

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.02.009

成型温度对聚合物微型机械模内组装成型流固耦合变形的影响

周国发,杨先鲁,张宇

(南昌大学环境科学与化学工程学院,南昌 330031)

摘要: 由于聚合物模内组装成型的微型机械制造精度和组装配合精度主要受控于二次成型熔体充填流动与一次成型固体微型零件之间的流固耦合作用,因此通过有限元数值模拟,系统研究了二次成型熔体注射温度对流固耦合变形的影响,并揭示了其影响机理。研究结果表明,增加二次成型熔体的注射温度,可使二次成型熔体的充填流动与一次成型固体微型轴表面间的流固耦合作用效应减弱,并使一次成型固体微型轴整体温度场趋于不均匀,从而导致一次成型固体微型轴流固耦合弯曲应力和弯曲变形减小,而热应力和热变形增加。增加二次成型熔体的注射温度可减小流固耦合变形,但二次成型熔体的注射温度过大,又会导致一次成型固体微型轴表面融化,影响装配配合界面的成型质量。

关键词: 模内组装成型;微型机械;流固耦合;数值模拟

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)02-0043-05

Influence of Molding Temperature on Polymeric Micromachine Fluid-Solid Coupling Deformation in In-Mold Assembly Molding Process

Zhou Guofa, Yang Xianlu, Zhang Yu

(School of Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract : The polymer micromachine manufacturing accuracy and assembly precision in in-mold assembly molding process depend on the fluid-solid coupling interaction between second molding stage of melt filling flow and first molding stage of polymer solid micro-component, therefore, by means of the finite element numerical simulation, the influencing rules of the melt injection temperature of the second stage on the fluid-solid coupling deformation were systematically studied and the influencing mechanisms were finally revealed by theoretical analysis. Research results show that increasing the polymer melt injection temperature of the second stage can weaken the fluid-solid coupling interaction between the second stage of melt filling flow and the first stage of polymer solid micro-shaft surface, and make the micro-shaft temperature field of the first stage tend to be inhomogeneous which cause reducing of the fluid-solid coupling bending stress and bending deformation, and increasing of thermal stress and thermal deformation of micro-shaft of the first stage. Therefore, increasing melt the injection temperature of the second stage can reduce the fluid-solid coupling deformation, but too large melt injection temperature of the second stage will result in melting of solid micro-shaft surface of the first stage which affect the forming quality of assembly interface.

Keywords : in-mold assembly molding ; micromachine ; fluid-solid coupling ; numerical simulation

微型机械具有体积小、质量轻、能耗低、性能稳定等特点,因而在国民经济各领域中的应用日趋广泛。2010年,微机电系统市场占有额约为950亿美元,因此聚合物微型机械制造加工技术的研究显得尤为重要^[1-2]。微型机械加工的主要技术难题是:由于微型机械尺寸微小,而导致微型零件成型与部件组装加工面临技术挑战。笔者研究的先进模内组装成型工艺,主要解决具有运动副连接的聚合物微型机械精密成型加工和组装关键技术瓶颈问题,该技术是在模具内顺序成型微型零件的同时,还在模内顺序将零件组装成机械,即将零件成型工序和零

件组装工序集成于一体。由于微型机械刚度低,在二次充模流动中,由于流固耦合作用,使一次成型的固体微型零件表面形成的流固耦合作用冲击压力和温度场分布不均匀,从而造成一次成型微型零件产生流固耦合弯曲变形和热变形^[3-5]。由此可见,控制模内组装成型过程的流固耦合变形是保障微型机械成型加工精度与组装配合精度的技术关键。为此研究二次成型熔体注射温度对流固耦合变形的影响规律和机理,对于这一创新成型技术的推广应用和产

联系人:张宇,讲师,主要从事过程装备与控制研究

收稿日期:2012-12-06

业化显得尤为迫切。

1 数值模拟条件

笔者以轴类转动运动副微型机械模内组装成型为背景,研究成型温度对流固耦合作用效应的影响。轴类微型机械如图 1 所示,微型轴 B 的半径为 0.6 mm,长度为 8 mm,而矩形块 A 为 2 mm×4 mm×8 mm。图 1 中 1 和 2 为矩形块注射的进、出口。轴类微型机械的成型过程是:先成型微型轴,待微型轴凝固后,再二次成型矩形块,实现微型轴与矩形块在模内组装成型。如何保障其装配配合精度是保证微型机械运动性能的技术关键。当二次充填流动熔体前沿与微型轴接触时,二次成型熔体的充填流动会与微型轴表面形成流固耦合作用,并在其表面形成流固耦合冲击压力,同时使其温度场趋于不均匀,从而引起微型轴流固耦合变形。其变形主要由流固耦合冲击压力产生的弯曲变形和温度场不均匀产生的热变形组成。

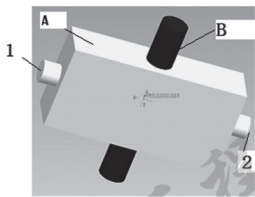


图 1 轴类微型机械模型

微型轴材料为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS),矩形块材料为低密度聚乙烯 (PE-LD)。本构模型采用 Cross-WLF 本构模型^[6-9]:

$$\eta(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (1)$$

$$\eta_0(T, p) = D_1 e^{\frac{A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)}} \quad (2)$$

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad (3)$$

$$A_2 = \bar{A}_2 + D_3 p \quad (4)$$

式中: τ^* ——产生剪切变稀特性的临界剪切应力, Pa;

η_0 ——零剪切黏度, Pa·s;

η ——黏度, Pa·s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切变形速率, s⁻¹;

T ——温度, K;

p ——压力, MPa;

n ——非牛顿指数;

T^* ——参考温度, K;

A_1 ——温度影响无因次参数;

A_2 ——温度影响系数, K;

D_1 ——熔体在玻璃化转变温度下的零剪切率黏性系数, Pa·s;

D_2 ——玻璃化转变温度, K;

$\bar{A}_2$ ——反应温度影响的材料参数, K;

D_3 ——压力影响系数, K/Pa。

Cross-WLF 型本构方程的材料参数如表 1 所示。

表 1 Cross-WLF 型本构方程的材料参数

材料	τ^*/Pa	n	$D_1/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	T^*/K	A_1	$\bar{A}_2/\text{K}$
ABS	70 508	0.280 8	1.24×10^{11}	373.15	25.849	51.6
LDPE	48 114	0.365 9	7.91×10^{15}	233.15	37.163	51.6

先模拟二次成型熔体充填流动过程的流场,分析其流固耦合作用效应。再将流固耦合作用的压力场和整体温度场信息导入到 ANSYS 固体有限元模型,分析其流固耦合的综合变形。为了揭示流固耦合变形的产生机制,需对热变形与弯曲变形耦合作用进行去耦。为计算纯压力场的弯曲变形,需将微型轴视为非等温变形过程,并令微型轴的热膨胀系数为零,以去除温度场不均匀产生的热变形影响。不考虑微型轴表面的压力场,仅考虑温度场的不均匀性,可计算其热变形。该去耦研究方法为流固耦合变形的形成机理研究创造条件。

2 二次成型熔体注射温度对模内组装成型流固耦合变形的影响

2.1 二次成型熔体注射温度对流固耦合效应影响的模拟

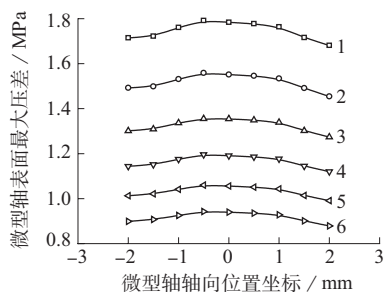
二次成型熔体注射温度是影响聚合物微型机械模内组装成型装配界面成型精度与质量的关键工艺参数之一,它通过影响二次成型充模流动的流动性能来影响矩形块二次成型充模成型过程的流场,因而对模内组装成型过程的流固耦合作用效应产生影响,同时二次成型熔体注射温度过高会导致微型轴表面熔化,从而影响装配配合界面的成型质量,最终影响微型机械成型的加工精度。为此,通过改变二次成型熔体注射温度,研究其对流固耦合作用变形的影响。二次成型熔体的注射温度分别取 413, 423, 433, 443 和 453 K,成型过程工艺参数如表 2 所示。

表 2 成型过程工艺参数

参数	设置值
熔体注射温度 / K	变化
熔体注射速度 / (m·s ⁻¹)	0.3
模壁温度 / K	320

在二次成型过程中,当充填熔体与微型轴表面

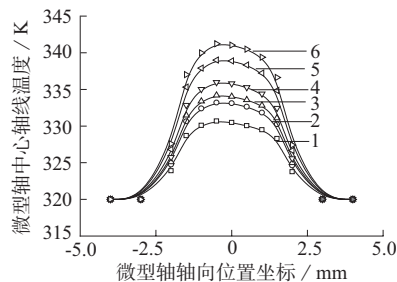
接触时,会在微型轴表面产生流固耦合作用效应,并在其表面形成流固耦合冲击压力。微型轴表面的流固耦合作用效应越强,则冲击压力越大,导致微型轴的综合变形越大,因而对成型精度的影响越大。为了研究二次成型的熔体注射温度对二次成型流固耦合作用效应的影响规律,首先研究二次成型熔体注射温度对一次成型固体微型轴表面流固耦合冲击压力场的影响,图2为二次成型熔体注射温度对一次成型微型轴表面最大压差沿轴向分布规律的影响。由图2可知,微型轴外表面流固耦合冲击的最大压差均随着熔体注射温度的增加而减小。



1—403 K; 2—413 K; 3—423 K; 4—433 K;
5—443 K; 6—453 K

图2 二次成型熔体注射温度对一次成型微型轴表面最大压差沿轴向分布规律的影响

图3为二次成型熔体注射温度对一次成型微型轴沿其中心轴线温度场分布规律的影响。由图3可知,随着二次成型熔体注射温度的增加,微型轴高温区的温度增加,使其温度场沿中心轴线分布趋于不均匀。减小二次成型的熔体注射温度有利于提高一次成型微型轴温度场的均匀性。



1—403 K; 2—413 K; 3—423 K; 4—433 K;
5—443 K; 6—453 K

图3 二次成型熔体注射温度对一次成型微型轴沿其中心轴线温度场分布规律的影响

2.2 流固耦合综合变形的模拟

流固耦合综合变形的有限元力学分析模型如图4所示。通过ANSYS软件的SOLIDE186单元将微型轴进行有限元离散,将计算流体动力学

(CFD)模拟分析得到的流固耦合压力场 P 和温度场 T 导入微型轴有限元模型中。将有限元模拟视为非等温过程,以考虑温度对微型轴用ABS弹性模量的影响,微型轴用ABS的力学性能参数见表3。

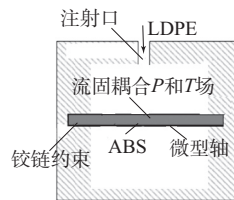


图4 流固耦合综合变形有限元力学分析模型

表3 微型轴用ABS的力学性能参数

参数	设置值
弹性模量/MPa	$-0.056T^2 + 0.0409T + 848.59$
泊松比	0.392
热膨胀系数/ K^{-1}	8×10^{-5}

图5为二次成型熔体注射温度对微型轴流固耦合综合变形的影响。由图5可知,微型轴流固耦合的综合变形量随着二次成型熔体注射温度的增加而减小,增加二次成型熔体注射温度有利于减小其综合变形,提高成型加工精度。但二次成型熔体注射温度增加过大,又会导致一次成型固体微型轴表面融化,影响装配配合界面的成型质量。因此,合理优化二次成型熔体的注射温度显得尤为重要。

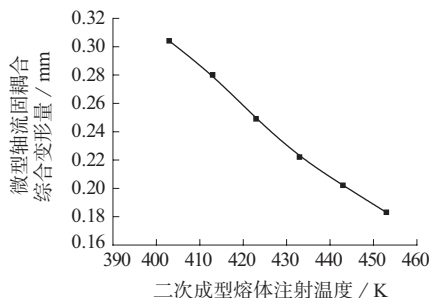


图5 二次成型熔体注射温度对微型轴流固耦合综合变形的影响

将表3中ABS的热膨胀系数设定为零,并将CFD模拟得到的流固耦合压力场 P 和温度场 T 导入ANSYS有限元模型中,即可计算微型轴流固耦合压力场产生的纯弯曲变形。图6为二次成型熔体注射温度对一次成型微型轴纯压力场弯曲变形的影响。由图6可知,一次成型微型轴流固耦合纯压力场的弯曲变形随着二次成型熔体注射温度的增加而减小。

仅将CFD模拟得到的温度场 T 导入ANSYS有限元模型中,通过ANSYS可模拟微型轴流固耦合温度场不均匀产生的纯热变形。图7为二次成型熔体注射温度对微型轴流固耦合热变形的影响。

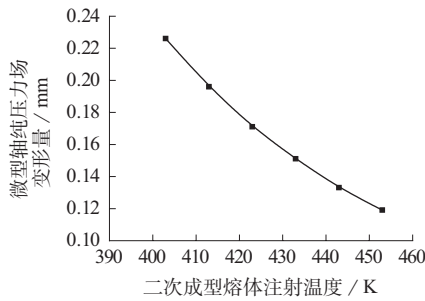


图 6 二次成型熔体注射温度对微型轴纯压力场弯曲变形的影响

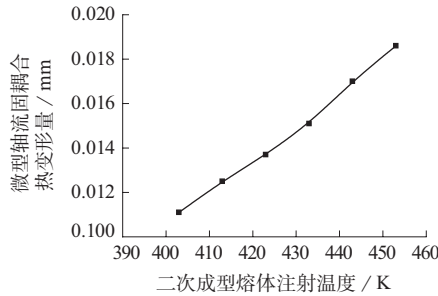


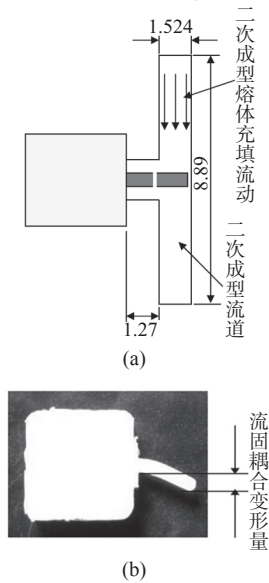
图 7 二次成型熔体注射温度对微型轴流固耦合热变形的影响

由图 7 可知,微型轴流固耦合的纯热变形随着二次成型熔体注射温度的增加而增加。

研究表明,一次成型微型轴的热变形比压力变形小 1~2 个数量级。由此可见,微型轴的综合变形主要由微型轴流固耦合的压力弯曲变形控制。

2.3 模拟结果实验验证

图 8 为二次成型熔体充填流动对一次成型微型轴流固耦合作用综合变形的影响。



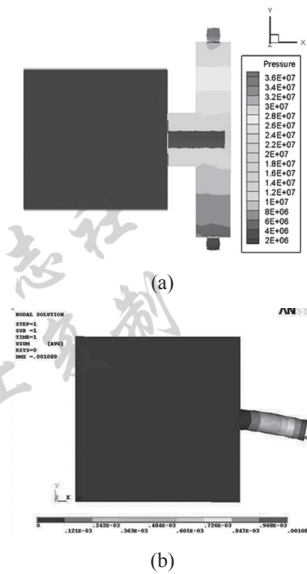
a—流道结构; b—实验变形结果

图 8 二次成型熔体充填流动对一次成型微型轴流固耦合作用综合变形的影响

实验采用的材料组合为:一次成型微型轴材料

为美国 Ashland Chemicals 公司的 ABS(Hival HG6),二次成型熔体材料为瑞士 EMS Grivory 公司的尼龙 12。实验测得二次成型熔体充填流动与微型轴流固耦合的最大综合变形量为 1.1 mm^[8]。

二次成型熔体充填流动与一次成型微型轴流固耦合压力场和综合变形的模拟结果如图 9 所示。微型轴流固耦合最大综合变形量为 1.089 mm,与实验测得的流固耦合最大综合变形量 1.1 mm 的实验结果相吻合。由此可见,笔者提出的理论模型和流固耦合有限元数值模拟方法是可靠的。



a—压力场模拟结果; b—综合变形模拟结果

图 9 二次成型熔体充填流动与一次成型微型轴流固耦合

压力场和综合变形模拟结果

2.4 产生机理分析

研究表明,在二次熔体充填成型中,二次成型熔体的充填流动与一次成型固体微型轴表面间的流固耦合作用效应均随着二次成型熔体注射温度的增加而减小。从流变学角度来说,造成这一变化规律的主要原因是在其它参数一定的条件下,随着二次成型熔体注射温度的增加,二次成型熔体充模流动的黏度减小,从而造成二次成型熔体通过一次成型固体微型轴的流动阻力减小,这必然使二次成型熔体的充填流动与一次成型固体微型轴表面间的流固耦合作用效应减弱,引起微型轴表面的流固耦合冲击压力减小,导致微型轴的弯曲应力和弯曲变形减小。另一方面,注射温度增加又使微型轴高温区的温度上升,使其温度场分布趋于不均匀,从而导致微型轴的热应力和热变形增加。由于微型轴流固耦合综合变形受控于一次成型微型轴表面压力场产

生的弯曲变形与整体温度场不均匀产生的热变形的耦合作用,而热变形比流固耦合压力变形小1~2个数量级,热变形的影响微弱,最终导致流固耦合综合变形随着二次成型熔体注射温度的增加而减小。

3 结论

(1) 二次成型的熔体注射温度增加会导致一次成型微型轴的流固耦合作用效应减弱和温度场趋于不均匀,流固耦合的作用效应减弱会使微型轴外表面流固耦合冲击压力减小,从而导致微型轴流固耦合压力场的弯曲应力和弯曲变形减小,而微型轴整体温度场趋于不均匀则导致其热应力和热变形增加。

(2) 一次成型微型轴流固耦合综合变形受控于其表面压力场产生的弯曲变形与温度场不均匀产生的热变形的耦合作用,其综合变形随着二次成型熔体注射温度的增加而减小,增加二次成型的熔体注射温度有利于减小流固耦合变形,但熔体注射温度增加过大又会导致一次成型固体微型轴表面融化,影响装配配合界面的成型质量。

参考文献

- [1] 段瑞玲,李玉和,李庆祥.国内微型器件装配技术的现状与应用[J].光电信息,2005,22(7):20-25.
Duan Ruiling, Li Yuhe, Li Qingxiang. Current status and applications of micro-assembly technology[J]. Optics Mechanics & Electronics Information, 2005, 22(7):20-25.
- [2] 单德彬,袁林,郭斌.精密微塑性成形技术的现状和发展趋势[J].塑性工程学报,2008,15(2):52-59.
Shan Debin, Yuan Lin, Guo Bin. Research situation and development trends in micro forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(2):52-59.
- [3] Ananthanarayanan A, Gupta S K, Bruck H A. Characterization and control of plastic deformation in mesoscale premolded components to realize in-mold assembled mesoscale revolute joints[J]. Polymer Engineering and Science, 2009, 49(2):293-304.
- [4] Ananthanarayanan A, Gupta S K, Bruck H A. Characterization of a reverse molding sequence at the mesoscale for in-mold assembly of revolute joints[J]. Polymer Engineering and Science, 2010, 50(9):1 843-1 852.
- [5] Ananthanarayanan A, Gupta S K, Bruck H A. Modeling and characterization to minimize effects of melt flow fronts on premolded component deformation during in-mold assembly of mesoscale revolute joints[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(4):0410061-0410069.
- [6] 周国发,苏婷,闫丽.聚合物水辅共注成型过程数值模拟研究[J].中国塑料,2008,22(1):80-84.
Zhou Guofa, Su Ting, Yan Li. Numerical simulation on water-assisted co-injection molding process for polymers[J]. China Plastics, 2008, 22(1):80-84.
- [7] 周国发,柳和生,何成宏,等.共注成型充模流动的理论模型和数值模拟研究[J].机械工程学报,2003,39(3):94-99.
Zhou Guofa, Liu Hesheng, He Chenghong, et al. Modeling and simulation of cavity filling in co-injection molding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(3):94-99.
- [8] 周国发,孙懋.聚合物全三维非稳态非等温多相分层流动成型过程的理论模型和数值模拟[J].机械工程学报,2004,40(9):16-22.
Zhou Guofa, Sun Mao. 3D-dimensional unsteady non-isothermal theoretical model and simulation of polymer multiphase-multilayer flow molding [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9):16-22.
- [9] 周国发,徐智迅.集成 Moldflow 与多岛遗传算法的共注成型多参数智能优化[J].南昌大学学报(工科版),2011,33(4):370-373.
Zhou Guofa, Xu Zhixun. Multi-variable intelligence optimization of co-injection molding process integrated with moldflow and multi-island genetic algorithms[J]. Journal of Nanchang University(Engineering & Technology), 2011, 33(4):370-373.
- [10] Ananthanarayanan A. Development of in-mold assembly methods for producing mesoscale revolute joints[D]. Maryland:University of Maryland, 2009.

《工程塑料应用》杂志开设“技术转让与合作”、“企业风采”栏目

为做好广大作者、读者单位最新科研成果及新产品、新技术的推广服务,《工程塑料应用》杂志和“工程塑料网”(www.epa1973.com)网站已开设“技术转让与合作”栏目,以方便买卖双方的有效交流与沟通。栏目内容可涉及科研成果及专利技术的转让,公司新产品、新技术简介等方面。另外,为了全方位宣传塑料行业精英企事业单位形象,《工程塑料应用》杂志增设“企业风采”栏目。报道内容主要是企业发展历史、企业文化、企业管理、研发创新能力、新产品发布、攻关项目介绍、人物专访等。来稿字数控制在5000字以内,可以附带图片。

《工程塑料应用》为中文核心期刊,是中国合成树脂供销协会会刊,国内外公开发行,屡获国家期刊奖,是中国塑料行业的权威媒体,知名度高,发行量大,可确保您发布的信息有足够的浏览量。欢迎各有关企事业单位踊跃投稿!

投稿时请加盖单位公章。具体刊登事宜请与编辑部直接联系。

地址:济南市天桥区田庄东路3号 邮编:250031

联系电话:0531-85878223 85878057