

## 音膜激光辐照的表面完整性及声学特性研究

周建忠, 刘伟, 黄舒, 郑阳, 谭文胜, 宋稳红, 穆丹, 余杰

(江苏大学机械工程学院, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 为解决高分子聚酯材料的音膜在使用过程中存在中频失真、发声性能有缺陷等问题, 针对音膜在发声器件中的作用和特点, 提出了一种新型高分子音膜材料激光改性工艺。采用不同功率, 固定波长为 975 nm 的半导体连续激光辐照音膜表面, 在保证其表面完整性的情况下获得不同的改性效果。结果表明, 经激光辐照后, 音膜试样材料表面完好, 无破损、变形; 音膜表面粗糙度降低, 有利于提高音膜振动的一致性和均匀性; 音膜失真、谐振频率等声学性能得以改善, 产品的发声品质显著提高。试验所得结果对于当前采用高分子聚酯材料作为音膜的发声器件快速、高效地提升市场竞争力有着重要意义。

**关键词:** 光学制造; 激光热效应; 激光改性; 聚酯材料

**中图分类号:** TN249   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1420-06

## Acoustic characteristic and surface integrity of sound film induced by laser irradiation

Zhou Jianzhong, Liu Wei, Huang Shu, Zheng Yang, Tan Wensheng, Song Wenhong, Mu Dan, She Jie

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of intermediate frequency (IF) distortion and acoustic performance deficiencies during the use of polymer polyester sound film, a novel laser modification technology on polymer sound film was proposed to improve the function and characteristics of sound film in sound device. Continuous semiconductor laser with the fixed-wavelength of 975 nm was applied to irradiate the surface of sound film with different laser power. Based on the assurance of the sound film surface integrity, different effects of laser irradiation on modification of sound film were obtained. The results show that after laser irradiation, the surface of sound film is intact without breakage or deformation. The surface roughness of the sample decreases, which is benefit for raising the consistency and uniformity of sound film during the vibration process. The sound film distortion, the resonant frequency and other acoustic properties are improved, moreover, the sound quality of the product is significantly improved. Results obtained in the experiment are of great significance to quickly and efficiently enhance the market competitiveness of the sound devices using polymer polyester sound film.

**Key words:** optical fabrication; laser thermal effect; laser modification; polyester material

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-10-09

基金项目: 江苏省科技工业支撑项目(BE2013097); 江苏省企业研究生工作站技术开发项目(2013186)

作者简介: 周建忠(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光先进制造技术方面的研究。Email: jzzhou@sina.cn

## 0 引言

聚酯是指分子主链上含有刚性苯环和极性酯基的高度对称的线性聚合物,其具备强度高、韧性大、在较宽的温度范围内能保持优良的物理力学性能的特点<sup>[1]</sup>。聚酯薄膜被广泛运用在扬声器音膜上,但和其他音膜材质相比,聚酯音膜刚性差,质量大,故在高速微动作时,音圈产生的动能无法完全一致地传达至整个音膜,造成“盆分裂现象”。虽然内置阻尼缓解了盆分裂共振,但毕竟已无法做完美的活塞运动,失真率相对提高。鉴于此,工程师们尝试各种音膜改性方法,提高高分子音膜的性能。

目前常用的高分子表面改性技术主要有化学改性、光化学改性、力化学处理、火焰处理和热处理、表面改性剂改性等,而随着激光技术的广泛应用,采用激光辐照对聚合物进行表面改性已成为可能。国内方面,中国科学院长春应用化学研究所和上海交通大学化学化工学院曾采用激光技术对聚酰亚胺进行了表面改性研究<sup>[2]</sup>;王素焕等<sup>[3]</sup>研究了 355 nm 脉冲(100 kHz)紫外激光刻蚀改性的功率密度对聚碳酸酯(PC)材料表面润湿性能影响规律;张云海等<sup>[4]</sup>分别在大气和氮气环境下研究了 KrF 准分子激光辐照对聚四氟乙烯(PTFE)材料表面的改性效果;金承钰等<sup>[5]</sup>采用激光诱导技术在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)材料表面制备周期性的纳米沟槽结构,提高了其表面亲水性能,改善了其血液相容性和内皮细胞生长状态;李天民<sup>[6]</sup>通过紫外光辐射 PTFE,在其薄膜表面接枝了聚乙二醇甲基丙烯酸酯,改善了 PTFE 表面的亲水性和粘接性能;姬亚玲<sup>[7]</sup>通过准分子激光辐照聚偏氟乙烯(PVDF)诱导材料表面导电性能变化,实现了由绝缘到导电的变化,并通过调整激光能量密度、光束质量、环境气氛、脉冲频率和辐照脉冲数等参数,确定出激光辐照诱导 PVDF 导电性质的最佳工艺条件;黄峰等<sup>[8]</sup>设计了 308 nm XeCl 准分子激光对高分子材料的表面处理系统,初步探讨了紫外激光处理高分子材料表面的物理和化学过程。国外方面,美国 IBM 公司采用紫外准分子激光辐照聚对苯二甲酸二乙酯(PET)薄膜,使薄膜表面发生刻蚀,并放出低分子量气体,产生 30 多种低聚物和固体残片<sup>[9]</sup>;Hoop 等<sup>[10]</sup>以三乙基四胺为改性剂,采用准

分子激光辐照法改性 PTFE 表面后发现,一定的激光辐照能量密度可以提高 PTFE 的粘接强度。同时,经准分子激光处理前后的 PTFE 表面,其水接触角由 96°下降至 30°~37°。

综上所述,目前有关采用激光辐照对聚合物表面改性的研究主要集中于激光辐照后聚合物表层发生的物理形态和化学结构的变化,以及改性后聚合物表面的应用性能改变等方面。国内有关激光辐照对聚合物表面改性的研究还很少。文中针对聚酯材料音膜在使用过程中由于刚性不足而导致中频失真、发声性能有缺陷的问题,采用一定功率的半导体激光器辐照聚酯材料音膜球顶区域。根据激光热效应,促使聚酯材料表面的分子链运动并重新排列,使得表面粗糙度均匀化;同时,高能激光束诱导聚酯音膜的分子链产生交联,提高其弹性模量等力学性能,从而提升其声学性能。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验材料为直径为 5 mm 的高分子聚酯音膜,其标准试样示意图如图 1 所示。试验前采用超声波清洗试样,除去表面杂质,防止杂质引起的激光吸收率不一致,从而破坏试验效果。

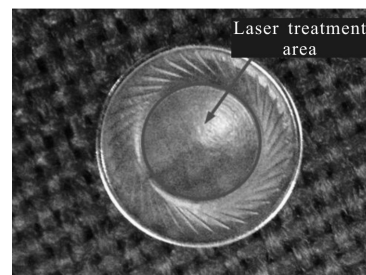


图 1 音膜试样及激光处理区域

Fig.1 Sound film and laser treatment area

### 1.2 试验设备及方法

试验采用德国 Dilas COMPACT130/140 半导体光线耦合激光器测试系统。激光器最大输出功率为 130W,连续输出,波长为 975±5 nm。采用芯径 400 μm 的光纤进行光束传输。由于在激光光斑确定的情况下,薄膜的温升主要取决于激光的功率密度<sup>[11]</sup>,短时间内的激光辐照对聚酯材料表面改性效果明显,而长时间的激光辐照聚酯材料易产生表面变形烧蚀的

现象,所以文中仅研究了激光功率对聚酯音膜的影响,并未对辐照时间的作用效果作进一步讨论。激光辐照高分子音膜试样采用的最大激光功率为 20 W,光斑直径为 2 mm,辐照时间为 20 s,处理球顶区域如图 1 所示。

表面微观形貌及粗糙度的测量采用 Zeiss-Axio CSM 700 型真彩色共聚焦扫描显微镜。测量时采用非接触分析,选用多波长(400~700 nm)白光,最高采集速度为 100 帧/s,三维扫描分辨率可达 1 028 pixel×1 024 pixel,从而获得真彩色的三维图像。在表面形貌和表面粗糙度测量过程中,选用 Zeiss10 倍镜头进行扫描,扫描区域约为 1.7 mm×1.7 mm。试样分组及试验参数如表 1 所示,表中  $P$  为激光功率, $t$  为辐照时间, $d$  为激光光斑直径。

表 1 试样分组及试验参数

Tab.1 Paramaters of laser surface treatment

No.	$P/W$	$t/s$	$d/mm$
1	0	0	0
2	10	20	2
3	15	20	2
4	20	20	2

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面粗糙度

表面粗糙度是反映表面微观几何形状误差的重要指标<sup>[2]</sup>。众多研究表明,薄膜的许多物理性质和化学性质均与薄膜表面形貌密切相关<sup>[3]</sup>。音膜表面粗糙,凹凸不均,在制造的过程中易产生残余应力,导致在发声的过程中振动不均匀。预应力的不同影响了音膜的谐振频率 $f_0$ ,导致声学性能受到影响。因此,准确测量音膜表面粗糙度有助于评价音膜改性的效果。

图 2、3 所示为激光辐照后面粗糙度和线粗糙度

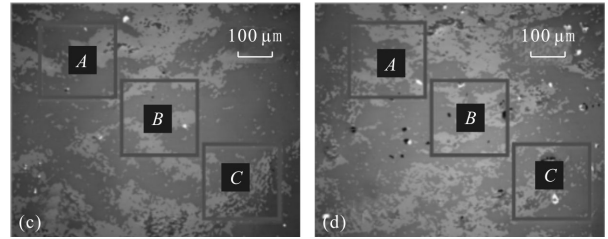
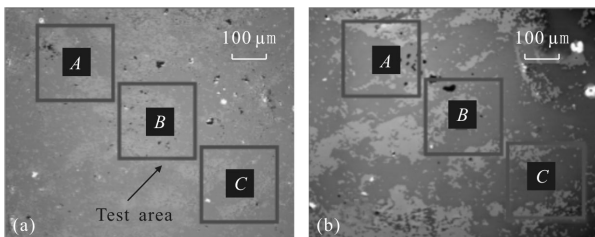


图 2 激光辐照后面粗糙度测试区域

Fig.2 Test areas of surface roughness after laser treatment

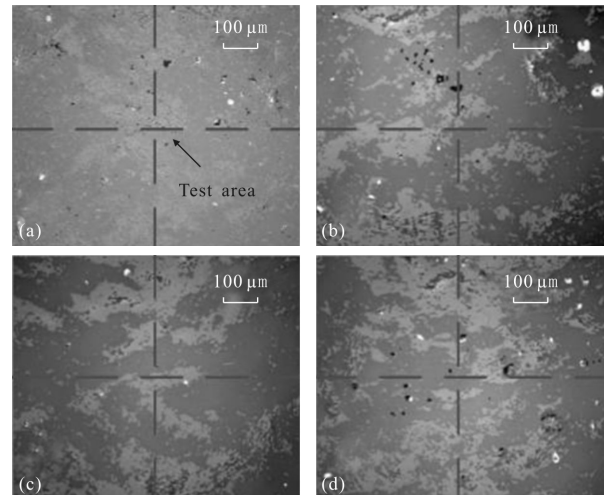


图 3 激光辐照后线粗糙度测试区域

Fig.3 Test areas of line roughness after laser treatment

的取样区域,其中图(a)、(b)、(c)、(d)分别为 1、2、3、4 组样测试区域。图 3 中过每个样的中心点选取横向、纵向两条线进行线粗糙度测试。

首先对整个待测试面进行面粗糙度测试,为了避免噪点对整体粗糙度真实性的影响,在每个待检测样中,沿对角线方向选取 3 个避开噪点的小方块区域 A、B、C 进行测试;最后将每组样的最终结果取均值进行对比分析,得出结论。表 2 所示为不同激光参数处理后粗糙度测试结果,表中  $Ra_A$ 、 $Ra_B$ 、 $Ra_C$  分别为 A、B、C 3 个测试区域的面粗糙度; $Ra_{sur}$ 、 $Ra_1$ 、 $Ra_2$  分别为面粗糙度、线水平粗糙度和线竖直粗糙度。

由表 2 可知,试样的面粗糙度随着激光功率的增大而减小。其中,由于噪点存在,与小区域的面粗糙度相比,试样的整体面粗糙度较大,线粗糙度的测试结果与小区域的面粗糙度测试结果较为吻合。相对于未处理的 1 组样,2、3、4 组样的面粗糙度分别降低了 2.626、4.385、4.892  $\mu\text{m}$ ;水平线粗糙度分别降低了 3.359、4.901、5.913  $\mu\text{m}$ ;竖直线粗糙度分别降低了 3.804、5.831、6.064  $\mu\text{m}$ 。由此可知,激光辐照后高

分子聚酯音膜材料的表面粗糙度降低且激光功率越大,音膜表面粗糙度越低。另外,在试验参数范围内,随着激光功率增大,音膜粗糙度的降幅有所下降,趋于平缓,表明激光辐照音膜表面只能在一定程度上改善表面粗糙度水平。

表 2 不同参数激光辐照后粗糙度测试结果

Tab.2 Results of surface roughness test induced by different parameters laser irradiation ( $\mu\text{m}$ )

No.	$Ra_A$	$Ra_B$	$Ra_C$	$Ra_{sur}$	$Ra_1$	$Ra_2$
1	9.808	11.898	9.153	11.574	9.828	10.964
2	6.378	6.795	7.598	8.948	6.469	7.160
3	5.755	5.153	5.063	7.189	4.927	5.133
4	4.584	4.055	4.809	6.682	3.915	4.900

### 2.2 二维形貌分析

图 4 为 2 组样激光辐照处理前后过球顶中心点横向二维轮廓图,其中  $a$  为音膜理论轮廓线; $b$  为激光辐照处理后音膜轮廓线; $c$  为激光辐照处理前音膜轮廓线。从图中可以看出,在测试范围  $0\sim 1100\ \mu\text{m}$  内,音膜球顶截面呈圆弧形,在宽度为  $500\sim 650\ \mu\text{m}$  附近达到最高。 $c$  线显示:激光处理前音膜球顶最高约为  $9\ \mu\text{m}$ ,比音膜理论轮廓线高  $4\ \mu\text{m}$  左右; $b$  线显示:激光辐照处理后,音膜球顶最高约为  $6\ \mu\text{m}$ ,比激光处理前降低约  $3\ \mu\text{m}$ 。从整条曲线看,相对于  $b$  线, $c$  线在宽度  $300\sim 700\ \mu\text{m}$  范围内偏离理论轮廓线较多,同时有较大的凹凸起伏,整条曲线显得较为粗糙。 $b$  线中,落差大的起伏明显减少,整条曲线贴近理论轮廓线。这是由于在压膜过程中,音膜表面存在残余应力,导致聚酯材料分布不均匀,音膜表面粗糙度高;经过激光辐照之后,高能激光束作用在音膜表面,促使音膜表面残余应力的释放和表层分子链的运动,使得音膜表面粗糙度降低,表层凹凸减少,起伏变均匀。

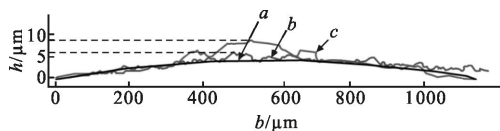


图 4 激光辐照前后音膜试样球顶部分的轮廓形状

Fig.4 Outline of the sound film top before and after laser treatment

### 2.3 失真分析

文中主要采用 B&K 声学测试设备对激光辐照

前后的聚酯材料音膜进行失真、谐振频率  $f_0$  和频响测试。图 5 为不同功率激光辐照处理音膜球顶区域后对失真的影响曲线,其中 THD 为失真率。

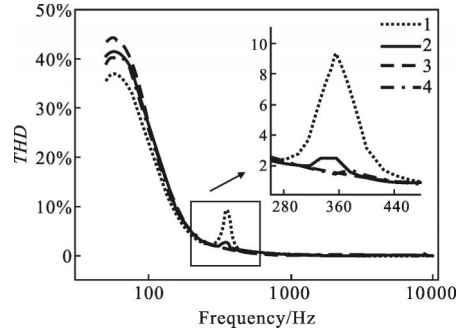


图 5 失真测试结果对比

Fig.5 Comparison of the results of THD test

从图 5 可以看出,在中频  $100\sim 1000\ \text{Hz}$  区域、频率  $350\ \text{Hz}$  附近,1 组样音膜存在明显的失真率陡增,形成失真尖峰,极大地影响了音膜的声学表现。同样的区域,2、3、4 组样的失真尖峰明显降低,甚至消失,音膜的中频失真得以改善。同时,激光处理的功率越大,失真尖峰越低。在高频  $1000\sim 10000\ \text{Hz}$  区域,失真曲线无明显变化。试验结果说明激光辐照聚酯材料音膜可以明显改善其中频失真,且激光功率越大,改善效果越明显。

为防止聚酯材料久置后产生的蠕变,验证激光辐照处理的持久性,在失真测试之后进行时效处理,即放置一段时间(约两个月)后再进行失真测试。从图 6 对第 4 组样的测试结果来看,在  $100\sim 1000\ \text{Hz}$  的中频段,时效处理前后两条失真曲线基本重合,表明时效处理并未对音膜的中频失真产生较大的影响,激光辐照处理工艺对音膜的中频失真改善具有持久性。

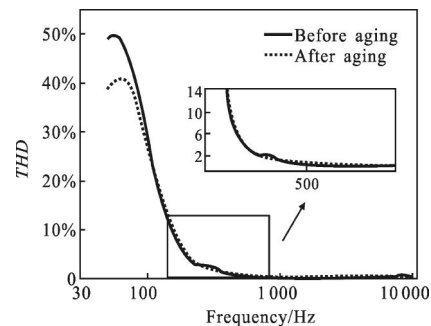


图 6 时效处理后失真度测试结果对比

Fig.6 Comparison of the results of THD test after aging

## 2.4 谐振频率分析

对样品进行谐振频率  $f_0$  测试,用以分析激光辐照处理对  $f_0$  的影响。图7为激光辐照处理前后的试样  $f_0$  的对比。可以看出,激光辐照后,音膜的  $f_0$  均得到了提升。激光功率为 10、15、20 W 时,  $f_0$  分别提高了 6.81、12.41、14.36 Hz,  $f_0$  增幅分别为 3.63%、6.90%、7.36%。较 15~20 W 区间,激光功率为 10~15 W 区间  $f_0$  增幅较大。这是由于在 10~15 W 区间内,激光辐照高分子聚酯音膜表面作用效果显著,音膜表面粗糙度趋于均匀,高分子交联反应使得音膜的弹性模量提高,  $f_0$  提升明显;在 15~20 W 区间内,随着激光能量的进一步增大,激光辐照的增益作用逐步减弱,高能量密度的激光使音膜表面的更多分子链发生运动,表面粗糙度趋于平缓,分子链内部分解反应加强,弹性模量提高减缓,致使  $f_0$  提升趋弱。

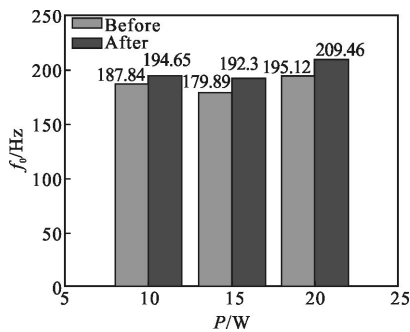


图7 激光辐照前后的音膜  $f_0$  对比

Fig.7 Comparison of the results of  $f_0$  test before and after laser treatment

## 2.5 频响分析

频率响应  $FR$  反映了声学器件工作时的频率范围。一定频率下声压级的大小与音膜的阻尼有关<sup>[14]</sup>。频响曲线对于音质的影响是巨大的,通常会关系到声学器件的音色、声场表现等性能。一般来说,声学器件的频响曲线是由专业的声学工程师根据产品的定位而设计的,在后续的制造装配过程中要尽量避免频响曲线的变化。

图8为4组样音膜经激光辐照处理前后的频响曲线。可以看出,无论在低频区域还是在中高频区域,激光辐照处理对音膜的声压级的大小影响不大。此结果说明激光辐照处理聚酯材料音膜对其阻尼无较大影响。对比激光辐照后的频响曲线发现,激光辐照改性聚酯材料音膜不会改变音膜的音色、声场等

产品定位和设计初衷。

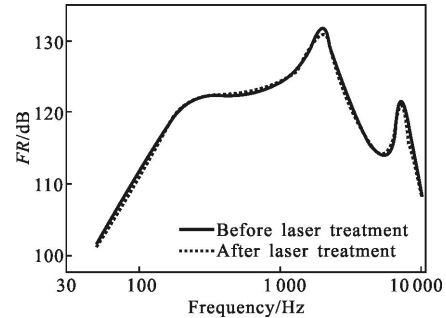


图8 音膜频响测试结果对比

Fig.8 Comparison of the results of FR test before and after laser treatment

## 3 结论

通过上述分析,可以得出以下结论:

(1) 激光辐照高分子聚酯材料音膜球顶可以降低球顶粗糙度,改善球顶的表面形貌,且在一定激光能量范围内,音膜球顶的表面粗糙度随着激光能量的增大而降低。

(2) 一定能量范围的激光辐照聚酯音膜球顶可以改善其中频 360 Hz 附近出现的失真现象,且激光能量越大,聚酯音膜球顶的中频失真改善越明显。经时效处理验证,其改善效果具有持久性。

(3) 一定能量范围的激光辐照聚酯音膜球顶可以提高其谐振频率,且激光能量越大,聚酯音膜球顶的中频失真改善越明显。

(4) 一定能量范围的激光辐照聚酯音膜球顶对于其频响曲线影响不大。

## 参考文献:

- [1] Yang Mingbo, Tang Zhiyu. China Materials Engineering Canon[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese) 杨鸣波,唐志玉. 中国工程材料大典 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] Zhang Yunhai. Surface modification and etching of polymer by excimer laser irradiation [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2005. (in Chinese) 张运海. 聚合物材料表面激光改性与刻蚀研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2005.
- [3] Wang Suhuan, Liu Jianguo, Lv Ming, et al. The effect of pulse ultraviolet laser modification on the surface wetting property of polycarbonate[J]. *Photovoltaic Engineering*, 2013 (7): 77-82. (in Chinese)

- 王素焕, 刘建国, 吕铭, 等. 脉冲紫外激光改性对聚碳酸酯表面湿润性能的影响[J]. 光电工程, 2013(7): 77-82.
- [4] Zhang Yunhai, Man Baoyuan. The research on the surface modification of PTFE irradiated by KrF excimer laser [J]. *Laser Journal*, 2012, 33(3): 10-12. (in Chinese)  
张运海, 满宝元. KrF 准分子激光改性 PTFE 研究[J]. 激光杂志, 2012, 33(3): 10-12.
- [5] Jin Chengyu, Li Huiqin. Nano-modified polyethylene terephthalate and its blood compatibility induced by laser[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2012, 10: 274-279. (in Chinese)  
金承钰, 李慧琴. 激光改性 PET 表面纳米修饰及其血液相容性研究[J]. 实验室研究与探索, 2012, 10: 274-279.
- [6] Li Tianmin. Cerous ions promote surface modification of fluoropolymers by UV -irradiation [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011. (in Chinese)  
李天民. 铈(III)离子促进紫外光引发氟塑料膜表面接枝改性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- [7] Ji Yaling. Research on the properties of polymer induced by laser irradiation [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007. (in Chinese)  
姬亚玲. 激光辐照聚合物材料改性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
- [8] Huang Feng, Lou Qihong, Xu Jianqiu, et al. Excimer laser treatment of polymer materials [J]. *Chinese Laser*, 1999, 26(8): 745-748 (in Chinese)  
黄峰, 楼祺洪, 徐剑秋, 等. 高分子材料的准分子激光表面处理[J]. 中国激光, 1999, 26(8): 745-748.
- [9] Srinivasan R, Leigh W J. Ablative photodecomposition: action of far-ultraviolet (193 nm) laser radiation on poly (ethylene terephthalate) films [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1982, 104(24): 6784-6785.
- [10] Hoop B, Kresz N, Kokavec J, et al. Adhesive and morphological characteristics of surface chemically modified polytetrafluoroethylene films [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 221(1-4): 437-443.
- [11] Dai Fu, Xiong Shengming, Gao Weidong. Temperature rise of optical coating irradiated by a high repetition frequency pulse laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 509-512. (in Chinese)  
代福, 熊胜明, 高卫东. 高重复频率脉冲激光辐照光学薄膜的温升实验[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 509-512.
- [12] Huang Shu, Zhou Jianzhong, Sun Yueqing, et al. Study on surface integrity of 6061-T6 aluminum alloy sheet after laser shot peening [J]. *Application of Laser*, 2007, 27(6): 450-455. (in Chinese)  
黄舒, 周建忠, 孙月庆, 等. 激光喷丸强化 6061-T6 铝合金板料的表面完整性研究[J]. 应用激光, 2007, 27(6): 450-455.
- [13] Fu Yongzhong, Ding Jianning, Yang Jichang, et al. Fractal characteristics of morphologies of GeSb<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> phase-change films [J]. *Journal of Jiangsu University Natural Science Edition*, 2006, 27(5): 430-433. (in Chinese)  
付永忠, 丁建宁, 杨继昌, 等. GeSb<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> 相变薄膜表面形貌的分形特征 [J]. 江苏大学学报自然科学版, 2006, 27(5): 430-433.
- [14] Cheng Guang. Vibration system of loudspeaker[J]. *Parts and Circuit*, 2009, 33(6): 21-25. (in Chinese)  
程光. 扬声器振动系[J]. 器件与电路, 2009, 33(6): 21-25.