

分层实体制造中层间应力和翘曲变形的研究*

闫旭日 颜永年 张人佶 郭永红
(清华大学机械工程系 北京 100084)

摘要: 分层实体制造(LOM)是一种典型的快速成形(RP)技术, 该文对分层实体制造中的层间应力和翘曲变形进行了深入研究。建立了一种 LOM 工艺的简化模型, 通过对模型的分析, 给出了零件层间正应力和切应力的计算公式。通过试验现象, 对翘曲变形的两种主要形式进行了说明。首次建立了翘曲变形过程描述模型, 深入分析了翘曲变形的机理, 认为内应力产生的等效弯矩是使零件翘曲变形的原因。最后从材料和成形工艺两个方面对减小内应力和翘曲变形的措施进行了论述。

关键词: 快速成形 分层实体制造 层间应力 翘曲变形

中图分类号: TH16

0 前言

分层实体制造(LOM)工艺是较早出现的一种快速成形(RP)技术。LOM 工艺具有成形厚壁零件的速度较快、易于制造大型零件、制造精度较高和无需支撑结构等优点。虽然只有 10 多年的发展历史, 已显示出广阔的应用前景^[1]。

由体积收缩产生的内应力称为收缩应力, 在 LOM 工艺中收缩应力不但影响成形零件的尺寸精度, 还会引起结构整体变形、翘曲或在零件内部引起分层, 甚至会损坏成形工件与工作台相连的支撑, 使成形过程无法进行下去。在其他快速成形工艺中, 也存在着类似的情况, 如光固化(SL)工艺中光引发聚合作用发生固化时的体积收缩会导致这种结果; 选择激光烧结(SLS)和熔融沉积制造(FDM)等工艺伴随有成形材料在热态和冷态转变或材料相变过程中引起的收缩。

翘曲变形是所有 RP 工艺处理连续多层试件中出现的现象。当给已成形层再附加一层时, 如果该层在成形过程中产生收缩, 成形件将产生翘曲^[2]。这主要是成形材料在该过程中必然产生的层间应力所致, 材料在成形过程中产生的层间收缩应力是零件翘曲变形的根本原因^[3]。

在 RP 技术中, 普遍存在着成形件翘曲变形的现象, 翘曲变形是影响零件质量的主要原因, 减少翘曲变形以提高制件的尺寸精度和成形性能是 RP 技术研究发展的重要课题。因此, 研究 LOM 工艺中的层间应力和翘曲变形不仅对 LOM 技术有重要

的意义, 而且对其他 RP 工艺也有重要的影响。

1 LOM 工艺中层间应力的分析

在 LOM 工艺中, 一般采用树脂热熔胶对箔片材料进行粘接, 其主要成分是低密度聚乙烯和醋酸乙烯(EVA)等。聚乙烯和 EVA 都是热塑性的材料, 热熔胶的固化伴随着严重的体积收缩。

收缩应力的大小主要是受失去流动性之后进一步固化所产生的那部分体积收缩的影响, 因为处于自由流动的状态下内应力可以释放出来, 凝胶化之后分子运动受到了阻碍, 特别是在玻璃化之后分子运动就更困难了, 所以凝胶化之后进一步的固化反应是造成收缩应力的主要原因^[3]。

LOM 工艺中, 树脂层下面的粘接对象为零件的已成形部分, 上表面为当前层的箔材。通过加热、加压及冷却固化过程, 树脂将上下两部分粘接在一起。

如果将成形件简化为有对称中心的圆形件, 则可表达为图 1 所示的模型。

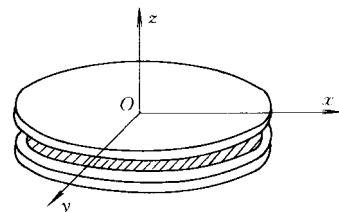


图 1 LOM 工艺的简化模型

Gent 对如图 1 形式的胶接结构的内应力分布进行了研究^[4], 其基本假设: ①树脂为理想弹性体。②树脂层在厚度方向可以自由收缩, 但在两个胶接面上尺寸受到限制。

LOM 工艺满足此假设的条件, 因此可以利用 Gent 的结论来分析图 1 模型的内应力。

* 国家 863/CIMS 目标产品重大项目(863-511-920-009)。20010620 收到初稿, 20020715 收到修改稿

ent 的结论来分析图 1 模型的内应力。

根据 Gent 的结论，在图 1 所示模型中胶层收缩的内应力分布复杂，有垂直胶面的正应力 σ_x 与平行于胶面的切应力 τ_x 。

设胶层半径为 r ，厚度为 δ ，如果没有任何限制，体积自由收缩，则收缩后半径为 r_0 ，厚度为 δ_0 。令收缩率 $e_0 = (\delta / \delta_0) - 1$ ，那么离开圆心距离为 x 圆周上的正应力

$$\sigma_x = 2Ee_0 \frac{0.5 - (x/r_0)^2}{0.5 + (\delta_0/r_0)^2} \tag{1}$$

式中 E ——树脂的弹性模量

除正应力外还有切应力

$$\tau_x = 2Ee_0 \frac{x/\delta_0}{1 + 0.5(r_0/\delta_0)^2} \tag{2}$$

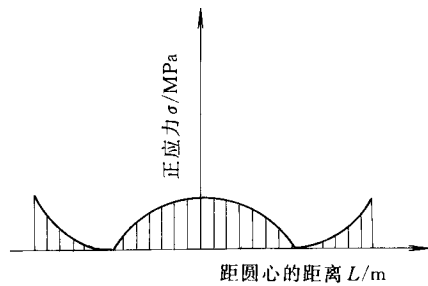
根据 LOM 工艺的条件和具体情况，对式(1)、(2)进行相应的修正和简化。在 LOM 工艺中，箔材的厚度一般为 0.1~0.3 mm，树脂层的厚度就更小了，且 $r \gg \delta$ ，对于这样的薄胶层，可以假设 $\delta \approx \delta_0$ ， $r \approx r_0$ ，则公式(1)、(2)可化为

$$\sigma_x = 2Ee_0 \frac{0.5 - (x/r)^2}{0.5 + (\delta/r)^2} \tag{3}$$

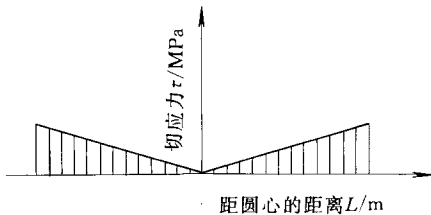
$$\tau_x = 2Ee_0 \frac{x/\delta}{1 + 0.5(r/\delta)^2} \tag{4}$$

从式(3)中不难看出：当 $x = r/\sqrt{2}$ 时， $\sigma_x = 0$ ，即没有内正应力。

在 $x=0$ 的圆心或 $x=r$ 的成形件边缘处，有最大的内应力 σ_{max} ，它们等值反向，分别是拉伸应力和压缩应力，图 2a 所示为层间正应力的分布图，图 2b 为切应力的分布图。



(a) 正应力分布图



(b) 切应力分布图

图 2 内应力分布图

由于 $\delta \ll r$ ，则有

$$\sigma_{max} = \pm 2Ee_0 \tag{5}$$

在 $x = r$ 的胶接边缘切应力有极大值，即

$$\tau_{max} = 2Ee_0 \frac{1}{\frac{\delta}{r} + \frac{r}{2\delta}} = 2Ee_0 \frac{r^2 + 2\delta^2}{2r\delta}$$

因为 $\delta \ll r$ ，所以

$$\tau_{max} \approx 2Ee_0 \frac{r^2}{2r\delta} = \frac{Ee_0 r}{\delta} \tag{6}$$

通过对图 1 模型的分析可知，树脂固化后，由于固化体积收缩而产生的层间应力既具有正应力又具有切应力。其中正应力的大小与树脂的弹性模量、收缩率成正比，与到中心的距离成二次函数的关系，最大正应力由弹性模量和收缩率决定；切应力与树脂的弹性模量、收缩率及到中心的距离成正比，最大切应力发生在距中心最远的边缘处，与胶层厚度成反比。

由上面的分析可知，LOM 工艺中零件内应力的大小主要与树脂的性质和成形零件的尺寸有关，降低树脂的弹性模量、收缩率，减小成形件的尺寸，或适当增加树脂层的厚度都有利于减小内应力和变形。减小层间正应力有利于提高粘接质量和粘接强度，减小切应力可以有效地减小翘曲变形。

2 翘曲变形的主要形式

在 LOM 工艺，翘曲变形是最严重的一种变形，因为如果在零件成形过程中发生翘曲，一般成形过程就无法再进行下去，更谈不上成形的精度了。翘曲有两种主要表现形式，一种如图 3 所示，内应力破坏了零件内部的结合面，零件从此层处裂开，裂缝上面部分发生翘曲；另一种如图 4 所示，此图中的零件为一 1.5 m 长细长零件，极易在长边方向发生翘曲。成形过程中在内应力的作用下，零件与底板(工作台)之间的约束被破坏，零件发生翘曲，左右两端脱离底板。成形过程中发生的翘曲，破坏一般从零件的端部开始，裂缝不断向内扩展，变形逐渐变大，且端部、边缘处的变形最大。

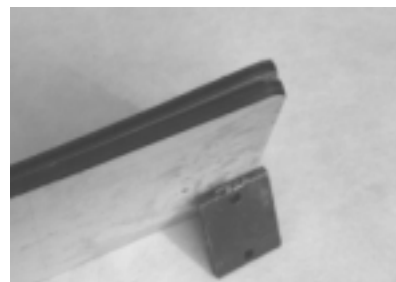


图 3 中间开裂的翘曲现象

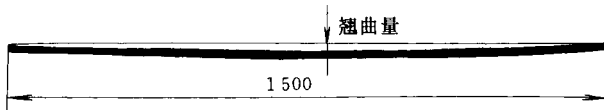


图4 翘曲变形的零件

3 翘曲变形与材料收缩的关系

RP 技术基于材料离散/堆积的成形原理, 新的一层在成形能量的驱动下与已成形的基体作用, 完成零件的不断“生长”, 因此材料成形过程中存在着动态的物理、化学变化, 零件内部的应力、应变也在不断地变化。虽然人们很早就注意到材料收缩愈严重, 其翘曲趋势愈大, 但如何定量描述翘曲以及它与材料收缩间的关系是相当复杂的问题。目前在 RP 技术中, 主要是对双层悬臂梁模型的翘曲量进行推导计算^[5], 通过对这一简化模型的计算来分析成形过程中翘曲变化的变化规律和影响因数等。

模型选取一双层悬臂梁作为简化模型进行研究, 假设当上层发生收缩时, 导致整体向上翘曲形成半径为 R 的圆弧。

模型定义层片厚度为 δ_1 , 材料的线性收缩率为 e_1 , 悬臂长为 L , 翘曲量 f , 则有

$$f = \frac{1}{2} \frac{e_1 L^2}{\delta_1} \quad (7)$$

从该模型得出的结论是, 在悬臂长度远小于翘曲半径时, 悬臂结构的变形量正比于悬臂长度的平方和线性收缩率, 反比于层厚。

可以看出, 从该模型得出的结论与第 1 节中通过内应力计算得出的结论基本一致, 即降低树脂的收缩率、减小成形件的尺寸, 或适当增加树脂层的厚度都有利于减小零件的变形量。

4 翘曲变形过程描述模型的建立

通过前面的讨论可以得知在 LOM 工艺中, 翘曲变形主要是由材料在成形过程中产生的体积收缩引起, 层间收缩应力是零件翘曲变形的根本原因, 并且推导出树脂固化收缩时产生的正应力、切应力的计算公式。但内应力是如何作用于零件, 并使之产生翘曲变形的? 针对这一问题, 建立了如下的翘曲变形描述模型。

在图 5 所示的模型中, 设层厚为 δ , 第一层粘接在底板(工作台)上, 如图 5a 所示; 第二层与第一层粘接, 依此类推。

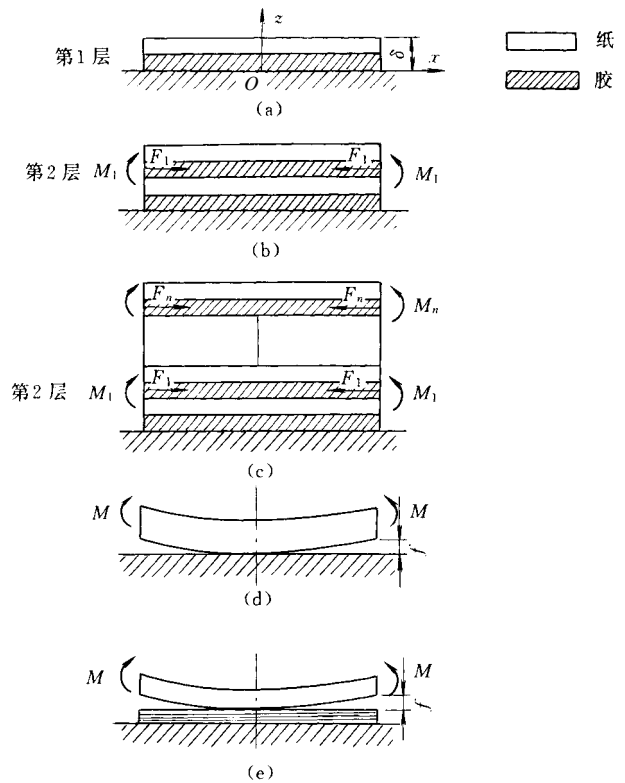


图5 翘曲变形的描述模型

δ ——层厚

M_i ——第 i 层收缩力产生的力矩

F_i ——第 i 层收缩产生的等效力

f ——翘曲量

假设: ①当第 i 层完全固化后开始粘接第 $i+1$ 层, 各层厚度均相等。②第 $i+1$ 层进行粘接过程时不对 i 层产生影响。③层间内应力不受纸变形的影响。④在考察过程中不会产生应力松弛现象。

如图 5b 所示, 当第二层与第一层粘接后, 由于第二层胶层的固化收缩而产生层间应力, 正应力和切应力可由式(3)、(4)进行估算。

正应力作用在垂直于 $x-y$ 平面的方向上, 在 Oxz 面内作用的力和应力产生的弯矩都是平衡的, 不是产生翘曲变形的直接原因, 主要是影响胶层的粘接性能, 破坏胶层以及胶层与纸的结合面。切应力作用在树脂层所在的 $x-y$ 平面内, 如图 5b 所示, 两端各自朝向中心的收缩切应力可等效出一对力 F_1 , 它们对底板的结合面产生了一对弯曲力矩 M_1 , 其大小等于收缩力 F_1 乘以层厚 δ , 即 $M_1 = F_1 \delta$ 。本文认为弯矩 M 是翘曲变形的直接原因。其中

$$F_i = \iint_A \tau_{xi} dA \quad (8)$$

$$M_i = F_i (i\delta) = (i\delta) \iint_A \tau_{xi} dA \quad (9)$$

$$M = \sum_{i=1}^n M_i = \delta \iint_A \tau_{xi} dA \sum_{i=1}^n i \quad (10)$$

式中 A ——粘接面的面积

当零件成形到第 $n+1$ 层时, 已成形零件对固定底板产生的弯矩 M 可由式(10)得出, 这时,

$$M = \sum_{i=1}^n M_i$$

的弯矩作用在零件与底板的连接面上,

如图 5c 所示, 由于在零件的边缘处有较大的正应力、切应力, 且应力集中非常严重, 当弯矩 M 超过底板对零件的约束作用时, 就首先在零件边缘处产生劈离, 进而发生翘曲变形, 如图 5d 所示。如果零件的某一层粘接情况较差, 对其上方部分的约束强度低于底板对零件的约束力, 则可能首先在此层发生劈离和翘曲变形, 如图 5e 所示现象。

图 5 所示的翘曲变形描述模型很好地描述了 LOM 工艺中成形零件发生在零件长边两端的开裂、劈离到翘曲变形这一过程, 与试验结果(如图 3、4 所示)非常吻合。

5 减小内应力和翘曲变形的措施

通过上文的分析, 可知树脂在固化时因体积收缩产生的收缩应力是翘曲变形的主要原因, 且切应力对翘曲变形起主导作用, 因此在 LOM 工艺中减小翘曲变形可以从如下两个方面入手。

5.1 材料方面

从式(3)~(6)可以看出, 无论正应力还是切应力, 都与树脂固化后的弹性模量和收缩率成正比, 因此改善树脂的性能非常重要。主要有如下一些措施^[4]。

(1) 降低反应体系中官能团的浓度。因为总的体积收缩率正比于体系中参加反应的官能团的浓度, 通过共聚或者提高预聚体的分子量等方法来降低反应体系中官能团的浓度, 是降低收缩应力的有效措施。

(2) 加入不与树脂发生反应的填料。填料一般为无机物, 由于填料不参与化学反应, 加入填料能使固化收缩按比例降低, 还能降低热膨胀系数。

(3) 加入高分子聚合物。要求分子聚合物能溶于树脂的预聚体中, 在固化过程中由于溶解度参数的改变能使高分子聚合物析出。相分离时所发生的体积膨胀可以抵消掉一部分体积收缩。

5.2 成形工艺方面

(1) 从式(3)、(4)、(6)和(7)可以看出, 成形零件的尺寸是一个很重要的影响因素, 尺寸越大, 无论是零件内的正应力、切应力, 还是翘曲量就会越大。因此为减小翘曲变形, 应尽量不做大尺寸的零件。如将一个尺寸大的零件分成多个小零件成形,

然后将它们按相对位置粘接后完成大零件的制作。

(2) 在 LOM 工艺中, 除切割零件轮廓外还需切割正交的网格, 选择合理的网格划分方式和切割顺序, 将零件大的单一尺寸进行分割, 可有效减小变形; 适当增加层厚也可减小变形。

(3) 从式(3)~(6)可以得出, 树脂的内应力与弹性模量成正比, 因此降低树脂固化后的弹性模量可以有效降低零件的内应力和翘曲量。

对于大多数非晶态高聚物来说, 它们在低温时处于玻璃态, 弹性模量很高。当温度升高到一定值时, 弹性模量急剧下降直到进入高弹态, 弹性模量对温度的变化非常敏感。因此, 提高成形零件内部和周边环境温度, 降低树脂的粘性, 可以有效减小内应力和翘曲变形, 即控制零件的整体温度是防止零件翘曲的有效方法^[6]。

利用三维非线性有限元分析软件 MARK, 分析工艺参数对 LOM 原形件变形的影响^[7], 在模拟分析试验中, 随着给定的环境变量成形室环境温度 t 的提高, 成形件内部的温度也随之提高, 内应力逐渐降低, 这一研究也得出了同一结论, 证明了提高零件内部温度对抑制零件翘曲变形的作用。

利用上文所述结论, 在清华大学激光快速成形中心的 SSM-1600 上对成形效果和成形质量进行了多次试验对比。图 6 所示为新工艺下完成的 $1300\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 汽车保险杠原型, 可以看出, 零件粘结良好, 表面平整, 虽然是一细长形零件, 但没有发生开裂和翘曲变形。

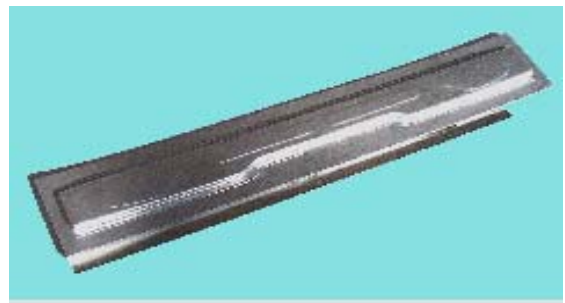


图 6 1300 mm 汽车保险杠原形

6 结论

文中研究了分层实体制造工艺中产生层间应力和翘曲变形的机理。通过建立 LOM 工艺的简化模型和对这一模型的分析, 首次给出了零件层间正应力和切应力的计算公式, 并得出 LOM 工艺中零件内应力的大小主要与树脂的性质和成形零件的尺寸有关, 降低树脂的弹性模量、收缩率, 减小成形件

的尺寸和适当增加树脂层的厚度都有利于减小内应力和变形。通过双层悬臂梁模型所得出的翘曲变形量与材料收缩的关系,进一步验证了文中的观点。

首次建立了翘曲变形过程描述模型,此模型很好地解释了成形中两种主要的翘曲变形形式。从这一模型可以得出内应力产生的等效弯矩是使零件翘曲变形的原因。最后从材料和成形工艺两个方面给出了若干减小内应力和翘曲变形的措施。

参 考 文 献

- 1 Merlin Warner, Brian Hsieh. Let's cast a LOM part: A case study of laminated object manufacturing machine. In: Proceeding of the Third International Conference on Rapid Prototyping, University of Dayton, Dayton, 1992
- 2 Jacobs P F. Stereolithography and Other RP&M Technologies. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1996
- 3 Paul F Jacobs. Rapid Prototyping & Manufacturing. In: Cooperation with the Computer and Automated Systems Association of SME, 1992
- 4 杨玉崑. 合成胶粘剂. 北京: 科学出版社, 1980
- 5 李彦生, 张人佶. 快速成形中零件变形的研究. 中国机械工程, 2000, 11(增刊): 121~121
- 6 林峰. 分层实体制造工艺原理研究及系统开发: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997
- 7 宋玉华, 颜永年, 张人佶. 分层实体制造(LOM)成形过程中的热力有限元分析. 中国机械工程, 2000, 11(增刊): 37~40

STUDY ON THE INTERLAMINAR STRESS AND WARPAGE DEFORMATION IN LAMINATED OBJECT MANUFACTURING

Yan Xuri Yan Yongnian

Zhang Renji Guo Yonghong

(Tsinghua University)

Abstract: The laminated object manufacturing is a representative rapid prototyping technology. The interlaminar stress and warpage deformation of LOM are researched and analyzed deeply. A simplify model is proposed to describe the adhesive process and the calculation formulae of interlaminar stress are deduced by means of analyzing the model. Based on the experiment results, two kinds of main forms of warpage deformation are presented. It is the first time that a describing model of warpage deformation process is presented and it is believed that equivalent moment caused by interlaminar stress is the primary reason of warpage deformation. Improvement methods for decrease of stress and deformation of prototypes are provided.

Key words: Rapid prototyping

Laminated object manufacturing

Interlaminar stress

Warpage deformation

作者简介: 闫旭日, 男, 1972 年出生, 硕士研究生。研究方向为快速成形(RP)技术、分层实体制造(LOM)设备和工艺、激光加工等, 发表论文 8 篇。