

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.018

发动机减振器环形轴承注塑模具设计及工艺参数优化

赵勇杰¹, 陈荣创¹, 伍长彬², 甘新刚²

(1. 湖北汽车工业学院汽车材料学院, 湖北十堰 442002; 2. 湖北广奥减振器制造有限公司, 湖北十堰 442003)

摘要: 发动机扭转减振器是控制发动机振动的关键部件, 其环形轴承需要具备高强度、高耐磨性和高尺寸精度。由于轴承壁厚较薄且采用尼龙材料注射成型, 成型难度较大, 因此设计合理的注塑模具并确定优化的工艺参数成为制造减振器面临的关键技术难题。为通过优化模具设计和注塑工艺参数, 解决薄壁尼龙轴承成型中的技术问题, 确保其性能满足使用要求, 选用尼龙66作为轴承材料, 分析了其注塑工艺特点, 重点设计了模具的流道系统、冷却系统和脱模顶出机构。通过模流分析, 研究了填充率、翘曲变形量和锁模力等关键指标, 并利用神经网络拟合工具对注塑工艺参数进行了训练和测试, 结合优化算法确定了最优注塑参数。研究表明, 当注射时间为2 s、熔体温度为270 °C、模具温度为40 °C时, 翘曲变形量最低为1.530 mm, 满足工艺要求。实验数据与模拟结果吻合, 验证了模具设计和工艺参数优化的有效性。

关键词: 减振器轴承; 尼龙材料; 注塑模具; 工艺优化; 流动模拟

中图分类号: TQ320.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0124-06

Injection mould design and process parameter optimization of engine vibration damper annular bearing

ZHAO Yongjie¹, CHEN Rongchuang¹, WU Changbin², GAN Xingang²

(1. School of Automotive Materials, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China;

2. Hubei Guang Ao Damper Manufacturing Co., Ltd., Shiyan 442003, China)

Abstract : The engine torsional vibration damper is a critical component for controlling engine vibrations, and its ring bearing requires high strength, wear resistance, and dimensional accuracy. Due to the relatively thin wall thickness of the bearing and the use of nylon material for injection molding, the forming process is quite challenging. Therefore, designing a reasonable injection mould and determining optimized process parameters have become key technical challenges in the manufacturing of shock absorbers. Aiming to address the technical issues in molding thin-walled nylon bearings by optimizing mould design and injection process parameters, ensuring their performance meets operational requirements. Nylon 66 as the bearing material was selected and its injection molding characteristics was analyzed. The design focused on the mould's runner system, cooling system, and ejection mechanism. Through mould flow analysis, key indicators such as fill rate, warpage deformation, and clamping force were investigated. A neural network fitting tool was used to train and test the injection process parameters, and an optimization algorithm was employed to determine the optimal injection parameters. The results show that when the injection time is 2 s, the melt temperature is 270 °C, and the mold temperature is 40 °C, the minimum warpage deformation is 1.530 mm, which meets the process requirements. Experimental data closely matched the simulation results, validating the effectiveness of the mold design and process parameter optimization.

Keywords : vibration damper bearing ; nylon material ; injection mould ; process optimization ; flow simulation

发动机扭转减振器是控制发动机振动的关键部件, 为了确保其环形轴承具备较高的强度、耐磨性和尺寸精度, 采用尼龙66 (PA66) 进行注射成型制造^[1]。轴承壁厚较薄, 尼龙材料成型困难, 因此设计

注塑模具并确定合理的注塑工艺参数是制造减振器的关键技术。

在塑料轴承的注塑方面已有诸多研究, 郭容等^[2]认为玻璃纤维增强的PA66材料可用作塑料轴

通信作者: 陈荣创, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为材料成型与设计、汽车振动与减振

收稿日期: 2025-01-31

引用格式: 赵勇杰, 陈荣创, 伍长彬, 等. 发动机减振器环形轴承注塑模具设计及工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(4): 124-129.

ZHAO Yongjie, CHEN Rongchuang, WU Changbin, et al. Injection mould design and process parameter optimization of engine vibration damper annular bearing[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 124-129.

承保持架,并分析了成型性。许傲^[3]采用圆周多向同步抽芯机构解决了塑件脱模难题。钟锋良^[4]设计了轴承座塑件两板冷、热复合流道注塑模具,并通过斜导柱滑块机构实现了轴承孔内、外壁的顺利脱模。唐继兵等^[5]分析了动车组轴箱塑料轴承6种浇口方案的熔接线位置、注射时间、最大剪切速率、流动末端压力差和翘曲位移等结果,获得了最佳浇口设计方案。尼龙属于较难注射成型的塑料,特别是针对薄壁和精度要求高的尼龙零件^[6],注塑尤其困难。

笔者针对发动机扭转减振器尼龙轴承,设计了流道系统、冷却系统及脱膜顶出机构,然后通过模流分析软件对注射成型过程进行仿真,研究了注射时间、熔体温度、模具温度对注射成型质量的影响。使用神经网络和优化算法确定了较优的注塑工艺参数,研究结果对同类塑料轴承的注塑模具结构设计具有参考价值。

1 模具结构设计

1.1 塑件结构与材料选择

图1为发动机减振器环形轴承的几何模型,材料选用A.Schulman公司生产的SCHULAMID 66 GF 25H PA66。该材料是一种玻璃纤维增强PA66,含有25%玻璃纤维,具有优异的力学性能、耐磨性、耐热性和较好的流动性,适合复杂结构的注射成型。压力-体积-温度曲线和黏度曲线数据来自文献[7],用于计算塑料流动与翘曲变形。轴承最大外径为179.2 mm,高度为12 mm,壁厚为1.3 mm。薄壁设计减轻了质量并提高了结构效率,同时确保受力均匀。分型面选择在轴承底面最大轮廓处,如图2所示,便于脱模并减少对制品外观的影响,同时兼顾模具加工的简便性和成本。该设计通过材料选择、几何优化和分型面设计,确保了轴承在高载荷、

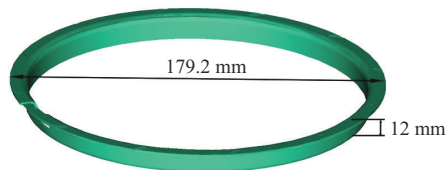


图1 发动机减振器环形轴承的几何结构

Fig. 1 Geometric structure of engine vibration damper annular bearing



图2 分型面位置

Fig. 2 Position of parting surface

高温等复杂工况下的长期稳定运行。

1.2 流道系统

PA66在注塑过程中需要较高的注射压力,为了确保轴承型腔能够得到充分填充并减少翘曲变形,应在短时间内快速充满型腔,并采用较高的保压压力进行补缩,以有效降低制品的收缩和变形^[8]。模具采用了1模1腔的结构设计,并在轴承边缘处设置3点进胶,这种设计不仅便于凝料的脱出,还能减小进胶阻力,确保材料均匀填充^[9]。

在流道设计方面,主流道采用锥形截面,分流道选用圆柱形截面^[10],如图3所示。主流道的首端直径为4 mm,末端直径为16 mm,分流道直径为5 mm,流道过渡处采用圆角设计以减少流动阻力,浇口处直径为1.5 mm。这种流道设计能够优化熔体的流动路径,降低压力损失,同时提高填充效率,确保制品成型质量稳定。

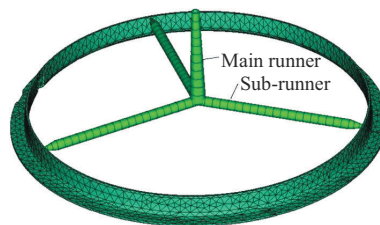


图3 主流道和分流道

Fig. 3 Main runner and sub-runner

1.3 冷却系统

为了加快塑件的冷却速度并确保成型质量,模具设计了冷却水路系统。冷却水均匀分布在塑件两侧,以实现高效且均匀的冷却效果。根据工艺条件,熔体温度为250 °C,模具温度为35 °C,冷却水入口温度为20 °C,出水口温度控制在25 °C以下。冷却管道直径为8 mm,成型周期为50 s,PA66的比热容为2 300 J/(kg·°C)。基于冷却计算方法^[11],计算得出冷却水的流量须达到20 L/min,以满足冷却需求并保证生产效率。

冷却水路的设计如图4所示,采用对称分布的方式,确保塑件各部位冷却均匀,避免因温差过大导致的变形或内应力问题。此冷却水路的布局和流量控制,能够有效缩短冷却时间,提高成型效率,同时保证制品的尺寸稳定性和力学性能。

1.4 顶出和复位机构

在脱模机构设计中,采用顶杆顶出方式,并通过校核脱模力^[12]确保塑件能够顺利脱模。顶出机构如图5所示,顶杆直径为4 mm,共设置12个顶杆,均

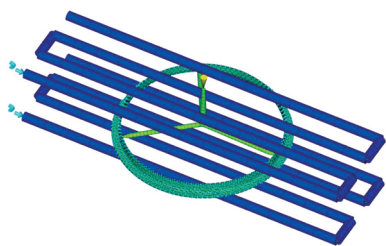


图4 冷却水路
Fig. 4 Cooling channel

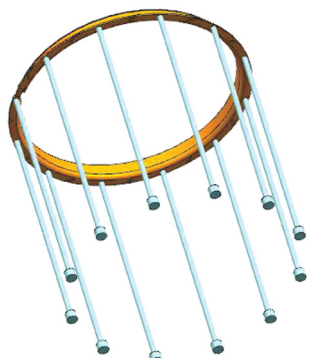


图5 顶出机构
Fig. 5 Ejection mechanism

匀分布在塑件周围,以保证顶出力的平衡和塑件的平稳脱模。顶杆的数量和直径能够满足脱模力的要求,同时避免对塑件表面造成损伤。复位机构由复位杆和弹簧组成,弹簧固定在复位杆上,复位杆直径为30 mm。在顶出动作完成后,弹簧的弹性力推动复位杆回位,使顶出机构恢复到初始位置,为下一次成型循环做好准备。

1.5 型腔与型芯设计

模具采用镶嵌式型腔与型芯结构^[13],这种设计便于加工、维修和更换,同时提高了模具的使用寿命和灵活性。型腔和型芯的材料选用P20模具钢,该材料具有良好的力学性能、耐磨性和抛光性,适合高精度、大批量生产的注塑模具。

在设计型腔与型芯时,充分考虑了顶出脱模机构、冷却水管道布局以及安装紧固关系,确保各功能部件之间的协调性和空间合理性。如图6所示,型腔与型芯的结构设计不仅满足了塑件的成型要求,还为顶杆、冷却水路等提供了足够的空间,避免

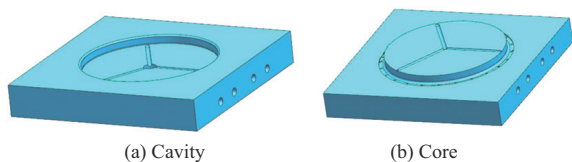
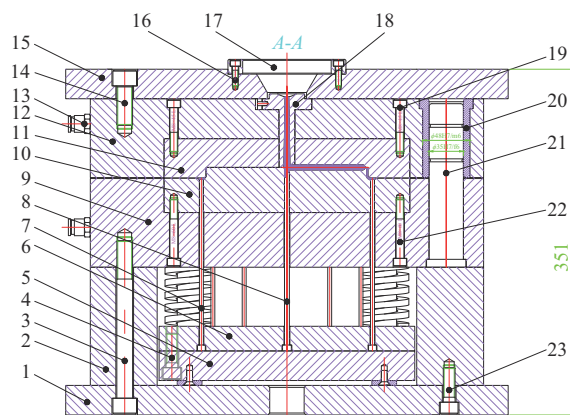


图6 型芯与型腔的结构设计
Fig. 6 Structural design of core and cavity

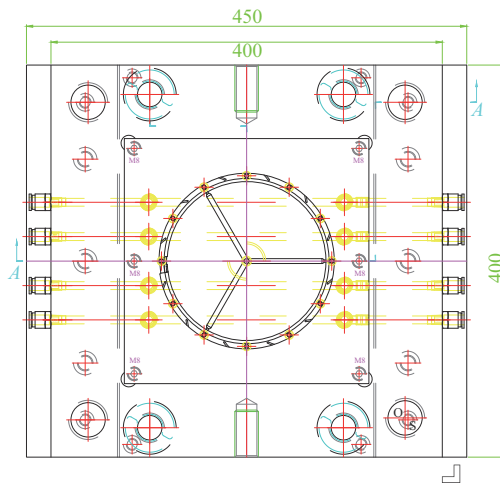
干涉。同时,型腔与型芯的安装面采用精确定位和紧固设计,确保模具在高压注塑过程中保持稳定,避免因受力不均导致的变形或错位问题。

1.6 装配图与工作原理

轴承注塑模具的装配图如图7所示。在成型塑料轴承时,高温的PA66熔体依次通过喷嘴、主流道、分流道和浇口进入型腔。填充完成后,经过保压和冷却阶段,模具开模,注塑机带动动模板沿分型面与定模板分离。当动模板移动一定距离后,推杆固定板推动顶杆将成型后的塑件从模具中顶出。合模时,复位杆推动顶出机构复位,使模具恢复到初始状态,为下一次注射成型做好准备。这一过程实现了高效、连续的自动化生产,确保了塑件的成型



(a) Front view



(b) Vertical view

1—Base plate; 2—Spacer block; 3, 4, 14, 16, 19, 22, 23—Hex socket head cap screws; 5—Ejector retainer plate; 6—Ejector plate; 7—Ejector pin; 8—Sprue puller pin; 9—Moving plate; 10—Core; 11—Cavity; 12—Fixed plate; 13—Water connector; 15—Support plate; 17—Clamp- ing plate; 18—Sprue bushing; 20—Shoulder guide bush; 21—Guide pin

图7 环形轴承注塑模具装配图

Fig. 7 Assembly drawing of annular bearing injection mould

质量和生产效率。

2 模流分析与优化设计

为了预测轴承塑料件的成型效果,对其填充、保压、冷却和翘曲过程进行了模拟分析^[14]。模型共划分了5 248个双层面网格,以确保计算精度和效率。模拟中设置的工艺参数包括:充填时间为1 s、熔体温度为320 ℃、冷却水温度为25 ℃、冷却时间为20 s、保压时间为10 s、保压压力为最大注射压力的70%,其他工艺参数采用系统默认值。通过模拟分析,可以直观地观察熔体在型腔中的流动状态、保压补缩效果、冷却均匀性以及可能产生的翘曲变形情况。分析结果如图8所示。

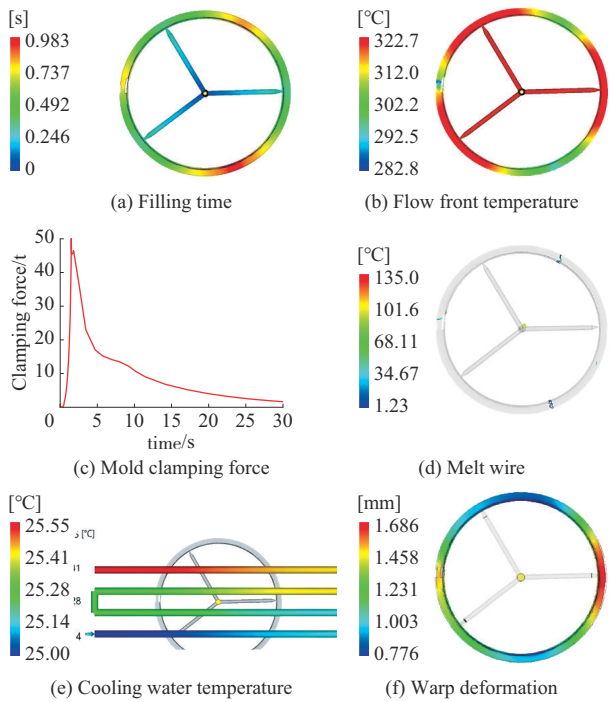


图8 模流分析结果

Fig. 8 Mold flow analysis results

从图8a充填时间可以看出,塑件可以在1 s内填满模具,无填充不足。从图8b流动前沿温度中可以看出,塑件流动前沿温度最高为322.7 ℃,最低为282.8 ℃,最大差值为39.9 ℃。从图8c锁模力变化中可以看出,锁模力在注塑前期迅速升高,在注射完成后开始保压时到达最大锁模力约50 t。在保压过程,保压压力逐渐降低,锁模力逐渐减小。从图8d熔接线的位置可以看出,塑件熔接线分布在边角位置,主要由分流道位置结构决定。从图8e回路冷却液温度分布可以看出,冷却液入口温度约为25 ℃,冷却液出口温度约为25.6 ℃,温度变化较小,温差约1 ℃,小于通常情况下最大5 ℃的要求。从图

8f翘曲变形图中可以看出,最大翘曲变形量为1.686 mm。

3 注塑工艺参数优化

从初步分析结果可以看出,塑件能填充满,最大翘曲变形量为1.686 mm。均匀的收缩变形可通过增大塑件外径来补偿收缩,而由于补缩不充分导致的翘曲则会使产品形状发生改变,降低产品的表面质量和尺寸精度,所以必须在注射成型阶段尽量减小翘曲变形量^[15-16]。选择注射时间、熔体温度和模具温度为自变量,评估对填充率、翘曲变形量和锁模力的影响。尼龙需要快速注射,所以选择注射时间为1,1.5,2 s;根据材料推荐注射工艺,选择熔体温度为270,295 ℃和320 ℃三个水平;设置模具温度分别为40,60 ℃和80 ℃。根据这些条件,在模流分析软件中进行填充、保压、冷却、翘曲分析,统计出27次模拟获得的填充率、翘曲变形量和锁模力,见表1。从表1可以看出,在所取的参数范围内,模具温度对翘曲变形、填充率和锁模力几乎没

表1 模拟仿真结果

Tab. 1 Simulation results

Num ber	Inject time/s	Melt tempera- ture/℃	Mould tempera- ture/℃	Filling rate/%	Warp deforma- tion/mm	Mould clamping force/t
1	1	270	40	85.72	1.596	53.47
2	1	270	60	85.72	1.596	53.47
3	1	270	80	85.72	1.596	53.47
4	1	295	40	85.19	1.634	44.42
5	1	295	60	85.19	1.634	44.42
6	1	295	80	85.19	1.634	44.42
7	1	320	40	84.82	1.686	37.66
8	1	320	60	84.82	1.686	37.66
9	1	320	80	84.82	1.686	37.66
10	1.5	270	40	86.26	1.554	62.52
11	1.5	270	60	86.26	1.554	62.52
12	1.5	270	80	86.26	1.554	62.52
13	1.5	295	40	85.52	1.641	48.82
14	1.5	295	60	85.52	1.641	48.82
15	1.5	295	80	85.52	1.641	48.82
16	1.5	320	40	85.08	1.645	41.00
17	1.5	320	60	85.08	1.645	41.00
18	1.5	320	80	85.08	1.645	41.00
19	2	270	40	86.79	1.530	71.80
20	2	270	60	86.79	1.530	71.80
21	2	270	80	86.79	1.530	71.80
22	2	295	40	85.99	1.570	56.03
23	2	295	60	85.99	1.570	56.18
24	2	295	80	85.99	1.570	56.19
25	2	320	40	85.36	1.647	45.21
26	2	320	60	85.36	1.648	45.21
27	2	320	80	85.36	1.648	45.21

有影响,所以只需求出最佳的注射时间和熔体温度的参数组合。

采用 Matlab 中的 Levenberg-Marquardt 神经网络算法用于拟合表 1 中的数据。在数据划分上,随机选取了 70% 的样本作为训练集,15% 的样本作为验证集,剩余的 15% 作为测试集。通过这种方式,确保了训练集、验证集和测试集的样本分布具有代表性。图 9 为训练集、验证集和测试集的模拟值与拟合值构成的散点图以及均方差下降的过程。从图 9a、图 9b 和图 9c 可以看出,训练集、验证集和测试集的模拟值与拟合值构成的散点图均紧密分布在 45° 斜线附近,表明神经网络对数据的拟合效果较好。图 9d 则展示了训练过程中均方差的下降趋势,可以看出网络对训练集、验证集和测试集的拟合程度逐渐改善,训练过程最终趋于平稳。由于样本是随机划分的,模型的泛化能力得到了较好的验证。

为降低减振器环形轴承的翘曲变形量,使用 Matlab 中的 NSGA- II 遗传算法优化注射时间和熔体温度。以翘曲变形量为优化目标,并约束优化注射时间和熔体温度的范围。遗传算法参数设置为:种群数量为 50,选择函数为轮盘赌选择,交叉概率为 0.8,交叉函数为分散交叉,变异函数为高斯变异。经过 73 次迭代后获得翘曲变形量最优值为 1.530 mm,比原始方案降低 9.25%。即在所定义的变量区间内,该优化是单调的,注射时间越长、熔体温度和模具温度越低,翘曲变形量越小,填充率和锁模力越大。所以最佳参数为注射时间 2 s,熔体温度 270 °C,模具温度 40 °C,也就是第 19 组模拟方案。

4 生产应用

根据三维设计结果生产模具,并根据模流分析结果确定注塑工艺参数。采用型号为 HTF160X2C 的注塑机生产环形轴承,注塑机额定注射量为 364 cm³,额定注射压力为 140 MPa,开模行程为 420 mm。图 10a 为模具的照片,图 10b 为生产出的塑件实物图,图 10b 中的数字为测量的翘曲变形量,对比计算得到的翘曲变形量与测量的翘曲变形量可知,计算的平均偏差为 0.033 mm (3.1%)。使用优化后的工艺生产的环形轴承翘曲变形量较小、质地致密、表面光滑、无缩孔缺陷,且塑件具有一定刚度、耐磨性能好,能满足发动机减振器对轴承高温性

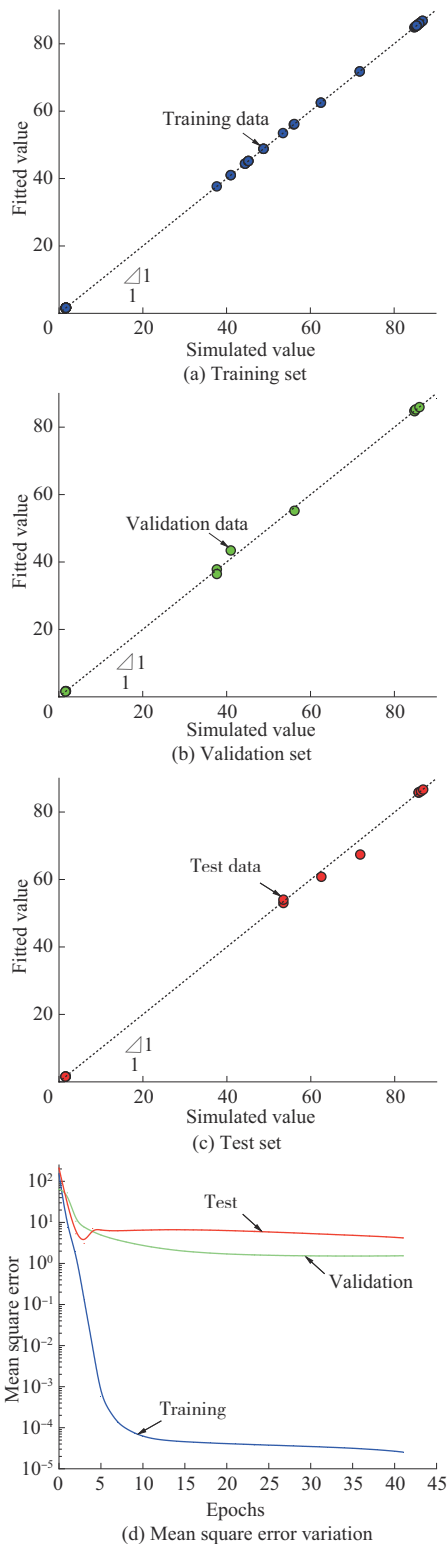


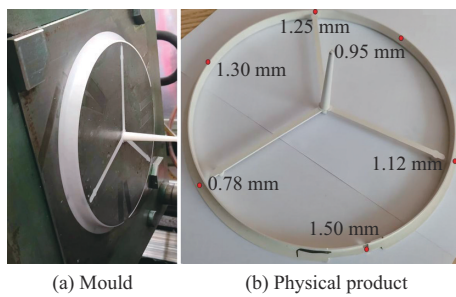
图 9 神经网络拟合结果

Fig. 9 Results of neural network fitting

能、耐冲击、耐磨等严苛的质量要求。

5 结论

(1) 采用 1 模 1 腔的结构形式,选择 PA66 进行发动机减振器轴承注射成型,设计了模具型腔、浇注



(a) Mould (b) Physical product

图10 环形轴承注塑件模具与实物

Fig. 10 Mould and physical product of annular bearing injection-molded part

系统、冷却系统以及脱模机构。采用了侧浇口3点进胶保证了充填性能,采用推杆推出保证塑件可以顺利地与模具型芯分离。

(2)使用神经网络拟合不同工艺参数下的模流分析结果,并使用遗传算法寻找翘曲变形量最小的工艺参数组合,结果表明,注射时间2 s、熔体温度270℃、模具温度40℃时,翘曲变形量最低为1.530 mm,比原始方案降低9.25%。采用优化的工艺参数生产环形轴承,结果较理想。

参考文献

- [1] 周宝友. 中国模具制造业现状及发展趋势[J]. 模具制造, 2019, 19(4):1-6.
ZHOU Baoyou. Current situation and development trend of die & mold manufacturing industry in China[J]. Die & Mould Manufacturing, 2019, 19(4):1-6.
- [2] 郭容, 宋宁. 玻璃纤维增强 PA66 注塑工程塑料轴承材料特性分析与研究[J]. 中国设备工程, 2022(6):108-109.
GUO Rong, SONG Ning. Analysis and research on material properties of glass fiber reinforced PA66 Injection molding engineering plastic bearings[J]. China Plant Engineering, 2022(6):108-109.
- [3] 许傲. 轴承套环圆周到同步抽芯注塑模设计[J]. 塑料科技, 2018, 46(1):85-89.
XU Ao. Design of multi direction synchronous core pulling mould for bearing ring[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(1):85-89.
- [4] 钟锋良. 轴承座改进型差速滑块机构及注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(4):93-98.
ZHONG Fengliang. Design of injection mold with improved differential slider mechanism for bearing seat[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4):93-98.
- [5] 唐继兵, 田少波, 陶国安, 等. 基于模流分析的动车组轴箱轴承工程塑料保持架注塑模具浇口数量方案分析[J]. 高速铁路新材料, 2024, 3(4):33-39.
TANG Jibing, TIAN Shaobo, TAO Guoan, et al. Injection mold gate number analysis for engineering plastic cage of EMU axle box bearing based on mold flow analysis software[J]. Advanced Materials of High Speed Railway, 2024, 3(4):33-39.
- [6] 张维合. 注塑模具设计实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [7] 慕江瀚, 刘淑梅, 吕兴利. 基于 Moldex3D 汽车配件注塑成型工艺优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(11):163-167.
MU Jianghan, LIU Shumei, LÜ Xingli. Optimization of injection molding process of auto parts based on Moldex3D[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2023, 61(11):163-167.
- [8] 叶久新. 塑料成型工艺及模具设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
YE Jiuxin. Plastic molding process and mold design[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [9] 史凯迪, 张世阳, 肖海峰, 等. 排水45°斜三通注塑模具设计与模拟[J]. 塑料科技, 2022, 50(9):85-88.
SHI Kaidi, ZHANG Shiyang, XIAO Haifeng, et al. Design and simulation of 45° inclined tee injection mold[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(9):85-88.
- [10] 孔凡超, 陈佳春, 林诗济, 等. 电源外壳注塑成型模具设计[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(9):14-17.
KONG Fanchao, CHEN Jiachun, LIN Shiji, et al. Design of power supply shell injection molding die[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(9):14-17.
- [11] 沈剑. 注塑成型浇注系统及成型工艺参数的优化研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
SHEN Jian. Study on optimization of gating system and molding process parameters in injection molding[D]. Suzhou: Soochow University, 2012.
- [12] 高业汉, 刘赛科, 王一栋, 等. 注塑模倒扣简易脱模结构设计[J]. 时代汽车, 2024(10):141-143.
GAO Yehan, LIU Saik, WANG Yidong, et al. Design of simple demoulding structure for injection mold inverted buckle[J]. Auto Time, 2024(10):141-143.
- [13] 张世阳, 陈荣创, 高广宇, 等. 商用车外后视镜镜框注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(10):93-97.
ZHANG Shiyang, CHEN Rongchuang, GAO Guangyu, et al. Injection mould design of rear view mirror frame for commercial vehicle[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10):93-97.
- [14] 陈荣创, 张世阳, 肖海峰, 等. PE排水三通管注塑模具设计与有限元模拟[J]. 塑料, 2022, 51(6):67-71.
CHEN Rongchuang, ZHANG Shiyang, XIAO Haifeng, et al. Injection mould design and finite elemental analysis for polyethylene drainage tee pipe[J]. Plastics, 2022, 51(6):67-71.
- [15] 王新超. 基于3D打印的注塑模具设计与工艺参数优化[D]. 烟台: 烟台大学, 2024.
WANG Xinchao. Design of injection mold and optimization of process parameters based on 3D printing[D]. Yantai: Yantai University, 2024.
- [16] 荣星, 肖国红, 韦祥轩, 等. 圆弧抽芯注塑模具优化设计[J]. 塑料, 2024, 53(2):142-146.
RONG Xing, XIAO Guohong, WEI Xiangxuan, et al. Optimization design of injection mould with arc core-pulling[J]. Plastics, 2024, 53(2):142-146.