

文章编号: 1001-3806(2018)03-0422-05

## 脉冲光纤激光切割连杆裂解槽工艺参数优化

张 冲<sup>1</sup>, 王 冠<sup>1\*</sup>, 杨志刚<sup>2</sup>, 刘赞丰<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 广东四会实力连杆有限公司, 四会 526200)

**摘要:** 为了获得 36MnVS4 连杆裂解槽最优的切割质量, 采用正交实验法对裂解槽进行了激光切割理论分析和实验验证, 通过激光共聚焦显微镜测量裂解槽的深度、宽度、张角及曲率半径等几何尺寸, 同时采用扫描电镜观测裂解槽底部微观形貌及热影响区的厚度, 采用极差分析法得到了峰值功率、脉冲宽度、切割速率和脉冲频率对裂解槽几何尺寸的影响, 并获得了最优实验参数组合。结果表明, 裂解槽热影响区厚度皆小于 100 μm 且裂解槽底部存在微裂纹及气孔, 各参数组合对裂解槽宽度、张角及曲率半径的影响较小, 对裂解槽深度的影响较大; 脉冲宽度和峰值功率对槽深的影响较大, 脉冲频率和切割速率对槽深的影响较小; 优化后切割速率为 1.0 m/min, 峰值功率为 700 W, 脉冲频率为 1000 Hz, 脉冲宽度为 50 μs。这一结果对实际生产具有重要意义。

**关键词:** 激光技术; 激光切割; 正交实验; 光纤激光器; 36MnVS4

中图分类号: TG485

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2018. 03. 025

## Optimization of technology parameters for fracture splitting grooves of connecting rods fabricated by pulse fiber laser

ZHANG Chong<sup>1</sup>, WANG Guan<sup>1</sup>, YANG Zhigang<sup>2</sup>, LIU Zanfeng<sup>2</sup>

(1. School of Electromechanical and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Sihui Shili Connecting Rod Co. Ltd., Sihui 526200, China)

**Abstract:** In order to obtain the optimal cutting quality of fracture splitting groove on connecting rod made of new material 36MnVS4, experimental study and theoretical analysis of crack groove fabricated by laser cutting were investigated through orthogonal experimental method. Geometric dimensions such as depth, width, opening angle and curvature radius of fracture splitting groove produced by laser cutting were measured and calculated by laser confocal microscope, respectively. In addition, microstructure and thickness of heat affected zone on the bottom of crack groove were observed and measured by adopting scanning electron microscope. The effects of laser peak power, pulse width, cutting speed and pulse frequency on geometric dimensions of fracture splitting groove were analyzed by using range analysis method. As a result, the optimal parameter combination of cutting fracture splitting groove were found out. The results show that, the depth of heat affected zone on the bottom of crack groove is less than 100 μm and there exist micro cracks and pores. The investigated parameters have less impact on the width, opening angle and curvature radius of fracture splitting groove, but have large effect on depth. Moreover, laser peak power and pulse width exert great influence on depth of crack groove, while cutting speed and pulse frequency have little effect on it. The optimal parameters exist with cutting speed of 1.0 m/min, laser peak power of 700 W, pulse frequency of 1000 Hz and pulse width of 50 μs. The study is of great importance for actual production.

**Key words:** laser technique; laser cutting; orthogonal experimental method; fiber laser; 36MnVS4

基金项目: 四会市科技计划资助项目(2016A0918002); 广州市科技计划资助项目(201704030063); 广州市南沙区科技计划资助项目(2016GG022)

作者简介: 张 冲(1991-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光微细加工技术研究。

\* 通讯联系人。E-mail: wangguan@gdut.edu.cn

收稿日期: 2017-06-16; 收到修改稿日期: 2017-09-08

## 引言

连杆裂解加工是一种新型连杆加工技术, 其采用裂解形成的 3 维凹凸断裂面代替传统的加工接合面, 保证了接合处的精确配合, 具有工序少、成本低、效率高、加工质量好、装配精度高、承载能力强等优点, 已成为连杆加工的主要方向<sup>[1]</sup>。连杆裂解加工首先需要

在连杆大头孔内侧柱面预制对称裂解槽，裂解时利用裂解槽根部位置形成的应力集中使连杆在预定的位置几乎不产生塑性变形的情况下快速裂解。因此，裂解槽的预制是连杆裂解加工的技术关键<sup>[2]</sup>。目前，裂解槽的加工方法主要有机械拉削、线切割和激光切割等。机械拉削刀具磨损后，裂解槽根部曲率半径增大，加工深度变浅，导致裂解不稳定；线切割加工精度低、生产效率低；激光加工具有效率高、精度高、无污染等优点，已成为目前最先进的工艺<sup>[3]</sup>。

连杆裂解槽属于窄缝盲槽，裂解加工对裂解槽加工精度和切口质量要求很高。激光切割是一个多因素共同作用的过程，峰值功率、脉冲宽度、脉冲频率和切割速率等参数都会影响裂解槽的切割质量。不同的切割参数组合对裂解槽的质量影响不一，因此研究各激光参数对切割裂解槽质量的影响程度，并获得最优参数组合对优化激光切割裂解槽质量、降低连杆裂解废品具有重要的意义<sup>[4-5]</sup>。现有的研究主要采用单因素法研究了YAG激光切割C70S6连杆裂解槽，对光纤激光切割36MnVS4连杆裂解槽的研究还不够深入，且未考虑多个因素同时作用时对切割质量的影响<sup>[6]</sup>。

本文中采用无交互作用的正交实验方法，设计了四因素四水平的正交实验表，针对光纤激光切割36MnVS4连杆裂解槽的实验，主要研究峰值功率、脉冲宽度、切割速率和脉冲频率等对裂解槽几何参数和底部微观形貌及热影响区深度的影响程度，并得出激光加工裂解槽的最优实验参数组合。

## 1 实验设备、材料及实验方案

### 1.1 实验设备和材料

预制裂解槽的目的是形成缺口效应，提高应力集中水平，能有效降低裂解载荷，保证连杆在预定位置快速脆性裂解，保证加工质量。如图1所示，裂解槽的槽深h、槽宽w、曲率半径r和张角α对裂解载荷有直接

Table 2 Chemical compositions (mass fraction w) of material

element	C	S	P	Si	Mn	Cr	V	Al	Ni
w	0.0036	0.00042	0.000007	0.0063	0.0099	0.0024	0.0027	0.00016	0.00011

### 1.2 实验方案

脉冲激光加工裂解槽过程中影响切割质量的因素较多，且每个因素有多个水平，此时会优先采用正交实验法。正交实验能在所有因素的不同水平内进行均衡采样，能够在达到较好实验目的同时减少实验次数<sup>[8]</sup>。

激光加工裂解槽是通过激光脉冲能量使加工位置

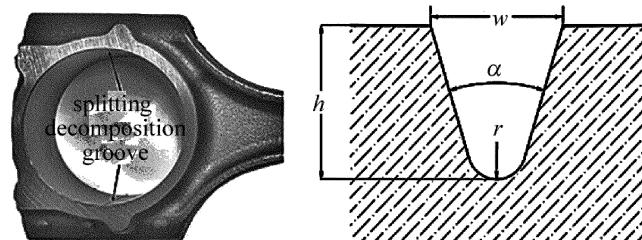


Fig. 1 Location and parameters of splitting decomposition groove  
影响，从断裂效率和裂解质量考虑，要求裂解槽尖锐、深而窄、张角小，以提高应力集中系数，有效降低裂解力，避免裂解缺陷的出现，保证连杆裂解加工质量<sup>[7]</sup>。

实验设备采用广东工业大学和广东四会实力连杆有限公司共同研制的胀断连杆激光切槽装备，如图2所示。该装备采用瑞士ROFIN公司FLBK SC 90/60型号的光纤脉冲激光器，其具体参数见表1。

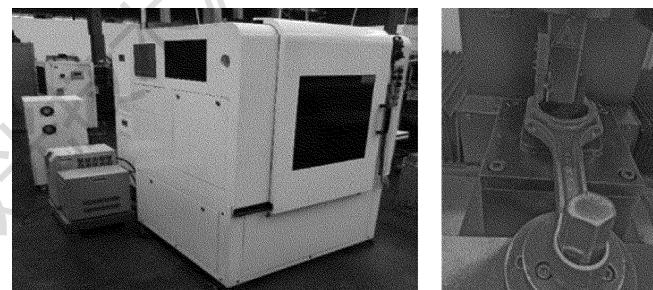


Fig. 2 Laser cutting equipment for processing connecting-rod splitting notch  
Table 1 Laser technical data

laser parameters	parameter scale
laser peak power/W	200 ~ 1590
pulse energy/mJ	0.1 ~ 15000
pulse width/μs	10 ~ 5000
pulse frequency/Hz	0.3 ~ 25000

试样选取JL4T18连杆，其材料为非调质中碳合金钢36MnVS4，其主要成分见表2。连杆毛坯经热锻成型并利用余热进行空气控制冷却，主要为均匀珠光体+铁素体。

Table 2 Chemical compositions (mass fraction w) of material

的金属迅速融化或气化，并利用辅助气体将融化金属从连杆上驱除。脉冲能量Q和脉冲重叠率n是影响激光切割效果的主要因素<sup>[9-10]</sup>：

$$Q = Pt \quad (1)$$

$$n = \left(1 - \frac{v}{fd}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中，Q为脉冲能量，P为峰值功率，t为脉冲宽度，d

为聚焦半径,  $v$  为切割速率,  $f$  为脉冲频率。

由(1)式可知, 脉冲能量由峰值功率和脉冲宽度二者共同决定, 由(2)式可知, 脉冲重叠率由聚焦半径、切割速率和脉冲频率共同决定。由于实验条件限制, 本文中暂不考虑聚焦半径对脉冲重叠率的影响, 因此本文中最终选取了峰值功率、脉冲宽度、脉冲频率和切割速率4个参数作为研究的因素, 每个因素设置4个水平, 切割角度垂直与连杆大头孔内壁且保持不变、辅助气体及离焦量等也保持不变。表3所示为各个因素在不同水平下的取值。

Table 3 Factors and levels of orthogonal experiments

level	cutting speed/ (m·min <sup>-1</sup> )	peak power/ W	pulse frequency/ Hz	pulse width/ μs
1	1.0	600	800	20
2	1.2	700	900	30
3	1.4	800	1000	40
4	1.6	900	1100	50

## 2 实验结果与讨论

对正交表中每组参量进行3次实验, 如图3所示。

Table 4 Results of orthogonal experiments

level	cutting speed/ (m·min <sup>-1</sup> )	peak power/ W	pulse frequency/ Hz	pulse width/ μs	notch depth/ μm	notch width/ μm	radius of curvature/ μm	opening angle/ (°)
1	1.0	600	800	20	250.99	123.88	18.37	27.72
2	1.0	700	900	30	472.05	154.02	20.21	18.53
3	1.0	800	1000	40	696.09	184.15	21.01	15.07
4	1.0	900	1100	50	860.30	187.49	17.56	12.43
5	1.2	600	900	40	455.18	170.75	32.55	21.24
6	1.2	700	800	50	692.87	184.15	25.32	15.13
7	1.2	800	1100	20	518.89	137.27	20.46	15.07
8	1.2	900	1000	30	632.93	174.11	27.67	15.66
9	1.4	600	1000	50	522.45	184.18	31.2	19.99
10	1.4	700	1100	40	579.04	187.49	26.94	18.39
11	1.4	800	800	30	505.33	160.71	25.10	18.07
12	1.4	900	900	20	532.27	157.36	23.03	16.81
13	1.6	600	1100	30	355.50	157.37	25.26	24.96
14	1.6	700	1000	20	287.88	147.30	20.77	28.70
15	1.6	800	900	50	840.32	194.19	23.45	13.18
16	1.6	900	800	40	622.50	187.49	19.28	17.12

由实验结果可知: 不同的参量组合对裂解槽的宽度、张角和曲率半径的影响不大。由文献可知: 槽深对裂解力的影响最显著, 随槽深的增加裂解所需载荷显著减小; 曲率半径和张角对裂解载荷也有一定影响, 随曲率半径和张角减小裂解所需载荷也越小; 槽宽对裂解力的影响最小, 随槽宽减小裂解所需载荷降低不

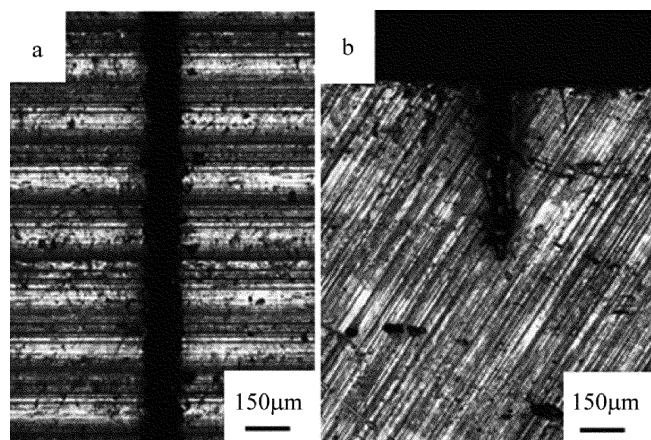


Fig. 3 Morphology of splitting cracks  
a—front view b—cross-sectional view

通过激光共聚焦显微镜观测裂解槽正面测量裂解槽宽度, 观测裂解槽截面测量裂解槽的深度和曲率半径, 将3次测量结果取平均值。由于裂解槽曲率半径很小, 则可根据下式计算出裂解槽的张角<sup>[11]</sup>:

$$\alpha = 2 \arctan [w/(2h)] \quad (3)$$

裂解槽的深度、宽度、曲率半径的测量平均值及张角的计算结果如表4所示。

明显<sup>[12]</sup>。由于张角、曲率半径及槽宽变化不大, 且不是影响裂解力的主要因素。因此, 可只研究不同的参量组合对裂解槽深度的影响程度, 并对参量进行优化。采用极差分析法对各个因素在不同水平值下的实验结果进行分析, 得到各因素对实验考察指标的影响程度, 结果如表5所示。

Table 5 The range of notch depth in different factors and levels

level	cutting speed( $A$ )/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	peak power( $B$ )/W	pulse frequency( $C$ )/Hz	pulse width( $D$ )/ $\mu\text{s}$
1	569.86	396.03	517.92	397.51
2	574.97	507.96	574.96	491.45
3	534.77	640.16	537.59	588.20
4	526.55	716.46	578.43	728.99
range	43.31	320.43	60.51	331.48

根据表5中计算的结果可得到,激光切割参数对裂解槽深度的影响程度由大到小依次为:脉冲宽度>峰值功率>脉冲频率>切割速率。

如图4所示,裂解槽底部凹凸不平且有部分金属融化后未被及时吹除,而凝结在裂解槽底部表面,形成凝固块。同时存在很多微裂纹和气孔,由于激光切割温度高、时间短,易形成较大的温度梯度从而产生热应力,使金属的变形不均,导致微裂纹的产生。微裂纹可和气孔降低了此处的材料强度,可显著降低裂解力。

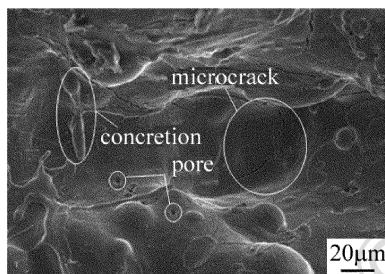


Fig. 4 Scanning electron microscope diagram of the bottom crack

裂解槽底部存在一定厚度的热影响区,在激光切割时,由于温度过高,且该连杆材料属于中碳钢<sup>[13]</sup>,因此会在高温附近区域形成片状(针状)马氏体<sup>[14]</sup>。连杆工作时受力情况相当复杂。所以,除了要求连杆具有足够的强度和刚度外,还应保证其具有相应的加工精度。其经激光切槽后,受到激光热作用的组织大部分转变为马氏体,高碳马氏体本身很脆,在撞击时极易产生裂纹,并且由于裂解槽内气孔和微裂纹的存在,这些裂纹和气孔极易成为疲劳裂纹源而导致开裂,必

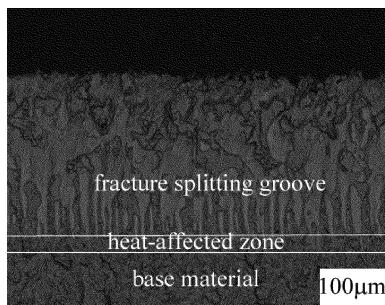


Fig. 5 Scanning electron microscope diagram of the lateral crack

须通过后续机械加工来完全去除这些组织<sup>[15-16]</sup>。如图5所示,通过观测连杆裂解后裂解槽的侧面,得到各裂解槽热影响区厚度在70 $\mu\text{m}$ 左右,为确保能去除热影响区,则取其厚度为100 $\mu\text{m}$ 。

根据连杆加工的要求,连杆裂解后,还需在连杆大头孔内壁进行半精镗、精镗、珩磨等加工工序,其加工余量为700 $\mu\text{m}$ 。由于热影响区厚度为100 $\mu\text{m}$ ,故裂解槽深度取600 $\mu\text{m}$ 为宜。

用 $A, B, C, D$ 分别表示表5中的切割速率、峰值功率、脉冲频率和脉冲宽度,字母下标表示字母对应列中的行序号。本文中以裂解槽深度小于且最接近600 $\mu\text{m}$ 为优化目标。根据表5的结果,对 $A, B, C, D$ 每列取小于且最接近600 $\mu\text{m}$ 的值,得到其值分别为 $A_1, B_2, C_4, D_3$ ,即得到了每个因素下的最优水平,然后将4个因素下的最优水平组合起来,得到最优参数组合为 $A_1B_2C_4D_3$ ,即切割速率为1.0mm/min、峰值功率为700W、脉冲频率为1000Hz、脉冲宽度为50 $\mu\text{s}$ 。

图6为优化前裂解槽的截面形貌。如图6a所示,在脉冲能量较小时裂解槽深度较浅,会使连杆裂解时裂解力较大,导致连杆大头孔产生较大的塑性变形而出现“失圆”现象,无法满足连杆的精度要求;如图6b所示,在脉冲能量较大时裂解槽深度太深,使得精加工后热影响区无法去除,甚至裂解槽深度超过加工余量。

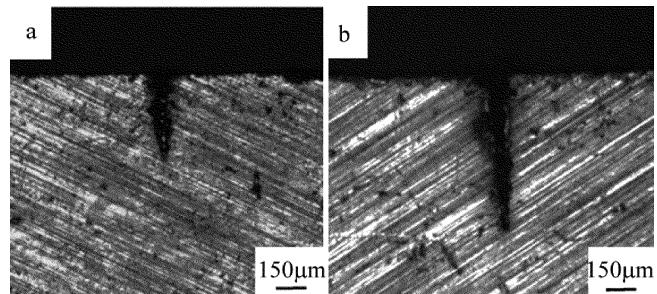


Fig. 6 Sectional view of the crack before optimization  
 a—with strong pulse energy    b—with weak pulse energy

图7为优化后裂解槽的截面形貌。此时裂解槽深

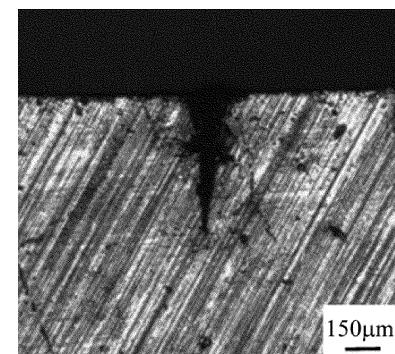


Fig. 7 Sectional view of the crack after optimization

度符合要求,裂解槽截面呈“V”型,裂解槽尖锐、深而窄、张角小,可以有效提高应力集中系数,降低裂解力,避免裂解缺陷的出现,保证连杆裂解加工质量。

### 3 结 论

通过对光纤脉冲激光切割36MnVS4连杆裂解槽进行正交实验设计,以切割速率、峰值功率、脉冲频率、脉冲宽度为影响因素,每个因素分别设定4个水平进行实验。

(1) 激光参量对裂解槽的深度影响较大,对裂解槽的宽度、张角及曲率半径影响不大,加工后槽宽在160 $\mu\text{m}$ 左右,张角在25°左右,曲率半径在20 $\mu\text{m}$ 左右。

(2) 激光参量对裂解槽深度的影响次序为:脉冲宽度>峰值功率>脉冲频率>切割速率。

(3) 加工后的裂解槽底部存在微裂纹和热影响区,热影响区的厚度小于100 $\mu\text{m}$ 。

(4) 通过参量优化后切割出的裂解槽可以获得较好的质量,其最优参量分别是:切割速率为1.0m/min、峰值功率为700W、脉冲频率为1000Hz、脉冲宽度为50 $\mu\text{s}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] KOU Sh Q,WANG J W,JIAN X X,*et al.* YAG laser cutting on sharp fracture splitting notch of connecting rod [J]. Optics and Precision Engineering,2010,18(6): 1340-1346 (in Chinese).
- [2] ZHENG Q F. Research on laser processing fracture splitting groove technologyand automation equipment for engine connecting rod[D]. Changchun: Jilin University, 2011: 6-8 (in Chinese).
- [3] YANG H Y. Numerical simulation of connecting rod fracture proces-sand analysis on main fracture splitting defects [D]. Changchun: Jilin University, 2014: 9-10 (in Chinese).
- [4] ZHAO Y. Study on parameters of connecting rod fracture splitting basedon fracture after small scale yielding and its application [D]. Changchun: Jilin University, 2011: 53-60 (in Chinese).
- [5] YANG Q T. Multi-scale simulation study on propagation of connecting rod crack by wire cut electrical discharge machining [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016: 10-20 ( in Chinese).
- [6] WANG J W. Numerical simulation and experimental study on pulsed laser processing fracture plitting notch of con-rod/crankcase bearing block [D]. Changchun: Jilin University, 2011: 89-105 ( in Chinese).
- [7] YANG Sh H, ZHANG Zh Q, KOU Sh Q, *et al.* Technological parameters in the laser cutting process of starting notch of connecting rod [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2009,41(1):126-130 (in Chinese).
- [8] SUN J G, LI Sh, HE Zh Y, *et al.* Study on orthogonal processing experiment of light absorbing coatings for laser micro-dimple [J]. Laser Technology,2016,40(6): 907-911 (in Chinese).
- [9] ZHENG Q F, YANG Sh H, DENG Ch P, *et al.* Manufacture of connecting-rod initial splittingnotch by Nd:YAG solid laser [J]. Optics and Precision Engineering,2010,18(1): 142-147 (in Chinese).
- [10] LIU Z Y, WEI X, XIE X Zh, *et al.* Experimental study about micro texture on tool surface processed by UV laser ceramic [J]. Laser Technology,2016,40(4): 550-554 (in Chinese).
- [11] ZHENG L M. Research on key technologies and equipment development of engine connecting rod fracture splitting[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 25-40 (in Chinese).
- [12] ZHANG Zh Q. Numerical analysis and experimental study on influencing factors of splitting process of engine connecting rod [D]. Changchun: Jilin University, 2011: 89-105 (in Chinese).
- [13] LIU P,LI W Zh,WEI Y Sh,*et al.* Development of fracture splitting connecting rod made of mid-carbonand microalloyed steel without quenching and tempering [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015,27(1):46-50 ( in Chinese).
- [14] JIAO J,GUO J F,WANG L,*et al.* Research of the form and growth of crack of in hot affected zonefor drill by pulsed CO<sub>2</sub> laser cutting [J]. Metallurgical Equipment,2012,6(3):17-21 (in Chinese).
- [15] LI F. The experimental research of laser processing for typical material fracture splitting notch [ D ]. Changchun: Jilin University, 2007: 40-50 (in Chinese).
- [16] WANG X H. Iron castings temperature field numerical analysis by laser cutting the stress-raising groove [ D ]. Changchun: Jilin University, 2010: 40-60 (in Chinese).