

刀切型纸层叠快速原型系统切割机机理研究*

余国兴 丁玉成 李涤尘

(西安交通大学先进制造技术研究所 西安 710049)

摘要: 采用具有自适应转向能力的刀具取代激光切割, 实现一种经济型快速原型制造系统。介绍了刀具结构, 采用曳物线模型分析了刀尖运动及其轨迹的形状误差机理, 提出消除误差的逐接点修正方法。在已开发的试验机上制作切割样件研究割缝形态尺寸, 回归分析表明在正常切割深度范围内因割缝造成的尺寸误差不超过 0.003 mm。实际制作显示用这种刀具实现纸的层叠快速原型制造系统具有实用价值。

关键词: 快速成形 分层实体制造 纸层叠 尺寸误差

中图分类号: TH161 TH164

0 前言

快速原型(Rapid prototyping, RP)是一种依靠材料逐渐堆积直接从三维 CAD 模型获得实际物理模型的制造技术。由于能快速准确得到形状复杂的物理实体, RP 已成为一种重要的现代原型制作手段, 其制件已在产品开发的阶段作为原型用于设计可视化、功能测试、装配验证, 并直接作为模型用于铸造、产品推广说明目的。2001 年全球 RP 用户总共制造了超过 355 万个模型和原型件^[1]。

分层实体制造(Laminated object manufacturing, LOM)是一种依靠薄片材料逐层堆积的快速原型技术, 当前基于该原理的商业设备多以激光切割纸张制作模型^[2,3]。与其他 RP 技术相比, 其加工材料便宜、制件成本低廉, 每层制作以切出平面轮廓而非材料填充为特征, 因而加工速度快, 此外, 无需支撑、材料不发生相变也是它的优点。其主要缺陷是每层厚度不可调、高度方向制作精度不高以及制件与废料剥离费时费力。以纸为材料的 LOM 制件由于有着类似木质件的品质而成为一种重要的产品快速开发辅助工具, 并且在模具加工和铸造等领域获得了应用^[4]。

整套激光切割系统(包括 CO₂ 激光器和激光动态聚焦扫描装置)价格昂贵, 控制要求高, 为排除切割产生的烟雾系统必须增设抽排机构。以刀具取代激光切割能降低系统及其运行成本、简化控制并避免激光切割产生的烟雾, 相应的设备国外已经有日本 Kira 公司的 PLT-4A 和 KSC-50、以色列

SolidDimension 公司的 3D 300c 桌面系统, 国内尚未见公开报道。一种以纸为加工材料的刀切型快速原型制造系统试验机已经在西安交通大学先进制造技术研究所开发出来, 它以一种商业化刀具及 x 、 y 运动机构取代了激光切割系统。为进一步简化控制, 系统减少了对刀具切削方向的实时控制, 采用的刀具具有自动转向能力。介绍该系统原理和采用的刀具结构, 深入分析刀具切割的形状误差和尺寸误差根源及其对实际加工影响, 最后给出制作实例。

1 系统简介

1.1 系统原理

系统原理如图 1 所示。基于 RP 一般原理, 本系统首先对三维 CAD 模型进行分层处理, 得到的分层数据包含着每一层的制作信息。实际制作时, 系统通过连续不断的铺纸、粘接和切割过程最终制作出包含制件的制作包(图 1d), 经手工剥离废料后取出制件。与激光切割相比, 这里用刀具及 x 、 y 运动机构取代了原激光切割系统(图 1c), 为消除材料向纸张表面扩展的切割变形还增加了一道碾压工序(图 1d)。

1.2 切割装置

图 2a 是切刀在刀座内的装配示意图。切刀径向通过精密滚珠轴承支撑, 锥形顶部与刀座构成事实上的含油轴承并通过刀座内的磁铁引力使切刀轴向定位, 刀具结构保证了切刀可以在刀座内绕其轴线灵活转动。刀尖 A 相对轴线 $O-O$ 有一个偏心距 e 。

切割装置可用图 2b 模型表示。切刀用代表刀尖 A 和轴心 O 的刚性细杆 AO 表示, 其长度是刀尖偏

* 国家“十五”科技攻关项目资金(2001BA205B10)和机械制造系统工程国家重点实验室资金资助项目。20030210 收到初稿, 20030820 收到修改稿

心距 e 。 AO 还表示了切削刃切割方向。切刀与刀座的装配关系用 O 点处的铰链表示， B 代表刀座。刀座带动切刀切割纸张的过程等效为轴心 O 在刀座 B

作用下拖曳 A 点运动， O 点轨迹与待加工轮廓重合， A 点在每一时刻都与 O 点位置有一偏差 e 。

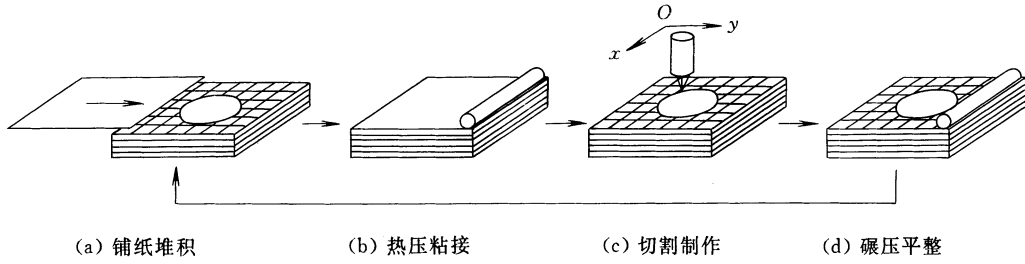


图 1 系统原理图

图 2c 是刀具切割部结构示意图。 A 点是刀尖，主切削刃 AD 是两个侧面平面 ABD 和 ACD 的交线。 ABC 是后刀面，图中用平面代替了具有圆锥曲面特征的实际后刀面。主要结构参数包括：法面楔角 α 、刃倾角 λ 和后面倾角 β 。图中未画的一个参数是刀尖偏离刀具轴线的偏心距 e 。

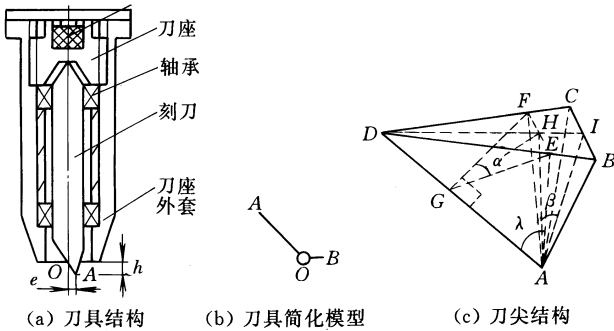


图 2 切割装置

AO 能够承受压力，刀尖能在受压状态运动。

设已知轴心 O 的运动轨迹 $(x_1(t), y_1(t))$ ，刀尖 A 的追踪位置用 $(x_2(t), y_2(t))$ 表示(图 3b)，它们都是时间 t 的函数。 A 点速度 v_A 方向可用单位矢量 w 表示

$$w = \frac{1}{e} [x_1(t) - x_2(t), y_1(t) - y_2(t)]^T$$

根据速度投影定理， $|v_A| = |v_O| \cdot \cos\theta$ ，所以

$$v_A = (v_O^T \cdot w)w$$

或

$$\begin{bmatrix} x'_2(t) \\ y'_2(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{e^2} \begin{bmatrix} x'_1(t) \\ y'_1(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) - x_2(t) \\ y_1(t) - y_2(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1(t) - x_2(t) \\ y_1(t) - y_2(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 v_A —— A 点速度

$$v_A = (x'_2(t), y'_2(t))^T$$

v_O —— O 点速度

$$v_O = (x'_1(t), y'_1(t))^T$$

在不计摩擦，认为 O 点铰链能够灵活转动时，刀尖轨迹可以通过数值方法解此微分方程系统求得。

2 形状误差及修正

2.1 曳物线模型

一柔软而有固定长度 a 的绳 OA ，一端 S 系一质点，另一端 T 沿 x 轴移动，则 S 点轨迹是曳物线^[5](图 3a)。曳物线上任一点 S 的切线长度 ST 等于 a ， T 端对质点的作用不包括转矩。受绳索拖曳，质点每一时刻的运动方向沿着 ST 。图 3a 曳物线可用方程描述如下^[6]

$$\begin{cases} x = t - a \tanh \frac{t}{a} \\ y = a \operatorname{sech} \frac{t}{a} \end{cases} \quad (1)$$

式中 t —— T 点坐标值，反映了 T 点移动的距离

a —— A 点坐标值，反映了绳的长度

根据图 2b 模型，刀座对刀尖的作用也不包括转矩，刀尖与绳索曳物中的质点有相同的状态，因此刀尖运动可以用曳物线模型描述，并且，由于刚杆

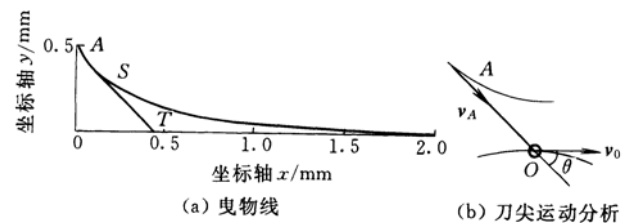


图 3 刀尖运动用曳物线模型表示

2.2 形状误差

系统采用 STL(StereoLithography)文件格式^[7]表示三维 CAD 模型，模型用三角面片逼近，一组平行平面截取三维模型得到的截面轮廓是多边形。分层制作时刀具需要从纸张材料中切出多边形轮廓。

2.2.1 直线切割误差

由于存在偏心距，切割开始时刀尖位于以轴心 O 为圆心、 e 为半径的圆周上，因此切割轨迹总是

与刀尖初始位置相关。图 4a 反映了刀尖初始位置对切割轨迹的影响。 $C_1 \sim C_7$ 是刀尖分别从圆周 1.8° 、 10° 、 30° 、 60° 、 90° 、 135° 和 180° 位置开始切割直线 OP 时由式(2)得到的计算轨迹。由图可见, 轨迹的曲线部分是形状误差的根源。只有刀尖从圆周 180° 位置开始的切割轨迹是直线(C_7), 从 0° 位置开始时理论上刀尖是被推着运动的。

刀尖从圆周 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围开始的计算轨迹在刀尖受力性质(压或拉)改变处产生间断点($C_1 \sim C_4$), 该点到待加工直线的距离是 e 。因此 e 越大误差也越大。曲线在直线上的投影长度表示了误差影响范围, 其最大值出现在刀尖从圆周接近 0° 位置开始的切割轨迹上(如 C_1), 由刀尖受压和受拉两种状态时的轨迹确定。误差与要求的精度有关。如果把与直线的距离小于 0.01 mm 之后的曲线轨迹认为是直线, 对偏心距 $e = 0.25 \text{ mm}$ 的刀具, 由式(1)得 $x = 0.74 \text{ mm}$, 最大误差影响范围等于 $2 \times 0.74 \text{ mm} = 1.48 \text{ mm}$ 。特定刀具产生的最大形状误差是确定的, 待加工直线 OP 越长, 误差影响范围在整个直线中所占比例越小, 因此刀切方法更适于加工长的直线段。

直线长度对切割误差也有影响。对 $e = 0.25 \text{ mm}$ 刀具, 若刀尖从圆周 90° 位置开始切割, 由式(1)可知, 线段长度小于 0.98 mm 时, 切割轨迹是曲线且曲线到直线距离在 $0.25 \sim 0.01 \text{ mm}$ 之间(C_3)。

2.2.2 折线切割误差

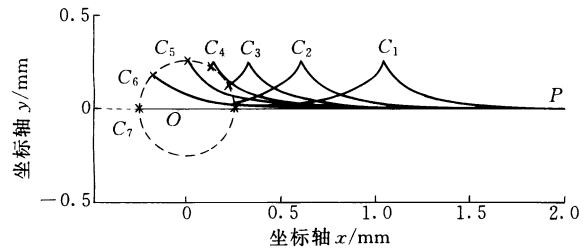
切割多边形轮廓就是依次切割多边形的每一条线段。除在轮廓起点刀尖初始位置不确定外, 刀尖切割一条直线结束的终点就是下一段切割的起点。由于偏心距 e 的存在, 切割下一段直线的刀尖位置偏离直线起点, 轨迹在两线段接点处产生了形状误差。图 4b 是分别切割折线 P_1OP 和 P_2OP 时刀尖在线段接点处的计算轨迹。

线段长度过短使得切割轨迹成为曲线时, 除了对当前直线产生形状误差外, 不正确的刀尖位置又影响到下一段切割, 引起轮廓变形、特征消失。图 4c 中刀尖从初始位置 A 点开始切割矩形 $OO_1O_2O_3O$ 的计算轨迹变形为 $AA_1A_2A_3A_4$, 同时尺寸减小。线段长度大于刀具切割误差影响范围时, 由于切割轨迹包括直线, 多边形几何特征得以保留(图 4d)。

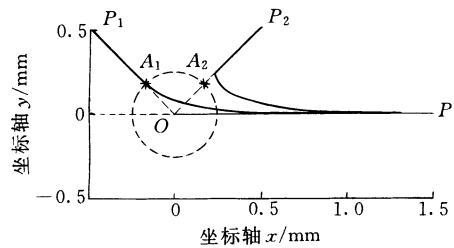
2.3 误差修正

避免形状误差就要使刀尖始终沿待加工直线运动。切割轮廓时, 先让刀具从轮廓起点 1(图 5a)沿直线相反方向按刀具的误差影响范围值移动一段距离(到 O_1 点)。加工中, 刀尖经过多切的距离后必然处于轮廓起点, 之后, 每到线段终点, 刀具再多走一段距离 e , 然后令刀具轴心绕刀尖转动到下一条

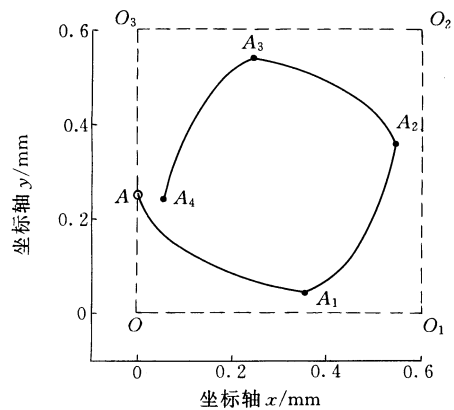
直线上, 如此就保证了刀尖始终从直线起点开始切割。按照这种方法加工图示折线时, 线段端点 1、2、3、4 处的刀具轴心位置将成为 O_1 、 O_2 、 O_3 和 O_4 点, 刀尖经过每条线段的起点和终点。图中 C_1 、 C_2 虚线是未对线段结点刀尖轨迹修正时的情况。图 5b 是切割 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 矩形修正前后的实物照片。



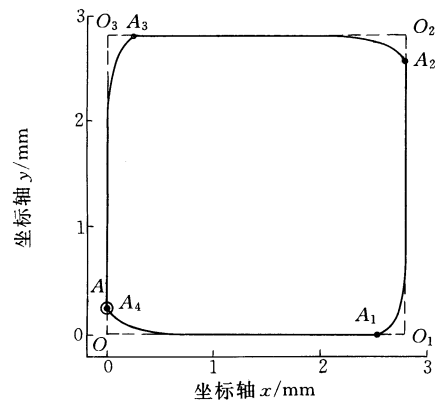
(a) 从不同初始位置切割直线 OP 时的轨迹



(b) 切割折线 P_1OP 和 P_2OP 时的轨迹

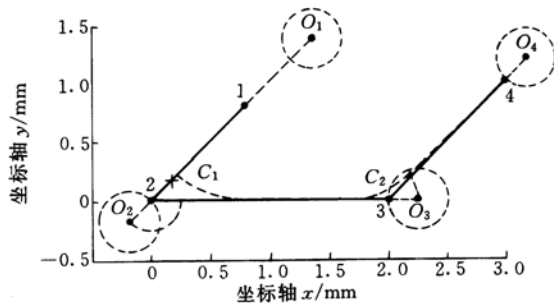


(c) 线段长度太短轮廓变形

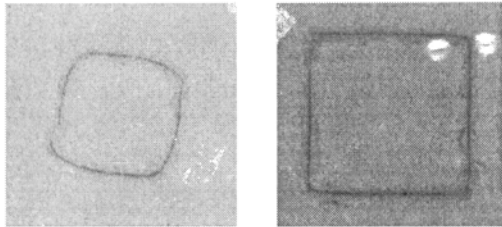


(d) 线段足够长时

图 4 线段长度对切割形状的影响



(a) 轨迹误差基本修正方法



(b) 实际切割照片(VH-8000 系统 25 倍镜头拍摄)

图 5 刀尖轨迹误差修正方法及示例

3 尺寸误差

3.1 割缝形态

在纸张底部粘接条件下，刀具切割纸张是个纯挤压过程^[8]，挤压结果在纸中产生带凸起变形的“V”形割缝(图 6a)。后刀面决定了割缝的最大形状尺寸。设切割深度为 h ，后刀面在 h 处的宽度 BC (图 2c)

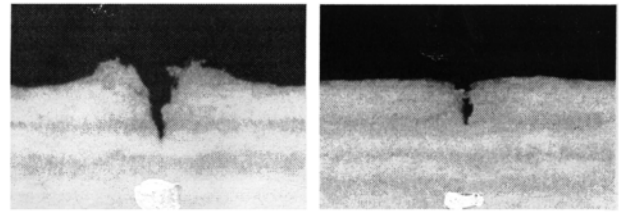
$$BC = 2BI = 2h(\tan \lambda + \tan \beta)\cos \lambda \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

式中 α, λ, β ——刀尖结构参数

h ——刀尖切割深度

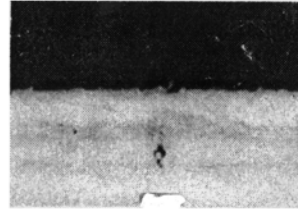
给定刀具结构参数后它与 h 成正比。

根据图 1 系统工艺，每个加工周期内的割缝形态如图 6a~6c 所示。图 6a 是切割割缝，有着典型的“V”字形态。由于侧刀面挤压，缝口两侧有凸起变形。为使后续纸张能够平整粘接在已加工层上，系统增加了碾压工序，凸起变形得以消除，割缝形态也变成近似“V”形(图 6b)。图 6c 是在碾压后的割缝上粘接纸张的一种割缝形式。由于多层制作后的割缝形状已无法从照片上准确观测，因此下面只从切割与碾压两方面研究实际割缝尺寸。采用图 6d 模型表示切割与碾压后的割缝。割缝由其深度 h_1 和缝口宽度 b 表示， δ 是纸张厚度。与真实情况相比，图中没有考虑切割割缝凸起部分，并用缝口尺寸 b 表示碾压割缝的最宽处。

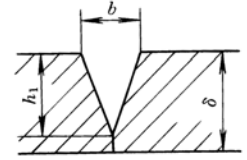


(a) 切割割缝

(b) 碾压割缝



(c) 粘接割缝



(d) 割缝简化模型

图 6 割缝形态变化及简化模型

3.2 试验说明

用试验方法测量割缝尺寸，切割样件在已开发的实验机上制作。采用一种单面涂有热敏胶的纸张，其平均实测厚度为 0.128 mm。刀具参数 $\lambda=41.92^\circ$ ， $\beta=18.56^\circ$ ， $\alpha=46.89^\circ$ ，刀座外套铣有 4 mm 宽的缺口以免其碾压割缝。考虑纸张厚度波动和实际加工中的刀具磨损，切割深度 h 从 0.124~0.261 mm 分成 6 组，在 25 mm/s 切割速度、340 g 刀压下制作割缝样件。碾压试验以 $\Phi 20$ mm 辊子碾压上述样件。所有样件通过日本 KEYENCE 公司 VH-8000 显微测量系统从切口端面拍照、测取割缝尺寸 b 和 h_1 。

3.3 试验结果

表 1 是切割割缝尺寸。碾压后的割缝尺寸见表 2，它是对表 1 六种割缝的碾压结果，表中数据是在碾压使得缝口凸起量小于 15 μm 时取得的。

在给定的切割深度范围内，切割割缝尺寸的线性最小二乘拟合结果(单位： μm)

$$\begin{aligned} b &= 0.4559h - 2.0232 \\ h_1 &= 0.5611h + 26.9567 \end{aligned} \quad (4)$$

碾压后割缝尺寸

$$\begin{aligned} b &= 0.2625h - 2.3780 \\ h_1 &= 0.5301h + 26.5791 \end{aligned} \quad (5)$$

式中 b ——缝口宽度

h_1 ——割缝深度

h ——刀尖切割深度

表 1 切割割缝尺寸

	μm					
h	124	153	175	196	238	261
b	52.65	70.22	78.36	86.05	107.14	116.32
h_1	97.96	112.24	124.89	133.47	165.30	171.42

表 2 上述割缝碾压结果

	μm					
h	124	153	175	196	238	261

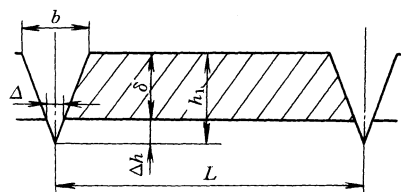
b	29.38	37.56	44.08	50.25	60.62	64.94
h_1	93.06	108.16	120.00	126.73	154.28	165.30

3.4 尺寸误差

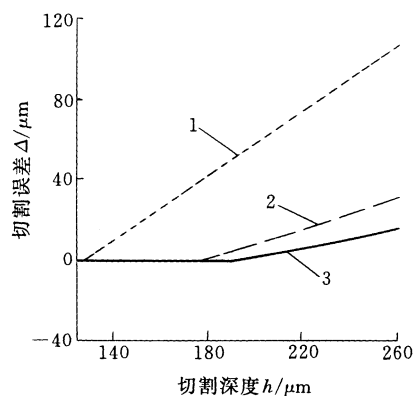
从试验结果可见, 割缝深度 h_1 比刀尖实际切割深度 h 小, 它是割缝底部微小变形恢复^[9]和测量方法局限性的结果。当 h_1 超过纸张厚度 δ 时切割产生尺寸误差 Δ (图 7a)

$$\Delta = \begin{cases} 0 & h_1 \leq \delta \\ \frac{h_1 - \delta}{h_1} b & h_1 > \delta \end{cases}$$

图 7b 是根据式(3)、(4)、(5)得到的误差曲线。对厚度 $\delta = 0.128 \text{ mm}$ 的试验用纸张, 材料的变形恢复效应使得实际切割深度 $h \geq 0.180 \text{ mm}$ 时出现尺寸误差; 碾压使割缝尺寸减小, 当 $h \geq 0.191 \text{ mm}$ 才出现切割误差, 并且在试验采用的切割深度范围内总的误差不超过 0.015 mm 。考虑到分层制作和控制缝口凸起变形因素, h 一般控制在 $(1.2 \sim 1.6) \delta$, 这时因割缝造成的误差 Δ 不超过 0.003 mm 。



(a) $h_1 > \delta$ 时割缝引起尺寸误差



(b) 尺寸误差曲线

图 7 割缝引起的尺寸误差分析
曲线 1~3 分别对应式(3)~(5)

4 制作实例

图 8 是由已开发的刀切型纸层叠快速原型制造系统实验机制作的模型照片, 模型外形尺寸 $130 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 由 442 层实测平均厚度 0.128 mm 纸张加工而成。模型未经抛光

后处理, 外圆上的 STL 模型三角面片清晰可见。

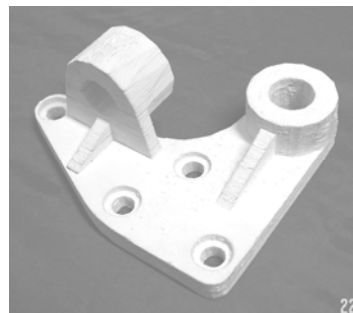


图 8 制作实例

5 结论

以刀具取代激光切割实现纸的层叠实体制造能够降低系统及其运行成本, 简化系统控制并实现绿色环保制造。根据刀尖运动模型分析了偏心距造成的切割形状误差, 提出消除误差的接点修正方法。对割缝形态尺寸的试验研究表明在正常切割深度范围因割缝产生的尺寸误差不超过 0.003 mm 。最后的实际制作表明以文中刀具为切割工具的刀切型纸层叠快速原型制造具有实用价值, 能够达到实现低成本经济型 RP 设备的目的。

参 考 文 献

- 1 Wholers Report 2002. Wohlers Associates, Inc. <http://www.wohlersassociates.com>
- 2 Kenneth G C. Rapid Prototyping Technology, Selection and Application. New York, Basel, Marcel Dekker, Inc. 2001
- 3 Pham D T, Gault R S. A comparison of rapid prototyping technologies. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1998 (38): 1 257~1 287
- 4 Bernhard M, Detlef K. Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry. Computer in Industry, 1999(39): 47~53
- 5 数学手册编写组. 数学手册. 北京: 高等教育出版社, 1979
- 6 原北京矿业学院高等数学教研组编著, 四川矿业学院数学教研组增订. 数学手册(增订本). 北京: 煤炭工业出版社, 1975
- 7 3D systems. Stereolithography interface specification. USA, 1988
- 8 范忠仁. 非金属切削刀具. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 9 (苏) 弗里雅捷 Д И. 纸的性能. 陈有庆等译. 北京: 轻工业出版社, 1985

CUTTING MECHANISM OF A CUTTER-BASED PAPER LAMINATION RAPID PROTOTYPING SYSTEM

Yu Guoxing Ding Yucheng Li Dichen
(*Institute of Advanced Manufacturing Technology,*
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Instead of conventional laser cutting, a cutter-based laminated object manufacturing (LOM) type rapid prototyping system is proposed. The cutter set is introduced, in which the cutter can turn its cutting direction automatically. The motion of the cutter nose can be described by the tractrix-model. According to the model, the form error caused by cutting is analyzed and a method to eliminate the error by modifying the cutter

path is thus obtained. Experimental research on the cutting notch is carried out through micro-analysis. On the experimental results, the dimension error caused by the notch is analyzed and the conclusions is that within the normal range of the cutting depth the dimension error is less than 3 microns. A physical model has been fabricated on the developed test machine, which indicates the proposed low cost system has use value.

Key words: Rapid prototyping (RP)

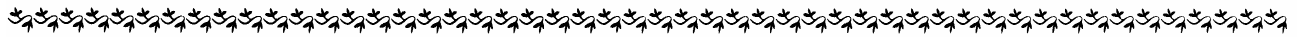
Laminated object manufacturing (LOM)

Paper deposition

Dimension error

作者简介: 余国兴, 男, 1962年出生, 博士研究生。主要研究方向是快速成形技术及计算机控制技术。

E-mail: yugx@mailst.xjtu.edu.cn



(上接第 43 页)

EFFECT OF STRUCTURE SIZES OF PNEUMATIC COMPONENTS ON CONDENSATION

Jin Yingzi
(*College of Mechanical Engineering and*
Automation, Zhejiang Institute of Science and
Technology, Hangzhou 310033)
Yang Qingjun
(*School of Mechatronic Engineering,*
Harbin Institute of Technology, Harbin 150030)

Abstract: Condensation greatly reduces performance and life of pneumatic systems, and it is important to judge and prevent it in engineering practice. There are many factors that influence condensation of pneumatic systems, and there is no simple criteria easy to use till now. The influence of structure parameters of pneumatic components on system condensation is studied by more than 1 000 experiments. The dominant

parameters that have significant influence on condensation were found, namely container volume V , length of exhausting tube l and section area of exhausting tube A . By introducing dimensionless

volume of exhausting tube and dimensionless section area of outlet of container in the further analysis of experimental results, a very simple and thus very useful criterion, dimensionless volume of exhausting tube Al/V , is finally achieved to judge if inner condensation or outer condensation would occur or not. Outer condensation systems, non-condensation systems and inner condensation systems exist subsequently from left to right along the axis of Al/V . The critical value of those zones would change as running conditions change, but would not change while the structure parameters of pneumatic components change.

Key words: Pneumatic systems Condensation Structure size

Dimension analysis

作者简介: 金英子, 女, 1963年出生, 副教授, 博士后。主要从事流体力学与气压传动技术研究。

E-mail: kimyongzha@hotmail.com