

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.11.015

微圆柱阵列注射成型数值模拟及正交优化

陈泽中, 陈晨

(上海理工大学材料科学与工程学院, 上海 200093)

摘要:针对微圆柱阵列的注射成型过程进行数值模拟研究,比较了不同原料聚丙烯(PP)、聚甲醛(POM)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)的成型工艺,并利用正交试验就微注射成型过程中影响熔体填充效果的主要工艺参数如模具温度、熔体温度和注射时间进行了模拟。运用极差分析法和方差分析法对熔体填充率进行分析。结果表明,对于PP而言,填充时间对其填充率的影响占主导地位,而对于POM与ABS,模具温度的影响相对更大。模具温度、熔体温度越高,注射时间越短,塑件填充效果越好。综合考虑,三种聚合物材料对微圆柱阵列填充效果适应性为:PP > ABS > POM。

关键词:微圆柱阵列;数值模拟;正交优化;填充率

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)11-0067-04

Injection Molding Numerical Simulation and Orthogonal Optimization for Micro Column Array

Chen Zezhong, Chen Chen

(School of Material Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Numerical simulation for forming process of micro column array was studied. The forming processes of different injection materials such as polypropylene (PP), polyformaldehyde (POM), ABS were compared. The main process parameters influencing the micro-parts quality included mold temperature, melt temperature and filling time was simulated by orthogonal experiments. Based on the range analysis and variance analysis, the simulation results of the filling ratio were analyzed. The results showed that, for PP, the filling time had the greatest influence on filling ratio, as for POM and ABS, the mold temperature had a relatively higher influence. The higher the mold temperature and the injection temperature, the lower the injection time, resulted in the better filling ratio. Comprehensive consideration, the availability of polymer material on the micro column array was as follows: PP > ABS > POM.

Keywords: micro column array; numerical simulation; orthogonal optimization; filling ratio

随着微型件在微机电系统中应用越来越普遍,人们对其成型工艺提出了更高的要求。运用硅基材料或传统的微细加工方法成型微型件,已经很难满足人们的期望^[1-2]。而微注塑作为近十几年来兴起的微型制品成型工艺,具有如下优势:尺寸和形状适应性好,成型精度高,可连续化批量生产,加工成本低,加工效率高等,因此,对于微注塑的研究得到了人们越来越多的关注^[3-7]。

微注射成型工艺作为微注塑技术的主要研究内容之一,能很好地为提高成型质量提供技术参考和支持。微小型腔因其特征尺寸小、表体比大,若采用宏观注射成型的工艺参数,熔体将迅速冷却,流动性急剧下降,造成严重的短射^[8]。因此,为了尽可能地保证微型制件充填的完整性,应尽量提高模具温度, Su Y C 等^[9]通过调整凹形微结构填充过程中的

工艺参数,发现只有模具温度比成型材料的玻璃化转变温度高出 30 ~ 40 ℃时制品才能有好的填充效果。

用于微注射成型的聚合物材料要具有玻璃化转变温度低、黏度低、力学性能高、热稳定性好等特点。Shen Y K 等^[10]利用计算机模拟,选取了聚丙烯(PP)、聚甲醛(POM)、聚碳酸酯(PC)、尼龙(PA)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚苯乙烯(PS)这几种微注塑原料,发现PP最适合用来成型微齿轮,而PMMA最适合成型带有微穴结构的零件。PP, 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS), POM, PMMA,

联系人: 陈泽中, 副教授, 主要研究方向为材料加工新技术及模具 CAD/CAE/CAM

收稿日期: 2016-08-16

PC, PA, 液晶聚合物 (LCP) 和聚醚醚酮 (PEEK) 是现今用于微注射成型的主要材料。

笔者以微圆柱阵列研究对象,该阵列是微流控芯片的一种,即芯片试验室。它的大小一般只有数十平方厘米,可利用底板上的微通道或微结构来控制系统中流体的流向,并在上面进行化学和生物等领域中所涉及的样品制备、反应和检测等操作。因此,在药物筛选、有机物的合成以及环境监测等方面得到了广泛的应用^[11]。同时在光学、化学、通讯以及医疗等领域也有很大的实用价值,例如生物微针阵列、微生物芯片、光存储器、显微镜头以及微化学反应芯片等^[12]。

PP 由于有较好的填充性能,近年来被广泛运用于微圆柱阵列成型的研究中^[13-15],但在该零件的成型中,其它材料的成型效果研究却未见报道。笔者选取了 PP, POM 和 ABS 这三种适用于微注塑的材料,以填充率为指标,对该零件的成型效果进行了研究,并分析了各工艺参数对填充率的影响规律。

1 数值模拟分析及正交试验

1.1 微圆柱阵列几何模型

微圆柱阵列几何模型设计如图 1 所示。底板长 12 cm,宽 8 cm,厚度为 2 mm。微圆柱采用 5×7 的阵列形式,间隔为 1 mm,微圆柱直径为 0.2 mm,高度为 0.4 mm。

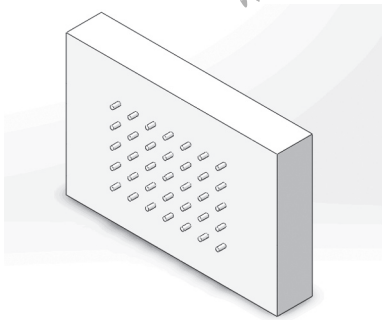


图 1 微圆柱阵列三维模型

1.2 数值模拟前处理

用 Hypermesh 对制品进行网格划分,然后导入 Moldflow。网格类型为 3D 四面体网格,底板和微圆柱采用不同的网格边长,底板网格边长为 0.4 mm,微圆柱网格边长为 0.06 mm。采用一模两腔注射方式,网格划分结果如图 2 所示。

1.3 微圆柱阵列注射成型工艺条件

选择的 PP, POM, ABS 的来源和牌号见表 1。微圆柱阵列在注射成型过程中常发生短射,即微圆

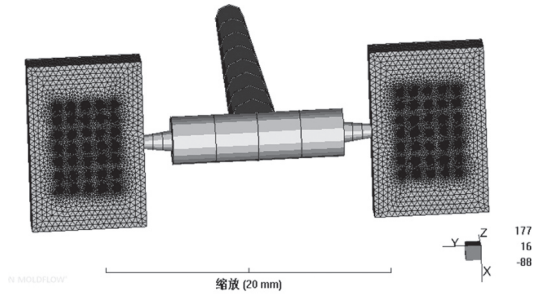


图 2 微圆柱阵列的网格划分

表 1 塑料原料

材料	制造商	牌号
PP	金发科技股份有限公司	API-3307
POM	宝理塑料株式会社	DURACON (R)M450-44
ABS	日本 UMG 公司	GF20

柱填不满的情况,因此将填充率作为目标试验指标,但由于微圆柱的体积占总体积的比例很小,传统的填充率计算方式不能直观表示填充率的变化趋势,所以这里的填充率=已填满的微圆柱个数/总的微圆柱个数,其中总的微圆柱个数为 70。试验证明由这种方式计算出的填充率变化趋势与 Moldflow 软件算出的填充率变化趋势一致。在选取数据前对三个主要因素模具温度 (A)、熔体温度 (B)、填充时间 (C) 分别进行了单因素的数值模拟,主要工艺参数见表 2~表 4。

表 2 PP 的主要成型参数

水平	A/℃	B/℃	C/s
1	40	200	0.35
2	50	210	0.45
3	60	220	0.55
4	70	230	0.65

表 3 POM 的主要成型参数

水平	A/℃	B/℃	C/s
1	60	200	0.6
2	70	210	0.7
3	80	220	0.8
4	90	230	0.9

表 4 ABS 的主要成型参数

水平	A/℃	B/℃	C/s
1	50	220	0.6
2	60	230	0.7
3	70	240	0.8
4	80	250	0.9

2 模拟结果分析

2.1 试验数据

利用 $L_{16}(4^3)$ 的正交表研究各个工艺参数对微圆柱阵列填充率的影响规律及影响程度,正交表的设计与试验结果如表 5 所示。

表5 试验设计及结果

试验号	A	B	C	填充率/%		
				PP	POM	ABS
1	1	1	1	77.1	67.1	34.3
2	1	2	2	68.6	62.9	25.7
3	1	3	3	55.7	58.6	28.6
4	1	4	4	45.7	54.3	30
5	2	1	2	71.4	65.7	34.3
6	2	2	1	91.4	77.1	45.7
7	2	3	4	52.9	58.6	35.7
8	2	4	3	68.6	74.3	41.4
9	3	1	3	68.6	68.6	45.7
10	3	2	4	61.4	64.3	42.9
11	3	3	1	94.3	91.4	88.6
12	3	4	2	91.4	90	85.7
13	4	1	4	68.6	74.3	87.1
14	4	2	3	84.3	85.7	90
15	4	3	2	100	91.4	100
16	4	4	1	100	100	100

2.2 模拟结果

(1) 极差分析。

各个因素对指标的影响程度体现为极差,极差越大,即该因素水平的变化对所选指标的影响越大,反之则影响越小。试验得到三种材料的极差分析如图3及表6所示,对于PP而言,注射时间的极差最大,说明注射时间对其填充率的影响最大,其次是模具温度,熔体温度对其影响程度最小。而对于POM和ABS,模具温度对它们的填充率的影响最大,注射时间次之,熔体温度的影响最小。

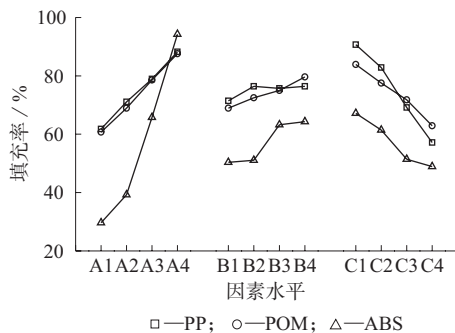


图3 正交模拟极差曲线

表6 填充率的极差分析

材料	A	B	C
PP	26.45	5.00	33.55
POM	27.12	10.72	21.02
ABS	64.63	13.93	18.22

试验发现,模具温度、熔体温度越高,注射时间越短,塑件填充效果越好,而注射时间对PP的填充率影响最大,推测其原因可能是PP是一种剪敏性材料,即它的流动性受剪切力的影响更大,注射时间越短,熔体流动速率越快,剪切力越大,导致剪切生

热,从而提高了它的填充率。而反观POM与ABS,可以发现模具温度对它们的填充率影响最大,尤其是ABS,极差值达到了64.43,说明它是温敏性材料,即增大模具温度能很好地提高它的流动性。

(2) 方差分析。

为了对试验结果进行进一步精确分析,根据方差分析理论,计算得三种材料各个因素的偏差平方和、F比和贡献率,如表7~表9所示。

表7 PP填充率的方差分析结果

因素	偏差平方和	F比	贡献率/%
A	1522.45	2.336	36.005
B	69.470	0.107	1.649
C	2636.9	4.045	62.346

表8 POM填充率的方差分析结果

因素	偏差平方和	F比	贡献率/%
A	1658.932	2.685	58.054
B	243.707	0.394	8.519
C	955.457	1.546	33.427

表9 ABS填充率的方差分析结果

因素	偏差平方和	F比	贡献率/%
A	10110.142	13.857	86.650
B	683.162	0.936	5.853
C	874.702	1.199	7.497

贡献率的值能更直观反映各个因素对填充率作用的大小,对于三种材料而言,熔体温度均对填充率的影响很小(贡献值分别为PP 1.649%, POM 8.519%, ABS 5.853%)。模具温度对ABS填充率的影响高达86.650%,为显著贡献因素。

通过以上分析,得出三种材料填充率的极差分析结果与方差分析结果完全吻合,说明正交试验设计和方差分析的方法在此很好地反映出了注塑结果的影响规律。但由于整个注塑过程是一个多因素相互作用、多目标决定成型质量的过程,所以在得到单目标影响规律的前提下,还要进行多目标的优化。

(3) 结果分析。

分析比较三种材料,填充率主要受注射时间及模具温度的影响较大,因为在填充过程中,模具温度远小于熔体温度,所以一旦物料接触到模具型腔壁面,就会导致其温度骤降,开始冷凝,流动性变差。提高模具温度,可以减少熔体与模具之间的温度差,使得熔体在填充过程的冷却效应减小,从而提高填充率。三种材料中,ABS的填充效果受模具温度的影响最大,其贡献率达到了86.650%,说明ABS是一种典型的温敏性材料。缩短注射时间,即减小了熔体与模具壁面的接触时间,降低了热量损失,同时

注射时间越短,注射速率越高,产生的剪切效应越显著,剪切生热,降低了黏度,增加了流动性,提高了微圆柱的填充率。三种材料中,注射时间对 PP 填充率的影响最大,这也印证了 PP 是剪敏性材料。

比较三种材料熔体温度变化对填充率的影响,可以发现随着熔体温度升高,填充效果略有改善,但相对于其它两个因素变化不甚明显,虽然熔体温度升高能使物料流动性变好,但熔体与模具之间的温度差还是很大,热量流失过多,导致使其流动性变差,因此填充率变化程度也越小,但熔体温度过高,材料容易发生降解,且制品收缩率和翘曲也会增大,所以,在保证填充效果前提下,熔体温度不宜过高。

综合极差分析与方差分析可以得出三种材料的最优参数:PP 为 A4B2C1,即模具温度 70℃,熔体温度 210℃,注射时间 0.35 s;POM 为 A4B4C1,即模具温度 90℃,熔体温度 230℃,注射时间 0.6 s;ABS 为 A4B3C1,即模具温度 80℃,熔体温度 240℃,注射时间 0.6 s。

3 结论

(1) 注射时间对 PP 填充率的影响最大,模具温度次之,熔体温度影响最小,而对于 POM 及 ABS,三个因素的影响主次顺序为:模具温度>注射时间>熔体温度。

(2) 微圆柱阵列的填充率随模具温度和熔体温度的升高、注射时间的降低而增大,但熔体温度对填充率的改善不甚明显。

(3) 三种材料成型该塑件的适用性为:PP > ABS > POM。

参考文献

- [1] 于同敏,庄俭,王敏杰,等.微注塑成型中熔体充模流动的影响因素研究[J].塑性工程学报,2007,14(6):185-189.
Yu Tongmin, Zhuang Jian, Wang Minjie, et al. Study on the influence factors on the filling flow for polymeric melt in micro injection molding[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(6):185-189.
- [2] 宋满仓,刘柱,于同敏.微成型数值模拟技术的现状与发展[J].机械制造与自动化,2005,34(2):1-3.
Song Mancang, Liu Zhu, Yu Tongmin. Present situation and development of numerical simulation technology for micro injection molding[J]. Machine Building & Automation, 2005, 34(2):1-3.
- [3] Liou A C, Chen R H. Injection molding of polymer micro-and sub-micron structures with high-aspect ratios[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(11-12):1 097-1 103.
- [4] Kim S, Shiau C S, Kim B H, et al. Injection molding nanoscale features with the aid of induction heating[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2007, 46(11):1 031-1 037.
- [5] Tosello G, Hansen H N, Gasparin S. Applications of dimensional micro metrology to the product and process quality control in manufacturing of precision polymer micro components[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1):467-472.
- [6] Giboz J, Copponnex T, Mélé P. Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(6):R96.
- [7] 冯晓祥,蒋志恒,甘鹤鸣,等.微型注塑条件下 PLA/POM 共混物的形貌及结晶行为[J].工程塑料应用,2016,44(2):96-100.
Feng Xiaoxiang, Jiang Zhiheng, Gan Heming, et al. Morphologies and crystallization behaviors of PLA/POM blends under microinjection molding conditions[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(02):96-100.
- [8] 王金莲,黄庆达,许忠斌,等.微注塑成型技术研究现状与发展[J].塑料工业,2014,42(8):16-20.
Wang Jinlian, Huang Qingda, Xu Zhongbin, et al. Research actuality and development of micro injection molding[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(8):16-20.
- [9] Su Yuchuan, Jatan Shah, Lin Liwei. Implementation and analysis of polymeric microstructure replication by micro injection molding[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, 14(3):415.
- [10] Shen Y K, Shie Y J, Wu W Y. Extension method and numerical simulation of micro-injection molding[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2004, 31(6):795-804.
- [11] 林炳承,秦建华.微流控芯片试验室[J].色谱,2005,23(5):456-463.
Lin Bingcheng, Qin Jianhua. Laboratory on a microfluidic chip[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2005, 23(5):456-463.
- [12] 卢振,张凯峰.微注射成形聚丙烯微阵列填充与形态结构[J].纳米技术与精密工程,2007,5(4):339-342.
Lu Zhen, Zhang Kaifeng. Filling and morphology of PP micro-array by micro injection molding[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2007, 5(4):339-342.
- [13] 张勤星,李倩,董自开,等.聚丙烯微阵列结构制品熔体充填行为[J].化工学报,2013(8):3 045-3 053.
Zhang Qinxing, Li Qian, Dong Zikai, et al. Filling behavior of iPP micro-array structure product by micro injection molding[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2013(8):3 045-3 053.
- [14] 宋满仓,于文强.微圆柱阵列微流控芯片注射成型[J].模具工业,2015,41(9):36-41.
Song Mancang, Yu Wenqiang. Injection moulding for micro-cylinder array microfluidic chip[J]. Die & Mould Industry, 2015, 41(9):36-41.
- [15] Lu Z, Zhang K F. Morphology and mechanical properties of polypropylene micro-arrays by micro-injection molding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 40(5):490-496.