

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.016

基于 CAE 的高压油封环冷流道注塑模具设计

崔熙尧

(天津科技大学机械工程学院,天津 300222)

摘要: 针对高压油封环内壁存在的细牙螺纹脱模困难问题,基于 CAE 技术设计了一模两腔的二板式冷流道注塑模具。首先,对高压油封环的结构及材质进行了分析,明确了模具设计的重点及难点;其次,利用 Moldflow 分析软件结合制品结构特点确定了高压油封环的最佳浇口位置并在此基础上设计了模具的浇注系统和冷却系统;而后,从充填时间、流动前沿温度、锁模力、充填区域、体积收缩率和回路冷却液温度等关键指标评估了浇注系统和冷却系统的设计合理性;随后,通过设计计算和选型,采用外置油缸驱动齿条进而带动齿轮组转动,解决了高压油封环内壁 0.6 mm 螺距的螺纹脱模问题,并将脱模机构放置于模具上方,螺纹在型腔内完成脱模后模具再开模,有效避免了机械干涉,保证了螺纹成型精度;最后,利用三维设计软件依据模具设计标准完成了模具其余辅助结构的设计。经过实际生产验证,高压油封环冷流道注塑模具生产过程稳定可靠、制品质量满足要求,可为具有相似结构的制品模具设计提供借鉴。

关键词: 高压油封环;内螺纹;油缸驱动;模流分析;注塑模具

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0115-06

Design of cold-runner injection mould for high pressure oil seal ring based on CAE

CUI Xiyao

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract : To address the demolding difficulties caused by the fine-pitch threads on the inner wall of high pressure oil seal ring, a two-plate cold-runner injection mold with a two-cavity design was developed using CAE technology. First, the structure and material characteristics of the high pressure oil seal ring were analyzed to clarify key challenges in mold design. Leveraging Moldflow analysis software, the optimal gate location was determined based on the component's structural features, followed by the design of the gating and cooling systems. Critical parameters including filling time, flow front temperature, clamping force, filling area, volumetric shrinkage and cooling circuit temperature were evaluated to verify the rationality of the gating and cooling system designs. An innovative demolding mechanism was implemented using an external oil cylinder to drive a rack-and-gear system, successfully resolving the demolding challenge for the 0.6 mm-pitch internal threads. The demolding mechanism was strategically positioned above the mold, enabling complete thread release within the cavity prior to mold opening to prevent mechanical interference and ensure thread forming precision. Complementary auxiliary structures were designed using 3D modeling software in compliance with mold design standards. Production trials confirmed the stability and reliability of the cold-runner injection mold, with finished products meeting quality requirements. This approach provides valuable insights for designing molds for similar threaded components.

Keywords : high pressure oil seal ring ; internal thread ; cylinder drive ; moldflow analysis ; injection mould

高压油封环广泛应用于各种高压机械设备中,如液压泵、压缩机和发动机等,其主要作用是防止液压油在高压环境下从系统中泄漏,从而确保整个

液压系统的密封性和稳定性^[1]。在设计高压油封环时,必须考虑到材料的耐温性能,高压油封环往往处于极端温度和压力条件下。为了适应严苛的工

通信作者: 崔熙尧,主要研究方向为精密注塑模具设计

收稿日期: 2025-03-01

引用格式: 崔熙尧. 基于 CAE 的高压油封环冷流道注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 115-120.

CUI Xiyao. Design of cold-runner injection mould for high pressure oil seal ring based on CAE[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 115-120.

作环境,高压油封环通常采用特殊的材料和结构以提升密封效果和延长其使用寿命。在材料上,一些高压油封环采用耐高温的聚苯硫醚(PPS)、液晶聚合物(LCP)以及高温尼龙,而另一些则可能使用具有自润滑特性的聚四氟乙烯(PTFE)材料,以减少磨损并提高耐久性。在设计上,高压油封环往往具有特殊的密封唇结构,以适应不同压力和温度下的密封需求。此外,为了适应不同设备的安装要求,高压油封环通常设计有螺纹结构。

高压油封环应用广泛、需求量大,通常采用注塑工艺生产,注射成型技术能够实现复杂形状的高压油封环生产,同时也能保证材料的均匀性和产品的一致性。鉴于高压油封环所处的特殊工作环境,为保证其密封性能,对产品的注射成型精度提出了很高要求。模具设计是注射成型过程中的关键因素。模具的合理设计和精密制造能够确保高压油封环的成型精度,从而满足高压油封环在极端压力和温度条件下的密封要求。高压油封环通常设计有螺距较小的螺纹结构,如何实现螺纹的顺利脱模是高压油封环模具设计的重点和难点。笔者以某型高压油封环为研究对象,借助CAE技术设计了一模二腔的冷流道注塑模具。

1 塑件结构与材料分析

1.1 塑件结构

某型高压油封环整体尺寸为 $\text{Ø}50.8\text{ mm}\times 5.7\text{ mm}$,体积 $2\,031.05\text{ mm}^3$,质量 3.9 g ,为保证密封效果,设计了两道密封槽,为方便紧固,内壁设计了螺距为 0.6 mm 的单线螺纹,如图1所示。

图2为壁厚分析云图。由图2可知,高压油封

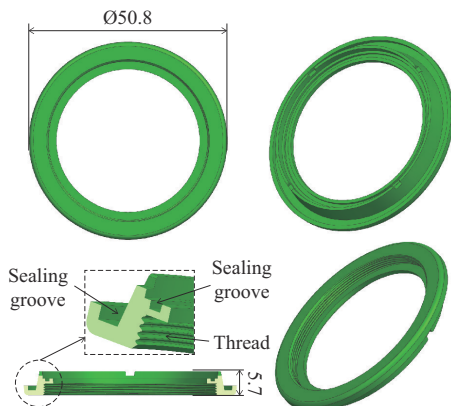


图1 高压油封环示意图

Fig. 1 Diagram of high pressure oil seal ring

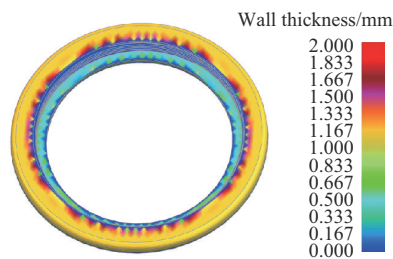


图2 壁厚分析云图

Fig. 2 Cloud diagram of wall thickness analysis

环的最大壁厚为 2.0 mm ,平均壁厚 0.78 mm 。该制品年产量约为300万件,要求塑件不能有注塑缩痕、飞边、光泽不均等缺陷。

1.2 材料分析

高压油封环采用广州金发科技股份有限公司生产的牌号为GM60的PPS工程塑料,其具有出色的耐高温和耐化学腐蚀性能,确保高压油封环在极端温度和压力下能长期稳定运行。PPS的固体密度为 $1.934\,8\text{ g/cm}^3$,剪切模量为 5 GPa ,泊松比为 0.362 ,第一主方向弹性模量(E_1)为 13 GPa ,其比热曲线如图3a所示,流变曲线如图3b所示^[2]。

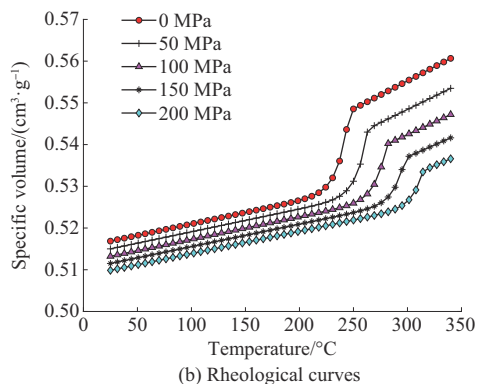
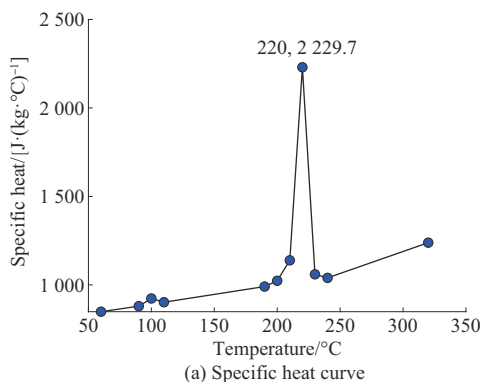


图3 PPS的比热及流变曲线

Fig. 3 Specific heat and rheological curves of PPS

2 基于CAE的注塑模具关键结构设计

2.1 浇注系统设计

模具浇注系统的作用是确保熔融材料能够均

匀且有效地流入模具型腔。它包括了浇口、流道和排气系统,这些部分共同协作,以减少材料流动中的阻力,避免制品产生缺陷^[3]。

将高压油封环模型以 stp 格式导入 Moldflow 2019 分析软件并进行双层面网格划分,经合并节点、插入节点、移动节点等操作后,得到的三角形网格最大纵横比 6.39,最小纵横比 1.13,平均纵横比 1.81,网格匹配百分比为 88.5%,网格质量满足分析要求^[4-5]。

建立模具浇注系统前首先要确定合适的浇口位置,浇口位置的选择应综合考虑产品的形状、壁厚、材料流动性以及模具结构等因素^[6]。应将浇口设置在产品的非外观面或非功能面上,以免影响产品的美观性和使用性能。

利用 CAE 得到的浇口匹配性分析结果如图 4 所示。结果云图中,蓝色越深的位置表示进胶熔体流入型腔时遇到的阻力越小,越适宜作浇口位置。A 处附近流动阻力数值 0.062 1,接近于 0,提示从此处进胶熔体所遇阻力较小。

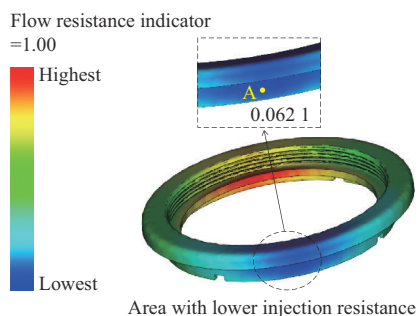


图4 浇口匹配性分析结果

Fig. 4 Results of gate matching analysis

综合考虑塑件年产量较大(年产量 300 万件)并结合现有注塑生产条件,采用一模二腔,选择 A 处位置作为浇口位置,建立一模二腔的潜伏式浇口的流道系统,如图 5 所示,其中主流道长度 93 mm,小端

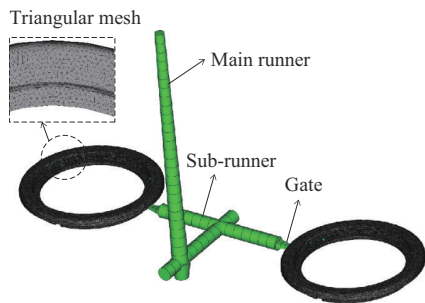


图5 浇注系统

Fig. 5 Gating system

直径 3.5 mm,大端直径 6.0 mm;分流道长度 24.50 mm,直径 5 mm;浇口为矩形浇口,长度 3.5 mm,矩形宽度 1.0 mm,矩形长度 2.0 mm。

2.2 冷却系统设计

冷却系统的作用是调节模具温度,确保熔体在模具中均匀冷却和固化。冷却系统能够加速熔体的凝固速度,缩短生产周期,提高生产效率;还能有效减少塑料制品的翘曲、变形等缺陷,提高产品的尺寸稳定性和表面质量。通过合理设计冷却系统,还可以实现模具温度的精确调控,以提升产品的加工精度和一致性。

依据笔者团队前期相关研究成果^[7]及设计经验,最终设计如图 6 所示的冷却水路,设置 2 道环形水道,水道直径为 8 mm,图中 IN 表示入水口,OUT 表示出水口。为方便加工,均采用直通式水道,水温通过水冷机进行控制。

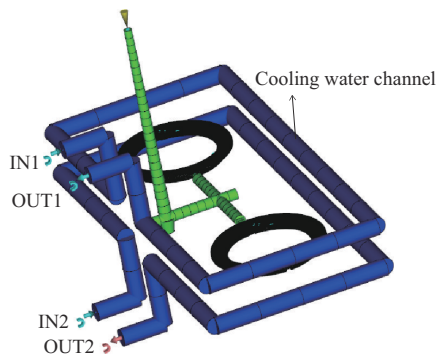


图6 冷却系统

Fig. 6 Cooling system

2.3 CAE 结果分析

合理的模具浇注系统和冷却系统对于制品成型质量至关重要。浇注系统必须能够确保熔融材料顺畅且均衡地填充到模具型腔的每一个角落,避免产生缺陷如欠注、气泡和熔接线等。而冷却系统则需要通过合理布置冷却水道,精确控制冷却介质的流动和温度,实现快速而均匀的冷却,以保证制品的尺寸精度和表面质量。笔者从充填时间、流动前沿温度、充填区域、锁模力、体积收缩率和回路冷却液温度等关键指标评估浇注系统和冷却系统的设计合理性,分析结果如图 7 所示。

从图 7a 充填时间分析结果可以看出,高压油封环充填所需时间为 0.525 1 s,表示 PPS 熔体在模具型腔内各位置充填均匀,满足流动性要求。从图 7b 流动前沿温度分析结果可以看出,流动前沿温度的下降幅度为 4.4 °C,下降幅度未超过 5 °C,提示注塑

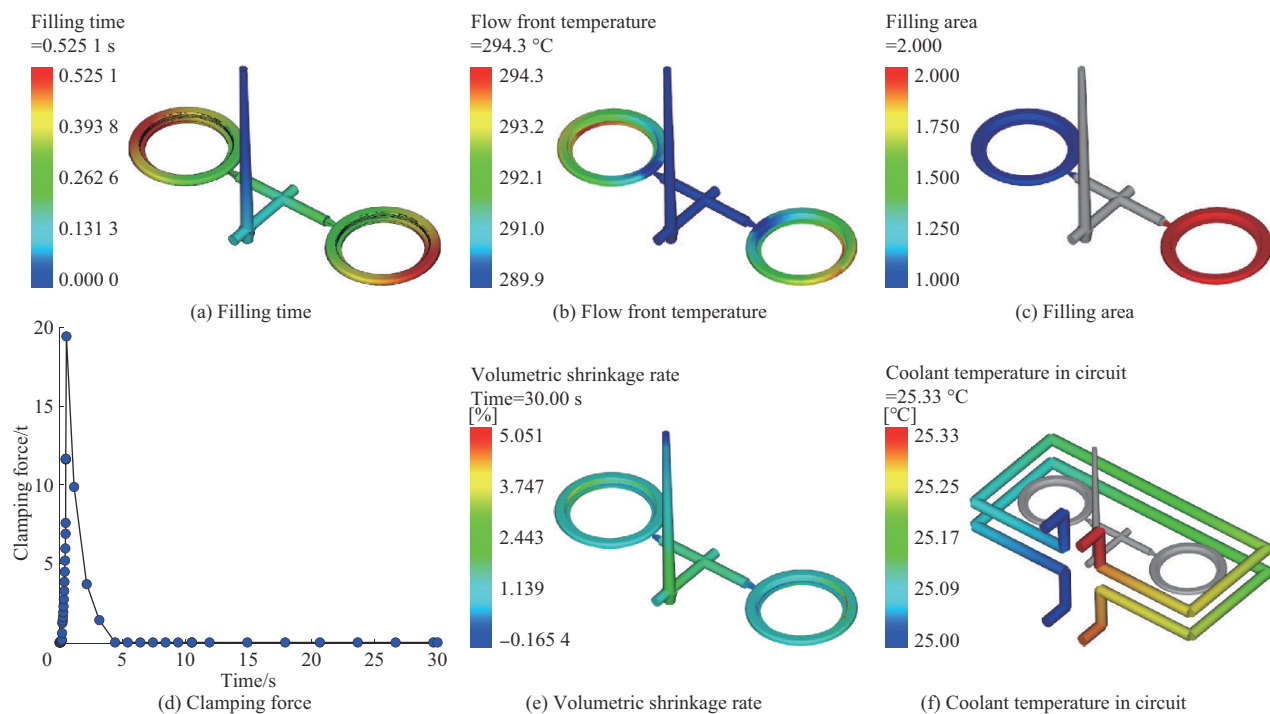


图7 CAE分析结果

Fig. 7 CAE analysis results

过程中不存在迟滞区域,熔体流动流畅^[8]。从图7c充填区域分析结果可以看出,一次成型的两个塑件均未发现有透明单元,说明在此浇注系统下,两个塑件都能够被完全填充,没有出现短射现象,且每个塑件的填充区域都呈现出清晰的边界^[9]。从图7d锁模力分析结果可以看出,高压油封环制品在充填时锁模力峰值约为19.42 t,且锁模力曲线在上升阶段相对平滑,没有折现或者突变,提示注塑机的注射状态良好。从图7e体积收缩率分析结果可以看出,塑件的最大体积收缩率为5.051%,体积收缩较为均匀,不影响其使用。图7f为回路冷却液温度分析结果,结果显示冷却回路内冷却液的温度,即冷却液从流入到流出的温度变化,通常以入口到出口温升不超过2~3 °C作为评判冷却系统冷却效果的依据^[10]。从图7f可以看出,冷却液从入口到出口温升为0.33 °C,说明冷却系统的冷却效果非常良好,能够有效地将热量从系统内部散发出去,体现了冷却系统设计的合理性。

综合以上分析,高压油封环模具的浇注系统和冷却系统设计合理,在注塑过程中能够保证塑件的完整填充,能够有效地进行热量散发。

3 模具结构设计

3.1 内螺纹脱模机构设计

根据高压油封环内螺纹尺寸参数,设计的内螺

纹脱模机构如图8所示。油缸的活塞杆驱动齿条及与之啮合的齿轮3转动,带动齿轮4旋转,进而带动齿轮1和齿轮2旋转,从而驱动螺纹成型芯轴旋转,螺纹成型芯轴端部设计有与高压油封环内螺纹螺距相等的成型螺纹,通过螺纹成型芯轴的旋转实现内螺纹脱模。为提高齿轮转动平稳性,在齿条背部安装轴承的同时在齿轮3上、下也均安装了轴承。为提高螺纹成型芯轴转动平稳性,保证内螺纹成型质量,在螺纹成型芯轴上装有牙套。螺纹成型芯轴采用718高温合金钢,因塑件年产量大,为提高其硬度和耐磨性,在芯轴表面做氮化处理,硬度提升至HRC60以上,耐磨性提高3倍,确保300万次生产周期内螺纹成型精度,可有效抵抗磨损和划痕,从而延长使用寿命^[11-12]。选用日本KHK公司生产的SRF2-1000型号齿条,齿线形状为直齿轮,齿高28 mm,齿面硬度为硬齿面。考虑经济性,采用MOB

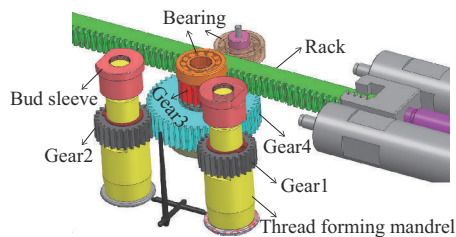


图8 内螺纹脱模机构

Fig. 8 Internal thread demoulding mechanism

标准液压油缸,油缸型号为MOB-FA-50-500(图8中未画出)。齿轮1、齿轮2、齿轮3及齿轮4的模数均为2,齿数分别为25,25,20,50,齿轮1与齿轮2的中心距为110 mm,齿轮1、齿轮2与齿轮3、齿轮4的中心距为51 mm,齿轮运动示意图如图9所示。

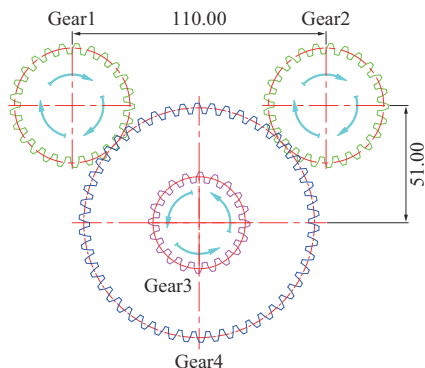


图9 齿轮运动示意图

Fig. 9 Diagram of gear motion

3.2 模具整体结构设计

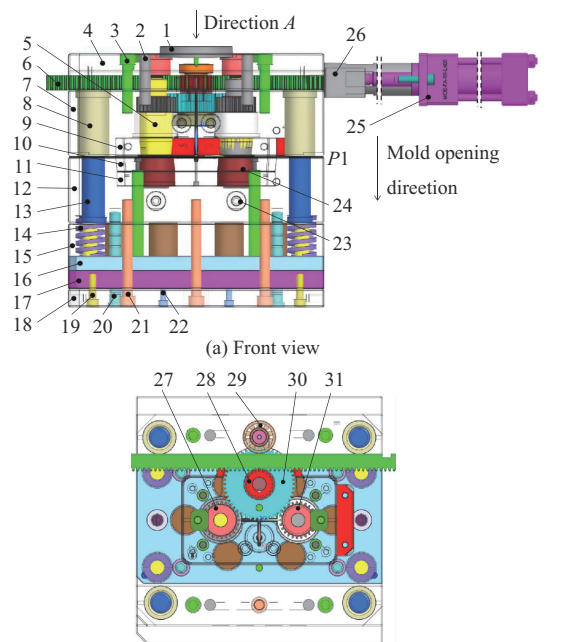
基于2.1节、2.2节、3.1节设计结果并依据模具设计相关准则^[13],高压油封环一模二腔模具整体设计结构如图10所示。为保证螺纹成型质量,将油缸脱模机构置于模具上方^[14-15],待制品螺纹在型腔内完成脱模后模具再开模,避免机械干涉。

4 模具工作过程

模具具体工作过程如下:利用起重装置将模具安装锁固在注塑机上,取下模具锁模器,料筒中呈熔融态的PPS塑料在注塑机注射压力下通过模具浇注系统注满型腔,经过一定时间的保压、冷却过程后,油缸驱动齿条、齿轮3运动并带动齿轮4、齿轮1以及齿轮2转动,螺纹成型芯轴在齿轮转动作用下开始旋转,朝开模方向旋转下移6 mm后完成内螺纹的抽芯脱模。随后,在注塑机拉力作用下模具在开面编号P1处按照装配图中的开模方向开模,在导柱、导套作用下,使动模板与定模板分离。随着动模板的移动,高压油封环制品逐渐脱离模具型腔。最后,塑料制品完全脱离模具,可通过人工或机械手进行抓取。模具在弹簧作用下复位,准备下一次注塑过程。

5 注塑验证

模具依照图10加工装配完成后,采用海天SA1000注塑机并依据文献[7]中的注塑工艺优化方法将获得的最优关键注塑工艺参数(熔体温度290℃、模具温度130℃、注射时间0.6 s、保压时间10 s、冷却时间15 s、保压压力80 MPa)应用到实际



(b) A-directional view with details 1, 4, 25, and 26 excluded

- 1—Locating ring; 2—Positioning pin; 3—Pin; 4—Fixed mould plate;
- 5—Central axis; 6—Rack; 7—Fixed mold plate; 8—Guide bush;
- 9—Front mold core; 10—Back mold stripping plate;
- 11—Rear mold core; 12—Moving platen; 13—Guide pillar;
- 14—Return spring; 15—Support plate; 16—Ejector plate fixing plate;
- 17—Ejector plate; 18—Moving mould base plate; 19—Cup head screw;
- 20—Fastening screw; 21, 22—Screw; 23—Sprue; 24—Locating sleeve;
- 25—Hydraulic cylinder; 26—Cylinder foot; 27—Gear 2; 28—Gear 3;
- 29—Bearing; 30—Gear 4; 31—Gear 1; P1—Parting surface

图10 注塑模结构

Fig. 10 Injection mold structure

注塑生产中,获得的高压油封环制品质量满足企业要求,制品如图11所示。



图11 高压油封环制品

Fig. 11 High-pressure oil seal ring products

6 结论

(1)结合CAE技术对设计的高压油封环模具浇注系统和冷却系统进行了分析验证,从充填时间、流动前沿温度、锁模力、充填区域、体积收缩率和回路冷却液温度等关键指标评估了浇注系统和冷却系统的设计合理性,分析结果表明所设计的浇注系统和冷却系统能够保证塑件在注塑过程中的完整填充并且能够有效地进行热量散发。

(2)将油缸脱模机构置于模具上方,采用外挂油

缸驱动齿条、齿轮及螺纹成型芯轴运动实现了高压油封环内螺纹在型腔内的成型与平稳脱模,保证了螺纹成型质量。

(3)该模具结构合理、工作过程稳定可靠,制品质量满足要求,可为具有相似结构的产品注塑模具设计提供有益借鉴。

参考文献

- [1] 王娇,朱峻玉,张日浩.考虑O形圈初始安装变形的浮动油封接触特性[J].润滑与密封,2022,47(10):71-77.
WANG Jiao, ZHU Junyu, ZHANG Yuehao. Contact characteristics of floating oil seal considering initial installation deformation of O-ring[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(10):71-77.
- [2] 许志强,陈江炳,詹莹韬,等.高性能聚苯硫醚长丝的制备工艺[J].工程塑料应用,2024,52(6):149-154.
XU Zhiqiang, CHEN Jiangbing, ZHAN Yingtao, et al. Preparation process of high-performance polyphenylene sulfide filament[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6):149-154.
- [3] 张晓光,程志超,孟泉,等.无人机灭火弹饰盖模流分析及注塑模具设计[J].塑料科技,2024,52(4):121-126.
ZHANG Xiaoguang, CHENG Zhichao, MENG Xiao, et al. Mold-flow analysis and injection mold design for UAV fire-fighting grenade cover[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(4):121-126.
- [4] 季宁,张卫星,于洋洋,等.基于最优拉丁超立方抽样方法和NSGA-II算法的注射成型多目标优化[J].工程塑料应用,2020,48(3):72-77.
JI Ning, ZHANG Weixing, YU Yangyang, et al. Multi-objective optimization of injection molding based on optimal Latin hypercube sampling method and NSGA-II algorithm[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):72-77.
- [5] 孙文革,程莉,雷皓,等.高压配电箱注塑成型优化分析[J].塑料科技,2024,52(5):126-129.
SUN Wenge, CHENG Li, LEI Hao, et al. Optimization analysis of injection molding for high-voltage distribution box[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(5):126-129.
- [6] 印磊,苏小平,潘杰.基于NCGA的汽车外饰件注塑成型工艺参数多目标优化[J].塑料工业,2024,52(8):95-100,164.
YIN Lei, SU Xiaoping, PAN Jie. Multi-objective optimizations of the injection molding process parameters for automotive exterior parts based on NCGA[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(8):95-100,164.
- [7] 董庆运,陈光军,季宁,等.基于CAE的一模异穴浇注系统的注塑流动平衡优化设计[J].塑料工业,2023,51(10):121-127.
DONG Qingyun, CHEN Guangjun, JI Ning, et al. Optimization of flow balance in injection molding of shell combination cavity based on CAE[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(10):121-127.
- [8] 季宁,于洋洋,么大锁.基于CAE的升降筒注塑模具设计[J].塑料工业,2021,49(6):84-89.
JI Ning, YU Yangyang, YAO Dasuo. Injection mould design of lifting cylinder based on CAE[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(6):84-89.
- [9] 程佳玮,曹俊哲,谢传颖,等.基于Moldflow的汽车把手气辅注塑工艺多目标优化[J].工程塑料应用,2024,52(4):89-93.
CHENG Jiawei, CAO Junzhe, XIE Chuanying, et al. Multi-objective optimization of automotive handles gas-assisted injection molding process based on Moldflow[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4):89-93.
- [10] 王静,刘浩,陈川,等.注塑模具螺旋式随形水路快速设计技术[J].工程塑料应用,2024,52(9):97-103.
WANG Jing, LIU Hao, CHEN Chuan, et al. Rapid design technology of spiral conformal cooling channels for injection mould[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9):97-103.
- [11] 张倩,马兰,杨绍利,等.钛铝基多元合金氮化层的耐磨性能研究[J].钢铁钒钛,2023,44(5):84-92.
ZHANG Qian, MA Lan, YANG Shaoli, et al. Study on wear resistance of nitriding coatings of Ti-Al base multielement alloys[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(5):84-92.
- [12] CHEN G, PENG Y B, ZHENG G, et al. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. Nature Materials, 2016, 15(8):876-881.
- [13] 张维合,陈国华.注塑模具课程设计指导[M].北京:化学工业出版社,2024.
ZHANG Weihe, CHEN Guohua. Course design guidance of injection mould[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2024.
- [14] 姜炳春,李振豪,赵利平.碎纸机收纳桶塑件的注塑模具设计[J].工程塑料应用,2024,52(9):104-111.
JIANG Bingchun, LI Zhenhao, ZHAO Liping. Design of injection mould for paper shredder storage barrel plastic parts[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9):104-111.
- [15] 李波,罗善明,李毅,等.内牙水管接头的注塑模具设计及CAE仿真[J].工程塑料应用,2024,52(1):95-101.
LI Bo, LUO Shanming, LI Yi, et al. Injection mold design of inner tooth water pipe joint and CAE simulation[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1):95-101.