试样,第一次获得了激光非晶(或微晶)薄层。用金相显微镜和扫描电镜观察了激光非晶化熔区的组织特征,分析了组织的转变过程。用显微硬度计检测了激光非晶化熔区的硬度分布,并研究了成分、冷却条件及不同工艺参数对显微硬度分布的影响。用X射线衍射仪分析了激光熔区的表层白亮组织,确认了非晶态的存在。最后还用光学显微镜观察分析了激光非晶熔区的裂纹情况。

一、前 言

磨损和腐蚀被认为是两种常见的零部件失效形式，全世界每年由此造成的经济损失达数百亿美元。以我国川东卧龙河油气田为例，在七十余口油气井中有各类阀件几个。因油气中较高的 H_2S 和 CO_2 含量，使阀件很快地磨蚀损坏，即使目前最好的喷焊Ni45、CO50耐磨蚀层，其寿命也较短，每年因阀件报废和阀件漏气造成的经济损失很大，因此寻找新的抗磨蚀材料就十分迫切。

众所周知，近期发展起来的非晶和微晶材料不仅具有高强度、高硬度，同时也具有高耐蚀性，是作为防腐抗蚀表层的理想材料。但是得到非晶和微晶表层的条件却是很苛刻的，只有对符合成分要求的表面进行快速熔凝才能获得。随着大功率 CO_2 激光器的发展，采用高功率密度光束快速扫描材料表面，可实现材料表面的激光淬火（表面相变硬化）、激光表面涂敷和激光表面合金化。如果采用更高的激光功率密度（ $10^5 - 10^7 W/cm^2$ ）和更快的扫描速度，就可使材料表面产生一层很薄的熔融层，具有非常高的比能量，使材料表面以极高的熔化效率局部熔化（即大部分吸收的能量用于熔化，极小部分能量进入材料内部）。以极快的冷却速度（ $10^5 \sim 10^{10} ^\circ C s^{-1}$ ）使基体保持冷态，有可能使材料表面获得所希望的非晶（或微晶）。

在我们的试验中，采用5-10kW CO_2 激光束，在几种共晶成分材料上第一次获得了激光非晶（或微晶）组织。

二、试验条件及装置

激光非晶（或微晶）的研究是在华中理工大学激光所研制的HPL-87型万瓦级激光试验机上进行的，其装置示于图1。试样放置在一个旋转的圆盘上，然后采用高功率聚焦激光束照射，采用GaAs透镜（焦距 $f = 80mm$ ），光束通过惰性气体保护罩的孔进入。

试样是设计类金属元素较低的微晶成分，以期在性能上接近微晶或非晶的前提下提高韧性。表1示出了几种试样的成分。

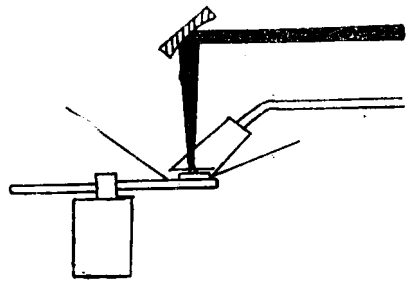


图1 激光非晶化处理装置示意图

表1 设计成分

元 素 编 号	Fe	Ni	Cr	P	B	C	Si
10	余	25	12	12	6	2	1.4
11	余	30	12	10	6	2	1.3
12	余	30	12	5	8	2	0.9

10#-12#试样制成 $\phi 18 \times 15mm^2$ 的圆块，在激光非晶（或微晶）处理之前，作者预先采用激光涂敷工艺。先在较低的激光功率密度和较慢的扫描速度下，摸索出所对应的