

## 激光与光电子学进展

## 激光加工胀断连杆裂解槽技术研究现状

苏培林<sup>1</sup>, 程焱<sup>2\*</sup>, 王冠<sup>2</sup>, 张传友<sup>2</sup>, 林晓平<sup>2</sup>, 邹欣<sup>2</sup><sup>1</sup>广州东振激光科技有限公司, 广东 广州 510760;<sup>2</sup>广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

**摘要** 连杆裂解加工是连杆加工的关键技术, 具有许多优势, 比如: 加工工序较少, 能够使设备投资达到最小化; 材料损耗程度低, 能够达到节能和节材的目的; 产品拥有较高的质量, 连杆承载能力明显提高等。其最为核心的技术包括三种: 连杆裂解槽加工、定向裂解连杆和定扭矩装配螺栓。连杆裂解槽加工的主要方式是激光加工。本文主要介绍激光加工连杆裂解槽的原理和特点, 以及激光加工连杆裂解槽设备的国内外发展现状和特点。激光加工连杆裂解槽的特点主要是精度高、效率高等, 目前国内外激光加工连杆裂解槽设备朝着提高加工效率、降低成本的方向发展。

**关键词** 激光加工; 胀断连杆; 裂解槽; 现状

中图分类号 TG485

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1100005

## Research Status of Laser Processing Technology of Broken Connecting Rod Cracking Groove

Su Peilin<sup>1</sup>, Cheng Yan<sup>2\*</sup>, Wang Guan<sup>2</sup>, Zhang Chuanyou<sup>2</sup>, Lin Xiaoping<sup>2</sup>, Zou Xin<sup>2</sup><sup>1</sup>Guangzhou Dongzhen Laser Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510760, China;<sup>2</sup>School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** Connecting rod cracking processing is a key technology for connecting rod processing, which contains many advantages, such as fewer processing procedures, which can minimize equipment investment; the material loss is low, which can achieve the effect of energy saving and material saving; and the products have higher quality and improve the carrying capacity of connecting rods. Its core technologies include three types, the first is connecting rod cracking groove processing, the second is the directional splitting connecting rod, and the last is fixed torque assembly bolts. The main processing method of connecting rod cracking groove processing is laser processing. This article mainly introduces the principle and characteristics of laser processing connecting rod cracking tank and the development status, and characteristics and prospects of laser processing connecting rod cracking tank equipment at home and abroad. The characteristics of laser processing connecting rod cracking tank are mainly high precision and high efficiency. At present, domestic and foreign laser processing connecting rod cracking tank equipment is developing in the direction of improving processing efficiency and reducing costs.

**Key words** laser processing; broken connecting rod; cracking groove; status

**OCIS codes** 140.3460; 140.3510

收稿日期: 2020-10-26; 修回日期: 2020-11-04; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 肇庆市科技计划(2019K023)、四会市科技计划(2018020103)

\*E-mail: 2440852917@qq.com

## 1 引言

发动机是整辆汽车的核心,发动机的寿命与质量会对整体的运行性能产生重要影响。而连杆作为发动机内部动力传送的重要组成部件<sup>[1]</sup>,承受的载荷较大,并处于恶劣的工作环境下,这对于连杆的性能结构提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。当采用机械拉削切割时,拉刀尖端处具有比较小的圆弧半径,切割时极易造成磨损变钝,裂解槽的尖端半径也跟着变大,影响裂解过程的应力集中效果,裂解之后缺陷出现的概率随之变大,因此机械拉削存在刀具磨损严重、效率低、精度低等问题<sup>[3]</sup>;线切割加工连杆裂解槽时,由于每一次线切割加工之前,均需要进行穿丝和重新定位,加工效率较低,重复精度较差。激光加工和裂解胀断则具有很多优势,如切缝窄小,加工速度相对较快,具有较高的重复精度,柔性好、噪声低、效率高<sup>[4]</sup>,无刀具磨损,容易裂解,并且裂解之后具有质量好、掉渣少、夹屑少、变形小等优势,将代替传统加工中的机械拉削工艺。线切割和激光加工都是目前常用的连杆裂解槽加工方法,线切割的成本低但效率也低,而激光加工效率高,对之后的裂解产生有利的影响,但成本较高。综合考虑优势和不足,目前许多汽车企业倾向于采用激光切割裂解槽<sup>[5-6]</sup>。

## 2 激光加工连杆裂解槽的特点和原理

### 2.1 激光加工连杆裂解槽的特点

当连杆材料完成激光切割流程以后,槽截面呈现V型,在槽深相同的状态下,相比于线切割的U型槽,裂解槽宽度更加窄小,槽底部的曲率半径更小,会对接下来的裂解加工产生有利影响<sup>[7-8]</sup>。在进行激光切割之后,裂纹槽的底部位置会产生相硬化区与凝固区,且切槽底部存在少量微小的裂纹,这对连杆以后的裂解更加有利<sup>[9]</sup>。

激光切割技术具有很多优势,如割缝狭小、热影响区小等<sup>[10]</sup>。对板材进行激光切割的过程中,无需模具,能明显缩短产品的生产周期,降低生产所需的成本。因此,该项技术已经在汽车、航空等领域得到了广泛应用。

### 2.2 激光加工连杆裂解槽的原理

激光加工连杆裂解槽中用到的加工主要是切割,因此本研究主要分析激光切割连杆裂解槽的原理。激光具有高强度、高方向性、高相干性、高单色

性等特点<sup>[11]</sup>,可以以极小的立体角照射在工件表面上,并在极短的时间内产生极高的温度,经过一系列激光器中的光学系统,可在被作用材料表面形成极小的光斑,功率密度高达 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ ,能在极短的时间内使加工的材料熔化、汽化,达到加工的目的。具体原理见图1。

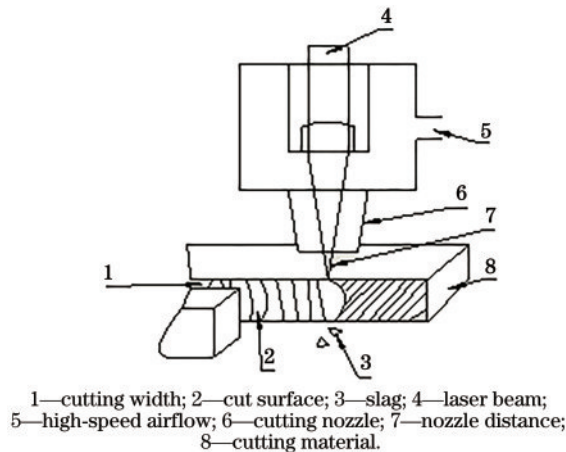


图1 激光切槽过程示意图

Fig. 1 Schematic of laser grooving process

通过对激光加工裂解槽进行研究,发现激光器射出的光束在经过聚光系统以及导光系统之后,产生的激光束具有能量密度高的特点。当激光束照射在工件表面<sup>[12]</sup>,激光能够被工件表面材料吸收,这样会使得部分位置的温度快速提升,使其迅速熔化、汽化或化学降解,从而实现材料分离,达到加工的目的<sup>[13]</sup>。不仅如此,借助同光束同轴的高压和高速辅助气流将熔融物质吹走,产生了相应的孔洞。由于激光束呈现匀速移动的状态,材料表面产生的小盲孔具有均匀连续的特点,最终也就产生了连杆裂解槽<sup>[14]</sup>。

## 3 裂解槽加工工艺的国内外研究现状

裂解槽加工工艺主要包含激光切割、机械拉削、电火花线切割等<sup>[15-18]</sup>,如图2所示。

在早期切口加工的过程中比较普遍采用的方式是机械拉削,该加工工艺的主要特点就是所需成本较低,加工效率较高,设备的结构比较简单,加工一个普通连杆的时间大约是12 s,但拉刀比较容易磨损。为了提升刀具的寿命,百濂保雄等<sup>[19]</sup>设计出全新的裂解槽拉削加工装置,如图3所示,该装置所采用的拉刀材料是具有较高硬度的磨石材料,但其依旧属于接触式加工的范畴,需要较高的生产维护成本。宋玮峰<sup>[20]</sup>分析了连杆胀断过程受到机械拉

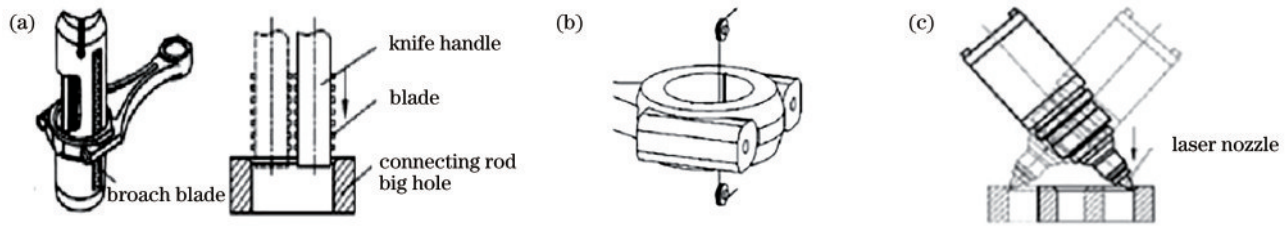


图2 常见的切口加工工艺。(a)机械拉削;(b)线切割加工;(c)激光切割

Fig. 2 Common incision processing technologies. (a) Mechanical broaching; (b) wire cutting processing; (c) laser cutting

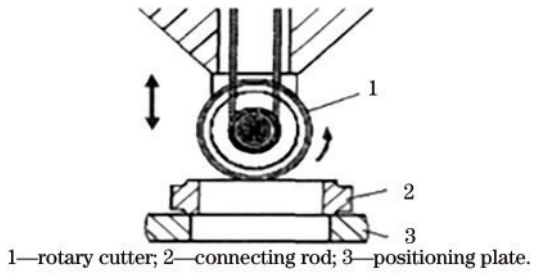


图3 日本本田公司制备的旋转切刀<sup>[19]</sup>

Fig. 3 Rotary cutter fabricated by Japan Honda<sup>[19]</sup>

削裂解槽几何参数的影响,研究了裂解载荷受到裂解槽张角、曲率半径和槽深的影响,得出了以下结论:裂解槽曲率半径越大,则裂解载荷越大;深度越大,裂解载荷越小;张角对裂解载荷的影响不大。

线切割加工裂解槽如图2(b)所示;基于电火花线切割应用技术,研发出单臂免穿丝电火花线切割机床设备,如图4(a)所示,该产品拥有较高的质量,同时设备的成本并不高,因此该设备已被广泛使用。由于每个连杆的切割都是要求上丝以及定位的,其加工一个连杆的时间为3~4 min,不适合进行连杆批量生产。广东工业大学研制出基于双向同步切割的电火花线切割设备<sup>[21]</sup>,如图4(b)所示,从而改变导轮布置位置,并且增加导轮数量,最终实现加工效率的提升,生产某个连杆的时间为40~60 s。在最近几年,又研制出新型连杆切槽线切割加工设备,如图4(c)所示,与双向同步切割的电火花线切割设备相比,该新型设备的加工效率显著提高。

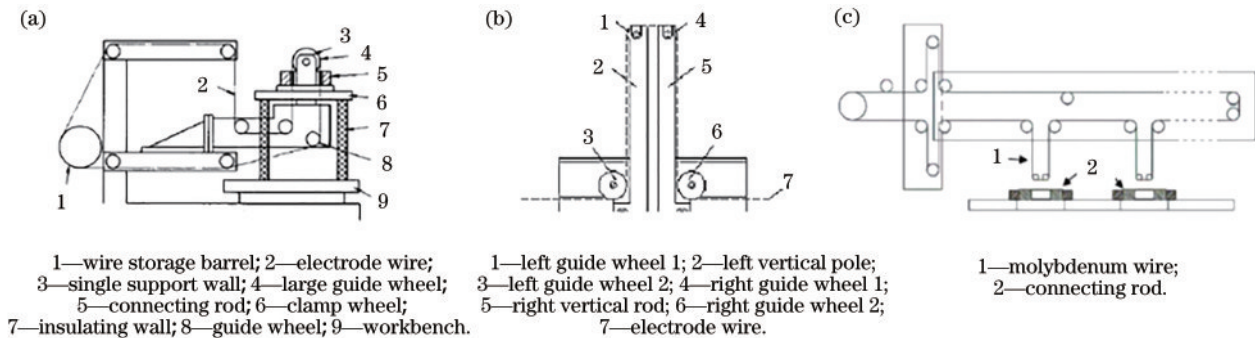


图4 线切割设备。(a)单臂免穿丝电火花线切割机床设备;(b)双向同步切割的电火花线切割设备;(c)双臂免穿丝电火花线切割加工机床

Fig. 4 Wire cutting equipment. (a) Single-arm wire-free wire electrical discharge machining (WEDM) equipment; (b) two-way synchronous cutting WEDM equipment; (c) double-arm wire-free WEDM equipment

## 4 激光加工连杆裂解槽的国内外研究现状

### 4.1 激光加工连杆裂解槽国外发展现状

德国的ALFING公司使用激光切割裂解槽的方法来对自动线与半自动线的裂解槽进行加工。在连杆裂解技术上德国ALFING公司已经积累了非常丰富的经验,最近这几年来,ALFING公司在原先的连杆裂解槽加工的基础上,有了新的突

破。在进行连杆裂解槽加工的过程中,主要使用的是双激光切割头,利用激光分时输出系统对连杆大头孔两侧进行裂解槽加工处理。该公司还研发出连杆裂解槽激光加工机床,主要为MAUSER公司等提供服务,与连杆裂解加工设备配套使用,详见图5,德国MAUSER公司在经过一系列的研究之后,研制出一种新型激光切槽设备,基于分光镜的作用,对单束激光进行分束,直接照射到两个交叉的聚焦设备上,并对连杆两端的裂解槽进行同时加



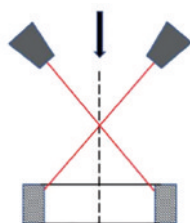
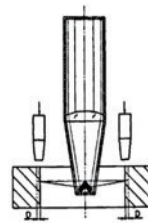


图5 MAUSER切槽方法

Fig. 5 MAUSER grooving method

工<sup>[22]</sup>,这样提高了加工效率,减少了激光器数量,降低了成本,但激光能量损失较多,激光会聚效果不理想。日本本田公司研发出一种新的切槽方法,具体结构见图6,激光束从激光振荡器射出后,会聚在管状头部的聚光透镜处,通过关于中心轴线对称的一对反射镜将激光束分为两束,这两束光分别垂直通过两边的出射孔,作用于连杆大头孔内圆柱面上,在聚光器沿着轴线向下运动的过程中,在连杆内圆柱面上进行加工,得到两个相对应的V型裂解槽。在槽周围的上方位置放置2个供给辅助气体的气管,激光束在加热之后,起到吹走熔渣的作用。相比于MAUSER切槽方法,日本本田公司的切槽方法不仅具有较佳的激光会聚效果,而且损失的激光能量也比较少,能够对槽深与形状进行精确控制。但是,日本本田公司的切槽方法并不适用于大

图6 日本本田公司切槽方法<sup>[11]</sup>Fig. 6 Method of grooving by Japan Honda<sup>[11]</sup>

头孔直径比较小的连杆加工,原因是该方法会产生尺寸较大的切割头。

瑞士LASAG公司研发的激光切割机床如图7所示,它的优势为节约激光源,加工效率非常高,光束传输使用的是常规方法,激光加工光束质量不错,但其也有不足之处。如果连杆的大头孔直径较厚,那么不适合用两个聚光器对其进行加工;对于激光切割头,由于其具有固定的角度,为了不让连杆大头孔和激光切割头相互影响,一般来说,对裂解槽进行加工时,所面向的都是单一品种的连杆;没有较好的柔性,因为在传输方式上使用的是常规光束,在远距离工位上激光能量很难传输到位;激光器需要较大的功率,否则分光以后,加工时可用的激光功率非常低,达不到裂解槽加工要求。

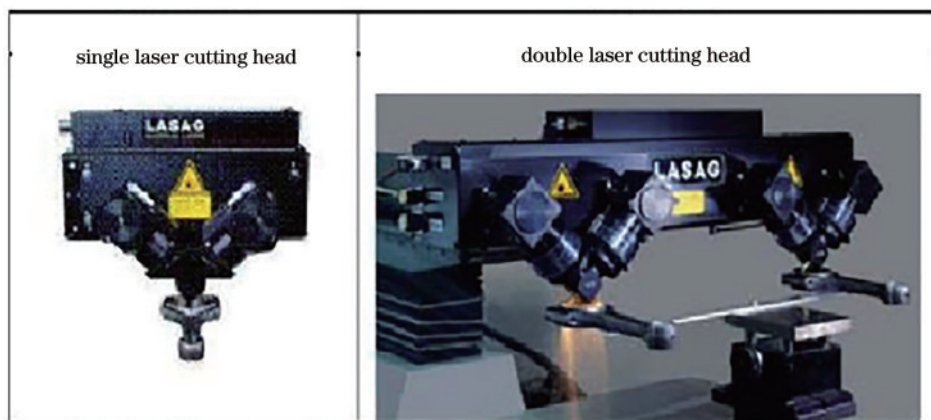


图7 瑞士LASAG公司的激光切割方式

Fig. 7 Laser cutting method of Swiss LASAG company

#### 4.2 激光加工连杆裂解槽国内发展现状

吉林大学开发出一系列Nd:YAG固体激光加工连杆裂解槽专用设备<sup>[23]</sup>。如图8所示,吉林大学在经过一系列的研究之后,研制出专门的裂解槽激光加工设备,主要选用单输出激光头,在激光头摆动结构的作用下,调节激光头的角度,最后实现加工操作<sup>[24]</sup>,这种设备加工连杆方便,但激光能量损

失较大,加工效率不高。

广东工业大学与广东四会实力连杆公司联手,研制出LFS150胀断连杆激光切槽专机,这也是我国第一台应用光纤激光加工连杆裂解槽的设备,如图9所示<sup>[25-26]</sup>。在这一设备中使用的是ROFIN的光纤激光器,能够进行激光垂直照射连杆大头孔内壁的操作,并且切割头也可以实现360°旋转,便于加工

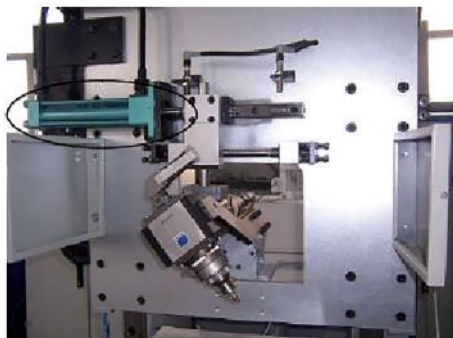
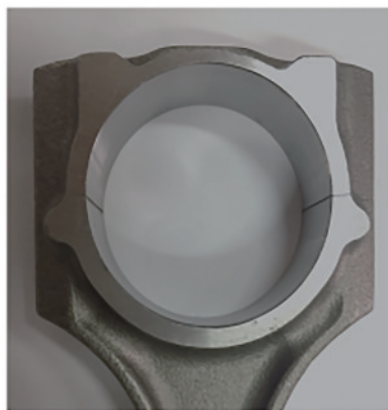
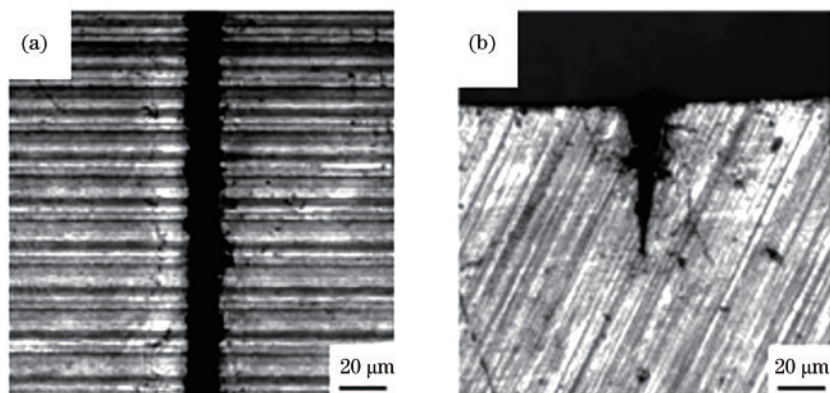
图8 吉林大学激光切槽设备<sup>[23]</sup>Fig. 8 Laser grooving device of Jilin University<sup>[23]</sup>图9 LFS150胀断连杆激光切槽设备<sup>[25-26]</sup>Fig. 9 LFS150 expanding and breaking connecting rod laser grooving equipment<sup>[25-26]</sup>图10 连杆裂解槽实物图<sup>[33]</sup>Fig. 10 Physical picture of connecting rod cracking tank<sup>[33]</sup>

图11 连杆裂解槽扫描电镜图。(a)裂解槽宽度图;(b)裂解槽深度图

Fig. 11 Scanning electron micrograph of connecting rod cracking tank. (a) Cracking tank width picture; (b) cracking tank depth picture

本课题组在一代设备上分析了激光加工参数(包括峰值功率、脉冲宽度、脉冲频率、扫描速度)对连杆裂解槽的槽深、槽宽、曲率半径和张角的影响规律,实验结果表明:随着脉冲宽度、峰值功率、扫描速度和脉冲频率的逐渐加大,裂解槽的曲率半径不断增大,而张角的变化不明显;随着峰值功率增大,脉冲宽度增大,切槽速度减小,裂解槽宽度增

处理对称裂解槽,这样一来,裂解槽位置的准确度也得到了更多保障<sup>[27-30]</sup>。采用 $0^\circ$ 入射角垂直加工连杆裂解槽,这是因为在激光能量密度相同的情况下,随着入射角度的增大,材料对激光的反射加大,材料对激光能量的吸收率减小,实际输入材料的激光能量减少,用于切割的有效能量降低,会使切槽变小、变浅<sup>[31]</sup>。这种设备的激光能量损失较少,但缺乏保护装置,对操作者安全有较大威胁。图10为连杆裂解槽实物图,图11为连杆裂解槽扫描电镜图。

大,脉冲频率对槽宽影响小;随着峰值功率增大,脉冲宽度增大,脉冲频率增大,切槽速度减小,裂解槽深度增大<sup>[32]</sup>。通过正交试验得出了峰值功率、脉冲宽度、脉冲频率和扫描速度的合适选取范围,扫描速度选取范围为 $0.2\sim 1.4$  mm/s,峰值功率的选取范围为 $200\sim 800$  W,脉冲宽度的选取范围为 $20\sim 80$   $\mu$ m,脉冲频率的选取范围为 $500\sim 2000$  Hz。只

有在以上激光加工参数范围内加工的连杆才能满足工厂生产的需求。

之后,本课题组又开发出胀断连杆激光切槽二代设备、三代设备,其中二代设备是双工位的,可以一边加工一边上料,上料和加工区被隔开,保证了

工人的安全。使用多功能的夹具可同时加工两条叠加放置的连杆,且便于更换连杆型号。而三代设备是在二代设备的基础上增加了不同的夹具,即是多工位的,避免了更换夹具的麻烦,提高了效率。二代设备和三代设备如图12和图13所示。

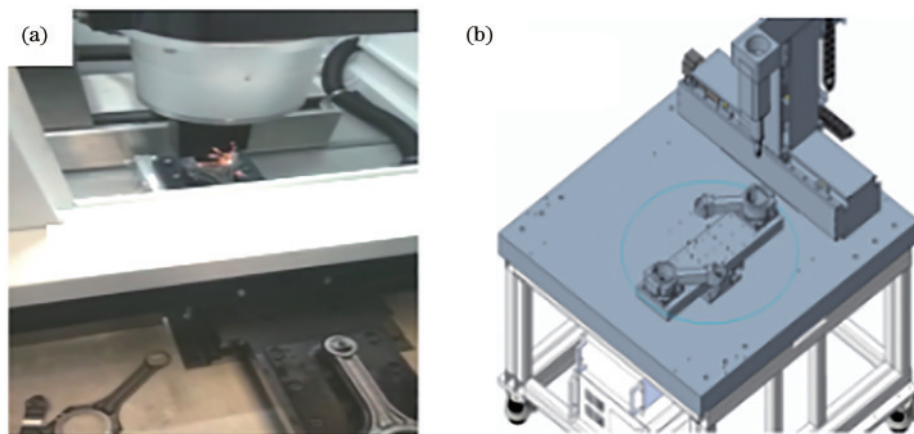


图12 胀断连杆激光切槽二代设备。(a)激光切槽二代设备实物图;(b)激光切槽二代设备示意图

Fig. 12 The second generation equipment of laser grooving for expanding and breaking connecting rod. (a) The physical photograph of the second-generation laser grooving equipment; (b) diagram of the second generation of laser grooving equipment

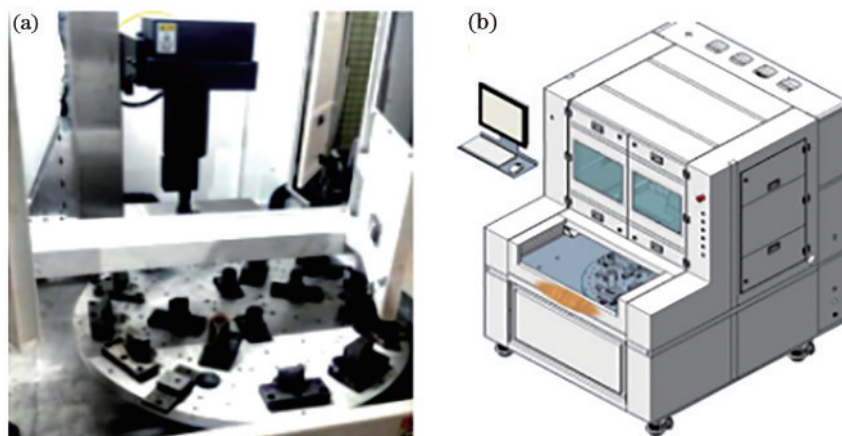


图13 胀断连杆激光切槽三代设备。(a)激光切槽三代设备实物图;(b)激光切槽三代设备三维模型图

Fig. 13 The third generation of laser grooving equipment for expanding and breaking connecting rods. (a) Physical picture of the third generation laser grooving equipment; (b) three-dimensional model of the third generation laser grooving equipment

在连杆裂解生产工作中最为重要的切口加工技术就是激光切槽技术,该技术的切割效率很高并且具有较高的功率密度,但是材料以及激光互相影响机制非常繁琐,有关的加工影响以及参量因素很多。因此,裂解槽加工质量在很大程度上受到激光切割过程的影响<sup>[14,34]</sup>。现在,针对加工裂解槽技术的分析工作有很多,也获得了较多的研究成果。高文婧<sup>[35]</sup>综合考虑辅助气体流场与温度场的交互作用,研究了激光参数、气体参数对匙孔成形尺寸及裂解槽加工质量的影响。当激光功率增大时,匙孔

深度和直径都随之增加;辅助气体起冷却作用,也会影响温度场的分布。张冲<sup>[12]</sup>研究了脉冲能量、脉冲重叠率对裂解槽几何参数的影响,得出了以下结论:脉冲能量的增加可以使裂解槽的深度增加,进而改善加工质量。激光脉冲重叠率的增加可以提高裂解槽的加工质量。李志鹏<sup>[32]</sup>主要分析了以下几个因素对裂解槽质量的影响,包括辅助气体、脉冲频率、离焦量等,并得出以下的结论:最优的离焦量可以达到最大的槽深,合适的辅助气压值可以防止熔渣在裂解槽表面附着,起到吹除熔渣的作用。



## 5 结论和展望

在设计激光加工连杆裂解槽装备的过程中,应选择最佳的激光入射角,采用 $0^\circ$ 入射角更适合裂解槽的加工,而且也会产生节能的效果;通过优化激光头的工作路径之后,选择使用垂直路径与 $180^\circ$ 自转的方法,对激光头的位置和角度进行适当调节,对于激光加工来说可以规避其他物体的影响<sup>[12]</sup>。此时,对于软件编程的简化处理非常有利,为后期的调试工作创造更多有利条件。

激光切割连杆裂解槽设备也有一些缺点,比如设备比较昂贵,切割时耗气量比较大等。未来激光切割连杆裂解槽设备应朝着智能化、轻量化、低成本、柔性化方向发展。其中智能化和低成本是主要发展趋势,智能化可以提高连杆裂解槽的加工质量,满足不同连杆的加工需求,即提高设备的灵活性,通过数据挖掘技术和借助仿真模型,设备具有了自适应,即智能化水平提高了,简化结构和采用自动化设备加以辅助可以降低成本。

### 参 考 文 献

- [1] Gao L, Zhang H X, Xu W, et al. Optimal design of connecting rod of gear-linked cylinders hydraulic engine [J]. Shandong Industrial Technology, 2016 (9): 73.  
高雷, 张洪信, 徐威, 等. 缸间齿轮联动液压发动机连杆优化设计[J]. 山东工业技术, 2016(9): 73.
- [2] Zhang X M. Main defects of connecting rod fracture splitting and calculation method of the allowable size [D]. Changchun: Jilin University, 2014.  
张希明. 连杆裂解加工主要缺陷及其许用尺寸计算方法初探[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [3] Hu X D, Li Y L, Bai S Z, et al. Research progress of laser application in material removal [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500008.  
胡晓冬, 李元龙, 白少状, 等. 激光在材料去除加工中应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500008.
- [4] Sun F, Song Y Y, Zhao Q L, et al. Influence of off-axis amount on dynamics performance of gas in laser cutting process [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402003.  
孙凤, 宋园园, 赵庆龙, 等. 激光切割中离轴量影响气体动力学性能的研究[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402003.
- [5] Kou S Q, Jin W M, Gu Z W, et al. The new technology and developing trend of IC engine connecting rod manufacturing [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2001, 22 (1) : 28-31.  
寇淑清, 金文明, 谷净巍, 等. 内燃机连杆制造最新技术与发展趋势[J]. 内燃机工程, 2001, 22(1): 28-31.
- [6] Gu Y S. Processing techniques development of today's automobile engine [J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 2000, 6(3): 36-41, 29.  
顾永生. 现代汽车发动机制造工艺的发展动向[J]. 柴油机设计与制造, 2000, 6(3): 36-41, 29.
- [7] Zhao Y. Study on parameters of connecting rod fracture splitting based on fracture after small scale yielding and its application [D]. Changchun: Jilin University, 2011.  
赵勇. 基于小范围屈服断裂的连杆胀断参数研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [8] 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.  
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.
- [9] Wang J W. Numerical simulation and experimental study on pulsed laser processing fracture splitting notch of con-rod/crankcase bearing block [D]. Changchun: Jilin University, 2011.  
王金伟. 连杆/箱体主轴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.
- [10] Zheng Q F. Research on laser processing fracture splitting groove technology and automation equipment for engine connecting rod [D]. Changchun: Jilin University, 2010.  
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.
- [11] Zheng L M. Research on key technologies and equipment development of engine connecting rod fracture splitting [D]. Changchun: Jilin University, 2012.  
郑黎明. 发动机连杆裂解加工关键技术研究及装备开发[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [12] Zhang C. Study on key technology and equipment of machining 36MnVS4 splitting connecting rod with pulse fiber laser [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.  
张冲. 脉冲光纤激光加工36MnVS4胀断连杆裂解槽关键技术及装备的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.

- [13] Zhang X C, Qian J, Liu J, et al. Recent process in laser processing of fiber-reinforced composites [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111432.  
张学聪, 钱静, 刘军, 等. 激光加工纤维增强复合材料研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111432.
- [14] Zheng Q F, Yang S H, Deng C P, et al. Manufacture of connecting-rod initial splitting notch by Nd:YAG solid laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 142-148.  
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): 142-148.
- [15] Yilbas B S. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155/156: 2106-2115.
- [16] Loisos G, Moses A J. Effect of mechanical and Nd:YAG laser cutting on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented steels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 161(1/2): 151-155.
- [17] Usov S V, Minaev I V. High-power impulse YAG laser system for cutting, welding and perforating of super hard materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/2/3): 541-545.
- [18] Ghany K A, Newishy M. Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 168(3): 438-447.
- [19] Yasuo M, Sigeo O. Machining apparatus for forming cracking slot for connecting rod: CN1575896A [P]. 2005-02-09.  
百濑保雄, 太田薰雄. 用于形成连杆的断裂狭槽的加工装置: CN1575896A [P]. 2005-02-09.
- [20] Song W F. Performance comparison and notch parameter selection on con-rod fracture splitting machining of 36MnVS4 and C70S6 [D]. Changchun: Jilin University, 2017.  
宋玮峰. 36MnVS4/C70S6 连杆裂解加工性能对比及缺口参数选择 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [21] Xia S. Development of inverted duplex station equipment for the wire electrical discharge machining of connecting rod fracture splitting groove [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.  
夏松. 倒立式双工位线切割连杆裂解槽设备的研制 [D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [22] Duerr U. Laser machining method for forming an incipient crack zone, for fracture separation of a component, in particular a connecting rod for an internal combustion engine and laser installation: WO2005040622 [P]. 2005-05-06.
- [23] Gu Z, Yang S, Ku S, et al. Fracture splitting technology of automobile engine connecting rod [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25(9/10): 883-887.
- [24] Kou S Q, Yang S H, Zhao Y. Laser processing method for connecting rod splitting groove and its equipment: CN1559744 [P]. 2005-01-05.  
寇淑清, 杨慎华, 赵勇, 等. 连杆断裂剖分前预制裂解槽激光加工方法及其设备: CN1559744 [P]. 2005-01-05.
- [25] Wang G, Li Z P. Device in car connecting rod schizolysis groove is cut to one-way vertical type laser: CN205996386U [P]. 2017-03-08.  
王冠, 李志鹏. 一种单向直立式激光切汽车连杆裂解槽的装置: CN205996386U [P]. 2017-03-08.
- [26] Wang G, Li Z P, Wei H Y, et al. Device and method for unidirectional vertical laser cutting of automobile connecting rod fracture splitting notches: CN106271092A [P]. 2017-01-04.  
王冠, 李志鹏, 韦鸿钰, 等. 一种单向直立式激光切汽车连杆裂解槽的装置及方法: CN106271092A [P]. 2017-01-04.
- [27] Wang G, Li Z P, Guan L, et al. Connecting rod visual auxiliary locating laser groove cutting device and control method: CN107414314A [P]. 2017-12-01.  
王冠, 李志鹏, 关蕾, 等. 一种连杆视觉辅助定位激光切槽装置和控制方法: CN107414314A [P]. 2017-12-01.
- [28] Wang G, Zhang C, Chen L Y, et al. Laser head protection device for machining connecting rod cracking grooves and protection method: CN107234349A [P]. 2017-10-10.  
王冠, 张冲, 陈玲玉, 等. 一种加工连杆裂解槽的激光头保护装置及其保护方法: CN107234349A [P]. 2017-10-10.
- [29] Wang G, Li Z P, Guan L, et al. Laser processing rotating disc clamp device used for connecting rod fracture splitting groove: CN107175414A [P]. 2017-09-19.  
王冠, 李志鹏, 关蕾, 等. 用于连杆裂解槽激光加工旋转盘夹具装置: CN107175414A [P]. 2017-09-19.
- [30] Wang G, Li Z P, Deng Y, et al. Laser machining clamp device of connecting rod fracture splitting



- groove: CN106736187A[P]. 2017-05-31.
- 王冠, 李志鹏, 邓宇, 等. 连杆裂解槽激光加工夹具装置: CN106736187A[P]. 2017-05-31.
- [31] Chen J M, Zuo T C. Effect of laser beam incident angle on laser cutting quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(11): 1037-1040.
- 陈继民, 左铁钊. 激光切割中入射角对切割质量的影响[J]. 中国激光, 2001, 28(11): 1037-1040.
- [32] Li Z P. Study on the optical fiber laser processing technology of the initial cracking groove of the engine connecting-rod[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- 李志鹏. 发动机连杆初始裂解槽光纤激光加工工艺研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [33] Wang C H. Research on the equipment and processing technology of vertical pulse fiber laser machining Splitting connecting rod with duplex processing area[D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2020.
- 汪春辉. 双工位直立式光纤激光垂直加工连杆裂解槽装备及加工工艺研究[D]. 广东: 广东工业大学, 2020.
- [34] Kou S Q, Wang J W, Zheng Q F. Numerical analysis of the temperature field generated during the production of a fracture notch in a C70S6 steel connecting rod using a Nd:YAG laser[J]. Lasers in Engineering, 2011, 21(1/2): 115-127.
- [35] Gao W Q. Modeling and simulation of fluid field and temperature field coupling system of laser grooving [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- 高文婧. 激光切槽流体场与温度场耦合系统建模与仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2015.