

文章编号: 0253-2239(2008)12-2354-05

激光固化快速成形 SL7510 型光敏树脂性能研究

黄笔武 陈伟凡 谌伟庆

(南昌大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要 利用红外光谱仪、紫外激光固化快速成形设备、旋转黏度计、电子拉力试验机以及热机械性能分析仪对美国 Huntsman 公司的 SL7510 型光敏树脂进行了性能研究。实验结果表明, SL7510 型光敏树脂是一种环氧树脂-丙烯酸酯混杂型光敏树脂, 它在 30 °C 时的黏度为 335 mPa·s, 临界曝光量为 10.9 mJ/cm², 透射深度为 0.14 mm, 固化体积收缩率为 4.03%, 固化物拉伸强度为 40.8 MPa, 拉伸弹性模量为 2009.2 MPa, 断裂伸长率为 13.6%, 玻璃化温度为 62 °C。同时, 根据所测定的光敏树脂临界曝光量和透射深度数值, 选定了紫外激光固化快速成形设备的加工参数, 制作了电话机外壳, 其制作效果较好。

关键词 激光技术; 快速成形; 光敏树脂; 临界曝光量; 透射深度

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2354

Study on the Properties of SL7510 Type Photosensitive Resin for Laser Curing Rapid Prototyping

Huang Biwu Chen Weifan Chen Weiqing

(School of Material Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract The properties of Huntsman SL7510 type photosensitive resin were investigated by using a FT-IR spectrometer, a stereolithography apparatus, a spinning viscometer, a universal testing machine and a thermomechanical analysis meter. The experimental results showed that the photosensitive resin belongs to an epoxy-acrylic hybrid photosensitive resin, its viscosity at 30 °C is 335 mPa·s, its critical exposure (E_c) is 10.9 mJ/cm², its penetration depth (D_p) is 0.14 mm, its cured volumetric shrinkage is 4.03%, the tensile strength of its cured product is 40.8 MPa, the tensile modulus of its cured product is 2009.2 MPa, the elongation at break of its cured product is 13.6%, and the glass transition temperature of its cured product is 62 °C. According to the determined E_c and D_p values of the photosensitive resin, the processing parameters of the stereolithography apparatus were chosen to fabricate the part of a telephone shell, and the quality of the fabricated part was good.

Key words laser technique; rapid prototyping; photosensitive resin; critical exposure; penetration depth

1 引 言

快速成型是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一项快速设计及成型技术^[1]。快速成型加工的核心思想是离散堆积成型^[2,3]。即由 CAD 软件设计出所需零件的计算机三维曲面或实体模型; 将三维模型沿一定方向(通常为 z 向)离散成一系列有序的二维层片(习惯称为分层); 根据每层轮廓信息, 进行工艺规划, 选择加工参数, 自动生成数控代码; 成型机制造一系列层片并自动将其联接起来, 得到三维物理实体。快速成型技术综合了激光、计算机辅助设计与制造、光化学、新型材料等科学技术的研究成果,

不需任何机械加工设备即可快速精确地制造复杂形状的物体。其中激光技术是快速成型技术的核心, 激光技术的发展^[4~9]推运了快速成型工艺的发展。常用的快速成型工艺有: 紫外激光固化快速成形(俗称立体光刻快速成形)^[10~13]、选择性激光烧结^[13]、熔丝沉积^[14]、分层实体制造^[15]等。其中紫外激光固化快速成型是将紫外激光在树脂液面上按二维截面的形状逐点扫描, 使树脂固化, 固化后的树脂便形成一个二维图形, 如此逐层扫描、固化, 最终即可得到完整的三维实体。在紫外激光固化快速成型中, 光敏树脂材料是其基础, 它的组成与紫外光固化涂料、

收稿日期: 2008-08-20; 收到修改稿日期: 2008-10-13

基金项目: 国家 863 计划(2002AA6Z3083)资助项目。

作者简介: 黄笔武(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光固化快速成形光敏树脂制备方面的研究。

E-mail: hbwhzkj@tom.com

油墨组成类似。即由光引发剂、预聚物、稀释剂及少量添加剂组成。但是,紫外激光固化快速成形对其光敏树脂具有特殊要求,要求光敏树脂具有以下特点^[16]:1)黏度低,低黏度树脂有利于成型中树脂能较快流平;2)固化收缩小,光固化树脂在由液态转化为固态的过程中会产生内应力收缩,这种收缩会引起原件在制作过程中的变形、翘曲、开裂等,使成型零件的精度降低;3)溶胀小,湿态成型件在液态的树脂中的溶胀会造成零件尺寸偏大;4)对光的敏感度高,即所吸收波长的范围要窄,以提高零件的制作精度;5)与光源匹配性良好,以充分利用光能,提高固化效率;6)树脂粘接性强,以保证后固化过程不产生层间剥离;7)固化速率快,以提高生产效率;8)贮存稳定性良好,一般贮存有效期至少应一年;9)毒性小,以利于操作者的健康和 not 造成环境污染;10)成本低,以利于商品化。由于紫外激光固化快速成形所需光敏树脂需要同时具有以上这些特点,致使其光敏树脂研究和开发具有一定的难度。现在,我国的紫外激光固化快速成形光敏树脂基本上依赖进口美国 Huntsman 公司和 DSM SOMOS 公司的昂贵光敏树脂,其价格昂贵,每公斤高达 1200 元人民币。因此,对美国 Huntsman 公司的紫外激光固化快速成形 SL7510 型光敏树脂进行研究,对于我国开发具有自主知识产权的紫外激光固化快速成形光敏树脂具有重要的指导意义。

2 实验部分

2.1 实验原料

SL7510 型光敏树脂,美国 Huantsman 公司购买。

2.2 实验设备

HRPL-I 型紫外激光固化快速成形设备,由华中科技大学武汉滨湖机电公司制造;紫外光固化机(功率 500 W),由武汉滨湖机电技术产业有限公司制造;NDJ-1 A 型旋转黏度计,由上海安德仪器设备有限公司制造;TMA7 型热机械性能分析仪(美国制造);Bruker FT-IR EQUINOX55 型红外光谱仪(德国制造);电子拉力试验机,由深圳市瑞格尔仪器有限公司制造。

3 结果与讨论

3.1 黏度

黏度是衡量光敏树脂可流动性、可加工性能的一个重要指标。适中的光敏树脂黏度有利于提高制作速度和制件的精度。利用 NDJ-1 A 型旋转黏度

计对 SL7510 型光敏树脂进行了黏度测试,其测试结果如图 1 所示。

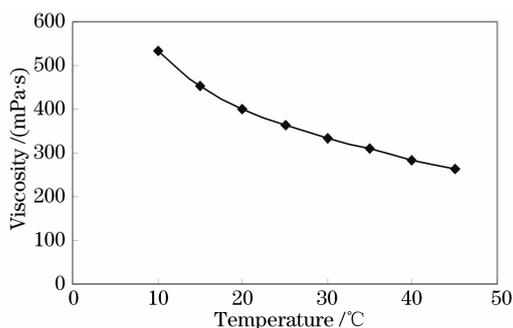


图 1 温度的变化对光敏树脂黏度的影响

Fig. 1 Influence of temperature on the photosensitive resin viscosity

从图 1 可知,SL7510 型光敏树脂随着温度的升高,黏度逐渐变小,在 30 °C 时的黏度值为 335 mPa·s。这说明 SL7510 型光敏树脂为非牛顿流体,且黏度适中。

3.2 红外光谱表征

利用 Bruker FT-IR EQUINOX55 型红外光谱仪,对 SL7510 型光敏树脂进行了红外光谱表征,其红外光谱图如图 2 所示。

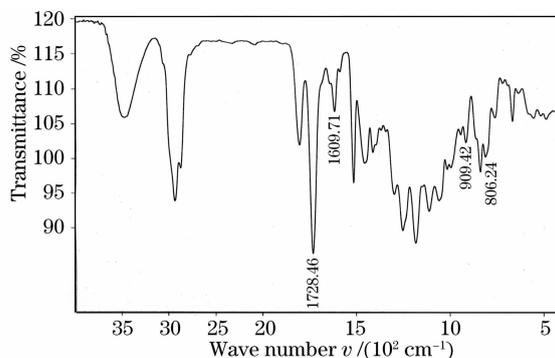


图 2 SL7510 型光敏树脂红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectrum of SL7510 photosensitive resin

图 2 显示下列特征峰:806.24 cm^{-1} (=C-H 弯曲振动特征峰),1609.71 cm^{-1} (C=C 骨架伸缩振动特征峰),1728.46 cm^{-1} (酯羰基特征峰),909.42 cm^{-1} (环氧基特征峰)。由此说明,SL7510 型光敏树脂中既含有环氧树脂组分又含有丙烯酸酯组分,SL7510 型光敏树脂应属于一种环氧树脂-丙烯酸酯混杂型光敏树脂。

3.3 固化体积收缩率

从分子角度讲,光敏树脂的固化过程是从小分子体向长链大分子的聚合体转变的过程,其分子结构发生很大变化,因此,固化过程中的收缩是必然的。光敏树脂的密度和体积收缩率也是光敏树脂的重要物

性指标。光敏树脂的固化体积收缩率与固化成形制件的內应力有着密切的关系:光敏树脂固化时体积收缩率大,则成形制件的內应力大,成形制件易翘曲变形;光敏树脂固化时体积收缩率小,则成形制件的內应力小,成形制件不易翘曲变形,成形制件精度高。利用比重瓶法^[17]在 25 ℃下对此 SL7510 型光敏树脂固化前、后的密度进行了测试,其测试结果为固化前的密度 1.19,固化后的密度为 1.24,则体积收缩率

$$S_v = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \times 100\% = \frac{1.24 - 1.19}{1.24} \times 100\% = 4.03\%$$

其值小于文献^[18~20]所报道的光敏树脂的固化体积收缩率,说明用该光敏树脂来制作零件将能保持较高的精度。

3.4 临界曝光量和透射深度

不同的光敏树脂具有不同的透射深度(D_p)和临界曝光量(E_c),透射深度和临界曝光是光敏树脂的特性常数。紫外激光固化快速成形制作工艺参数的选定必须以它们作为依据,即紫外激光固化快速成形设备的紫外激光照射到光敏树脂液面的能量(E_o)必须大于临界曝光量(E_c), $E_o > E_c$;设备工作台下移一个层厚的距离(分层厚度 d)必须小于透射深度(D_p), $D_p > d$ 。根据文献^[21]所述方法,对该光敏树脂进行 D_p 和 E_c 测定。

液态光敏树脂对紫外光的吸收通常遵循 Beer-Lambert 定理,紫外激光照射到光敏树脂液面上符合 Beer-Lambert 定理,即紫外激光的能量也沿照射深度成负指数衰减^[22],即

$$E(z) = E_o \exp(-z/D_p), \quad (1)$$

式中 E_o 为紫外激光照射到液面的能量密度, $E(z)$ 为透射到 z 深度的激光能量密度; D_p 为光敏树脂固有的参数,表示对紫外激光吸收性能的强弱, D_p 越小,表明树脂对紫外激光吸光越强。当液态光敏树脂接受的紫外光的曝光量(E)超过一定的阈值即临界曝光量(E_c)后,即当

$$E_o \exp(-z/D_p) \geq E_c, \quad (2)$$

光敏树脂会发生相变,从液态变为固态,此时, $z \leq D_p \ln(E_o/E_c)$,等号左边的 z 为固化深度,设其值为 C_d ,则固化深度为

$$C_d = D_p \ln(E_o/E_c), \quad (3)$$

(3)式描述了一定的曝光量下树脂的固化深度,进一步可写为

$$C_d = D_p \ln E_o - D_p \ln E_c, \quad (4)$$

(4)式为紫外激光照射光敏树脂的光固化方程。

从固化深度表达式(4)可知,如果以 $\ln E_o$ 为横

坐标, C_d 为纵坐标,则光固化方程是一条直线,直线的斜率为 D_p ,直线与 $\ln E_o$ 轴的交点为 $\ln E_c$ 。为了曝光量的计算方便,本文采用平面扫描的方法。平面扫描指扫描一个区域时,扫描线之间充分重叠,从而使曝光区域的曝光均匀。一般可设置扫描线之间的距离小于紫外激光器所发出的激光光斑半径(0.1 mm)即可实现,不难得得出液态光敏树脂液面上的平均曝光量的计算公式为: $E = P_L / (V_s \times h_s)$, P_L 表示到达光敏树脂液面时紫外激光的功率, V_s 表示紫外激光的扫描速率, h_s 表示紫外激光的扫描间距。

从一系列已知的 P_L 、 V_s 和 h_s 值以及测得的 C_d 值,绘制 C_d 与 $\ln E_o$ 的工作曲线,即可求得 E_c 和 D_p 值。

利用 HRPL-I 型紫外激光固化快速成形设备,在实验条件为: $P_L = 95 \text{ mW}$, $h_s = 0.08 \text{ mm}$,SL7510 型光敏树脂工作温度 30 ℃, V_s 为 2000~5500 mm/s。平面扫描制作一层厚的 25 mm×25 mm 正方形薄片,乙醇清洗,再放入功率为 400 mW 的紫外箱后固化 30 min。所测薄片层厚的数据如表 1 所示。

表 1 不同扫描速度和曝光量对固化层厚的影响
Table 1 Different scanning speeds and exposure energies with corresponding thickness of layers

n	$V_s / (\text{mm/s})$	$E_o / (\text{mJ}/\text{cm}^2)$	$\ln E$	C_d / mm
1	2000	59.4	4.08	0.24
2	2500	47.5	3.86	0.21
3	3000	39.6	3.68	0.18
4	3500	33.9	3.52	0.16
5	4000	29.7	3.39	0.14
6	4500	26.4	3.27	0.12
7	5000	23.8	3.17	0.11
8	5500	21.6	3.07	0.10

根据表 1 数据,结合(4)式可绘出固化深度 C_d 与曝光量 $\ln E_o$ 的关系图,如图 3 所示。

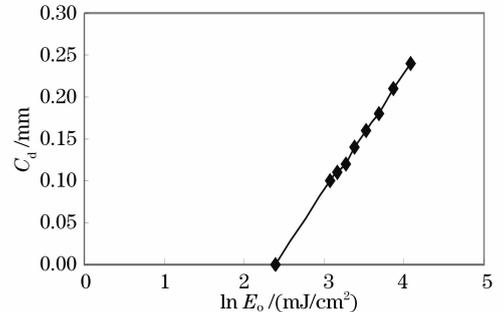


图 3 光敏树脂的曝光能量自然对数与固化深度的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between exposure energies natural logarithm and thickness of layers for the photosensitive resin

从图 3 可知, C_d 与 $\ln E_c$ 成线性关系即成直线关系, 直线的斜率为 D_p , 直线与横坐标轴的交点为 E_c , 从而可得到 $D_p = 0.14 \text{ mm}$, $E_c = 10.9 \text{ mJ/cm}^2$, 也就是说, 由 SL7510 型光敏树脂的特性参数临界曝光量和透射深度分别为 $E_c = 10.9 \text{ mJ/cm}^2$, $D_p = 0.14 \text{ mm}$ 。根据紫外激光固化快速成形设备运行制作零件时, 所设定的分层厚度 d 这个工艺参数必须小于光敏树脂透射深度 D_p 这个条件, 对于用 SL7510 型光敏树脂为原材料制作零件, HRPLA-I 型紫外激光固化快速成形设备运行时, 设定的分层厚度可为 0.10 mm , 而不能设为 0.20 mm 。

3.5 固化物的力学性能

用 SL7510 型光敏树脂为原材料, 根据 ASTM D638 标准^[23], 利用 HRPLA-I 型立体光刻快速成型设备, 参照所测定出来的临界曝光量和透射深度值, 设定设备的运行参数 $P_L = 95 \text{ mW}$, $h_s = 0.08 \text{ mm}$, $d = 0.10 \text{ mm}$, $V_s = 4000 \text{ mm/s}$, 光敏树脂工作温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 制作了 5 根测试样条。把这 5 根测试样条从 HRPLA-I 型立体光刻快速成型设备的液槽中取出后, 放入紫外烘箱中固化 90 min , 对此进行拉伸测试。所测试的力学性能数据如表 2 所示。测试温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 拉伸速度 20 mm/min 。

表 2 样品拉伸力学性能测试数据

Table 2 Data of testing tensile mechanical property for the specimens

No	Tensile strength /MPa	Tensile modulus /MPa	Elongation /%
1	42	2007	13.9
2	39	1973	13.3
3	45	2109	14.1
4	41	1994	13.7
5	37	1963	13.1

从表 2 可得, 在温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 所制样条的拉伸强度平均值为 40.8 MPa , 弹性模量平均值为 2009.2 MPa , 断裂伸长率平均值为 13.6% , 这说明 SL7510 型光敏树脂固化物在此温度具有较好的机械性能, 制作的零件将具有一定的强度。

3.6 固化物的热性能

玻璃化转变是高聚物的一种普遍现象。在高聚物发生玻璃化转变时, 许多物理性能都发生了急剧的变化, 特别是力学性能。在只有几度范围的转变温度区间前、后, 模量将改变 1 到 2 个数量级, 材料从坚硬的固体可能突然变成柔软的弹性体, 完全改变了材料的使用性能。光敏树脂固化物的玻璃化温度 (T_g) 也是光敏树脂的一个重要物性参数, 因此,

测定 SL7510 型光敏树脂固化物的玻璃化温度非常重要。利用 TMA7 型热机械性能分析仪, 采用针入型热机械分析法来测量 SL7510 型光敏树脂固化物的玻璃化温度, 其温度-形变曲线图如图 4 所示。

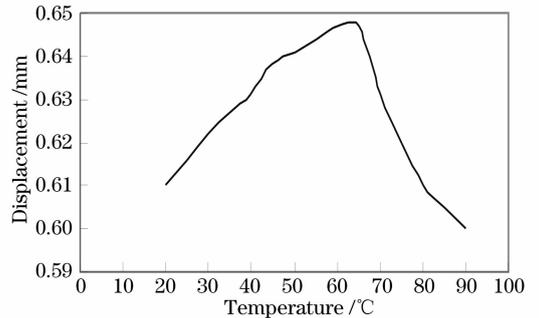


图 4 光敏树脂固化物的热机械性能分析曲线

Fig. 4 Thermomechanical analysis graph of the cured resin specimen

从图 4 可知, 这种 SL7510 型光敏树脂固化产物的玻璃化温度为 $62 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这说明这种光敏树脂固化产物在 $62 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下呈现玻璃态, 这种光敏树脂成形件在 $62 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下将具有一定的机械强度。

3.7 制作零件

以 SL7510 型光敏树脂为材料, 参考所测得的临界曝光量和透射深度这两个参数, 利用 HRPLA-I 型设备, 把工作条件设定为激光功率 $P_L = 90 \text{ mW}$, 扫描间距 $h_s = 0.07 \text{ mm}$, 激光扫描速度 $V_s = 4500 \text{ mm/s}$, 分层厚度 $d = 0.10 \text{ mm}$, 盛装光敏树脂的液槽温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 制作了电话机外壳零件, 见图 5。



图 5 电话机外壳

Fig. 5 Shell of telephone

图 5 所示的制作件, 它的尺寸与计算机 CAD 软件设计尺寸吻合, 且制作轮廓清晰。这说明所设定的 HRPLA-I 型设备制作零件的工艺参数, 特别是分层厚度 d 为 0.10 mm , 比较准确。

4 结 论

对紫外激光固化快速成形 SL7510 型光敏树脂进行了红外光谱表征, 表征结果说明 SL7510 型光

敏树脂既不是单纯环氧树脂型光敏树脂,也不是单纯的丙烯酸酯型光敏树脂,而是一种环氧树脂-丙烯酸酯混杂型光敏树脂。对 SL7510 型光敏树脂的固化物进行了力学性能和热性能测试,其拉伸强度、拉伸弹性模量、断裂伸长率和玻璃化温度分别为 40.8 MPa、2009.2 MPa、13.6% 和 62 °C,说明 SL7510 型光敏树脂的固化物具有较好的力学性能和热性能。对 SL7510 型光敏树脂进行了黏度测试,其结果表明该光敏树脂的黏度随着温度的升高而降低,是一种非牛顿流体。对 SL7510 型光敏树脂及其固化物进行了密度测试,计算得出该光敏树脂固化时的体积收缩率为 4.03%,这较低的体积收缩率说明用该光敏树脂制作零件,其制作件将具有一定的精度。对 SL7510 型光敏树脂的特性常数进行测试,透射深度 $D_p = 0.14$ mm,临界曝光量 $E_c = 10.9$ mJ/cm²。由此可知,在用 HRPL-I 型设备制作零件时,分层厚度的设置应为 0.10 mm,而不能为 0.20 mm,激光光斑达到 SL7510 型光敏树脂液面的能量不能小于 10.9 mJ/cm²。

参 考 文 献

- Jack G. Zhou, Daniel Herscovici, Calvin C. Chen. Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts[J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2000, **40**(2): 363~379
- D. T. Pham, R. S. Gault. A comparison of rapid prototyping technologies [J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 1998, **38**(10): 1257~1276
- Chen Xubing. Application of CAD models' direct slicing on rapid prototyping systems[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, **11**(10): 1098~1100
- 陈绪宾. CAD 模型的直接切片在快速成形系统中的应用[J]. *中国机械工程*, 2000, **11**(10): 1098~1100
- Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying *et al.*. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 29~32
- 石朝辉,樊仲维,张 瑛等. 高效率高功率全固态紫外激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 29~32
- Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 1014~1018
- 于 君,陈 静,谭 华等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 1014~1018
- Wu Jiang, Gao Bo, Tan Hua *et al.*. Titanium base of complete denture fabricated with laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1139~1142
- 吴 江,高 勃,谭 华等. 激光快速成形技术制造全口义齿钛基托[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1139~1142
- Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Temperature/stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1308~1312
- 贾文鹏,林 鑫,陈 静等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1308~1312
- Han Yanfeng, Gao Bo, Hu Jiang *et al.*. Titanium coping fabricated with laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 876~880
- 韩彦峰,高 勃,胡 江等. 激光快速成形技术制作纯钛基底冠[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 876~880
- Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 721~729
- 彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 721~729
- Li Jing. Control and application of photosensitivity rapid prototyping[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2002, **35**(4): 37~38
- 李 静. 光固化快速成形的控制原理及应用[J]. *现代塑料加工及应用*, 2002, **35**(4): 37~38
- Zhao Wanhua, Li Dichen, Lu Bingheng. Investigation of the part deformation in stereolithography [J]. *J. Xi'an Jiaotong University*, 2001, **35**(7): 705~708
- 赵万华,李涤尘,卢秉恒. 光固化快速成形中零件变形机理的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2001, **35**(7): 705~708
- Wang Qinggang, Yan Yongnian, Guo Ge *et al.*. Study on stereolithography technology [J]. *New Technology & New Process*, 2004, **5**: 42~44
- 王青岗,颜永年,郭 戈等. 立体光刻(SL)工艺研究[J]. *新技术新工艺*, 2004, **5**: 42~44
- J. L. Song, Y. T. Li, Q. L. Deng *et al.*. Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2007, **188**(6): 614~618
- P. Rochus, J. Y. Plessier, M. van Elsen *et al.*. New applications of rapid prototyping and rapid manufacturing (RP/RM) technologies for space instrumentation [J]. *Acta Astronautica*, 2007, **61**(2): 352~359
- Wang Yungan, Lin Guocai, Chen Guoqing. Rapid forming technology and rapid forming system with laminated paper[J]. *Metal Forming Machinery*, 1996, **21**(3): 36~37
- 王运赣,林国才,陈国清. 快速成形技术与分层叠纸快速成形系统[J]. *锻压机械*, 1996, **21**(3): 36~37
- Meng Huaidong, Yin Jinxiang, Hong Xiaoyin. Photopolymerization materials used in stereolithography and their recent advance[J]. *J. Functional Materials*, 1997, **28**(3): 247~252
- 孟怀东,阴金香,洪啸吟. 用于立体光刻的光聚合材料及其发展[J]. *功能材料*, 1997, **28**(3): 247~252
- Peng Zhengzhi, Lin Xiaodong. Study on relative internal stress and shrinkage of cured volume for UV-curing coatings[J]. *J. Beijing University of Chemical Technology*, 1995, **22**(4): 22~25
- 庞正智,林晓东. 光固化涂层相对内应力与体积收缩率的研究[J]. *北京化工大学学报*, 1995, **22**(4): 22~25
- Duan Yugang, Wang Xuerang, Wang Suqin *et al.*. Research on a low curl photocurable resin for stereolithography[J]. *J. Xi'an Jiaotong University*, 2001, **35**(11): 1155~1174
- 段玉岗,王学让,王素琴等. 一种用于激光固化快速成形的低翘曲光敏树脂的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2001, **35**(11): 1155~1174
- Duan Yugang, Wang Suqin, Chen Hao *et al.*. Study on the effect of photocuring resin shrinkage on parts curl distortion in the process of laser rapid prototyping[J]. *Chemical Engineering*, 2000, **28**(6): 54~57
- 段玉岗,王素琴,陈 浩等. 激光快速成形中影响光固化材料收缩变形的研究[J]. *化学工程*, 2000, **28**(6): 54~57
- Zhai Huanping, Hou Liya, Jia Hongbing. Photocurable resins used for rapid prototyping[J]. *Chemical World*, 2002, **8**: 437~440
- 翟缓平,侯丽雅,贾红兵. 快速成形工艺所用光敏树脂[J]. *化学世界*, 2002, **8**: 437~440
- Zou Jianfeng. Research on Stereolithography Process and Part Accuracy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. 9~15
- 邹建锋. 光固化成形工艺及制件精度的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004. 9~15
- Zhao Yi. Experiment study of the photocurable resin for stereolithography [J]. *Polymeric Materials Science & Engineering*, 2004, **20**(1): 184~186
- 赵 毅. 激光快速成形中光敏树脂特性的实验研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 2004, **20**(1): 184~186
- American National Standards Institute. ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics[S]. New York: American Standard Press, 1997