

气压熔融挤压快速成形材料及成形工艺研究

王伊卿, 何仲云, 方勇, 赵万华, 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了拓宽气压熔融挤压快速成形工艺的应用领域, 开发了可应用于气压熔融挤压快速成形的改性石蜡材料, 并对成形工艺进行了研究. 研究表明, 改性石蜡熔融挤丝的黏度随硬脂酸镁含量的增加而增大, 当挤丝直径增加时, 丝径的均匀程度降低, 使成丝性能也降低. 当硬脂酸镁的质量分数降低至 1/10 时, 材料黏度降低, 丝材之间表现出脱黏现象, 从而影响了成形性能. 实验表明, 石蜡与硬脂酸镁的质量比为 8 : 1, 通过建立的熔融挤丝宽度与熔融挤出丝速率、扫描速度和分层厚度之间的数学模型, 得到了挤出丝速率、扫描速度和分层厚度相匹配的工艺参数, 并验证了挤丝宽度和扫描间距对制件质量的影响.

关键词: 气压; 改性石蜡; 挤丝宽度

中图分类号: TG241 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)01-0100-05

Material and Prototyping Process in Air Pressure Fused Deposition Manufacturing

WANG Yiqing, HE Zhongyun, FANG Yong, ZHAO Wanhua, LU Bingheng

(State Key Laboratory for Mechanical Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To extend the application area of the air pressure fused deposition manufacturing (FDM), the modified paraffin is developed and the prototyping performance of the air pressure FDM is investigated. The increased results show that the viscosity of modified paraffin melt increases with research content of magnesium stearate increased. The increment of the modified paraffin melt viscosity contributes to the larger diameter and less uniformity of the wire. When the content of magnesium stearate decreases to 10 : 1, it can be observed that dehiscence appears because of the decline of the viscosity of modified paraffin. The suitable weight ratio of paraffin and magnesium stearate can be determined as 8 : 1. The mathematical model of a wire width with wire melt extrusion rate, scanning speed and thickness is established, and the matching parameters of melt wire extrusion speed and scanning speed and coating thickness are given. The influence of the wire width and scanning distance on the quality of workpiece is verified by the experiments.

Keywords: air pressure; modified paraffin; wire width

由于气压熔融沉积快速成形系统(FDM)可使用多种成形材料^[1-2], 因此本文开发的气压熔融挤压快速成形系统, 使用石蜡材料来制造精密铸造的蜡型. 熔融挤压快速成形的工作原理是采用压缩空气作为动力源, 将成形材料加热到一定温度呈低黏度

的熔融状态, 然后由喷头挤出, 同时控制喷头按所需加工零件的层面形状进行扫描运动, 实现快速成形制造^[3].

本文研究的熔融挤压快速成形系统^[4]采用石蜡为基体, 以硬脂酸盐为改性剂的成形材料, 研究了改

性石蜡材料的成丝性能及成形性能. 在一定温度和压力下,测试熔融挤压快速成形系统的出丝速率,建立了出丝速率与理论丝宽的数学模型,计算出熔融挤丝宽度,并确定了扫描间距.

1 改性石蜡材料的研究

改性石蜡材料熔化后应具有较低的黏度,可持续被压缩空气从喷嘴中挤出,形成直径均匀的丝材. 同时,成形丝材应具有适当的黏结性,实现丝材之间的黏结^[4],并且要求材料具备足够的强度和韧性^[5],在成形过程中不发生断丝现象.

选择石蜡作为主体原材料,利用硬脂酸盐对其进行改性,研制了一种可用于气压熔融挤压的快速成形材料. 石蜡加热到一定温度时呈流体状态,在气压作用下,可以顺利流过直径很小的喷嘴,形成均匀的丝材. 实验中发现纯石蜡丝材因为表面黏度低,导致丝与丝之间根本无法黏结在一起(见图 1),因此无法作为气压熔融挤压的快速成形材料.

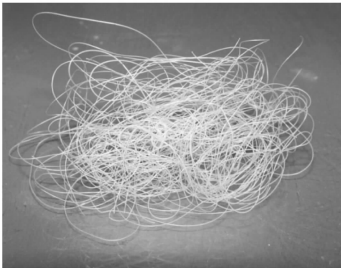


图 1 纯石蜡的熔融挤压成型丝

石蜡的黏度随温度的升高而降低,而熔化后的石蜡是一种非牛顿流体,具有剪切增稠效应^[6]. 研究表明,在熔融石蜡中加入适量的硬脂酸镁可改变石蜡的黏度^[7],从而改善丝材的黏结性能. 当石蜡加热融化后,加入适量的硬脂酸镁,使硬脂酸镁链状的多聚体分子结构与石蜡油完全溶解在一起,长链的硬脂酸镁分子互相缠绕、聚合,使得石蜡材料的黏度增大,从而大幅提高了丝材的黏结性能. 在混合成形材料中,石蜡与硬脂酸镁的质量比分别为 10 : 1、8 : 1、5 : 1 和 4 : 1,采用 NDJ-8s 数字式旋转黏度计 (12 r/min),测量混合材料的动力黏度 μ ,实验结果如图 2 所示. 实验结果表明,随着硬脂酸镁含量的增加,混合材料的黏度也增加,但随着加热温度的增加,黏度则降低. 如图 3 所示,对石蜡和硬脂酸镁的混合材料进行熔融挤压实验,对挤出丝的直径进行测量,测量结果见表 1,采用丝径的均匀性作为成丝

性能的评价指标.

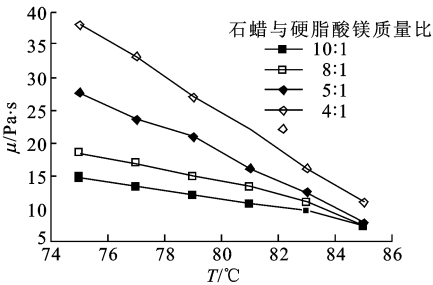
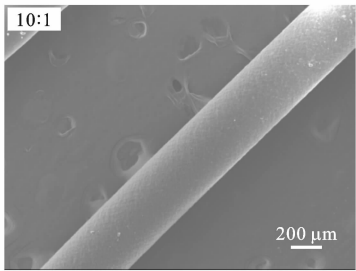
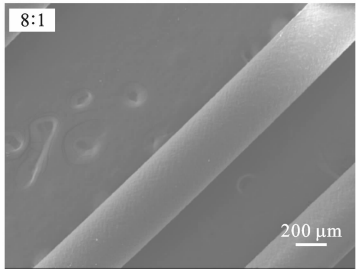


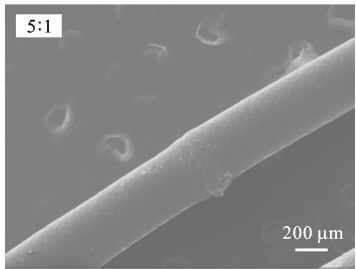
图 2 石蜡和硬脂酸镁混合材料的黏度测试曲线



(a) 石蜡和硬脂酸镁的质量比为 10 : 1



(b) 石蜡和硬脂酸镁的质量比为 8 : 1



(c) 石蜡和硬脂酸镁的质量比为 5 : 1

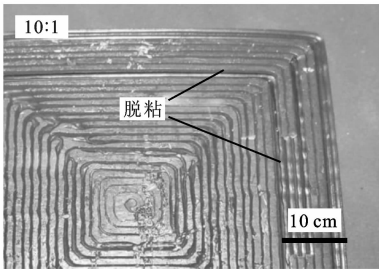
图 3 混合材料的溶融挤压石蜡丝材的形貌

实验中发现,石蜡和硬脂酸镁的质量比为 4 : 1 的混合成形材料,因出丝困难而无法形成连续丝材,但质量比为 10 : 1、8 : 1、5 : 1 的混合成形材料可以从喷嘴中挤出,形成连续丝材. 从表 1 中发现,石蜡和硬脂酸镁的质量比为 10 : 1、8 : 1 时,改性石蜡材料的直径 d 比较均匀,平均为 $392.2 \sim 396.9 \mu\text{m}$. 采用 $S = \left(\sum (x - \bar{x})^2 / n \right)^{1/2}$ 计算的直

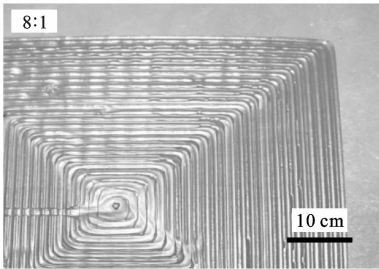
表 1 熔融挤压蜡丝直径的测量结果

石蜡与硬脂酸镁 的质量比	$d/\mu\text{m}$								丝径平	丝径标
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7	位置 8	均值/ μm	准差/ μm
10 : 1	397.3	397.3	394.6	397.3	397.3	397.3	397.3	397	396.9	0.884
8 : 1	391.9	389.2	391.9	391.9	391.9	391.9	397.3	391.9	392.2	2.236
5 : 1	424.3	408.1	405.4	435.1	413.5	413.5	416.2	418.9	416.9	8.725

径标准偏差为 0.884 5~2.236 μm ,而质量比为 5 : 1 的改性石蜡,由于材料黏度较大,出丝缓慢、不顺畅,丝材直径明显增加,丝径平均值达到 416.9 μm .因此,当丝径标准偏差达到 8.725 μm 时,丝材直径的均匀程度下降显著.图 4 为改性石蜡熔融挤压快速成形制件的形貌,从制件的表面质量可看出,当石蜡与硬脂酸镁的质量比为 10 : 1 时,丝与丝之间的黏结不牢固,丝与丝之间会出现脱黏现象.当石蜡与硬脂酸镁的质量比为 8 : 1 时,层与层之间没有出现脱黏现象,表现出良好的成形性.



(a) 石蜡和硬脂酸镁的质量比为 10 : 1 的混合材料



(b) 石蜡和硬脂酸镁的质量比为 8 : 1 的混合材料
图 4 改性石蜡熔融挤压快速成形制件的形貌

2 熔融挤压工艺参数优化

当材料的成分一定时,喷嘴出丝速度与加热温度和气体压力有关,并且出丝速度决定了分层厚度、熔融挤丝宽度以及扫描速度,而分层厚度、熔融挤丝宽度以及扫描速度则决定了快速成形制件的精度及表面质量.

2.1 熔融挤压出丝速率的实验测定

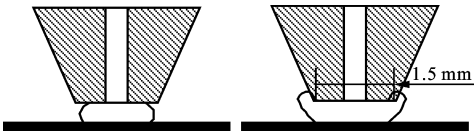
实验结果表明,挤出材料的速度随加热温度和

气体压力的升高而增大,其中气体压力对其影响更大^[5].采用西安交通大学研制的气压熔融挤压快速成形系统和熔融挤压改性石蜡材料,石蜡与硬脂酸镁的质量比为 8 : 1,改变熔融加热温度和气压,来测定熔融材料的出丝速度.当熔融挤压快速成形系统喷嘴直径为 0.4 mm 时,测量 10 s 内熔融挤丝的质量 m ,评价熔融挤丝速度,测量结果如表 2 所示.

2.2 熔融挤压蜡丝截面模型及计算

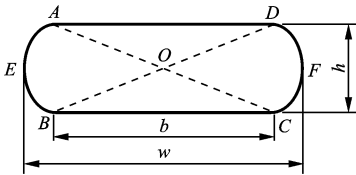
在自由状态下,从喷嘴挤出丝的形状应该与喷嘴的形状一致呈圆柱形,但在成形过程中,挤出的丝要受到喷嘴下端面的作用,同时在填充方向上还受到已堆积丝的拉伸作用,因此挤出的丝应该是具有一定宽度的扁平状丝材(见图 5).

当材料从喷嘴挤出时,丝的宽度随着挤出丝速度的增加而增加,图 5a 为正常挤出丝速度时丝材的端面.当出丝速度过大^[4]时,挤出丝宽度将超过喷嘴下端面的直径,挤出的丝会黏附到喷嘴的外圆锥面上,使成形加工不能正常进行,如图 5b 所示.



(a) 正常速度 (b) 速度过大
图 5 挤丝速度对丝材端面的影响

喷嘴出丝速度、分层厚度以及扫描速度决定了丝的宽度,而丝的宽度决定了扫描间距的设置.假设熔融挤出丝截面为矩形和弧形组合模型^[5](见图 6),则



b :丝端面的矩形模型宽度; w :丝端面的组合模型宽度; h :丝端面模型高度(分层厚度)

图 6 丝的截面形状模型

表 2 喷嘴在不同温度和压力下熔融挤丝的质量

$T/^{\circ}\text{C}$	m/g							
	0.1 MPa	0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa	0.6 MPa	0.7 MPa	0.8 MPa
75	0.009	0.020	0.031	0.045	0.057	0.065	0.080	0.121
76	0.011	0.022	0.039	0.054	0.072	0.087	0.108	0.126
77	0.012	0.026	0.041	0.055	0.076	0.100	0.119	0.134
78	0.013	0.026	0.042	0.056	0.081	0.100	0.126	0.146
79	0.014	0.027	0.047	0.066	0.089	0.107	0.133	0.155
80	0.014	0.027	0.048	0.067	0.089	0.116	0.139	0.159
81	0.015	0.031	0.052	0.074	0.095	0.125	0.150	0.173
82	0.015	0.036	0.056	0.079	0.095	0.128	0.154	0.184
83	0.018	0.036	0.061	0.083	0.111	0.135	0.163	0.192
84	0.019	0.037	0.064	0.091	0.118	0.146	0.179	0.203
85	0.024	0.038	0.070	0.097	0.124	0.150	0.184	0.214

熔融挤出丝的截面积

$$S = h/2[(b^2 + h^2)^{1/2} - b] + bh \tag{1}$$

在 10 s 内熔融挤出丝的质量

$$m = 10Sv\rho = 10\left\{\frac{h}{2}[(b^2 + h^2)^{1/2} - b] + bh\right\}v\rho \tag{2}$$

熔融挤出丝的宽度

$$w = (b^2 + h^2)^{1/2} = \left\{\left[\left(\frac{m}{5hv\rho}\right)^2 - h^2\right]^2 \frac{25h^2v^2\rho^2}{4m^2} + h^2\right\}^{1/2} \tag{3}$$

式中： v 为扫描速度； ρ 为材料的密度。由式(3)可以看出,由于材料的密度已知,当 10 s 内挤出的 m 一定时, w 只与 h 和 v 有关。表 2 中可查得 $\varnothing$ 0.4 mm 的喷嘴在 79℃、气压为 0.3 MPa 的条件下,10 s 内挤出材料的质量为 0.047 g。根据实际成形经验, h 一般设为 0.15~0.25 mm, v 一般为 15~20 mm/s,计算的挤丝宽度结果如图 7 所示。

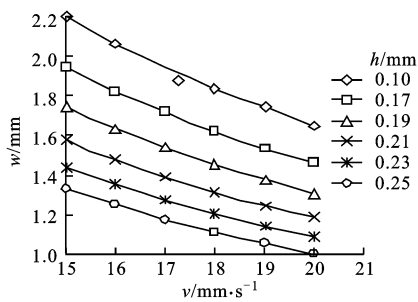


图 7 挤丝宽度计算结果

2.3 扫描间距的确定

图 8 为在不同扫描间距工艺条件下,熔融挤压快速成形制件的表面形貌。理论上扫描间距 e 应该等于 w ,即相邻的丝应刚好贴合在一起。在快速成形工艺过程中,若 e 过大,超过了 w ,则快速成形制件实体内部不能完全填充(见图 8a),这将导致制件内部组织疏松,制件强度降低;若 e 小于 w ,相邻熔融挤出丝将发生重叠现象(见图 8c),将导致成形表面皱褶,影响制件的粗糙度和精度,甚至导致成形过程失败。

3 结 论

本文针对气压熔融挤压快速成形改性石蜡的成丝及成形性能进行了研究,改性石蜡的熔融挤压丝的黏度随硬脂酸镁含量的增加而增加,但其在气压作用下从喷嘴挤出时,由于丝材直径增加,从而使直径的均匀性降低,影响了成丝性能。当改性石蜡和硬脂酸镁的质量比为 10 : 1 时,因为黏度降低,在成形过程中丝材与丝材之间表现出脱黏现象,使成形性能受到影响。通过实验确定出石蜡与硬脂酸镁的合适质量比为 8 : 1,建立了熔融挤出丝宽度与熔融挤出丝速率、扫描速度和分层厚度之间的数学模型,并给出了挤丝宽度与喷嘴扫描速度及分层厚度的匹配关系。

本文通过实验,验证了挤丝宽度与扫描间距对熔融挤压快速成形制件质量的影响。实验表明,当扫描间距小于挤丝宽度时,成形件表面粗糙度增加,当扫描间距大于挤丝宽度时,制件内部疏松,而适当的扫描间距,可以保证制件快速成形的质量。

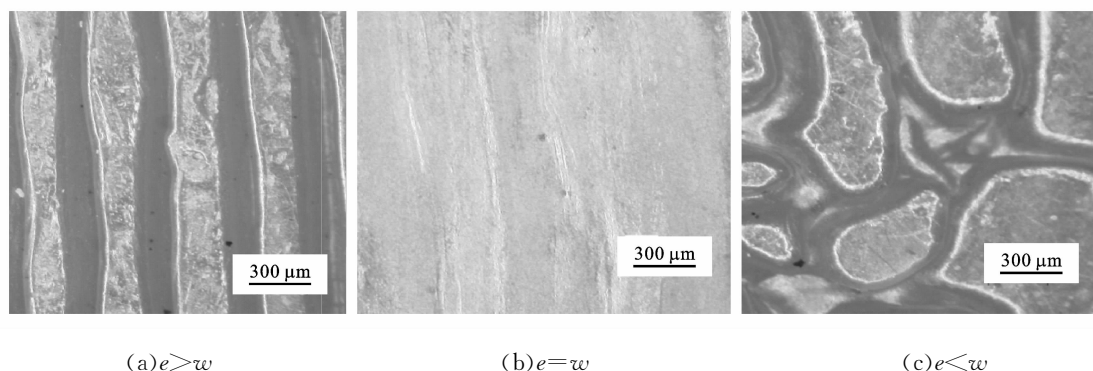


图8 扫描间距对成形质量的影响

参考文献:

- [1] XUE Yan, GU P. A review of rapid proto-typing technologies and systems [J]. Computer-Aided Design, 1996, 28(4):307-318.
- [2] 陈中中, 李涤尘, 卢秉恒. 气压式熔融沉积快速成形系统 [J]. 电加工与模具, 2002(2):9-12.
CHEN Zhongzhong, LI Dichen, LU Bingheng. Air-pressure jet solidification system [J]. Electromachining & Mould, 2002(2):9-12.
- [3] 赵萍, 蒋华, 周芝庭. 熔融沉积快速成形工艺的原理及过程 [J]. 机械制造与自动化, 2003(5):17-18.
ZHAO Ping, JIANG Hua, ZHOU Zhiting. The technology theory and process for fused deposition modeling rapid prototyping [J]. Machine Building & Automation, 2003(5):17-18.
- [4] 邹国林, 郭东明, 贾振元. FDM 工艺出丝过程影响因素分析 [J]. 制造技术与机床, 2002(10):32-35.
ZOU Guolin, GUO Dongming, JIA Zhenyuan. Analysis on influence factors of extrusion filament process of FDM [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2002(10):32-35.
- [5] 何新英, 潘夕琪, 刘晓红. FDM 工艺中的尺寸补偿 [J]. 机械与电子, 2006(4):70-72.
HE Xinying, PAN Xiqi, LIU Xiaohong. Compensation of measurement on fused deposition modeling [J]. Machinery & Electronics, 2006(4):70-72.
- [6] 罗晋, 叶春生, 黄树槐. FDM 工艺的重要参数及其控制

技术研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2006(6):77-80.

- LUO Jin, YE Chunsheng, HUANG Shuhuai. The study on the Important parameters and there control of FDM system [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2006(6):77-80.
- [7] 李国锋, 李小俊, 黄允兰, 等. 硬脂酸盐对石蜡油的增稠作用与其结构的关系 [J]. 化学研究与应用, 2001, 13(6):645-648.
LI Guofeng, LI Xiaojun, HUANG Yunlan, et al. Influence of stearate structure on the viscosity of stearate-paraffin oil system [J]. Chemical Research and Application, 2001, 13(6):645-648.

[本刊相关文献连接]

- 电子束熔融直接金属成型工艺的研究. 2007, 41(11):1307-1310.
- 小型低温余热发电系统膨胀机输出特性试验研究. 2009, 43(11):100-103.
- 铝衬底微等离子体阵列的制作与光电特性测量. 2008, 42(8):982-985.
- 环氧及其复合材料气固界面快脉冲闪络特性. 2008, 42(6):703-707.
- 高精度溶解度实验系统的研制与验证. 2007, 41(7):862-866.

(编辑 管咏梅)