

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.12.016

微型齿轮半热流道多腔成型工艺设计与优化

李祥,肖淑莹,彭必友,蒋心豪

(西华大学材料科学与工程学院,成都 610039)

摘要: 基于半热流道技术和正交试验,对微型齿轮半热流道多腔成型过程进行数值模拟。相比于传统冷流道,半热流道技术更有助于完成微型尺寸的充填。运用 Moldflow 软件进行分析,对比三种型腔在填充时间、压力和剪切速率,发现采用 Y 形布局的方案为最优,但其剪切速率仍然超过了材料的最大剪切速率,因此需优化浇口设计以降低剪切速率,当浇口从非锥体式改为锥体式且长度不变时,填充效果最好。正交试验结果表明,流动速率、模具温度、熔体温度、注塑压力等四个成型工艺参数对微型齿轮填充率的影响依次减低,最佳工艺方案为注塑压力 120 MPa、流动速率 $0.016 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、模具温度 60°C 、熔体温度 180°C 。

关键词: 微注塑;微型齿轮;半热流道;Moldflow;正交试验

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)12-0084-06

Design and Optimization of Multi-cavity Forming Process of Semi-hot Runner of Micro-gear

Li Xiang, Xiao Shuying, Peng Biyou, Jiang Xinhao

(School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract : Based on the semi-hot runner technology and orthogonal experiments, numerical simulation of the forming process of micro gear multi-cavity with semi-hot runner was carried out. Compared with the traditional cold runner, the semi-hot runner technology was more helpful to complete the micro size filling. Using the Moldflow software for analysis, the time, pressure and shear rate of the three kinds of cavity when filling were compared, it was found that the scheme using Y-shaped layout was optimal, but the shear rate still exceeded the maximum shear rate of the material. Therefore, the gate design was optimized to reduce the shear rate. The filling effect was best when the gate was changed from a non-cone type to a cone type and the length was constant. The orthogonal test results showed that the influence of four molding parameters, such as flow rate, mold temperature, melt temperature and injection pressure, on the filling rate of micro-gear was reduced in turn, and the best process scheme was that the injection pressure was 120 MPa, the flow rate was $0.016 \text{ cm}^3/\text{s}$, the mold temperature was 60°C , and the melt temperature was 180°C .

Keywords : micro-injection ; micro-gear ; semi-hot runner ; Moldflow ; orthogonal experiment

微机电系统 (MEMS) 是由微机械技术与微电子技术相融合形成一个新兴的技术领域,由于其具有体积小、质量轻、能耗低、集成度高和智能化等技术优势,已是 21 世纪各国竞相争夺的科技战略制高点,在国民经济和军事国防中有着广泛的应用前景^[1-2]。微型传动机构是 MEMS 中不可缺少的部分,微型传动元件有微型齿轮、微型轴承、微型蜗杆、微型连杆等^[3],而作为传动机械力和运动的关键,微型齿轮的制造至关重要。

常见的齿轮材质为塑料和金属,其中塑料齿轮具有质量轻、传动噪音小、加工成本低、耐腐蚀等优点,比金属齿轮具有更广泛的应用领域^[4-5]。微注塑成型技术作为微型塑料齿轮的主要成型方法,不需要二次加工,相对于冲压、机造金属齿轮在成本上可降低 50%~90%^[6-9]。目前微注塑制品成型的首要问题是解决填充完整性,由于型腔和流道尺寸的微型化,导致熔体充模流动过程相较于传统注塑成型变得十分复杂,熔体可能还未达到型腔便停止流动,

基金项目: 四川省大学生创新创业项目 (201810623098)

通讯作者: 彭必友,副教授,主要研究方向为材料成型 CAD/CAE、先进成型技术 E-mail: pengbiyou@126.com

收稿日期: 2018-09-14

引用格式: 李祥,肖淑莹,彭必友,等. 微型齿轮半热流道多腔成型工艺设计与优化 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(12):84-89.

Li Xiang, Xiao Shuying, Peng Biyou, et al. Design and optimization of multi-cavity forming process of semi-hot runner of micro-gear[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(12):84-89.

传统注塑成型工艺不再适用。

笔者以微型齿轮为研究对象,采用半热流道浇注系统,对微型齿轮多腔成型过程进行数值模拟,在型腔布置、浇口优化设计后,通过正交实验,分析注塑压力、流动速率、模具温度、熔体温度等成型工艺参数对精密小齿轮填充率的影响规律,最后通过极差分析得出最佳工艺方案,为精密小齿轮成型工艺的研究提供一定的参考。

1 产品几何模型的建立

微型齿轮主、侧视图如图 1 所示。齿廓为渐开线,模数 $m=0.1$,压力角 $\alpha=20^\circ$,齿数 $z=10$,分度圆 1 mm,中心孔直径 0.3 mm,孔槽宽 0.1 mm,孔槽高 0.06 mm,齿厚 0.1 mm。材质为聚丙烯。

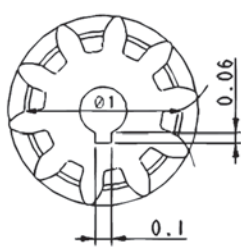


图 1 微型齿轮主、侧视图

2 浇注系统及正交试验的设计

2.1 浇注系统的选择

由于微制件的质量只有 0.05~2 g,相较于其浇注系统体积大,产生较大的凝料,而采用热流道技术可有效减少凝料的产生。但热流道模具成本高,考虑经济原因,采用一种主流道为热流道,分流道为冷流道的浇注系统,其结构简单,维护成本低,对生产的稳定进行有更大保证^[10-12]。

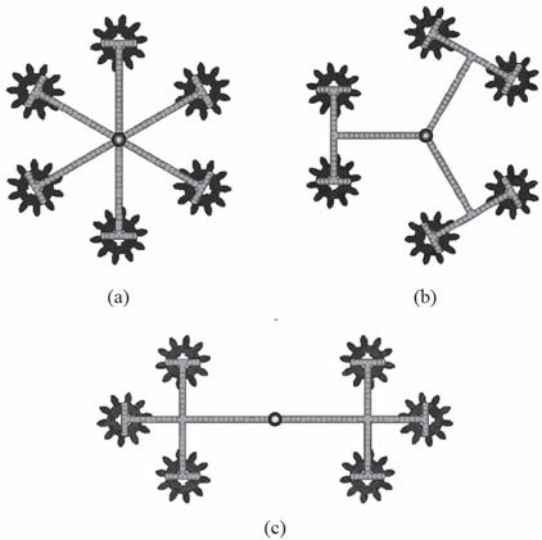
2.2 型腔的布置

在多型腔浇注系统设计中,型腔的布置方式分为平衡式和非平衡式两种^[13]。为了减低微流道设计的复杂度,采用平衡式一模六腔的布置方式,提出了图 2 的三种布置方案,进行精密小齿轮半热流道多腔成型过程数值模拟。

三个方案模型均全部连通,模具温度为 50℃,熔体温度为 200℃,填充选择自动控制,速度/压力自动切换。具体参数如表 1 所示。分流道属性为冷流道,截面均为圆形,直径 0.15 mm。

2.3 浇口的设计

浇口设计如图 3 所示。采用点浇口两点进浇,在对称型腔模中,容易实现各型腔的平衡进料。其长度 0.05 mm,非锥体,直径 0.05 mm。



a—方案 1; b—方案 2; c—方案 3

图 2 流道布置方案

表 1 各级分流道尺寸

方案号	布局	mm			
		一级分流道长度	二级分流道长度	三级分流道长度	四级分流道长度
1	圆形	2	0.25	0.3	
2	圆形	2	1	0.25	0.3
3	Y 形	2	1	0.25	0.3

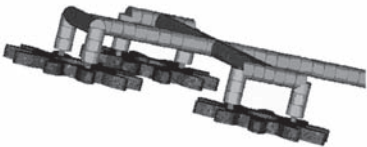


图 3 浇口设计

2.4 正交试验中指标、因素及水平的确定

选择注塑压力(A)、流动速率(B)、模具温度(C)、熔体温度(D)作为因素,并且假定各个因素间不存在交互作用,以微型齿轮的填充率作为考察指标。根据所选材料的具体信息,各个因素都均匀地设置 3 个水平,如表 2 所示。

表 2 影响填充率指标的因素水平设置

水平	A/MPa	B/(cm ³ ·s ⁻¹)	C/℃	D/℃
1	60	0.006	40	180
2	90	0.011	60	200
3	120	0.016	80	220

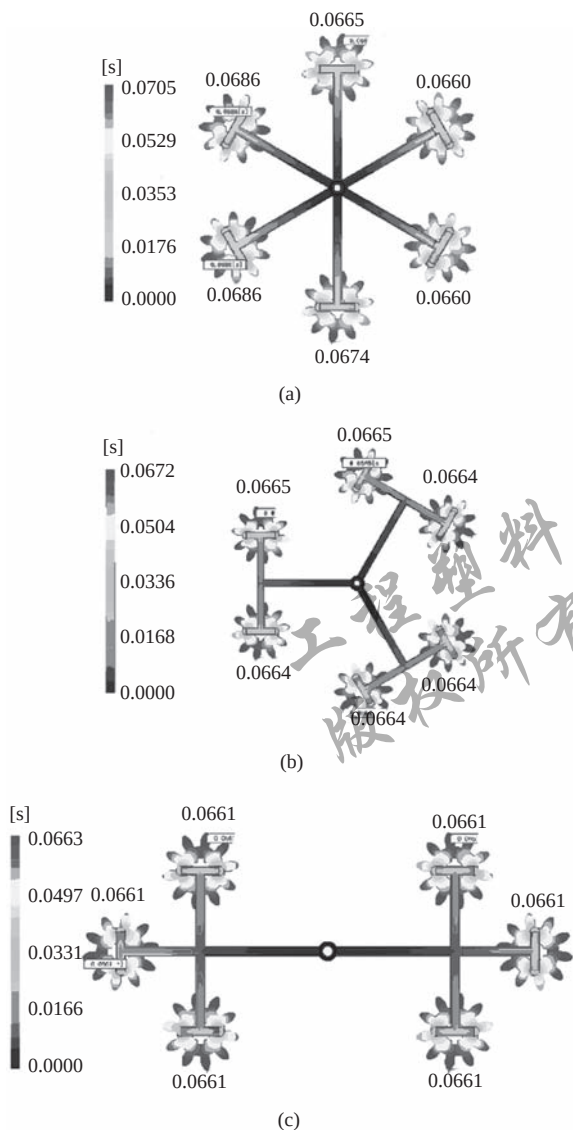
根据因素和水平划分,采用四因素三水平的正交实验设计进行实验,正交表选择 $L_9(3^4)$,安排 9 次实验。

3 微型齿轮半热流道多腔成型过程数值模拟

3.1 填充时间的对比

图 4 为不同型腔布置方案下的填充时间分布。

如图4所示,3个方案均能填充完整。方案1~方案3填充时间依次为0.0705,0.0672,0.0663 s,逐渐减低,但差距较小。此外,每种方案各个型腔的填充时间差微小,显然,填充均匀几乎能同时填充完整,无填充不平衡现象,证明3个方案的型腔布置均合理。

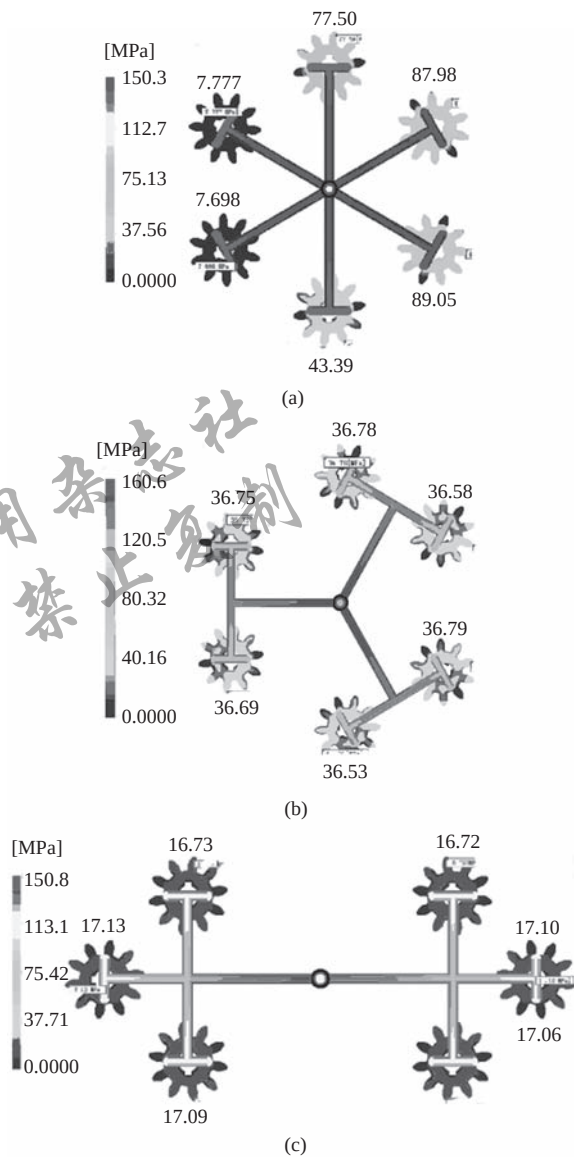


a—方案1;b—方案2;c—方案3
图4 不同方案下的填充时间分布

3.2 填充结束时的压力对比

图5为不同型腔布置方案下的压力分布。如图5所示,方案1中各个型腔中压力差较大,最大的压力差为80.8 MPa,并且部分型腔中压力超过80 MPa,这容易导致塑件产生飞边,此外,分流道处的压力普遍较高,在130 MPa以上;方案2中各个

型腔的压力都在36 MPa左右,分流道处的压力在127 MPa左右;方案3中各个型腔内压力比较均衡,都在17 MPa左右,分流道处的压力在112 MPa左右。方案2、方案3中各型腔压力差均微小,因此,方案2和方案3比方案1较好。



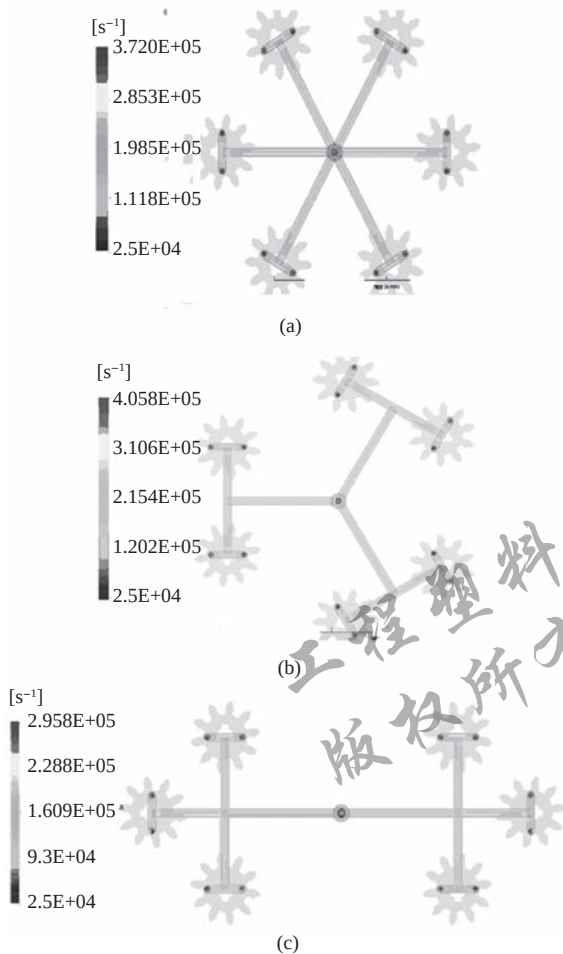
a—方案1;b—方案2;c—方案3
图5 不同方案下的压力分布

3.3 剪切速率的对比

根据传统注塑成型中的经验表明,主流道和分流道的剪切速率在 $5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围,点浇口的剪切速率在 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 范围时,熔体接近等温流道,填充效果好^[14-15]。图6为不同方案下的剪切速率分布。

如图6所示,填充时间在0.04 s左右时,各个

方案中在分流道与浇口的过渡处及浇口位置剪切速率最大,方案 1 中最大剪切速率为 $3.72 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$; 方案 2 中最大剪切速率为 $4.06 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$; 方案 3 中最大剪切速率为 $2.97 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$,这都超过了材料的最大剪切速率。



a—方案 1; b—方案 2; c—方案 3
图 6 不同方案下的剪切速率分布

总结上述填充时间、压力、剪切速率的数值模拟结果对比来看,在这 3 个方案中选择填充时间最短、型腔内压力最小、剪切速率最小,并且流道体积相对较小的方案 3 的型腔布置形式。但由于其剪切速率仍然较高,还需进行优化浇口尺寸,降低剪切速率。

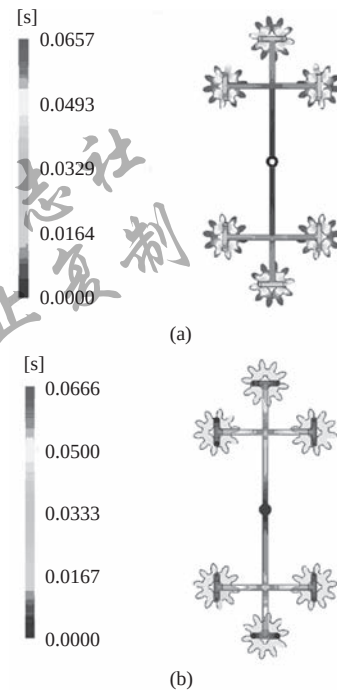
4 浇口的优化设计

由于高剪切速率在浇口及浇口与流道连接处,因此,对其进行优化设计,提出两个优化方案:方案 I 通过由原来非锥体浇口改为锥体形式浇口,使得浇口与分流道有一个良好的过渡,减低该处的剪切速率;方案 II 选择锥体形式浇口,同时增加浇口的

长度,同样使得浇口与分流道过渡良好。这里没有选择通过增大浇口截面尺寸,原因是齿轮尺寸微小,浇口截面尺寸增大会导致其脱模困难。表 3 所示为两种优化方案的浇口参数。

方案	浇口长度	mm	
		始端直径	末端直径
I	0.05	0.15	0.05
II	0.1	0.15	0.05

图 7 为两种浇口优化方案的填充时间分布。如图 7 所示,方案 I 中型腔填充完整,填充时间为 0.0657 s,方案 II 中出现短射现象,熔体未进入型腔便停止流动。



a—方案 I; b—方案 II

图 7 两种浇口优化方案的填充时间分布

结果表明,浇口从非锥体改为锥体形式同样能使型腔填充完整,但浇口长度的增加使得型腔难以充填。原因可能是由于微注塑成型中,流道尺寸微小,浇口长度的增加使得熔体流动阻力增加,难以进入型腔。因此,通过增加浇口长度的方案 II 不理想,选择方案 I 中的浇口设计应用在接下来的正交实验。

5 基于正交实验法的成型工艺方案优化

5.1 数据分析

正交试验方案及结果如表 4 所示。由表 4 均值结果可看出,四个因子的优水平组合为 $A_3B_3C_2D_3$ 。比较极差 R 值大小, $R_2 > R_3 > R_4 > R_1$,即流动速率对填充率的影响最大,其次为模具温度和熔体温

表4 正交试验方案及结果¹⁾

序号	A	B	C	D	填充率/%
1	1	1	1	1	31.38
2	1	2	2	2	68.17
3	1	3	3	3	100
4	2	1	2	3	59.66
5	2	2	3	1	69.12
6	2	3	1	2	90
7	3	1	3	2	55.14
8	3	2	1	3	68.2
9	3	3	2	1	100
k_1	66.517	48.727	63.193	66.833	
k_2	72.927	68.497	75.943	71.103	
k_3	74.447	96.667	74.753	75.953	
R	7.930	47.940	12.750	9.120	

注: k_i 为均值, R 为极差。

度,而注塑压力的影响最小。

5.2 确定最佳工艺方案

在正交实验组中,实验组3和实验组9同样能达到填充完整,为了得出最佳工艺方案,需要与优水平组进一步分析对比。由于正交实验只以填充率作为质量指标,针对这三组以体积收缩率和翘曲作为新的指标,比较三组的成型质量,参数对比情况如表5所示。

表5 参数对比情况

实验组	剪切速率/ s^{-1}	体积收缩率/%	翘曲量/mm
3	27 679	6.046	0.006 2
9	65 848	5.335	0.005 8
优水平组	27 543	6.083	0.006 2

实验组9的体积收缩率和翘曲变形最小,虽然剪切速率较大,但是并未超出材料最大剪切速率;而另外两组的体积收缩率和翘曲量接近,但都略高于实验组9,此外,这两组的剪切速率明显低于实验组9。从成型工艺条件上看,实验组9熔体温度和模具温度的设置比其余2组低,因此,最终选择实验组9作为最佳工艺方案,即注塑压力为120 MPa、流动速率为 $0.016\text{ cm}^3/\text{s}$ 、模具温度为 60°C 、熔体为 180°C 。

6 结论

(1) 通过微型齿轮半热流道多腔成型过程数值模拟,得出最佳型腔布置为Y形布局;最佳浇口优化设计为方案I,即从非锥体式改为锥体式且长度不变。

(2) 通过正交实验及极差分析,发现流动速率、模具温度、熔体温度、注塑压力等四个成型工艺参数对微型齿轮填充率的影响依次减低。

(3) 最佳工艺方案为注塑压力120 MPa、流动

速率 $0.016\text{ cm}^3/\text{s}$ 、模具温度为 60°C 、熔体温度为 180°C 。

参考文献

- [1] 张冬至,胡国清. 微机电系统关键技术及其研究进展[J]. 压电与声光,2010,32(3):513-520.
Zhang Dongzhi, Hu Guoqing. Key echnologies of micro-electromechanical system and its recent progress[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2010,32(3):513-520.
- [2] Niza M E, Komori M, Nomura T, et al. Test rig for micro gear and experimental analysis on the meshing condition and failure characteristics of steel micro involute gear and metallic glass one[J]. Mechanism and Machine Theory,2010,45(12):1 797-1 812.
- [3] 莫瀚宁,辛洪兵,邱辰,等. 微型谐波齿轮传动概述[J]. 轻工科技,2012(12):26-28.
Mo Hanning, Xin Hongbing, Qiu Chen, et al. Overview of micro harmonic gear transmission[J]. Light Industry Science and Technology,2012(12):26-28.
- [4] 戴亚春. 对微注射成型浇注系统与微制件熔接缝形成的CAE模拟研究[D]. 镇江:江苏大学,2006.
Dai Yachun. The simulation of the micro-part's weld lines by injection molding[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2006.
- [5] 曹雄刚,靳伍银,韩炎娜. 基于CAE技术的塑料齿轮注塑成型工艺参数的优化研究[J]. 机床与液压,2008,36(7):27-30.
Cao Xiong gang, Jin Wuyin, Han Yanna. Study of optimization for processing parameters of plastics gear injection molding based on cae technology[J]. Machine Tool & Hydraulics,2008,36(7):27-30.
- [6] 康红梅,肖陶康,王玉丹. 微齿轮注塑成型工艺模拟分析[J]. 机械设计与制造,2013(8):237-242.
Kang Hongmei, Xiao Taokang, Wang Yudan. Micro-gear injection molding process simulation analysis[J]. Machinery Design & Manufacture,2013(8):237-242.
- [7] 姜爱菊,吴宏武. 微注射成型技术的最新进展[J]. 塑料工业,2008,36(8):1-4.
Jiang Aiju, Wu Hongwu. Recent advance in micro-injection molding technology[J]. China Plastics Industry,2008,36(8):1-4.
- [8] 杨铎,刘冲,徐征,等. 微注塑成型模具设计与制造技术研究进展[J]. 塑料工业,2010,38(10):1-5.
Yang Duo, Liu Chong, Xu Zheng, et al. Progress in the design and manufacture technology of micro-injection mold[J]. China Plastics Industry,2010,38(10):1-5.
- [9] 李爽,王利霞,李倩,等. 微注塑薄壁制品可成型性及充填过程中的流动现象分析[J]. 高分子材料科学与工程,2013,29(4):109-

- 112.
- Li Shuang, Wang Lixiang, Li Qian, et al. Analysis of molding ability of the micro thin wall parts and some flow phenomena in filling stage of micro injection molding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(4):109-112.
- [10] 张朝阁, 宓大云, 张亚. 热流道塑料模具技术的研究与发展前景[J]. 塑料工业, 2013, 41(7):5-9.
- Zhang Chaoge, Mi Dayun, Zhang Ya. Research and development prospect of hot runner technology in injection molding[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(7):5-9.
- [11] Volker Muller. 应用于微型零件的热流道解决方案[J]. 现代模具, 2008(4):60-61.
- Volker Muller. Hot runner solution for miniature parts[J]. Maschinen Markt, 2008(4):60-61.
- [12] 付伟, 陈碧龙. 注塑模具设计原则、要点及实例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- Fu Wei, Chen Bilong. Principles, key points and example analysis of injection mold design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.
- [13] 郑燕君. 基于 CAE 的多型腔注塑模浇注系统优化[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- Zheng Yanjun. Optimization of runner system in multi-cavity injection molding based on CAE[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [14] 姚强, 鲍家福, 邵鹏飞. 多型腔注射模浇注系统 CAD[J]. 模具工业, 1997, 11(4):13-16.
- Yao Qiang, Bao Jiafu, Shao Pengfei. Multi-cavity injection mold casting system CAD[J]. Die & Mould Industry, 1997, 11(4):13-16.
- [15] 林权, 陈冲. 塑料微齿轮微流道注塑模充填研究[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(4):38-41.
- Lin Quan, Chen Chong. Study on micro-channel injection molding of plastic micro gears[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(4):38-41.

欢迎订阅 2019 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘, 请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊, 是中国合成树脂供销协会会刊, 荣获首届、第二届、第三届国家期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2019 年定价 20 元/期, 全年 240 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊, 荣获多项省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2019 年定价 20 元/期, 全年 120 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号 (1973 年) 至 2018 年底共 46 卷 350 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售; 同时也将《化学分析计量》自创刊号 (1992 年) 至 2018 年底

共 27 卷 127 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文, 又可根据读者自定义的关键词进行全文检索, 非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元; 《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 260 元。

邮局汇款:

收款地址: 济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮编: 250031

电话: (0531)85878223 85878057 85878278

传真: (0531)85947355

银行汇款:

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

账 号: 1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>