

基于 Moldflow 的注塑模具冷却系统有限元分析

卯声松¹, 张矿伟², 郑绪东³, 王程娅³, 汤建国³, 陈 焰¹

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南昆明 650500; 2. 玉溪师范学院物理与电子工程学院, 云南玉溪 653100; 3. 云南中烟工业有限责任公司技术中心, 云南昆明 650202)

摘要: 某汽车拉杆装饰罩因注塑模具的冷却系统设计不当, 造成产品出现明显的顶白缺陷。通过建立模具冷却系统的数学模型和汽车拉杆装饰罩注塑模具的三维模型, 并利用Moldflow软件对该模具冷却系统进行了有限元仿真分析。结果表明, 原模具冷却系统布局不合理, 塑件平均温度为64.3℃, 塑件凹槽处温度为100.5℃, 表面温度分布不均, 温度梯度大, 产品全部存在顶白缺陷。对冷却系统布局进行调整修改后, 塑件平均温度为46.5℃, 凹槽处温度为68.32℃, 缺陷部位温度较整改前下降32.18℃。保持注塑工艺条件不变, 连续抽样3 000件产品, 产品缺陷消失, 提高了产品质量和合格率。

关键词: 注塑模具; 冷却系统; Moldflow; 顶白

作者简介:

卯声松(1991-), 男, 硕士生, 研究方向为自动化技术检测及控制。电话: 15758011723, E-mail: 921022515@qq.com

通讯作者:

陈 焰, 男, 高级工程师。电话: 13211694197, E-mail: chy01@sina.com; 汤建国, 男, 高级工程师。电话: 15825147535, E-mail: jgtang@163.com

中图分类号: TG241

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2019)12-1407-04

基金项目:

云南省教育厅科学研究基金(2016ZZX201); 云南省科技厅科技计划(2018FD093)。

收稿日期:

2019-05-09 收到初稿,
2019-09-11 收到修订稿。

在模具结构中, 模具冷却系统冷流道的布局对成形制品的冷却及收缩的均匀性起着决定性作用。模具冷却系统通过科学设定冷流道的布局和调节模具介质对模具进行冷却, 带走模具在工作中产生的多余热量, 使模具温度保持恒定, 从而保证塑件质量。如果模具温度不稳定, 将导致制品零件收缩不均和尺寸不稳定。传统注塑模具设计主要依赖工程师的经验^[1], 在投入生产后往往通过工艺参数的调整甚至修改塑料制品规格来弥补由于模具设计失误造成的产品缺陷, 这种生产方式不仅降低了新产品的开发速度, 也为企业生产造成严重损失, 大约60%的塑件问题是由于模具冷却系统设计不恰当而引起的^[2-4]。

某公司汽车拉杆装饰罩由于注塑模具的冷却系统设计不当, 造成塑件出现顶白缺陷, 产品全部失效, 由此造成经济损失达千万元。为解决该问题, 本研究采用Moldflow软件对该模具进行流动模拟仿真, 利用MPI/Cool-Flow-Warp模块分析塑料注塑模具冷却系统对塑件温度场的影响, 结合塑件温度场分布, 预测塑件可能出现翘曲、顶白等缺陷的位置, 并通过实际产品加以验证。本研究的目的是通过仿真分析检验模具的冷却效果是否合理, 找到模具冷却系统设计缺陷, 提高一次试模成功率, 降低生产成本及生产周期^[5-6], 提高产品质量, 为优化冷却系统提供可靠的依据。

1 数学模型

注塑产品冷却过程中散发的热量通过介质(模具)传递到冷却水路, 以模具与水路接触部位为导热面积进行热传导, 使热量传递到水中带走, 期间要求水在水路中形成湍流, 保证足够的散热面积, 以达到最佳冷却效果。在冷却过程中, 若要求模具内部各点的温度和热流值, 应同时考虑模具冷却系统的几何参数和物理参数及熔体与模具型腔之间的相互热作用, 需用具有周期性边界条件的热扩散方程求解。在工程应用中, 通常采用数值方法利用计算机得近似解。本研究的热塑性模具热分析涉及热传导和热对流两种方式, 包括塑件与模具之间的热传导、水路和模具之间的热传导、模具与空气的热对流^[7]。实际冷却过程较为复杂, 为方便对模具传热过程的分析, 依据实际注塑过程的特性, 对冷却过程进行了简化与假设。基本假设为:

模具的材料为各向同性材料；在工作过程中塑件与模具完全接触，忽略接触热阻；模具与周围环境的热交换仅考虑热对流交换，无辐射换热；忽略注塑填充过程中的热交换。

基于以上假定，模具传热过程可视为三维瞬态热传导问题，遵循能量守恒方程，如式（1）。

$$\frac{de}{dt} + P \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \frac{\Phi}{\rho} \quad (1)$$

式中： e 为流体内能， P 为流体在该点的压强， ρ 为流体密度， Φ 为耗散函数， Φ/ρ 为边界表面对流体做功产生的热量。方程右端在直角坐标系可表示为式（2）。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho c w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (2)$$

式中： c 、 T 、 λ 分别为比热容、液体温度、液体导热系数， S 为源项。基于假设，视 $u=v=w=0$ ，密度比热容导热系数均为常数，为各向同性。简化式（2），得式（3）。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

式中： $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$ ，简化为二维方程可得式（4）。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

通过近似方法利用计算机求解即可得塑件在不同时间和位置的温度场。

2 模型建立及模拟分析

针对塑件出现的缺陷问题，利用Moldflow进行冷却系统优化的流程为：导入CAD模型或新建CAD模型—划分网格并对网格进行分析—网络检查与修补—分析类型判定选择—选定分析材料—建立冷却系统—设定工艺参数—进行分析计算—查看分析结果。

在整体仿真结束后，查看分析结果是否合理，若得到合理的仿真数据，可将数据导出。若得到错误的仿真数据，可返回到冷却系统，重新检查和建立冷却系统的模型，检查并设定工艺参数进行分析计算，直到得到合理有效的数据为止。

2.1 模型建立

以某汽车厂手刹拉杆装饰罩注塑模具为研究对象，该零件为汽车拉杆装饰罩，整体呈长方体，曲面，壁薄，外形尺寸为38.5 cm，深16.8 cm，主壁厚0.35 cm，该产品有多处凹槽、凸台、圆角、圆孔及肋板，内表面有较多需要配合精度高的卡扣，局部结构复

杂。材质为共混改性后的聚丙烯PP塑料。利用UG6.0软件中的三维建模功能，建立拉杆装饰罩注塑制品及模具的三维实体模型^[8]，塑件结构见图1，模具结构见图2。

2.2 模拟仿真过程

模具材料为P20，塑件采用共混改性后的聚丙烯PP塑料，塑件材料基本性能见表1^[9]。将实体模型转化为IGES格式导入Moldflow软件中，选用MPI/Cool-Flow-Warp分析模块。设定双层面网格（网格边长为3 mm），统计网格划分品质，对网格的纵横比、重叠单元、配向、连通性及自由边等做诊断修订。塑件共划分为37 964个单元，节点为19 861个。最小纵横比为1.55，最大纵横比为9.8<10，匹配率为88.1%>85%，满足分析要求^[10]。

Moldflow参数设置如下：熔体温度230 ℃，模具温度60 ℃，冷却介质为水，冷水机进水温度为20 ℃，冷却介质流量为1 L/min，入口雷诺系数为10 000（湍流状态），冷却时间为40 s。

2.3 仿真结果

Moldflow仿真见图3a，观察塑件仿真结果，塑件平均温度为64.3 ℃，塑件凹槽处温度为100.5 ℃，塑件表面温度分布不均，温度梯度大。进一步分析塑件凹槽部位设有顶出机构，在模具冷却系统工作完成后，模具顶出系统将塑件顶出，在此温度下，塑件凹槽处极易出现顶白缺陷。为验证设想的真实性，在该模具达到稳定工作状态后连续抽样500件，塑件凹槽部位全部出现顶白。由此可见，塑件凹槽部位模具冷却系统水路布置不合理^[11]，应对该部位冷却系统进行整改。

重新设计产品缺陷部位的冷却系统水路布局，其

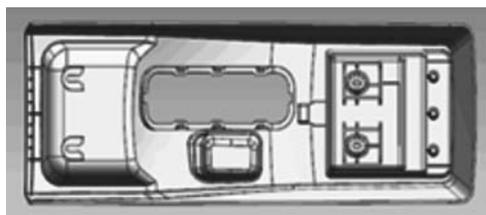


图1 塑件结构

Fig. 1 Structure of plastic parts

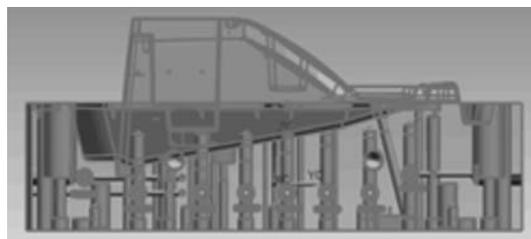


图2 模具结构

Fig. 2 Mold structure

他条件不变,对该模具冷却系统再次进行模流分析,塑件温度场分布见图3b。分析仿真结果,塑件平均温度为46.5℃,凹槽处温度为68.32℃,较整改前该部位温度下降32.18℃,且调整后的模具冷却系统水路布局能使塑件表面温度分布均匀,理论分析顶白缺陷消失。

此外,冷却时间是由制件的最高温度和顶出温度的差值来确定^[12]。从调整后的模具冷却系统仿真结果可知,制件最高温度(68.32℃)远小于顶出温度(85℃),型腔平均温度(46.5℃)远小于模具温度(60℃),表明冷却时间(40s)过长。因此,可以缩短冷却时间,调整工艺参数以提高生产效率^[13]。

2.4 模具冷却系统优化

在模具开模前,设计出合理的模具冷却系统对于注塑成型至关重要。为了提高二次开模的成功率,根据仿真分析得到的数据结果对模具冷却系统的水路设计形式、水路直径、水路布局位置进行优化设计。

2.4.1 冷却水路设计形式

行业内,常用水路形式有直水路、水井、点冷式三种。通过对塑件结构深入研究分析,优先选择加工简单、冷却性能好、对冷却介质阻力小的直水路式冷却水路设计形式。

2.4.2 水路直径参数设计

结合行业内标杆公司的模具水路设计直径及公司内部设计标准,给出管路直径的建议标准值如下:

在空间允许的情况下应优先选择大直径。 $T < 650\text{ t}$, 直径为 $\Phi 8\text{ mm}$ 和 $\Phi 10\text{ mm}$; $650\text{ t} \leq T \leq 800\text{ t}$, 直径为 $\Phi 10\text{ mm}$ 和 $\Phi 12\text{ mm}$; $800\text{ t} < T < 2\ 800\text{ t}$, 直径为

$\Phi 15\text{ mm}$; $T \geq 2\ 800\text{ t}$, 直径为 $\Phi 18\text{ mm}$ (T 表示注塑机吨位)。

结合实际情况,在保证空间足够情况下优先选择大直径、冷却介质在冷却管道内处于湍急状态的前提下,冷却管直径设计为 $\Phi 8\text{ mm}$ 、 $\Phi 10\text{ mm}$ 和 $\Phi 12\text{ mm}$ 。

2.4.3 水路布局位置

冷却水路在布局时,必须先设计脱模机构,留以足够空间,避免结构间干涉。管道位置主要设计因素有水路间间距和水路距塑件表面距离两个方面。

第一方面,水路间间距 h 。模具冷却水路的水路间距在设计时无明确的具体标准,若模具水路间隙过大,不利于模具温度的稳定与均衡。因此,在现有已知参数结合仿真结果的情况下,最终分析确定:管道直径为 $\Phi 8\text{ mm}$ 时, $h < 70\text{ mm}$;管道直径为 $\Phi 10\text{ mm}$ 时, $h < 80\text{ mm}$;管道直径为 $\Phi 12\text{ mm}$ 时, $h < 90\text{ mm}$ 。

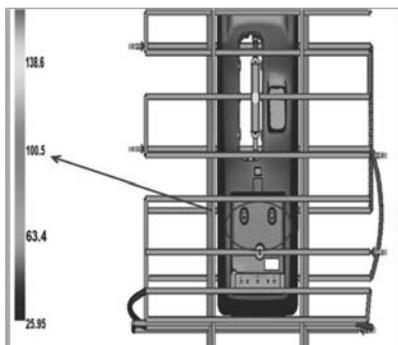
第二方面,水路距塑件表面距离 l 。水路距塑件型腔表面的距离要科学布局,一般保持在水路直径的2~3倍。选取几款市场反馈强烈的汽车拉杆装饰罩进行参数研究,发现水路与塑件产品距离为76 mm,布局不合理。根据行业经验值(T 表示注塑机吨位), $T < 650\text{ t}$, $l = 20\text{ mm}$; $650\text{ t} \leq T \leq 800\text{ t}$, $l = 20\text{ mm}$; $800\text{ t} < T < 2\ 800\text{ t}$, $l = 20\text{ mm}$; $T \geq 2\ 800\text{ t}$, $l = 20\text{ mm}$,及大量的实验探索研究,最终将水路至塑件表面距离调整为 $l \leq 35\text{ mm}$ 。

在实验仿真结果的指导下,完成上述模具冷却系统的优化,按照新的设计图纸对模具重新开模,在注塑工序工艺条件不变的情况下,连续进行3 000件产品抽样,产品顶白缺陷消除,产品如图4所示。

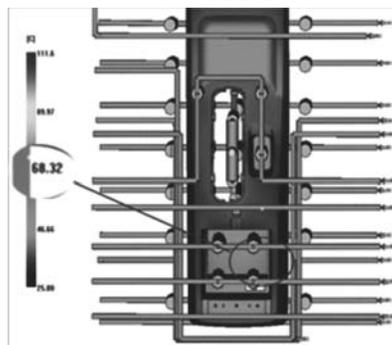
表1 塑件材料基本参数

Table 1 Basic parameters of plastic parts

熔体流动速率/[g·(10 min) ⁻¹]	弯曲强度/MPa	弯曲弹性模量/MPa	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	IZOD缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)
32	49.93	1 643.88	36.43	19.78	8.38
密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比/ ν	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	
956	0.89	0.420 3	1 930	2.8	



(a) 改善前



(b) 改善后

图3 冷却系统改善前和改善后塑件温度场分布图

Fig. 3 Temperature field distribution of plastic parts before and after cooling system improved



图4 塑件产品

Fig. 4 Produced plastic part

3 结束语

利用Moldflow软件对模具冷却系统结构进行仿真分析, 塑件表面温差极大, 准确预测塑件出现顶白缺陷的位置。对模具冷却结构重新布局并再次仿真分析, 塑件缺陷位置温度由100.5 ℃下降至68.32 ℃, 降低了塑件表面温差, 保证了冷却均匀性。利用仿真分析得到的数据结合理论分析、试题实验等方法对模

具冷却系统内部的水路设计形式、水路直径、水路布局位置等主要因素进行重新设计, 设计完成后重新开模, 随机抽取3 000件产品进行合格检验, 通过产品实际验证, 产品顶白缺陷消失, 有效提高了产品质量和合格率, 在一定程度上为模具注塑制造行业提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 李庆. 基于CAD/CAE集成模型的塑料注射模优化设计系统 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [2] 张龙. 基于CAD/CAE集成的注塑模冷却系统的研究与开发 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [3] 冯刚, 田雅萍, 张朝阁. 注塑模具冷却系统的关键技术及研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2014, 42 (9): 115-119.
- [4] 王金水, 魏爱思, 杨大成. 基于Moldflow的汽车外饰件成型缺陷分析与优化设计 [J]. 中国塑料, 2016, 30 (4): 102-108.
- [5] 王刚, 单岩. Moldflow模具分析应用实例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] 汤宏群, 苏广才. Moldflow在注塑成型中的应用 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2003, 28 (s1): 61-63.
- [7] 李熹平, 赵国群. 快速热循环注塑模具加热与冷却过程分析及其结构优化设计 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (1): 196-201.
- [8] 李颖晴, 郑志安. UG NX7.5注塑模设计师基础与范例标准教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 51-71.
- [9] 刘仿军, 吕恒勇, 李亮, 等. 汽车内饰件用聚丙烯材料的研究 [J]. 塑料科技, 2013, 41 (6): 49-52.
- [10] 段贤勇, 何顺荣. 大型塑料托盘注塑成形分析的FEA模型创建 [J]. 制造技术与机床, 2012, (12): 145-147.
- [11] 胡明良. 基于CAE技术的超声探头外壳注塑模具设计 [D]. 四川: 成都理工大学, 2015.
- [12] PARK S J, KWON T H. Optimal cooling system design for the injection molding process [J]. POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, 1998, 38 (9): 1450-1462.
- [13] 刘卫军. 基于选择性激光熔化成型技术的随形冷却流道注塑模具的设计制造研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.

Finite Element Analysis of Cooling System in Injection Mold Based on Moldflow

MAO Sheng-song¹, ZHANG Kuang-wei², ZHENG Xu-dong³, WANG Cheng-ya³, TANG Jian-guo³, CHEN Yan¹

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunan, China; 2. School of Physics and Electronic Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, Yunan, China; 3. Technology Center of China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming 650202, Yunan, China)

Abstract:

Improper design of the cooling system in the automobile rod decorative cover injection mold led to the plastic parts to occur visible ejector white marks defect. In this study, both mathematical model of the mold cooling system and three-dimensional model of the decorative cover injection mold were established, and finite element simulation analysis was carried out based on Moldflow software. The results show that the layout of the cooling system in original mold was unreasonable; the average temperature of the plastic parts was 64.3 ℃, while the temperature of the groove was 100.5 ℃. Uneven surface temperature distribution and large temperature gradient were responsible for ejector marks. After the cooling system layout was adjusted and modified, the average temperature of the plastic parts was 46.5 ℃, the temperature of the groove was 68.32 ℃, with a decrease of 32.18 ℃. Keeping the injection molding process conditions unchanged, 3 000 products were continuously sampled. As a result, visible ejector white marks defect disappeared with improved product quality and pass rate.

Key words:

injection mold; cooling system; Moldflow; ejector white marks