文章编号:1001-5078(2018)03-0285-06

· 激光应用技术 ·

脉冲光纤激光加工 36MnVS4 连杆裂解槽的研究

张 冲1,王 冠1,杨志刚2,刘赞丰2

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

摘 要:为了获得新材料36 MnVS4 连杆裂解槽的最优切割质量,采用光纤激光器对36 MnVS4 连杆进行了裂解槽激光加工的工艺研究,分析了离焦量、峰值功率、脉冲宽度、切割速度和脉冲 频率对裂解槽几何尺寸的影响,通过激光共聚焦显微镜测量对比,研究不同激光工艺参数下裂 解槽几何尺寸的变化规律。结果表明:负离焦能加工出质量更好的裂解槽;峰值功率、脉冲宽 度、脉冲频率和切割速度对槽深和张角的影响较大,对槽宽和曲率半径的影响较小,但在裂解 槽深度为0.5~0.6 mm时,张角在10°~25°的较小范围内变化。

关键词:激光切割;连杆裂解;光纤激光器;36MnVS4

中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.03.003

Study on fracture splitting groove of 36MnVS4 connecting rod fabricated by pulse fiber laser

ZHANG Chong¹, WANG Guan¹, YANG Zhi-gang², LIU Zan-feng²

(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 optimized cutting quality of fracture splitting groove of 36 MnVS4 connecting rod, fiber laser is used to study the laser processing technology of this fracture splitting groove. The effects of defocusing amount, laser peak power, pulse width, cutting speed and pulse frequency on geometric dimension were analyzed. The microstructure of the splitting groove was observed by laser scanning confocal microscope. By comparison, variation law of geometric dimension was obtained under different laser processing parameters. The results indicate that the negative defocusing amount is helpful for the fabrication of fracture splitting groove; laser peak power, pulse width, pulse frequency and cutting speed have great influence on depth and opening angle of the fracture splitting groove, but they have less effect on width and radius of curvature. At the same time, when the depth of crack groove is 0.5 ~ 0.6 mm, opening angle usually varies within $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ small ranges.

Key words: laser cutting; connecting rod splitting; fiber laser; 36MnVS4

1 引 言

连杆裂解加工是一种新型连杆加工技术,其采用 裂解形成的三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^[1]。连杆裂解加工首先需

基金项目:四会市科技计划项目(No. 2016A0918002);广州市科技计划项目(No. 201704030063);广州市科技计划项目 (No. 201704030129)资助。

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。

通讯作者:王 冠(1979-),男,博士,副教授,主要从事表面腐蚀与防护及电化学微细加工。E-mail:wangguan@gdut.edu.cn **收稿日期:**2017-06-12;修订日期:2017-07-16

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^[2]。

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。其中机械拉削在刀具磨损后,裂 解槽根部的曲率半径增大,加工深度变浅,导致裂解 不稳定^[3];线切割加工一般需要重新定位和穿丝, 从而导致生产效率低。邓伟辉等^[4]发明了一种应 力槽双向同步线切割技术,该技术解决了线切割加 工连杆裂解槽需要穿丝的难题,但线切割加工精度 低,生产效率低的缺点依旧存在;激光加工裂解槽具 有效率高、精度高、无污染等优点,已成为目前最先 进的工艺。激光加工的槽截面呈"V"型,在相同槽 深的情况下与线切割加工的"U"型槽相比裂解槽宽 度更窄,曲率半径更小,更有利于裂解^[5-6]。激光加 工后槽的底部有凝固区和相变硬化区,此区域材料 相比基体材料硬度有所增加,且槽底部存在少量微 裂纹,对连杆的裂解更有利^[7]。

连杆裂解槽属于窄缝盲槽,裂解加工对裂解槽 的加工精度和切口质量要求很高。光纤激光器与其 他激光器相比光电转换效率高、使用寿命长、聚焦半 径小,且其切割金属材料有天然的优势,因此能更好 地加工出质量优异的裂解槽,已成为激光加工连杆 裂解槽的首选光源^[8-9]。为此,本文针对光纤激光 器加工连杆裂解槽进行了试验研究,探索不同激光 参数对裂解槽几何尺寸的影响规律。

2 实验条件及方法

预制裂解槽的目的是形成缺口效应,提高应力 集中水平,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。根据连杆裂解加工 的要求槽深应在0.5~0.6 mm 为宜。图1 为裂解槽 位置及几何参数,裂解槽的槽深h、槽宽w、曲率半径 r和张角 a 对裂解载荷有直接影响:槽深对裂解力的 影响最显著,随着槽深的增加,裂解所需的载荷显著 减小;曲率半径r和张角 a 对裂解载荷也有较大影 响,随着曲率半径r和张角 a 减小,裂解所需的载荷 也越小;槽宽对裂解载荷的影响最小,随着槽宽减 小,裂解所需载荷降低不明显^[10]。因此,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。



图1 裂解槽位置及几何参数

Fig.1 Position and geometric parameters of splitting groove 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。



图 2 连杆裂解槽激光加工装备 Fig. 2 Lase processing equipment of fracture splitting groove

表1 激光器参数

Tab. 1 Laser parameters

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 36 MnVS4,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,金相组织如 图 3 所示,主要为均匀珠光体+铁素体。

表2 材料化学成分

Tab. 2 Material chemical compositions

Element	С	S	Р	Si	Mn	Cr	V	Al	Ni
wt%	0.36	0.042	0.0007	0. 63	0. 99	0.24	0. 27	0.016	0.011

试验在室温下进行,采用压缩空气作为辅助气体,激光采用负离焦且离焦量保持不变,垂直入射到 被加工表面进行切割。通过试验可知,当峰值功率 为800 W、脉冲宽度为30 μm、脉冲频率为1000 Hz、 切割速度为 1.4 m/min 时,加工出裂解槽深度为 0.5451 mm、宽度为 0.1456 mm、张角为 10.2°、曲率 半径为 0.0174 mm,可满足加工要求。此时,固定其 他三个因素改变其中一个因素,分别研究峰值功率、 脉冲宽度、脉冲频率和切割速度对裂解槽几何尺寸 的影响,进而来研究脉冲能量和脉冲重叠度对裂解 槽几何尺寸的影响规律。每组参数切割 3 个试样,采用 LEXT OLS4000 激光共聚焦显微镜对加工后的 裂解槽几何尺寸进行测量并取平均值。





4 试验结果与讨论

激光加工裂解槽是通过激光脉冲能量使加工位 置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,激光束的匀速移动使材料表面 出现连续均匀的小盲孔,最后形成连杆裂解槽^[11]。

4.1 离焦量的影响

激光焦点与工件表面的位置关系可用离焦量来 表示。离焦量的大小决定了光斑能量密度的大小及 能量分布的均匀性,能量密度分布的均匀性直接影 响裂解槽的几何尺寸。如图4所示,图中 d 为光纤 直径;f 为焦距; d₀ 为光斑直径; h 为焦深; θ 为发散 角; a 为焦点位置,当焦点 a 在连杆大头孔内壁表面 之上时,称为正离焦;当焦点 a 在连杆大头孔内壁表 面之下时称为负离焦^[12]。



图 4 焦点位置 Fig. 4 The focal point position

处于正离焦位置切割后的裂解槽截面如图 5 (a)所示,由于激光光束趋于发散时才落到大头孔 内壁,光斑较大,能量密度小,因此所切割的裂解槽 深度浅、曲率半径大,不能满足加工要求;处于负离 焦位置切割后的裂解槽截面如图 5(b)所示,由于激 光能量最强点落在大头孔内壁表面之下,能量集中, 能充分对工件进行切割,切割深度大,槽底呈尖角, 能够保证连杆的裂解质量。因此,需采用负离焦进 行裂解槽加工。



图 5 激光正(负)离焦切割的裂解槽几何形貌 Fig. 5 The geometrical profile of notch by cutting on positive/negative focus

4.2 峰值功率和脉冲宽度的影响

连杆裂解槽的几何尺寸直接由瞬间聚焦在材料 表面的脉冲能量大小决定:

$$Q = P \times t \tag{1}$$

式中,Q为脉冲能量;P为峰值功率;t为脉冲宽度。

由式(1)可知,增大峰值功率或脉冲宽度,都会 使每个脉冲能量增加,使切割位置的热影响区扩大。 如图 6 所示,在其他因素不变的情况下随着峰值功 率的增加,槽深增加显著,槽宽略有增加,曲率半径 变化不大,基本在 0.02 mm 左右,张角变化较大但 不超过 30°,峰值功率在 700~900 W 时皆可满足加 工要求。如图 7 所示,在其他因素不变的情况下,随 着脉冲宽度的增加,槽深增加显著,槽宽略有增加, 曲率半径在 0.025 mm 左右变化,张角在 18°以内较 小范围变化,脉冲宽度在 25~40 μs 皆可满足加工 要求。

因此,实际加工时可根据需要适当增加峰值 功率或脉冲宽度来提高脉冲能量,以满足加工要 求,提高裂解槽的加工质量,但脉冲能量也不宜过 大,否则会在裂解槽底部形成较大的热影响区,精 加工后残余的热影响区会影响连杆的性能。同 时,热影响区材料硬度变大,对后续的精加工有一 定的影响^[13]。



图 6 不同峰值功率时裂解槽的几何尺寸









4.3 脉冲频率和切割速度的影响

裂解槽是由许多连续或叠加的盲孔构成的,激 光每发出1个脉冲则进行1次打孔,裂解槽的连续 性可由相邻两个盲孔的相连程度来描述,即脉冲重 叠率^[14]:

$$n = \left[1 - \frac{v}{f \times d}\right] \times 100\% \tag{2}$$

式中,d为聚焦半径;v为切割速度;f为脉冲频率。

由式(2)可知,在离焦量一定时,减小切割速度 或增大脉冲频率,都可以增加裂解槽的连续性。如 图8所示,在其他条件一定时,切割速度对裂解槽几 何尺寸的影响不大。由于生产要求,在批量生产时, 需要较快的切割速度来保证加工效率。但是,切割 速度也不宜过快,过快的切割速度,使金属不易充分 燃烧气化并驱除,会导致部分融化金属凝结在槽周 围,凝固区硬度较大,在后续连杆大头孔的精加工中 会严重磨损刀具^[11]。因此,切割速度在 1.0 ~ 1.4m/min 为宜。



Fig. 8 The geometric size of notch with different laser cutting speed

如图 9 所示峰值功率为 800 W、脉冲宽度为 30 um、切割速度为 1.4 m/min、脉冲频率为 300Hz 时, 裂解槽虽然满足连续性要求,但是槽深只有 0.3348 mm 无法满足加工要求。如图 10 所示,当脉冲频率 增大到 1000 Hz 时,裂解槽深度为 0.5451 mm 才能 满足加工要求。因此,构成裂解槽的盲孔需要在多 个脉冲的重复作用下,即脉冲重叠度较大时才能满 足深度要求。







图 10 脉冲频率为 1000 Hz 时裂解槽的几何形貌 Fig. 10 The geometrical profile of notch when frequency is 1000Hz

如图 11 所示,给出了裂解槽几何尺寸随频率的 变化关系曲线,随着脉冲频率的增加裂解槽深度变 大,槽宽略有增加,张角和曲率半径变化不大,脉冲 频率在 600~1200 Hz 皆可满足加工要求。因此,实 际加工中,速度一定且在脉冲能量较大的情况下,仍 不满足加工要求时,可增加脉冲频率来增大重叠度, 以满足加工要求。



5 结 论

本文通过光纤激光切割 36 MnVS4 连杆裂解槽 试验,分析激光加工参数对裂解槽几何尺寸的影响。 峰值功率、脉冲宽度、脉冲频率和切割速度对槽深和 张角的影响较大,对槽宽和曲率半径影响较小。但 槽深为 0.5~0.6 mm 时, 张角在 10°~25°较小的范 围内变化。在加工时应选用负离焦进行切割;在特定 的切割速度下,当脉冲能量小于 36 mJ(900W · 40 μs) 时,若槽深不足,则首先考虑加大峰值功率来提高脉 冲能量,改善加工质量;若峰值功率增加到 900 W 时还不满足要求,则考虑加大脉冲宽度来提高脉冲 能量,改善加工质量;若脉冲宽度增加到40 µs,即脉 冲能量增加到36 mJ时,裂解槽几何尺寸还不满足 加工要求,则应增加脉冲频率,即增加光斑重叠度来 改善切割质量。针对 36 MnVS4 材料连杆,切割速 度取 1.4 m/min 时,峰值功率选 700~900 W、脉冲 宽度选 25~40 µs、脉冲频率选 600~1200 Hz 可满 足加工要求。

参考文献:

[1] KOU Shuqing, WANG Jinwei, JIAN Xiaoxia, 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)

寇淑清,王金伟,菅晓霞,等. 连杆尖锐裂解槽的脉冲 YAG激光切割[J]. 光学 精密工程,2010,18(6): 1341-1346.

- [2] ZHENG Qifeng. Research on laser processing fracture splitting groove technology and automation equipment for engine connecting rod[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
 郑祺峰. 发动机连杆裂解槽激光加工技术及自动化设
- [3] YANG Hongyu. Numerical simulation of connecting rod fracture processand analysis on main fracture splitting defects [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

备[D]. 长春:吉林大学,2011.

杨宏宇.连杆断裂剖分过程数值模拟及主要裂解缺陷 分析[D].长春:吉林大学,2014.

 [4] DENG Weihui, ZHANG Yongjun, HUANG Yaxi, et al. Development of cracking notches process for Engine conrod[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(11):60 -61. (in Chinese)

邓伟辉,张永俊,黄压西,等.发动机连杆应力槽加工 新技术[J].机床与液压,2009,37(11):60-61.

[5] ZHAO Yong. Study on parameters of connecting rod fracture splitting based on fracture after small scale yielding and its application [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
赵勇. 基于小范围屈服断裂的连杆胀断参数研究与应

用[D]. 长春:吉林大学,2011.

- [6] YANG Qingtian. Multi-scale simulation study on propagation of connecting rod crack by wire cut electrical discharge machining [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016. (in Chinese)
 杨青天. 电火花线切割连杆裂纹扩展的多尺度仿真研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [7] WANG Jinwei. Numerical simulation and experimental study on pulsed laser processing fracture splitting notch of con-rod /crankcase bearing block [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
 王金伟. 连杆/箱体主轴承座裂解槽脉冲激光加工数

值模拟及试验研究[D].长春:吉林大学,2011.

[8] Yuvraj K Madhukar, Suvradip Mullick, Ashish K Nath. An

investigation on co – axial water – jet assisted fiber laser cutting of metal sheets [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016:77.

- [9] HU Kai. Study of 1550 nm and 2 um fiber lasers based on nonlinear effects [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
 胡凯. 基于非线性效应的 1550 nm 及 2 µm 光纤激光 器研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [10] ZHANG Zhiqiang. Numerical simulation and experimental study on effect factors of engine connecting rod fracture splitting[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

张志强.发动机连杆裂解加工影响因素数值分析及试验研[D].长春:吉林大学,2007.

[11] ZHENG Qifeng, YANG Zhenhua, DENG Chunping, et al. Manufacture of connecting – rod initial splitting notch by Nd : YAG solid laser[J]. Optics and Precision Engineering,2010,18(1):142 – 147. (in Chinese) 郑祺峰,杨慎华,邓春萍,等.应用 Nd_YAG 激光加工 连杆初始裂解槽[J].光学 精密工程,2010,18(1): 142-147.

[12] GUO Qiang, JIA Zhixin, GAO Jianqiang, et al. Technological study on laser cutting of polycrystallinediamond compact[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(6):686-692. (in Chinese)

郭强,贾志新,高坚强,等.聚晶金刚石复合片激光切 割工艺研究[J].激光与红外,2017,47(6):686-692.

- [13] ZHENG Liming. Research on key technologies and equipment development of engine connecting rod fracture splitting[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese) 郑黎明. 发动机连杆裂解加工关键技术研究与装备开发[D]. 长春:吉林大学, 2012.
- [14] LI Yue. Laser mark technology for Ge Wafer[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12):1424 - 1426. (in Chinese)
 李悦. Ge 晶片激光标识码的制作技术[J]. 激光与红 外, 2015, 45(12):1424 - 1426.