

文章编号: 1001-3806(2011)04-0472-05

基于热裂法的液晶玻璃基板激光切割技术研究

汪旭煌^{1,2,3}, 姚建华^{1,2*}, 周国斌¹, 楼程华^{1,2}, 杨渊思¹

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310014; 2. 浙江工业大学 激光加工技术工程研究中心, 杭州 310014; 3. 浙江工业大学 理学院, 杭州 310014)

摘要: 为了实现液晶玻璃基板的可控断裂切割, 提出了一种液晶玻璃基板激光切割的新方法。采用 Nd: YAG 激光在液晶玻璃基板上预置初始裂纹, 用 CO₂ 激光作为热源对其进行加热, 并用 Ar 气进行冷却。分析了激光光斑尺寸和液晶玻璃基板厚度对切割的影响, 并与传统机械切割进行了对比。用扫描电子显微镜检测了激光切割后切割表面及断面形貌。结果表明, 运用机械切割, 其基体内存在大量的微裂纹, 而基于热裂法的液晶玻璃基板激光切割表面光滑平直、无毛刺、基体内无微裂纹存在, 切割断面影响区小于 20 μm, 优越性明显高于机械切割。

关键词: 激光技术; 激光切割; 裂纹控制法; 液晶玻璃基板; 裂纹扩展

中图分类号: TG485 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.009

Research of the technology of laser cutting LCD glass substrates based on thermal cracking method

WANG Xu-huang^{1,2,3}, YAO Jian-hua^{1,2}, ZHOU Guo-bin¹, LOU Cheng-hua^{1,2}, YANG Yuan-si¹

(1. Key Laboratory of Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to cut liquid crystal display (LCD) glass substrates with controlled crack, a new method was put forward. Firstly, an initial crack was prepared on the surface of LCD substrates with Nd: YAG laser. Then, the substrate was heated up with CO₂ laser and cooled with Ar gas. The effect of laser spot size and the thickness of LCD glass substrates on laser cutting quality was analyzed. The surface and performance of the cutting face after laser treatment was tested by means of scanning electronic microscope (SEM). The cutting quality was compared with the traditional mechanical cutting quality. The results show that there are lots of micro cracks in the substrates cut with traditional mechanical method, however, the laser cutting surface based on thermal cracking method is smooth and flat, no micro cracks exists, and the cutting section-affecting zone is less than 20 μm. It is better to cut LCD glass substrates with thermal crack laser cutting method than mechanical cutting method.

Key words: laser technique; laser cutting; crack controlled method; liquid crystal display glass substrate; crack propagation

引言

近年来,随着现代科技的进步和信息技术的迅猛发展,以及人们对高品质生活的追求,显示技术正逐步的向轻薄化,大幅面方向发展。液晶显示器(liquid crystal display, LCD)由于具有质量轻,图像清晰细腻,色彩自然丰富而逼真等优点而取代传统的阴极射线管

显示器。现已被广泛地应用于光电子、生物医疗和国防等高科技电子显示领域,如液晶电视、笔记本电脑、通讯及仪器仪表、监视器等^[1-2]。据显示器市场调查公司美国 Display Search 于美国时间 2008-07-08 公布的全球平板显示器市场的调查结果;2011 年,中国将超过美国,居全球液晶显示器市场第 2 位。而这些高科技电子显示器的制作过程中都需要对大幅面玻璃基板进行切割,其切割质量的好坏直接影响了其后相关产品的生产成本和市场价值。

对于液晶玻璃基板这种脆性材料,传统的切割方法是采用金刚石砂轮片或硬质合金轮滑线切割的机械切割,然后用外力使其分离。用该机械方法进行切割存在较大的残余应力,极易产生断片,边缘碎屑与微裂

基金项目:浙江省科技厅资助项目(2009C31104)

作者简介:汪旭煌(1985-),男,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: laser@zjut.edu.cn

收稿日期:2010-09-29;收到修改稿日期:2010-10-13

纹等缺陷,由于用外力使其机械断裂,因而容易崩边致使成品率较低。对于具有高质量要求的液晶显示玻璃这些都是不允许的,任何一个碎屑或者微裂纹都会造成整个器件的损坏,因此,传统的机械切割必须进行切后边缘打磨、清洗等后处理工序,甚至进行热处理以强化边缘。目前对于液晶玻璃基板的切割,另外一种方法是采用熔断法^[3],即用激光产生局部高温,使材料融化而分离。采用这种方法,由于极高温梯度引起的高热应力和残余热应力会导致加工完成后微裂纹的产生,断面有残留熔融物质,切割后仍然需要清洗、打磨等后续工序^[4]。为了提高切割的成品率,以达到节约原材料成本、扩大产能的目的,寻求一种快速、高效、洁净的玻璃基片切割技术是十分必要的。

20世纪70年代,LUMLEY^[5]等人提出了应用激光诱导的可控断裂切割理论,利用CO₂激光在材料表面快速扫描对其进行加热再冷却而产生的张应力,成功地实现了陶瓷材料沿激光扫描路径的分离。之后,GROVE等人^[6]首次将可控断裂理论应用到切割玻璃材料上,并对6mm的玻璃进行了实验。2001年至2008年间,TAI和LIU等人^[7-9]对激光切割脆性材料的裂纹扩展机理进行了研究,并对加工过程中的应力场和温度场进行了模拟。2009年曼彻斯特大学的NISAR和LI等人^[10]用半导体激光器进行了切割实验,并对切割过程中裂纹偏转问题进行了分

析研究。国内对于脆性材料的激光切割最近几年刚开始起步。ZHOU等人^[11]运用回归分析方法建立了激光功率和切割速度的切割数学模型。YUAN等人^[12]提出了依照材料光学透过率特性来选择激光切割用激光源的方法。ZHOU等人^[4]讨论了激光分离脆性材料的研究。JIAO等人^[13-14]模拟了在激光作用下石英玻璃的温度分布,并研究了在TEM₀₀和TEM₁₁两种模式激光作用下的温度和应力分布。XU等人^[15]提出了用双光束CO₂激光进行切割并对切割过程进行了数值模拟。作者通过实验与分析,提出一种基于热裂法的液晶玻璃基板激光切割的方法,并将其与传统机械切割进行了对比,对两种切割方法下切割断面质量进行了对比分析与评价。

1 实验材料、装置及方法

实验中所使用的主要实验设备为: UNIVERSAL LASER SYSTEM INC. M-300 Laser Platform 50W 激光切割机、300W JH-V1 型 Nd: YAG 激光器、扫描电子显微镜(scanning electronic microscope, SEM)、计算机数字检测机床(computer numerical control, CNC)精密3维工作台和计算机等。实验材料选用的是美国康宁公司生产的 Corning® EAGLE XGTM 玻璃基板,其尺寸为10mm×20mm×0.7mm和10mm×20mm×0.5mm。室温下该液晶玻璃基板的热物理参量见表1。

Table 1 Thermal and physical property of LCD glass substrates

density/(kg·m ⁻³)	Young's modulus/GPa	specific heat/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	strain point/°C	softening point/°C
2380	73.6	768	1.09	669	971

图1为液晶玻璃基板激光切割系统示意图。选用

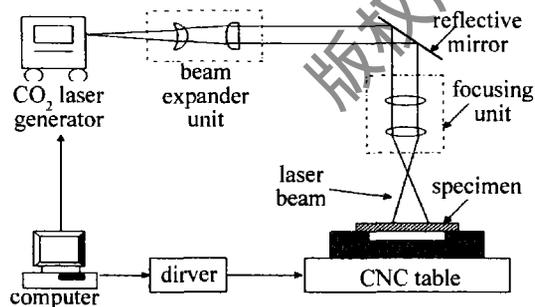


Fig. 1 Schematic diagram of a laser cutting system

的激光为CO₂激光且为连续激光,波长为10.6μm,焦点处最小光斑直径为127μm,因为液晶玻璃的软化点温度为750℃,所以,用CO₂在液晶玻璃表面加热所产生的温度必须低于此温度。如果激光束以最小光斑直径聚焦在玻璃上表面,那么激光能量将集中在很小的区域,而导致局部区域温度过高。因此,在可控断裂激光切割过程中,液晶玻璃基板必须置于焦平面以下,即玻璃基板与聚焦透镜间的距离大于透镜的焦距,这样

照射到材料上的光斑将被放大,以免照射到玻璃上的激光能量过大使材料被加热到软化点温度以上而使玻璃熔融,烧蚀甚至气化。

在试验之前先用波长为1.06μm的JH-V1型Nd: YAG激光器在液晶玻璃基板上预置一条长为10mm的初始裂纹,如图2所示。液晶玻璃基板固定在CNC工作台上,采用输出功率为10W~50W的CO₂激光在不同的扫描速率和光斑直径下分别对0.5mm和0.7mm的液晶玻璃基板进行切割实验,所用的冷却气体为Ar。液晶玻璃基板位于焦平面以下10mm~40mm,此时光斑直径为2mm~4mm。

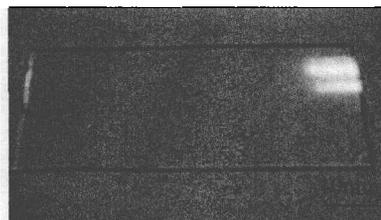


Fig. 2 Photo of initial cracking

2 脆性断裂切割原理分析

液晶玻璃的可控断裂激光切割在原理上不同于传统的激光切割。传统的激光切割原理是利用经聚焦的高功率密度激光束照射工件,使被照射的材料迅速熔化、气化、烧蚀,同时借助与光束同轴的高速气流吹除熔融物质,从而实现将工件割开^[3]。液晶玻璃的激光切割是一种应用材料的应力的切割方法,利用低功率激光散焦在基板表面对其进行加热,由于玻璃对激光的强烈吸收,使局部急剧升温产生热应力,然后骤冷使其在应力作用下沿着激光扫描路径开裂从而分离板材。

一种材料能否用激光进行加工,在很大程度上取决于该种材料对所用激光器波长的吸收情况。液晶玻璃的主要成分为硅酸盐,大部分带 Si—O 结合键的材料对可见光相对透明,而在 10μm 波段则强烈吸收,激光射入玻璃几十微米就被完全吸收。因而采用波长为 10.6μm 的 CO₂ 激光器对液晶玻璃进行切割具有良好效果^[16-17]。

液晶玻璃基板属于脆性材料,其断裂模式属于高脆性材料 I 型(张开型)断裂,在拉应力作用下发生裂纹面的垂直分离,如图 3 所示。通常以应力强度因子

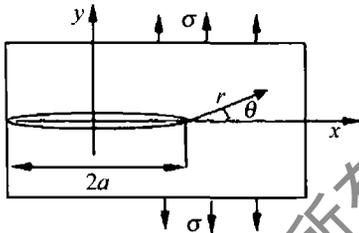


Fig. 3 The schematic diagram of type I cracking and stress distribution

来进行判断裂纹的起裂,当应力强度因子大于裂纹断裂韧度时裂纹扩展^[18-19]。其材料断裂基本判据可表示为:

$$K_i \geq K_c \tag{1}$$

式中, K_c 是裂纹系统的临界应力场强度,其值只与材料本身有关; K_i 是应力强度因子,它只与材料中的裂缝长度以及外加应力大小有关,与材料本身特性无关,其表达式为 $K_i = \sigma\sqrt{\pi a}$, a 为裂缝半长, σ 为外加应力大小。

根据断裂力学理论^[20], I 型裂纹的裂尖应力场分布为:

$$\sigma_x = \frac{K_i}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \tag{2}$$

$$\sigma_y = \frac{K_i}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \tag{3}$$

式中, σ_x, σ_y 分别表示 x, y 方向的应力分量。对于裂

尖处,当 $\theta = 0^\circ$,即裂纹沿着 $\theta = 0^\circ$ 裂纹的扩展方向开裂发展,此时在 $\theta = 0^\circ$ 处周向应力达到极值 $\sigma_{max} = \sigma_x = \sigma_y = \frac{K_i}{\sqrt{2\pi r}}$,根据断裂判据,在 r 处,随着裂纹的增长 K_i 增大,当 K_i 增大到临界值 K_c 时,应力达到断裂极限,此时裂纹失稳沿着应力最大方向扩展,直至材料断裂。

3 实验结果与分析

3.1 光斑尺寸对切割的影响

图 4 中给出了光斑直径 D 分别为 2mm, 3mm 和

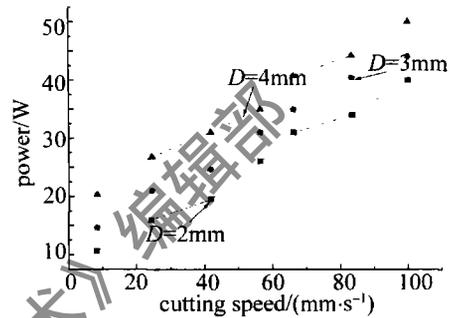


Fig. 4 The cutting speeds for different laser spot size

4mm 时对液晶玻璃基板的切割影响曲线。从图中可以看出,当光斑直径一定时,随着切割速率的增加,要想实现对液晶玻璃基板的切割,激光的输出功率也必须相应地增加,其与切割速率基本成线性关系。当光斑直径增大时,在相同的扫描速率下,要达到同样的切割效果必须增大输出功率,这是因为光斑直径的增大,在相同速率下照射到材料表面的功率密度减小了,为了提高激光功率密度以达到玻璃的断裂阈值因而需要加大输出功率。当光斑直径减小时,功率密度越高,所产生的温度场梯度就越大,在切割过程中就更容易引起表面的烧损。通常切割玻璃选用较大的光斑来降低温度场梯度从而减少玻璃的烧蚀熔融。

试验中,当激光光斑直径小于 1mm 时,此时激光的功率密度大于 10^3 W/cm^2 ,则无论改变激光功率还是切割速度都不能得到较好的切口质量。其原因是由于光斑直径过小,玻璃对 CO₂ 激光的强烈吸收使上表面的温度过高导致玻璃出现熔融和烧蚀,如图 5 所示。当然激光光斑直径也不能过大。试验中,当光斑直径大于 12mm 时,此时激光的功率密度在 50 W/cm^2 左

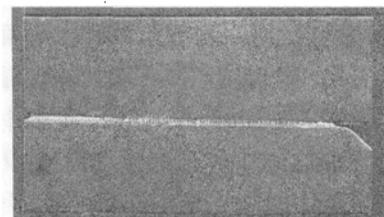


Fig. 5 The cutting speeds for different laser spot

右,加载的激光基本不能实现液晶玻璃基板的断裂切割,只在液晶玻璃表面激光扫描路径上留下一道激光加热的痕迹。其原因是由于光斑直径过大,使照射在玻璃基板上的功率密度达不到断裂阈值而无法分离玻璃基板。

3.2 玻璃基板厚度对切割的影响

图6中给出了厚度 h 分别为0.5mm,0.7mm时液

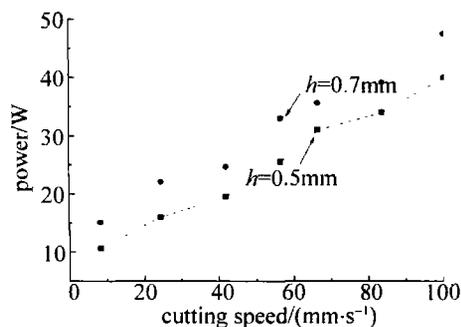


Fig. 6 The cutting speeds for different thickness of LCD glass

晶玻璃基板对激光切割的影响曲线。从图中可以看出,随着厚度的增加,在相同切割速率下激光的输出功率也相应的增大。这是因为液晶玻璃的热导率比较低,当玻璃的厚度增加时热阻也相应地增加了,热量从上表面传递到下表面也就更加地困难,所用的时间也就越长。因而在相同的切割速率下,0.7mm厚度的液晶玻璃基板比0.5mm厚需要更大的能量注入。

3.3 激光热裂切割与机械切割

图7为运用热裂法激光切割后试样的宏观表面照



Fig. 7 Whole morphology of laser cutting LCD glass

片,由照片中可以看出,直线切割轨迹非常直,裂纹没有偏离预定直线方向,宏观切割断面平滑,基本没有边缘碎屑与微裂纹的存在。图8为试样切割截面放大

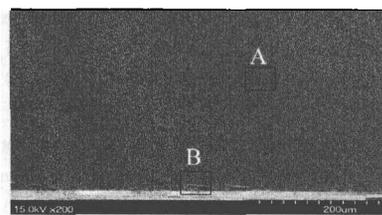


Fig. 8 SEM graph of profile after laser cut

200倍的扫描电子显微镜照片。由图可见,该切割断面除上表面有微量烧损脱落外,在基体内无微裂纹存在(A区域,见图9),基本达到实验要求;图10为图8中最大烧损部位(B区域)放大10倍后的扫描电镜照

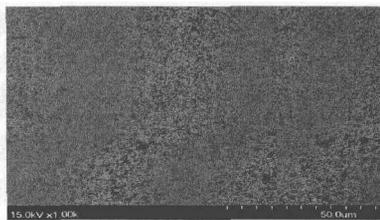


Fig. 9 SEM graph of A area after regional amplification

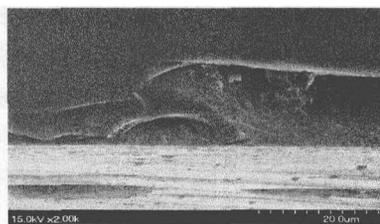


Fig. 10 SEM graph of B area after regional amplification

片,由图中可以看出其影响范围约 $18\mu\text{m}$ 。

图11为用硬质合金轮滑线机械切割断面的扫描

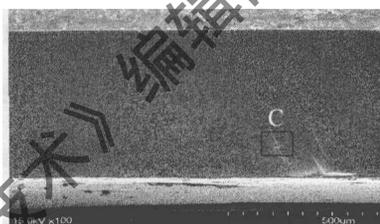


Fig. 11 SEM graph of profile after mechanical cut

电镜照片。可以看出,基体内存在大量的微裂纹,而这些正是影响液晶玻璃基板品质原因。微裂纹的存在使其在裂尖处产生很大的应力,在外力作用下极易开裂破碎。图12为图11中所选部位(C区域)放大10倍



Fig. 12 SEM graph of C area after regional amplification

的扫描电镜照片,从图中还可以看出,机械切割后在基体内的微裂纹还容易产生剥落的碎屑,这同样影响了液晶玻璃基板的品质,并为其质量问题埋下了隐患。

从切割断面的扫描电镜对比图中可以看出,利用本方法切割,虽然在基体内部没有微裂纹,但是在切割的上表面还是存在一些剥落。这是由于液晶玻璃强烈地吸收 $10.6\mu\text{m}$ 的激光,大部分激光能量被液晶玻璃表面约 $15\mu\text{m}$ 厚吸收,而液晶玻璃的热传导率又低,激光扫描后在其表面产生大量的热无法散去,过大的热应力使切口的上表面有几微米的剥落。

4 结论

研究了一种基于热裂法的液晶玻璃基板激光切割的方法。该方法先用YAG激光的瞬间高能量使液

晶玻璃发生热爆产生微裂纹,然后用 CO₂ 激光作为热源对其进行加热再用 Ar 气流对其进行冷却。材料的厚度对激光切割具有一定的影响,在其它条件不变的情况下,厚度越大所需要的输入功率也就越大,并且成线性增加。光斑直径的大小对激光切割表面质量起着重要作用。实验表明,激光光斑直径过大或过小都不宜切割,过大的光斑使能量密度不能达到液晶玻璃的断裂阈值,而过小的光斑则容易使液晶玻璃烧损。本实验室条件下,优化的光斑直径范围为 1mm ~ 12mm。通过对比实验可以确定基于热裂法的激光切割法优于机械切割法,能够基本消除切割边缘碎屑与微裂纹等缺陷达到良好的表面切割质量。

参考文献

- [1] JIAO J K, WANG X B, LI Y P. Research progress on glass cutting by laser[J]. *Glass*, 2007, 34(4): 8-12 (in Chinese)
 - [2] LI Ch. The present status and development trend of glass for TFT-LCD application[J]. *Glass*, 2006, 33(1): 15-23 (in Chinese)
 - [3] FU G Zh. Laser cutting technology glass [J]. *OME Information*, 2008, 13(7): 5-11 (in Chinese).
 - [4] ZHOU Sh F, ZENG X Y. Laser separation of brittle material [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(3): 321-325 (in Chinese).
 - [5] LUMLEY R M. Controlled separation of brittle materials using a laser [J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1969, 48(1): 850-854.
 - [6] GROVE R, DAE H C, SU W, *et al.* Laser cutting apparatus and method: US 3543979[P]. 1970-10-01.
 - [7] TSAI C H, LIU C S. Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003, 125(8): 519-528.
 - [8] TSAI C H, LIN B C. Laser cutting with controlled fracture and pre-bending applied to LCD glass separation[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 32(3): 1155-1162.
 - [9] TSAI C H, HUANG B W. Diamond scribing and laser breaking for LCD glass substrates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1/3): 350-358.
 - [10] NISAR S, SHEIKH M A, LI L. Effect of thermal stresses on chip-free diode laser cutting of glass[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(3): 318-327.
 - [11] ZHOU Y, LIU X Sh, CHEN X Y, *et al.* Modeling on the parameters of laser cutting quartz crystal[J]. *Laser Technology*, 2000, 24(2): 74-77 (in Chinese).
 - [12] YUAN M Q, LING H Zh, PENG B. Precision laser cutting technique for thin quartz glass plates[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 406-408 (in Chinese).
 - [13] JIAO J K, WANG X B. Temperature distribution of moving quartz glass heated by CO₂ laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(1): 1-4 (in Chinese).
 - [14] JIAO J K, WANG X B, LU H. Analysis of temperature field and thermal stress field in quartz glass heated by laser beams[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 427-430 (in Chinese).
 - [15] XU G L, LI Y X, HUANG S Y, *et al.* Numerical simulation of cutting glass with double-beam CO₂ laser[J]. *Huazhong University of Science & Technology Nature Science*, 2007, 35(1): 88-90 (in Chinese).
 - [16] LI L J. *Modern laser processing and equipment* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 120-129 (in Chinese).
 - [17] YIN S M, ZHANG L H, XU R J, *et al.* Experimental analysis of glass cutting by laser thermal stress [J]. *Engineering Science*, 2007, 9(3): 67-70 (in Chinese).
 - [18] BRIAN L. *Fracture of brittle solids* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 32-40 (in Chinese).
 - [19] YE Sh L, HUANG X, MA J Sh, *et al.* A study of cutting LCD glass substrates by laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 26(6): 401-404 (in Chinese).
 - [20] YANG X H, LUAN M T. Study of brittle/ductile fracture mechanism and criterion of crack tip deformation theory [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005: 12-14 (in Chinese).
- (上接第 456 页)
- 2007, 129(9): 1177-1186.
 - [4] ELHEM G, GIUSEPPE C, STEPHANE A. Laser diode transmission welding of polypropylene: geometrical and microstructure characterization of weld[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(7): 2745-2751.
 - [5] BAPPA A, DIPTEN M, DIPANKAR B, *et al.* Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology[J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, 41(8): 956-967.
 - [6] YUAN H, LAI J J, HE Y G. Experimental study on laser welding of thermoplastics[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2005, 3(1): 18-21 (in Chinese).
 - [7] WANG Y L, CAI Y, WANG J C. Technology of laser welding plastic [J]. *Applied Laser*, 2006, 26(2): 93-96 (in Chinese).
 - [8] WANG X, ZHANG H Z, DING G M. Investigation on influence of additive on welding quality of laser transmission welding plastics [J]. *Applied Laser*, 2007, 27(4): 314-317 (in Chinese).
 - [9] LIU H X, ZHANG H Z, JI J Q, *et al.* Methods and present status of laser welding of plastics [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 166-170 (in Chinese).
 - [10] WANG J C, QIN L M, LI J. Technics and microcosmic analysis research of PMMA/ABS thermoplastic laser transmission welding[J]. *Applied Laser*, 2008, 28(4): 287-291 (in Chinese).
 - [11] WANG X, YANG K, ZHANG H Z. Experiment research on laser transmission welding of two different thermoplastics[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(5): 97-100 (in Chinese).
 - [12] SHI W Q, YANG Y Q, HUANG Y L, *et al.* Simulation of the temperature field in rapid prototyping of selective laser melting[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(4): 410-412 (in Chinese).