

# 熔融沉积快速成形工艺材料粘结质量分析<sup>\*</sup>

肖 棋 江开勇

(华侨大学机电工程系, 泉州 362011)

**摘要** 在 FDM 工艺中, 粘结强度直接决定零件的机械性能和使用效果. 文中在理论分析的基础上, 结合较系统的工艺试验, 初步探索几种聚合物材料在不同工艺条件下的粘结质量问题, 总结出不同材料在 FDM 工艺中的最佳喷嘴温度范围、成形室温度范围和合理的层厚. 实验结果对于 FDM 工艺中不同成形材料工艺参数的优化控制提供了重要的依据.

**关键词** FDM, 抗拉强度, 粘结强度

**分类号** TQ 317.3

熔融沉积快速成形工艺, 简称 FDM (Fused Deposition Modeling) 工艺, 是一种基于熔融粘结机理的成形方法. 首先把热塑性聚合物通过挤出成形制作成直径( $\phi$ )为 1.8 mm 的丝材. 在 FDM 设备上, 通过一对磨擦轮把材料丝送入液化管, 并在送进沿程不断受热熔融. 在液化管靠近喷嘴的下段形成了熔池, 而液化管上段的材料丝仍处于玻璃态, 具有足够的抗弯强度, 起着活塞推进的作用, 把熔料推出喷嘴. 经喷嘴挤出的半熔融热塑性聚合物细丝在扫描头的牵引下, “编织”出当前层的截面形状. 同时, 迅速凝固并与周围的材料凝结, 从而形成三维实体, 如图 1 所示. 由于在 FDM 工艺中材料是一层层堆积起来的, 因此要求层与层之间的材料粘结应牢固. 即要求有足够的粘结强度. 而粘结强度与喷嘴温度、成形室温度及层厚有着直接的关系. 因此本文就几种常用的 FDM 工艺材料 (ABS, AS, 聚丙烯、尼龙) 的粘结强度, 与喷嘴温度、成形室温度和层厚的关系进行研究.

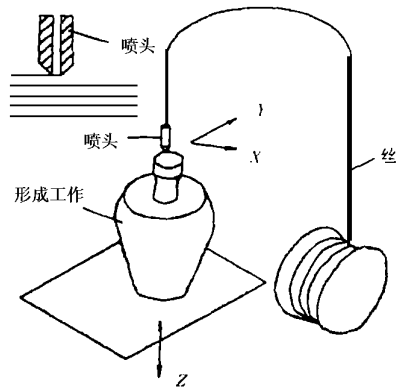


图 1 FDM 工艺工作原理图

## 1 实验部分

### 1.1 材料及设备

1.1.1 材料 ABS, AS, 聚丙烯, 尼龙.

1.1.2 设备 M-RPMS 多功能快速成形机 (清华大学快速成形中心研制)、19JA 万能工具显

显微镜、LJ-500 型拉力试验机。

## 1.2 粘结强度判据(粘结势)

FDM 工艺是一种基于熔融挤射堆积成形的制造方法。材料的粘结成形依赖成形材料的自熔融粘结。其粘结机理是在温度梯度的驱动下的分子扩散过程。材料的粘结强度取决于越过粘结界面的分子扩散的数量。根据扩散焊接的基本原理<sup>[1]</sup>, 越过界面的分子扩散量可表示为

$$dm = -D_0 e^{\frac{Q}{RT}} \frac{dc}{dx} dt, \quad (1)$$

其中  $T$  为界面温度,  $t$  为扩散时间,  $c$  为扩散物质的浓度,  $x$  为扩散距离,  $Q$  为物质的激活能量,  $R$  和  $D_0$  为常数。然而, 材料界面的温度及扩散物质浓度  $dc/dx$  变化比较复杂, 准确计算分子的扩散量是非常困难的。从实际工程应用的角度看, 准确地计算分子扩散量是不现实也是没有必要的, 必须作适当的简化处理<sup>[2]</sup>。从而, 可以得到一种判断粘结强度的判据(粘结势), 记为  $\Psi$ 。有

$$\Psi = \frac{1}{S} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \xi(T) e^{-\frac{K}{T(x,y)}} dx dy dt, \quad (2)$$

$$\xi(T) = \begin{cases} 1 & T \geq T_c, \\ 0 & T < T_c, \end{cases}$$

其中  $\Psi$  定义为粘结势,  $T_c$  为实现有效粘结的临界温度,  $K$  为粘结势常数,  $S$  为粘结区域的面积。用式(2)可以给出粘结强度的评价指标, 对于分析试件的实验结果有一定的指导意义。式(2)表明, 影响粘结势的主要参数为粘结时温度及接触面积。

## 1.3 实验方法

用 M-RPMS 多功能快速成形机先造出空心长方体, 从长方体上切刈出长方形薄片, 再从长方形薄片上冲压出如图 2 所示的标准拉伸试件。用 LJ-500 型拉力试验机测出试件的拉断力, 然后用 19JA 万能工具显微镜测量试件断口的面积  $S$ , 计算出试件单位面积的抗拉

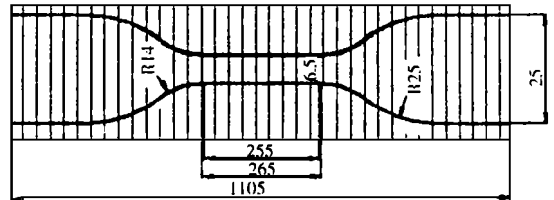


图 2 拉伸试件

强度( $\sigma_T$ ), 即层与层之间的粘结强度(MPa)。绘制抗拉强度与喷嘴温度、成形室温度、层厚的关系曲线。

# 2 实验结果与分析

## 2.1 喷嘴温度、成形室温度对粘结强度的影响

图 3~6 分别是以 AS、聚丙烯、ABS 和尼龙为成形材料, 在层厚为 0.2 mm、扫描速度为 20 mm·s<sup>-1</sup>、进丝速度为 1.67 mm·s<sup>-1</sup>的前提下, 改变喷嘴温度  $T_N$  及成形室温度  $T_E$  的关系曲线图。

以 AS 为成形材料时, 当喷嘴温度  $T_N > 230$  时, 喷嘴挤出的丝上有气泡产生;  $T_N > 235$  时, 喷嘴挤出的丝上有“竹节”现象, 这是因为喷嘴温度过高, 材料分子破裂, 产生“竹节”现象, 使材料的粘度降低。图 3 表明, 喷嘴温度越高, 试件的抗拉强度值越高, 但喷嘴温度超过了

230 时, 试件的抗拉强度值开始下降. 另成形室温度越高, 试件的抗拉强度值也越高, 但当成形室温度  $T_E > 55$  时, 成形的试件表面开始产生褶皱, 试件的抗拉强度值反而下降. 图中 3 条曲线交叉, 表明当喷嘴温度较高时, 应降低成形室温度. 否则会影响成形零件的粘结强度. 因此, 当以 AS 为成形材料时, 喷嘴温度  $T_N$  应控制在 215 ~ 230 之间, 成形室温度  $T_E$  可取 28 ~ 45 之间, 所成形的零件粘结强度较高.

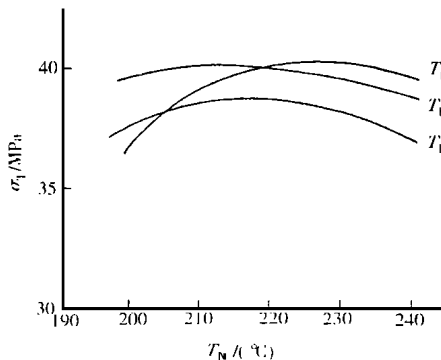


图3 AS 的温度与抗拉强度曲线

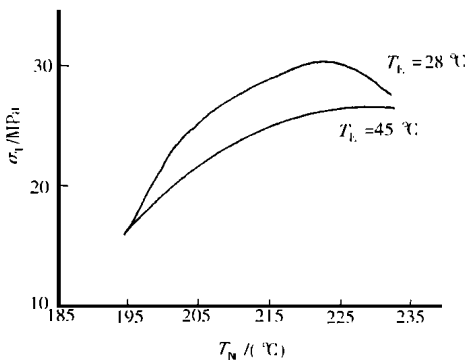


图4 聚丙烯的温度与抗拉强度曲线

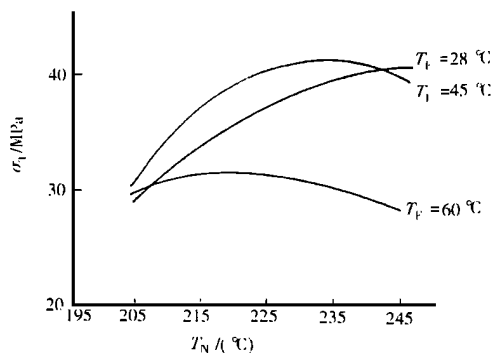


图5 ABS 的温度与抗拉强度曲线

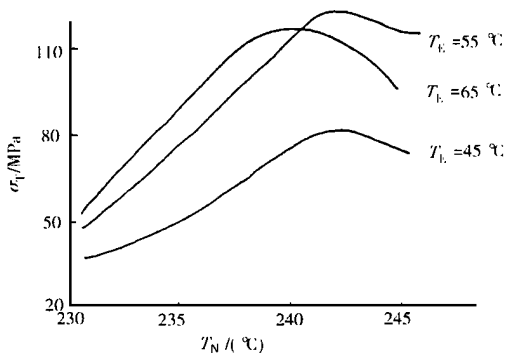


图6 尼龙的温度与抗拉强度曲线

以聚丙烯为成形材料时, 最佳温度约在 220 时. 当喷嘴温度超过 220 时, 因熔体破裂喷嘴出丝表面粗糙, 导致粘结质量下降. 另外, 聚丙烯在本文所采用的 4 种材料中最容易出现表面起皱和“坍塌”现象, 故成形室温度以室温为宜.

以 ABS 为成形材料时, 喷嘴温度越高, 试件的抗拉强度值越高. 但喷嘴温度  $T_N > 235$  时, 喷嘴挤出的丝的表面粗糙, 即材料分子开始破裂, 试件的抗拉强度值也开始下降. 另外, 成形室温度越高, 试件的抗拉强度值也越高; 但成形室温度  $T_E = 60$  时, 成形的试件表面产生褶皱, 因此试件的抗拉强度值下降. 图 5 表明, 以 ABS 为成形材料时, 喷嘴温度  $T_N$  应控制在 225 ~ 235 之间, 成形室温度  $T_E$  可取 40 ~ 50 之间, 所成形的零件粘结强度较高.

以尼龙为成形材料时, 喷嘴温度越高, 试件的抗拉强度值越高, 但喷嘴温度  $T_N > 240$  时, 喷嘴挤出的丝上有“竹节”, 材料分子开始破裂, 试件的抗拉强度值也开始下降. 另外, 成形室温度越高, 试件的抗拉强度值也越高. 由于实验条件的限制, 成形室温度  $T_E > 60$  的实验没做. 分析结果表明, 以尼龙为成形材料时, 喷嘴温度应控制在 235 ~ 240 之间, 成形室温度

$T_E$  可取 50 ~ 60 之间, 所成形的零件粘结强度较高.

从以上的实验结果表明, 每种材料都有其最合适的喷嘴温度及成形室温度范围. 这是因为 FDM 工艺在堆积过程中, 除了进行第一层堆积时材料是直接堆积在底板上的以外, 在进行其它层堆积时, 材料都是在上一层堆积的基础上继续进行堆积. 所以, 材料丝与上一层的材料会有局部或全部的互相接触. 由于材料从喷嘴中刚刚挤出时温度较高, 会局部熔化与它相接触的下一层材料, 然后相互粘结在一起. 喷嘴挤出的材料和成形室温度越高, 则材料熔化的程度越高, 层间粘结得越好; 喷嘴温度过低, 则容易产生喷嘴堵塞或因为粘结不牢而产生脱层等质量问题. 但另一方面, 若温度过高, 材料分子会破裂, 影响成形零件的粘结强度; 或因为温度过高, 材料会成为流体状态, 流动的可控性差, 无法挤出可精确控制的材料丝且凝固后收缩严重会出现褶皱、塌陷等质量问题, 反而影响成形零件的粘结强度<sup>[6]</sup>. 因此, 每种材料都有其最佳的喷嘴温度范围和最合适的成形室温度范围.

2. 2 层厚对材料粘结强度的影响

图 7, 图 8 为在以表 1 所示的工艺参数下, 改变层厚( $d$ ) 的实验数据关系曲线.

表 1 不同材料的几种工艺参数数据

材料	$T_N / (^\circ\text{C})$	$T_E / (^\circ\text{C})$	$V_{\text{扫}} / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{\text{进}} / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
AS	210	28	20	1.82
ABS	220	28	20	1.72
聚丙烯	210	28	20	1.85
尼龙	240	65	20	1.96

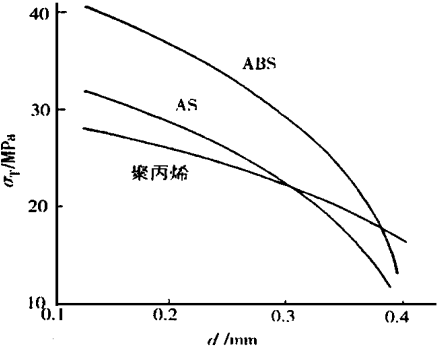


图 7 层厚与抗拉强度曲线

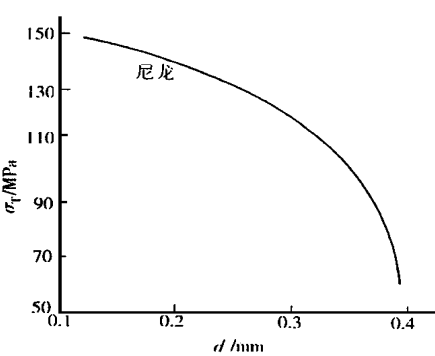


图 8 层厚与抗拉强度曲线

以上实验结果表明, 层厚越小, 试件的抗拉强度越高, 表明成形零件的粘结强度越高. 这是因为层厚越小, 层间的热传导距离短, 同时喷嘴挤压铺平作用加强, 因此试件粘结强度越高. 所以, 在选择层厚时, 应同时考虑粘结强度、工作效率、表面质量这几个指标. 一般情况, 层厚可选择 0.2 ~ 0.3 mm.

2. 3 试件抗拉强度与原材料抗拉强度对比

显然, 粘结强度与成形材料本身的强度有关. 为了准确地说明与成形工艺有关的粘结质量问题, 下面以各种材料在层厚为 0.2 mm 时的试件实测抗拉强度( $\sigma$ ) 与原材料的抗拉强度( $\sigma_0$ ) 的比值作比较(原材料的抗拉强度为成形材料丝的实测值, 非手册值), 以此考察成形工艺条件对粘结强度的关系, 如表 2 所示. 比较结果表明, 尼龙最高, 聚丙烯次之, AS 最差.

表 2  试件抗拉强度与原材料抗拉强度对比表

材料	$\sigma_{T0}/\text{MPa}$	$\sigma_T/\text{MPa}$	$\sigma_{T0} \cdot \sigma_T^{-1}/(\%)$
尼龙	192.93	162.19	84.1
聚丙烯	34.81	28.57	82.1
ABS	56.51	45.00	79.6
AS	53.58	41.67	77.4

4  结论

- (1) 粘结质量与喷嘴温度、环境温度有明显的依赖关系。尼龙的最佳喷嘴温度为 235 ~ 240 、成形室温度为 50 ~ 60 ；聚丙烯的最佳喷嘴温度为 215 ~ 220 、成形室温度为常温 (约 28 )；ABS 的最佳喷嘴温度为 225 ~ 235 、成形室温度 40 ~ 50 ；AS 的最佳喷嘴温度为 215 ~ 230 、成形室温度 28 ~ 45 。
- (2) 在最佳温度范围以内提高粘结界面温度, 有利于提高粘结强度。一旦温度超过这一临界值, 粘结强度反而下降, 实验证表明这时喷嘴出丝出现破裂、继续现象, 因而影响了粘结质量。
- (3) 减少分层厚度有利于提高粘结质量, 但同时又降低成形效率。因此, 分层厚度应根据实际情况选定。

参    考    文    献

1  卡扎柯夫 Φ著. 材料的扩散焊接. 何康生等译. 北京: 国防工业出版社, 1982. 71 ~ 80

2  洪国栋. 熔融挤压堆积成形关键理论与系统开发: [学位论文]. 北京: 清华大学机械系, 1998. 20 ~ 23

3  肖  棋, 江开勇. 熔融沉积快速成形工艺控制研究. 华侨大学学报( 自然科学版) 1999, 20( 1) : 76 ~ 79

Bonding Quality of Materials Fastly Modeling  
by Fused Deposition

Xiao Qi        Jiang Kaiyong

(Dept. of Electromech. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract**  The bonding quality of materials fastly modeling by fused deposition directly determines the mechanical performance and service effect of the elements made of such material. In the light of technological tests and based on theoretical analysis, the authors probe into the bonding quality of several polymeric materials under different technological conditions. A summary is made on optimal temperature range at nozzle, temperature range in modeling room and reasonable slice thickness of different materials fastly modeling by fused deposition. The results provide a basis for optimized controlling technological parameters of different materials modeling by fused deposition.

**Keywords**  fused deposition modeling, tensile strength, bonding strength