

文章编号 1004-924X(2010)06-1340-07

连杆尖锐裂解槽的脉冲 YAG 激光切割

寇淑清¹, 王金伟¹, 菅晓霞², 郑祺峰¹

(1. 吉林大学 锻压研究所, 吉林 长春 130025; 2. 哈尔滨理工大学 荣成学院, 山东 荣成 264300)

摘要:对激光加工连杆裂解槽工艺进行了研究,根据材料状态、能量平衡和孔形变化,将脉冲激光加工裂解槽孔过程分为起始、准稳定破坏及收尾 3 个阶段;对脉宽、波形、脉冲频率、切割速度等影响裂解槽根半径的因素进行了分析;设计了一种新的激光脉冲波形,以满足槽根尖锐度的要求。分析及实验结果表明:长脉冲宽度与切割速度的合理匹配是获得尖锐裂解槽的关键,当脉宽取 1 ms,切割速度为 10 mm/s 时,获得了根部尖锐的裂解槽。对于要求深且尖锐的裂解槽,可增加频率转化为多个长脉冲加工;当频率增加到 40 Hz,脉宽取 0.5 ms,得到的裂解槽纵横比大且根部尖锐。裂解槽形貌对比表明,对于脉宽和频率进行优化,可在加工裂解槽孔的各个阶段合理地注入能量,获得高质量的裂解槽。

关键词:激光切割;连杆;裂解槽;脉冲激光;尖锐度

中图分类号: TG485 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101806.1340

YAG laser cutting on sharp fracture splitting notch of connecting rod

KOU Shu-qing¹, WANG Jin-wei¹, JIAN Xiao-xia², ZHENG Qi-feng¹

(1. *Roll Forging Research Institute, Jilin University, Changchun 130025, China;*

2. *Rongcheng College, Harbin University of Science and Technology, Rongcheng 264300, China*)

Abstract: A laser cutting process for the fracture splitting notch of a connecting rod was researched in this paper. According to the material behaviors, energy balance and the changes of hole shapes, the process was divided into three stages, initial state, quasi-steady destruction and tail stage. The affects of pulse width, waveform, pulse frequency and cutting speed on the notch root radius were analyzed, and a new pulse waveform was designed to satisfy the request of notch root sharpness. Analysis and experimental results show that a long pulse width combined with a reasonable cutting speed is the key to obtain a sharp fracture splitting notch. When the pulse width is set to be 1 ms, cutting speed to be 10 mm/s, the sharp fracture splitting notch can be obtained. Furthermore, for a deeper and sharper notch, it can be transformed into many long pulse processing by increasing the frequency. When the frequency is increased to 40 Hz, pulse width to 0.5 ms, the fracture splitting notch with a larger aspect ratio and a sharp root can be obtained. By comparison of the morphologies for the fracture splitting notch, it indicates that proposed process can achieve the sharp fracture splitting notch with higher

收稿日期: 2009-09-24; **修订日期:** 2009-10-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50375066); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20060183066)

quality by injecting energy reasonably into each stage in laser processing.

Key words: laser cutting; connecting rod; fracture splitting notch; pulsed laser; sharp degree

1 引言

连杆裂解(也称连杆胀断)加工是20世纪90年代初发展起来的一种连杆加工技术,该工艺采用断裂剖分大头结合面,使连杆由传统的分体加工变为整体加工,可取消传统加工工艺中切断、杆、盖结合面拉削与磨削等工艺,同时简化了连杆螺栓孔的结构设计和加工工艺,省去了螺栓孔铰、镗等精加工,具有加工工序少、制造精度高、节材节能、降低生产成本等优点,而且定位精准且重复定位精度极高,使连杆承载能力、组件刚度以及发动机装配质量大幅度提高。该技术从根本上改变了连杆的传统加工方法,是对传统连杆加工技术的重大变革^[1]。连杆裂解技术首先要求在结合面位置以适当的方式预制两条裂解槽,其目的在于确定断裂位置并制造缺口效应。当施加载荷后,从裂解槽根部启裂、裂纹扩展并快速发生脆性断裂,形成三维凹凸断裂剖面。对于裂解槽的加工方式已进行了很多探索^[2-5],结果表明:采用机械拉削加工,拉刀尖角处的圆弧半径很小,加工过程中很容易磨损变钝,裂解槽的半径随之变大,影响应力集中,裂解缺陷率亦随之增大;线切割每次加工都需要重新定位、穿丝,加工效率低,重复精度差。与机械拉削和线切割加工相比,采用脉冲YAG激光加工裂解槽,具有切缝窄,速度快,重复精度高,无刀具磨损,易裂解,裂解质量好,掉渣、夹屑、变形等质量缺陷减少等优点,将逐渐替代传统的机械拉削工艺,成为初始裂解槽的发展方向。目前,研究裂解槽几何参数对裂解加工质量的影响时,大都沿用拉削裂解槽的模型参数(槽深、张角和曲率半径),而脉冲YAG激光加工裂解槽上部呈圆柱形,根部为圆锥形。裂解槽的纵横比(槽深/槽宽)和根部半径(尖锐度)是激光加工裂解槽的两个重要参数。在槽的纵横比一定的情况下,减小根部半径,即增加裂解槽根部的尖锐度,对于提高裂解质量极为重要。

本文对脉冲YAG激光切割裂解槽的过程进行分析,研究了影响裂解槽根部半径的因素,为合理匹配激光参数和切割参数,提高连杆裂解加工

质量提供依据。最后,使用优化前后两组参数进行裂解槽加工,对理论分析进行实验验证。

2 脉冲激光切槽分析

2.1 裂解槽要求及激光切槽特点

连杆裂解槽的形状尺寸以及切槽质量对断裂行为有较大影响。裂解槽要求深度适中、根部尖锐,前者是因为裂解并合装之后要进行后序的精加工,需要考虑精镗、珩磨余量;后者是为了提高应力集中系数,达到在较低的载荷下断裂剖分的目的。在槽深一定的条件下,减小根部半径可有效降低裂解载荷,减少大头孔塑性变形,提高裂解加工质量。切槽质量评价主要包括切割位置、尺寸精度、切槽一致性、双槽对称性、切槽清晰度等。提高切槽质量,可保证断裂位置、减小断裂面倾斜、避免因两槽先后启裂造成外缘挤压等缺陷。

脉冲YAG激光用于材料加工具有功率密度高、聚焦光斑小、加热作用时间精确可调、热影响区小等优点,用于精密切槽有着独特的优越性,因此成为预制裂解槽的主要手段^[6]。脉冲YAG固体激光加工裂解槽是利用激光束聚集形成的高功率密度光斑,将材料快速加热至汽化温度,在高压辅助气体的作用下形成孔洞,再使光束与材料以一定的相对速度移动,在指定位置形成一条由密排孔洞构成的裂解槽——裂解槽孔。当加工过程中光斑重叠时,裂解槽孔宏观表现为波纹状连续沟槽,反之为一系列非连续小孔。因此,对加工裂解槽过程的研究可以转化为对脉冲激光加工裂解槽盲孔根部半径尖锐度的研究。脉冲激光打孔的质量直接决定裂解槽的质量。

2.2 裂解槽孔加工过程

脉冲激光打孔过程是一系列复杂物理现象的综合,包括如下3个阶段(如图1):(1)起始阶段,(2)准稳定破坏阶段,(3)收尾阶段^[7]。

2.2.1 起始过程

在打孔的起始阶段,高功率密度的激光束以点热源的方式照射在工件的表面,激光束的能量以一定的吸收率被材料吸收并迅速转化为热能,材料开始慢慢被加热,并通过热传导方式向周围

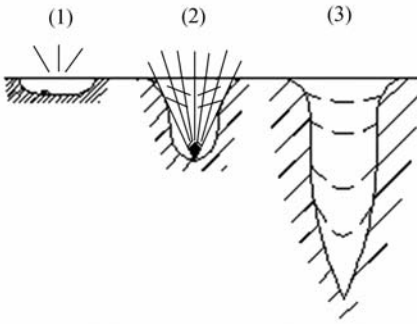


图 1 激光打孔过程

Fig. 1 Laser drilling process

材料传递热量。Lim 和 Powell 的实验结论^[8-9]认为,热量损失主要是热传导,而热辐射和对流导致的散热非常小,可以忽略不计。激光开始作用时,由于材料表面为室温,反射率很高,加热比较缓慢,造成较大区域的材料温升,相变以熔化为,并伴随蒸发,相变区面积大而深度浅,如图 1(1)所示。继续加热,熔融区面积缩小而深度增加,孔径开始收敛。熔化和蒸发的金属被高压辅助气体的气流吹走,加速凹坑的形成,同时,高压辅助气体使热影响区减小。

2.2.2 准稳定破坏过程

准稳定破坏阶段指在每一瞬时,都可以认为是蒸发及熔化状态与时间无关的稳态。能量平衡式表达如下^[10]:

$$P_s(t)dt = L_B \pi r^2(t) dh + L_m 2\pi r(t) h(t) dr, \quad (1)$$

式中 L_B 为材料单位蒸发能量 (J/cm^3), L_m 为材料单位熔化能量 (J/cm^3), P_s 为材料吸收的辐射功率 (W), t 为辐射作用时间 (s), h 为孔深 (cm), r 为孔的半径 (cm)。

在此阶段,打孔过程相对稳定,材料的汽化比例剧增至最大程度,孔的基本轮廓形成,如图 1(2)所示。从喷嘴喷出来的气体由低压变成高压,一方面补充燃烧反应所消耗的氧气,另一方面产生沿激光束向下的冲击作用,排出熔融金属。

2.2.3 收尾过程

在收尾阶段,脉冲能量即将结束,材料的加热已临近终止,汽化及熔化趋于结束。越往下层,金属与氧气接触的机会越少,底层金属基本不发生燃烧反应,主要是靠燃烧反应所产生的热量将其熔化。由于燃烧反应向孔壁扩展,越往下影响越小,因此,孔的形状大都呈现上宽下窄,最终形成了锥形孔底,如图 1(3)所示。

3 影响裂解槽根部半径的因素

3.1 脉冲宽度与切割速度

脉冲宽度所表现的是脉冲能量的时间部分特性^[11]。当激光脉冲能量恒定时,脉宽越窄,表示以时间为分母的时间能量密度越大,反之则时间能量密度越小。因此,脉宽的变化对孔深、孔径、孔型的影响较大。

脉宽的选择是由孔的要求而定的。深而小的孔,宜选用较长的脉冲宽度;大而浅的孔,则宜选用较短的脉冲宽度^[7];裂解槽孔相对较深、窄、尖,应采用长脉冲宽度。从材料受热变形及热应力裂纹的角度考虑,脉宽增大,激光作用时间长,热应力大,在裂解槽孔底部容易出现微裂纹。这些微裂纹在裂解工艺后续的胀断工序中将可能成为启裂点,显著降低胀断力,减小裂解缺陷。但是,脉宽也不易过长,假定激光能量恒定,脉宽增加,将使能量密度降低,材料的蒸发汽化减弱,熔化比例居上。当激光束快速移到下一位置切割裂解槽孔时,熔化的材料又重新凝固,容易堵塞裂解槽孔根部,且使孔深减小;排出的金属熔渣则在槽口堆积,降低槽的整洁性和清晰度,并加剧后续加工时刀具的磨损。

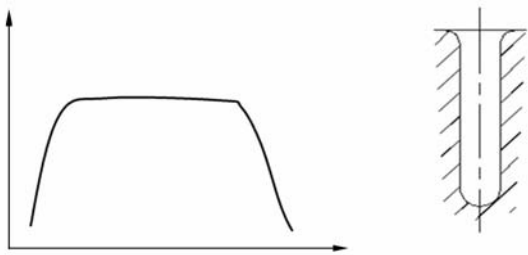
切割速度表现为激光束在材料表面移动的速度。只有脉冲宽度与切割速度合理搭配,才能保证一个长激光脉冲完全作用在一个裂解槽孔中,保证打孔过程的 3 个阶段顺利完成,得到尖锐的裂解槽根部。脉冲宽度太短,或者长脉冲宽度但移动速度过快,一个完整的脉冲不是全部作用在一个裂解槽孔中,就会因为未进入准稳定破坏阶段或者进入准稳定破坏阶段而未进入收尾阶段激光照射已经结束,造成未达到一定深度及图 1(2)所示的圆窝形孔底。同时,切割速度可以控制裂解槽孔的稀疏程度,满足不同裂解工艺的需求。生产过程中,为了兼顾加工效率,切割速度一般选择 $10 \sim 20 \text{ mm/s}$ 。

3.2 脉冲波形

在脉宽确定之后,如何有效地对材料加热并使其汽化,取决于如何以最佳的方式给材料注入能量,这直接与激光脉冲波形的构造有关。图 2 给出了不同波形与切割出的裂解槽孔轴向剖面示意图,其中图 2(a)为传统的打孔波形,前后沿陡,

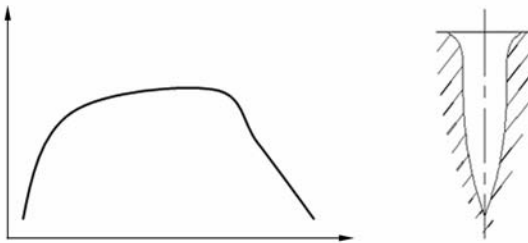
中间呈平顶状,所打孔根部呈圆窝形。图 2(b)的波形前后沿坡度平缓,波形呈馒头状,所打孔有一定锥度,入口处较宽,根部尖锐。

对比图 2(a)、(b),设计了一种新的脉冲波形如图 2(c)所示,初始为尖峰脉冲,用来快速加热并汽化材料,抵消打孔初始阶段材料反射所损耗的激光;接着为陡峭前沿与中间段连接,中间段平稳上升,这样利于减小孔的锥度及孔入口处的喇叭口大小,即槽宽;后沿为平缓的波形,利于尖锐裂解槽根部的形成,符合裂解槽孔的要求。图 2(c)所示为利用新的脉冲波形形成的裂解槽孔,其特点是进口处喇叭口很小,中部为圆柱形,根部半径小、尖锐度高,作为连杆裂解槽十分理想。



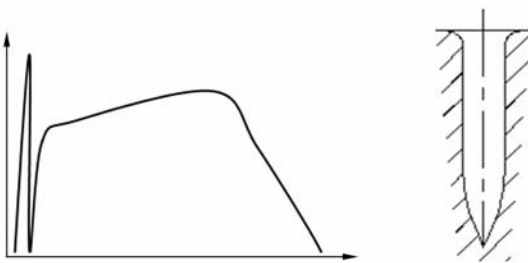
(a) 传统打孔波形

(a) Traditional drilling waveform



(b) 馒头状波形

(b) Bread-like waveform



(c) 新的脉冲波形

(c) New pulse waveform

图 2 激光波形与成孔示意图

Fig. 2 Laser waveforms and hole shot

3.3 脉冲频率与切割速度

对于有更深要求的裂解槽,脉冲频率的选择同样重要。频率过小,欲获得连续的裂解槽,切割速度需相应减小,但加工效率会很低。单个长脉冲加工较深裂解槽时随着孔深的增加,其底部会由于激光的散射、飞溅物及等离子体对激光的吸收等原因导致汽化速度下降,由此形成的熔化物部分排出,其余部分有可能在底部重新凝固,堵塞孔根部,形成圆形孔底。增加脉冲频率,与切割速度配合可变成多脉冲打裂解槽孔。多脉冲打裂解槽孔的特性在于利用一组若干长脉冲(比单脉冲切槽时的脉宽稍短)进行裂解槽孔的加工,当一个长脉冲结束时,另一个脉冲紧跟上来开始作用,在打出必要的深孔时,能造成汽化过程的急速中断,以减少液相的形成,防止堵塞孔底,在高压辅助气体向下的冲击作用下得到尖锐的孔根部。

多脉冲加工裂解槽孔,孔型和孔径仍由单个长脉冲参数决定,可以保证得到窄而尖锐的裂解槽孔;孔深由一组脉冲的总能量来决定,可以满足裂解槽深度的要求,孔深和孔径极限可以通过下述公式估算^[10-12]:

$$d_{\max} = 2 \left(r_0^3 + \frac{3\bar{E}}{\pi L_B} \tan \Phi \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

$$h_{\max} = \frac{1}{\tan \Phi} \left[\sqrt{\frac{\bar{E}}{\pi Q^*}} - r_0 \right], \quad (3)$$

式中, $r_0 = r(0)$, \bar{E} 为多脉冲加工平均能量, Φ 为光锥的半张角, Q^* 为在脉冲将要结束时建立起准稳定蒸发态的阈值能量密度。

脉冲频率不能过大,否则一个脉冲作用后,部分汽化熔化物没有完全排出之前,下一个脉冲马上开始作用,使裂解槽孔内部来不及汽化完,又在内壁加热,产生的熔化部分在孔的内部堆积,材料被过度烧蚀,使裂解槽孔中部直径变宽,锥度变大,并造成热影响区的显著增大,增加后续去除工艺的难度。打孔结束时这些熔化物仍将有一部分留在孔中,孔根部出现堵塞现象,裂解槽孔的质量显著下降。

4 激光切割试验

激光切槽试验在吉林大学自行研发的激光加工裂解槽机床上进行,见图 3。切割光源采用德国 TRUMPF 公司生产的 HL62P Nd:YAG 脉冲

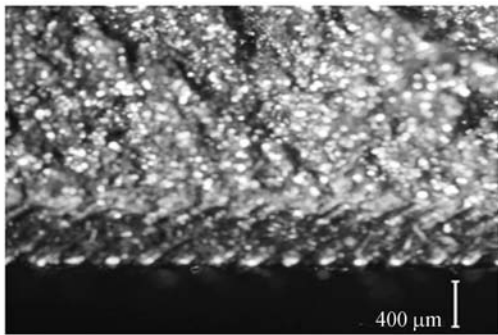
固体激光器,最大脉冲功率为 3.2 kW,输出功率为 60~75 kW。峰值功率、脉宽、频率、速度均可调。加工过程中辅助气体采用空气,压力为 0.6 MPa。试验材料为连杆 C70S6 高碳微合金非调质钢。

图 4 给出了脉冲宽度优化前后裂解槽形貌的对比(切割速度 12 mm/s、激光功率 3 kW、频率 40 Hz)。当脉宽为 0.3 ms 时,见图 4(a),裂解槽孔深度小,中间锥度大,底部为圆窝状,孔形较差;脉宽增加为 0.5 ms 时,孔入口处小,深度大,中间



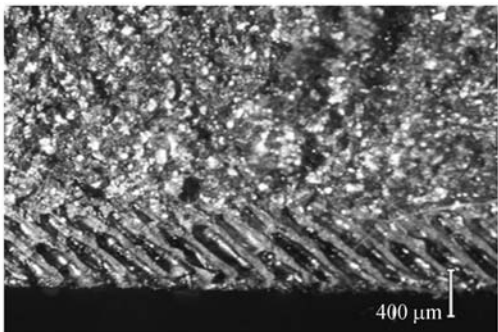
图 3 激光切槽试验

Fig. 3 Experiment of laser notching



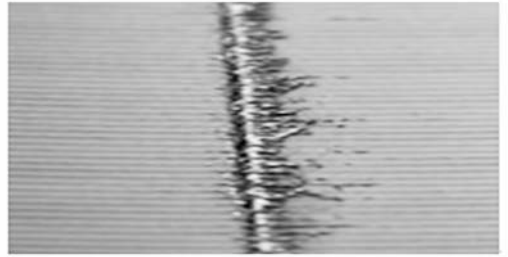
(a) 脉冲宽度 0.3 ms

(a) Pulse duration of 0.3 ms



(b) 脉冲宽度 0.5 ms

(b) Pulse duration of 0.5 ms



(c) 脉冲宽度 1.0 ms

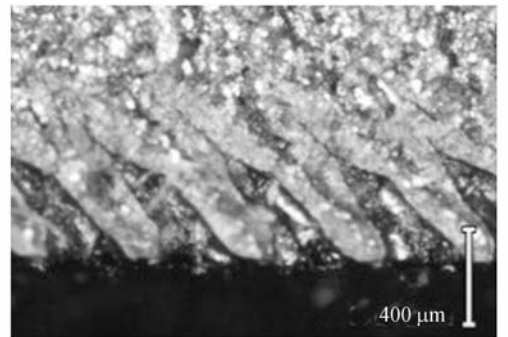
(c) Pulse duration of 1.0 ms

图 4 脉宽优化前后裂解槽形貌对比

Fig. 4 Morphologies of fracture splitting notch before and after pulse duration optimizations

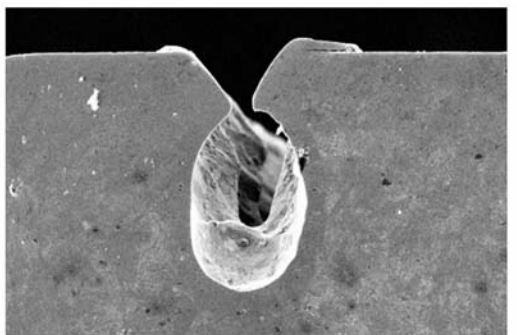
呈圆柱形,根部尖锐,如图 4(b)所示,孔形符合裂解槽孔深、窄、尖的要求;当脉宽达到 1.0 ms 时,在槽口出现了明显的金属熔渣,见图 4(c)。

图 5 为频率优化前后裂解槽形貌对比(激光功率 3 kW)。当频率为 20 Hz,脉宽为 1.0 ms



(a) 脉冲频率 20 Hz

(a) Pulse frequency of 20 Hz



(b) 脉冲频率 50 Hz

(b) Pulse frequency of 50 Hz

图 5 频率优化前后裂解槽形貌对比

Fig. 5 Morphologies of fracture splitting notch before and after frequency optimizations

时,需要降低切割速度(10 mm/s),才能获得相对连续的裂解槽孔,如图 5(a)所示,属于单个长脉冲加工裂解槽。当频率为 40 Hz,脉宽为 0.5 ms,切割速度为 12 mm/s 时,裂解槽如图 4(b)所示,其纵横比大且槽根部尖锐,属于多个较长脉冲加工裂解槽孔。当频率增加到 50 Hz,脉宽为 0.5 ms 时,所加工裂解槽孔如图 5(b)所示,呈口袋状,中间直径变宽,底部为圆窝形。实验结果与分析相吻合,说明了所提出的新加工工艺的有效性。

5 结 论

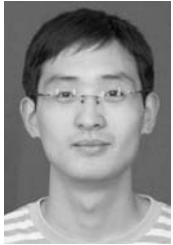
本文对激光加工裂解槽根部半径(尖锐度)的

问题进行了探讨,得出结论表明:根据材料状态、能量平衡和孔形变化,脉冲激光加工裂解槽孔过程包括 3 个阶段,即起始阶段、准稳定破坏阶段和收尾阶段。对于尖锐裂解槽,采用长脉冲宽度的激光与切割速度匹配来加工更合理;对于深度要求更大的裂解槽可采用多个长脉冲加工,即保证深度又可获得满意的根部半径。设计了一种新的激光脉冲波形,符合各个阶段向加工区输入所需能量的规律,较常规激光脉冲波形更有利于裂解槽孔的加工。激光切槽实验表明,采用优化后的激光加工参数,不仅裂解槽根部尖锐,而且入口宽度窄、中间圆柱部分直径小,完全满足裂解槽尖锐度和槽深纵横比等要求。

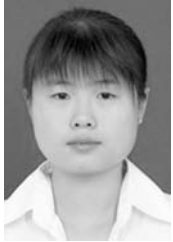
参考文献:

- [1] 寇淑清,杨慎华,金明华. 发动机连杆裂解加工技术及其应用[J]. 机械强度, 2004, 26(5):538-541.
KOU S Q, YANG S H, JIN M H. Fracture splitting technology and its application in manufacturing connecting rods of engine[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(5):538-541. (in Chinese)
- [2] YILBASB S. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155-156:2106-2115.
- [3] 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: 151-155 .
- [4] 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, 149:541-545.
- [5] 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, 168:438-447.
- [6] 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: 151-155.
- [7] 张国顺. 现代激光制造技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
ZHANG G S. *Modern Laser Manufacturing Technology* [M]. Beijing: Chemical industry Press, 2006. (in Chinese)
- [8] LIM C K. Numerical modeling of reactive gas assisted laser cutting of metals[J]. *Iowa State University*, 1995:123-131.
- [9] POWELL J. *Laser cutting* [M]. Berlin: Springer, 1993:215-225.
- [10] H. H. 雷卡林, A. A. 乌格洛夫, A. H. 科科拉. 材料的激光加工[M]. 北京:科学出版社, 1982.
LEIKALIN H H, WUGEGEFU A A, KEKELA A H. *Laser Processing of Materials* [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)
- [11] BANKS P S, FEIT M D, RUBENEHIK A M, et al.. Material effects in ultra-short Pulse laser drilling of metals[J]. *Appl Phys.*, A, 1999, 69 (s):375-380.
- [12] 朱企业. 激光精密加工[M]. 北京:科学出版社, 1990.
ZHU Q Y. *Laser Precision Machining* [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)

作者简介:



王金伟(1982-),男,河南焦作人,博士研究生,2006年于吉林大学获得学士学位,主要从事发动机连杆裂解加工技术的研究。E-mail: wangjinwei66@yaho.com.cn



菅晓霞(1984-),女,河南安阳人,助教,2006年、2008年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事材料加工工艺的研究。E-mail: jianxx08@163.com



郑祺峰(1977-),男,黑龙江伊春人,博士研究生,助教,1999年于吉林大学获得学士学位,主要从事精密加工技术与装备方面的研究。E-mail: zhengqf@jlu.edu.cn

导师简介:



寇淑清(1962-),女,黑龙江肇源人,教授,博士生导师,1984年、1987年、1999年于吉林工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事汽车关键零部件精密高效制造技术的研究。E-mail: kousq@jlu.edu.cn

● 下期预告

离轴三反宽视场空间相机的辐射定标

任建伟¹,刘则洵^{1,2},万志¹,李宪圣¹,任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

离轴三反(TMA)光学系统具有高分辨率、大视场、长焦距、质量轻、体积小等特点,是目前最先进的空间对地观测相机的光学系统。本文在分析 TMA 宽视场空间相机成像机理的基础上,针对 TMA 光学系统光路和结构的特点,提出了分视场定标方案和利用特殊开口形状积分球的全视场定标方案,并采用两种定标方案分别对 TMA 宽视场空间相机两个不同阶段的样机进行了实验室辐射定标,定标结果表明两种方案切实可行,满足 TMA 宽视场空间相机实验室辐射定标要求。通过对两种实验室辐射定标方案优缺点的分析,得出两种定标方案不同的使用条件,结果显示两种定标方案的定标精度分别为 1.68% 和 1.89%。