

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.07.013

双头螺旋内齿轮精密注塑冷却工艺优化

宁敬威^{1,2},林立²,刘文²,崔红伟¹,徐平均³,胥树志³,王菊维³,马健³,邬华东³

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院,太原 030024; 2. 浙江万里学院信息与智能工程学院,浙江宁波 315100;

3. 宁波双林部件股份有限公司,浙江宁波 315600)

摘要:以双头螺旋内齿轮注塑模冷却工艺为例,探究不同冷却工艺方案对成型精度的影响。根据双头螺旋内齿轮结构特点,采用三维建模软件 UG (Unigraphics NX) 构建齿轮结构模型,运用响应面法确立模具温度、熔体温度、保压压力和保压时间等最优注塑工艺参数,提出三种不同的冷却工艺方案,运用正交试验法确定最优的冷却水道布局参数,通过 Moldflow 软件对不同方案的流动前沿温度、回路冷却介质温度以及翘曲变形量进行分析比较,结果表明,轴向冷却工艺方案流动前沿温度差为 23.7℃,浮动最小,回路冷却介质温度差最小,且整体翘曲变形量为 0.2748 mm,模拟效果最好。采用最优冷却工艺方案进行模具设计开发,并进行试模。试模结果表明,实际注塑产品成型精度满足设计要求,验证了优化工艺方案的可行性与模流分析的可靠性。

关键词: 双头螺旋内齿轮; 冷却工艺; 精密注塑

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)07-0079-07

Optimization of Precision Injection Cooling Process for Double-headed Spiral Internal Gear

Ning Jingwei^{1,2}, Lin Li², Liu Wen², Cui Hongwei¹, Xu Pingjun³, Xu Shuzhi³, Wang Juwei³, Ma Jian³, Wu Huadong³

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. College of Information and Intelligent Engineering, Zhejiang Wanli College, Ningbo 315100, China;

3. Ningbo Shuanglin Components Co., Ltd., Ningbo 315600, China)

Abstract : The cooling process of injection mold for double-headed spiral internal gear was taken as an example to explore the influence of different cooling process schemes on the forming accuracy. According to the structural characteristics of double-headed spiral internal gear, the structure model of gear was built by using 3D modeling software UG (Unigraphics NX), and the optimal injection process parameters such as mold temperature, melt temperature, holding pressure and holding time were determined by using response surface methodology. Three different cooling process schemes were proposed. The optimal cooling channel layout parameters were determined by orthogonal experiment. Moldflow software was used to analyze and compare the flow front temperature, loop cooling medium temperature and warpage deformation of different schemes. The results show that for axial cooling process scheme, the temperature difference of flow front is 23.7℃, of which the floating is the smallest, the temperature difference of loop cooling medium is the smallest, and the overall warpage deformation is 0.2748 mm, which has the best simulation effect. The optimal cooling process was adopted to design and develop the mold, then the mold was tested. The test results show that the molding precision of the actual injection products meets the design requirements, which verifies the feasibility of the optimized process scheme and the reliability of the mold flow analysis.

Keywords : double-headed spiral internal gear ; cooling process ; precision injection

随着碳达峰与碳中和节能减排目标的提出,汽车轻量化已成为汽车领域实现“双碳”目标不可或缺的一部分。相较于金属齿轮,塑料齿轮具有质量轻、工作噪音小、耐磨损、自润滑等优良特性,并且还

基金项目: 中国创新挑战赛项目 (2021E006), 宁波市 2025 重大专项 (202002P2004), 浙江省基础公益研究计划 (LGG20E050004), 奉化区产业链关键核心技术“揭榜挂帅”项目 (202106201)。

通信作者: 刘文,博士,副教授,主要从事先进塑性成形技术和智能装备技术研究

收稿日期: 2022-04-01

引用格式: 宁敬威,林立,刘文,等. 双头螺旋内齿轮精密注塑冷却工艺优化 [J]. 工程塑料应用,2022,50(7):79-85.

Ning Jingwei, Lin Li, Liu Wen, et al. Optimization of precision injection cooling process for double-headed spiral internal gear [J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7):79-85.

可以成型较复杂的形状,进行大批量低成本生产。用塑料零部件替代汽车金属零部件,是实现汽车轻量化的有效手段之一。塑料齿轮在成本、设计、加工和性能上的巨大优势,使其在汽车行业中的应用越来越广泛^[1]。

为了保证塑料齿轮齿形参数精度,满足齿轮传动过程中工作稳定性和传动噪音等要求,塑料齿轮的加工精度尤为重要。对于注塑制品而言,冷却工艺占据着十分重要的地位,是影响塑料齿轮成型精度的主要因素之一^[2-3]。赵天德^[4]通过优化一种注塑加工冷却工艺,证明冷却工艺对翘曲变形有重大影响;Chen等^[5]介绍了一种通过3D打印技术实现的注塑共形冷却通道效率最大化的方法;韩伟等^[6]针对塑件的结构特点设计了一种多层次的模具冷却系统使复杂构件得到充分均衡的冷却。

在合模—填充—保压(气辅,水辅)—冷却—开模—脱模的整个注塑过程中,冷却时间可以占到整个成型周期的80%以上^[5,7],而冷却工艺将通过影响注塑制品的冷却时间、翘曲变形量、型腔残余应力、表面粗糙度以及产品力学性能等来最终影响注塑制品的质量^[8-9]。因此,对精密注塑制品进行冷却工艺设计,有利于缩短生产周期,减少模具调整及试模次数,增加注塑精密度,从而提高产品质量^[10]。

综合以上研究,笔者以汽车零部件中的塑料双头螺旋内齿轮为例,通过交互式计算机辅助设计与计算机辅助制造(CAD/CAM)三维设计软件UG(Unigraphics NX)对双头螺旋内齿轮及冷却工艺布置方案进行三维建模,同时为保证双头螺旋内齿轮的高效冷却,设计传统冷却、轴向冷却和螺旋冷却三种不同空间结构的冷却工艺方案,以流动前沿温度、回路冷却介质温度以及翘曲变形量作为工艺目标参数,运用Moldflow对三种不同的方案进行模流分析,通过综合对比获得最高效的冷却工艺方案,为模具冷却工艺结构设计提供有利参考^[11]。

1 精密塑料齿轮冷却工艺设计

为设计出高效可行的冷却工艺方案,需在设计过程中满足冷却工艺设计的两项原则,既能使注塑制品均匀冷却,又能使注塑制品迅速冷却^[12]。为实现以上目的,提高冷却效率,首先需要明确双头螺旋内齿轮外形结构及基本制品尺寸,建立三维模型;然后确定注塑材料,对双头螺旋内齿轮模型进行网

格划分;最后确立最佳浇注及填充系统。

1.1 产品结构特点及注塑工艺分析

(1) 产品结构分析。

双头螺旋内齿轮整体为圆柱状薄壁塑料制品,内为空腔,顶面外直径26 mm,内直径11 mm,高39 mm,外表面光滑平整无毛刺,内表面带有斜齿且斜齿间距波动范围在0.05 mm以内。双头螺旋内齿轮顶部壁厚0.86 mm,顶面内部凹槽深1.3 mm,底部壁厚0.8 mm,带有4个凹槽、2个孔洞,具体三维模型如图1所示。

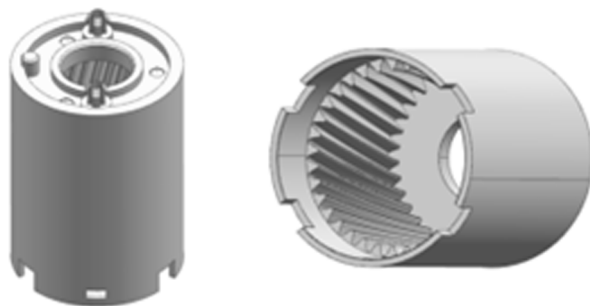


图1 双头螺旋内齿轮三维模型

(2) 注塑材料选择与网格划分。

对于双头螺旋内齿轮,要求外齿面光滑且光泽度好,内斜齿面精度高,无填充不均匀、带毛刺或缩孔等注塑加工问题。为保证双头螺旋内齿轮良好的力学性能,使其具有优良的强度、耐磨性、韧性、耐疲劳性和抗蠕变性等以适应汽车运行中的复杂工况环境,同时具有优良的电绝缘性、耐溶剂性和可加工性,选择热塑性结晶性高分子聚合物——聚甲醛(POM)为注塑材料。材料工艺仿真参数范围为:熔体温度205~225℃,模具温度80~100℃,材料最大许用剪切应力0.45 MPa,最大许用剪切速率40 000 s⁻¹。

在对双头螺旋内齿轮进行注塑模流分析前,首先需要对整体模型进行分析前处理,主要处理模型的尖角、较小倒角等网格薄弱环节,避免因网格质量问题而导致仿真分析失败^[13-14]。然后将处理好的模型另存为.igs格式导入到Moldflow软件中,采用3D网格模型,不断完善网格划分结果。经划分,双头螺旋内齿轮网格部分最大纵横比为26.82,最小纵横比为1.05,平均纵横比为3.07,划分完网格的模型如图2所示,网格匹配率达到88%以上^[15-16],满足模流分析网格质量要求。

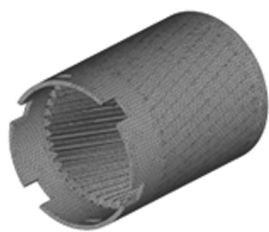


图2 双头螺旋内齿轮网格模型

1.2 浇注系统设计

对浇注系统进行优化设计,将有利于缩短塑料填充速度及浇注成型所需时间,有利于避免紊流和其他杂质进入型腔^[17-18]。由于双头螺旋内齿轮的尺寸较小,为了精准控制胶口进胶,根据浇注系统设计基本准则,设计的浇注系统如图3所示,冷胶竖流道A直径由4 mm沿纵向逐步扩大为7 mm;主流道B采用宽度7.5 mm的U型流道,便于进胶;分流道C直径由7 mm沿纵向逐步缩小为3 mm;每腔设3个直径1.5 mm的冷浇口D进胶。

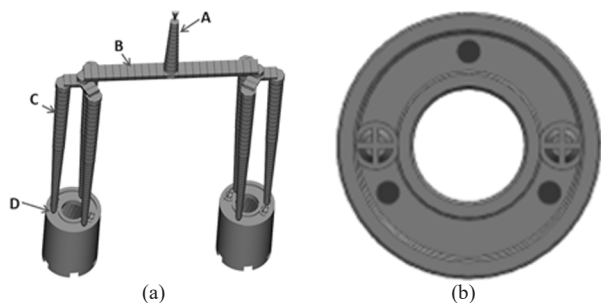


图3 浇注系统设计

1.3 填充分析

双头螺旋内齿轮填充分析如图4所示。由图4可知,采用此浇注系统填充时间短,无短射阻塞,注塑制品填充均匀。在填充过程中的V/P(速度/压力)切换时,型腔内的压力在充填体积达到总体积的98.5%时转保压,转换压力为80.52 MPa,满足注塑要求。通过分析注塑喷嘴压力可知,最大注塑压力为80.53 MPa,保压压力为90 MPa,充填时间为1.378 s,符合注塑条件。

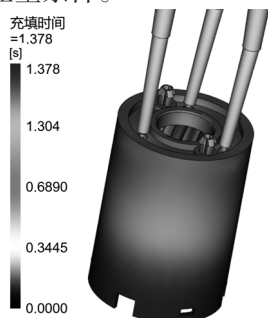
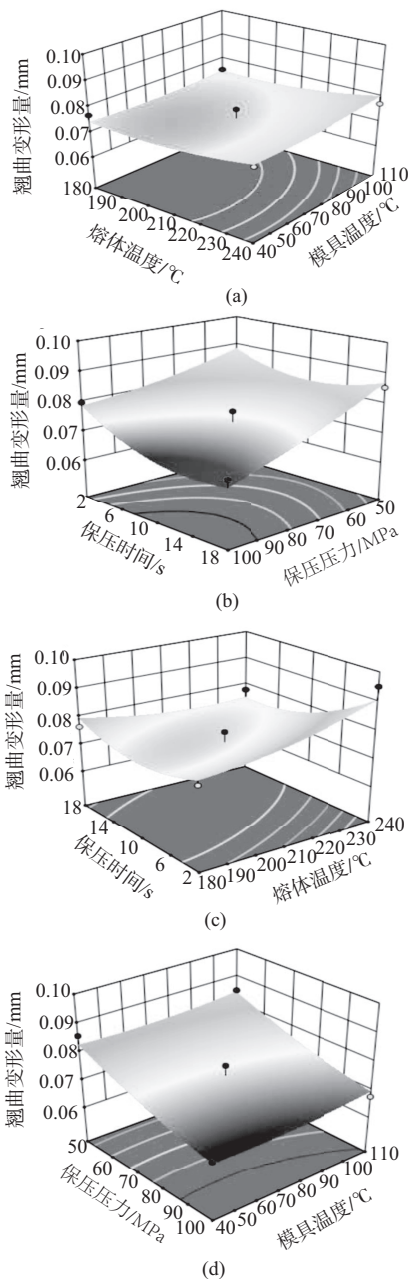


图4 双头螺旋内齿轮填充分析

2 冷却工艺方案设计

2.1 注塑工艺参数

所得交互作用影响如图5所示。根据产品工艺要求及POM材料的理化特性,并结合实际注塑生产情况,在确定影响因素后,通过Design-Expert12软件,采用BBD(Box-Behnken Design)设计响应



a—熔体温度和模具温度对翘曲变形量的交互作用影响;
b—保压时间和保压压力对翘曲变形量的交互作用影响;
c—保压时间和熔体温度对翘曲变形量的交互作用影响;
d—保压压力和模具温度对翘曲变形量的交互作用影响

图5 多参数交互作用影响

面,对拟合出的二次回归模型进行方差分析,然后利用回归函数,通过 3D 响应图分析熔体温度(180~240℃)、模具温度(40~110℃)、保压时间(2~18 s)、保压压力(50~100 MPa)对翘曲变形量的交互影响,研究优化注塑工艺参数组合,实现多参数优化^[19]。

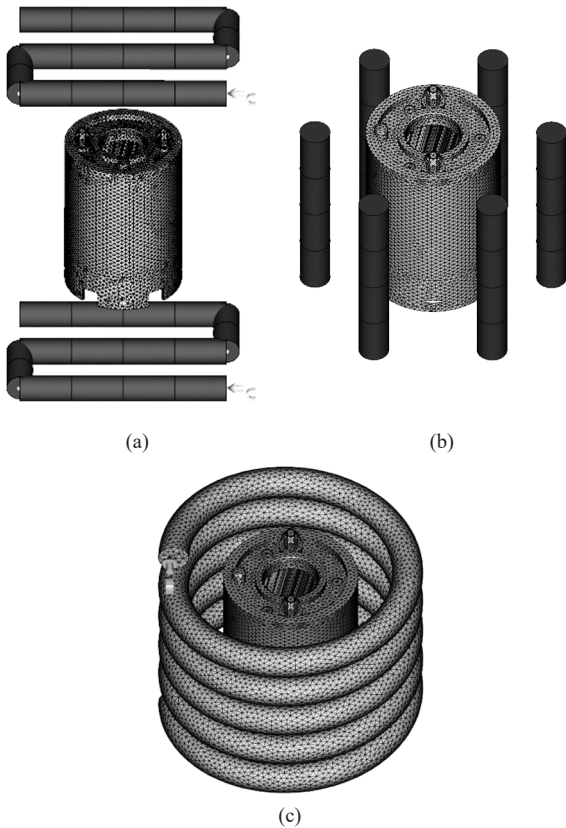
对以上响应面进行分析,并结合实际注塑工艺条件,采用的最优注塑过程工艺参数如表 1 所示。

表 1 注塑工艺参数

工艺参数	参数设置
模具表面温度/℃	90
熔体温度/℃	215
冷却水初始温度/℃	25
保压压力/MPa	90
保压时间/s	10
填充注射时间/s	1.3

2.2 冷却工艺水道布置方案

为了达到预期的冷却工艺效果,保证产品合格率,缩短冷却时间,提高生产效率,拟采用如图 6 所示的三种不同冷却工艺水道布置方案:方案一为传统冷却工艺布置方案,方案二为轴向冷却工艺布置方案,方案三为螺旋冷却工艺布置方案,所有方案统一采用圆形截面水道以保证冷却效果。



a—方案一(传统冷却); b—方案二(轴向冷却); c—方案三(螺旋冷却)

图 6 不同冷却工艺水道布置方案

为保证模具型腔各处温度均衡,提高注塑制品精度,应进行冷却工艺水道布局设计。影响冷却工艺水道布局的因素为冷却水道直径、相邻冷却水道间的距离和冷却水道与模具之间的距离^[20]。根据三者之间的经验公式和产品尺寸,冷却水道直径选取 6~8 mm,冷却水道间的距离选取 12~18 mm,冷却水道与模具之间的距离选取 9~12 mm,且围绕注塑制品均衡分布。拟采用正交试验法选取最优的冷却水道布局参数,实验选取的各参数数据见表 2。

表 2 正交实验数据

冷却水道直径/mm	相邻冷却水道间的距离/mm	冷却水道与模具之间的距离/mm
6	12	9
7	15	10
8	18	11

以传统冷却方案模型为例,正交试验结果见表 3。在表 3 中, k_1, k_2, k_3 分别表示各因素列中水平对应翘曲变形量的水平度,对表 3 进行极差分析可以确定各因素对冷却工艺效果的影响。在表 3 中,通过数值运算对 k_1, k_2, k_3 进行比较分析,确定各因素对冷却工艺影响的大小顺序为:冷却水道与模具之间的距离>冷却水道直径>相邻冷却水道间的距离,且最优的冷却水道布局参数为:冷却水道直径 6 mm;相邻冷却水道间的距离 12 mm;冷却水道与模具之间的距离 9 mm。

表 3 正交试验与结果

实验号	冷却水道直径/mm	相邻冷却水道间的距离/mm	冷却水道与模具之间的距离/mm	翘曲变形量/mm
1	6	12	9	0.2979
2	6	15	10	0.2986
3	6	18	11	0.3022
4	7	12	10	0.3011
5	7	15	11	0.3020
6	7	18	9	0.2998
7	8	12	11	0.3007
8	8	15	9	0.2995
9	8	18	10	0.2992
k_1	0.2996	0.2999	0.2991	
k_2	0.3010	0.3000	0.2996	
k_3	0.2998	0.3004	0.3016	
极差 R	0.0014	0.0005	0.0025	

3 冷却工艺注塑成型影响研究

采用不同的冷却工艺方案,将会对双头螺旋内齿轮注塑过程中的流动前沿温度、回路冷却介质温度以及翘曲变形量等工艺目标参数产生较大影响,进而影响注塑精度。

3.1 注射成型对流动前沿温度的影响

流动前沿温度为塑料熔体中间流截面中心的温度,温差越小,代表温度分布越均匀,成型精度越高。图7为三种冷却工艺方案下的流动前沿温度,从图7中可以看出,方案二的温差为 23.7°C ,浮动最小,注塑效果最佳,方案三的温差为 26.1°C ,浮动最大,注塑效果最差。

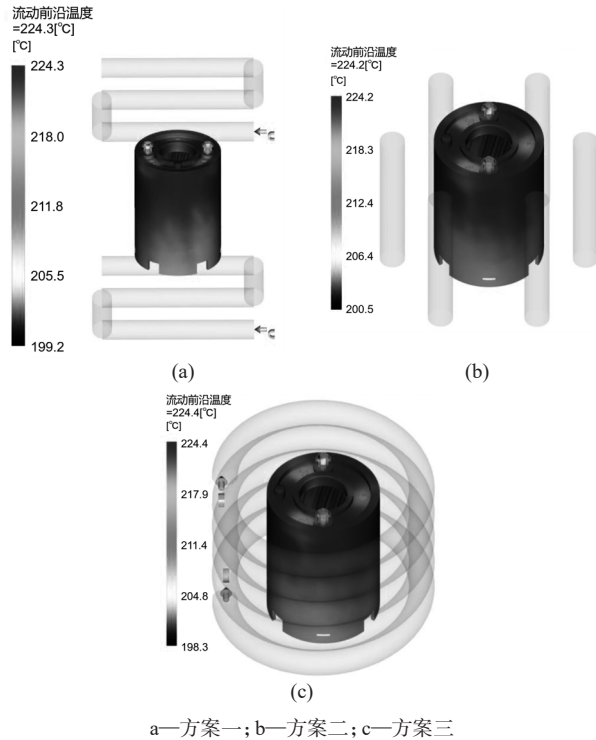


图7 注塑制品流动前沿温度示意图

3.2 注塑成型对回路冷却介质温度的影响

回路冷却介质温度要求冷却液进出口温度差不能超过 3°C ,因为冷却介质温度差越小成型精度越高。三种冷却工艺方案的回路冷却介质温度示意图如图8所示,从图8中可以看出,方案二的回路冷却介质温度差最小,冷却效果最好,方案三的回路冷却介质温度差最大,冷却效果最差。

3.3 注射成型对翘曲变形量的影响

翘曲变形量是指注塑制品与模具型腔的偏离程度,是衡量成型精度的重要指标之一。通过对三种冷却工艺方案进行模流分析,得到三种方案的整体翘曲变形量如图9所示,冷却水道周围注塑制品翘曲变形量显著减小,其中方案一的整体翘曲变形量为 0.2979 mm ,方案二整体翘曲变形量为 0.2748 mm ,方案三整体翘曲变形量为 0.2777 mm 。其中方案二的整体翘曲变形量最小,成型精度最高。

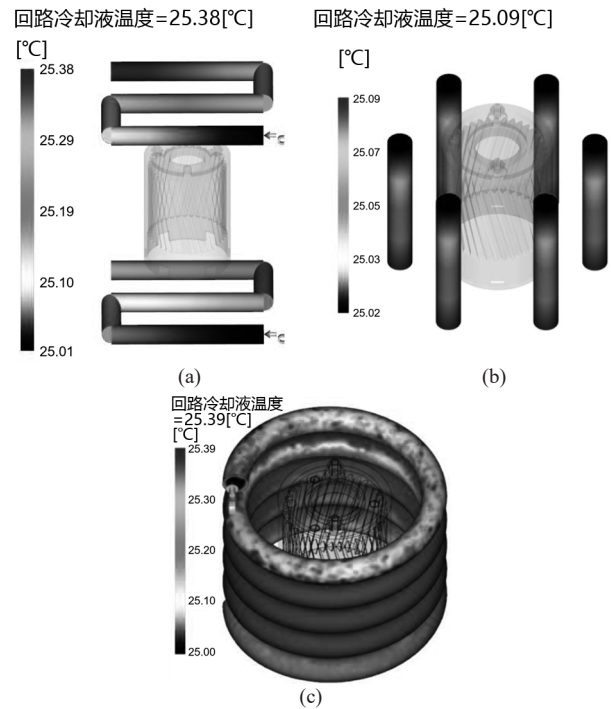


图8 注塑制品回路冷却液温度

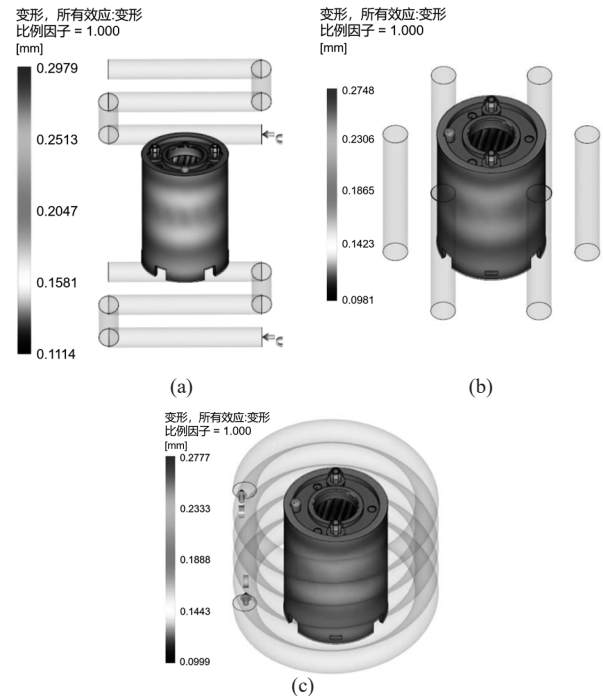


图9 注塑制品最大翘曲变形量

综上所述,利用 Moldflow 对三种不同的冷却工艺方案进行模流分析,得到方案二流动前沿温差为 23.7°C ,浮动最小,回路冷却介质温度差最小,且整体翘曲变形量为 0.2748 mm ,模拟效果最好。故采用冷却工艺方案二可保证注塑精度,提高产品质

量。

4 模具设计及生产验证

4.1 注塑模具

在确定冷却工艺方案后,充分考虑制品注塑过程中的浇注、填充、保压及冷却等,进行相应的双头螺旋内齿轮注塑模具设计,得到的模具装配图如图10所示。

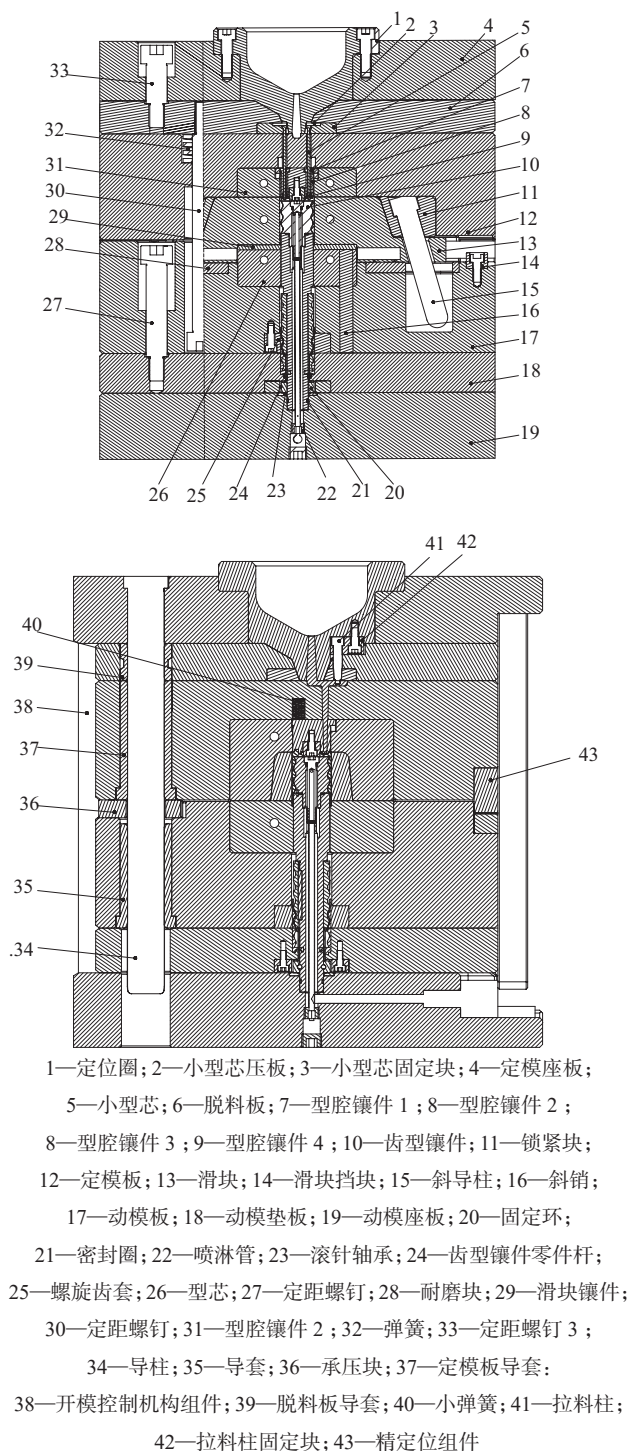


图10 模具装配图

4.2 样件生产及检测

在模具制造完成后,对双头螺旋内齿轮进行试模,得到的样件如图11所示,可以看出采用冷却工艺所生产的双头螺旋内齿轮整体顺滑无瑕疵,外观良好无飞边,壁厚均匀,斜齿规整。

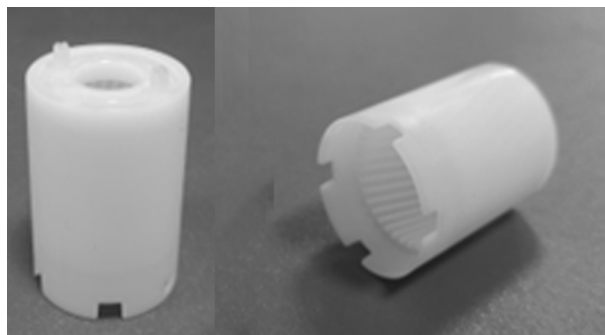


图11 试模产品图

在得到试制样件后,通过克林贝格齿轮检测仪对产品进行相应的注塑精度检测。由产品检测报告可知,齿形误差在 ± 0.05 mm以内,在工业生产上满足九级精度,符合产品注塑质量要求。

5 结语

(1) 在一定的冷却工艺参数下,冷却布局(冷却水道布局形式、参数等)对精密注塑过程有较大影响。采用冷却工艺将有效降低制品冷却时间,使注塑制品冷却均匀,提高产品合格率。

(2) 冷却水道将对产品变形控制产生显著影响,为了获得高效的冷却工艺方案,可以将冷却水道布置在注塑过程的热量集中处。

(3) 在模具设计前,先对模型进行模流分析,确定最佳冷却工艺方案,再将实际生产结果与分析结果进行对比,不断调整,反复优化,将很大程度上节省设计时间,提高设计精度及效率,为相应注塑模具冷却工艺设计提供参考。

参考文献

- [1] 周佳艺. 面向生产现场的注塑齿轮快速视觉检测技术研究[D]. 北京:北京工业大学,2020.
Zhou Jiayi, Research on work shop-oriented rapid visual inspection technology for injection molding gears[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2020.
- [2] 宋珂,胡青春,姜晓平. 注塑模具冷却水道排布优化设计[J]. 塑料工业,2014,42(12):45-48.
Song Ke, Hu Qingchun, Jiang Xiaoping. Optimization design of injection mold cooling channels arrangement[J]. China Plastics Industry,2014,42(12):45-48.
- [3] 吕志杰,黄尚宇,董晨阳. 注塑模冷却水道工艺参数优化[J]. 工

- 程塑料应用,2017,45(8):80-83,87.
- Lyu Zhijie, Huang Shangyu, Dong Chenyang, Optimization of injection mold cooling channel process parameters[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(8):80-83, 87.
- [4] 赵天德. 冷却系统对 ABS 材质汽车后视镜外壳翘曲变形影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(7):75-79.
- Zhao Tiande. Influence of cooling system on warpage and deformation of ABS automotive rearview mirror shell[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7):75-79.
- [5] Chen J C, Guo G, Wang W N. Artificial neural network-based online defect detecti-on system with in-mold temperature and pressure sensors for high precision injection molding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7):2 023-2 033.
- [6] 韩伟,江丽珍,黄凌森,等. 汽车档位杆注塑模具冷却系统设计与优化[J]. 塑料, 2020, 49(2):128-131.
- Han Wei, Jiang Lizhen, Huang Lingsen, et al. Design and optimization of cooling system for injection mould of automobile gear rod[J]. Plastics, 2020, 49(2):128-131.
- [7] 马松柏. 家用榨汁机机身注塑模冷却系统 CAE 分析与设计[J]. 中国塑料, 2014, 247(10):100-105.
- Ma Songbai. CAE analysis and design of injection moulds for cooling system of household juicer bodies[J]. China Plastics, 2014, 247(10):100-105.
- [8] 韦彬贵,谢帮灵,盘承军. 基于 CAE 的扶手后盖翘曲变形注塑参数优化设计[J]. 塑料科技, 2019, 47(3):76-82.
- Wei Bingui, Xie Bangling, Pan Chengjun. Optimum design of injection molding parameters for warpage deformation of armrest rear cover based on CAE[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(3):76-82.
- [9] Ogorodnyk O, Martinsen K. Monitoring and control for thermoplastics injection molding:A review[J]. Procedia Cirp, 2018, 67:380-385.
- [10] 杨鸿. 基于 Moldflow 的无人机上盖模流优化分析与模具设计[J]. 中国塑料, 2020, 315(6):92-99.
- Yanghong. Moldflow-based optimization analysis and die design of UAV upper cover[J]. China Plastics, 2020, 315(6):92-99.
- [11] 吴俊超. 基于 Moldflow 的汽车仪表板大型塑件注塑模工艺优化[J]. 中国塑料, 2021, 333(12):121-128.
- Wu Junchao. Process optimization of injection mold for large plastic parts of automobile dashboard based on Moldflow[J]. China Plastics, 2021, 333(12):121-128.
- [12] 张新聚,李亚男,刘雷. 影响注塑模具成型质量的关键因素分析[J]. 塑料工业, 2018, 46(5):71-75.
- Zhang Xinju, Li Yanan, Liu Lei. Analysis of key factors influencing molding quality of injection mold[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(5):71-75.
- [13] 朱彦,徐乔擎,庄向斌. 基于 Moldflow 的遥控器壳精密注塑模具设计[J]. 塑料科技, 2021, 49(3):70-72.
- Zhu Yan, Xu Qiaoping, Zhuang Xiangbin. Design of precision injection mold for remote control shell based on Moldflow[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(3):70-72.
- [14] 王豆丰,周志明,张乾仁,等. 基于 Moldflow 的芯片盘注塑模冷却系统设计与优化[J]. 塑料工业, 2019, 387(S1):102-105.
- Wang Doufeng, Zhou Zhiming, Zhang Qianren, et al. Simulation and optimization of the cooling system for chip plate injection mould based on Moldflow[J]. China Plastics Industry, 2019, 387(S1):102-105.
- [15] 陈杰,王星阳. 车载 GPS 定位器注塑模具优化设计[J]. 塑料科技, 2021, 49(2):70-73.
- Chenjie, Wang Xingyang. Optimization design of injection mold for vehicle GPS locator[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(2):70-73.
- [16] 邹斌扬,周天意,于洋洋,等. 基于响应面和 ASA 的抑爆球注塑质量多目标优化[J]. 塑料, 2021, 50(5):147-155.
- Wu Binyang, Zhou Tianyi, Yu Yangyang, et al. Multi-objective optimization of explosion suppression ball injection molding quality based on response surface model and ASA algorithm[J]. Plastics, 2021, 50(5):147-155.
- [17] 温煌英,赵利平,刘付国宇. 汽车前保险杠热流道精密注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3):98-103.
- Wen Huangying, Zhao Liping, Liu Fuguoyu. Design of precision injection mold for hot run-ner of automobile front bumper[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):98-103.
- [18] 李伟,张晓黎. 基于 UG 和 Moldflow 的过桥弯管圆弧抽芯注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(8):93-98.
- Li Wei, Zhang Xiaoli. Design of arc core-pulling injection mould for bridge elbow based on UG and Moldflow[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8):93-98.
- [19] 郭小锋,王坦,崔陆军,等. 基于响应面法 SLA 光敏树脂 3D 打印工艺策略[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(1):60-65.
- Guo Xiaofeng, Wang Tan, Cui Lujun, et al. 3D printing process strategy of SLA photosen-sitive resin based on response surface method[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):60-65.
- [20] 张新聚,刘雷,赵文清,等. 注塑模具随形冷却的分析及优化[J]. 塑料, 2018, 47(2):126-130.
- Zhang Xinju, Liu Lei, Zhao Wenqing, et al. Analysis and optimization of conformal coolingsystem in injection mold[J]. Plastics, 2018, 47(2):126-130.