

文章编号 1004-924X(2011)04-0768-07

曲轴轴承座/连杆激光加工裂解槽的组织与胀断性能

寇淑清,王金伟,郑祺峰,杨慎华

(吉林大学 锻锻研究所,吉林 长春 130025)

摘要:采用 Nd:YAG 脉冲激光对连杆所用材料 C70S6 钢和发动机曲轴轴承座常用材料灰铸铁进行了裂解槽加工,并在裂解设备上进行了胀断实验。采用工具显微镜、扫描电子显微镜和显微硬度仪等对比研究了裂解槽的几何形貌、裂解槽附近显微组织和显微硬度变化以及断口形貌,探讨了脉冲激光加工裂解槽的特性,揭示了脉冲激光加工韧/脆性材料裂解槽对胀断工艺的影响机制。结果表明:脉冲激光加工韧/脆性材料裂解槽的几何形貌、缺口效应均明显优于拉削加工和线切割加工,其中灰铸铁的缺口敏感性得到显著增强,在韧/脆性材料裂解槽附近均生成了易碎的马氏体,在槽的根部出现了微裂纹,组织明显细化;韧/脆性材料熔化区显微硬度约为 820/850 HV,相硬化区约为 860/550 HV,显微硬度均高于基体,硬化效果显著;在 C70S6 钢槽根部区域未见韧性撕裂现象,韧/脆性材料断口都表现出脆性断裂特征,满足裂解工艺要求。

关键词:韧/脆性材料;裂解槽;脉冲激光;显微组织;脆性断裂

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/OPE.20111904.0768

Organization and expansion breaking performance of fracture notch of crankshaft bearing and connecting rod by laser processing

KOU Shu-qing, WANG Jin-wei, ZHENG Qi-feng, YANG Shen-hua

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

Abstract: Fracture splitting notches from C70S6 steel used in a connecting rod and from gray cast iron used in an engine crankcase main bearing bracket were processed by a YAG pulse laser, and the fracture splitting experiment was conducted in the fracture splitting device. The geometry appearances, microstructures, micro-hardness change as well as the fracture surface of fracture splitting notches were studied by a tool microscope, a scanning electronic microscope and a micro-hardness tester. Characteristics of fracture splitting notches processed by the pulse laser were discussed, and the influence of pulse laser processing fracture splitting notches from ductile/brittle materials on the expansion and breaking performance of the notches was revealed. The results indicate that the geometry appearances and notch effects of the fracture splitting notches from ductile/brittle materials processed by the pulse laser are obviously superior to those of the broaching and linear cutting processing, and the gap sensitivity of gray cast iron has been strengthened greatly. The brittle martensite has been produced nearby the fracture splitting notches from ductile/brittle materials, and micro crack appears in the root of

收稿日期: 2010-04-19; **修订日期:** 2010-08-24.

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)

notch. The organization is obviously refined. The micro-hardnesses of melting zone and the solid phase transition zone of ductile/brittle materials approximately are 820/850 HV and 860/550 HV, respectively, which are higher than that of the substrate, and show a remarkable hardening effect. The ductile tearing phenomenon can not be seen in the C70S6 steel notch root zone. The ductile/brittle material fracture shows the brittle fracture characteristic, which satisfies the fracture splitting technological requirement.

Key words: ductile/brittle materials; fracture notch; pulsed laser; microstructure; brittle fracture

1 引言

剖分类零件(连杆、发动机箱体曲轴轴承座)裂解加工技术是利用材料的断裂特性,在零件圆柱孔内侧对称加工两条裂解槽,形成初始断裂源,然后施加垂直于预定断裂面的正应力使剖分类零件在断裂源处脆性断裂分离成本体和盖体的过程,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^[1]。

C70S6 微合金非调质钢以其优良的裂解性能广泛应用于连杆生产中,属于韧性材料,仅在德国就有 60 多种发动机连杆采用该种材料,是最早在室温条件下采用裂解加工的锻钢连杆材料。发动机箱体曲轴轴承座在结构形式上与连杆有相似之处,其由本体与盖体两部分合装而成,二者用螺栓连接,轴承孔有较高加工精度要求。发动机箱体常用的材料是灰铸铁,灰铸铁价格便宜、易成型、吸振、耐磨、硬度高、脆性大^[2],属于脆性材料。奔驰、菲亚特等轿车的发动机箱体都由灰铸铁铸造而成。

裂解加工技术的关键是裂解槽的加工。目前,裂解槽的加工主要采用机械拉削和激光加工两种方法。激光切槽是一种先进的切割技术,具有快的加热和冷却速度、无刀具磨损以及窄的热影响区,而且激光可对裂纹槽缺口根部进行淬火处理^[3],近年来已逐步取代机械拉削工艺,成为裂解槽加工的主要手段^[4-7]。C70S6 钢和灰铸铁从化学成分、制造工艺到材料特性均不相同,因此,本文利用 Nd:YAG 激光对 C70S6 钢、灰铸铁进行裂解槽加工并进行胀断实验,从几何形貌、显微组织、显微硬度、断裂特性等方面研究韧/脆性材料激光加工裂解槽的异同及其对胀断工艺的影响,为裂解加工工艺在不同领域的应用提供参考。

2 试验材料及方法

试验材料选择某连杆所使用的高碳微合金钢 C70S6 和某发动机箱体主轴轴承座所使用的灰铸铁。试样的化学成分如表 1 所示。切槽前样品用丙酮清洗去除表面油污。

表 1 各成分的质量分数

Tab. 1 Chemical composition of the material (%)

	C70S6	灰铸铁
C	0.72	3.2
Si	0.21	1.18
Mn	0.48	1.1
P	0.008	0.082
S	0.064	0.055
Al	≤0.01	—
Cr	0.10	—
Mo	≤0.03	—
Ni	0.05	—
V	0.04	—

实验在自主研发的 LNM-3 型裂解槽激光加工数控机床^[8]上进行,见图 1。峰值功率、脉宽、频率、速度均可调,其 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 W。

切槽过程在室温下进行,调解激光切割头与工作台角度(41°方向切割 C70S6 钢,90°方向切割灰铸铁),使激光经过透镜聚焦后,照射到被加工表面,工作台及激光切割头的运动由数控系统自动控制。加工过程中辅助气体采用空气,压力为 0.6 MPa。

切槽后制成的金相样品经 4%硝酸酒精腐蚀后,采用 SEM 扫描电镜分析裂解槽的微观组织及断口;然后在 1600-5122VD Micromet 5104 显

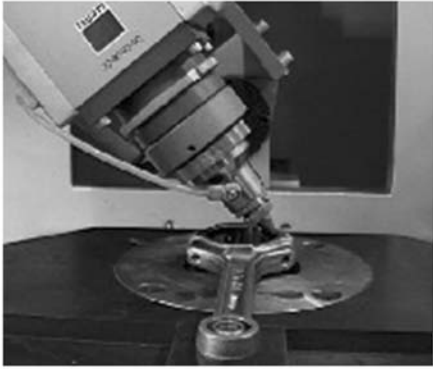


图 1 激光加工裂解槽试验

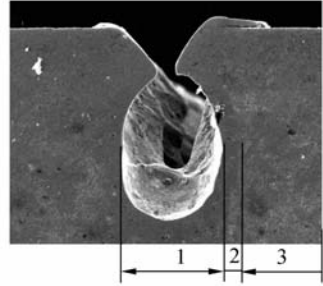
Fig. 1 Experiment of fracture notch produced by laser cutting

微硬度机上进行硬度测试, 载荷为 200 g; 使用工具显微镜获得其表面形貌。

3 试验结果及讨论

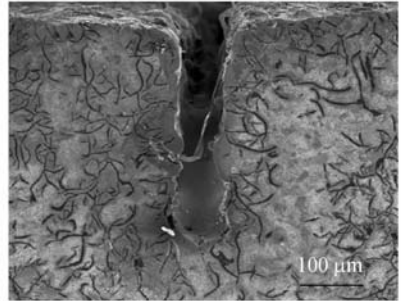
3.1 裂解槽几何形貌对比

图 2 为 Nd:YAG 脉冲激光在相同参数下切割 C70S6 钢和主轴轴承座用灰铸铁裂解槽的形貌。试件表面的温度分布形成了 3 个区域: 裂解槽区 1、热影响区 2 和基体 3。图 2(a) 为激光 41° 方向切割 C70S6 的截面形貌(呈口袋状), 图 2(b) 为激光垂直切割灰铸铁的截面形貌(近似为直缺口)。两者对比可见, 由于 C70S6 钢的熔点高于主轴轴承座用灰铸铁, 且倾斜切割使激光光斑面积增加, 单位面积热输入减小, 因此, 在同一组激光加工参数下 C70S6 裂解槽深度小于灰铸铁裂解槽。根据灰铸铁在各种缺口下的断裂机理研究^[9], 与其他缺口形状相比, 直缺口对启裂和断裂的效应最明显, 这将在一定程度上减小由于灰铸铁对缺口敏感度低的不利影响。图 2(c) 为激光 41° 方向切割 C70S6 钢的表面形貌, 图 2(d) 为激光垂直切割灰铸铁的表面形貌, 从中可见, 激光加工裂解槽切缝很窄, 宽度仅比激光斑点直径稍大, 热影响区很小, 减小了后续加工去除量。另外倾斜切割槽口清晰, 整洁, 垂直切割由于排渣不利, 在槽口有挂渣出现, 不利于后续加工。对于两种材料都可以根据剖分零件尺寸调整并合理匹配激光参数(光斑直径、激光功率、脉宽、离焦量)和加工参数(切槽速度)得到不同深度和宽度的高尖锐度高裂解槽。



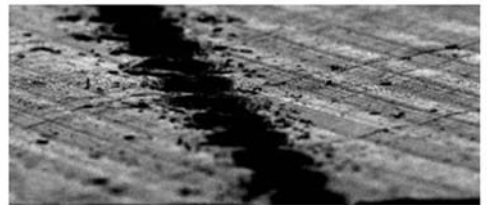
(a) 倾斜切割 C70S6 钢的截面形貌

(a) Cross-section profile of C70S6 steel by oblique cutting



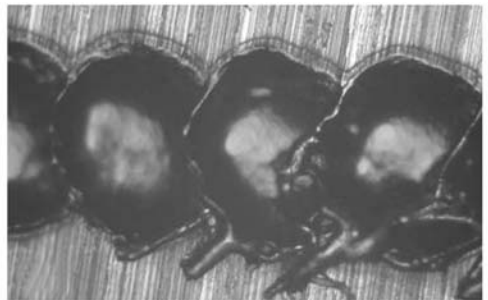
(b) 垂直切割灰铸铁的截面形貌

(b) Cross-section profile of gray cast iron by perpendicular cutting



(c) 倾斜切割 C70S6 钢的表面形貌

(c) Surface profile of C70S6 steel by oblique cutting



(d) 垂直切割灰铸铁的表面形貌

(d) Surface profile of gray cast iron by perpendicular cutting

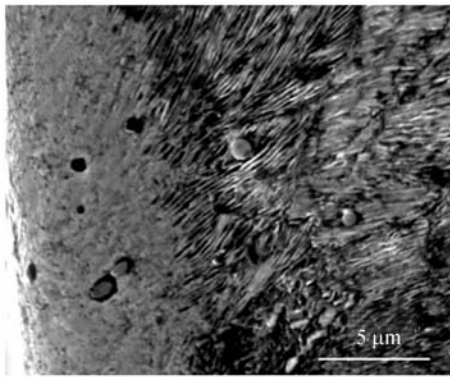
图 2 激光加工裂解槽形貌

Fig. 2 SEM image of cross-section of fracture notch produced by laser cutting

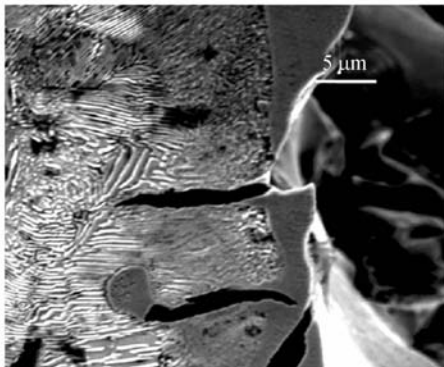
3.2 显微组织

C70S6 显微组织为珠光体加在其边界处的断续铁素体,其成分特点是低硅、低锰、添加微量合金元素钒及易切削的元素硫,该材料要求合金范围窄,并采用电炉冶炼和炉外精炼处理;以热轧状态供货,晶粒度 4—8 级,为高碳钢。连杆毛坯采用热锻加工,并利用余热进行空气控制冷却。主轴承座用灰铸铁组织为珠光体基体加片状石墨。灰铸铁比高碳钢 C70S6 含有更多的碳、硅、锰以及其它微量元素,强度与硬度与 C70S6 钢相近。灰口铸铁中由于石墨的存在,与 C70S6 相比具有较低的缺口敏感性,这将不利于裂解工艺的进行。

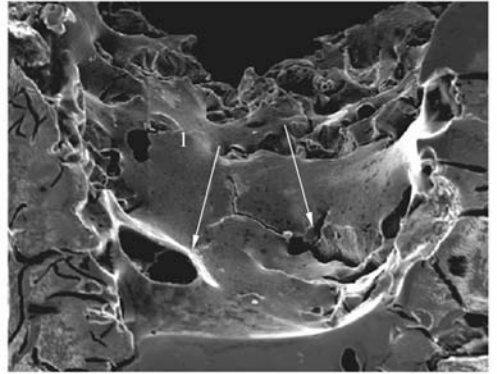
图 3 是高倍扫描电镜照片,由图可知,热影响区 2 可分为融化区和固态相变区。其中图 3(a) 为 C70S6 钢,从左到右依次为融化区、固态相变区和基体。融化区显微组织为马氏体,固态相变区为少量马氏体和残余奥氏体;图 3(b) 为灰铸铁,从右到左依次为融化区、固态相变区和基体,各区界限清晰。融化区为树枝状初晶($M+A'$)和莱氏体($M+A'+Fe_3C$);固态相变区为马氏



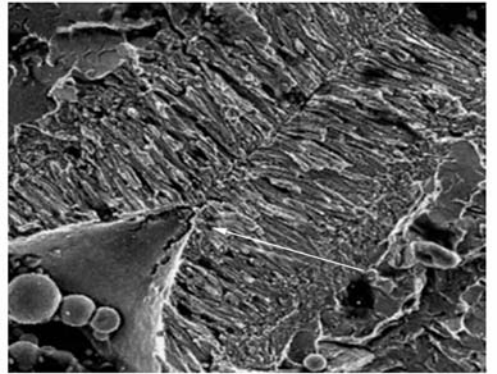
(a) C70S6 钢的微观形态
(a) Micrograph of C70S6 steel



(b) 灰铸铁的微观形态
(b) Micrograph of gray cast iron



(c) 灰铸铁的气孔和淬火微裂纹
(c) Gas hole and micro crack of gray cast iron



(d) C70S6 钢的淬火微裂纹
(d) Micro crack of C70S6 steel

图 3 裂解槽区和热影响区的高倍微观形态

Fig. 3 High magnification micrograph of fracture splitting notches and thermal effect regions

体和残余奥氏体。

融化区金属从高温快速冷却到室温时,冷却凝固过程中发生淬火反应,其中灰铸铁生成高碳马氏体,C70S6 钢形成柱状晶^[10],使用 SEM 扫描电镜对融化区进行 EDX 分析,结果显示在柱状晶边界上存在空隙和 MnS 颗粒。

固态相变区达到了奥氏体化温度,但未溶化,只经历了固态相变,随着向基体区深度增加,温度越来越低,温度梯度很大,使奥氏体来不及长大及均匀化,最终形成不均匀的奥氏体细晶组织。C70S6 钢一部分转变成马氏体,其余以残余奥氏体形式存在;灰铸铁大部分转变成隐针马氏体,其余以残余奥氏体形式存在。

由于马氏体的相变过程中相变应力较大^[11],在马氏体相变过程中硬而脆的马氏体基体局部被拉裂,两种材料均形成淬火微裂纹,如图 3(c)、

(d)所示,其中图 3(c)为灰铸铁形成的微裂纹,图 3(d)为 C70S6 钢形成的微裂纹。灰铸铁中的石墨在高温下与压缩空气中的氧气作用,生成 CO_2 , 从灰铸铁表面逸出,在裂解槽表面形成了很多孔洞,即气孔,如图 3(c)箭头 1 所示。

马氏体相变中萌生的淬火裂纹及铸铁中的气孔,急剧减小了此处的材料强度,因此在拉伸时,这些微裂纹将成为启裂点。

3.3 显微硬度

对两种材料激光切槽后的融化区、固态相变区、基体显微硬度进行了测量,如图 4 所示。由图可知,两种材料经激光处理后硬度均明显高于母材,硬化效果显著。

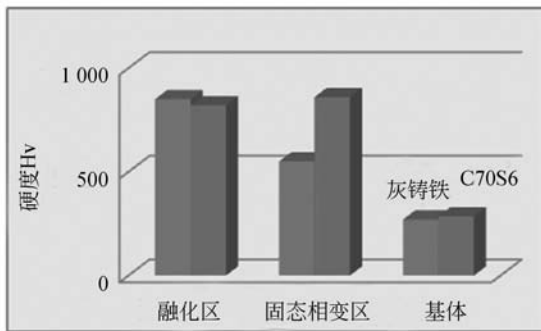


图 4 灰铸铁/C70S6 显微硬度对比

Fig. 4 Micro hardness distribution of fracture notch

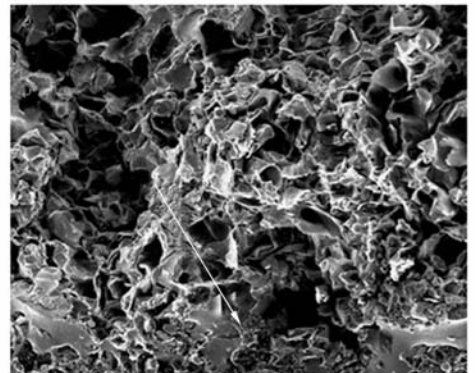
灰铸铁的碳含量多,激光入射功率大,金属过热度高,石墨融化充分,碳原子扩散能力强,液相碳分布均匀,在随后的急冷过程中,在融化区生成了高碳马氏体。而 C70S6 钢由于含碳量少且组织较小,石墨完全燃烧,在融化区形成脱碳层,硬度相对较低。

从融化区到固态相变区 C70S6 钢硬度变化很小,因为在这两个区域都只生成了马氏体。固态相变区,过热度比融化区小,温度梯度略小,随后冷却速度快,使残留奥氏体量增加,碳来不及扩散使残留奥氏体中碳含量增加,随着奥氏体向马氏体的转变,得到高碳马氏体,从而提高了淬火硬度,同时淬硬层组织明显细化,此处硬度较融化区较高。激光能量没有对基体组织产生影响,所以这部分硬度不变。

由此可见,激光切槽过程中,同时对两种材料进行了淬硬处理,且硬化效果明显,对后续的胀断工艺将产生有利的影响。

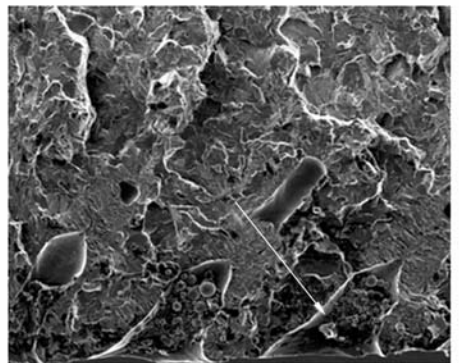
3.4 断裂分析对比

图 5 为断口形貌,图中箭头所指为裂解槽,其中图 5 (a)为主轴承座用灰铸铁断口形貌,图 5 (b)为连杆用 C70S6 钢断口形貌。结果发现,无论是对缺口不敏感的灰铸铁,还是属于韧性材料的 C70S6 钢,断裂均起始于裂解槽底部尖端处,且表现为脆性断裂特征,裂解后未出现掉渣、爆口等明显的裂解缺陷。连杆用 C70S6 槽与灰铸铁相比断裂面锯齿状明显,表现出了更加优异的断裂啮合定位性。同时观察到韧性材料 C70S6 钢断裂主要以 3 种形式出现:(1) 在溶化区柱状晶粒边界处的晶间断裂,(2) 在奥氏体化温度高的地方形成的粗晶晶间断裂,(3) 马氏体的穿晶断裂。灰铸铁中在方向有利的石墨片上形成很多微裂纹,随着载荷增加,这些微裂纹进一步扩展,再与槽根部的裂纹连接,引起断裂,这与 C70S6 钢的脆性断裂是不同的。



(a)灰铸铁

(a) Gray cast iron



(b)C70S6 钢

(b) C70S6 steel

图 5 断口形貌及裂解面的脆性断裂特性

Fig. 5 Fracture morphology and brittle cleavage feature of fracture surface

总体而言,裂解槽引起的局部应力集中、裂解槽底部出现的裂纹及一定厚度的淬硬层的出现,使脆性断裂力学条件易于实现,满足了剖分类零件(连杆、发动机箱体主轴承座)裂解加工技术的要求。

4 结 论

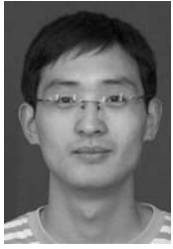
本文采用 Nd : YAG 激光对 C70S6 钢和灰铸造铁进行了裂解槽加工。在裂解设备上做了胀断实验,并进行了一系列分析测试。结果显示,通

过调节工艺参数可以获得窄、深、尖锐且连续均匀的裂解槽。通过淬火处理,有效改善了韧性材料 C70S6 的断裂特性,而且显著提高了主轴承座用灰铸铁对缺口效应的敏感性。激光加工裂解槽的热影响区,主要生成了硬而脆的马氏体及微裂纹,组织明显细化,硬度显著高于基体硬度。韧/脆性材料熔化区显微硬度约为 820/850 HV,相硬化区约为 860/550 HV。一定厚度淬硬层的生成,保证了脆性断裂的发生。另外,C70S6 钢比灰铸铁具有更优异的裂解性能,但是使用激光加工裂解槽的灰铸铁同样可以满足裂解工艺的要求。

参考文献:

- [1] REPGEN B. Optimized connecting rods to enable higher engine performance and cost reduction[C]. *SAE TECHNICAL paper series 9800882 International Congress and Exposition Detroit*, 1998;1-5.
- [2] 王国凡,汤爱君,景财年,等. HT250 灰口铸铁的退火工艺和性能试验[J]. *金属热处理*, 2004, 29(9): 44-45.
WANG G F, TANG A J, JING C N, *et al.*. Annealing process and property test of HT250 gray cast iron[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, 29(9)44-45. (in Chinese)
- [3] 龚俊,芮执元,郎福元,等. 激光催裂的初步研究[J]. *甘肃工业大学学报*, 1994, 20(4): 44 - 48.
GONG J, RUI ZH Y, LANG F Y, *et al.*. The preliminary study of laser-catalyzed cracking[J]. *Journal of Gansu University of Technology*, 1994, 20(4): 44-48. (in Chinese)
- [4] YILBAS B S. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155-156; 2106-2115.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] ABDEL G K, MEWISHY 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.
- [8] 寇淑清,杨慎华,赵勇,等. 连杆断裂剖分前预置裂解槽激光加工方法及设备: 中国, 200410010722. 1 [P]. 2005-01-05.
KOU SH Q, YANG S H, ZHAO Y, *et al.*. Methods and Device of Prefabricating Fracture Splitting Notch Processed by Laser before Fracture Splitting Connecting Rod: Chinese, 200410010722. 1 [P]. 2005-01-05. (in Chinese)
- [9] 曹睿,任学冲,陈剑虹,等. 铸铁断裂机理原位拉伸研究[J]. *甘肃工业大学学报*, 2003, 29(2): 8-13.
CAO R, REN X C, CHEN J H, *et al.*. In-situ stretching investigation on cast iron fracture mechanism[J]. *Journal of Gansu University of Technology*, 2003, 29(2): 8-13. (in Chinese)
- [10] ZHANG D, HARRIS S J, MCCARTNEY D G, *et al.*. The effect of laser transformation notching on the controlled fracture of a high carbon (C70S6) steel [J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, 489; 273-284.
- [11] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
XU ZH Y. *Martensitic Transformation and Martensite* [M]. Beijing: Science Press, 1980. (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@yahoo.com.cn



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



杨慎华(1949—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,吉林大学锻工艺研究所副所长,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: shenhua@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

多像素光子计数器在单光子探测中的应用

赵 帅^{1,2,3}, 郭 劲^{1,2}, 冯 强^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为实现高光子探测效率、高量子效率、大动态范围的光子探测,了解新型多像素光子计数器(Multi-Pixel Photon Counter MPPC)光子探测特性,特别是光子分辨能力,对MPPC的光子探测性能进行了研究。以MPPC作为光子探测器件,采用半导体制冷降噪技术及信号外触发技术,将MPPC探测器温度稳定在15℃,MPPC的暗噪声降低为 6.5×10^{-4} 计数/脉冲;采用统计学方法,利用泊松分布拟合MPPC输出信号,结果表明,得出衰减后入射脉冲光强分布特性符合泊松分布的特性;根据MPPC的光子探测效率,分析计算出MPPC的能量分辨率;综合脉冲分布特性及能量分辨率,得出入射到MPPC上的光脉冲能量的平均值。实验结果表明,MPPC在532 nm波长下,能量分辨率为 1.96×10^{-18} J;不同衰减倍率下,入射到MPPC的光脉冲平均光子数分别为1.665与4.201。