

FDM 工艺缝隙模型及消除方法研究

赵庆红^{1,2}, 郭俊卿^{*1,2}, 陈拂晓^{1,2}, 张信民³

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 有色金属共性技术河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471023;

3. 洛阳天久铝业有限公司, 河南 洛阳 471023)

摘要: 熔融沉积成型作为一种成本低、稳定性高的快速成型工艺,在三维模型制造和新产品开发领域的应用不断扩大.针对熔融沉积成型制件中光栅线与轮廓线之间出现的缝隙,分析了其产生的原因并建立了缝隙熔合模型.将理论计算与实验结果进行对比,研究了光栅角度、路径宽度对缝隙面积的影响,获得了光栅角度 $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$ 时缝隙面积的变化规律,提出了减小孔状缝隙、避免线状缝隙产生的解决方案,为合理选择光栅角度和路径宽度,改善制件质量提供了科学依据.

关键词: 熔融沉积成型;缝隙熔合模型;光栅角度;路径宽度

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201801006

0 引言

熔融沉积成型(fused deposition modeling, 简称 FDM)技术利用热塑性材料的热熔性、黏结性等特点,在计算机控制下进行层层堆积叠加,最终形成所需产品或模型^[1].FDM 快速成型技术无需激光系统,因而使用及维护简单,运行费用低、可靠性高,在三维实体模型制造等领域得到了越来越广泛的应用^[1-2].FDM 制件的质量与工艺参数联系紧密.单独采用轮廓偏置线作为填充路径所得制件中易出现一个沿 Z 方向的稀疏带,对制件的物理性能造成不利影响,奇数层与偶数层采用不同路径填充可以改善制件质量^[3].Zhang 等^[4]基于鲁棒设计原理进行 FDM 工艺参数优化,指出路径宽度对制件质量的影响大于挤出速度、填充速度和层厚.Kaveh 等^[5]研究了工艺参数对 HIPS(high impact polystyrene,高抗冲聚苯乙烯)材料成型质量的影响,指出路径宽度较小时易产生填充不足,路径宽度较大时易过度堆积造成重叠.不同层厚对应的最佳路径宽度不同,层厚为 0.25 mm 路径宽度取 0.605 mm 时所得制件质量

较理想.层厚较大时,制件表面产生的台阶高度较大、台阶痕迹明显,表面质量和精度较差;反之,制件表面质量较好,但需要加工的层数增多,加工效率降低^[6-10].Lee 等^[11]应用 FDM 工艺制作 ABS 材质的玩具弹弩,通过测验指出光栅角度为 $30^\circ/60^\circ$ 时弹弩的射程最远,但缺乏光栅角度对产品表面质量影响的研究.本文主要针对 FDM 成型工艺中产生的缝隙建立数学模型,并将模型计算与实验结果进行对比分析.

1 缝隙分析与熔合模型的建立

1.1 成型平面路径与缝隙

FDM 工艺是通过热熔丝料沉积成型,路径宽度和光栅角度是对成型质量有重要影响的工艺参数.路径宽度是指热熔丝料进行堆积时每道丝料的设定宽度,光栅角度是指 X-Y 平面内热熔丝料堆积路径方向与成型室内 X 轴正方向的夹角,如图 1 所示.

由于丝料具有一定的宽度且是熔融态,按照设定路径进行连续填充时,虽然转折处是尖角路

径但实际填充效果呈圆弧状,不能完全与周围的丝料相熔合,从而导致外部轮廓线与内部光栅线熔合处出现一定缝隙,路径宽度和光栅角度是影响缝隙大小的主要因素。

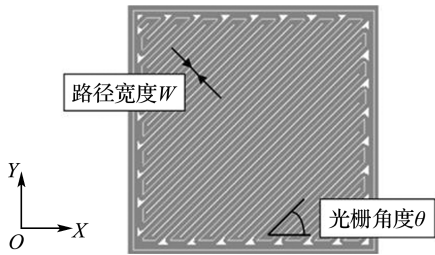


图1 FDM 工艺 X-Y 成型平面上填充路径

Fig. 1 Fill path on X-Y plane of FDM process

1.2 缝隙熔合模型的建立

根据 X-Y 平面内丝料填充方式及外部轮廓线与内部光栅线之间的熔合情况,建立缝隙熔合模型。

光栅角度 $\theta = 0^\circ$ 时,光栅线与轮廓线相互平行,其熔合效果主要受到路径宽度的影响:路径宽度 W 能够被制件 Y 方向的尺寸整除时,熔合效果最佳,无缝隙;若路径宽度 W 不能被制件 Y 方向的尺寸整除,易出现缝隙。设 Y/W 的余数为 R ,内部光栅线以制件 X-Y 平面的中心为参考中心,将缝隙均分给对称的两边,则光栅线与轮廓线之间的缝隙宽度为 $R/2$ 。 R 越小熔合效果越佳。

光栅角度 $\theta \in (0^\circ, 90^\circ]$ 时,光栅线与轮廓线之间的熔合形态如图 2 所示。图中阴影部分即为光栅线与轮廓线之间产生的熔合缝隙。

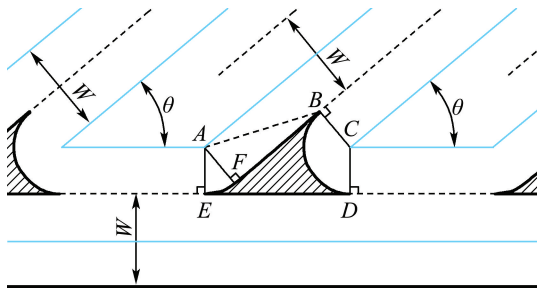


图2 $\theta \in (0^\circ, 90^\circ]$ 时缝隙熔合模型

Fig. 2 Gap fusion model while $\theta \in (0^\circ, 90^\circ]$

缝隙面积

$$S_{\text{gap}} = S_0 - (S_1 + S_2 + S_3) \quad (1)$$

式中: S_0 为多边形 ABCDE 的面积, $S_0 = \frac{W^2}{4 \tan \theta} + \frac{W^2}{2 \sin \theta}$; S_1 为三角形 ABF 的面积, $S_1 = \frac{W^2}{4 \tan \theta}$; S_2 为扇形 AEF 的面积, $S_2 = \frac{\theta}{2\pi} \cdot \pi \cdot \left(\frac{W}{2}\right)^2 = \frac{\theta \cdot W^2}{8}$; S_3 为扇形 BCD 的面积, $S_3 = \frac{\pi - \theta}{2\pi} \cdot \pi \cdot \left(\frac{W}{2}\right)^2 = \frac{(\pi - \theta) \cdot W^2}{8}$ 。

由此可知 $\theta \in (0^\circ, 90^\circ]$ 时,光栅线与轮廓线之间的缝隙面积为

$$S_{\text{gap}} = \left(\frac{1}{2 \sin \theta} - \frac{\pi}{8} \right) W^2 \quad (2)$$

其中 $\theta = 90^\circ$ 时, $S_1 = 0$, 光栅线与轮廓线之间的熔合形态如图 3 所示,阴影部分面积为

$$S_{\text{gap}} = \frac{(4 - \pi) W^2}{8} \quad (3)$$

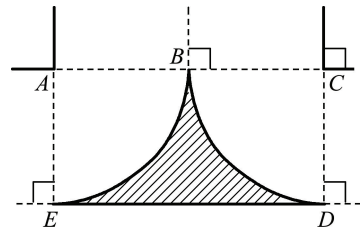


图3 $\theta = 90^\circ$ 时缝隙熔合形态

Fig. 3 Gap fusion description while $\theta = 90^\circ$

当路径宽度 W 已确定,光栅角度 $\theta \in (0^\circ, 90^\circ]$ 时,随着 θ 增大,光栅线与轮廓线之间的缝隙面积 S_{gap} 不断减小,当 $\theta = 90^\circ$ 时, S_{gap} 取得最小值 $\frac{(4 - \pi) W^2}{8}$ 。当光栅角度 θ 已确定,缝隙面积 S_{gap}

是路径宽度 W 的二次函数, W 越大, S_{gap} 越大,且随着 W 增大 S_{gap} 增大得更快。

2 实验方案

本实验以路径宽度和光栅角度为因素,实验因素与水平表如表 1 所示。实验设备为美国 Stratasys 公司的 Fortus-360MC 快速成型机,填充路径采用单圈光栅线与轮廓线相结合,奇数层与偶数层光栅线方向垂直。制件尺寸为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,为兼顾制件表面质量与成型效率,层厚取 0.254 mm 。

制件后处理方法:在 25% 的 NaOH 水溶液中

经超声波清洗 1 h 溶解底座支撑材料后,用蒸馏水洗涤去除残余 NaOH,最终将制件置于 75 ℃干燥箱中烘干 2 h.

表 1 实验因素与水平表

Tab.1 Control factors and their levels table

水平	因素	
	路径宽度/mm	光栅角度/(°)
1	0.616	0
2	0.638	15
3	0.660	30
4	—	45
5	—	60
6	—	75
7	—	90

选取制件上表面边长中段,利用 OLYMPUS 显微镜对缝隙进行 5 次测量,将所得数据剔除最大值和最小值后取平均值.对于光栅角度 $\theta=0^\circ$ 的制件,测量缝隙宽度误差范围为 $\pm 0.006\text{ mm}$;光栅角度 $\theta\in(0^\circ,90^\circ]$ 时,测量缝隙面积误差范围为 $-0.004\sim 0.003\text{ mm}^2$.

3 结果与讨论

光栅角度 $\theta=0^\circ$ 时,若路径宽度不能被制件 Y 方向的尺寸整除,模型缝隙宽度等于 $R/2$. 路径宽度为 0.616、0.638、0.660 mm 时, $R/2$ 分别为 0.175、0.255、0.364 mm. 光栅线与轮廓线之间的实际熔合情况如图 4 所示. 由于丝料冷却固化时受到下面一层材料和周围材料的影响收缩不均

匀,同一制件同一条缝隙各处的宽度有轻微波动. 图 4(a)~(c) 中缝隙平均宽度分别为 0.145、0.227、0.341 mm,图 4(a) 中熔合缝隙最窄,(b) 次之,(c) 最宽. 实验结果与模型预测规律一致: R 较小时熔合效果较好, R 增大缝隙也由窄变宽.



(a) 缝隙平均宽度 0.145 mm (b) 缝隙平均宽度 0.227 mm (c) 缝隙平均宽度 0.341 mm

图 4 $\theta=0^\circ$ 时,光栅线与轮廓线之间实际缝隙

Fig.4 Actual gap between rasters and contours while $\theta=0^\circ$

光栅角度 $\theta\in(0^\circ,90^\circ]$ 时,模型计算值与实验测量的缝隙面积对比图如图 5 所示,以 $\theta=30^\circ$ 为例, $W=0.616\text{ mm}$ 、 0.638 mm 、 0.660 mm 时的模型缝隙面积分别为 0.230、0.247、0.265 mm^2 ,实际测量值分别为 0.201、0.236、0.243 mm^2 ,实际缝隙小于模型缝隙,缝隙随着路径宽度增大而增大. 以 $W=0.638\text{ mm}$ 时为例,随着光栅角度增大缝隙面积减小,且减小的趋势变缓. 实际缝隙面积与模型预测面积变化规律一致,光栅线与轮廓线之间的缝隙面积随着光栅角度增大而减小, $\theta=90^\circ$ 时缝隙面积最小. 实际缝隙面积略小于模型缝隙面积,这是因为实际填充时光栅线与轮廓线路径平行处、光栅线路径拐折处丝料扩散熔合使微

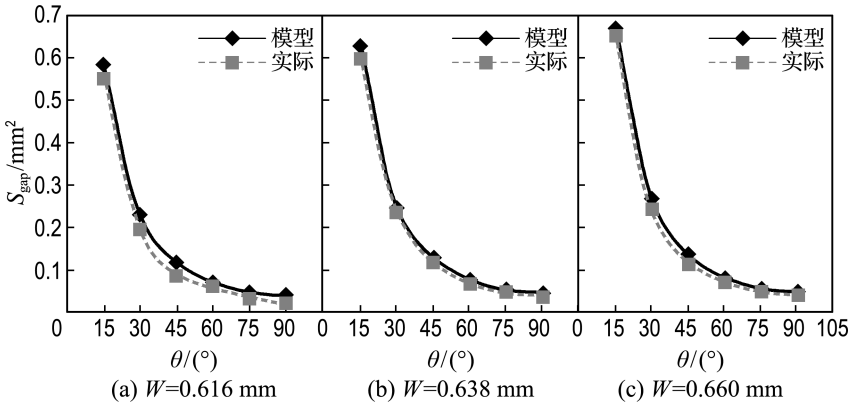


图 5 模型与实际缝隙面积对比

Fig.5 Contrast of model and actual gap area

小角隙得到了填充. 图 6 中(a)~(f)分别为光栅角度 $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时的实际熔合缝隙.

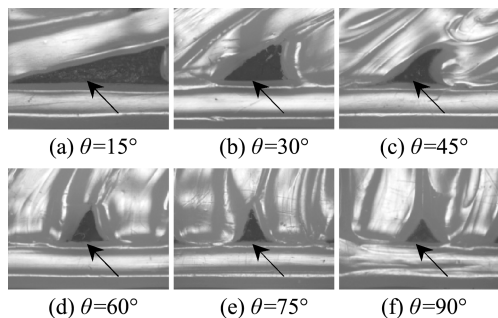


图 6 光栅线与轮廓线之间实际缝隙
($W=0.660\text{ mm}$)

Fig. 6 The actual gap among rasters and contours
($W=0.660\text{ mm}$)

制件中光栅线与轮廓线之间的缝隙有线状和孔状两种形态. $\theta=0^\circ$ 与 $\theta=90^\circ$ 时获得的制件, 两条对边的缝隙为线状、另两条对边的缝隙为孔状. $\theta \in (0^\circ, 90^\circ)$ 时, 4 条边上都是孔状缝隙. 通过改善熔合状况可以消除线状缝隙, 而孔状缝隙只能减小无法消除.

相同路径宽度, $\theta=0^\circ$ 与 $\theta=90^\circ$ 时获得的制件相同. $W=0.616\text{ mm}$, $\theta=0^\circ$ 与 $\theta=90^\circ$ 时所得制件的光栅线与轮廓线之间熔合效果较好、缝隙较小. 对于 X、Y 方向尺寸相同 ($X=Y$) 的制件, 选择能被制件 Y 方向尺寸整除的较小路径宽度、 $\theta=0^\circ$ 或 90° , 获得的制件光栅线与轮廓线之间熔合效果好, 两条对边无缝隙、另两条对边孔状缝隙小. 若 $X>Y$, 选择能被制件 Y 方向尺寸整除的较小路径宽度、 $\theta=0^\circ$, 能够获得两条长对边无缝隙、另两条短对边孔状缝隙很小的制件; 反之, 选择能被制件 X 方向尺寸整除的较小路径宽度、 $\theta=90^\circ$.

当实际所需光栅角度 $\theta \in (0^\circ, 90^\circ)$ 时, 所得制件中光栅线与轮廓线之间的缝隙形态为孔状, 可以结合实际设计较小的光栅角度和路径宽度来减小缝隙. 或者尝试在光栅线与轮廓线熔合处减小光栅线的填充速度、增大填充材料量使孔状缝隙减小, 但该设备不具备条件.

4 结 论

(1) 光栅角度 $\theta=0^\circ$ 或 90° 时, 光栅线与轮廓线

之间会出现线状缝隙, 线状缝隙大小与路径宽度 W 有关: 制件 Y 方向尺寸除以路径宽度所得余数 R 越小, 熔合效果越好、线状缝隙宽度越小. 对于确定的路径宽度 W , $\theta=0^\circ$ 或 90° 时, 孔状缝隙最小.

(2) 当光栅角度 θ 为 $(0^\circ, 90^\circ)$ 的一个确定值时, 光栅线与轮廓线之间只有孔状缝隙, 孔状缝隙面积随着路径宽度 W 增大而增大, 且增大速度变快. 若路径宽度 W 为确定值, 光栅角度 $\theta \in (0^\circ, 90^\circ)$ 时, θ 越大, 则光栅线与轮廓线之间的孔状缝隙越小, 且减小趋势变缓.

(3) 为获得无线状缝隙且孔状缝隙很小的制件, 应让线状缝隙出现在制件的长边上、孔状缝隙出现在短边上, 路径宽度设置为可以被短边尺寸整除的较小值. 在光栅线与轮廓线转折熔合处减小光栅线的填充速度、增大填充材料量或许有利于减小孔状缝隙, 但该设备不具备条件, 应根据快速成型设备及程序等展开进一步研究.

参考文献:

- [1] 韩霞, 杨思源. 快速成型技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 47.
HAN Xia, YANG Enyuan. **Rapid Prototyping Technology and Application** [M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 47. (in Chinese)
- [2] 王广春, 赵国群. 快速成型与快速模具制造技术及其应用 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2013: 91.
WANG Guangchun, ZHAO Guoqun. **Rapid Prototyping and Rapid Tooling Manufacturing Technology and Applications** [M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2013: 91. (in Chinese)
- [3] 范丽荣, 任 翀, 曹一青. FDM 工艺快速成型技术中均匀壁厚截面填充路径的优化 [J]. 中国制造业信息化, 2011, 40(11): 39-41.
FAN Lirong, REN Chong, CAO Yiqing. Filling path optimization of consistent thickness in FDM rapid prototyping technology [J]. **Machine Design and Manufacturing Engineering**, 2011, 40(11): 39-41. (in Chinese)
- [4] ZHANG Jianfeng, PENG Anhua. Processing parameter optimization of FDM based on robust design [J]. **Transactions of Nanjing University of**

- Aeronautics & Astronautics**, 2012, **29**(1):62-67.
- [5] KAVEH M, BADROSSAMAY M, FOROOZMEHR E, *et al.* Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2015, **226**: 280-286.
- [6] BOSCHETTO A, GIORDANO V, VENIALI F. 3D roughness profile model in fused deposition modelling [J]. **Rapid Prototyping Journal**, 2013, **19**(4):240-252.
- [7] MOHAMED O A, MASOOD S H, BHOWMIK J L. Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion [J]. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, 2016, **81**: 174-196.
- [8] 邹国林, 郭东明, 贾振元, 等. 熔融沉积制造工艺参数的优化[J]. 大连理工大学学报, 2002, **42**(4): 446-450.
- ZOU Guolin, GUO Dongming, JIA Zhenyuan, *et al.* Research on process parameter optimization of fused deposition modeling [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2002, **42**(4):446-450. (in Chinese)
- [9] 黄 丹, 张效迅, 习 武, 等. 基于 FDM 工艺的打印件成型时间与力学性能的研究[J]. 塑料工业, 2016, **44**(3):89-93.
- HUANG Dan, ZHANG Xiaoxun, XI Wu, *et al.* The research of the printing time and mechanical properties of the printout based on FDM process [J]. **China Plastics Industry**, 2016, **44**(3):89-93. (in Chinese)
- [10] 彭安华, 张剑峰, 张江林. FDM 工艺参数对制件精度影响的实验研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2008, **17**(1):21-24.
- PENG Anhua, ZHANG Jianfeng, ZHANG Jianglin. Experimental research into the influence of technical parameters on parts precision [J]. **Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Sciences Edition)**, 2008, **17**(1):21-24. (in Chinese)
- [11] LEE B H, ABDULLAH J, KHAN Z A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2005, **169**:54-61.

Research on gap model and elimination method in FDM process

ZHAO Qinghong^{1,2}, GUO Junqing^{*1,2}, CHEN Fuxiao^{1,2}, ZHANG Xinmin³

- (1. College of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2. Collaborative Innovation Center of Nonferrous Metals, Henan Province, Luoyang 471023, China;
3. Luoyang Tianjiu Aluminum Co., LTD, Luoyang 471023, China)

Abstract: As a rapid prototyping technology with low cost and high stability, the application of FDM (fused deposition modeling) process is increasing in the field of three dimensional model manufacturing and new product development. The gap fusion model is established for the gap among rasters and contours according to its generation mechanism, and then the theoretical calculation is compared with the experimental results. The conclusion points out the influence of raster angle and fill path width to gap area. Variation regularity of gap area affected by raster angle ($\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$) is analyzed detailedly. Solutions to reduce the poroid gap and avoid the threadlike gap are indicated, which have directive significance to choose reasonable raster angle and fill path width and improve the quality of FDM parts.

Key words: fused deposition modeling; gap fusion model; raster angle; fill path width