

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.017

集成两种复合抽芯机构的分水法兰注塑模设计

贺柳操¹, 黎文龙², 唐志³

(1. 湖南机电职业技术学院机械工程学院, 长沙 410151; 2. 赣州职业技术学院智能制造学院, 江西赣州 341000;

3. 长沙众耀模塑科技有限公司, 长沙 410137)

摘要: 针对某三管四通型分水法兰塑件存在5个方向倒扣, 内外壁抽芯方向共计11个的复杂脱模难题, 设计了一副一模两腔两板式注塑模具。通过优化塑件在模具中的摆放方位, 使模具整体尺寸最小化且各抽芯机构布置最为紧凑。重点解决两大核心脱模难点, 一是塑件外侧外壁某一方向水平抽芯与歧管内壁另两个方向斜向抽芯在同一侧布置产生的空间干涉问题, 创新设计了一种三向二次复合抽芯机构, 采用隧道滑块内置斜T型导轨驱动歧管圆柱型芯先行完成30°和-21°斜向抽芯, 再由油缸驱动主滑块体带动侧成型块完成水平二次抽芯, 并设置了保险锁紧滑块与行程挡杆实现时序保护与行程精确控制; 二是针对管内两段非连续内螺纹需垂直于主管方向抽芯且空间狭小的难题, 创新设计了一种两向缩芯二次复合抽芯机构, 由斜导柱驱动缩芯驱动块经斜导轨带动两内螺纹镶件先行完成轴向缩芯, 再由油缸驱动主滑块完成水平抽芯。采用Moldflow软件对浇注系统和冷却系统进行CAE分析, 并经实际试模验证。结果表明: 充填时间约1.76 s, CAE预测最大注射压力23.3 MPa, 实际注射压力26.8 MPa; CAE预测锁模力峰值为380 kN, 实测值为410 kN; 冷却时间约18 s, 实际成型周期37.2 s; 翘曲变形量控制在0.3 mm以内。三坐标检测表明11个关键尺寸全部合格, 表面粗糙度 $R_a \leq 1.6 \mu\text{m}$, 连续生产2 000件合格率98.5%。该设计方案为同类多向脱模复杂塑件的模具开发提供了系统的技术参考。

关键词: 分水法兰; 注塑模具; 复合抽芯; 滑块中滑块; CAE分析

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0152-11

Design of injection mould for water distribution flange integrating two core-pulling mechanisms

HE Liucuo¹, LI Wenlong², TANG Zhi³

(1. Mechanical Engineering College, Hunan Mechanical & Electrical Polytechnic, Changsha 410151, China; 2. School of Intelligent Manufacturing Ganzhou polytechnic, Ganzhou 341000, China; 3. Changsha Zhongyao Molding & Plastics Technology Co., Ltd., Changsha 410137, China)

Abstract: Aiming at the challenges for complex demolding of a three-pipe four-way water distribution flange plastic part featuring undercuts in five directions and a total of eleven core-pulling directions on the inner and outer walls, a two-plate injection mould with one mould and two cavities was designed. By optimizing the placement orientation of the plastic part in the mould, the overall mould dimensions were minimized and the arrangement of each core-pulling mechanism was made most compact. Two core demolding difficulties were mainly addressed: First, to solve the spatial interference issue on the same side where a horizontal core-pulling in a certain direction on the outer wall and two oblique core-pullings in other directions on the inner wall of the branch pipe are located, an innovative three-directional two-stage core-pulling composite mechanism was designed. A tunnel slider equipped with internal oblique T-shaped guide blocks drives the cylindrical core pins of the branch pipes to first complete 30° and -21° oblique core-pulling, and then a hydraulic cylinder drives the main slider body together with the side forming block to complete the horizontal secondary core-pulling. A safety locking slider and a stroke stop rod are provided for sequential protection and precise stroke control. Second, to address the challenge of two discontinuous internal threads inside a pipe requiring core-pulling perpendicular to the main pipe direction in a confined space, an innovative two-way core-reduction two-stage core-pulling composite mechanism was designed. An angle pin drives a core-reduction driving block, which drives the two internal thread inserts via oblique guide rails to first complete axial core-reduction, and then a hydraulic cylinder drives the main slider to complete horizontal core-pulling.

基金项目: 湖南机电职业技术学院技能传承创新团队建设阶段性成果(HNJD2024-07)

通信作者: 贺柳操, 副教授, 从事数字化设计与制造、职业教育工作

收稿日期: 2026-04-30

引用格式: 贺柳操, 黎文龙, 唐志. 集成两种复合抽芯机构的分水法兰注塑模设计[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 148-158.

HE Liucuo, LI Wenlong, TANG Zhi. Design of injection mould for water distribution flange integrating two core-pulling mechanisms[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 148-158.

CAE analysis of the gating and cooling systems was conducted using Moldflow software, followed by actual mould trial verification. The results show that the filling time is about 1.76 s, the maximum injection pressure predicted by CAE is 23.3 MPa and the actual injection pressure is 26.8 MPa. The peak clamping force predicted by CAE is 380 kN, and the measured value is 410 kN. The cooling time is about 18 s, the actual molding cycle is 37.2 s and the warpage deformation is controlled within 0.3 mm. Coordinate measuring machine inspection shows that all 11 critical dimensions are qualified, the surface roughness R_a is less than $1.6 \mu\text{m}$, and the yield rate over 2 000 consecutive production cycles is 98.5%. This design provides a systematic technical reference for the mould development of similar complex plastic parts with multi-directional demolding requirements.

Keywords: water distribution flange; injection mould; composite core-pulling; slider-in-slider; CAE analysis

分水法兰类塑件在给排水系统、暖通管道及工业流体输送领域应用广泛,它的功能在于实现主管道与多路分支管道的流体分配与连接。此类塑件通常呈现三通、四通或多通结构,内外壁分布有螺纹、卡槽、密封凹槽及加强筋等复杂功能特征,致使脱模方向多,抽芯路径相互干涉,模具设计难度显著高于常规注塑件^[1-3]。

近年来,多向复合抽芯技术已成为解决复杂塑件脱模难题的核心手段。郑子军等^[2]针对汽车软管接头,设计了复合弯管抽芯机构,通过滑块内设置斜向导轨实现多角度同步抽芯;林明山等^[3]基于有限元分析,对复合抽芯机构的关键构件进行了强度校核与优化设计;马春文^[4]针对建筑排水管接头内螺纹脱模,提出了螺纹型芯旋转抽芯方案;叶朝桢等^[5]介绍了滑块中设置滑块的抽芯机构,有效解决了同侧多滑块空间干涉问题。然而,当塑件同时面临多个方向脱模,内外壁抽芯相互交叉以及狭小空间内复合动作等综合难题时,现有单层次复合机构难以满足全部功能需求,需要更系统的创新设计方法。

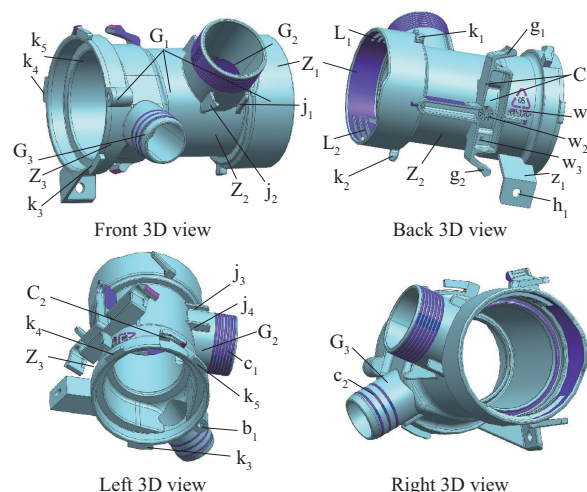
文章设计对象为一种三管四通型分水法兰,塑件存在5个方向的倒扣,内外壁抽芯方向共计11个,其中一段管内存在两段非连续内螺纹,需垂直于主管方向抽芯,而管外壁与歧管内壁的抽芯在同一侧形成空间干涉。通过优化塑件摆放方位,使模具尺寸最小化。在此基础上,创新设计了两种复合抽芯机构:一是三向二次复合抽芯机构,解决外侧水平抽芯与歧管斜向抽芯的空间干涉问题;二是两向缩芯二次复合抽芯机构,实现狭小空间内内螺纹的垂直抽芯。结合Moldflow CAE分析对浇注与冷却系统进行了优化验证。本设计为同类多向脱模复杂塑件的模具设计提供了可借鉴设计方法。

1 分水法兰塑件

1.1 塑件结构

某三管四通型分水法兰塑件结构如图1所示。

塑件由1个主管道 G_1 和2个歧管分管道 G_2 、 G_3 组合而成。其中主管道 G_1 又由3个不同管径的分段 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 构成,各分段之间以过渡台阶连接,形成变径管状结构。



G_1 —Main pipe; G_2 , G_3 —Manifold; Z_1 , Z_2 , Z_3 —Main pipe segments; L_1 , L_2 —Non-continuous internal threads; k_1 ~ k_5 —Latching tongues; w_1 ~ w_3 —Text; z_1 —Foot plate; h_1 —Hole; j_1 ~ j_4 —Reinforcing ribs; C_1 —T-slot; C_2 —Tightening groove; b_1 —Screw post; c_1 , c_2 —Sealing recesses

图1 塑件结构

Fig. 1 Plastic parts structure

Z_1 内壁的上端、下端分别设置有分段式内螺纹(非连续内螺纹) L_1 、 L_2 ,用于与其他管件的螺纹连接;外壁上设置有2个旋紧卡舌 k_1 、 k_2 ,用于安装时的旋转定位与锁紧。

Z_2 内壁为光滑圆柱面,外壁上设置的特征有:T型插槽 C_1 ,用于安装连接件, C_1 两端分别设置有1个弹性卡勾 g_1 、 g_2 ;外壁表面还布置有环保标识文字 w_1 、日期章文字 w_2 及等级标识文字 w_3 。此外, Z_2 外壁还设有支脚板 z_1 及其上的安装孔 h_1 以及由4个加强筋 j_1 ~ j_4 增强的歧管 G_2 。 G_2 外壁上靠近出口部位设置有多圈截面为圆形的密封凹槽 c_1 ,用于安装“O”型密封圈。

Z_3 的内壁为两台阶沉孔式光滑内壁,其外壁口

部沿周向均布3个卡舌 k_3 、 k_4 、 k_5 ,用于与配合件的快速卡接。外壁上还设置有1个旋紧卡槽 C_2 ,1个自攻螺丝孔柱 b_1 。歧管 G_3 同样设置在 Z_3 外壁上,其口部设置有多圈截面为圆形的密封凹槽 c_2 。

塑件平均壁厚2.9 mm,采用压延球方法计算的壁厚值分布在0.417~5.0 mm之间,如图2所示。外形包容尺寸为84 mm×92 mm×102.5 mm,塑件总体积66.14 cm³。

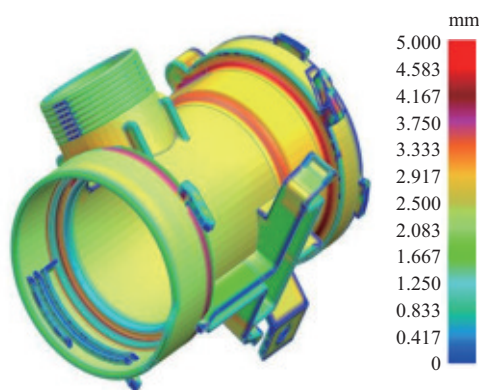


图2 塑件壁厚分布

Fig. 2 Wall thickness distribution of plastic parts

1.2 塑件材料选用

塑件材料选用质量分数20%矿物填充聚丙烯(PP+T20)。PP基体赋予材料优良的流动性和成型加工性,20%矿物粉(滑石粉或碳酸钙)的添加可显著提高材料的刚性、尺寸稳定性和耐热性,同时有效降低成型收缩率,减少翘曲变形^[6-7]。对于分水法兰这类要求密封性能、尺寸精度及一定力学强度的管件,PP+T20兼具良好的综合性能与经济性^[8-9]。推荐选用聚赛龙 Selon PP-T20,该牌号密度0.97~1.05 g/cm³,熔体流动速率适中,拉伸强度≥25 MPa,弯曲模量≥1 800 MPa,热变形温度(0.45 MPa)≥110 °C,收缩率0.8%~1.2%,满足塑件使用要求。材料主要性能参数见表1。

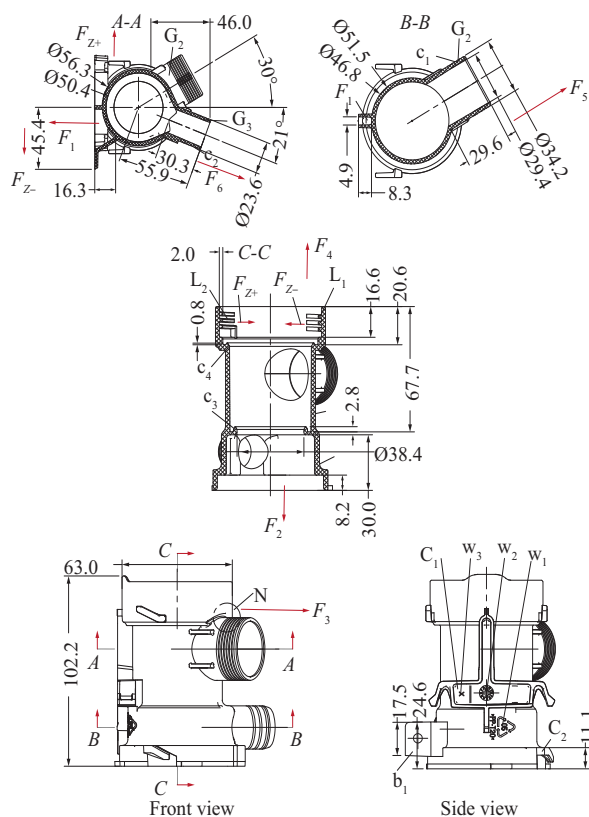
表1 PP+T20材料主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of PP+T20 material

Performance item	Value
Density/(g·cm ⁻³)	0.97~1.05
Melt flow rate (230 °C/2.16 kg)/[g·(10 min) ⁻¹]	10~20
Tensile strength/MPa	≥25
Flexural modulus/MPa	≥1 800
Izod notched impact strength (23 °C)/(J·m ⁻¹)	≥25
Heat deflection temperature (0.45 MPa)/°C	≥110
Molding shrinkage/%	0.8~1.2

2 模具设计难点及解决方法

根据图1所示塑件结构,经多次方案比选与验证,最终确定的塑件摆放方位如图3所示。该方位下模具整体尺寸最小,各抽芯机构布置最为紧凑合理,结构安全性最优。基于该方位,塑件外壁脱模需从5个方向进行,内壁脱模需从6个方向进行,具体分析如下。



G_2 , G_3 , L_1 , L_2 , w_1 ~ w_3 , h_1 , C_1 , C_2 , b_1 , c_1 , c_2 —The same as Fig. 1;
 c_3 , c_4 —Inner ring recesses; F_1 ~ F_6 —Core-pulling direction;
 F_{Zc} —Mould opening direction; F_{Zc} —Mould closing direction

图3 脱模方向及难点分析

Fig. 3 Analysis of demolding direction and challenges

(1)外壁脱模方向分析(按图3所示A-A剖面方位)。
 ① F_1 向抽芯脱模:对应特征包括 C_1 槽、 w_1 、 w_2 、 w_3 、 h_1 、 k_1 、 k_2 等,所需抽芯距离最小,为18.3 mm;
 ② F_2 向抽芯脱模:对应 C_2 、 b_1 等特征,所需抽芯距离最小,为28 mm;
 ③ F_3 向(F_1 向反向)抽芯脱模:对应 G_2 与 Z_1 交界处的沟槽区域N,该区域存在较深的凹陷结构,所需抽芯距离最小,为48 mm;
 ④闭模 F_{Zc} 方向的分离脱模:对应剩余外壁的上半部分,所需抽芯距离最小,为38.8 mm;
 ⑤开模 F_{Zc} 方向的分离脱模:对应剩余外壁的下半部分,所需抽芯距离最小,为45.4 mm。

(2)内壁脱模方向分析。① F_4 向(F_2 向反向)抽芯脱模:由于 Z_1 、 Z_2 中存在内环凹槽 c_3 、 c_4 特征,且受 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 内壁直径差异的影响, Z_1 、 Z_2 内壁只能按 F_4 向抽芯脱模,所需抽芯距离最小70 mm;② Z_1 管内 F_{Z-} 、 F_{Z+} 向抽芯脱模: L_1 、 L_2 内螺纹镶件的抽芯脱模方向分别为位于 Z_1 管内的 F_{Z-} 、 F_{Z+} 向,该方向与 F_4 垂直,因此 F_4 向抽芯前必须先完成 L_1 、 L_2 内螺纹镶件的轴向缩芯抽芯,所需抽芯距离最小4 mm;③ F_2 向抽芯脱模: Z_3 内壁必须按 F_2 向抽芯脱模,所需抽芯距离最小32 mm;④ F_5 向抽芯脱模: G_2 内壁必须按 F_5 向抽芯脱模, F_5 向与水平面夹角 30° ,所需抽芯距离最小32 mm;⑤ F_6 向抽芯脱模: G_3 内壁必须按 F_6 向抽芯脱模, F_6 向与水平面夹角 21° ,所需抽芯距离最小33 mm。

2.1 脱模难点分析

为实现上述11个方向的自动脱模,模具脱模机构设计面临以下两大核心难点。

(1)外壁脱模中的第③项(F_3 向抽芯)与内壁脱模中的第④、⑤项(F_5 、 F_6 向斜向抽芯)在空间位置上相互重叠。 F_3 向为水平方向,而 F_5 向、 F_6 向分别与 F_3 向呈 $+30^\circ$ 和 -21° 夹角。这意味着在同一侧狭小空间内,既要完成大行程的水平抽芯(48 mm),又要完成两个不同角度的斜向抽芯(分别为32 mm和33 mm)。若采用常规的分体式滑块布局,三个方向的抽芯机构将发生严重的空间干涉^[10-11]。更为复杂的是,三个抽芯动作存在时序要求:斜向抽芯必须先行完

成,否则歧管圆柱型芯与塑件的分离将受到侧成型块的阻碍;水平抽芯则必须在斜向抽芯完成后进行。因此,需要设计一种能够实现时序控制的三向复合抽芯机构,在有限空间内协调完成三个方向、两次抽芯的复杂动作。

(2)内壁脱模中的第②、第③项同样构成复合抽芯难题。第③项(F_4 向抽芯)的实现必须以第②项(L_1 、 L_2 内螺纹镶件的 F_{Z-} 、 F_{Z+} 向缩芯)先行为前提,因为 L_1 、 L_2 内螺纹镶件的非连续内螺纹特征在几何上阻碍了 F_4 向主型芯的抽离。两内螺纹的抽芯方向与主管抽芯方向垂直,且空间极为狭小—— Z_1 管内径有限,所有抽芯机构必须集成在一个直径受限的圆柱形空间内。传统的独立抽芯方案无法在此空间内布置。因此,需要设计一种紧凑型的两向缩芯二次复合抽芯机构,使缩芯驱动与主抽芯能够在同一轴线空间内顺序完成^[12-14]。

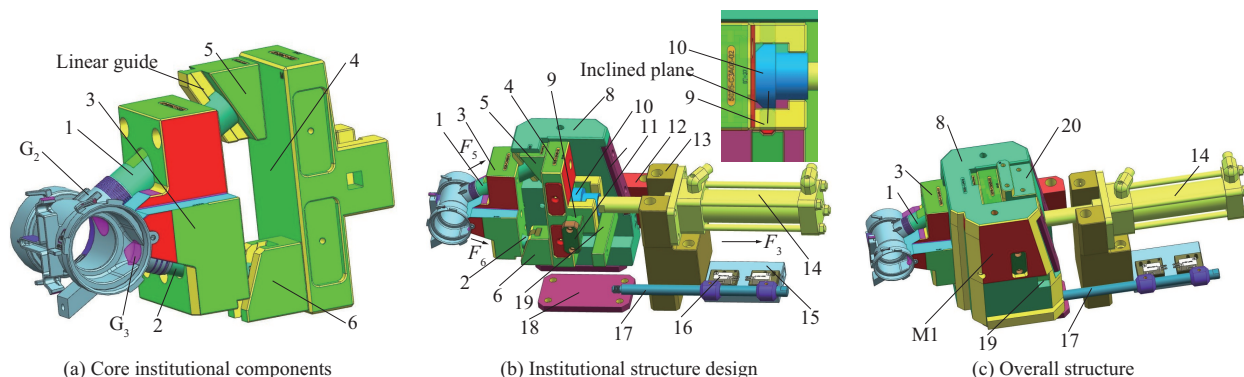
2.2 主要脱模难点解决方法

2.2.1 一种三向二次复合抽芯机构(M1)

针对2.1节第(1)项难点,创新设计了一种三向二次复合抽芯机构M1,其设计如图4所示。

(1)机构核心原理。

首先,如图4a所示,设置 G_2 圆柱型芯镶件1用于成型歧管 G_2 内壁并按 F_5 向抽芯,设置 G_3 圆柱型芯镶件2用于成型歧管 G_3 内壁并按 F_6 向抽芯,设置侧成型块3用于成型 Z_2 外壁 F_3 向一侧侧壁并按 F_3 向抽芯。三者相互独立但空间上紧密配合。



1— G_2 cylindrical core insert; 2— G_3 cylindrical core insert; 3—Side forming block; 4—Tunnel slider; 5, 6—Inclined T-groove guide blocks; 7—Wear-resistant plate; 8—Main slider body; 9—Safety lock slider; 10—Cylinder push rod T-head; 11—Cover plate; 12—Clamping strip; 13—Supporting block; 14—Hydraulic cylinder; 15—Supporting plate; 16—Limit switch; 17—Travel control rod; 18—Bottom wear-resistant plate; 19—Stopper bar; 20—Locking block; F_3 — F_6 —Core-pulling direction; M1—Institutional number

图4 一种三向2次复合抽芯机构创新设计

Fig. 4 An innovative design of a three-directional two-stage composite core-pulling mechanism

其次,设置隧道滑块4,并在其前端附加设置2个斜T型导轨块5、6,分别用于驱动 G_2 圆柱型芯镶件1和 G_3 圆柱型芯镶件2按 F_5 向、 F_6 向抽芯。侧成型块3上对应开设2个斜孔,用于容纳 G_2 圆柱型芯镶件1和 G_3 圆柱型芯镶件2穿过及滑动。斜孔轴线分别与 F_5 向、 F_6 向平行。油缸驱动隧道滑块4抽芯时,侧成型块3保持不动。

再次,待 G_2 圆柱型芯镶件1和 G_3 圆柱型芯镶件2的斜抽芯完成后,油缸继续驱动隧道滑块4带动主滑块体8及侧成型块3共同完成二次抽芯(F_3 向水平抽芯)。

(2)机构结构设计。

如图4b所示,侧成型块3安装于主滑块体8前端,二者通过螺钉刚性连接。 G_2 圆柱型芯镶件1和 G_3 圆柱型芯镶件2分别穿过侧成型块3上的斜孔,尾部与斜T型导轨块5、6采用T型槽连接,可在斜向导轨驱动下沿各自轴线移动。隧道滑块4安装于主滑块体8内腔,通过两侧压条12限位,可沿 F_3 向滑动。隧道滑块4尾部设置矩形尾槽以容纳油缸推杆T型头10,尾槽侧边设置有保险锁紧滑块9。油缸14通过支架块13固定安装于模具侧边。主滑块体8尾端加装行程控制杆17,对应设置2个行程开关16(通过支撑板15安装于模具侧边),用于检测抽芯到位信号。主滑块体8尾端还设置挡杆19,用于限制隧道滑块4在主滑块体8内的抽芯行程。模具闭合时,锁紧块20和油缸14同时对隧道滑块4实施锁紧,确保 G_2 圆柱型芯镶件1、 G_3 圆柱型芯镶件2和侧成型块3在注射压力下不发生位移。

(3)机构工作原理:开模后,油缸14动作,活塞杆沿 F_3 向移动。首先移动距离 t (6 mm),使保险锁紧滑块9在弹簧作用下向矩形尾槽中心缩回,解除隧道滑块4与主滑块体8之间的锁定。随后油缸推杆T型头10带动隧道滑块4沿 F_3 向移动,隧道滑块4前端的斜T型导轨块5、6分别驱动 G_2 圆柱型芯镶件1和 G_3 圆柱型芯镶件2沿斜孔按 F_5 向和 F_6 向移动,完成第一次斜向抽芯(抽芯距离分别为32 mm和33 mm)。第一次抽芯完毕后,隧道滑块4尾端被主滑块体8上的挡杆19挡住,隧道滑块4停止运动。此时油缸14继续驱动,带动主滑块体8及其上的侧成型块3共同沿 F_3 向移动,完成第二次水平抽芯(抽芯距离48 mm)。复位时,油缸14反向驱动,锁紧块

20在合模时压紧隧道滑块4,保险锁紧滑块9在锁紧块20的斜面作用下向外伸出,将隧道滑块4与主滑块体8重新锁定。

(4)机构中保险锁紧滑块9的设置是确保时序可靠性的关键——只有当油缸先移动距离 t 解除锁定后,隧道滑块4才能相对主滑块体8滑动,有效防止了斜抽芯与水平抽芯同时发生而导致的塑件拉伤或机构卡死。挡杆19的设置则保证了两次抽芯行程的精确控制,使机构具有良好的鲁棒性。

2.2.2 一种2向缩芯二次复合抽芯机构(M2)

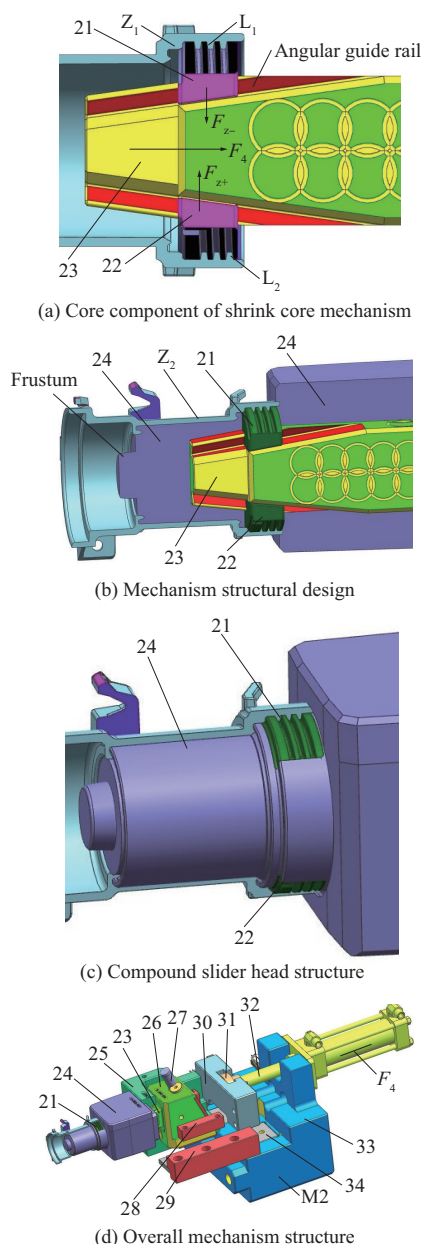
针对2.1节第(2)项难点,创新设计了一种两向缩芯二次复合抽芯机构M2,如图5所示。

(1)机构核心原理。

如图5a、图5b所示,设置 L_1 内螺纹镶件21用于成型 L_1 并按 F_{z-} 向缩芯抽芯,设置 L_2 内螺纹镶件22用于成型 L_2 内螺纹镶件并按 F_{z+} 向缩芯抽芯。设置缩芯驱动块23,其两侧面加工有斜导轨,通过斜导轨与 L_1 内螺纹镶件21、 L_2 内螺纹镶件22的尾部斜面配合,驱动二者分别沿 F_{z-} 、 F_{z+} 向运动。设置 Z_1/Z_2 圆柱型芯24用于成型 Z_1 、 Z_2 内壁,并按 F_4 向抽芯。 L_1 内螺纹镶件21和 L_2 内螺纹镶件22均安装在 Z_1/Z_2 圆柱型芯24前端的径向滑槽内,仅能分别沿 F_{z-} 、 F_{z+} 方向移动。缩芯驱动块23安装在 Z_1/Z_2 圆柱型芯24的中心孔内,可沿 F_4 向滑动。缩芯驱动块23驱动 L_1 、 L_2 内螺纹镶件抽芯时, Z_1/Z_2 圆柱型芯24保持不动(第一次两向缩芯抽芯),待该抽芯完成后, Z_1/Z_2 圆柱型芯24再带着已收缩的镶件组件一起从塑件 Z_1 、 Z_2 内壁中抽出(第二次水平抽芯)。 Z_1/Z_2 圆柱型芯24前端设置定位圆锥台,与 Z_3 内壁圆柱型芯前端的圆锥形凹槽配合,确保管内型芯在注射压力下不发生径向偏移。

(2)机构结构设计。

如图5d所示, L_1 内螺纹镶件21、 L_2 内螺纹镶件内螺纹镶件22安装在 Z_1/Z_2 圆柱型芯24前端径向滑槽内,分别与缩芯驱动块23两侧的斜导轨采用T型槽配合连接。缩芯驱动块23的前端位于 Z_1/Z_2 圆柱型芯24的中心孔内,可在孔内滑动;其尾部固定安装在隧道驱动滑块26的前端。隧道驱动滑块26通过压条28安装在 Z_1 主滑块25的内腔中,由定模一侧的斜导柱27驱动,斜导柱角度取 20° 。 Z_1/Z_2 圆柱型芯24通过法兰安装在 Z_1 主滑块25前端, Z_1 主滑块25通过压条29安装在滑块座33上,其尾端加装



21— L_1 Internal thread insert; 22— L_2 Internal thread insert; 23—Core retraction driving block; 24— Z_1/Z_2 Cylindrical core; 25— Z_1 Main slider; 26—Tunnel driving slider; 27—Oblique guide pillar; 28, 29—Clamping strips; 30—Connecting block; 31—T Block; 32—Hydraulic cylinder; 33—Slider base; 34—Wear-Resistant plate; F_4 —Core-pulling direction; F_{Z-} —Mould opening direction; F_{Z+} —Mould closing direction; M2—Mechanism number

图5 一种2向缩芯2次复合抽芯机构创新设计

Fig. 5 An innovative design of two-way core reduction and two-stage composite core-pulling mechanism

衔接块30,用于油缸32通过T型块31驱动 Z_1 主滑块25。

(3)斜导柱角度选择及校核。

斜导柱27倾斜角取 20° ,选取依据如下:根据抽

芯力计算,抽芯力 $F_c \approx 620$ N。抽芯力按经验公式(1)计算。

$$F_c = A \times p \times (\mu \cdot \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (1)$$

式中: A 为塑件包络型芯的投影面积(约 1200 mm^2); p 为塑件对型芯的包紧力(取 10 MPa); μ 为摩擦系数(取 0.3); α 为脱模斜度(取 1°)。

斜导柱直径取 20 mm ,倾斜角 $\theta = 20^\circ$ 。斜导柱所受弯曲力 $F_w = F_c / \cos \theta \approx 620 / \cos 20^\circ \approx 660$ N。斜导柱弯曲强度校核按公式(2)计算。

$$\sigma = M/W = (F_w \times L_w) / (\pi d^3 / 32) \leq [\sigma] \quad (2)$$

式中: M 为弯矩, $M = F_w \times L_w$, L_w 为斜导柱有效弯曲长度; W 为圆轴抗弯截面模量, $W = \pi d^3 / 32$ (约 60 mm^3), $d = 20 \text{ mm}$,计算得 $\sigma \approx 84 \text{ MPa}$,SKD61材料许用弯曲应力 $[\sigma] \geq 200 \text{ MPa}$,安全系数约 2.4 ,满足设计要求。该角度下斜导柱有效工作长度约 85 mm ,抽芯行程满足要求(所需抽芯距离 4 mm ,实际行程大于该值),同时避免了倾斜角过大($>25^\circ$)导致的滑块复位自锁风险。

(4)机构工作原理。

开模时,定模与动模分离,斜导柱27随定模移动,驱动隧道驱动滑块26在 Z_1 主滑块25内腔中沿 F_4 向滑动。隧道驱动滑块26带动缩芯驱动块23同步运动,缩芯驱动块23两侧的斜导轨驱动 L_1 内螺纹镶件21沿 F_{Z-} 向、 L_2 内螺纹镶件内螺纹镶件22沿 F_{Z+} 向移动,完成第一次两向缩芯抽芯(抽芯距离 4 mm)。模具完全打开后,斜导柱27与隧道驱动滑块26脱离。此时油缸32动作,驱动 Z_1 主滑块25沿 F_4 向移动,带动 Z_1/Z_2 圆柱型芯24及已收缩的 L_1 、 L_2 内螺纹镶件整体从塑件中抽出,完成第二次水平抽芯(抽芯距离 70 mm)。复位时,油缸32反向驱动, Z_1 主滑块25回位;合模过程中,斜导柱27进入隧道驱动滑块26的斜孔,驱动其反向运动,带动缩芯驱动块23将 L_1 、 L_2 内螺纹镶件复位至成型位置。合模后,定模板上设置的斜面锁紧块压紧隧道驱动滑块26,同时油缸32也起到锁紧作用。

2.3 其余部位的脱模解决方案

(1) Z_3 内壁 F_2 向斜导柱滑块抽芯脱模(机构M3)。

如图6a所示,针对 Z_3 内壁及周边特征的脱模,设计了斜导柱滑块机构M3。 Z_3 圆柱镶件35安装于滑块37前端,用于成型 Z_3 内壁及侧端面特征。滑块37上还集成有局部成型镶件38,用于成型 k_3 至 k_5 、 b_1

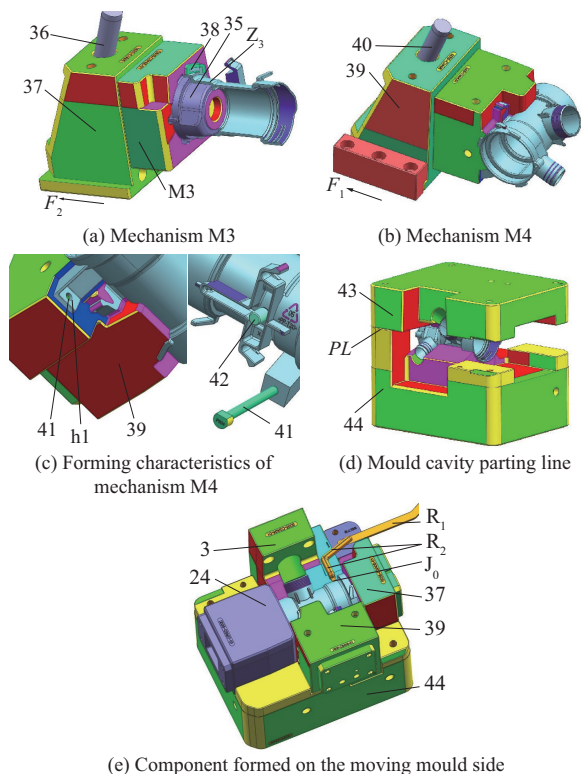


Fig. 6 Design of demolding mechanism components for inner and outer walls with general difficulty

及 C_2 等特征。 Z_3 圆柱镶件35的前端设置圆锥形凹槽,与机构M2中 Z_1/Z_2 圆柱型芯24的前端锥台配合,形成锥面定位。开模时,斜导柱36随定模运动,驱动滑块37沿 F_2 向移动, Z_3 圆柱镶件35和局部成型镶件38同步从塑件中抽出,抽芯距离32 mm。斜导柱36直径取20 mm,倾斜角 20° ,材料为SKD61。抽芯力经计算约为620 N,斜导柱弯曲强度满足安全系数 ≥ 2.0 的要求。

(2) Z_2 外壁 F_1 向斜导柱滑块抽芯脱模(机构M4)。

如图6b、图6c所示,针对 Z_2 外壁 F_1 向特征的脱模,设计了斜导柱滑块机构M4。滑块39由斜导柱40驱动,前端集成局部成型镶件41、42,分别用于成型 C_1 槽、 w_1-w_3 、 h_1 、 k_1 、 k_2 、 G_1 、 G_2 等特征。开模时,斜导柱40驱动滑块39沿 F_1 向移动,带动成型镶件同步抽芯,抽芯距离18.3 mm。斜导柱40直径取16 mm,倾斜角 20° ,材料为SKD61,抽芯力经计算约为510 N。

(3)主分型面及顶出设计。

如图6d、图6e所示,在完成前述外壁、内壁各局部抽芯的基础上,模腔通过主分型面 PL 分型,获得型腔镶件43和型芯镶件44。 PL 面打开时,塑件随动模移动,主动与型腔镶件43分离。在各侧向抽芯机构完成抽芯动作后,塑件仅包裹在型芯镶件44上,最终由顶针顶出脱模。该方案使塑件在顶出时仅受轴向顶出力,避免了因侧向抽芯未完全脱离而造成的顶出变形。

3 浇注及冷却系统设计

3.1 浇注系统设计及CAE分析

如图6e所示,综合考虑脱模机构的布置空间和一模两腔的平衡布局需求,采用侧浇口方案。单腔设置1个矩形截面侧浇口 J_1 ,尺寸为3 mm $\times$ 2 mm。二级流道 R_2 和一级流道 R_1 均采用梯形截面,尺寸为8 mm $\times$ 5 mm $\times$ 6 mm(上底 $\times$ 下底 $\times$ 高),主浇道 R_0 采用圆锥形结构,小端直径3.5 mm,锥度 2° 。

采用Moldflow软件对充填过程进行CAE分析,结果如图7a至图7f所示。充填时间分析(图7a)

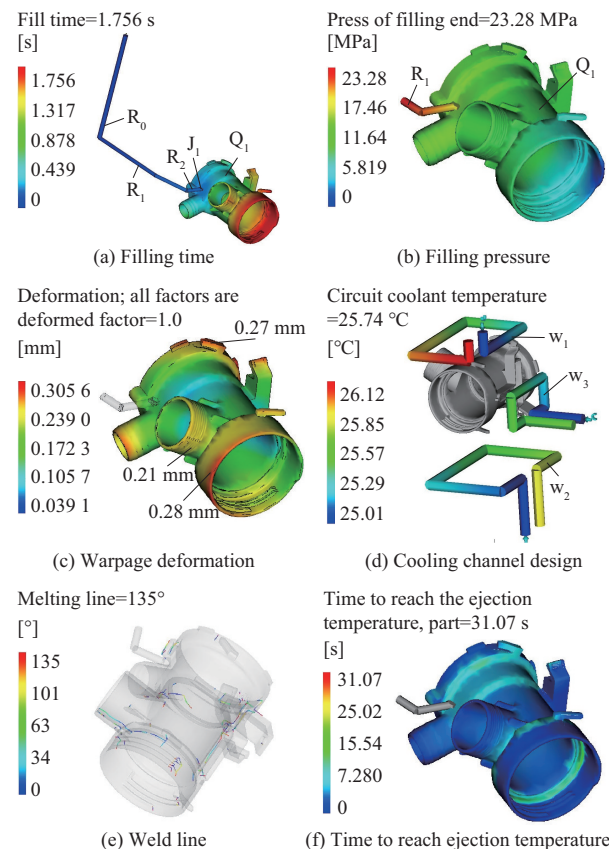


Fig. 7 CAE analysis of mould cavity gating and cooling design

表明,熔体在约 1.76 s 内完成模腔充填,流动前沿温度保持在 215~225 °C 范围内,温度分布均匀,未出现局部过热或过冷现象,有利于保证塑件内部组织的一致性。充填压力分析显示最大注射压力约为 23.3 MPa,在注塑机额定压力范围内。熔接线分析结果(图 7e)表明,熔接线主要分布于塑件的非受力区域,对塑件对接强度的影响较小,锁模力峰值约为 380 kN,模具刚度和注塑机吨位均可满足要求^[15-18]。

3.2 冷却系统设计

受脱模机构密集布置的限制,模腔冷却采用 3 条直径为 10 mm 的冷却管道。如图 7d 所示,型腔镶件 43 中开设管道 w_1 、型芯镶件 44 中开设管道 w_2 、滑块 39 中开设管道 w_3 。三条管道串联布置,冷却水入口温度设定为 25 °C,流量为 6 L/min。CAE 分析结果表明,塑件在冷却约 18 s 后整体温度降至顶出温度(约 85 °C)以下(图 7f),模腔表面温度分布均匀,温差控制在 ± 5 °C 以内。冷却管道与成型表面的距离保持在 12~15 mm,既保证了冷却效率,又避免了局部过冷导致的塑件内应力增大。成型周期约为 35 s (含注射 1.76 s、保压 5 s、冷却 18 s,开合模及顶出约 10 s)。该冷却方案在有限空间内实现了有效冷却,塑件翘曲变形量控制在 0.3 mm 以内(图 7c),满足尺寸精度要求。

3.3 工艺验证

实际试模采用海天 MA1200 注塑机,主要工艺参数与 CAE 预测对比见表 2。结果表明 CAE 仿真与实际情况吻合良好,工艺窗口合理。

表 2 CAE 预测值与实际工艺参数的对比

Tab. 2 Comparison of CAE predicted and actual process parameters

Parameter	CAE predicted	Actual value
Injection pressure/MPa	23.3	26.8
Holding pressure/MPa	20	22
Holding time/s	4.2	4.5
Mould temperature (core)/°C	31	32 - 35
Cooling water inlet/outlet/°C	25/28	25/28.9
Clamping force/kN	380	410
Cooling time/s	18	20
Molding cycle/s	35	37.2

4 模具结构设计

4.1 模具整体结构

4.1.1 模具结构

如图 8 所示,模具采用两板模结构,单次开模,单次顶出,一模两腔布局(Q_1 、 Q_2 对称布置)。模具总体外形尺寸为 650 mm×550 mm×480 mm,总质量约

2.3 t。模架选用标准龙记(LKM)CI 型两板模架,规格为 CI-4550-A200-B180-C150。定模部分由面板 47、定模板 46 组成;动模部分由动模板 48、模脚 52、推板 53、推板盖板 54 及底座板 55 组成。导柱 45 与导套 50 配合保证合模精度,四角设置边锁 57 进一步提高定位精度。支撑柱 60 均匀布置于推板下方,保证顶出时的受力均匀性。平衡块 49 用于调整模具安装后的水平度。保护柱 51 防止模具运输和存放过程中分型面意外闭合造成损伤。

模具主要零件材料选择如下:型腔镶件 43 和型芯镶件 44 采用 718H 预硬塑胶模具钢(硬度 33~37 HRC),具有良好的抛光性能和耐腐蚀性;各滑块体(主滑块体 8、Z₁主滑块 25、滑块 37、滑块 39)采用 P20 模具钢(硬度 28~32 HRC),加工性能良好;圆柱型芯镶件(1、2、24、35)及内螺纹镶件(21、22)采用 H13 热作模具钢(硬度 48~52 HRC),经真空淬火处理,具有优良的耐磨性和热稳定性;斜导柱(27、36、40)及斜 T 型导轨块(5、6)采用 SKD61 (硬度 50~55 HRC);导向零件及耐磨板采用 Cr12MoV (硬度 58~62 HRC)或铜合金+石墨镶嵌自润滑材料^[19-21]。

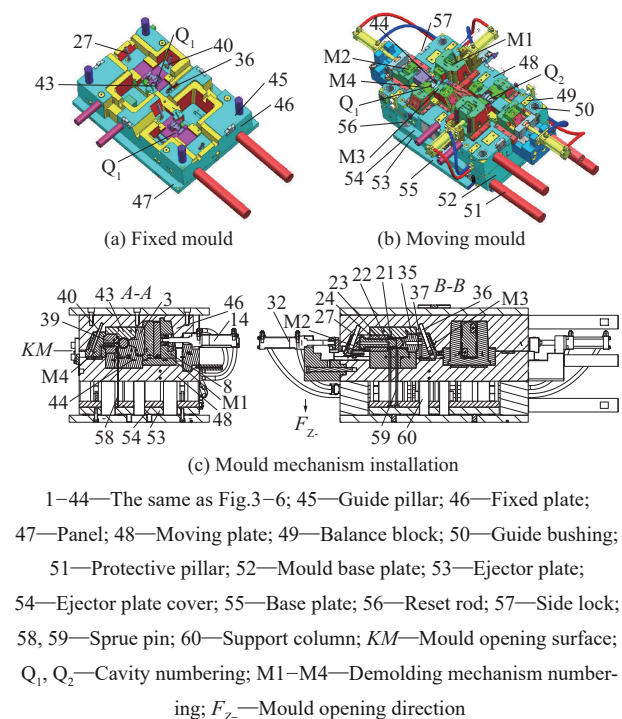


图 8 模具结构与工作原理

Fig. 8 Mould structure and working principle

4.1.2 脱模机构 M1~M4 在模具中的安装

如图 8c 所示,四组机构在模具四周呈十字对称布置,使合模力分布均衡,避免偏载。各油缸的动

作顺序通过注塑机控制系统与行程开关信号联锁控制,确保抽芯时序准确可靠^[22-23]。

4.1.3 顶出机构

顶出机构由推板 53、推板盖板 54、复位杆 56 及顶针 58、59 组成。顶针 58($\varnothing 6\text{ mm}\times 6\text{ 支}$)布置于塑件边缘加强筋区域,顶针 59($\varnothing 8\text{ mm}\times 4\text{ 支}$)布置于主管道底部区域,顶出距离为 40 mm。

4.2 模具工作原理

结合图 8c,模具工作原理如下。

(1)注塑:模具闭合,锁紧块 20、定模侧锁紧块分别压紧各滑块,油缸 14、32 处于锁紧状态。熔体经主浇道 R_0 、分流道 R_1/R_2 及浇口 J1 注入模腔,完成充填,保压及冷却过程。

(2)开模及斜导柱抽芯:注塑机带动动模后退,模具沿 KM 面打开。开模过程中,定模板 46 随动模分离,斜导柱 27 驱动隧道驱动滑块 26 在 Z_1 主滑块 25 内滑动,带动缩芯驱动块 23 驱动 L_1 内螺纹镶件 21 和 L_2 内螺纹镶件 22 完成轴向缩芯抽芯(机构 M2 第一次抽芯);同时,斜导柱 36 驱动滑块 37 及 Z_3 圆柱镶件 35 完成 F_2 向抽芯(机构 M3);斜导柱 40 驱动滑块 39 及成型镶件 41、42 完成 F_1 向抽芯(机构 M4)。开模到位后,各斜导柱与对应滑块分离。

(3)油缸抽芯。开模完成后,注塑机控制系统依次触发油缸动作:首先,油缸 14 动作,先移动距离 t 使保险锁紧滑块 9 解除锁定,再驱动隧道滑块 4 带动斜 T 型导轨块 5、6 驱动 G_2 圆柱型芯镶件 1 和 G_3 圆柱型芯镶件 2 完成 F_5 、 F_6 向斜抽芯;隧道滑块 4 被挡杆 19 限位后,油缸 14 继续驱动主滑块 8 及侧成型块 3 完成 F_3 向水平抽芯(机构 M1 两次抽芯)。其次,

油缸 32 动作,驱动 Z_1 主滑块 25 带动 Z_1/Z_2 圆柱型芯 24 及已收缩的内螺纹镶件整体完成 F_4 向抽芯(机构 M2 第二次抽芯)。各抽芯到位信号由行程开关 16 反馈至控制系统。

(4)顶出:全部抽芯动作完成后,注塑机顶杆推动推板 53、带动顶针 58、59 将塑件从型芯镶件 44 上顶出,完成脱模。

(5)复位:顶出机构先复位;随后油缸 32 反向驱动机构 M2 复位,油缸 14 反向驱动机构 M1 复位;最后,在合模过程中,各斜导柱进入对应滑块斜孔驱动滑块复位,定模侧锁紧块压紧各滑块,保险锁紧滑块 9 在锁紧块 20 斜面作用下重新锁定隧道滑块 4。模具恢复至注塑准备状态。

4.3 生产验证

典型产品实物如图 9 所示。脱模过程顺利,各抽芯机构动作平稳无卡滞。



图9 塑件实物

Fig. 9 Physical plastic part

经三坐标测量仪检测 11 个关键尺寸,全部合格(表 3)。

表3 关键特征的尺寸检测结果(数量=30)

Tab. 3 Dimensional inspection results of key features (number=30)

Feature	Nominal/mm	Tolerance/mm	Measured mean/mm	Max deviation/mm	Pass rate/%
Z_1 inner thread major diameter	32.00	± 0.15	32.05	+0.08	100
Z_1 inner thread minor diameter	28.50	± 0.12	28.52	+0.06	100
Z_2 outer wall width	48.00	± 0.20	48.10	+0.12	100
F_3 core-pulling side length	35.00	± 0.15	35.08	+0.10	100
G_2 branch pipe inner diameter	16.00	± 0.10	16.04	+0.05	100
G_3 branch pipe inner diameter	12.00	± 0.10	12.03	+0.04	100
C_1 T-slot width	8.00	± 0.08	8.02	+0.03	100
k_1-k_2 card tongue height	3.00	± 0.10	3.05	+0.06	100
Hole h_1 diameter	5.00	± 0.08	5.01	+0.02	100
Screw post b_1 height	10.00	± 0.15	10.09	+0.11	100
Overall length	102.50	± 0.25	102.38	-0.12	100

尺寸精度检测:采用三坐标测量仪(ZEISS CONTURA G2)对塑件 11 个关键尺寸进行检测,所

有尺寸均在图纸公差范围内。最大偏差为 Z_1 管内螺纹大径(+0.08 mm,公差 $\pm 0.15\text{ mm}$),合格率 97%

(抽检30件)。

表面粗糙度:采用粗糙度仪检测,塑件外壁 $Ra=0.8\sim 1.2\ \mu\text{m}$,内壁 $Ra=1.2\sim 1.6\ \mu\text{m}$,满足设计要求($Ra\leq 1.6\ \mu\text{m}$)。

外观质量:目视及放大镜检查,无飞边、缩痕、熔接痕等明显缺陷,脱模无拉伤。

生产稳定性:连续生产2 000件,模具动作正常,无卡滞或损坏,合格率98.5%。主要缺陷为微量飞边(占1.2%)及轻微缩痕(占0.3%),经工艺微调后可控制在0.5%以内。

5 结论

(1)针对分水法兰塑件5个方向倒扣、11个脱模方向的复杂成型需求,设计了集成两种创新脱模机构的一模两腔注塑模具。

(2)通过优化塑件摆放方位,使模具整体尺寸最小化,使5个方向的外壁脱模和6个方向的内壁脱模在有限空间内得以有序布置。

(3)创新设计的三向二次复合抽芯机构M1,采用隧道滑块内置斜T型导轨驱动歧管圆柱型芯先行完成 30° 和 -21° 斜向抽芯,再由油缸驱动主滑块体完成水平二次抽芯,有效解决了同侧多向抽芯的空间干涉和时序协调难题。保险锁紧滑块和挡杆的设计确保了两次抽芯的顺序可靠性。

(4)创新设计的两向缩芯二次复合抽芯机构M2,在狭小的Z₁管内集成缩芯驱动块和两个内螺纹镶件,由斜导柱驱动先行完成轴向缩芯,再由油缸驱动主滑块完成水平抽芯,实现了垂直方向抽芯与主管抽芯的顺序复合。

(5) Moldflow CAE分析验证了浇注系统和冷却系统设计的合理性,充填平衡性良好,冷却均匀。实际试模工艺参数与CAE预测吻合良好,实际成型周期37.2 s,塑件翘曲变形控制在0.3 mm以内。

(6)实际生产验证表明:四组脱模机构动作协调,运行平稳,塑件脱模顺利。三坐标检测11个关键尺寸全部合格, $Ra\leq 1.6\ \mu\text{m}$,连续生产2 000件合格率98.5%。该设计方案为同类多向脱模复杂塑件的模具开发提供了系统的技术参考。

参考文献

- [1] 唐华. 某复杂机盖多脱模机构注塑模的设计[J]. 塑料, 2026, 55(1):166-171.
TANG Hua. Design of injection mold with multiple demoulding mechanisms of a complex machine cover[J]. Plastics, 2026, 55(1): 166-171.
- [2] 郑子军, 刘晓彬, 张涛, 等. 汽车软管接头复合弯管抽芯机构模具设计[J]. 塑料工业, 2025, 53(6):71-77.
ZHENG Zijun, LIU Xiaobin, ZHANG Tao, et al. Mould designs with a composite bending tube core pulling mechanism for automotive hose joints[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(6):71-77.
- [3] 林明山, 胡滨铠. 基于有限元分析的注塑模具复合抽芯机构设计[J]. 现代塑料加工应用, 2021, 33(3):39-42.
LIN Mingshan, HU Binkai. Design of composite core-pulling mechanism of injection mould based on finite element analysis[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(3):39-42.
- [4] 马春文. 建筑排水管接头内螺纹抽芯注塑模具设计[J]. 现代塑料加工应用, 2021, 33(1):48-51.
MA Chunwen. Design of injection mold with internal thread core pulling for drainage pipe joint[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(1):48-51.
- [5] 叶朝桢, 吴光明. 一种滑块中有滑块的模具抽芯机构[J]. 制造技术与机床, 2019(5):40-42.
YE Chaozhen, WU Guangming. A mold core pulling mechanism with slider in slider[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(5):40-42.
- [6] 陈泉, 何洋, 秦强强, 等. PP极性改性的性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2):86-90.
CHEN Quan, HE Yang, QIN Qiangqiang, et al. Study on performance of PP polarity modification[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2):86-90.
- [7] 潘美玲, 潘慧. 汽车电池包用玻纤增强PP复合材料轻量化改性及成型工艺优化[J]. 汽车维修技师, 2026(4):112-113.
PAN Meiling, PAN Hui. Lightweight modification and molding process optimization of glass fiber reinforced PP composite for automobile battery pack[J]. Auto Maintenance, 2026(4):112-113.
- [8] 耿梦飞, 黄宇, 吕璐, 等. 硅灰石改性抗冲PP复合材料的制备与性能[J]. 沈阳化工大学学报, 2026, 40(1):42-49, 112.
GENG Mengfei, HUANG Yu, LYU Lu, et al. Preparation and properties of wollastonite modified impact polypropylene composite materials[J]. Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology, 2026, 40(1):42-49, 112.
- [9] JASKA D, NAVRATILOVA J, SVOBODA R, et al. Tuning the crystallization and polymorphic composition of polypropylene by organo-silane-modified silica[J]. Polymer Testing, 2026, 154. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2026.109085.
- [10] 杨南南, 文勇, 陈国夫. 降解型PP对再生骨料沥青混合料老化性能的影响[J]. 山西交通科技, 2025(6):7-12.
YANG Nannan, WEN Yong, CHEN Guofu. Impacts of degradable PP on aging properties of recycled aggregate asphalt mixture[J]. Shanxi Science & Technology of Transportation, 2025(6):7-12.
- [11] 文根保, 方新, 熊利军. 轿车开门拉手骨架注塑模结构方案的分析与设计[J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(4):15-20.
WEN Genbao, FANG Xin, XIONG Lijun. Analysis and design of injection mold structure for car door handle frame[J]. China

- Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2026, 52(4):15-20.
- [12] 张星婷,陈淑梅,林权. 蓝牙耳机外壳注塑模具设计及数值模拟研究[J]. 河南科技, 2026, 53(4):53-58.
- ZHANG Xingting, CHEN Shumei, LIN Quan. Design and numerical simulation of injection mold for bluetooth earphone shell[J]. Henan Science and Technology, 2026, 53(4):53-58.
- [13] CHEN H L, HUANG P W, Huang Y S. Influence of draft angle design on surface texture-dimensional accuracy coupling in injection-molded commodity and engineering polymers with semi-crystalline and amorphous characteristics[J]. Polymers, 2025, 17(21). DOI:10.3390/polym17212892.
- [14] 袁开波,文根保. 隔分筒形体与注塑模结构方案最佳优化可行性分析与禁忌及对策[J]. 橡塑技术与装备, 2025, 51(10):61-64.
- YUAN Kaibo, WEN Genbao. Feasibility analysis, taboos, and countermeasures for the optimal optimization of the structure scheme of the partition cylinder and injection mold[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2025, 51(10):61-64.
- [15] 杨帆,张维合. 新能源汽车后视镜内支架大型精密注塑模设计[J]. 中国塑料, 2025, 39(9):129-133.
- YANG Fan, ZHANG Weihe. Design of large and precision injection mold for car rearview mirror substrate[J]. China Plastics, 2025, 39(9):129-133.
- [16] 许春龙,李耀辉. 注塑模具侧抽芯机构创新设计[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(3):142-143.
- XU Chunlong, LI Yaohui. Innovative design of injection mold and side core extraction mechanism[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2025, 54(3):142-143.
- [17] 贾秋霜,姜少燕,刘晓燕,等. 多材料兼容性汽车前灯灯座注塑模具集成设计[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9):155-163.
- JIA Qiushuang, JIANG Shaoyan, LIU Xiaoyan, et al. Integrated design of multi-material compatible injection mould for automotive headlight sockets[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9):155-163.
- [18] 夏雨,高云霄,王声杭,等. 基于CAE优化的汽车中屏罩热流道注塑模具设计[J]. 塑料工业, 2025, 53(2):63-70, 78.
- XIA Yu, GAO Yunxiao, WANG Shenghang, et al. Designs of hot runner injection moulds for car screen covers based on computer aided engineering optimization[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(2):63-70, 78.
- [19] 王浩,陈杰,王泽森,等. 车内杯座注塑成型模具设计及数值模拟[J]. 山东工业技术, 2025(1):48-53.
- WANG Hao, CHEN Jie, WANG Zesen, et al. Design and numerical simulation of injection molding mold for car cup holder[J]. Shandong Industrial Technology, 2025(1):48-53.
- [20] ZHAO M Y, TANG Z C. Finite element simulation of injection mold design integrating different structures of conformal cooling channels[J]. Processes, 2025, 13(1). DOI:10.3390/pr13010234.
- [21] 万琼,闫鸽,刘奥运,等. 基于Moldflow的90°大弧弯管注塑模具设计[J]. 模具技术, 2025(2):1-6.
- WAN Qiong, YAN Ge, LIU Aoyun, et al. Design of injection mould for 90° large arc bending pipe based on moldflow[J]. Die and Mould Technology, 2025(2):1-6.
- [22] 宋金亚. 两支架混合四腔的注塑模具设计[J]. 模具技术, 2025(2):36-42.
- SONG Jinya. Injection mold design of two-support combined four-cavity[J]. Die and Mould Technology, 2025(2):36-42.
- [23] 张利华. 同步密封壳内外壁圆环凹槽复合脱模机构注塑模设计[J]. 中国塑料, 2025, 39(2):94-99.
- ZHANG Lihua. Design of injection mold with composite demolding mechanism for inner and outer wall ring grooves of synchronous sealing shell[J]. China Plastics, 2025, 39(2):94-99.

(上接第147页)

- [14] 钟罗浩,匡唐清,赖家美,等. 成型工艺对短玻璃纤维增强聚丙烯注塑管件的壁厚分布及玻璃纤维取向的影响[J]. 中国塑料, 2021, 35(5):11-16.
- ZHONG Luohao, KUANG Tangqing, LAI Jiamei, et al. Effect of molding process on wall residual thickness distribution and glass-fiber orientation of short-glass-fiber-reinforced polypropylene molded pipes[J]. China Plastics, 2021, 35(5):11-16.
- [15] 丁加新,陈英龙,周华. 水辅成型浮动芯注射对制品残余壁厚的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5):937-945.
- DING Jiaxin, CHEN Yinglong, ZHOU Hua. Effect on residual wall thickness of parts with floating core injection of water-assisted injection molding[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(5):937-945.
- [16] KUANG T Q, FENG Q, LIU T, et al. Numerical simulation on the penetration behavior of the projectile during the water injection stage of water-projectile-assisted injection molding process[J]. Advances in Polymer Technology, 2020(9):1-15.
- [17] YANG J G, ZHOU X H. Numerical simulation on residual wall thickness of tubes with dimensional transitions and curved sections in water-assisted injection molding[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 128(3):1 987-1 994.
- [18] TSENG H C, FAVALORO A J. The use of informed isotropic constitutive equation to simulate anisotropic rheological behaviors in fiber suspensions[J]. Journal of Rheology, 2019, 63(2):263-274.
- [19] TSENG H C, CHANG R Y, HSU C H. Accurate predictions of orientation dependent modulus in short-fiber-reinforced composite with experimental validation[J]. Polymer Composites, 2018, 39(8): 2 847-2 859.