

聚苯乙烯快速成形加工参数对表面粗糙度的影响

孙琨, 方亮, 叶庆光, 黄晓慧, 严伟林
(西安交通大学材料科学与工程学院, 710049, 西安)

摘要: 介绍了一种已获得国家发明专利的消失模铸造模样加工技术——聚苯乙烯快速成形技术. 该技术采用计算机控制点热源非接触分层气化聚苯乙烯泡沫塑料材料, 从而实现模样的三维快速加工. 通过理论分析, 确定了模样的表面粗糙度与聚苯乙烯快速成形技术加工参数之间的关系, 并通过正交试验方法获得了最佳的加工参数组合: 加工速度 35 mm/s、刀具温度 400 °C、分层厚度 0.1 mm. 按照最佳加工参数组合加工的铸造模样, 表面粗糙度达到了消失模铸造要求, 从而实现了高效、低成本、高精度地制作消失模铸造模样的目标.

关键词: 聚苯乙烯泡沫塑料模样; 快速成形; 加工参数; 表面粗糙度

中图分类号: TG242.7; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)03-0344-04

Influence of Process Parameters on Surface Roughness in Rapid Manufacturing for Expandable Polystyrene Pattern

Sun Kun, Fang Liang, Ye Qingguang, Huang Xiaohui, Yan Weilin
(School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel technology, rapid prototyping for expandable polystyrene pattern, is introduced, where unnecessary part of the pattern is evaporated by the laminated method with a pin hot knife. The influence of process parameters on the surface roughness of expandable polystyrene pattern is analyzed. The optimal process parameters, such as cutting speed 35 mm/s, knife temperature 400 °C and layered thickness 0.1 mm, are experimentally obtained and combined to meet the surface roughness criterion of lost foam casting. The proposed technology is of higher efficiency and precision, and lower cost.

Keywords: expandable polystyrene pattern; rapid prototyping; process parameter; surface roughness

快速成形技术兴起于 20 世纪 80 年代, 经过国内外学者二十多年来的研究, 在成形理论和制造工艺方面都已比较成熟, 并且已经实现了商业化生产. 以快速成形技术为核心, 结合其他制造工艺, 形成了新的制造理念和技术——快速制造技术. 特别是快速成形技术和制造业的基础行业——铸造技术相结合, 具有重大的工业意义, 是快速成形技术发展的必然趋势^[1-2]. 快速成形技术与铸造技术相结合既可制造单件、小批量的金属零件和模具, 具有生产周期短、制造成本低、选材自由度大的特点, 亦可生产大

型金属零件, 特别是对形状复杂或具有内腔的金属零件, 其优越性更加明显. 但是, 由于目前商品化快速成形设备的成型材料主要是光敏树脂(SL 工艺)、纸(LOM 工艺)等难气化材料, 因此当使用原型作为陶瓷型、石膏型精密铸造的铸造模样时, 必然存在设计拔模斜度及分型面的工艺过程, 极大地影响了铸件的精度^[3-4]. 为提高铸造精度, 人们已经大量采用易气化聚苯乙烯(EPS)材料作为真空消失模铸造的模型, 以便实现净成形铸造. 聚苯乙烯泡沫成形加工技术主要有两种方法: ①对大批量生产, 采用一次

发泡聚苯乙烯泡沫珠粒在模具中发泡成型的方法,这种方法除需要在专用设备中成形外,还需要价格昂贵的金属模具;②对单件、小批量生产,往往采用电热丝手工切割成形,但这种方法加工效率低,精度及表面光洁度差,只能完成简单二维切割任务.由于上述聚苯乙烯泡沫塑料的加工成形方法存在一定缺陷,因而限制了真空消失模铸造技术的进一步推广.

针对聚苯乙烯泡沫塑料的快速成形技术,国外学者进行了大量的研究工作:Ahn 等人^[5-6]研究了四轴、四维电热丝分层加工聚苯乙烯模型的快速成形技术,该技术可以完成聚苯乙烯泡沫塑料制品成形,但对较复杂的三维实体成形及三维实体中的细节部分的成形则无能为力;Hamade 等人^[7]研究了使用五轴机械臂作为运动机构、用弯曲的电热丝加工聚苯乙烯泡沫塑料制品的系统,这种技术的缺点是使用五轴机械臂作为运动机构使得设备成本剧增,弯曲的电热丝加工使得零件表面精度难以提高;Jouaneh 等人^[8]研究了五轴门式机器人加工系统,使用几种基本几何外形的热丝刀具作不同的组合,来加工简单的聚苯乙烯泡沫塑料三维形状,但该技术加工三维结构表面的能力受限于热丝刀具的几何外形;Broek 等人^[9]针对大尺寸聚苯乙烯泡沫塑料模型的制作问题,提出修正柔性刀具形状的厚层分层加工思想,但是该技术的算法复杂,刀具形状修正非常困难.目前,聚苯乙烯泡沫塑料快速成形技术研究中的问题不是设备投资昂贵,就是三维加工能力较差.因此,如何实现高效、低成本、高精度加工聚苯乙烯泡沫塑料零件,已成为迫切需要解决的问题.

1 影响加工表面质量的因素

本课题组所研发的聚苯乙烯泡沫塑料快速成形技术,是点热源非接触加工技术和快速成形技术的叠层制造法完美结合的一种新的加工技术^[10],已获得国家发明专利授权,其关键技术主要包括:①开放的 CAD 接口技术;②多重分层、多方向扫描加工技术;③非接触热源去除加工概念和技术;④柔性热刀快速成形复杂型面技术;⑤基于树状拓扑结构的加工路径算法;⑥低成本、高精度的超静定运动系统设计;⑦低成本的基于 DSP 芯片的控制电气系统设计技术.

聚苯乙烯泡沫塑料三维快速成形技术的原理是:首先利用各种 CAD 软件对 EPS 模样进行三维实体造型设计,得到 STL 格式的数据文件;在三维造型设计完成后,利用数据准备软件依照层厚尺寸

对产品的 STL 文件进行切片分层处理,得到一组平行的层切轮廓数据;在上述制作数据生成完备并设定好各项工艺参数后,在计算机系统的控制下,利用电热刀具尖端的热效应,非接触气化 EPS 原料上多余部分而形成极薄的一层零件实体;随后,工作台上升一层的厚度,进行下一层的加工,如此反复逐层加工,最终实现产品三维原型的快速加工.如果零件原型尺寸超出设备的最大加工尺寸,则需按最大加工尺寸将零件分块,块内按上述步骤逐层加工,然后将所有加工完成的 EPS 分块实体装配在一起,形成完整的零件原型.聚苯乙烯泡沫塑料快速成形系统的结构如图 1 所示,这种新的快速成形工艺实现了复杂形状 EPS 模样高效、低成本、高尺寸精度的制作,突破了快速成形工艺对所加工材料的选择限制,使得分层加工非流动性厚材成为可能.

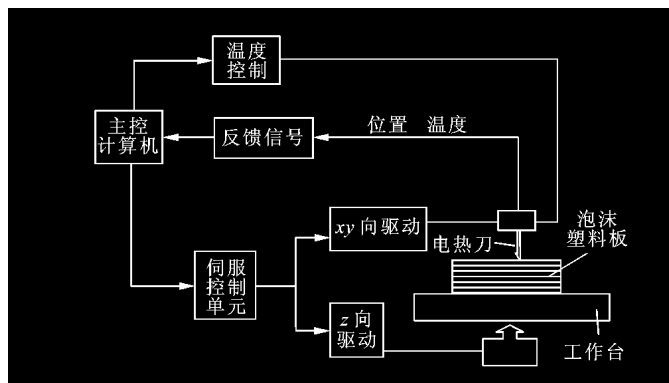


图1 聚苯乙烯泡沫塑料快速成形系统结构图

真空消失模铸造技术作为一种主要的近净成形技术,要求聚苯乙烯铸造模样不仅要有较高的形状和尺寸精度,同时还要有低的表面粗糙度,以达到不必再次加工而直接使用的目的.因此,低表面粗糙度的铸造模样加工对聚苯乙烯泡沫塑料快速成形技术具有重要意义.

通过试验观察知道,聚苯乙烯快速成形机在加工过程中,电热刀以一定的温度和速度非接触气化切割聚苯乙烯泡沫塑料材料,在热扩散的影响下会在聚苯乙烯材料表面形成一定宽度和深度的近似圆锥状气化区,如图 2 所示,图中 H 为气化区深度, W 为气化区宽度. 气化区的边缘形状可近似认为是与垂直面成 ϕ 角的斜面,在此定义 ϕ 为热影响角. 当原型具有 θ 倾斜角的轮廓时,电热刀非接触气化切割聚苯乙烯泡沫塑料后的原型表面形状如图 3 所示,图中虚线为设计轮廓形状,实线为实际加工的轮廓形状.

根据图形学知识可知,任何形状都可以表示成为多个凸形的组合,所以本文只针对凸形零件进行

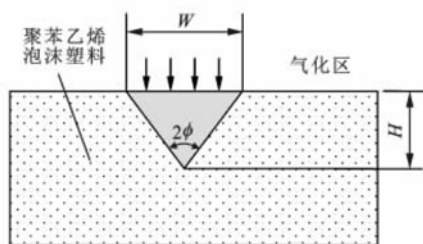


图2 聚苯乙烯泡沫塑料上加工轨迹的垂直截面图

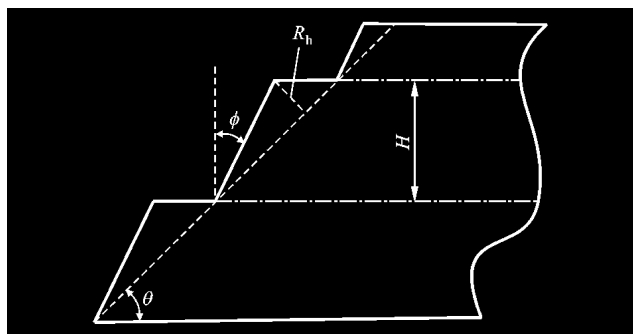


图3 斜角原型的加工表面形状示意图

分析,在实际加工时也是分成多个凸形部件分别加工,然后再装配成为一个完整零件。根据代数几何知识,可以计算出图3中的最大形状误差

$$R_h = \frac{H}{\cos\phi} \cos(\theta + \phi) \quad (1)$$

再由表面粗糙度的定义,容易得到具有 θ 倾斜角原型的表面粗糙度

$$R_a = R_h/2 = \frac{H}{2\cos\phi} \cos(\theta + \phi) \quad (2)$$

由式(2)可知,表面粗糙度与 H 成正比,同时还与原型的倾斜角 θ 和热影响角 ϕ 有关。同时由图2知道,对于特定的聚苯乙烯泡沫塑料,影响其原型表面粗糙度的主要因素是快速成形机的加工工艺参数,主要包括分层厚度、加工刀具温度和加工速度等。

2 加工参数选择

通过文献[11]可知,聚苯乙烯泡沫塑料的大致加工参数范围为:加工温度 $t=300\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$;加工速度 $v=20\sim 50\text{ mm/s}$ 。为了获得高表面质量的聚苯乙烯泡沫塑料原型,本文采用正交试验研究了分层厚度 h 、加工速度、刀具温度的最佳工艺参数组合。正交表采用 $L_{16}(4^3)$ 的正交表[12],因素水平见表1。

采用表1中的温度、速度、分层厚度加工如图4所示的四棱台模型,各侧面的夹角分别为 20° 、 45° 、 70° 。加工完成之后测量各个斜面的粗糙度,数据记录见表2。

根据试样的表面粗糙度综合指标,用数学统计的原理对试验数据进行级差分析,结果见表3。

表1 因素水平表

水平	因素		
	$v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$t/^{\circ}\text{C}$	h/mm
1	15	250	0.05
2	25	300	0.10
3	35	350	0.20
4	45	400	0.30

表2 试验数据

编号	因素			粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$			
	$v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$t/^{\circ}\text{C}$	h/mm	20°	45°	70°	综合指标
1	15	250	0.05	32	35	25	31
2	15	300	0.10	53	38	17	36
3	15	350	0.20	94	68	22	61
4	15	400	0.30	132	82	16	77
5	25	250	0.10	54	39	19	37
6	25	300	0.20	97	68	27	64
7	25	350	0.30	139	66	31	79
8	25	400	0.05	30	21	11	21
9	35	250	0.20	98	68	28	65
10	35	300	0.30	140	66	31	79
11	35	350	0.05	32	24	13	23
12	35	400	0.10	50	32	11	31
13	45	250	0.30	142	77	37	85
14	45	300	0.05	31	23	12	22
15	45	350	0.10	52	38	19	36
16	45	400	0.20	97	68	27	64

表3 级差分析

项目	因素		
	v	t	h
K_{1j}	205	218	97
K_{2j}	201	201	140
K_{3j}	198	199	254
K_{4j}	207	193	320
M_{1j}	51.25	54.50	24.25
M_{2j}	50.25	50.25	35
M_{3j}	49.50	49.75	63.50
M_{4j}	51.75	48.25	80
R_j	2.25	6.25	55.75

注: K_{ij} 为第 j 因素第 i 水平上所有综合指标之和; M_{ij} 为第 j 因素第 i 水平上所有综合指标的平均值, $M_{ij} = K_{ij}/N$, N 为第 i 水平出现的次数; R_j 为第 j 因素的级差, $R_j = \max_i \{M_{ij}\} - \min_i \{M_{ij}\}$ 。

根据表3的级差分析可知,对聚苯乙烯泡沫塑料原型表面粗糙度影响最显著的因素是分层厚度,显

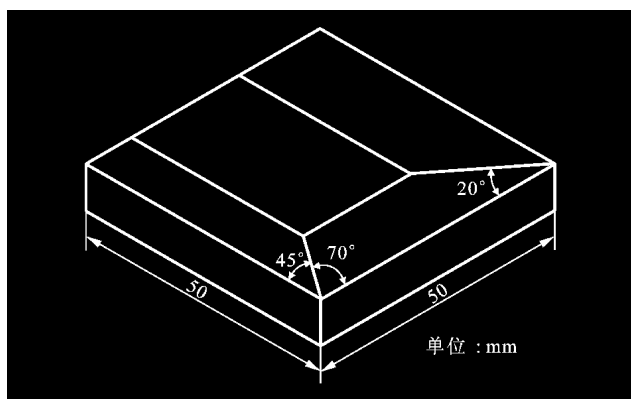


图4 正交试验四棱台模型

著因素是加工温度,次显著因素为加工速度.根据表3中的 $K_{1j} \sim K_{4j}$ 值,获得了制作低表面粗糙度聚苯乙烯泡沫塑料原型的加工参数组合:加工速度取3水平——35 mm/s;刀具温度取4水平——400 °C;分层厚度取1水平——0.05 mm.

通过对表3的分析可以看出,聚苯乙烯泡沫塑料快速成形技术与现有的快速成形技术一样,分层厚度越小,表面质量就越高,成形时间也越长.因此,考虑到质量和效益的统一,本文在不太降低原型表面质量的情况下,适当采用较大的加工层厚,分层厚度选择2水平——0.1 mm,由此获得的聚苯乙烯泡沫塑料快速成形机的最佳加工参数组合为:加工速度35 mm/s;刀具温度400 °C;分层厚度0.1 mm.

3 应用实例

应用本文所获得的最佳加工参数,选择密度为18 kg/m³的聚苯乙烯泡沫塑料,加工出的聚苯乙烯泡沫塑料原型如图5、图6所示,原型的表面粗糙度 R_a 均小于35 μ m.



图5 汉代壁画原型

4 结论

聚苯乙烯泡沫塑料快速成形技术实现了单件小批量复杂形状铸造模样的高效、低成本、高精度制



图6 交通大学校徽原型

作,给消失模铸造工艺的模样制造技术注入了新的活力.

理论分析结果表明,在聚苯乙烯泡沫塑料材料一定的情况下,影响聚苯乙烯泡沫塑料原型表面粗糙度的主要因素是快速成形机的加工工艺参数,主要包括分层厚度、加工刀具温度和加工速度等.根据正交试验获得的聚苯乙烯泡沫塑料快速成形机的最佳加工参数组合为:加工速度35 mm/s;刀具温度400 °C;分层厚度0.1 mm.按照此最佳加工参数组合,用聚苯乙烯泡沫塑料快速成形机加工的铸造模样的表面粗糙度 R_a 小于35 μ m,达到了消失模的铸造要求.

参考文献:

- [1] 黄天佑,闻星火.快速成型技术及其在铸造中的应用[J].铸造,1995(2):38-42.
- [2] 卢秉恒,唐一平,李涤尘.激光快速成型制造技术的发展与应用[C]//全国高等学校机床学研究会会议论文集.北京:中国机械工程学会生产分会,1997:101-106.
- [3] 周雄辉,邢渊,阮雪榆.集成化快速模具制造技术[C]//98全国快速成型与模具快速制造会议论文集.西安:陕西科学技术出版社,1998:238-241.
- [4] 姜不居,闫双景,崔占良,等.快速金属模具制造[J].特种铸造及有色合金,1999(1):44-47.
Jiang Buj, Yan Shuangjing, Cui Zhanliang, et al. Rapid metal die casting [J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 1999(1): 44-47.
- [5] Ahn D G, Lee S H, Yang D Y. Investigation into development of progressive-type variable lamination manufacturing using expandable polystyrene foam and its apparatus[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2002, 216(9): 1239-1252.
- [6] Ahn D G, Lee S H, Yang D Y. Development of transfer type variable lamination manufacturing (VLM-ST) process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(14): 1577-1587.
- [7] Hamade R F, Zeineddine F, Akle B. Modelangelo: a

- subtractive 5-axis robotic arm for rapid prototyping[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2005, 21(2): 133-144.
- [8] Jouaneh M, Hammad A, Datseris P. Flexible automated foam cutting system[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1997, 37(4): 437-449.
- [9] Broek J J, Kooijman A. Exploration of local blade motions during blade shaping for thick layered foam[C]// *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*. New York: ASME Technical Publisher, 2004: 1003-1010.
- [10] 方亮,孙琨,徐学武,等. 聚苯乙烯泡沫塑料模型的快速成型方法及其加工设备: 中国, ZL 03134410.0[P]. 2006-03-15.
- [11] 梁光泽. 实型铸造[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986: 126-134.
- [12] 颜钰芬,徐明钧. 数理统计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992: 265-281.

(编辑 葛赵青)