

塑料微齿轮微流道注塑模充填研究

林权

陈冲

(武夷学院, 武夷山 354300)

(福建技师学院, 福州 350101)

摘要 使用圆形微流道进行塑料微齿轮注射成型充填研究, 利用模流分析软件 Moldflow 进行数值模拟试验, 通过改变注射速度参数(微流道深度尺寸和进口注塑压力), 探讨熔融塑料在微流道内的充填状况, 并结合实际注射成型实验, 了解工艺参数改变对微齿轮充填的影响。为避免塑料在微结构件内产生充填不良等问题, 提高成型质量, 降低生产成本提供了理论参考。

关键词 微齿轮 微流道 微注射 Moldflow 充填

随着现代产品追求轻薄短小以及微米、纳米级的应用, 传统的注塑成型技术也随之调整。进入 21 世纪以来, 我国虽然在塑料微注射成型技术上有了一定的发展, 但是与发达国家相比, 国内在这方面的研究还不足^[1]。微注射成型技术与传统注射成型技术相比较, 具有多项生产优势, 但是目前对于塑料在微尺寸流动情况并不完全了解, 导致塑料件易出现成型缺陷。塑料齿轮作为重要工程构件之一, 其应用范围呈扩大趋势, 比如在家用电器、机械仪表、电讯、玩具产品等装置中已广泛使用。

塑料齿轮与金属齿轮相比较, 具有加工成本低、传动噪声低、自润滑、质轻、吸振、耐腐蚀等优点, 尤其是塑料微齿轮具有的体积小、传动紧凑等独特优点, 使其可在许多金属齿轮不宜使用的领域使用^[2]。微注射成型是塑料微齿轮的主要成型方法, 微注射成型不用再次滚齿, 其相对浇铸和注塑滚齿的加工方式具有明显优势。

笔者利用模流分析软件 Moldflow, 以微齿轮的注射成型为数值模拟对象, 使用微流道进行充填, 改变注射速度参数(微流道深度和注塑压力) 以观察微齿轮熔融塑料的充填行为, 并通过与实际注射实验比较, 探讨熔融塑料在微流道内的充填状况, 以了解熔融塑料在微尺寸流道里的流动情况, 从而避免塑料在微结构件内产生充填不良等问题, 提高成型质量, 降低生产成本, 达到产量化目标, 为微齿轮成型模具的结构设计、成型工艺参数的合理化等提供理论参考。

1 有限元分析模型建立

以标准渐开线塑料圆柱直齿轮为研究对象, 其基本参数为模数 $m=0.5$ 、齿数 $z=10$ 、分度圆压力角 $\alpha=25^\circ$ 、齿厚 $b=1\text{ mm}$ 、齿顶高系数 $ha=1$ 、顶隙系数 $c=0.25$ 。现阶段用于微注塑成型的聚合物原料

主要有聚甲醛 (POM), 聚甲基丙烯酸甲酯 (PM-MA), 尼龙 (PA) 66, 聚醚醚酮 (PEEK), 液晶聚合物 (LCP)^[3], 笔者选用了奇美公司的牌号为 CM-205 的 PMMA。PMMA 为耐热型塑料, 刚度和硬度较高, 且具有高透明度, 可达 92% 透光率, 可塑性佳, 可制成各种形状塑料件, 其物性数据如表 1 所示。

选用 Sodick TR05EH 型高精度注塑机, 注射机参数为锁模力 5 t、最大注塑压力 197 MPa、最大注射速率 340 cm³/s、螺杆最大行程 40 mm 及螺杆直径 12 mm。

表 1 PMMA 物性数据

物 性	数 据	物 性	数 据
相对密度	1.19	拉伸强度 / MPa	70
熔体流动速率 / g · (10 min) ⁻¹	1.8	弯曲强度 / MPa	108
密度 / g · cm ⁻³	0.77	断裂伸长率 / %	5
成型收缩率 / mm · mm ⁻¹	0.002 ~ 0.006	冲击强度	0.37 / 2.0
硬度	M-97	热变形温度 / ℃	100
吸水率 / %	0.3	维卡软化点 / ℃	113

首先运用 PRO/E 建立塑料齿轮 3D 模型, 由于在将 CAD 图文件转换为 Moldflow 模型时, 需要进行网格划分等许多复杂的工作, 而且建模质量不高, 因此若通过使用 CAD Doctor 塑料件分析前处理软件, 自动对 CAD 图文件进行模型的修复与简化, 然后将导出的 UDM 文件再导入 MPI 模块进行分析, 就能较易获得高质量的划分网格, 保证分析结果的正确性与准确度。最后转化完添加浇注系统和冷却系统, 有限元分析模型如图 1 所示。图 1 中浇注系统的主流道为圆锥体, 其高度为 30 mm、上下圆直径为 2 和 5 mm; 分流道为矩型体, 其长、宽、深分别为 20、5、2 mm。圆形微流道参数视研究项目而定, 冷却水路为 5 mm 的圆柱体。

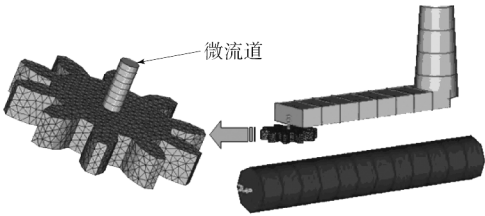


图1 有限元分析模型

2 工艺参数分析及优化

微齿轮最终的质量表现很大程度上取决于生产中成型工艺参数的选取。微齿轮注射成型加工工艺参数主要包括:熔融温度、模具温度、注塑压力、注射速度、保压压力、转换保压方式、保压时间、冷却时间等。笔者为了观察塑料在微流道里的流动情形,需制造短射的情况,因此保压压力及保压时间两项均设定为 0,采用充填压力达到设定值即转保压的方式,而其它参数则视研究项目给定。试验采用的精密注塑机的注射速度和注塑压力控制方式为注射速度优先的闭环控制。在这种情况下,注射速度起决定性作用,注塑压力则是被动调节,即注塑压力的大小受注射速度的设定变化而变化,因此注塑压力和注射速度之间存在相关性。所以笔者研究的影响因素可以不包括注塑压力,其对微齿轮最终精度的影响将在注射速度的调节中得到体现^[3]。

综上所述,选取熔体温度、模具温度、注射速度和冷却时间作为熔融塑料在微流道内的充填状况的主要影响因素。为找出注射成型最优成型条件,以提高塑料件的精度和质量,笔者运用正交试验设计方法对这些工艺参数进行优化。试验中以微齿轮的充填率为指标,以熔体温度 A 、模具温度 B 、注射速度 C 、冷却时间 D 为因素。此外虽然在多因素试验中,各因素不仅可能独立地在起作用,而且还可能交互作用,但实际经验表明,各因素之间存在的交互作用对指标的影响甚微,因此可不考虑^[4]。各因素分别取三个水平,确定为四因素三水平试验,通过 CAE 模拟正交试验的结果见表 2。由于微流道深度尺寸在 200 μm 以下时,微齿轮塑料件 Moldflow 软件模拟时会存在收敛不好的问题,且经过模拟试验测试当微流道深度太小时,注塑压力要很大才能实现充模,这对注射机参数、模具结构、模具材料、材料性能都要求比较高,且实际注射过程中还容易发生模板变形、熔体溢出等注射成型问题,从而导致试验精度降低和成本提高,因此试验中初定微流道深度为 300 μm 。

表2 工艺参数正交试验设计及结果

项 目		因 素				充填率/%
		$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	$C/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	D/s	
水 平	实验 1	270	80	0.05	10	95.5
	实验 2	270	85	0.08	15	95.8
	实验 3	270	90	0.11	20	97.4
	实验 4	280	80	0.08	20	98.2
	实验 5	280	85	0.11	10	98.3
	实验 6	280	90	0.05	15	98.3
	实验 7	290	80	0.11	15	98.4
	实验 8	290	85	0.05	20	98.2
	实验 9	290	90	0.08	10	98.4
均值 1		96.233	97.367	97.333	97.400	
均值 2		98.267	97.433	97.467	97.500	
均值 3		98.333	98.033	98.033	97.933	
极差		2.100	0.666	0.700	0.533	

从表 2 极差分析可以看出,各影响因素参数对试验指标(充填率)的影响顺序为 $A > C > B > D$,其中影响充填率的最重要的因素是熔体温度,其次为注射速度和模具温度,而冷却时间影响最小。

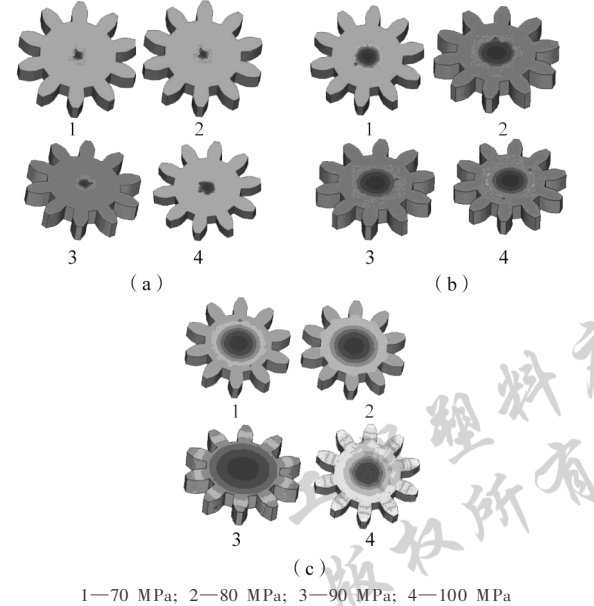
微注射成型的熔体温度相比传统的注射成型要求略高,这是为了更好地保证高分子聚合物充模能顺利进行,因此微注射成型中塑料熔体常在熔体温度设置较高的条件下以较低的粘度充模。模具温度在微注射成型中对充模时间的影响较大,但随着模具温度升高,对充模时间的影响也逐步降低,而且模具温度过高还会给塑料件的脱模和成型周期带来较大的影响,对生产效率影响较大^[5]。冷却时间对本试验结果影响最小,冷却时间设为 15 s 符合实际经验。因此综合考虑选取最优方案为实验 7,最后确定熔体温度 290 $^{\circ}\text{C}$ 、模具温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 、冷却时间 15 s 做为模拟试验基础工艺参数,其中试验中注射速度可采用分阶段式给定。

3 微齿轮充填模拟结果

在运用 Moldflow 进行模拟前,先要对充填模拟条件做适当的假设:①塑料熔体粘度高,粘滞力远高于惯性力及体作用力,动量方程式中的非线性惯性项与重力项可以忽略,且忽略塑料熔体粘弹效应。②塑料流动方向(x, y)的热传导项与热对流项可忽略。③忽略塑料熔体前缘喷泉流动效应。④塑料若无给定适当的材料物性,则视为不可压缩流体,反之,则视为可压缩流体。⑤忽略成型过程中因塑料件收缩或模具接触不良造成的接触热阻。

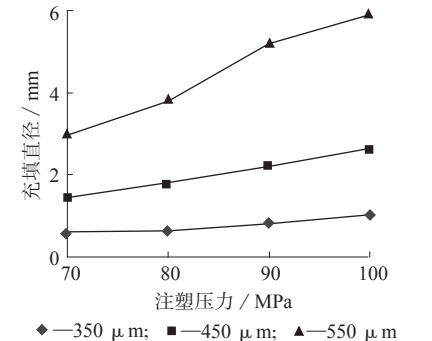
根据微流道的深度大小对注塑机、模具、试验成本等影响,笔者将微流道深度尺寸设计为 350、450、550 μm ,按上述确定的最佳条件固定其它工艺参

数,进口注塑压力分别设为 70、80、90、100 MPa,到了上述压力点后即转换成保压模式不再充填,运用 Moldflow 软件进行模拟,以观察塑料熔体在微流道内充填的情况,其结果如图 2 所示,由此为基础得到微流道充填结果数据,如图 3 所示。其中充填面积测量采用 Moldflow 自带的测量工具,沿圆周测量充填直径 10 次,并剔除测量值中随机误差和粗大误差的影响,再取平均充填直径值来作为充填面积的指标值。



1—70 MPa; 2—80 MPa; 3—90 MPa; 4—100 MPa
a—350 μm; b—450 μm; c—550 μm

图 2 微流道深度和注塑压力对充填效果的影响



◆—350 μm; ■—450 μm; ▲—550 μm

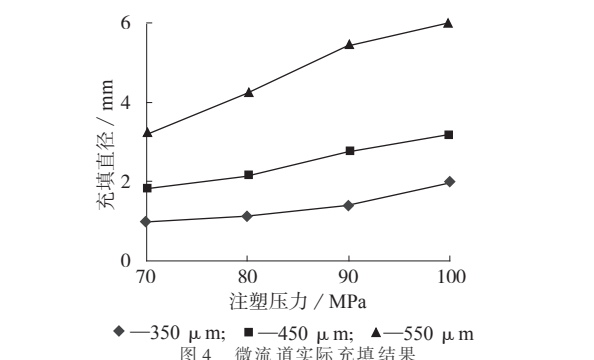
图 3 不同微流道深度和注塑压力下的充填直径

从图 3 可以看出,塑料熔体在各微流道内充填时,其充填面积在不同进口注塑压力下皆呈增加趋势,尤其以深度为 550 μm 的微流道充填面积增加的幅度较其它两个明显,深度为 350 μm 的微流道充填面积增加的幅度不明显,几乎固定在直径为 0.8 mm 左右的区域内,深度为 450 μm 的微流道充填面积增加的幅度在两者之间。由此可知,造成各微流道充填面积大小与其趋势的不同主要是因为各微流

道的深度不同所致,提高注塑压力对较小尺寸微流道充填影响及趋势从模拟分析结果来看并不明显。

4 微齿轮实际注射试验结果

为了验证模拟分析对微流道内塑料熔体的充填结果数据的可靠性,进行了实际的注射成型试验,并将实验结果和模拟结果做比较分析。为了使试验结果更精确,首先针对 PMMA 吸湿性高的特点,加工前加强其干燥,干燥温度为 80℃,并连续干燥 24 h 以上,然后才开始进行注射成型试验。其次注射成型是一个非稳态的周期程序,整个注射成型过程是随着时间改变的,当每一个注射周期时间均相同时,随着注射的次数增加,会慢慢趋于动态的稳定,即每个周期的温度或是压力等随时间变化状况几乎完全相同。所以在注射成型的过程中,保持每一个周期时间相同较为重要,这样塑料件质量才会趋于稳定,每个工艺参数的影响才会真正展现出来。故每次变换参数时,需等待一段时间后待其达到稳定状态,同时为取得稳定的试样,取样时采用以下措施:改变参数后注射成型前 10 件,均直接丢弃不予采样,取第 11 件至第 20 件共 10 件,再进行充填面积测量,并统计计算平均值。另外,为了提高测量精度,微流道注射充填面积测量采用 CPJ3025 数字式精密投影仪。实际注射试验采取的测试条件和工艺参数均和模拟分析相同,其充填结果如图 4 所示。



◆—350 μm; ■—450 μm; ▲—550 μm

图 4 微流道实际充填结果

从图 4 可以发现,塑料熔体在各微流道内充填时,其充填面积的幅度随着进口注塑压力的增加而明显增加,其中深度为 550 μm 的微流道充填面积增加的幅度最为明显(曲线斜率最大,与模拟试验结果一致)。另外,还可以发现三个微流道的模拟分析数据与实际注射成型试验数据有一些误差,从图 3 和图 4 可以看出,实验数据普遍都比模拟数据大,尤其是 350 μm 微流道的误差最为明显,通过对实际注射成型塑料件的尺寸测量,可以发现每个塑料件的厚度都比原先设计的尺寸多约 20 μm 左右。

虽然试验中一般会存在误差,但该误差特点是方向明确,大小也较稳定,可以排除粗大误差和随机误差的可能性,确定应该是存在的系统误差。

可能造成模拟和实际试验尺寸误差的原因一般为测量误差、冷却凝固收缩、缺少保压、浇口尺寸变大、模板微变形等。其中,在测量方面,笔者采取严谨的取样措施和精密的测量仪器来保证测量精度,测量误差会存在但不会带来明显的差别,因而不是主要原因。在冷却收缩方面,根据塑料件原料的物性数据和实际注射工作经验可知,微型产品上冷却收缩比例较低,且收缩只会导致塑料件尺寸缩小而不是膨胀,因此冷却凝固收缩也不是主要原因。针对试验中不采取保压措施,更不会因为压力太大而使塑料件尺寸变大,因而缺少保压也可排除。另外,由于试验用模具较小,对模具板材刚度和硬度都没有特别要求,而试验测量的是微型尺寸,只要模具模板或者模具成型零件在高注塑压力下发生一点微变形就会给实际试验的塑料件尺寸测量带来误差,且误差会较大,因此浇口尺寸的变化和模具模板的微变形应该是造成试验塑料件系统误差较大的原因。对于350 μm 的微流道而言,其浇口尺寸最小,微小的变化对其影响最大,所以其误差最为明显。其它方面,比如PRO/E建立塑料齿轮3D模型与实际塑料件可能存在形状特征误差、Moldflow软件模拟计算存在误差问题、模拟分析工艺假设问题也都会给试验带来误差,这些误差都是不可能避免的,要深究

其规律还必须提高CAD建模质量,需在聚合物的流变学、弹性力学、计算机技术等方面深入分析探讨。

5 结论

(1) 熔体温度、注射速度、模具温度为影响PM-MA微齿轮微流道充填率的关键工艺参数,冷却时间对其影响不明显。

(2) 随着注塑压力的提高,微流道深度尺寸越大,微齿轮充填面积的增加幅度越大,且基本呈线性关系增加;而较小深度尺寸的微流道对充填面积增长幅度的影响较平缓,提高注塑压力对较小深度尺寸微流道充填结果的影响及趋势不明显。

(3) 实际注射成型试验结果显示,实际试验结果与模拟结果在微流道对微齿轮的充填行为的影响趋势基本一致,只是在数值上存在一些误差,该误差的根源主要来自模具结构。

参考文献

- [1] 刘杰,马瑞伍.渐开线小模数塑料齿轮模具设计关键技术研究[J].模具制造,2010(6):48-50.
- [2] 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.
- [3] Shen Y K, Shie Y J, Wu W Y. Extension method and numerical simulation of micro-injection molding[J]. Int Comm Heat Mass Transfer, 2004, 31(6): 795-804.
- [4] 郑亮.高精度塑料齿轮项目中的工艺参数优化研究[D].上海:上海交通大学,2008.
- [5] 戴亚春,王匀,周建忠,等.微齿轮注塑成型正交优化及数值模拟[J].材料工程,2010,7:46-48.

STUDY ON MICRO-CHANNEL INJECTION MOLDING OF PLASTIC MICRO GEARS

Lin Quan

Chen Chong

(Wuyi University, Wuyishan 354300, China) (Fujian Technician College, Fuzhou 350101, China)

ABSTRACT The injection molding filling of plastic micro gears was studied by using round micro-channels, and numerical simulation tests were proceeded with the Moldflow software. The filling of plastic melt in the micro-channels was studied by changing the injection speed parameters (micro-channel depth size and injection pressure) and the effect of change of process parameters on the filling of micro channels was explored combining with practical injection molding test. It provides theoretical references for such efforts as to prevent bad filling of plastic melt in micro-structures, improve molding quality and reduce production cost, etc.

KEYWORDS micro gear, micro-channel, micro-injection, Moldflow, mold filling

2011年东南亚PVC需求可望增长5%

据报道,泰国塑料化工公司(TPC)人士表示,受建筑、基础设施和灌溉行业需求的推动,2011年东南亚聚氯乙烯(PVC)需求可望增长5%。2010年东南亚地区PVC需求为150万t,约占世界总需求量的4.4%。

泰国是东南亚最大PVC消费国,占2010年东南亚总需求的28%。2010年东南亚PVC供应量为190万t,过剩量40万t,未来5年估计还会维持过剩。但该地区PVC需求前

景还是比较乐观,因为人均消费量低,增长潜力很大。

(慧聪网)

塞拉尼斯宣布上调乙烯-乙酸乙烯酯价格

全球领先的化工技术与特种材料公司塞拉尼斯宣布将提高所有等级的Ateva 乙烯-乙酸乙烯酯(EVAC)销售价格,提价幅度为0.08美元/磅,以及所有等级的低密度聚乙烯(PE-LD)销售价格,提价幅度为0.06美元/磅。此次提价将自2011年4月15日起生效或依据合同约定。(慧聪网)