

光固化中的纤维——树脂复合材料机械性能研究

杨继全¹, 侯丽雅²

(1. 南京师范大学控制科学与工程系, 210042 南京)

(2. 南京理工大学机械学院, 210094 南京)

[摘要] 对于快速成型中的光固化制作工艺, 在光敏树脂中加入短纤维而制得的零件的机械性能可得到改善. 制备了纤维——树脂悬浮液, 探讨了纤维的添加对悬浮液粘度的影响, 研究了纤维的分布方位及长度对复合材料固化物的弹性模量的影响. 依据复合材料相关理论预测了固化层片及固化零件的机械性能, 如弹性模量、强度. 实验发现复合材料制作的样件的弹性模量和拉伸强度明显高于纯树脂固化样件, 且其后固化过程中的收缩量也比后者小. 实验结果为光固化系统的制造提供最优的操作参数.

[关键词] 光固化, 复合材料, 机械性能, 玻璃纤维, 光敏树脂

[中图分类号] TQ323.5, [文献标识码] B, [文章编号] 1672-1292-(2003)01-0026-04

0 引言

固化的零件发生体积收缩和机械性能较差是光固化(Stereo Lithography: SL)工艺中使用光敏树脂材料制作原型而遇到的主要问题, 且这种不精确度在后续的手工处理及二次固化的强紫外光照射下会进一步被扩大. 这些弱点限制了原型的使用范围, 因此, 也妨碍了功能型或半功能型的快速原型(Rapid Prototyping: RP)概念模型机的推广.

在过去几年里, 为了获得更高的强度和精度, 已开展了许多改善工艺和光敏树脂的研究^[1,2]. 直接金属烧结技术或通过金属渗透工艺制作功能或半功能复合金属零件也是快速原型研究的重点之一^[3]. 另外, 有些工作为了提高光固化零件的强度, 也进行了把连续的纤维渗透入制作零件的研究^[4]. 也有对适中长度的光纤(10~15 mm)及直径为55 μm 的微玻璃球组成的树脂混合物的性能进行的研究. 有些文献采用LOM法以预浸料为原料制造聚合物基复合材料, 但由于原材料消耗较大, 仅限于某些玻璃纤维复合材料零件的制造. 文献[5]对短纤维——树脂复合材料进行了研究.

1 纤维——树脂复合材料

1.1 研究纤维——树脂复合材料的意义及其主要内容

上述那些使用适中长度, 或者连续纤维作为填充物的方法对制造几何形状简单的零件是较适合的, 但对具有小尺寸特征、薄壁件或复杂形状零件的制造却相当困难; 而目前文献涉及到的在树脂中加入短纤维的方法仅限于实验, 没有充分利用复合材料理论来预测光固化零件的力学性能, 不具备普遍性.

基于此提出了在开发的光敏树脂中引入非连续的短纤维, 以增加树脂原型件的性能, 同时复杂几何形状的实体也能用这种复合材料制作. 在进行基本实验的基础上, 利用复合材料理论预测了复合材料固化物的机械性能, 其性能由以下因素决定: 混合物中纤维所占的比例、纤维的长径比、纤维的分布方位、光敏树脂和纤维各自的机械性能及其界面结合强度等. 本研究只对其中部分因素进行了探讨.

收稿日期: 2003-02-15.

基金项目: 国家“863”计划项目(863-511-943-016); 南京师范大学引进人才基金(2002KZXGQ2B25)资助.

作者简介: 杨继全, 1973-, 工学博士, 南京师范大学控制科学与工程系讲师, 主要研究方向为快速成型技术、微机电系统.

1.2 复合材料的制备

取3种具有代表性的光敏树脂(均属环氧丙烯酸酯系列),分别为无颜色1号树脂、淡黄色2号树脂、红色3号树脂,在其中分别加入长0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm,直径为10 μm 的短纤维.对每种短纤维,又分别按其所占体积比5%、10%、15%、20%,制备相应的纤维——树脂复合材料.

对以上制备的材料进行初步筛选,选择性能较好的几种.多个实验证实,纤维的长径比为100左右,其增强效果更好,因此纤维长度取1.0 mm;2号树脂性能较为稳定,且反应速度快,选择2号树脂为复合材料的基体材料.在理论上虽然使用更高纤维含量的树脂可以增强样件特性,但树脂粘度的增加却影响液面的流平及固化层的成型,不利于样件的制作,因此,选择5%、15%的体积含量.参与最终实验的为纤维体积含量为5%及15%、纤维长度均为1.0 mm、基体同为2号树脂的纤维——树脂复合材料.

1.3 复合材料粘度

纤维——树脂的粘度比纯光敏树脂的粘度要大,而粘度的变化对原型的加工、后处理、固化层片成型及树脂的排放等都会造成影响.

纤维——树脂的粘度与光纤长径比、表面涂层和光纤含量有关^[5].实验表明,粘度是随纤维含量和其长径比的增加而明显增加的.粘度分析的实验结果将为基于掺入任何材料的聚合物的成型提供基本的依据.特别是实验结果将有助于为快速成型系统的制造提供最优的操作参数.

为避免在固化过程中,短玻璃纤维不断沉积,需采取两个步骤:

(1) 排除悬浮液中的空气,目的是保证纤维与树脂的完全贴合.为此,可使用真空室.

(2) 每隔几层由手工铺撒玻璃纤维.

固化前的纤维——树脂的纤维沉积和成型是最受液体流变性能影响的两个过程.纤维——树脂是一种悬浮液.根据悬浮液的浓度可分为:稀释型、半浓缩型、浓缩型.纤维悬浮液的浓度 n 由分散相的密集度描述,其单位为 $/\text{mm}^3$:

$$n = 4\phi \pi L d^2 \quad (1)$$

L 、 d 、 ϕ 分别是光纤的长度、直径及其含量.

纤维悬浮液当 $n < 1/L^3$ 时为稀释型, $1/L^3 < n < 1/dL^2$ 时为半浓缩型, $n > 1/dL^2$ 为浓缩型.

当悬浮的物质是纤维时,其流变性能比起悬浮物为低长径比的悬浮液的流变特性更难以描述.主要原因是纤维——树脂的流变特性不仅受其它因素的影响,也受纤维在悬浮液中的分布方位的影响.所谓分布方位,是指液体中的纤维的长轴方向与液体表面法线方向之间的夹角.

悬浮物间复杂的相互作用使得对悬浮液进行理论上的预测极端地困难.由于前面提到的纤维方位的影响,稀释型的悬浮液因其悬浮颗粒分布的自由状态而同半浓缩型及浓缩型的悬浮液应分开处理.

采用长1.0 mm、直径10 μm 的短纤维,由公式(1)可知,任何悬浮液的纤维含量应超过0.8%.在实验中,为使混合物的性能有明显改善,纤维——树脂中光纤体积含量至少为5%.

1.4 复合材料实验

文献[5]中测试材料的性能所用的方法均为模型注塑法,而不是激光扫描法,该法存在以下缺陷:

(1) 模型注塑法制造出的样件质地均匀,是各向同性的,但是光固化制作的零件由于采用的是逐层单向扫描方式,因而固化的层片是各向异性的;

(2) 光固化零件的层间结合强度较模型注塑法制作的小很多;

(3) 因纤维长度大于层厚(一般为0.10~0.20 mm),其在单片固化层中的方位分布不可能呈现较大的夹角,其分布就远不如模型注塑法均匀.

因此,采用上述文献制作的零件,其测试性能与光固化工艺实际制作的零件不具备较好的可比性.故利用开发的快速成型系统实际制作了纤维——树脂复合材料的相关实验.

实验所用的光固化系统主要组成部分有:普通紫外灯为光源的紫外辐射装置、X-Y平面导轨变芯

径光纤传输系统、带基板的Z轴工作台等。

按照给定的 ASTM 标准测试方法 D638(塑料的拉伸特性)制作标准尺寸 $63 \times 10 \times 63$ (mm) 的样件及多个其它样件。

在实验制作复合材料零件的同时可研究 SL 的各种工艺参数对复合材料零件的影响。为实现复合零件的顺利加工,对 RP 系统进行了一些改进。为使所用材料减少到最小,及更换试验材料(即不同的添加物和添加物浓度)较易操作,设计了小的仅容纳试验样件的树脂槽;为适合小树脂槽,对加工平台进行了调整;为使树脂槽中的混合物在光固化期间混合均匀,且液体中不能有气泡,调整了加工参数。

制作样件时,使用了不同的光功率(30、40、50和60,该种数字表示光的能量级,数字越大,能量越高)和层厚(0.10 mm、0.15 mm、0.20 mm)。扫描速度为 8 mm/s,使用正交分区扫描方式,即相邻两层的扫描方向是相互垂直的,且每层划分多个区分别加工。

2 复合材料机械性能预测及实验结果分析

短纤维在平面内杂乱地分布,在面内可看成是各向同性的,垂直于平面方向是准横向各向同性的,因此,可用各向同性力学对短纤维——树脂复合材料进行力学特性的宏观分析。

2.1 纤维的分布方位及长度对复合材料固化物弹性模量的影响

纤维在树脂中的分布如图1所示。

图中 θ 为纤维的分布方位角; s 为纤维在短轴方向上的尺寸; l 为纤维在长轴方向上的尺寸;有如下关系:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{s}{l} \quad (2)$$

实验表明,纤维的分布方位角位于 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间的约为 80%。纤维的分布方位对固化物弹性模量的影响因子 η_0 可由(3)式确定^[6]:

$$\eta_0 = \sum S_f \cos^4 \theta \quad (3)$$

S_f 为纤维在每个 θ 方向上分布的百分数。

纤维的长度对固化物弹性模量的影响因子 η_l 可由(4)式确定:

$$\eta_l = 1 - \frac{\lg(na)}{na} \quad (4)$$

其中,

$$n = \sqrt{\frac{2G_m}{E_f \ln \left(\frac{2R}{d} \right)}} \quad (5)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

$$\frac{2R}{d} = \sqrt{\frac{\pi}{4\phi}} \quad (7)$$

$$a = l/d \quad (8)$$

式中: G_m 、 E_m 是树脂基体的剪切模量和弹性模量; l 、 d 是纤维的长度和直径; ν 则是树脂的泊松比; E_f 是纤维的弹性模数; R 是纤维基团之间的平均距离; ϕ 是纤维占复合材料的体积百分比。

2.2 预测纤维——树脂单片固化层的弹性模量

预测纤维——树脂固化物的弹性模量可采用经验公式:

$$E_c = \frac{3}{8} E_1 + \frac{5}{8} E_2 \quad (9)$$

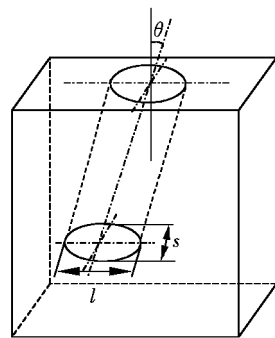


图1 纤维在树脂中的分布方位图

E_1 、 E_2 分别为单向纤维固化层的纵向弹性模量和横向弹性模量. 单向纤维固化层的纵向弹性模量 $E_1 = V_f E_{f1}(1 - p/2) + V_m E_m$, 式中: p 为 l_c/l (l_c 为纤维的临界长度, l 为实际使用的纤维长度); V_f 、 V_m 分别为纤维、树脂的体积含量; E_{f1} 为纤维的纵向弹性模量; E_m 为树脂的弹性模量.

利用公式 $1/E_2 = V_f/E_{f2} + V_m/E_m$ 求单向纤维固化层的横向弹性模量 E_2 , 式中 E_{f2} 为纤维的横向弹性模量.

2.3 预测复合材料强度

对于面内各向同性的短纤维——树脂固化物的拉伸强度可由公式(10)简单预测.

$$\sigma_b^0 = 0.3x_t \quad (10)$$

x_t 为纤维含量相同的单向纤维——树脂固化物的纵向拉伸强度. 短纤维——树脂固化物的压缩强度则约等于单向纤维——树脂固化物的压缩强度的一半.

2.4 实验结果分析

为改善原型的机械及物理性能,进行了相关实验,其结果如下:

(1) 树脂中引入短玻璃纤维使得原型的机械性能得以改善.

实验发现制作的原型的机械强度与纤维含量有关,通过增加纤维含量可使零件获得更高的机械强度.

(2) 纤维——树脂固化物的机械强度与光功率和层厚有关.

实验发现经后固化处理的复合材料固化物的机械特性与层厚及曝光量有关.通过增加光量级,减少层厚,二次固化的固化物的机械特性被改善,因而有助于获得终端产品所需的更高机械强度和更好的尺寸精度.

(3) 如果使用更高的光功率和较低的层厚,原型在成型加工和后固化期间里的零件收缩可因短玻璃纤维的添加而降低.

3 结论

在制备符合实验条件的复合材料的基础上,研究了纤维对复合材料粘度的影响,及光敏树脂中纤维的定向和长度对固化物的弹性模量的影响;对固化物的性能进行了理论预测;实验表明短玻璃纤维的加入增强了丙烯酸光敏树脂制作的零件的机械性能.

[参考文献]

- [1] W L Yao, Ming C Leu. Analysis of shell cracking in investment casting with laser stereolithography patterns[J]. Rapid Prototyping Journal, 1999, 5(1): 12~ 20.
- [2] J S Ullett, J W Schultz, R P Chartoff. Novel liquid crystal resins for stereolithography processing parameters and mechanical analysis[J]. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6(1): 8~ 17.
- [3] A Greco, A Licciulli, A Maffezzol. Stereolithography of ceramic suspensions[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36: 99~ 105.
- [4] Charan R, Renault T, Ogale A A, et al. Automated fibre-reinforced composite prototypes[A]. Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping, 1994. 91~ 97.
- [5] G Zak, M Haberer, C B Park, et al. Mechanical properties of short-fiber layered composites: prediction and experiment[J]. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6(2): 107~ 118.
- [6] C M Cheah, J Y H Fuh, A Y C Nee, et al. Mechanical characteristics of fiber-filled photo-polymer used in stereolithography[J]. Rapid Prototyping Journal, 1999, 5(3): 112~ 119.

(下转第 37 页)

3 结论

按上述原理和结构研制的简码单道绝对式编码器已用于上海宝钢铸坯长度测试仪上,并在 90 °高温、振动下长期正常工作. 该编码器还在其他恶劣环境下(如舰艇)使用,性能稳定,寿命长.

[参考文献]

- [1] 郁有文, 常健. 传感器原理及工程应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [2] 刘丰文. 25 位绝对式编码器[J]. 光电工程, 2000, 27(6): 66~ 68.
- [3] 董莉莉. 光电编码器的发展动态[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 198~ 202.

Single Channel Absolute Photoelectric Shaft Encoder

Yu Youwen

(Department of Control Science and Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: This paper puts forward a new kind of single channel absolute photoelectric shaft encoder. The design for the code salver of the encoder uses new encoding technology, which makes it easy to produce and figure simpler. The research on single channel absolute encoder will have great effect on the application of single channel absolute photoelectric shaft encoder.

Key words: absolute encoder, encoding technology, photoelectric detector

[责任编辑: 刘健]

(上接第 29 页)

Mechanical Characteristics of Fiber-filled Resin Used in Stereolithography

Yang Jiquan¹, Hbu Liya²

(1. Department of Control Science and Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

(2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, 210094, Nanjing, PRC)

Abstract: Fiber-filled resin can improve the mechanical characteristics of the parts manufactured by adopting stereolithography process. The effects of short fiber filled into resin have been researched. The effects of fiber distributing orientation and its length on elastic modulus of solidified resin are discussed. The experimentss show that the elastic modulus of fiber-filled solidified resin is much higher than pure solidified resin, and the shrinkage of the former is less than the latter. The experiment results have been applied to stereolithography apparatus.

Key words: stereolithography, fiber-filled resin, mechanical characteristics, glass fiber, photo-polymer

[责任编辑: 刘健]