

文章编号 1004-924X(2010)01-0142-07

# 应用 Nd : YAG 激光加工连杆初始裂解槽

郑祺峰, 杨慎华, 邓春萍, 林宝君, 寇淑清  
(吉林大学 锻锻研究所, 吉林 长春 130025)

**摘要:**为改善连杆裂解槽加工精度和质量,进而提高裂解连杆的成品率,通过试制两种连杆产品,确定了激光加工参数。采用 Nd : YAG 固体激光器对两种类型的连杆进行了裂解槽激光加工试验,分析了采用不同切割参数加工的裂解槽质量,并对激光切割参数进行了优化。结果表明:激光峰值功率、离焦量、切割速度、脉冲频率、辅助气体压力、激光入射角等对裂解槽的加工质量均有很大的影响,其中激光峰值功率 2.4 kW,脉冲时间 0.4 ms 时,切槽深度为 0.453~0.457 mm,当脉冲频率与切割速度比值约为 3,在非正离焦量状态下,所加工的裂解槽对连杆的裂解非常有利,能够满足 M0406 连杆的裂解质量要求。

**关键词:**连杆裂解;裂解槽;激光切槽;Nd : YAG 激光器

**中图分类号:**TG665 **文献标识码:**A

## Manufacture of connecting-rod initial splitting notch by Nd : YAG solid laser

ZHENG Qi-feng, YANG Shen-hua, DENG Chun-ping, LIN Bao-jun, KOU Shu-qing

(Roll Forging Institute, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** In order to improve the processing precision and quality of a connecting-rod splitting notch and to improve its manufacturing yield, two kinds of connecting-rod products were manufactured and laser processing parameters were also determined. The splitting notch processing on two kinds of connecting rods was carried out by a Nd : YAG solid laser and then the influence of different cutting parameters on the cutting quality was analyzed and the laser cutting parameters were optimized. The result shows that the laser peak power, clearance between focus and plate, cutting speed, impulse frequency, assistant air pressure, and the angle of laser incidence have a great influence on the processing quality of splitting notch. When the peak power of laser is 2.4 kW and the impulse time is 0.4 ms, the depth of cutting notch is 0.453—0.457 mm. Moreover, when the ratio between impulse frequency and cutting speed is 3, the splitting notch processed is conducive to the splitting of connecting rod in the condition of the minus clearance between focus and plate, which can meet the demand of the splitting quality of M0406 connecting-rods.

**Key words:** connecting-rod fracture-splitting; splitting slot; laser notching; Nd : YAG laser

收稿日期:2009-10-20;修订日期:2009-11-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50375066);国家教育部博士点基金资助项目(No. 20060183066)

## 1 引 言

连杆裂解加工具有加工工序少、设备投资小、制造成本低、产品质量好、装配精度高、生产效率高等诸多优点,已成为连杆加工的发展方向<sup>[1-5]</sup>。在进行裂解加工时首先需要在连杆大头孔适当位置设计并预制裂解槽(或缺口),以形成初始裂解源。当施加裂解载荷后,在裂解槽根部形成很高的应力集中,局部区域应力迅速升高达到断裂应力,在几乎不发生塑性变形的情况下将连杆沿裂解槽断裂剖分,因此初始裂解槽的预制是连杆裂解加工的技术关键<sup>[6]</sup>。目前,连杆初始裂解槽的预制方法主要有机械拉削、线切割和激光切割等。其中机械拉削时刀具磨损较快,导致裂解槽根部曲率半径增大,加工深度变浅,使得裂解力增大,出现大头孔变形超差等裂解缺陷率;线切割加工时需要重新定位和穿丝,操作人员劳动强度大,加工精度低,生产效率低,不易实现自动化生产;而激光切割裂解槽具有切缝窄、速度快、无刀具磨损、易裂解、重复精度高等优点,已成为目前最先进的工艺。连杆初始裂解槽属于窄缝盲槽,其加工槽深度精度和切口质量要求很高,由于 CO<sub>2</sub> 激光器无法满足裂解槽的加工精度和槽面的质量要求,并且 Nd:YAG 固体激光器输出波长比 CO<sub>2</sub> 激光器输出波长短,与金属的耦合效率高,加工性能好,已成为预制连杆裂解槽的首选光源<sup>[7-8]</sup>。为此,本文针对 Nd:YAG 固体激光器进行了初始裂解槽的预制实验,对不同激光切割参数条件下预制的裂解槽进行分析比较,探索了不同激光切割参数对初始裂解槽的预制以及最终连杆裂解质量的影响效果和影响规律。

## 2 连杆裂解对初始裂解槽要求

初始裂解槽预制的目的是制造缺口效应,提高应力集中水平,保证在预定位置发生脆性断裂,并有效降低裂解加工载荷,保证裂解加工质量。裂解加工载荷和加工质量主要取决于初始裂解槽的槽深  $h$ 、张角  $\theta$ 、槽底曲率半径  $R$ ,见图 1。实验表明:槽深减小(即  $h$  较小)可使裂解力陡增,但槽

深过大,会使裂解后大头孔精加工余量加大;同样张角  $\theta$  和槽底曲率半径  $R$ ,对连杆裂解质量有很大影响,张角  $\theta$  或槽底曲率半径  $R$  的减小,能够降低裂解加工时的裂解力<sup>[9-10]</sup>。因此,从断裂效率和裂解质量考虑,要求初始裂解槽尖锐,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。

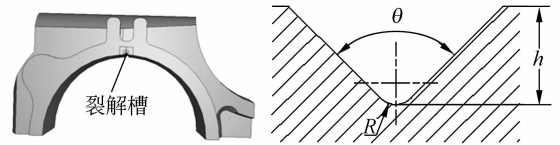


图 1 裂解槽位置及描述参数

Fig. 1 Splitting decomposition groove location and parameters

## 3 试验设备及样件

试验是在吉林大学自行研制的连杆裂解槽激光加工数控机床上完成,如图 2 所示。该机床的激光器采用了德国 TRUMPF 公司 HL62P 型号的 Nd:YAG 脉冲固体激光器,具体性能参数见表 1。

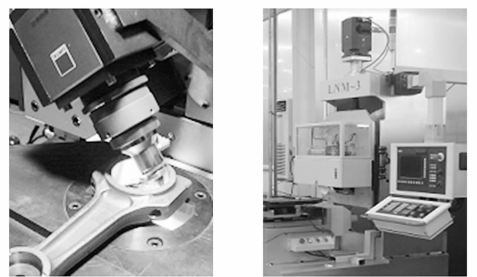


图 2 连杆裂解槽激光加工机床

Fig. 2 Numerical laser machine tool for processing connecting-rod splitting notch

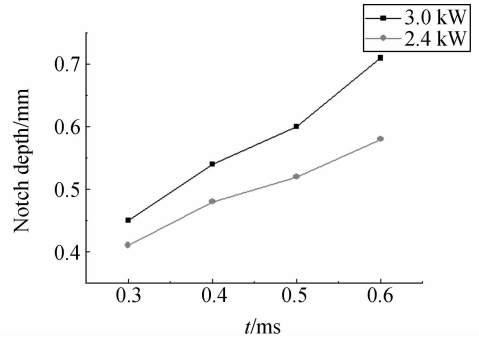
样件分别选取 52D 连杆和 M0406 连杆。材料为高碳微合金非调质钢 C70S6,材料屈服强度为 585 MPa,抗拉强度为 945 MPa,弹性模量  $E=2.1 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\mu=0.3$ <sup>[11]</sup>。

所预制裂解槽的形貌是在裂解后通过光学显微镜进行测量。

表 1 激光器技术参数

Tab. 1 Laser technical data

技术参数	参数值
最大输出功率/W	75
最大脉冲功率(可调)/kW	3.2
脉冲能量/J	0.1~30
脉冲时间(可调)/ms	0.2~20
脉冲频率(可调)/Hz	20~200
光束质量	8
激光光纤长度/ $\mu\text{m}$	200



(a) 峰值功率和脉冲时间对裂解槽深度的影响

(a) Influence of peak power and pulse time on depth

## 4 影响因素分析

激光加工初始裂解槽是通过激光脉冲能量使连杆大头孔内侧裂解槽预制位置的金属迅速气化蒸发,并利用辅助气体将融化或气化的金属驱除,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。

大量实验表明:激光器峰值功率、脉冲时间、脉冲频率、切割速度、聚焦位置、激光入射角和辅助气体类型与压力等对初始裂解槽的预制以及连杆的裂解质量都有不同程度的影响。

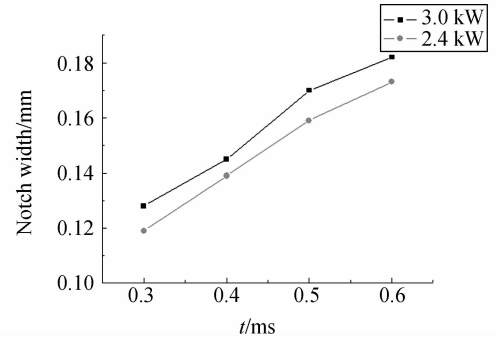
### 4.1 峰值功率和脉冲时间的影响

由于脉冲能量直接决定着瞬间聚焦在材料表面能量的大小,从而影响着盲孔的深度和直径,即连杆裂解槽的槽深和槽宽。

$$Q = P_k \cdot \tau_H, \quad (1)$$

式中  $Q$  为脉冲能量,  $P_k$  为峰值功率,  $\tau_H$  为脉冲时间。

由公式(1)可知,在相同脉冲能量的条件下,加大脉冲时间会导致每个激光脉冲作用于金属表面的时间增多,使切割位置的热影响区扩大,槽宽增加,槽深减小。反之,峰值功率增大,激光脉冲作用于材料表面的时间减小,预制出裂解槽深度变大,对应槽宽变窄。图 3 给出了 52D 连杆和 M0406 连杆分别在 3.0 kW 和 2.4 kW 峰值功率,不同脉冲时间条件下对应激光切割裂解槽的槽深和宽度变化的曲线。可以看出,当峰值功率固定不变时,随着脉冲时间的延长,裂解槽的深度和宽度都相应增大。实际应用时可根据需要适当改变峰值功率或脉冲时间来满足加工要求,提高裂解槽的加工质量。



(b) 峰值功率和脉冲时间对裂解槽宽度的影响

(b) Influence of peak power and pulse time on width

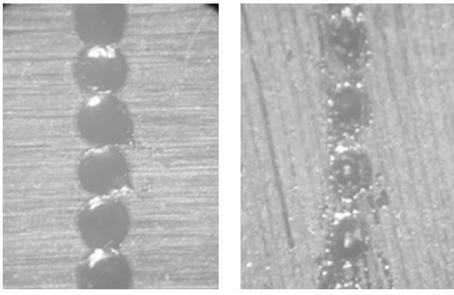
图 3 峰值功率和脉冲时间对裂解槽深度和宽度的影响

Fig. 3 Influence of peak power and pulse time on depth and width

### 4.2 脉冲频率和切割速度的影响

适当增大激光切割速度可以提高切割效率。然而,裂解槽是由许多连续或者叠加的盲孔构成的,每一个孔都是一个脉冲作用的结果,切割速度过快,会使脉冲之间的距离增大,不利于连杆裂解。同时过快的切割速度,使金属不易充分燃烧汽化并彻底回收(通过压缩空气和相应回收装置),会导致部分汽化金属凝结在切割盲孔周围,影响裂解槽的加工质量,而且在后续对连杆进行精加工时也会严重损伤刀具。减小切割速度尽管可以加工成叠加盲孔,甚至加工成微槽,但降低了激光切割效率,不利于批量生产。图 4 给出了脉冲频率为 50 Hz,切割速度分别为 17 mm/s 和 23 mm/s 时对应切割裂解槽的外观形貌。可以看出,激光切割速度以 17 mm/s 移动时所加工裂解槽质量明显优于 23 mm/s 的切割质量。

上述分析可知提高脉冲频率也可以改善切割



(a)切割速度 17 mm/s (b)切割速度 23 mm/s

(a)Cutting speed 17 mm/s (b)Cutting speed 23 mm/s

图 4 不同切割速度时裂解槽型貌

Fig. 4 Shape of splitting decomposition groove by various cutting speeds

质量,但脉冲频率受到平均功率、峰值功率和脉冲时间的制约,很难将 4 个参数合理优化。通过对裂解后 52D 连杆裂解槽的测量及相应连杆的裂解质量分析得知,在 1 mm 范围内盲孔数  $\geq 3$  时,不会出现裂解缺陷。此种条件下对应脉冲频率  $f_p$  和切割速度  $v$  比值约为 3,即脉冲频率和切割速度的最优匹配。

### 4.3 激光束离焦量的影响

激光切割过程中激光焦点与连杆大头孔的位置关系可用离焦量来表示,如图 5 所示。图中, $d$  为光纤直径; $f$  为焦距; $d_0$  为光斑直径; $h$  为焦深; $\theta$  为发散角; $a$ 、 $b$ 、 $c$  为工作位置。当连杆大头孔壁位于图 5 中的  $c$  位置时,称为正离焦,即焦点一直未落在连杆大头孔壁;当激光焦点位置越过连杆大头孔壁时称为负离焦,大头孔壁位于如图 5 中的  $a$  位置。

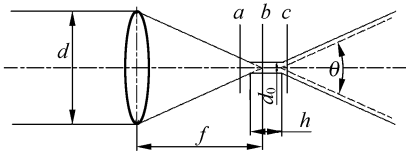
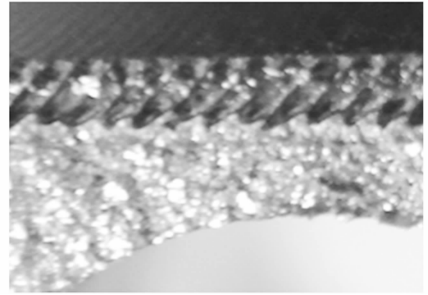


图 5 激光焦点与工件表面位置关系

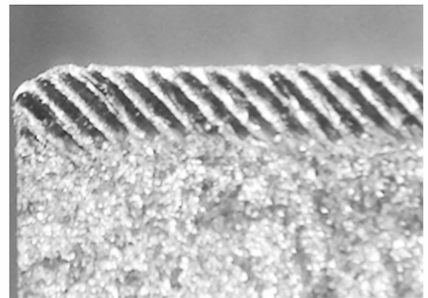
Fig. 5 Relation of laser focus and workpiece surface

当连杆大头孔壁处于负离焦位置时完成切割的裂解槽如图 6(a)所示。处于负离焦位置的大头孔壁在切割时并不接触到激光能量最强点,导致切割后盲孔内出现激光能量过渡区域,但加工的裂解槽槽底呈尖角,并有一定张角,能够保证连杆的裂解质量。



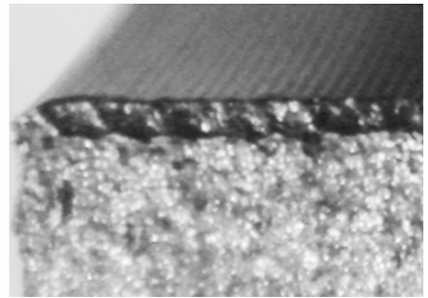
(a)激光负离焦切割的裂解槽形貌

(a)Shape of splitting decomposition groove by laser cutting on negative focus



(b)激光焦点处切割的裂解槽形貌

(b)Shape of splitting decomposition groove by laser cutting on focus



(c)激光正离焦切割的裂解槽形貌

(c)Shape of splitting decomposition groove by laser cutting on positive focus

图 6 裂解槽形貌

Fig. 6 Shape of splitting decomposition groove

当连杆大头孔壁正好处于图 5 中的  $b$  位置时输出激光正好聚焦到大头孔壁,切割后裂解槽如图 6(b)所示。由于激光聚焦有一定的焦深,在整个焦深范围内,激光脉冲能量相同,经激光切割后所形成盲孔密排均匀,孔径匀称窄小,即裂解槽宽度较窄。同时切割时激光对裂解槽根部进行的淬

火处理同样优于其它位置,继而进一步提高了缺口根部的应力集中系数,保证了连杆的裂解质量。

连杆大头孔壁处于正离焦位置切割后的裂解槽如图 6(c) 所示。由于激光光束趋于发散时才打到大头孔壁,光斑较大,接触能量较小,因此所切割的裂解槽深度较浅,经裂解后,连杆大头孔的变形量会超差严重,使得裂解加工质量降低。

#### 4.4 辅助气体及压力的影响

激光切割连杆裂解槽过程中,需要通过激光同轴的辅助气体来吹走裂解槽内的熔渣并达到保护聚焦镜的目的。当采用惰性气体作为辅助气体时,只能起到吹渣的作用;改成压缩空气后,在吹渣的同时还能起到助燃的作用,继而提高了切割速度,因此选用压缩空气作为激光切割裂解槽的辅助气体。

通过试验显示压缩空气的压力同样对裂解槽质量有影响。当压缩空气压力  $< 0.4$  MPa 时,气体的流量较小,氧气助燃能力削弱,不能及时驱除熔渣,导致裂解槽的切割深度减小;而压力超过  $0.5$  MPa 后,气体流量增大,会加速气化金属的冷却速度,使得裂解槽内附着熔渣。此外,气体压力增大易使熔渣飞溅到激光切割头的保护镜上,污染保护镜,最终降低激光的光束质量,影响切割效果。因此预制连杆裂解槽时易采用  $0.4 \sim 0.5$  MPa 压缩空气为辅助气体。

#### 4.5 激光入射角的影响

激光入射角  $\alpha$  (如图 7 所示) 同样对裂解槽的加工质量产生影响。随着入射角的减小,材料对激光能量的吸收相应增加,使裂解槽加深。当入射角减小到  $0^\circ$  时,大量激光会反射回激光头,损伤光纤甚至激光发生器,并且金属熔渣在压缩空

气的作用下,会溅到喷嘴内部,污染保护镜。大量试验显示,激光入射角  $\alpha$  在  $20 \sim 60^\circ$  时切割的裂解槽质量较好,并且在条件允许的情况下,尽量减小激光入射角,继而以较小的峰值功率获得较深的切割效果,以节省能源。

分析上述影响因素,52D 连杆和 M0406 连杆的最终激光切割参数见表 2。采用表 2 参数进行裂解槽加工时,所预制的连杆裂解槽以及后续连杆的裂解加工,均能取得满意的效果,有效地降低了产品废品率。

表 2 激光加工参数

Tab. 2 Laser processing data

切割参数	52D 连杆	M0406 连杆
入射角/ $^\circ$	49	49
峰值功率/kW	3.0	2.4
脉冲时间/ms	0.4	0.4
脉冲频率/Hz	50	60
脉冲能量/J	1.2	0.9
平均功率/W	60	54
切割速度/(mm/s)	17	20
切槽深度/mm	0.543~0.546	0.453~0.457

## 5 结 论

本文通过两种型号连杆的激光加工试验,分析激光加工参数,并从以下几个方面确定两种型号连杆的激光切割参数。首先,峰值功率决定了切割槽的深度。在切割的裂解槽未达到要求深度时优先考虑调整激光器峰值功率来满足产品的需求。针对 52D 连杆,激光器峰值功率选用  $3.2$  kW;而 M0406 连杆,激光器峰值功率选用  $2.4$  kW。其次,激光器脉冲频率  $f_p$  和切割速度  $v$  的比值约为 3 时,加工的裂解槽适合断裂。比值过大,脉冲盲孔相互叠加,裂解槽宽度增大;比值过小,相邻盲间的距离加大,不利于裂解。再者,激光焦点与连杆大头孔壁的位置决定着裂解槽的加工质量。为避免裂解缺陷的出现,连杆大头孔壁与激光光束的焦点位置关系应为负离焦。另外,采用压缩空气作为激光切割辅助气体,并且压缩空气的压力应调节至  $0.4 \sim 0.5$  MPa 之间。最后,入射角增大,裂解槽深度减小;反之,裂解槽深度增加。但入射角的改变对裂解槽的宽度和表面质量影响不明显,当入射角取  $20 \sim 60^\circ$  时,切割的

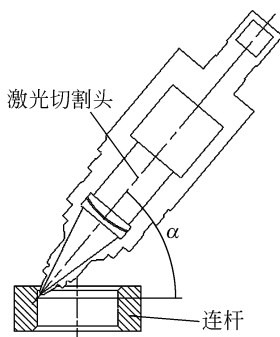


图 7 激光入射角

Fig. 7 Angle of laser incidence

裂解槽质量好。受限于封闭孔加工,故采用 49°

入射角切割。

## 参考文献:

- [1] 杨慎华,寇淑清,谷诤巍,等. 发动机连杆裂解加工新技术[J]. 哈尔滨工业大学学报,2000,32(3):129-131.  
YANG SH H, KOU SH Q, GU ZH W, *et al.*. Fracture splitting technology of automobile engine connecting rod [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2000,32(3):129-131. (in Chinese)
- [2] SHINSAKU F, HIROHITO E. Development of fracture splitting connecting rod [J]. *JSAE Review*, 2002,23:101-104.
- [3] HOFFMANN G, GEIMAN T, MARRA M. Fracture splitting of powder forged connecting rods [C]. *SAE Technical Paper Series*, 2002.
- [4] GU Z, YANG S, KOU S, *et al.*. Fracture splitting technology of automobile engine connecting rod [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005,25:883-887.
- [5] WHITTAKER D. The competition for automotive connecting rod markets [J]. *Metal Powder Report*, 2001(5):32-36.
- [6] 寇淑清,杨慎华,赵勇. 发动机连杆裂解加工及其关键技术[J]. 吉林大学学报:工学版,2004,34(1):85-90.  
KOU S Q, YANG S H, ZHAO Y. Fracture splitting process of engine connecting rod and its key techniques [J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2004,34(1):85-90. (in Chinese)
- [7] 林宝君,杨慎华,郑祺峰,等. 发动机连杆裂解槽激光加工机床的加减速控制[J]. 光学精密工程,

- 2008,16(10):1922-1927.  
LIN B J, YANG SH H, ZHENG Q F, *et al.*. Acceleration and deceleration controls of laser processing machine for connecting-rod fracture splitting notch in engine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1922-1927.
- [8] ZHANG D, HARRIS S J, MCCARTNEY D G. The effect of laser transformation notching on the controlled fracture of a high carbon (C70S6) steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008,489:273-284.
- [9] 杨慎华,张志强,寇淑清. 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 SH H, ZHANG ZH Q, KOU SH Q. Technological parameters in the laser cutting process of starting notch of connecting rod [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009,41(1):126-129. (in Chinese)
- [10] 寇淑清,杨慎华,赵庆华,等. 发动机连杆裂解加工初始裂纹槽几何参数研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(1):126-129.  
KOU SH Q, YANG SH H, ZHAO Q H. Research on geometry parameters of stress-raising groove in fracture splitting processing of engine con-rod[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007,39(9):1487-1490. (in Chinese)
- [11] 赵立新,刘志民,赵树国. C70S6 连杆材料的研究[J]. 车用发动机,2005,4:48.  
ZHAO L X, LIU ZH M, ZHAO SH G. Study on C70S6 material of connecting rods[J]. *Vehicle Engine*, 2005,158(4):48-50. (in Chinese)

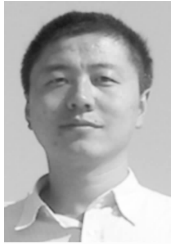
## 作者简介:



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



邓春萍(1950—),吉林省长春人,吉林大学副教授,主要从事精密加工技术与装备、发动机关键部件先进加工技术与装备等方面的研究。E-mail: dengcp@jlu.edu.cn



林宝君(1974—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事精密加工设备中的自动控制技术方面的研究。E-mail: lbj123.student@sina.com



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、硕士和博士学位,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

#### 导师简介:



杨慎华(1949—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1977年于吉林工业大学获得学士学位,主要从事先进精密加工设备方面的研究。E-mail: shenhua@jlu.edu.cn

#### ● 下期预告

## 光电非接触式表面流速测量

吴俊<sup>1,2</sup>,丁姪奇<sup>2</sup>,余葵<sup>2</sup>,李晓飏<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 省部共建水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400074;

2. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所,重庆 400016)

水工物理模型试验中,基础实验参数之一的表面流速尚没有简单易行的直接测量方法,为此提出了一种新型光电非接触式表面流速直接测量方法。在对光束入射水体后散射光强度公式进行推导的基础上,根据水体浅层泥沙浓度的统计继承效应,得出了经上下游浅层泥沙调制的散射光强成相关特性的结论。根据上下游散射光的相关特性,推导了流速测量公式,并分析了上下游测量间距、水流流速、采样率对测量结果的影响。搭建了实验系统,在6种不同标定流速下,分析了不同含沙量对测量精度的影响。实验结果表明,在 $0\sim 50\text{ kg/m}^3$ 六种不同含沙量情况下,实测流速与标定流速的一致性均较好,但水体在 $10\sim 50\text{ kg/m}^3$ 适量含沙情况下,测量精度较不含沙情况有所提高,测量绝对误差均 $< 0.1\text{ m/s}$ ,相对误差能控制在8%以内。