

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.06.015

# 基于 ANSYS 的浇口套冷却系统研究

冯亚斌, 王飞雷, 代海风, 杨文哲

(西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710613)

**摘 要:** 为了降低注塑模浇口套工作时的使用温度, 减小其形变以提高使用寿命, 课题组以风扇叶片注塑模为例研究注塑过程中高温、高压熔融塑料对浇口套结构的影响。利用有限元软件 ANSYS 在注塑模型腔最大压力下对注塑模浇口套进行结构研究, 在此基础上根据热弹性耦合理论对其进行热力耦合分析, 发现在型腔压力一定时注塑模温度增高会导致浇口套形变增加, 影响浇口套的使用寿命; 故提出一种浇口套冷却系统, 并利用 ANSYS CFX 进行传热流动分析。研究表明: 冷却系统能明显降低浇口套工作时的使用温度。研究达到了减小注塑模浇口套形变、提高其使用寿命的目的。

**关 键 词:** 注塑模浇口套; 热弹性耦合分析; ANSYS CFX; 传热流动分析

中图分类号: TQ320.52; TH161.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2019)06-0077-05

## Research on Cooling System of Sprue Sleeve Based on ANSYS

FENG Yabin, WANG Feilei, DAI Haifeng, YANG Wenzhe

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710613, China)

**Abstract:** For injection mold sprue sleeve, in order to reduce the operating temperature during operation, reduce the deformation to improve the service life. Taking the fan blade injection mold as an example, the influence of high temperature and high pressure molten plastic on the structure of the sprue sleeve during the injection process was studied. The structural analysis of the maximum pressure of the injection molding cavity was carried out by means of the finite element software ANSYS. Based on thermo-elasticity coupled analysis, the thermo-mechanical coupling analysis was carried out. It was found that the temperature of the injection mold increased when the cavity pressure was constant, which would lead to an increase in the shape of the sprue, affecting the service life of the sprue sleeve; therefore, a sprue sleeve cooling system is proposed, and the heat transfer flow analysis is performed by ANSYS CFX. The results show that the cooling system can obviously reduce the operating temperature of the sprue sleeve, which aims to reduce the deformation and improve the service life.

**Keywords:** injection mold sprue sleeve; thermo-elasticity coupled analysis; ANSYS CFX; heat transfer flow analysis

随着市场经济的繁荣, 注塑模具的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>, 逐渐在现代制造业中占有举足轻重的位置。为提升注塑模多方面性能, 国内外学者开展了深入的研究。Smith 等<sup>[2]</sup>用 B2 样条曲面表征型腔中面, 用参数化坐标表征浇口位置, 采用序列线性规划法对浇口位置进行了优化。林权等<sup>[3]</sup>利用基因遗传算法结合模流分析技术为优化搜寻工具, 进行冷却水道成型参数设计, 实验发现能够有效的解决水道布局困难的问题; 王善凯等<sup>[4]</sup>优化浇口、主流道的位置和长度来优化模具的结构, 从而使得制件的翘曲变形减小; 郑占明

等<sup>[5]</sup>结合遗传算法和数值模拟技术用于注射速率的优化, 确定了螺杆速度或注射速率的最优值。但关于提高注塑模浇口套使用寿命方面的研究较少。

浇口套安装在注塑模具定模板上, 是连接注射机料筒喷嘴和注射模具的桥梁, 它是熔融的塑料进入模具型腔时最先经过的地方<sup>[6]</sup>。浇口套部分在成型过程中, 主流道与特定温度、压力的塑料熔融体冷热交替反复接触<sup>[7]</sup>, 造成浇口套在短时间内产生反复的热胀冷缩, 导致浇口套使用寿命严重缩短。课题组针对风扇叶片注塑模浇口套, 利用热弹性耦合理论, 对注塑过

收稿日期: 2019-04-17; 修回日期: 2019-09-10

第一作者简介: 冯亚斌(1996), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要研究方向为注塑模具。E-mail: yabin114@163.com

程中注塑模型腔最大压力时进行多场仿真模拟分析,提出一种浇口套冷却系统对工作状态下的浇口套进行降温,以延长其使用寿命。

## 1 浇口套热弹性耦合模型

对于非恒温场中的弹性体,温度的变化不仅会造成弹性体产生热变形,同时会产生热应力,也将引起材料性能的改变。另外,弹性体变形及变形速率也影响着温度的变化。所以,热弹性问题需要考虑变形和热的互相转化关系,相关导热方程和热弹性运动方程要将位移分量和温度变化作为耦合问题解决<sup>[8]</sup>。此外,还要考虑物性随温度而变化的影响,如剪切模量、线膨胀系数等。因此,耦合热弹性问题很难获得真正的解析解。

根据浇口套圆柱筒体结构,其热力耦合分析模型采用柱坐标,结构对称轴方向为 $z$ 向,径向为 $r$ 向,周向为 $\theta$ 向。可将耦合热弹性问题简化为只考虑温度对弹性体变形影响的准静态半耦合热弹性问题,再采用数值计算方法予以求解。热力耦合模型如图1所示。

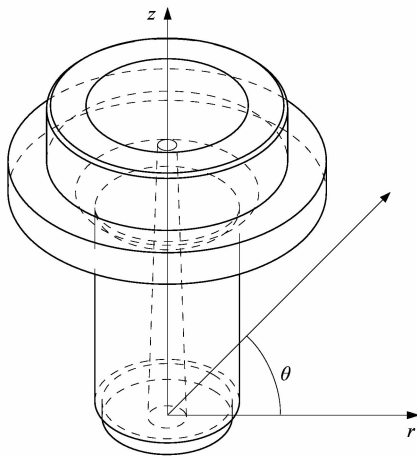


图1 热力耦合模型

Figure 1 Thermal coupling model

模型轴对称,三维柱坐标系稳态情况下导热微分方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

式中: $k$ 为导热系数; $T$ 为温度。

边界条件为:

$$q|_S = q_w = h \Delta T$$

式中: $h$ 为界面换热系数(对于接触界面换热相当于接触热导); $\Delta T$ 为界面温差; $q_w$ 为边界面上热流密度,在稳态热平衡情况下为常量; $S$ 表示边界面。

关于浇口套稳态热平衡下传递的热量 $Q$ 可表示为<sup>[9]</sup>:

$$Q = h A \Delta T = \alpha p^x A \Delta T$$

式中: $\alpha = \frac{k C \sigma'}{\sigma H^x}$ , $x$ 为指数,取0.50~0.95, $k$ 为接触材料调和平均导热系数, $C$ 为常数, $\sigma$ 为表面高度的均方根偏差, $\sigma'$ 为表面平均坡度; $H$ 为较软材料的硬度; $p$ 为界面接触载荷;接触材料、状态一定的情况下 $A$ 为常数。

对浇口套模型进行热弹性结构分析的基础是建立传热分析。在结构分析中考虑温度对弹性变形的影响,但在热分析中没有考虑弹性变形对温度的影响,所以这里温度作为传热分析后的已知结果。

此模型为轴对称,弹性体在三维柱坐标系下的平衡微分方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + R = 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + Z = 0. \end{cases}$$

几何方程:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r};$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r};$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z};$$

$$\gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}.$$

热应变:

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \theta \\ \alpha_2 \theta \\ \alpha_3 \theta \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

应力-应变关系为:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{v_{21}}{E_2} & -\frac{v_{31}}{E_3} & 0 \\ \frac{v_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{v_{32}}{E_3} & 0 \\ -\frac{v_{13}}{E_1} & -\frac{v_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \sigma_r \\ \sigma_{rz} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ 0 \end{Bmatrix} \theta.$$

式中: $\sigma$ 为应力; $\tau$ 为剪应力; $\varepsilon$ 为正应变; $E$ 为弹性模量; $v$ 为泊松比; $\alpha$ 为热膨胀系数; $G$ 剪切弹性模量;下标 $r, \theta, z$ 为柱坐标分量符号。

## 2 浇口套有限元模拟分析

### 2.1 浇口套结构分析

浇口套安装如图 2 所示。在 SolidWorks 软件中完成零件的装配和修改,为简化结构,提高计算效率,省略螺钉、螺栓孔等结构。浇口套及安装部分的结构也进行了相应的简化,最终的分析模型如图 3 所示。

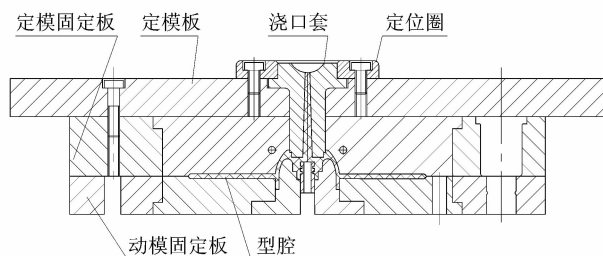


图 2 浇口套结构

Figure 2 Structure of sprue bushing

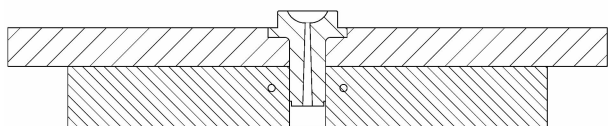


图 3 简化后浇口套结构

Figure 3 Structure of simplified sprue bushing

结构分析中载荷只有应力载荷,载荷来源是注塑机向密闭型腔注入高压熔融态的 AS 塑料,模具在保压时间内主流道受到最大压力载荷。在注射时间内,塑料熔融体进入型腔,并达到最远处,而且压力急剧升高。在保压时间内,螺杆作少量推进,以维持一定的压力,使其充分压实补缩<sup>[10]</sup>。故结构分析中压力载荷取最大型腔压力为施加载荷。

高压塑料熔融体刚充满模具型腔时会产生沿开模方向的力,此力称为胀模力。胀模力大小等于塑料件和浇注系统在分型面上投影面积乘分型面上模腔的平均压力  $P_c$ 。模具锁模力必须大于胀模力,才能防止分型面上产生溢边,保证塑料件在深度方向的尺寸精度<sup>[10]</sup>。

因此:

$$F \geq KP_c s.$$

式中:  $F$  为注射机的额定锁模力;  $s$  为塑料件与浇注系统在分型面上的总投影面积;  $P_c$  为型腔压力;  $K$  为安全系数,通常取 1.1 ~ 1.2。

由 SolidWorks 分析可得  $s = 25\,513\text{ mm}^2$ ,安全系数  $K$  取 1.2,此注塑模使用的注塑机为 SZ160/1000,其额定锁模力为 1 000 kN,得  $P_c = 32.7\text{ MPa}$ 。

应用 ANSYS Workbench 进行浇口套结构场分析,

采用模型导入的方法。在前处理器中选择结构分析选项,浇口套使用材料为 45 号钢,其密度为  $7\,890\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。

应用 ANSYS 对模型进行有限元网格划分,为使仿真结果更加精确,采用六面体主导划分的方法划分网格。因为此方法使用的算法可以用虚拟拓扑工具把一些面或边构成组,构成虚拟单元,从而在计算精度、变形特性、划分网格数量和抗畸变程度等方面有明显的优势<sup>[11]</sup>。网格划分后,有限元结构分析模型共有 926 994 个节点,251 655 个单元。

在浇口套主流道上加载应力载荷时,需要对模型的自由度进行约束,模型的动模固定板设置为固定不动,定位圈、浇口套、定模板和定模固定板等设置为只有轴向自由度。载荷设置为 32.7 MPa 并提交运算器模块进行运算,完成后,在后处理器中查看压力的运算结果,考虑到结构的对称性,取浇口套结构整体 1/2 作为研究对象,其总变形如图 4 所示。

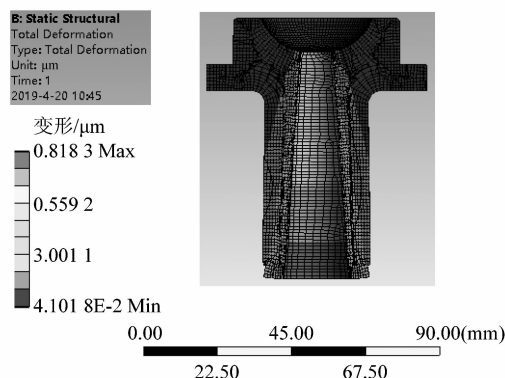


图 4 浇口套变形

Figure 4 Deformation of sprue bushing

由图 4 看出,浇口套在施加载荷后有明显的形变,最大形变可达  $0.8183\text{ }\mu\text{m}$ ,且越靠近主流道出口端的形变变化越明显。

### 2.2 浇口套热力耦合分析

在工作情况下,浇口套内壁不仅受到高压熔融塑料的压力而且内壁受到高温熔融塑料的作用。为研究温度对注塑模工作时浇口套的变形影响,所以在结构分析的基础上对此模型进行热力耦合分析。

热力耦合实际上是力和热两个物理场之间的相互作用。根据 ANSYS 顺序耦合场分析方法进行模拟,网格划分采用六面体结构单元。设置材料的比热容为  $475\text{ J/(kg}\cdot\text{ }^\circ\text{C)}$ 、热膨胀系数为  $1.2 \times 10^{-6}$ 。温度载荷采用 AS 材料工业加工温度  $200\text{ }^\circ\text{C}$ 。浇口套热力耦合分析后,总变形如图 5 所示。

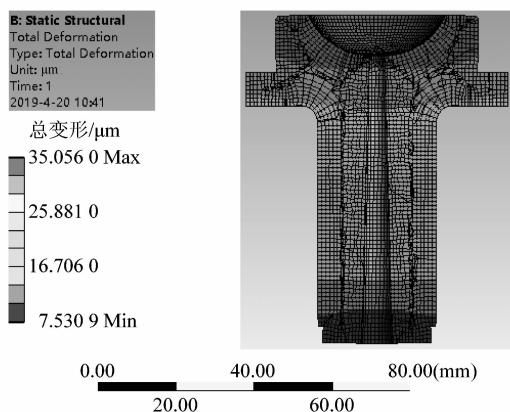


图5 热力耦合分析下浇口套总变形

Figure 5 Total deformation of sprue bushing under thermal coupling analysis

完全接触的物体之间导热主要是由于温度的阶梯变化而引起的各零件之间的内能交换,在分析过程中需要考虑各零件之间的热量传递,接触的零件之间需对接触参数进行设置,此模型为稳态热分析,作用力的影响不予考虑,相互接触的零件之间只进行热交换,接触面中的导热系数设定为  $47 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 。

图5中浇口套的最大形变为  $35.056 \mu\text{m}$ ,最小形变为  $7.5309 \mu\text{m}$ ;图4中最大形变为  $0.8183 \mu\text{m}$ ,最小形变为  $0.041018 \mu\text{m}$ 。可以看出浇口套热力耦合分析产生的变形远大于其结构分析产生的变形,两者形变相差3个数量级。另外,可以看出,在进行热力耦合分析时浇口套进口端变形变化最明显,原因是浇口套进口端比出口端材料更多,所以受热后热胀冷缩明显,变形量明显增加。可得出温度对浇口套变形比只有压力载荷作用时大的结论。

### 3 浇口套冷却系统

为降低浇口套工作时的温度提高浇口套的使用寿命,为浇口套设计了冷却回路。在注塑模定模板内设计一条平面回路式的冷却管道,在注塑模工作时为管道注入定速常温水,达到降温的效果,冷却管道与水流方向如图6所示。

利用 ANSYS CFX 对工作状态下的浇口套部分进行传热流动分析,为了使计算仿真更易于收敛,所以网格划分方法采用 Fluid Flow (CFX) 中自动生成网格功能并将划分类型设置为四面体网格,并在壁面附近、部件结合面、主流道区域增加网格密度,这有利于提高模型的计算精度并且模型的流场特性更易于捕捉。划分完成后单元有 1 105 745 个,节点有 213 456 个。网格划分如图7所示。

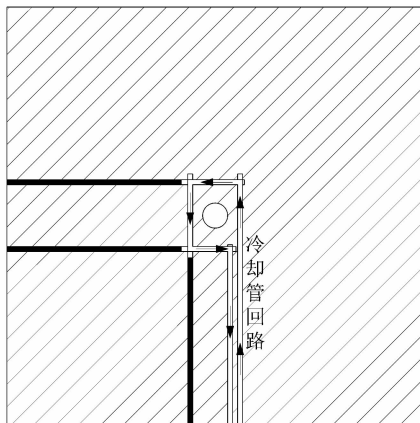


图6 冷却回路结构及水流方向

Figure 6 Cooling circuit structure and water flow direction

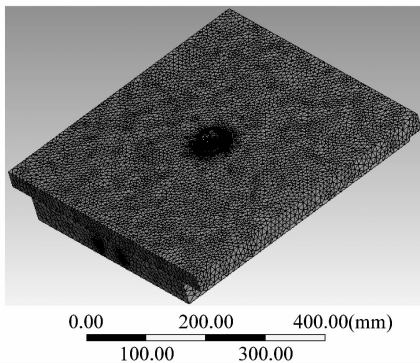


图7 模型传热流动分析网格划分

Figure 7 Model heat transfer flow analysis grid division

模型计算中的域和边界条件都在 CFX-pre 中完成,包括流体域及固体域、浇口套冷却系统的进出口条件和出入口边界条件等。进入 CFX-Pre 参照上文对模型的材料参数进行设定,并创建模型的计算域,包括流体域和固体域。因为在模型中只计算对流换热及热传导,不考虑流体动能带来的变化,且流体流动速度较低,所以选择热焓传热模型为传热模型<sup>[12]</sup>。模型流体域边界条件需要设置流体的进出口位置、流体的温度  $25^\circ\text{C}$ 、流体入口处速度  $1 \text{ m/s}$ 、流固的接触面等。模型固体域边界条件需要设置为主流道内孔温度  $200^\circ\text{C}$ 。边界条件设定完成的模型如图8所示。

浇口套流场分析模拟求解是采用 ANSYS CFX 软件中全隐式多重网格耦合算法求解器 CFX-Solver 进行求解。图9和图10分别是无冷却系统的浇口套和有冷却系统的浇口套在受热时的温度分布图。

图9显示,无冷却系统的浇口套受热时主流道承受的温度最高。温度分层明显,尤其是主流道中部,出

现了温度较高且集中的现象,并且浇口套外壁周围的温度分层较大,向外辐射递减。图 10 显示,主流道没有出现温度集中现象,主流道能保持较高的温度保证熔融塑料不会在主流道出现冷凝现象,且浇口套外壁周围没有较大的温度分层。

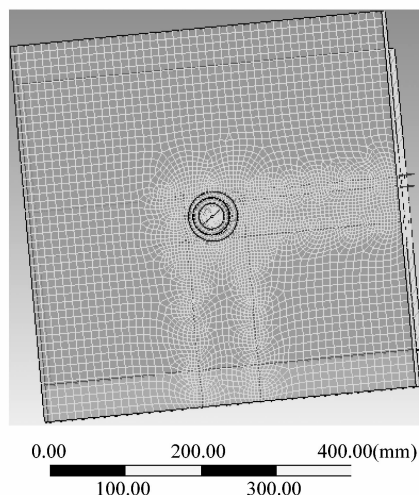


图 8 前处理完成图

Figure 8 Pre-processing complete diagram

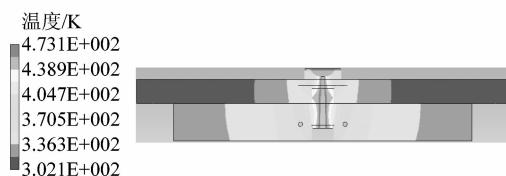


图 9 无冷却系统的浇口套受热温度分布情况

Figure 9 Heating temperature distribution of sprue bush without cooling system

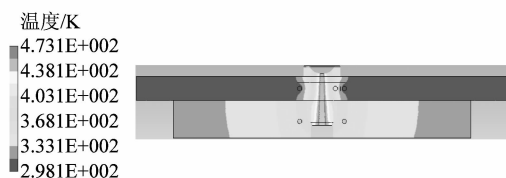


图 10 有冷却系统的浇口套受热温度分布情况

Figure 10 Heating temperature distribution of sprue bushing with cooling system

## 4 结论

1) 在浇口套同时受到热应力及压力载荷时,浇口套的变形远大于只有压力载荷时的变形,证明注塑模工作时高温熔融塑料对浇口套的形变有很大影响,高温能影响浇口套的使用寿命。

2) 通过 ANSYS CFX 软件对浇口套进行传热流动分析,证明提出的浇口套冷却系统对浇口套工作时有明显的降温效果,能提高浇口套的使用寿命。

3) 因为影响浇口套形变的主要因素为温度,所以在实际生产时可将浇口套的材料更换为耐热材料。

4) 进一步的研究可探究不同材料下浇口套的变形情况,为生产制造浇口套选择一种性价比较高的耐热材料。

## 参考文献:

- [1] 吴国强. 饮料容器塑料框架注塑模具设计研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2017:1.
- [2] SMITH D E. Optimal design and analysis for polymer extrusion and molding[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 1996:65.
- [3] 林权,刘瑞来. 基因遗传算法结合模流分析优化注塑模冷却水道设计[J]. 中央民族大学学报(自然科学版),2018,27(1):27-33.
- [4] 王善凯,李晶,胡激涛,等. 基于 Moldflow 的薄壁注塑件翘曲优化分析[J]. 西安工程大学学报,2015,29(3):369-374.
- [5] 郑占明,刘春太,申长雨. 基于遗传算法的注塑模注射速率优化[J]. 工程塑料应用,2002(7):25-28.
- [6] 卢荣敏,倪子田. 浅谈塑料模具的改良及应用[J]. 科技与企业,2014(16):338-339.
- [7] 张宏武. 鼠标注射模的结构设计[J]. 机械研究与应用,2010(2):76-77.
- [8] 刘康,汪荣顺,石玉美,等. 特种低温容器径向支撑结构热力耦合模拟分析[J]. 上海交通大学学报,2008,42(3):457-462.
- [9] 刘康. 纤维复合材料低温强冲击适用性研究[D]. 上海:上海交通大学,2007:60.
- [10] 徐佩弦. 塑料制品与模具设计[M]. 北京:中国轻工业出版社,2001:35.
- [11] 张岩. ANSYS Workbench 17.0 有限元分析从入门到精通[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2017:70.
- [12] 丁源,吴继华. ANSYS CFX 14.0 从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2013:82.