

薄壁光盘片架注射成型应力翘曲的数值模拟与分析

周建华

(江南大学机械工程学院,无锡 214122)

摘要 分析了注射成型过程中影响薄壁制品应力翘曲的因素,给出了注射成型时制品翘曲变形的数学模型及其求解方法。利用数值模拟的方法,模拟出光盘片架注塑过程中的不同模具设计和工艺条件对其翘曲变形程度的影响。根据模拟结果,分析出在原材料和制品结构确定的情况下,流动不平衡和冷却不均衡是影响薄壁光盘片架应力翘曲的主要因素,提出了解决应力翘曲的方法。

关键词 应力翘曲 数值模拟 注射成型 薄壁制品

以注射成型为基础的塑料制品已经成为国民经济持续繁荣的重要支柱产业之一,塑料制品被广泛应用于日常生活、交通工具、航空航天、信息通讯等众多行业,“以塑代钢”是实现制品轻量化、生产装配高效化的重要手段。保证注塑制品在注射成型时的尺寸精度,是实现“生产装配高效化”的重要前提;合理地减小塑料制品壁厚,是实现塑料制品轻量化、微型化和结构复杂化的主要方法。如何提高薄壁注塑制品的尺寸精度,在注射成型的工艺设计中显得十分重要。

壁厚在 2.0~3.2 mm 的称为常规厚度的制品,壁厚在 1.2~2.0 mm 的称为薄壁制品,壁厚在小于 1.2 mm 的称为超薄厚度制品^[1]。薄壁制品和超薄厚度制品在注射成型时,由于采用注射速度快、充型时间短、注塑压力高等工艺手段,使得这类制品在成型时的内部应力较大、成型后产品的翘曲变形会变得尤为突出。笔者以汽车六碟 DVD 播放器的光盘片架为例,分析了该薄壁制品在注射成型时产生应力翘曲的原因,以及克服应力翘曲的方法。由于汽车内部的空间限制,汽车六碟 DVD 播放器要求结构紧凑、占用的空间小,使得该制品在光盘放置区的壁厚只有 1 mm,属于超薄厚度塑料制品,而该制品在设计时光盘放置区域许可的平面度为 0.06 mm,因此在注射成型该制品时如何将制品的平面度控制在设计范围内、防止制品产生过大的翘曲变形,是该制品注射成型工艺设计和模具设计的关键。

1 影响薄壁注塑制品翘曲变形的因素^[2]

翘曲变形是由于注塑生产过程中制品不均匀收缩产生的一种制品形状偏离模具型腔尺寸的变形。对注塑生产而言,制品收缩是一种不可避免的现象,收缩本身并不重要,重要的是收缩的差异性、不均衡性。一般的均匀收缩只会引起制品本身单纯的体积

变化,可以通过设置收缩率加以补偿,只有不均匀收缩才会引起翘曲变形^[3]。影响薄壁注塑制品翘曲变形的因素较多,概括起来主要有:注塑制品本身的结构、成型制品所采用的原材料性能、注塑生产时所采用的成型工艺参数及注射成型的模具结构。以上 4 点,任何一项不符合成型工艺要求,都可能使生产出的注塑制品产生翘曲变形。其中,注塑制品本身的结构和原材料是产品设计时就确定的,在实际生产中只要符合注塑工艺即可控制。因此,影响薄壁注塑制品翘曲变形的因素就集中在注射成型时所采用的成型工艺参数和模具结构上。

从制品的翘曲变形的表现形式来看,主要体现在由于成型工艺参数和模具结构不合理所引起的流动不平衡和冷却不均衡,从而引起流动应力和冷却应力,以及由于材料性能和制品结构本身导致的收缩不均匀而引起的收缩应力,这三种应力的综合作用导致了薄壁制品的应力翘曲。

1.1 注射成型工艺参数对翘曲变形的影响

注射成型工艺参数主要有:温度(熔体温度和模具温度)、压力(注塑压力和保压压力)、时间(注射时间和保压时间)等。在注射成型的过程中,合理控制以上注射成型工艺参数是控制薄壁注塑制品翘曲变形的关键。

在薄壁注塑时,熔体温度偏低时必须提高注塑压力,但注塑压力太高会产生较大的残余应力;同时熔体温度偏低,将使保压时间缩短,从而无法压实制品,导致翘曲增大。模具温度过低,残余剪切应力增大,容易产生翘曲。保压压力过高,因补料而固化的残余流动应力增大,同时制品的压应力会增大,应力更容易释放,形成翘曲变形。保压压力过低,会产生

“回流”现象,不仅形成残余流动剪切应力,而且会形成较大的体积收缩率差异,从而产生较高的残余拉、压应力,使制品翘曲变形。

1.2 模具结构对翘曲变形的影响

模具结构对翘曲变形的影响主要表现在:浇注系统的设计、冷却管路的布置和顶出位置的设定。

浇注系统在设计时,浇口的形式、数量和位置的设计是否合理,流道的长短、浇口尺寸的大小是否合适,都会影响到注射成型时注塑压力的高低。浇注系统流程太长、流动阻力过大,会导致相应的注塑压力也提高,残余应力增大,翘曲变形增大;冷却管路的布置需保证模具型腔表面温度的均衡,以及不同型腔的温度的平衡,若模具型腔温差过大,会导致体积收缩率差异增大,残余应力增大;制品在顶出脱模时,顶出位置不合适、顶出时制品温度偏高、顶出力不平衡,都会使制品产生应力翘曲。

2 注塑应力翘曲数值模拟数学模型

注射成型的充填过程是高分子材料在复杂的几何型腔内做有阻碍和带有自由表面流动的传热和传质的过程^[4]。注射成型数值模拟主要是利用高分子材料学、传热学、计算力学和计算机图形学等基本理论,建立塑料成型过程的数学和物理模型,构建有效的数值计算方法,实现成型过程的动态仿真分析,使塑料成型过程从宏观的经验设计进入到微观的定量设计,为优化模具设计和控制成型过程提供了科学依据和设计分析手段^[5]。

注塑应力翘曲数值模拟是注射成型数值模拟的一部分,是从力学研究的角度,根据应力、应变、边界条件等求解静态平衡方程,得到位移并进行计算结果“可视化”的数值计算过程。

影响塑料制品的翘曲变形的因素包括:制品结构、原材料性能、成型工艺参数及模具结构。在注射成型过程中产生的应变可以完整地表示为式(1)^[6]:

$$\varepsilon = \varepsilon^p + \varepsilon^T + \varepsilon^c + \varepsilon^R + \varepsilon^0 \quad (1)$$

式中: ε ——与应力相对应的真实的应变分量;

ε^p ——静水压力产生的应变;

ε^T ——因温度不均匀产生的应变,与热膨胀系数有关;

ε^c ——结晶收缩产生的应变;

ε^R ——化学反应产生的应变;

ε^0 ——分子链取向产生的应变。

为了方便研究,所考虑的各种应变通常被看成

是时间或压力的函数,即:

$$\varepsilon_j^i = f(P) \text{ 或 } \varepsilon_j^i = f(T) \quad (2)$$

式中: j ——表示前面所述的各种应变。

在各向同性的条件下,上述的应变表达式为:

$$\begin{aligned} \varepsilon^p &= - \int_0^P \beta dP, \quad \varepsilon^T = \int_{T_0}^T \alpha dT, \quad \varepsilon^c = \int_{\phi_0}^{\phi} C_c d\phi, \\ \varepsilon^R &= \int_{\tau_0}^{\tau} C_R C d\tau, \quad \varepsilon^0 = \int_{\xi_0}^{\xi} C_o d\xi \end{aligned} \quad (3)$$

式中: P ——静水压力;

β ——压缩系数;

T ——温度;

S ——制品固化时刻;

α ——热膨胀参数;

ϕ ——结晶度,是随时间变化的温度函数;

r ——化学反应时的一种转换系数,也是随时间变化的温度函数;

ξ ——分子取向度;

C_c, C_R, C_o ——分别是与聚合物结晶、化学反应和分子链取向相关的常数。

注塑制品的初始应力(残余应力)主要包括:由于流动不平衡引起的残余流动应力和由于温度不均匀引起的残余温度应力,两者可由粘弹性本构方程求出。初应力、初应变确定后,结合边界条件求解静态平衡方程,可求得位移。从力学的角度来看,注射成型的翘曲变形分析过程,就是根据初应力、初应变及边界条件,求解位移的分析过程。

塑料件翘曲变形的数值模拟公式为:

$$\sum_{i=1}^N [K] \{ \delta \} = \{ R_T \} + \{ R_S \} - \{ R_0 \} \quad (4)$$

式中: N ——制品离散单元总数;

$[K]$ ——单元刚度矩阵;

$\{ \delta \}$ ——单元位移矩阵;

$\{ R_T \}$ ——等效温度载荷矩阵;

$\{ R_S \}$ ——等效收缩应力载荷矩阵;

$\{ R_0 \}$ ——等效初始应力(残余应力)载荷矩阵。

在计算制品翘曲变形时,通过计算每个单元各个时刻的温度场,求出制品上下表面的温差,计算出等效温度载荷、等效初始应力(残余应力)载荷和等效收缩应力载荷,形成单元的刚度矩阵和总刚度矩阵,即可求解位移。

3 光盘片架注塑应力翘曲的数值模拟与分析

薄壁光盘片架如图1所示,制品尺寸长为130 mm,宽120 mm,制品最大壁厚2.3 mm且位于制品

轮廓周边的加强处, 最薄壁厚 1 mm 位于制品中间光盘放置区域, 所用材料为聚碳酸酯(PC)。为了控制该制品在注射成型时光盘放置区域的翘曲变形, 在模具设计以前, 采用数值模拟的模流分析方法对该制品的成型工艺及模具结构进行了优化设计。表 1 为该制品初定的成型工艺参数。

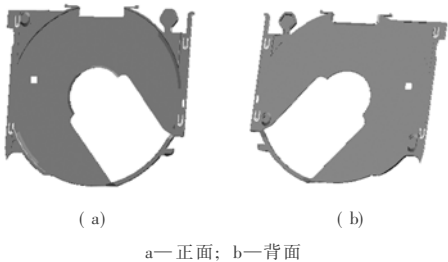


图 1 薄壁光盘片架结构图

表 1 初定成型工艺参数

熔体温度 /℃	模具温度 /℃	注射压力 /MPa	保压压力 /MPa	注射时间 /s	保压时间 /s	冷却剂入口温度 /℃
305	100	110	50	4	30	25

3.1 光盘片架注塑应力翘曲的数值模拟

由上述分析可知, 在所用材料和制品结构确定后, 影响光盘片架注塑应力翘曲的因素主要为成型工艺参数和模具结构。在表 1 给出的成型工艺下, 根据注射成型理论和实际的生产经验, 在模具结构设计方面影响制品翘曲变形的因素为模具浇注系统(浇口形状和位置) 和模具的冷却系统(冷却水道的布置)。一旦模具的浇注系统和冷却系统在设计中产生不合理的情况, 往往是不可逆转, 尤其对光盘片架这种超薄型制品的翘曲变形控制显得尤为重要。

分析该制品的特征、结合理论和经验, 初步确定了表 2 所示的模具浇注系统和冷却系统的设计方案。

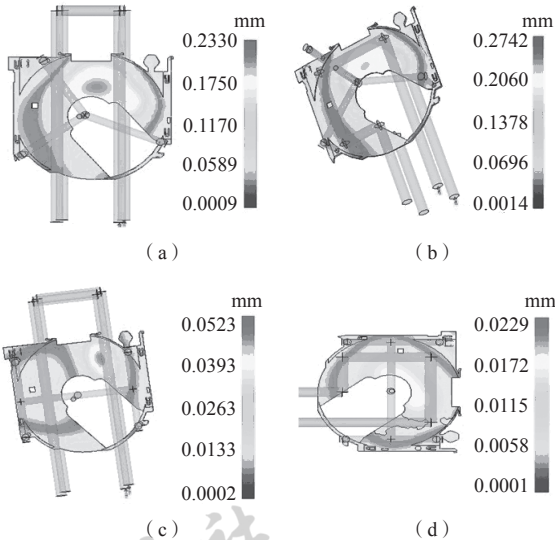
表 2 模具结构方案

方 案	一	二	三	四
浇口数量	3	3	4	4
冷却水道型式	平行	□型	平行	□型

在上述 4 种模具结构方案中, 模具型腔布置采用一模一腔的布局, 模具浇口的布置分别采用三个和四个点浇口的布置形式, 由于光盘放置区域不能设置浇口, 所以浇口位置放在制品周边的厚壁处, 接近均布, 点浇口直径为 1.2 mm。冷却水道采用单路的平行水道和环形的口型水道, 冷却水道的直径为 8 mm。

基于以上的 4 种方案, 采用注射成型的数值模

拟分析方法, 计算并模拟出上述四种方案对应的由于熔体流动不平衡和冷却不均衡所引起的该制品的翘曲变形, 分析结果如图 2 所示。



a—方案一; b—方案二; c—方案三; d—方案四

图 2 四种方案的翘曲变形计算结果

3.2 光盘片架注塑应力翘曲分析

从图 2 可以看出, 方案一的最大翘曲变形量为 0.23 mm 左右、且最大变形发生在光盘放置区域的中间; 方案二的最大翘曲变形量为 0.22 mm 左右、位置与方案一大致相同; 方案三的最大翘曲变形量为 0.05 mm; 方案四的最大翘曲变形量为 0.02 mm。综合上述四种方案的计算结果发现: 方案一和方案二所采用的三浇口方案比方案三和方案四所采用的四浇口方案的翘曲变形量大 0.18 ~ 0.2 mm, 所以在成型模具上决定采用四个浇口; 同样在四个浇口的条件下, 采用口型冷却回路方案四的最大翘曲量为采用平行回路方案三的一半、且翘曲变形量很小, 为 0.02 mm, 故决定采用方案四所确定的模具结构。

经过数值计算及分析, 可以看出在成型工艺和模具结构对制品的翘曲影响方面有: ①由于浇口数量的不同而引起的流动应力, 在制品的翘曲变形中占主要因素。②由于冷却水道的布置不同而引起的温度应力, 在制品的翘曲变形中占次要因素。③不同的冷却水道所引起的温度应力, 可能使制品的翘曲变形加倍。

上述的翘曲变形的计算, 只是考虑了模具结构方面产生的流动应力和温度应力对该制品翘曲变形的影响。在方案四的基础上, 进一步调整优化成型工艺参数, 优化后的成型工艺参数, 如表 3 所示。进而得出工艺优化后的制品冷却翘曲量, 如图 3 所示。

表 3 优化后的成型工艺参数

熔体温度/℃	模具温度/℃	注射压力/MPa	保压压力/MPa	注射时间/s	保压时间/s	冷却剂入口温度/℃
310	110	105	50	4	30	25

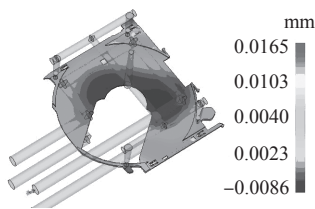


图 3 工艺优化后的冷却翘曲

从图 3 可以看出,在将熔体温度从 305℃ 提高到 310℃、注塑压力从 110 MPa 降低到 105 MPa、模具温度从 100℃ 提高到 110℃ 后,制品的冷却翘曲变形量已经降低到 0.01 mm。由此可见,成型工艺参数对制品的翘曲影响较小。在此基础上,综合材料性能和制品本身收缩不均衡对翘曲变形的影响,计算出制品总体的翘曲变形如图 4 所示。

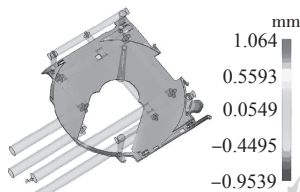


图 4 制品的总体翘曲

从图 4 可以看出,采用方案 4 和优化后的成型工艺参数,该制品在光盘放置区域的总体翘曲变形约为 0.05 mm,其中流动不平衡和冷却不均衡引起的翘曲变形量为 0.01 mm 左右,原材料性能及制品本身收缩不均衡引起的翘曲变形量为 0.04 mm 左右,可见原材料性能及制品本身结构对薄壁光盘片

架翘曲变形也有着较大的影响,这可通过进一步优化材料性能和制品结构来加以控制,总体上该设计方案满足薄壁光盘片架的注塑要求。

4 结语

经过模拟和分析可以看出,在原材料及制品本身结构确定的情况下,影响薄壁光盘片架应力翘曲变形的因素主要是熔体流动不平衡和冷却不均衡这两方面的因素。其中熔体流动不平衡是薄壁制品翘曲变形的主要因素,冷却不均衡是薄壁制品翘曲变形的次要因素,流动不平衡可以通过优化浇口的数量和位置加以控制,冷却不均衡可以通过优化模具的冷却水道加以控制。注射成型的应力翘曲数值计算与模拟对注塑制品的成型工艺的确定及注塑模具结构的优化具有重要的工程指导意义,尤其对尺寸要求较高的薄壁制品显得十分重要。

参考文献

- [1] 朱春东,虞炜华,朱洪艳,等.成型工艺参数对薄壳塑件翘曲变形影响的数值模拟[J].模具工业,2007,33(9):50-53.
- [2] 李海梅,刘永志,申长雨,等.注塑翘曲变形的 CAE 研究[J].中国塑料,2003,17(3):53-58.
- [3] 高月华,王希诚.注塑制品的翘曲优化设计进展[J].中国塑料,2006,20(11):8-11.
- [4] 周建华.基于充型和凝固过程数值模拟的硬盘座压铸工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2009,29(11):1007-1009.
- [5] 申长雨,李海梅.塑料模具 CAE 技术概况及发展趋势[J].工程塑料应用,2001,29(2):40-45.
- [6] 杨亚男.手机外壳注塑成型的数值模拟及翘曲变形控制[D].上海:上海交通大学,2010.
- [7] 奚国栋,周华民,李德群.注塑制品残余应力数值模拟的研究[J].中国机械工程,2007,18(9):1112-1116.

NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS ON THE STRESS WARPAGE DEFORMATIONS OF THIN-WALLED OPTICAL DISK BRACKET IN INJECTION FORMING

Zhou Jianhua

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT The factors affecting the stress warpage deformations about thin-walled part in the plastic injection forming were analyzed, a numerical simulation mathematical model and solving method about the warpage deformation of injection forming plastic were given. Based on it, effects of various mould designs and forming process conditions on the degree of warpage deformations of thin-walled optical disk bracket in injection forming was simulated. According to the simulation result, it was analyzed that flowing unequilibrium and cooling unequilibrium were the key factors affecting the stress warpage deformations when the raw materials and the structure of part were confirmed, the solving method for stress warpage deformations were given.

KEYWORDS stress warpage, numerical simulation, injection forming, thin-walled part

住友化学在华投资聚丙烯复合材料厂

据报道,住友化学近日称,日前与中国吉林省新东泰工程塑料有限责任公司成立了生产和销售车用聚丙烯复合材

料的合资公司。这将是该公司在中国建设的第三家同类工厂。住友化学称,合资公司总投资 9 亿日元,预定在 2012 年 1 月开始生产,年生产能力为 2 万 t。(中国色母粒网)