

DOI: 10.7652/xjtuxb201611019

40Cr 圆棒低应力剪切的激光旋切 环形槽理论与试验研究

董渊哲, 赵升吨, 崔敏超, 霍权, 任芋见
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统剪切工艺存在的断面质量差、精度低等问题,提出了一种用于金属圆棒低应力剪切的激光旋切环形槽方法,并以 40Cr 圆棒为例,建立了 40Cr 圆棒激光旋切环形槽的数学模型;利用 $L_{25}(5^6)$ 正交试验对激光器参数(峰值功率 P_k 、脉宽 τ 、脉冲频率 f)和加工参数(加工转速 n 、离焦量 s 、重复圈数 N)等影响因素进行了研究,通过方差及槽型分析得到了各影响因素的主次关系及最优工艺参数范围,并对采用最优工艺参数旋切环形槽的 40Cr 棒料进行了剪切试验。研究表明:影响 40Cr 圆棒激光旋切环形槽深度 h 的各因素的主次顺序为 N 、 s 、 P_k 、 f 、 τ 、 n ,其中 N 和 s 的 F 值分别为 11.925 和 5.268,大于 F 的临界值 4.11,具有显著影响;最优工艺参数范围为峰值功率 $P_k \geq 9.6$ kW,脉宽 $\tau \geq 0.3$ ms,重复圈数 $3 \leq N \leq 10$,加工转速 10 r/min $\leq n \leq 25$ r/min,离焦量 $s = 0$ mm;40Cr 圆棒激光旋切环形槽的理论深度和试验深度的误差平方和为 0.112 mm²,表明理论槽深的计算公式误差小、准确度高;应用该技术的 40Cr 圆棒剪切断面平整,断面倾斜度仅为 0.3° ,比传统剪切工艺的精度提高了 12 倍以上,剪切质量公差仅为 0.35% ,比传统剪切工艺的精度提高了 6 倍以上。

关键词: 金属圆棒;激光旋切;低应力剪切;环形槽

中图分类号: TG485 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)11-0121-08

Theoretical and Experimental Study on Laser Rotary Grooving for 40Cr Bar Low-Stress Shearing

DONG Yuanzhe, ZHAO Shengdun, CUI Minchao, HUO Quan, REN Yujian
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A laser rotary grooving method on metal bar for low-stress shearing was developed to improve the precision of billets. A mathematical model was established through theoretical analysis on the laser rotary grooving process of 40Cr bars, and then $L_{25}(5^6)$ orthogonal tests were conducted to study the influence of factors including the laser parameters such as peak power (P_k), pulse width (τ) and pulse frequency (f), and the processing parameters such as processing speed (n), defocusing amount (s) and repeat turns (N). The influence order and optimum range of these factors were obtained by means of ANOVA analysis, and further shearing experiment was carried out on 40Cr bars. The results indicate that the influence order of the factors is $N > s > P_k > f > \tau > n$, and the F values of N and s are 11.925 and 5.268 respectively, both of which

收稿日期: 2016-03-29。 作者简介: 董渊哲(1989—),男,博士生;赵升吨(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51335009);国家 04 科技重大专项资助项目(2009ZX04005-031);陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2011KTCQ01-04)。

网络出版时间: 2016-09-23 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160923.1550.008.html>

have remarkable effects. The optimum ranges of these influencing factors are: $P_k \geq 9.6 \text{ kW}$, $\tau \geq 0.3 \text{ ms}$, $3 \leq N \leq 10$, $10 \text{ r/min} \leq n \leq 25 \text{ r/min}$, and $s = 0 \text{ mm}$. The sum of squares of errors (ϵ) between theoretical depth and real depth is 0.112 mm^2 which proves that the calculation formula of theoretical groove depth h is accurate. Compared with the 40Cr billets processed by traditional shearing, the sheared surface inclination is 0.3° , and the weight tolerance is only 0.35% , resulting in an accuracy improvement of more than 13 times and 8 times, respectively.

Keywords: metallic bar; laser rotary grooving; low-stress shearing; annular groove

金属圆棒的剪切广泛存在于航空航天、汽车工业、轴承工业、装备制造业等众多行业中,剪切数量巨大。传统的冲床剪切工艺通过刃口锋利的剪切模一次剪断圆棒,存在剪切力大、精度低、断面呈“马蹄形”塌陷等问题。随着冷、温挤压,精密模锻,精密辗压和电热锻等近净成形新工艺、新技术的发展,急需高效、精密的剪切技术提供支撑。

基于裂纹技术的低应力剪切^[1-2]作为一种新的精密剪切工艺,首先在棒料的预剪截面处开制环形的应力集中槽,进而按一定的加载方式促使裂纹萌生、扩展^[3-4],从而完成剪切,具有断面质量好、高效、节能的优点。目前,应力集中槽的预制主要通过车床、铣床等加工,所加工的应力集中槽呈V形^[5],存在着应力集中系数不高、切屑浪费、刀具磨损等问题。同时,高硬度材料的应力集中槽加工一直是低应力剪切过程中的关键难题。

激光切割利用聚焦后的高功率密度激光束照射待加工物体表面,使局部材料快速升温至熔化、气化^[6-7],同时采用高压气体辅助吹离,以达到开槽或切割的目的,具有精度高、切缝小、无接触、可加工超硬材料等优势。Michael 等对比研究了金属对 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 间不同波长激光的吸收率和吸收强度,发现 $1 \mu\text{m}$ 波长的光纤激光器的切割效率高于 $10 \mu\text{m}$ 波长的 CO_2 激光器及盘形激光器的效率^[8]。Kheloufi 等基于 Navier-Stokes 方程和能量守恒方程建立了激光切槽的有限体积模型,对工件的瞬态温度场和切口形成进行了数值模拟^[9]。Bazyleva 等测量了不同激光切割速度下的工件温度场变化,研究了能量损失与切割速度的关系^[10]。Golnabi 等探究了激光功率、切割速度对槽宽的影响规律^[11]。国内学者丁升等对激光辐照转动充压壳体的热力学问题进行了数值计算,获得了圆柱壳壁上的温升、应力、应变等物理图像^[12];段文强等研究了激光旋切法加工微小孔的工艺特点,对旋切路径、旋切速度、旋切圈数 3 个关键参数对孔质量的影响规律进行了探讨^[13];陈

聪等对光纤激光切割铝合金薄板的工艺特性进行了研究^[14];杨慎华、郑祺峰等采用 Nd:YAG 激光器进行了连杆裂解槽加工试验,分析了不同切割参数加工的裂解槽的质量,并进行了优化^[15-16]。

目前,激光切割研究主要集中于板材切割、打孔及发动机连杆裂解等加工过程。本文针对低应力精密剪切的尖角深槽的槽型要求^[5],即槽根圆角半径小于 0.1 mm ,槽深 h 和棒料直径 D 的关系满足 $h \geq (4 \sim 5)\%D$,提出了一种用于低应力剪切的激光旋切环形槽的方法,并对机械制造业广泛使用的 40Cr 圆棒的激光旋切环形槽过程进行了理论分析和试验研究。

1 激光旋切环形槽方法

本文采用的毫秒激光旋切试验台包括 JK300D 型 Nd:Yag 激光器、光纤、激光头三轴精密运动系统、棒料回转系统及机身等。JK300D 型激光器参数为:波长 $1.064 \mu\text{m}$,峰值功率 $0 \sim 16 \text{ kW}$,频率 $1 \sim 1000 \text{ Hz}$,脉宽 $0.2 \sim 5 \text{ ms}$,焦距 12.9 mm ,聚焦半径 0.2 mm 。这种激光器波长短,光的集成性好,适合切割金属窄缝、盲槽等^[7]。加工时,通过棒料的回转运动和激光头的直线插补运动,按剪切长度在棒料表面开制等间距的环形槽,并采用压缩空气作为辅助气体进行助燃和吹渣。图 1 为激光旋切环形槽方法示意图。

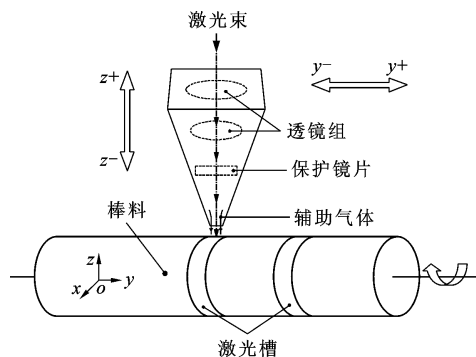


图 1 激光旋切环形槽示意图

2 物理过程与数学模型

40Cr 圆棒的旋切物理过程可看作激光脉冲的密排打孔过程。假设直径为 D 的 40Cr 圆棒以转速 n 绕中心轴 y 旋转,使得激光在棒料表面形成由一系列半径为 r 的光斑组成的圆周轮廓,并将材料逐层进行去除,最后形成具有一定宽度 w 、深度 h 的环形槽。

图 2a 所示为激光光斑扫描轨迹,一个圆周上的光斑数量为 k ,相邻 2 个脉冲孔的重叠长度 δ 决定了环形槽的连贯程度

$$k = \left(\frac{60}{n}\right) / \left(\frac{1}{f}\right) = \frac{60f}{n} \tag{1}$$

$$\delta = \begin{cases} 2r - \frac{\pi n D}{60f}, & n < \frac{120rf}{\pi D} \\ 0, & n \geq \frac{120rf}{\pi D} \end{cases} \tag{2}$$

图 2b 所示为 Nd:YAG 激光器输出的脉冲波形,可调节参数包括峰值功率 P_k 、脉宽 τ 、脉冲频率 f ,其峰值功率密度(即脉冲强度 I_0)由下式计算

$$I_0 = \frac{P_k}{\pi r^2} \tag{3}$$

当第一束激光脉冲垂直照射 40Cr 圆棒表面的位置 1 时,在位置 1 取半径为 r 、厚度为 dz 的表面薄层,到达此薄层的激光强度为 I ,减少量为 dI ,40Cr 圆棒的吸收系数为 α ,在厚度范围内积分可得

$$\int_0^z \frac{dI}{I} = -\alpha \int_0^z dz \tag{4}$$

则激光通过厚度为 z 的 40Cr 材料后的强度为

$$I = I_0 e^{-\alpha z} = \frac{P_k e^{-\alpha z}}{\pi r^2} \tag{5}$$

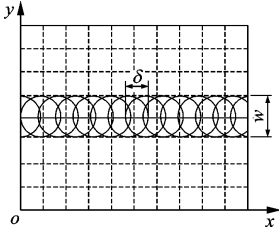
式中:吸收系数 α 与激光波长 λ 和 40Cr 的直流电阻率 ρ_R 存在如下关系

$$\alpha = 0.365 \rho_R^{1/2} \lambda^{-1/2} \tag{6}$$

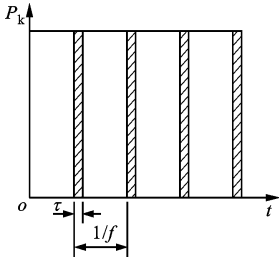
在激光照射下,40Cr 圆棒表层的温度不断上升,直至熔化或气化后被辅助气体吹走。Powell 的研究表明,材料的气化去除量与材料表面的吸收熔化潜热系数 L_f 、气化潜热系数 L_v 有关,而辐射损失的比例小于 1%,对流损失小于 2%^[16]。忽略辐射、对流损失及瞬时热传导,单脉冲内热流密度 q 与气化去除质量 m 的关系为

$$q \tau \pi r^2 = I \tau \pi r^2 = m [c(T_b - T_0) + L_v + L_f] \tag{7}$$

式中: c 为 40Cr 材料的比热容; T_b 为材料的沸点温度; T_0 为材料的初始温度。设去除体积是半径为 r 、厚度为 h_0 的圆柱层,则去除质量



(a)激光光斑扫描轨迹



(b)激光脉冲波形

图 2 激光旋切时的光斑扫描轨迹及脉冲波形

$$m = \pi r^2 \rho h_0 \tag{8}$$

第二束脉冲到来时,光斑移动到位置 2,对位置 2 的材料进行熔化和去除。这样旋切一周重新回到位置 1 后,再在下一层产生新的熔化和去除。经过 N 周逐层去除后,便形成了宽度为 w 、深度为 h 的环形槽。这里宽度 w 主要由激光聚焦光斑的半径 r 决定,槽深 h 则按下式计算

$$h = \int_0^t \frac{q(t)}{\rho [c(T_b - T_0) + L_f + L_v]} dt \tag{9}$$

式中: $q(t)$ 是与时间有关的热流密度。

实际上 40Cr 材料的电阻率 ρ_R 和比热容 c 与温度均存在非线性关系。为简化计算,本文取不同温度范围内的平均值作为定常量,代入式(5)~式(8),可得简化的槽深 h 的计算公式

$$\frac{h}{e^{-\alpha h}} = N \frac{0.365 \rho_R^{1/2} \lambda^{-1/2} P_k \tau}{\pi \rho r^2 [\bar{c}(T_b - T_0) + L_f + L_v]} \tag{10}$$

式中: $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$ 。对于 40Cr 材料,相关参数的取值为 $\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$, $\bar{c} = 0.697 \text{ J/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$ ^[17], $T_b = 2\,672^\circ\text{C}$, $L_v = 6\,077 \text{ J/g}$, $L_f = 74.32 \text{ J/g}$ ^[17-18]。电阻率 ρ_R 随温度的变化满足

$$\rho_R = \rho_0 [1 + \beta(T_b - T_0)] \tag{11}$$

其中 $\beta = 0.006\,51 \text{ } \Omega \cdot \text{m}/^\circ\text{C}$, 20°C 下 $\rho_0 = 9.78 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ^[19],计算可得 $\bar{\rho}_R = 9.42 \times 10^{-7} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 。将上述参数代入式(9),可得 40Cr 圆棒的槽深计算公式

$$h = [0.191 \text{ lambertw}(0.024 p_k \tau N)]^{-1} \tag{12}$$

式中:lambertw 函数为形如 $f(w) = we^w$ 的反函数。

3 正交试验

在对 40Cr 圆棒进行激光旋切环形槽的过程中,激光器参数(峰值功率 P_k 、脉宽 τ 、脉冲频率 f)和加工参数(加工转速 n 、离焦量 s 、重复圈数 N)等对槽深 h 和槽型有不同程度的影响。本节将采用正交试验的方法对影响槽深和槽型的主要影响因素进行分析,并对激光旋切的工艺参数进行优化选择,以满足低应力剪切的要求。

3.1 试验设计

试验材料为热轧、退火态的 40Cr 圆棒,圆棒的直径为 30 mm,长度为 500 mm。按照垂直入射方式,对脉冲激光的峰值功率 P_k 、脉宽 τ 、脉冲频率 f 、离焦量 s 、加工转速 n 、重复圈数 N 共 6 个因素按照 $L_{25}(5^6)$ 进行水平值设计,如表 1 所示。沿 40Cr 圆棒轴线按 50 mm 间距依次进行 25 次试验,时间间隔为 5 min,重复试验 3 次。辅助气体为压缩空气,压强为 0.6 MPa,室温为 23 ℃。

表 1 正交试验因素水平表

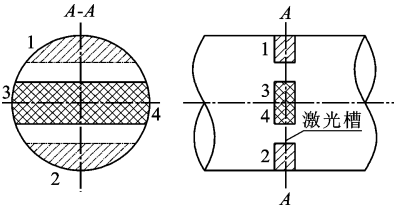
水平	1	2	3	4	5
P_k/kW	6.4	8.0	9.6	11.2	12.8
τ/ms	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
f/Hz	20	30	40	50	60
s/mm	-0.4	0.0	0.4	0.8	-0.8
$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	5	10	25	50	100
N	1	2	5	10	20

3.2 试验结果

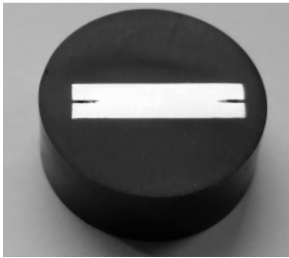
按图 3a 所示位置取样,利用光学显微镜观测环形槽表面及剖面,测量深度为 h ,并利用激光共聚焦扫描电镜观测环形槽的三维形貌。计算 3 次重复试验下各因素不同水平所对应的 h 之和及其平均值 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 、 h_5 ,进一步计算偏差平方和 Q ;根据 F 表按自由度为 4、 $\alpha=0.05$ 查得 F 的临界值 F_c 。为 4.11,并进行方差计算,得出 F 值,见表 2。

表 2 正交试验各因素的统计结果

结果	P_k	τ	f	s	n	N
h_1/mm	0.445	0.375	0.436	0.671	0.807	0.081
h_2/mm	0.466	0.511	0.581	1.051	0.640	0.259
h_3/mm	0.491	0.560	0.937	0.244	0.644	0.536
h_4/mm	0.721	0.628	0.678	0.702	0.551	0.947
h_5/mm	0.962	0.674	0.457	0.417	0.440	1.126
Q/mm^2	0.992	0.685	0.820	1.886	0.358	4.269
F	2.771	1.913	2.291	5.268	1.000	11.925
F_c	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11



(a) 取样位置



(b) 试样

图 3 40Cr 圆棒取样位置及试样图

4 结果分析

4.1 因素指标及方差分析

图 4 为激光器影响因素的效应曲线,从中可以看出:从水平 1 到水平 5,随着峰值功率 P_k 、脉宽 τ 的增加,环形槽深度 h 也随之增加,表明 40Cr 材料的去除量主要由脉冲能量决定,亦即槽深 h 主要由脉冲能量决定;在水平 1、水平 2 的低水平范围内, τ 的影响大于 P_k 的影响,而在高水平范围内, P_k 对 h 的影响更大;当 f 从 20 Hz 增大到 40 Hz 时, h 也随之增大,但当 f 继续增大时, h 则明显减小。

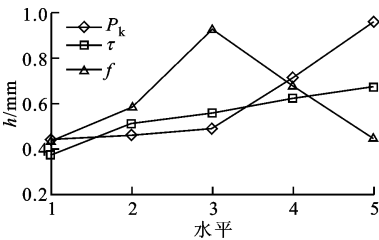


图 4 激光器因素的效应曲线图

图 5 为加工参数影响的效应曲线,从中可以看出:从水平 1 到水平 5,随着 n 的增加, h 随之减小;随着 N 的增加, h 随之显著增大;当 s 在水平 2($s=0$ mm)时, h 达到最大值。

根据式(1)、式(12),脉冲频率 f 和加工转速 n 共同影响脉冲孔的连贯程度,理论上不直接影响槽深变化,而在实际加工中,在一定范围内当 f 增大或当 n 减小时,脉冲孔之间的重复作用区增大,导致局部槽深增加,会对整体槽深测量造成一定的影响。

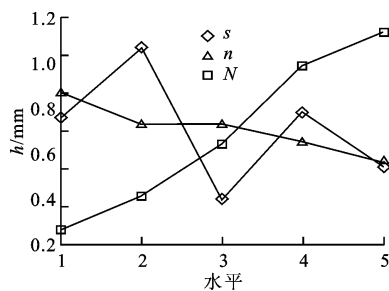


图 5 加工因素的效应曲线

本文主要考虑式(12)中的 P_k 、 τ 和 N 对槽深的影响。

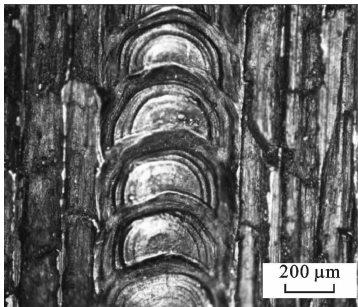
表 2 中的偏差平方和数据表明,影响 h 的因素的主次顺序为 N 、 s 、 P_k 、 f 、 τ 、 n ,其中 N 和 s 的 F 值大于 F 的临界值,具有显著的影响。最大切槽深度的参数组合(括号内是水平值)为: $N(5)-s(2)-P_k(5)-\tau(5)-f(3)-n(1)$ 。

4.2 槽型分析

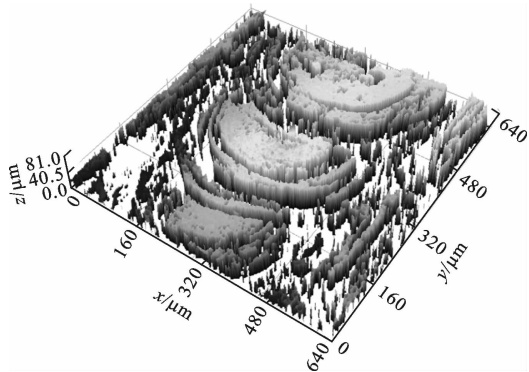
4.2.1 脉冲能量对槽型的影响 根据式(12)可知,在激光能量作用下材料的去除量主要由脉冲能量决定,进而决定了脉冲孔洞的深度。对于图 6 所示的槽型,激光参数为 $P_k=6.4\text{ kW}$, $\tau=0.3\text{ ms}$, $f=30\text{ Hz}$,其他参数为 $s=0\text{ mm}$, $n=10\text{ r/min}$, $N=2$ 。由图 6 可见,在低脉冲功率下,槽型呈连续的“草帽”状轮廓,外圈材料被切除,内圈材料融覆为“梯田状”,未切除出适合低应力剪切的尖角深槽。

4.2.2 离焦量对槽型的影响 对于图 7a 所示的槽型,取 $s=-0.4\text{ mm}$,其他参数为 $P_k=11.2\text{ kW}$, $\tau=0.3\text{ ms}$, $f=60\text{ Hz}$, $n=5\text{ r/min}$, $N=10$ 。加工时激光束聚焦在圆棒上方呈发散状,圆棒表面聚焦的激光光斑较大,同时能量密度较弱,使环形槽呈入口宽度大($w=785.47\text{ }\mu\text{m}$)、深度小($h=165.67\text{ }\mu\text{m}$)的“喇叭”形。

对于图 7b 所示的槽型,取 $s=0.4\text{ mm}$,其他参数为 $P_k=9.6\text{ kW}$, $\tau=0.3\text{ ms}$, $f=50\text{ Hz}$, $n=$



(a)平面槽型图

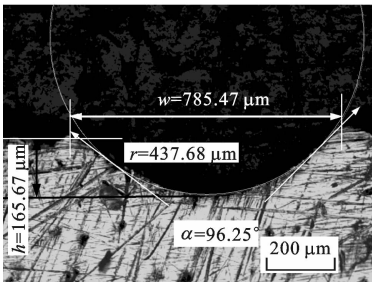


(b)三维槽型图

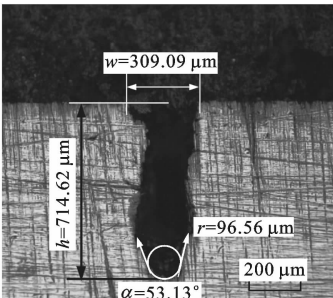
图 6 低脉冲能量旋切的槽型图

25 r/min, $N=20$ 。加工时激光束聚焦在圆棒内部,环形槽深度为 $714.62\text{ }\mu\text{m}$,在焦平面处分为上、下 2 部分:上部入口宽度较大,为 $309.09\text{ }\mu\text{m}$,在焦平面附近减小;下部呈尖角形,张角为 53.13° ,槽底圆弧半径为 $96.56\text{ }\mu\text{m}$ 。

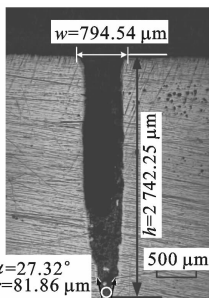
对于图 7c 所示的槽型,取 $s=0\text{ mm}$,其他参数为 $P_k=12.8\text{ kW}$, $\tau=0.5\text{ ms}$, $f=40\text{ Hz}$, $n=5\text{ r/min}$, $N=20$ 。加工时激光束聚焦在圆棒表面,聚焦光斑小、能量高, h 达到 $2742.25\text{ }\mu\text{m}$,满足 $h\geq(4\sim 5)\%D$,同时激光束强度分布较均匀,在一定深度范围内得到了近似圆柱形截面的均匀环形槽,槽底呈尖角形,张角为 27.32° ,槽根圆角半径为 $81.86\text{ }\mu\text{m}$,小于 0.1 mm ,满足尖角深槽的低应力剪切要求。



(a) $s=-0.4\text{ mm}$



(b) $s=0.4\text{ mm}$



(c) $s=0\text{ mm}$

图 7 不同离焦量旋切的槽型图

4.2.3 加工转速对槽型的影响 图 8a~8e 为对应不同加工转速 n 的槽型俯视图,可以看出随着 n 从 100 r/min 逐渐减小到 5 r/min,相邻 2 个脉冲孔的重叠长度 δ 逐渐增大,直到形成连贯的环形槽。由图 8a、8b 可见,当加工转速为 50~100 r/min 时,脉冲孔未贯通成槽;由图 8c、8d 可见,当加工转速为 10~25 r/min 时,相邻脉冲孔连贯程度适中;由图 8e 可见,当加工转速为 5 r/min 时,激光作用区域重叠率过高,重复浪费能量。图 8f 为加工转速为 100 r/min 时的槽型剖面图,可见由于加工转速过高,压缩空气来不及将熔化、气化的 40Cr 材料完全吹走,导致材料冷却后迅速凝结堵塞环形槽。

综上所述,当 $P_k \geq 9.6 \text{ kW}$ 、 $\tau \geq 0.3 \text{ ms}$ 、 $3 \leq N \leq 10$ 、 $10 \text{ r/min} \leq n \leq 25 \text{ r/min}$ 、 $s = 0 \text{ mm}$ 时,可加工出满足低应力剪切所需的理想环形槽。

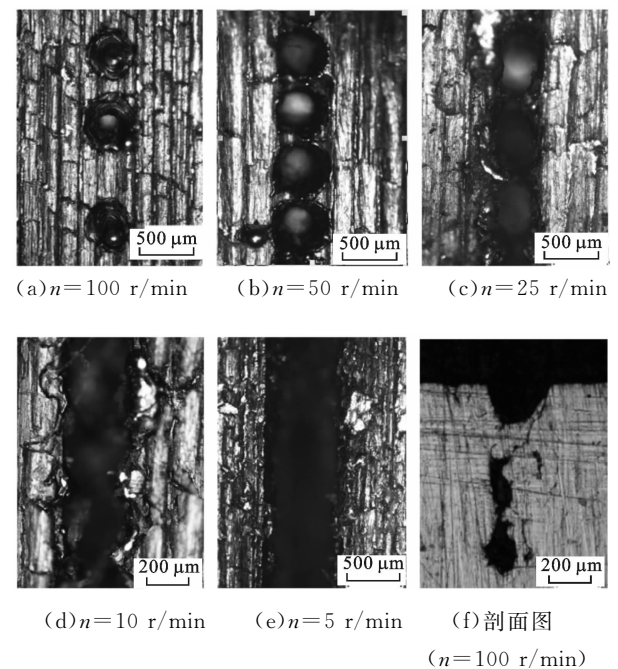


图 8 不同加工转速旋切的槽型图

4.3 槽深公式校验

为进一步校验槽深 h 的计算公式(12),采用 $P_k = 12.8 \text{ kW}$ 、 $\tau = 0.3 \text{ ms}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$ 、 $n = 20 \text{ r/min}$ 和 $s = 0 \text{ mm}$ 的优化加工参数,对本试验中的 40Cr 圆棒分别进行 N 为 3、5、10、15 的 4 组激光旋切加工试验,并重复进行 3 次,同时根据式(11)进行理论槽深的计算。图 9 为理论计算槽深 h_o 和试验测量槽深 h_e 的结果对比。

$h_o(N)$ 和 $h_e(N)$ 的误差平方和 ϵ 按式(13)计算为 0.112 mm^2 ,表明理论计算公式对样本观测值拟合误差小、优度高。

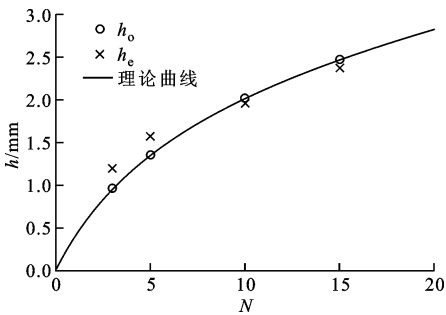


图 9 理论槽深和试验槽深结果对比

$$\epsilon = [h_o(N) - h_e(N)]^2 = 0.112 \text{ mm}^2,$$
$$N = 3, 5, 10, 15$$

(13)

4.4 剪切质量对比

图 10 为目前工业上广泛应用的温剪工艺加工的 40Cr 坯料及断面。圆棒剪切时,刃尖接触区材料首先发生屈服变形形成剪切塌角,导致开裂扩展方向偏离预剪切面,形成“马蹄形”塌陷,断面倾斜度高达 4.1° ,质量公差达 2.5%,需要增加车削及平整断面工序,总耗时达上百秒。

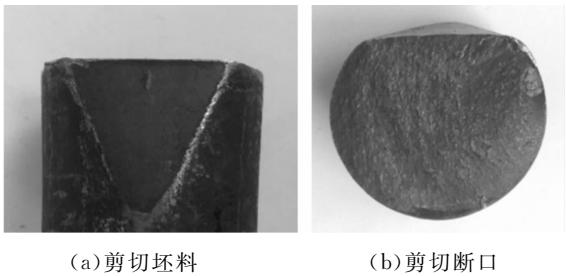


图 10 未预制环形槽的 40Cr 圆棒的传统温剪结果

图 11 为激光预制环形槽的 40Cr 圆棒的低应力剪切坯料及断面,断面倾斜度仅为 0.3° ,精度提高了 12 倍以上;剪切质量公差仅为 0.35%,精度提高了 6 倍以上。当 $n = 10 \sim 25 \text{ r/min}$ 时,旋切 3~10 圈最短需 7.2 s,配套的高速剪切设备的平均剪切时间为 1.5 s,即 40Cr 棒料激光旋切环形槽及剪切整体工艺耗时不到 10 s,配合自动化的送料装置,加工效率可达约 6 件/min。

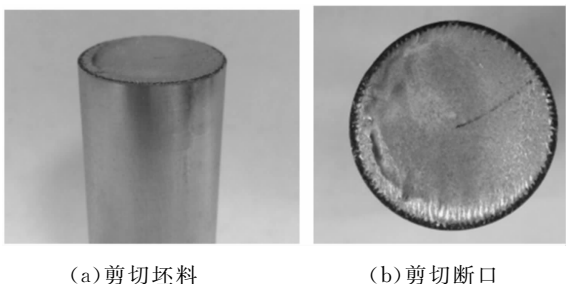
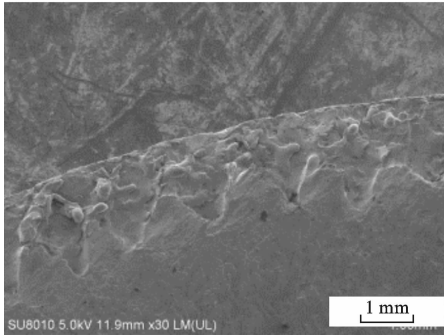
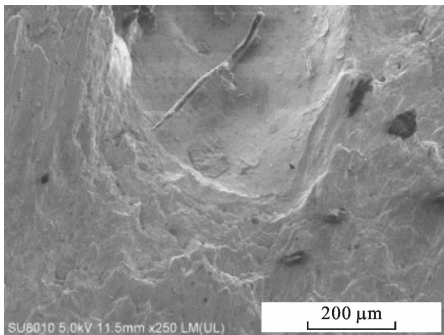


图 11 激光预制环形槽的 40Cr 圆棒的低应力剪切结果

针对图 11a 中 40Cr 坯料外圆周残留的激光影响区进行扫描电镜分析,结果如图 12 所示。40Cr 圆棒剪切时,裂纹起裂于环形槽根部,此处材料应力集中严重,更容易实现脆性起裂,使得断口周围塑性变形小,不会产生马蹄形塌陷。残留的环状热影响区很小(宽度小于 2 mm),而剪切工序多为制坯,需留有加工余量,同时圆棒料在锻造成形前需倒棱角以减小断面毛刺对模具的损伤,因此环状热影响区可以在后续倒角工序中去除掉。



(a)激光影响区



(b)环形槽根部裂纹起裂位置

图 12 40Cr 圆棒激光影响区及剪切时的裂纹起裂位置

5 结 论

本文提出了一种用于 40Cr 圆棒低应力剪切的激光旋切环形槽方法,根据激光旋切的物理过程建立了环形槽深度的数学模型,并对峰值功率 P_k 、脉宽 τ 、脉冲频率 f 、离焦量 s 、加工转速 n 和重复圈数 N 等影响因素进行了正交试验研究,得到以下结论:

(1)激光旋切 40Cr 圆棒环形槽深度的影响因素依主次顺序为 N 、 s 、 P_k 、 f 、 τ 、 n ,其中 N 和 s 的 F 值分别为 11.925 和 5.268,大于 F 的临界值 4.11,具有显著影响;

(2)为加工出 40Cr 圆棒低应力剪切所需的尖角深槽,应采用的最优工艺参数范围为 $P_k \geq 9.6 \text{ kW}$, $\tau \geq 0.3 \text{ ms}$, $3 \leq N \leq 10$, $10 \text{ r/min} \leq n \leq 25 \text{ r/min}$, $s =$

0 mm;

(3)40Cr 圆棒激光旋切环形槽的理论深度 h_t 和试验深度 h_e 的误差平方和 ϵ 为 0.112 mm^2 ,表明理论槽深的计算公式误差小、准确度高;

(4)应用本文技术的 40Cr 圆棒剪切坯料断面平整、无“马蹄形”塌陷,断面倾斜度为 0.3° ,比传统剪切工艺的精度提高了 12 倍以上,剪切质量公差仅为 0.35%,比传统剪切工艺的精度提高了 6 倍以上。

参考文献:

- [1] 马广英,郎福元,龚俊. 裂纹技术在应力下料中的研究与应用 [J]. 甘肃科学学报, 2003, 15(3): 86-90.
MA Guangying, LANG Fuyuan, GONG Jun. Research and application of crack technology in stress blanking [J]. Journal of Gansu Sciences, 2003, 15(3): 86-90.
- [2] 李有堂. 裂纹技术理论与应用 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2007: 22-23.
- [3] ZHAO Renfeng, ZHAO Shengdun, ZHONG Bin. Experimental study on novel precision cropping machinery using rotary striking action [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 281(1): 287-292.
- [4] 付建华,李永堂,雷步芳,等. 金属棒料高速精密剪切试验研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 154-156.
FU Jianhua, LI Yongtang, LEI Bufang, et al. Experiment research on the high-speed precision shearing of metal bar [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 154-156.
- [5] ZHONG Bin, ZHAO Shengdun, ZHAO Renfeng, et al. Investigation on the influences of clearance and notch-sensitivity on a new type of metal-bar non-chip fine-cropping system [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 76(6): 144-151.
- [6] SAHIN A Z, AYAR T, YILBAS B S. First and second law analyses of laser cutting process in relation to the end product quality [J]. International Journal of Energy Research, 2008, 32(8): 689-697.
- [7] 孟庆轩,王续跃,徐文骥,等. 薄板激光切割气熔比数学建模及试验验证 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 172-178.
MENG Qingxuan, WANG Xuyue, XU Wenji, et al. Vaporization-melt ratio mathematical model and experiments of laser cutting sheet metal [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(17): 172-178.
- [8] BRUGMANN M H, THOMAS F. Comparative theoretical analysis of continuous wave laser cutting of

- metals at 1 and 10 μm wavelength [J]. *Applied Physics: A*, 2013, 116(3): 1353-1364.
- [9] KHELOUFI K, AMARA E H. Numerical investigation of the effect of some parameters on temperature field and kerf width in laser cutting process [J]. *Physics Procedia*, 2012, 39(7): 872-880.
- [10] BAZYLEVA I O, GALUSHKIN M G, GOLUBEV V S, et al. Thermal losses in the process of gas-assisted laser cutting of metals [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4644(4): 73-82.
- [11] GOLNABI H, BAHAR M. Investigation of optimum condition in oxygen gas-assisted laser cutting [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(4): 454-460.
- [12] 丁升, 王建国, 刘峰, 等. 激光辐照转动充压圆柱壳体热力学效应 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(11): 1787-1792.
- DING Sheng, WANG Jianguo, LIU Feng, et al. Thermal-mechanical effects on rotating internally pressurized cylindrical shell irradiated by laser beam [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(11): 1787-1792.
- [13] 段文强, 王恪典, 董霞, 等. 激光旋切法加工高质量微小孔工艺与理论研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(3): 95-103.
- DUAN Wenqiang, WANG Kedian, DONG Xia, et al. Study on machining of high-quality micro-holes by laser trepan drilling [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(3): 95-103.
- [14] 陈聪, 高明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 73-79.
- CHEN Cong, GAO Ming, GU Yunze, et al. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 49(3): 95-103.
- [15] 杨慎华, 张志强, 窦淑清. 连杆预制裂纹槽激光加工工艺参数 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(1): 126-129.
- YANG Shenhua, ZHANG Zhiqiang, DOU Shuqing. Influence of starting notch processing methods on fracture splitting quality of connecting rod [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(1): 126-129.
- [16] 郑祺峰. 发动机连杆裂解槽激光加工技术及自动化设备研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [17] 韩艳凯, 陈连生, 宋进英, 等. 空冷奥氏体相变过程中的相变潜热 [J]. *河北理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(3): 46-49.
- HAN Yankai, CHEN Liansheng, SONG Jinying, et al. The transition latent heat of austenite phase transition in air-cooled conditions [J]. *Journal of Hebei Polytechnic University (Natural Science Edition)*, 2011, 33(3): 46-49.
- [18] 林继辉. 40Cr 钢和 60Si2Mn 钢顶端淬火过程的数值模拟 [D]. 辽宁大连: 大连交通大学, 2010.
- [19] 干勇, 田志凌, 董瀚, 等. 钢铁材料手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 264-265.

[本刊相关文献链接]

- 步明繁, 刘志刚, 张为波, 等. 采用 F-P 光学腔的外腔半导体激光器锁相稳频方法. 2016, 50(10): 125-131. [doi:10.7652/xjtuxb201610019]
- 齐静雅, 王昭, 黄军辉, 等. 机床导轨滚转角测量误差分析. 2016, 50(9): 31-35. [doi:10.7652/xjtuxb201609005]
- 郝维娜, 令锋超, 刘志刚, 等. 轴承滚珠面型误差激光干涉测量系统的研究. 2016, 50(6): 83-89. [doi:10.7652/xjtuxb201606013]
- 余宝, 王昭, 黄军辉, 等. 机床滚转角高精度测量中的频偏现象研究. 2016, 50(3): 101-105. [doi:10.7652/xjtuxb201603016]
- 吴继伟, 朱刚贤, 陆斌, 等. 自愈合效应对光内送粉激光变斑熔覆成形薄壁件的影响. 2016, 50(1): 145-150. [doi:10.7652/xjtuxb201601022]
- 白浩, 王伊卿, 董霞, 等. Ti6Al4V 钛合金脉冲激光抛光微裂纹产生机理与尺寸特征研究. 2015, 49(12): 117-123. [doi:10.7652/xjtuxb201512019]
- 王新孟, 杨军, 梅雪松, 等. 精密坐标镗床进给系统热误差分析与预测. 2015, 49(10): 22-28. [doi:10.7652/xjtuxb201510004]
- 张为波, 刘志刚, 周扬理, 等. 采用同步调谐方法的 Littman 型可调谐半导体激光器. 2015, 49(10): 29-33. [doi:10.7652/xjtuxb201510005]
- 段文强, 王恪典, 董霞, 等. 激光旋切法加工高质量微小孔工艺与理论研究. 2015, 49(3): 95-103. [doi:10.7652/xjtuxb201503016]
- 郑卜祥, 姜歌东, 王文君, 等. 超快脉冲激光对钛合金的烧蚀特性与作用机理. 2014, 48(12): 21-28. [doi:10.7652/xjtuxb201412004]

(编辑 葛赵青)