

45[#] 钢圆筒外表面水下激光刻槽工艺研究

李彦文 柳进转 李维新

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

提要 报道了对 45[#] 钢圆筒刻片开展的 CO₂ 激光刻槽工艺研究情况。采取了把工件浸入水中冷却的措施,克服了刻槽余热引起的烧伤现象,研究了圆筒外表面激光斜刻槽的工艺条件,并且给出了槽深度均匀性解剖检测的结果以及激光刻槽槽体的组织和性能分析。

关键词 水下激光刻槽, 刻片, CO₂ 激光

1 引 言

探索钢圆筒刻片^[1]的刻槽工艺是一个重要的课题。采用传统机械加工手段(铣槽),受刀具大小局限,刻槽宽度较大(一般对槽深度为 2 mm,刻槽宽度 ≥ 0.8 mm),难以进行斜线交叉刻片等槽分布复杂的刻槽;并且加工效率低,周期长,费用高;把激光应用于刻片的刻槽,预期会有加工速度快、效率高和刻槽宽度窄等优点;并且激光加工数控,易于进行刻片槽分布复杂的刻槽。

对激光刻槽的文献报道比较少,概括起来分为非金属材料激光刻槽,刻槽深度为 0.1~10.0 mm,工艺比较成熟^[2];金属材料激光切削^[3],刻槽深度对碳钢达 2.0 mm,不锈钢达 4.5 mm,工艺还不太成熟。把激光应用于刻片的刻槽,还没有文献报道。本文介绍了对 45[#] 钢圆筒外表面刻片进行的激光刻槽工艺研究情况。

2 刻槽要求和试验条件

刻槽要求 45[#] 钢圆筒的外径为 71 mm,壁厚为 2.9~3.2 mm,长度为 108 mm;要求在圆筒外表面上沿轴方向斜线交叉刻槽(以下简称斜刻槽)(如图 5),将柱面刻成 765 个大小形状都相同的菱形刻片,菱形顶角为 45°,平行斜线间隔为 4.58 mm,刻槽深度为 1.3 mm,槽宽度越窄越好。

试验条件 从国外引进的数控 CO₂ 激光切割机,额定激光功率为 1700 W,分连续波(CW)和脉冲(NP)方式工作。机床有三个线性轴,一个旋转轴;激光束聚焦镜焦距为 127 mm。为了降低试验成本,准备了厚 8.0 mm 的 A₃ 钢板试件若干块,进行刻槽工艺探索试验;准备了 45[#] 钢圆筒 10 个,进行圆筒的刻槽试验;以及必要的冷却水槽、刻槽解剖和测量工具。

3 工艺试验和分析

激光刻槽熔渣只能从工件表面上方排出, 这为工艺研究带来了许多有待解决的问题, 试验分析它们产生的根源, 采取相应的措施, 合理地选择刻槽工艺条件, 是进行激光刻槽工艺研究的内容。

3.1 部分工艺条件初选和存在的问题

辅助气体类型 选用普通氮气(N_2)和氧气(O_2)作为辅助气体进行的刻槽比较试验发现: 吹氮气, 一部分熔渣被从逆刻槽方向吹出, 沿槽线方向堆焊在工件表面上, 另一部分熔渣完全熔焊在槽内, 当然这是不能接受的; 而吹氧气, 熔渣为疏松的浮渣, 部分被吹出槽外, 用手或工具容易去除掉, 部分留在槽内, 剖面发现没有出现渣熔焊槽的现象, 这是由于熔渣实际上是铁和铁氧化物的混合物。另外, 铁氧燃烧是放热反应, 为激光刻槽提供了第二个能量来源。这些说明选择氧气作为辅助气体是适宜的。

喷嘴孔径 进行了喷嘴孔径为 0.8, 1.0, 1.5 和 2.0 mm 的刻槽试验, 发现喷嘴孔径小, 刻槽宽度窄, 刻槽深度浅, 有时会出现排渣困难, 引起槽上口烧伤; 喷嘴孔径大, 刻槽宽度和深度都大。考虑到壳体槽深度不太大, 希望刻槽宽度窄的要求, 比较选择孔径为 1.0 mm 的喷嘴是适当的。

喷嘴与工件间距 在激光切割中一般取喷嘴与工件间距为 1.0 mm 左右. 用该条件进行激光刻槽试验, 发现熔渣从工件表面上方排出, 容易把嘴口烧坏, 使刻槽不能正常进行; 接着又进行了间距为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 和 3.5 mm 的刻槽试验, 发现间距大于 2.0 mm 喷嘴口烧伤就大大减小了, 同时考虑到辅助气体对熔渣的有效去除性, 选取喷嘴与工件间距为 3.0 mm 左右(一般为 2.7~ 3.1 mm)。

焦点相对工件位置 通过不同焦点相对工件位置的刻槽比较试验发现: 焦点位于工件表面下, 槽宽度窄, 排渣困难, 容易发生槽口烧伤现象; 焦点在工件表面处, 槽起点烧伤严重; 焦点在工件表面上方, 槽宽度逐渐增加, 烧伤得到改善。兼顾到抑制烧伤和槽宽度窄的要求, 选取焦点在工件表面上方 1.0 mm 处。

存在问题 为了探讨因排渣方式与刻片尺寸小和数目多可能出现的问题, 在上面选定的部分工艺条件下, 用与 2.0 mm 厚的 A_3 钢板的激光切割类似的工艺条件进行了一系列激光刻槽试验, 发现存在: (1) 刻槽起点烧伤现象(如图 1 槽线右上方端点, 呈不规则的坑) 以及由此带来的槽深度不均匀现象; (2) 熔渣从工件上方排出, 有时会有损伤喷嘴口的现象; (3) 对于相邻刻槽, 先前刻槽的余热影响, 使后面刻槽深度变深、烧伤或刻透的现象(如图 1); (4) 对于

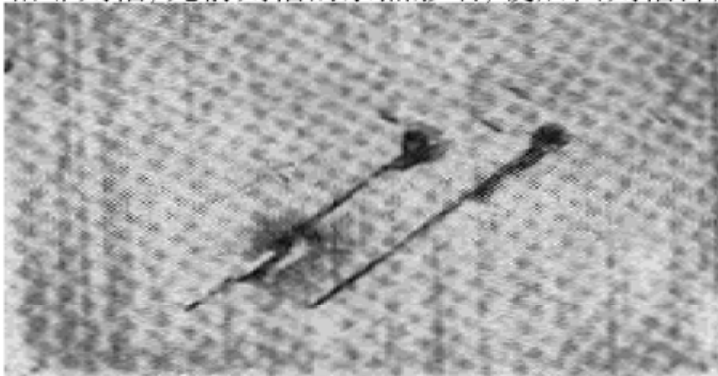


图 1 槽起点和相邻刻槽烧伤图

Fig. 1 Burns of the groove start point and adjacent groove

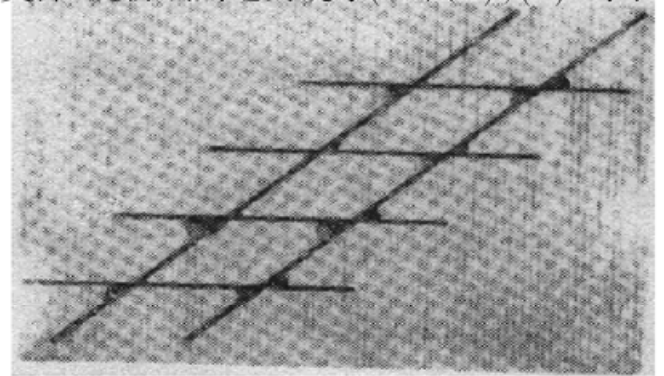


图 2 槽交叉点烧伤图

Fig. 2 Groove-cross-point burns

斜刻槽, 交叉节点易发生烧角或烧坑, 严重时将试件烧透的现象(如图 2)。

3.2 水下激光刻槽的探索试验

激光刻槽本质上是热加工过程。激光能量被工件吸收转化成热, 同时点燃铁和氧燃烧反应, 也放出热, 这些热把工件加热, 使工件熔化, 产生的熔化物被与光束同轴的氧气流吹走, 在工件上形成了槽。在进行激光相邻刻槽时, 先前刻槽的余热会沿着槽周围传导, 使后面进行的邻近刻槽过热, 出现了刻槽不稳定或严重时发生烧伤现象, 尤其对刻片尺寸小, 数目多, 这种现象更突出; 另外这些刻槽余热累积, 还会引起工件不均匀的变形。因此, 为了确保每条刻槽都具有同样的工艺条件, 采取把工件浸入水中冷却消除刻槽余热的措施, 开始了水下激光刻槽的探索性试验(如图 3)。

可行性和安全性 考虑到水对波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光几乎完全吸收, 采取了在激光头水下作业和出入水的过程中, 常吹光束同轴氧辅助气流的措施。试验表明: 在激光头伸入水下深度在 $0\sim 30\ \text{mm}$ 范围内, 喷嘴与工件间距在 $0.5\sim 5\ \text{mm}$ 之间, 辅助氧气体压力大于 $20\ \text{kPa}$, 气流都会把水吹开, 在喷嘴孔和工件之间形成一个无水的气流柱, 避免了水阻隔激光束到达工件表面和水蒸气喷射到聚焦透镜的热炸裂现象。

工件浸水深度(工件表面到水面的距离) 对钢板试件进行了不浸水和浸水深度为 $0, 3, 7, 10, 15, 20, 25$ 和 $30\ \text{mm}$ 的许多组相邻激光刻槽试验。试验中选取激光功率为 $500\ \text{W}$, 刻槽速度为 $1000\ \text{mm}/\text{min}$, 氧气体压力为 $50\ \text{kPa}$, 刻槽线长度为 $40\ \text{mm}$, 两相邻刻槽线间隔为 $4.0\ \text{mm}$, 每组连续平行刻四条槽线。试验表明: 在工件浸水深度 $\leq 10\ \text{mm}$ 的条件下, 后续刻槽较先前刻槽深; 在工件浸水深度 $> 15\ \text{mm}$ 的条件下, 相邻刻槽深度没有明显差异, 说明先前刻槽余热对后续刻槽的影响已经消除了; 同时发现工件不浸水起刻点烧伤严重, 随着工件浸水深度的增加, 起刻点烧伤逐渐得到改善, 表明水冷却工件对抑制起刻点烧伤有一定的作用; 并且还发现激光头深入水中后, 喷嘴被冷却, 喷嘴口损伤现象很少发生了。因此, 在采取了常吹光束同轴辅助气流的措施后, 水下激光刻槽是可行的和安全的; 适当选择工件浸水深度(一般可取 $15\sim 20\ \text{mm}$), 可以消除刻槽余热的影响和抑制喷嘴口损伤的现象。

3.3 槽起刻点烧伤现象的抑制

槽起刻点烧伤现象可能来自起刻点激光打孔过程和起刻激光的冲击过程。先进行了起刻点打孔试验, 激光脉冲为矩形脉冲, 其峰值宽度 (t_H) 为 $1.33\ \text{ms}$, 低谷宽度 (t_L) 为 $3.96\ \text{ms}$, 氧气体压力为 $100\sim 300\ \text{kPa}$, 工件浸水深度为 $15\sim 20\ \text{mm}$, 改变激光功率和打孔时间发现: 当激光功率 $P_L < 400\ \text{W}$ 时, 起刻点不发生烧伤现象; 当 P_L 为 $350\ \text{W}$ 和打孔时间为 $3.5\ \text{s}$ 时, 孔深度为 $1.3\sim 1.5\ \text{mm}$, 孔径为 $0.35\ \text{mm}$, 这作为圆筒激光刻槽的起刻点打孔条件; 又进行了起刻点去掉打孔过程直接刻槽的试验, 发现对氧气体压力为 $100\sim 300\ \text{kPa}$, 速度小于 $600\ \text{mm}/\text{min}$, 连续波激光功率 $< 400\ \text{W}$ 或者脉冲激光 ($t_H = 1.0\ \text{ms}$, $t_L = 0.5\ \text{ms}$) 功率 $P_L < 800\ \text{W}$, 刻槽起点不出现烧伤(坑)现象; 并且还发现: 对于刻槽起点无打孔过程直接进行刻槽, 在起刻段约 $2.0\ \text{mm}$ 内, 槽深度由浅变深, 然后逐渐稳定下来, 这对本文小尺寸刻片是不合适的, 说明起刻点打孔过程是必要的。

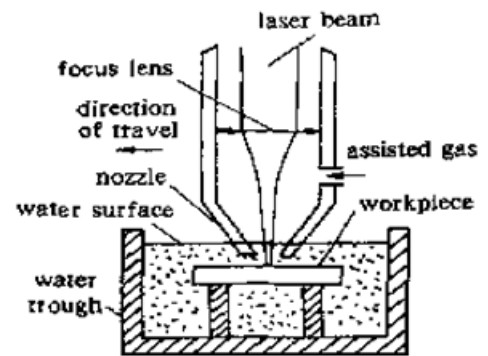


图 3 水下激光刻槽装置示意图

Fig. 3 Setup of the laser grooving system under water

3.4 斜刻槽交叉点烧伤现象的抑制

先进行了脉冲激光减小交叉节点能量重叠输入对抑制烧伤的试验,结果表明在脉冲激光

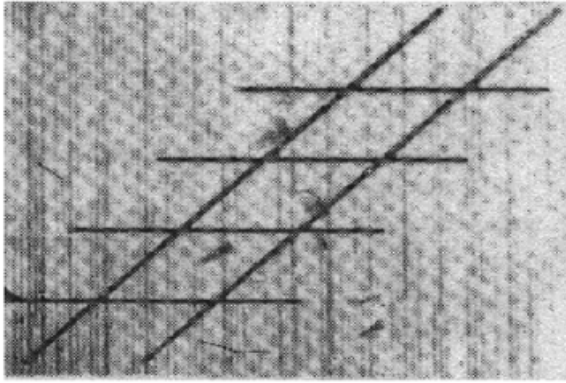


图 4 交叉刻槽图

Fig. 4 Cross-grooving without burns

功率低谷刚好跨接槽口或落在槽内时,抑制交叉节点烧伤的效果并不理想;在脉冲激光功率低谷跨越过槽口时,类似于从槽口起刻,槽深度由浅到深,影响刻槽深度的均匀性。又进行了不同氧气压力为 50, 75, 100, 150, 175, 200, 225, 250 和 300 kPa 的气流对交叉节点冷却作用的水下刻槽比较试验。刻槽线间隔取 4.0 mm,斜线交叉刻槽线夹角为 45°,首刻方向槽线和交叉槽线都为 5 条,一系列不同激光功率和刻槽速度的试验发现:随着气体压力增加,交叉节点烧伤的个数在减少;气体压力在 150~ 250 kPa 内,交叉节点烧伤现象得到了抑制(见图 4),这是由于气体压力增加,气流对交叉节点的冷却作用增强,当然气体压力过大燃烧也加剧,偶尔也出现个别交叉节点烧伤现象。因此,为了避免交叉节点烧伤现象,选取氧气压力在 150~ 250 kPa 之间。

4 45° 钢圆筒激光斜刻槽工艺

在工艺试验过程中,发现激光刻槽工艺参数条件范围很宽。如在连续波激光功率为 200~ 400 W 或脉冲激光功率为 300~ 800 W ($t_H = 1.0$ ms, $t_L = 0.5$ ms),氧气压力为 150~ 250 kPa 以及刻槽速度为 200~ 700 mm/min 的参数条件范围内,给定激光功率和氧气压力,通过改变刻槽速度很容易获得所要求的刻槽深度。

对 45° 钢圆筒,通过试验和解剖检测槽深度,选择出了一组水下激光斜刻槽工艺条件:其中首刻槽方向,连续波激光功率为 230 W,刻槽速度为 520 mm/min 和氧气压力为 200 kPa;交叉刻槽方向(与首刻槽成 45°角),脉冲激光功率为 350 W ($t_H = 1.0$ ms, $t_L = 0.5$ ms),刻槽速度为 200 mm/min 和氧气压力为 200 kPa。先后对 7 个 45° 钢圆筒外表面进行了水下激光斜刻槽加工,每个圆筒刻槽仅用时约 90 min,这比机加工刻槽要快得多;并且从圆筒外形看(见图 5),每个圆筒斜刻槽所成的 765 个菱形刻片全部规整均匀,没有发现有起点和交叉节点烧伤的现象,说明工艺可靠和稳定。同时发现圆筒没有出现整体或局部变形,这进一步说明:工件浸水

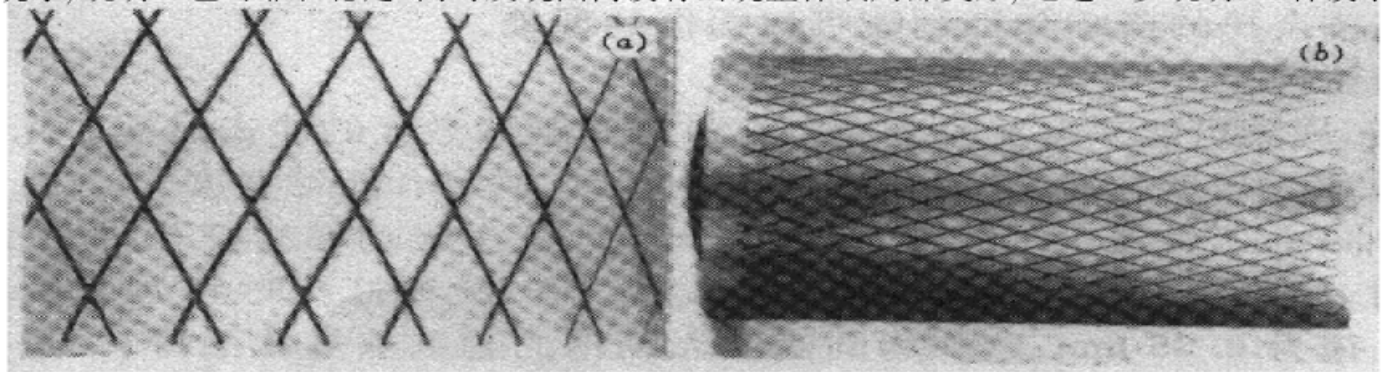


图 5 圆筒激光斜刻槽图

(a) 局部; (b) 整体

Fig. 5 Cylinder casing of laser grooving

(a) Local; (b) Whole

冷却对消除激光刻槽余热影响是成功的。

为了准确了解激光刻槽圆筒槽深度和宽度的均匀性,对其中一个激光刻槽圆筒进行了解剖检验,测量统计表明:各个刻槽交叉节点处,槽深处于 1.15~ 1.45 mm 之间,平均值为 1.39 mm,槽口宽度处于 0.33~ 0.45 mm 之间,平均值为 0.39 mm;各非节点处,槽深处于 1.00~ 1.40 mm 之间,平均值为 1.16 mm,槽口宽度处于 0.33~ 0.40 mm 之间,平均值为 0.36 mm。这说明刻槽深度不太均匀(见图 6),不及机械加工刻槽,不过仍处于可用范围(0.90~ 1.50 mm);刻槽宽度明显较机械加工(≥ 0.8 mm)要窄,这是刻片所期望的。

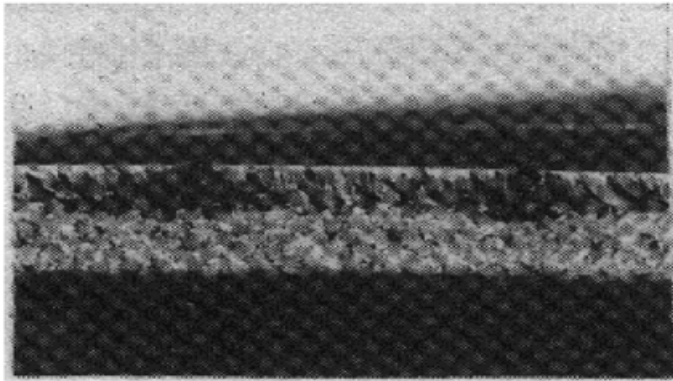


图 6 槽线剖面图(3.8×)

Fig. 6 Section of a groove

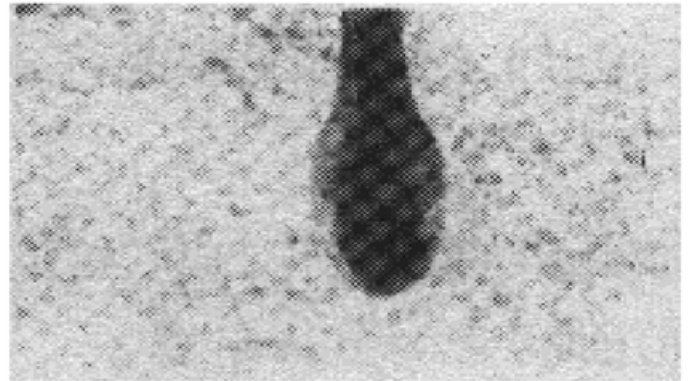


图 7 槽断面图(4×)

Fig. 7 Groove cross section

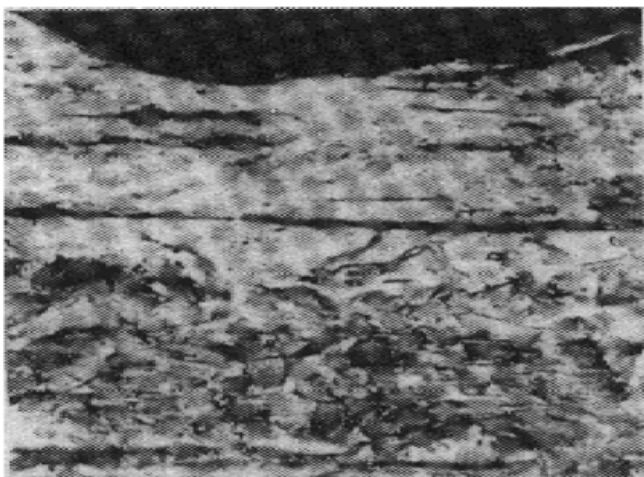


图 8 槽根部淬火层组织(100×)

Fig. 8 Organization of the groove-basis cross section

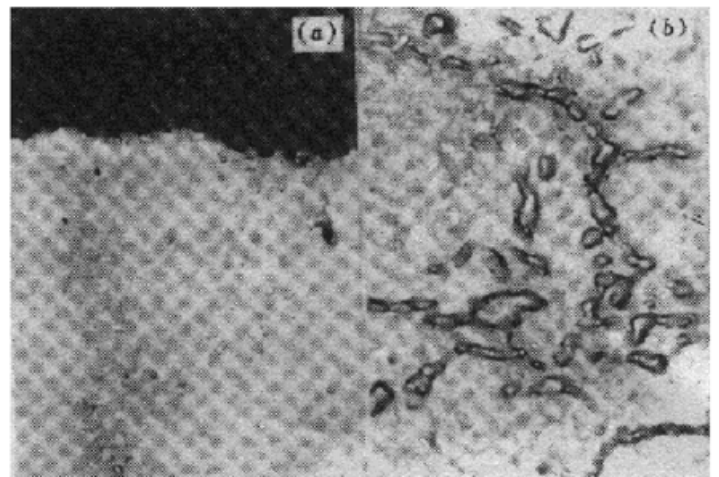


图 9 槽根部淬火层组织 ((a) 500×; (b) 200×)

Fig. 9 Organization of the groove-basis quenching layer

5 槽体组织及性能分析

为了了解激光刻槽对刻片破裂形成的特点,还进行了 45# 钢水下激光刻槽槽体组织金相分析和激光与机加工刻槽试件的拉伸断裂对比试验。试验发现:激光刻槽槽体周围存在一层很薄的脆硬淬火层(见图 7),槽根部的厚度约为 0.2 mm(见图 8 黑色槽底下面)。该淬火层靠近槽体底部表面部分,组织为隐晶马氏体(图 9),显微硬度为 HV_{0.05}946;靠近基体部分,组织为隐晶马氏体加铁素体,铁素体分布在晶界上(图 9 (b)),显微硬度为 HV_{0.05}701;基体材料(有条状夹杂物)组织为正火态(铁素体和珠光体)(图 8 下部分),显微硬度为 HV_{0.05}303。

表 1 激光刻槽和机加工刻槽试件的抗拉强度 σ_b

Table 1 The tensile strength of samples with laser grooves or milling grooves

Sample number	1#	2#	3#	4#	5#	σ_b
Laser groove σ_b /MPa	509	510	525	538	566	530
Milling groove σ_b /MPa	-	635	636	661	630	640

表 1 列出了激光刻槽和机加工(铣)刻槽试件的拉伸断裂对比试验结果,可以看出激光刻槽试件的抗拉强度 σ_b 比机加工刻槽试件约低 15%,这是由于激光刻槽槽体根部热影响区的脆硬淬硬层先裂口,使有效承载面积减小的缘故。从试件沿槽线的断裂情况看,激光刻槽的断裂面垂直整齐,有先裂层,先裂层厚度约 0.4 mm,这是因为槽根部脆硬,残余热应力高度集中,起到了向槽深度方向破裂的作用,这对实现刻片破裂形状规整性和质量均匀性的控制是有利的;比较而言,机加工刻槽断裂面不整齐,有层裂现象,对控制刻片破裂形状规整性和质量均匀性是不利的。

致谢 对参加此课题的李宏琪、刘继友和刘军同志以及对解剖检测槽深宽度的西南流体物理研究所的周光前同志,致以谢意。

参 考 文 献

- 1 M. Held. Fragmentation warheads. Washington: AIAA, 1993. 387~ 426
- 2 G. Chryssolouris. Laser Machining: Theory and Practice. New York: Springer-Verlag New York Inc., 1991. 55~ 57, 225, 245
- 3 G. Chryssolouris, J. Brecht, S. Kordas *et al.*. Theoretical aspects of a laser machine tool. *Journal of Engineering for Industry, ASME*, 1988, **110**(2): 65~ 70

Study of CO₂ Laser Grooving under Water on the Outside of a Cylinder Casing

Li Yanwen Liu Jinzhuan Li Weixin

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

Abstract This paper describes the CO₂ laser grooving technology with assisted oxygen for the cylinder casing (45[#] carbon steel). The cooling method that the workpiece is submerged under water is developed so that the irregular combustion phenomenon caused by excessive heat from the former grooving is effectively restrained. The testing results about the organization performances of the laser-grooving body and the consistency of the groove depth and width by dissecting the groove body are presented.

Key words laser grooving under water, fragmentation, CO₂ laser