

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.019

大长径比薄壁零件偏芯优化及其模具设计

王根华¹, 卢云祥², 肖国华¹, 汪洋¹

(1. 浙江工商职业技术学院, 浙江宁波 315012; 2. 宁波华宝百顺模具制造有限公司, 浙江宁波 315600)

摘要: 针对某大长径比(30)薄壁塑件在注塑过程中易出现型芯偏移、成型质量难以控制等问题, 结合模流分析技术对型芯偏移行为进行了系统研究, 并提出了一种兼顾成型精度与生产效率的热流道模具创新设计方案。首先, 通过Moldflow模流分析软件对产品进行网格划分与浇口位置优化, 分析不同浇口位置对型芯偏移的影响。结果表明, 将浇口设置在型芯直径较大的A段区域(距离端面10 mm处), 可显著降低型芯偏移量。优化后, 型芯保压结束后的最终偏移量由0.059 9 mm下降至0.010 2 mm, 下降幅度达82.97%, 有效保证了产品壁厚均匀性与尺寸稳定性。在模具结构设计方面, 针对产品B、C段的外观要求, 采用大滑块一体化成型方案, 避免了分型线对外观的影响。针对133 mm的长抽芯需求, 创新性地设计了“齿条-齿轮-齿条”传动机构, 利用开模动作提供驱动力, 实现了滑块的平稳抽芯与限位。同时, 针对C段成型区域排气困难及脱模负压问题, 设计了排气镶针先抽芯机构, 有效解决了填充不良与脱模困难等成型缺陷。模具采用一模八腔热流道布局, 并对铍铜长镶件设置独立循环水冷却, 保障了成型效率与模具寿命。经实际生产验证, 该模具结构合理、运行稳定。研究成果可为同类大长径比精密塑件的模具开发提供理论依据与工程参考。

关键词: 大长径比; 型芯偏移; 模流分析; 热流道模具; 齿条-齿轮传动; 抽芯机构

中图分类号: TQ320.66+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0164-09

Optimization of core shift for thin-walled parts with large length-diameter ratio and its mould design

WANG Genhua¹, LU Yunxiang², XIAO Guohua¹, WANG Yang¹

(1. Zhejiang Business Technology Institute, Ningbo 315012, China; 2. Ningbo Huabaishun Mold Manufacturing Co., Ltd., Ningbo 315600, China)

Abstract: To address the challenges of core deflection and difficulty in the quality control of the formed product during injection moulding of thin-walled plastic parts with a large length-to-diameter ratio of 30, the core deflection behavior was systematically investigated using mould flow analysis technology, and an innovative mould design of the hot runner mould balancing moulding precision and production efficiency was proposed. Firstly, mesh generation and gate location optimization were conducted using Moldflow software to analyze the influence of different gate positions on core deflection. The results indicate that the gate placed in section A (10 mm from the end face), where the core diameter is larger, significantly reduces core deflection. After optimization, the final core deflection after the core-punching pressurization process is reduced from 0.059 9 mm to 0.010 2 mm, achieving a reduction rate of 82.97%, which effectively ensures uniform wall thickness and dimensional stability of the product. In terms of mould structure design, considering the appearance requirements of sections B and C, an integrated moulding scheme with large slider was adopted to avoid the impact of parting lines on the surface quality. To meet the long core-pulling distance of 133 mm, an innovative transmission mechanism with the rack to the gear to the rack again was designed, utilizing the mould opening action to provide driving force, achieving smooth core-pulling and limiting of the sliders. Additionally, to address the difficulties in venting and negative pressure during demoulding in section C, a pre-ejection mechanism for venting pins was designed, effectively solving filling defects and demoulding issues. The mould adopts an 8-cavity hot runner layout, with independent circulating water cooling for the beryllium copper long core inserts, ensuring moulding efficiency and mould life. Practical production verification shows that the mould

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y202351833), 浙江省教育科学规划课题(2025SCG254), 宁波市教育科学规划专项课题(2025YGHZJ13)

通信作者: 肖国华, 硕士, 副教授, 研究方向为塑料模具设计与制造

收稿日期: 2026-04-09

引用格式: 王根华, 卢云祥, 肖国华, 等. 大长径比薄壁零件偏芯优化及其模具设计[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(6): 164-172.

WANG Genhua, LU Yunxiang, XIAO Guohua, et al. Optimization of core shift for thin-walled parts with large length-diameter ratio and its mould design[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 164-172.

structure is reasonable and operates stably. The research results of this paper can provide theoretical basis and engineering reference for the mould development of similar high-precision plastic parts with large length-to-diameter ratios.

Keywords: large length-to-diameter ratio; core deflection; mould flow analysis; hot runner mould; rack-gear transmission; core-pulling mechanism

随着精密制造技术的不断发展,具有大长径比与薄壁特征的细长塑件在工业自动化、仪器仪表及精密传动等领域得到了广泛应用^[1-2]。此类零件因其特殊的几何结构,对成型精度、尺寸稳定性及力学性能提出了极高要求,从而对模具设计与注塑工艺构成显著挑战。

薄壁零件的成型难度主要源于熔体在受限型腔内的快速冷却与高流动阻力^[3]。随着壁厚减薄,熔体在充填过程中温降加剧,流动性急剧下降,极易引发充填不足、短射及内应力集中等问题^[4]。为此,薄壁注塑通常需要极高的注射压力和极短的充填时间,对模具结构的刚性与热平衡能力提出了更高要求^[5];对于具有深孔特征的塑件,型芯长径比指的是成型该深孔的型芯长度(L)与其直径(D)的比值,用 L/D 定量表述,是评估成型可行性的核心指标^[6-8]。工程实践表明,当型芯长径比大于5时,其在注射压力作用下的弯曲变形问题即需纳入重点关注范畴^[9]。对于长径比高达数十倍的细长型芯,注射过程中熔体压力分布不均极易引发型芯偏移,进而导致塑件壁厚偏差、尺寸超差,甚至引发模具损坏或生产中断。

针对薄壁高流长比塑件,目前研究可从工艺、设计及材料三方面优化。工艺上,变模温技术通过快速加热模具消除冷凝层,能显著降低充填压力,从而减小型芯偏移风险^[10]。设计上,优化浇口位置与数量(如采用多点平衡浇口)可实现平衡填充,有效控制型芯变形;增加芯轴支撑亦可提升模具刚度^[11]。材料上,选用高流动、低收缩树脂,如高熔体流动速率(MFR)的聚甲醛(POM),可从源头减轻充填时熔体对型芯的冲击。

基于上述背景,本文以某大长径比细长管件为研究对象,结合模流分析技术,系统研究其成型过程中型芯偏移行为,并提出一种兼顾成型精度与生产效率的热流道模具创新设计方案^[12-15]。研究成果旨在为同类大长径比精密塑件的模具开发提供理论依据与工程参考。

1 产品材料与结构分析

产品为某便携式电子探测针外壳结构件,结构、尺寸如图1所示,壁厚为1.0 mm且分布均匀,长

度为133 mm,整体为细长杆类零件,可划分为A、B、C三段区域。其中,A段内径6 mm,长度43 mm,外侧设有数个凸起圆环特征;B、C段总长90 mm,外径5 mm,B段末端上下各设有一个长4 mm、宽1 mm的腰形通孔,用以安装精密传感器元件。产品内部中空,需采用细长型芯成型,型芯长径比为30($L=90$ mm, $D=3$ mm),属于极易偏移结构。客户指定材料为POM共聚物,牌号M90-44(供应商Polyplastics)。作为一种综合性能优异的高结晶性工程塑料,POM具备高刚性、低吸湿性、出色的耐磨性与耐疲劳性,是成型精密细长管件的理想选择。其结晶度较高,虽导致成型收缩率较大,但收缩行为稳定且可预测,成型后尺寸受湿度环境影响极小,适用于成型长期尺寸稳定性要求较高的工业零部件。材料收缩率1.5%,尺寸精度要求达MT4级,因产品内部需要安装精密零件,要求B、C段的圆柱度误差需控制在0.06 mm以内,为此需要严格控制此处的型芯偏移量。此外,对B、C段的外观有要求,应尽量美观,不允许有飞边、气孔、缩水等缺陷。

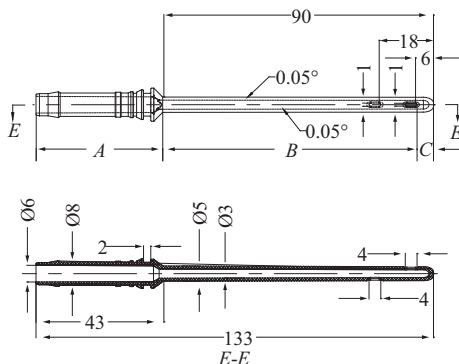


图1 产品结构及尺寸

Fig. 1 Product structure and size

2 型芯镶件偏移分析及优化

鉴于B、C段型芯长径比高达30,因此需要密切关注产品在注塑过程中细长型芯的偏移情况,并为设计提供参考。为保证分析数据准确性,此次仅针对产品的倒角及倒圆尺寸小于0.1 mm的细节特征实施优化。导入模流分析软件(Moldflow 2016)进行双层面网格划分,共计47 970个单元。接着,将单元格纵横比修复至4.0以内,以确保后续分析结果可靠,如图2所示。

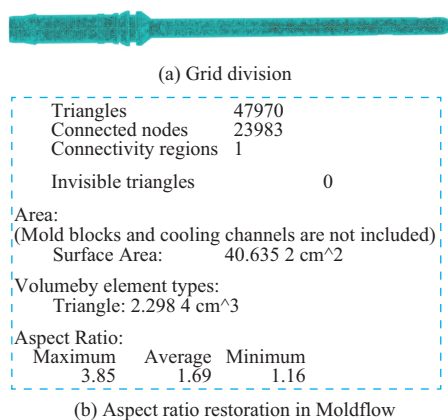


图2 产品网格划分及纵横比修复

Fig. 2 Grid division and aspect ratio restoration of the product

首先,开展产品最佳浇口位置探寻,如图3a所示,最佳进胶点位于产品中间部位,通过查看日志确定最近节点为N19374。采用最佳浇口位置开展成型窗口分析,确定此时的最优注射参数:指定材料为M90-44后勾选成型窗口分析序列,分析日志结果显示建议模具温度99.5℃,料温222.3℃,注射时间0.624 5 s,最大注射压力40.1 MPa。

导入热流道曲线,依要求指定各段属性后开展2D网格划分。划分时,确保热浇口处单元数不少于3个,以保障分析结果的准确性。设定浇口大小为1 mm,随后导入长型芯镶件,同样进行2D网格划分。进行纵横比修复至4.0以下后,连同流道、产品

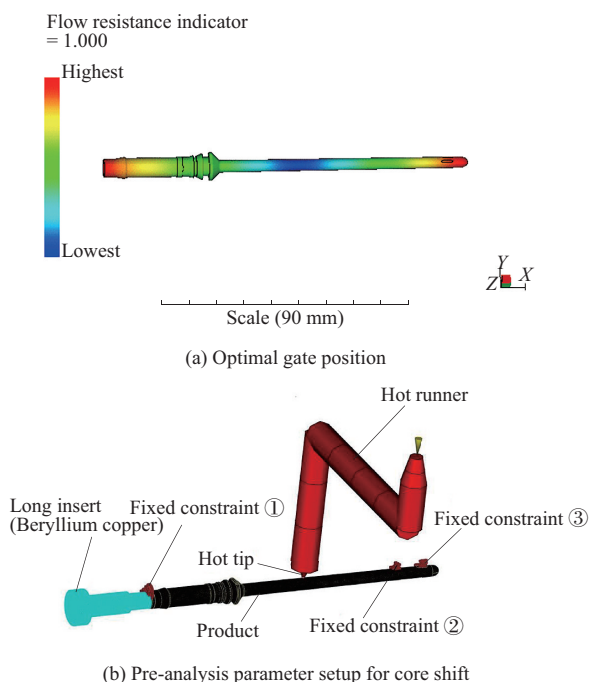


图3 最佳浇口位置及型芯偏移分析前参数设定

Fig. 3 Optimal gate position and pre-analysis parameter setup for core shift

一并转为3D网格划分,确保后续符合型芯偏移要求。转换后,产品与流道四面体网格单元数量为706 597个,镶件四面体网格单元数量为201 594个。由图1可知,产品B区域有两处腰形孔,需要设计两个成型镶件,此时,镶件将会与中间长型芯接触,为此,需要对长型芯施加固定约束使其满足实际工况。具体如下,对与产品A区域的端部面的四周节点施加固定约束①,对与上下两个小镶件接触的区域节点施加固定约束②和③。再者,考虑到产品中B、C段直径仅为3 mm,难以采用有效形式进行降温,为此,该型芯整体上选用铍铜材料,型芯头部采用杯头形式固定,铍铜弹性模量为 1.31×10^5 MPa,热导率为105 W/(m·K),与普通钢材相比可以更好地传递熔体热量,不足之处是材料更容易发生变形,选用前必须经过仿真验证,避免过大变形量导致产品尺寸精度超差。结合上述分析,在模流分析软件中设定好相关参数,如图3b所示。

按照最佳浇口位置推荐的参数进行型芯偏移分析,结果如图4所示,产品在充填时间为0.105 2 s时,最大偏移量0.137 4 mm(图4a)。保压结束后型芯有弹性复位,31.04 s后得出最终偏移量为0.059 9

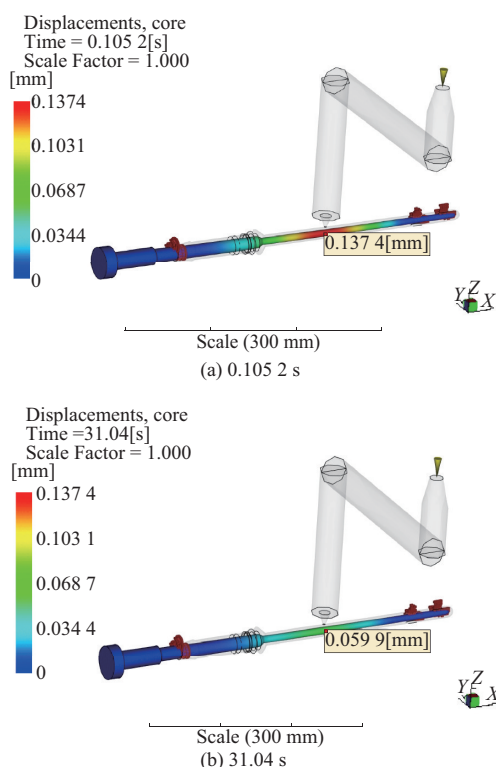


图4 选用最佳浇口位置时不同充填时间的型芯偏移量

Fig. 4 Core shift value at different filling times with optimal gate position

mm(图4b)。已经非常接近要求极限0.06 mm,为了保障注塑过程稳定性,需要结合具体生产要求对注塑工艺进一步优化调整。

经分析,型芯发生偏移的主要原因在于浇口位置选择不当,注射压力直接作用在细长型芯的中部位置,造成偏移量过大,为此,尝试优化浇口位置,如若采用C段端面轴向进料,可以有效改善型芯的变形,但是此时产品的成型将需要极大的注射压力,且填充不平衡,产品后续翘曲风险加大。再者,产品为细长杆,极易出现短射现象。如若采用热流道则需要设计为热流道转冷流道的进胶形式,增大设计难度且冷浇口会对C段的表面产生一定的影响。浇口放在A段区域也会导致充填的不均衡,注射压力提升,甚至出现欠注等问题,但可以直接采用热流道进胶,考虑到A段处型芯较粗壮,还可以进一步降低型芯的偏移量。综合考虑,A段进胶为最优选择。经多次验证,最终将注射位置放在A段区域距离端口10 mm处,此处的型芯直径6 mm,是B段的2倍且接近型芯的固定约束端,将有助于型芯的偏移优化。选定该浇口位置后重新做成型窗口分析,得出注射参数为:模具温度105℃,料温224.4℃,注射时间1.306 s,最大注射压力77.52 MPa。和之前相比,发现模温、料温与注射时间及注射压力均有增加,符合之前设想且在工艺范围内。其余参数沿用之前设置,再次进行型芯偏移分析,结果如图5所示。产品在填充1.146 s时,B区域最大偏移量为0.0278 mm(图5a),保压结束后偏移量为0.0102 mm(图5b),与之前相比偏移量减小了82.97%,且远小于规定值,保证了产品注塑的稳定性,并且将浇口开设在A段可以完全保证B、C段的外观质量,一举两得。

3 模具创新设计

3.1 产品分型方案设计

结合产品特点,产生如下两种分型方案,如图6所示。

方案1:在产品中部最大轮廓处分型,腰形孔处采用镶件成型。此方案优势在于上下模仁加工便捷,产品成型时排气性能良好;弊端为POM材料流动性佳,产品外观或留明显夹线,若模具加工与修配不当,极易出现披风,对模具加工质量和模配要求苛刻。此外,因产品上下模各占一半,若先抽芯后开模,难以确保产品留于动模侧;即便设计成让

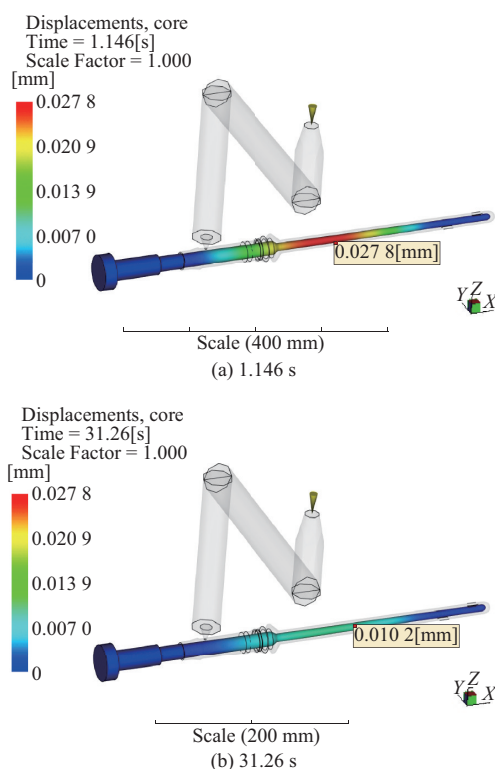


图5 优化浇口位置后不同充填时间的型芯偏移量

Fig. 5 Core shift value at different filling times after gate location optimization

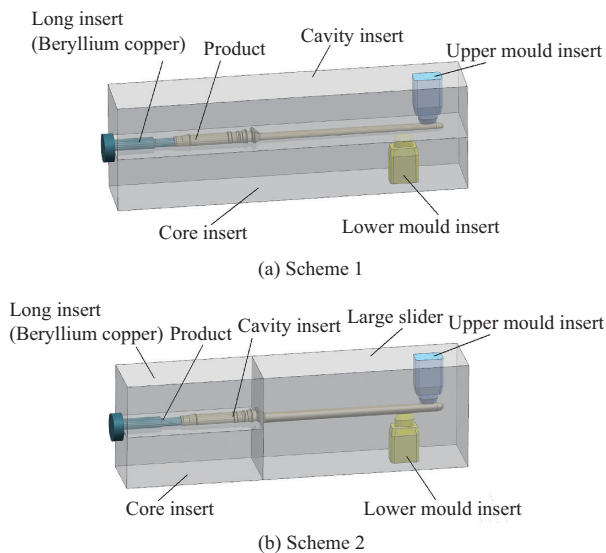


图6 产品分型方案

Fig. 6 Product parting layout scheme

其留在动模,为保证顶出平衡,B、C段势必要增设顶出元件,到时会进一步对B、C段外观质量产生影响,若先开模后抽芯,则需考虑抽芯驱动力来源,增加设计难度。

方案2:产品B、C段采用大滑块一体化成型,大滑块中部直接加工出型腔用来成型产品外观面,A

段继续采用中间最大轮廓处分型。此方案优势在于可确保产品B、C部位无夹线,进而获得较好的外观质量;且设计成动模滑块后,产品可留于动模一侧。分型面打开时,大滑块右移,B、C段外观区域先脱模,顶出元件可直接作用于A段区域,将产品顶出。其缺点为滑块中间直径5 mm成型特征加工难度大,装配时需确保滑块与上下模位置精度,且C段区域成型时无法排气,易出现欠注、烧焦等缺陷。这也是本模具设计的一个难点。经综合考量,本设计采用第二种方案,且征得客户同意后,将B、C段内外侧均减胶拔模 0.05° (图1)。

3.2 模具型腔布局及C段排气设计

鉴于产品系高压薄壁的长流动塑件,为保证产品质量及生产效率,应客户要求,模具采用一模八腔布局。浇注系统采用热流道,用于改善注塑所需压力,分流道板布设8个开放式热射嘴保障浇注平衡性。产品间距设为36 mm,确保散热效果,每四个产品编为一组,共计2组,组间距离为111 mm。因长镶件采用铍铜材质,特设置循环水对每个铍铜镶件底部进行冷却。为提升模具寿命,模仁材料选用瑞典一胜百公司生产的S136H钢材。鉴于产品成型时排气不足,本设计增设排气镶针,镶针头部直径为0.5 mm,排气间隙设为0.01~0.02 mm以防止溢料。镶针兼具三重作用:一是便于产品放电加工;二是注塑时C段区域利用间隙排气;三是滑块后退时可先提前脱离塑件,便于快速引气,防止C段区域内部形成低气压,导致产品脱模困难,此为本模具创新设计之一。此外,考虑大滑块与模仁配合精度,特开设导向槽,导向槽与滑块压条共同作用,确保开合模时滑块的位置精准。同时,模仁上加装4支锥形精定位件,模架上增设2对交错条形精定位件,进一步保障开合模时模仁的位置精度,如图7所示。

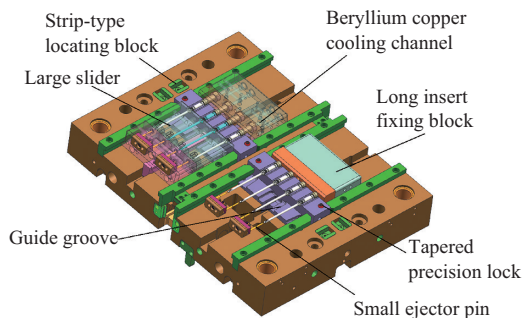


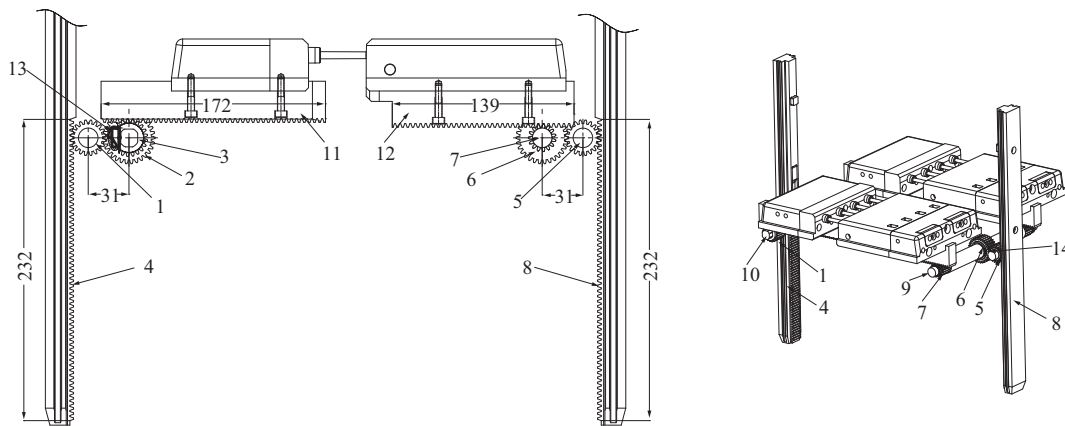
图7 模具型腔布局及C段排气设计

Fig. 7 Mould cavity arrangement and venting design at section C

3.3 “齿条-齿轮-齿条”长抽芯机构设计

产品内部抽芯距离为133 mm,考虑安全余量后,最终确定为140 mm。大滑块需成型B、C段外圆柱面,且需抽芯脱模,故此处抽芯距离设定为100 mm。通常,动模滑块采用斜导柱驱动,对于尺寸较大、需较大抽拔力的滑块,则采用油缸驱动。鉴于本例抽芯距离较大,若采用斜导柱,则斜导柱过长,导致强度不足;若采用油缸抽芯,则需额外增加两个油缸,进而提高模具成本并增大模具体积,且油缸启动与闭合时震动较大,不适用于本产品精密模具的成型。为此,本产品创新性地采用“齿条-齿轮-齿条”传动机构,利用模具开合模动作提供驱动力,带动齿轮转动以驱动滑块开合,整体结构小巧紧凑。此外,齿轮传动机构具备较精确的传动比,可确保注塑过程中滑块位置精度。齿轮传动设计时,需关注模数(m)、传动比(i)和齿数(Z)三个方面。模数选择方面,根据实践经验,塑料注射模具的齿轮模数通常优先选取1、1.25、1.5、2。模数选择越大,齿牙越粗壮,有着较好的强度和刚性,相同的齿数意味着齿轮具有更大的尺寸。反之模数选择越小,则齿牙越薄弱,抗冲击能力越弱,相同的齿数下齿轮尺寸较小,可节约安装空间。综合考虑本产品动模板的大小及抽芯距离,将齿轮模数选定为1.25。传动比选择方面,本模具动力来源于开模动作,传动方式为“齿条-齿轮-齿条”,为减小齿条长度,缩短开模距离,提高生产效率,齿轮传动比初步设计为1.5。齿数选择方面,当传动比与模数确定后,还需结合模具整体布局情况确定各齿轮的分度圆直径(d),依据计算公式 $Z=d/m$ 得出齿数。此外,为避免因频繁接触、摩擦、撞击而导致的疲劳失效集中在少数齿轮上,相互啮合的齿轮齿数应互为质数。当齿轮中心距一定时,齿数越多,传动越平稳,噪声越低;但齿数过多会导致模数减小,齿厚变薄,弯曲强度降低。基于以上分析,本模具设计的“齿条-齿轮-齿条”长抽芯机构如图8所示。

其运动过程如下:以左侧成型产品内部直径3 mm孔的抽芯滑块运动为例。齿条4固定于定模,并与齿轮1啮合,齿轮1与齿轮3啮合,齿轮3和齿轮2均安装在轴10上,齿轮2与齿条11啮合。齿条4带动齿轮1转动时,齿轮1带动齿轮3转动,进而齿轮2转动,齿轮2再带动齿条11左右运动。其中成型3 mm孔的抽芯滑块通过螺丝锁紧于齿条11上,



1, 5, 9-Gear shaft; 2, 3, 6, 7-Gear; 4, 8, 11, 12-Rack; 10-Shaft; 13, 14-Key

图8 “齿条-齿轮-齿条”长抽芯机构

Fig. 8 "Rack-gear-rack" long core-pulling system

齿轮3由键13与轴10相连,齿轮2与轴10的采用方形型面连接。当大滑块抽芯距为140 mm时,齿轮2转 n 圈, $n=140/\pi \cdot m_2 \cdot Z_2$,此时齿轮3也转 n 圈,其展开后长度 $L_3=n \cdot \pi \cdot m_3 \cdot Z_3$,即210 mm。因为齿轮1只起到改变运动方向作用,故此处 L_3 即为齿条4所需长度。为确保运行过程中齿轮齿条不脱离,将齿条

11长度设为172 mm,齿条4长度设为232 mm。同理可推算右侧成型B、C段外观面情况,大滑块抽芯距离为100 mm时,齿条8的距离为200 mm,为确保运行过程中齿轮齿条不脱离,齿条12长度设为139 mm,此时齿条8长度为232 mm。具体参数见表1。

表1 “齿条-齿轮-齿条”长抽芯机构零件名称及参数

Tab. 1 Components and parameters of the "rack-gear-rack" long core-pulling system

No.	Part name	Parameters	No.	Part name	Parameters
1	Gear shaft 1	$m_1=1.25, Z_1=20$	8	Rack 8	$m_8=1.25, L_8=232$ mm
2	Gear 2	$m_2=1.25, Z_2=21$	9	Gear shaft 9	$m_9=1.25, L_9=262$ mm
3	Gear 3	$m_3=1.25, Z_3=30$	10	Shaft 10	$L_{10}=262$ mm
4	Rack 4	$m_4=1.25, L_4=232$ mm	11	Rack 11	$m_{11}=1.25, L_{11}=172$ mm
5	Gear shaft 5	$m_5=1.25, Z_5=20$	12	Rack 12	$m_{12}=1.25, L_{12}=139$ mm
6	Gear 6	$m_6=1.25, Z_6=30$	13	Key 13	7 mm×4 mm×16 mm
7	Gear 7	$m_7=1.25, Z_7=15$	14	Key 14	7 mm×4 mm×16 mm

Notes: m is module; Z is number of teeth; L is length.

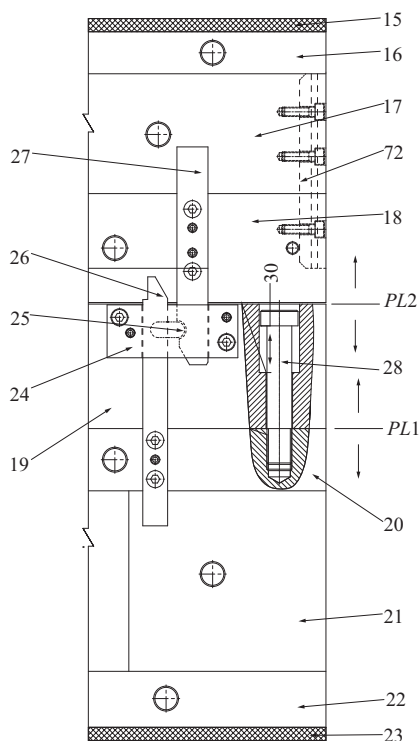
3.4 模具定距分型机构设计

产品B段处设有两处腰形通孔,一上一下排布,设计采用镶件碰穿形式。为此,需在模具左右大滑块抽芯前对下镶件进行先脱模处理。在动模侧增设一个分型面,并确保其在模具开模时优先开启,故需设定开模顺序。本模具定距分型机构分为内外两部分(如图9所示),内部由4根定距拉杆螺丝28控制,均匀分布于模具内部,拉杆螺丝固定于承板20上,限位距离为30 mm,下模镶件通过螺钉安装在承板20上,并用销钉定位。外部则由盖板24、滑动销25、插杆26、拉杆27构成定距分型机构进行控制。如图9所示。模具开模时,在外部分型机构作用下,滑动销25与拉杆27配合,锁紧模具动模板与定模板。在注塑机带动下,PL1将首先开启,确保下模镶件先脱离塑件。当距离达到30 mm时,插杆26

亦向下移动30 mm,解除对滑动销25的限制,滑动销25在拉杆27作用下向左滑动,解除模具动模板与定模板的锁紧,定距拉杆螺丝28发挥作用,拉动动模板继续下移,此时PL2面开始打开。

3.5 排气镶针的先抽芯机构设计

PL2分型面打开时,要求小镶针先脱离产品,以起到引气(在模具开模或产品脱模时,主动导入空气,以防止型腔内形成真空负压)的作用,为后续两个大滑块的顺利脱模做准备,为实现该功能,进行如下设计。如图10所示,PL2面打开时,定模板18与滑块74分离,小镶针36及镶针固定板35在弹簧33的作用下后移3 mm,便于小镶针脱离产品引气。与此同时,由于拉动滑块的力量大于齿条滑动的力量,因此,齿条4和8首先分别在齿轮1和5的作用下,沿着齿条导向板72垂直向下移动,由于限位块



15-Heat insulation plate; 16-Top clamp plate; 17-Hot runner plate;
18-Fixed mould plate; 19-Moving mould plate; 20-Support plate;
21-Spacer block; 22-Ejector housing; 23-Heat insulation plate;
24-Cover plate; 25-Sliding pin; 26-Insert rod; 27-Pull rod;
28-Limit pull rod; 72-Rack guide plate; PL1, PL2-Parting line;

1 to 14 same as Fig. 8

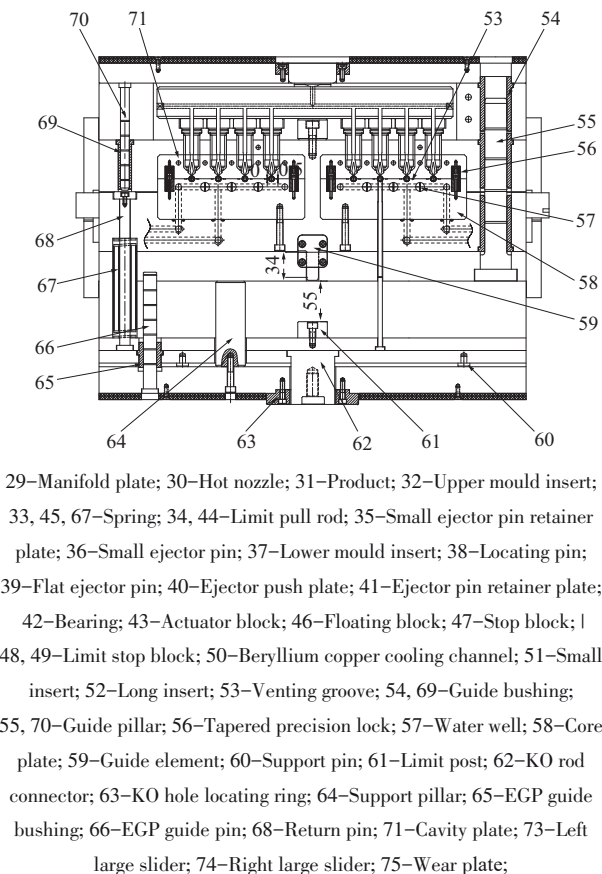
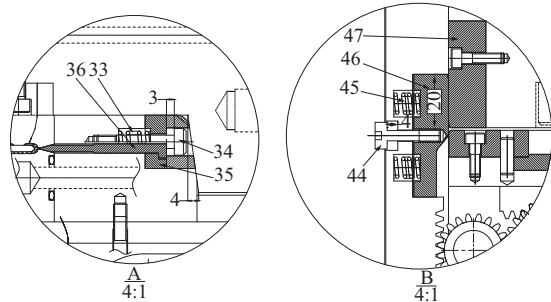
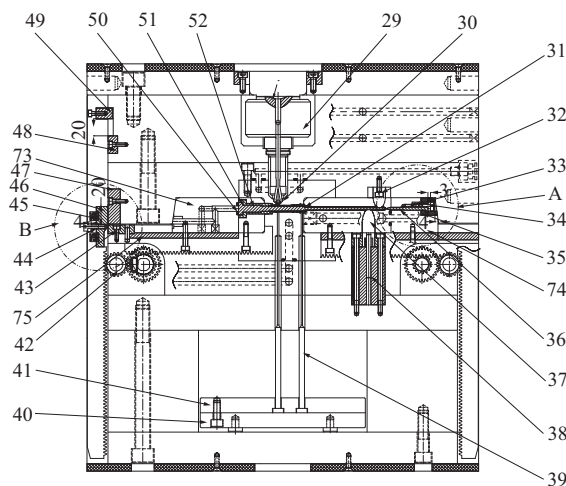
图9 内外定距分型机构

Fig. 9 Internal and external parting limit device

48和49的作用,齿条不会立即拉动左右大滑块73和74进行抽芯动作。但上模镶件安装在定模板上,这就保证了上模镶件的先抽芯。当PL2面打开20 mm后,限位块48和49接触,同时浮块46在弹簧45作用下弹出,卡住挡块47。此时,随着PL2面继续开模,齿条4和8分别拉动滑块73和74向两侧移动,完成抽芯脱模动作。由于小镶针在滑块动作前已经脱离了产品,外部气体可以顺利进入型腔,因而可以解决脱模过程中型腔负压造成的脱模困难问题,这是本设计的一个创新。

3.6 其他细节设计

为确保热流道在安装与拆卸过程中的位置精度,并有效保护热流道,本设计除采用常规导柱导套外,另在热流道板17与动模板18间增设四支直径为8 mm的导柱70及导套69;产品PL1面分型时,为确保动模板19与承板20间的位置精度,增设导向元件59,以保障开合复位精度;增设四支顶针板导柱导套(EGP)保证扁顶杆顶出顺畅性;因型腔采



The rest are the same as Fig. 8 and Fig. 9

图10 模具装配图

Fig. 10 Mold assembly drawing

用一模八腔设计,分两组布局,为确保产品A段区域成型排气顺畅,结合POM材料流动性,于各产品分型面中部开设深度为0.005 mm的排气通道,并通过深度0.5 mm,宽度3.0 mm的排气槽53排出;除复位杆68与复位弹簧67外,模具采用强制拉回机构,利用KO连接柱62与注塑机顶棍通过M16螺牙连接,防止合模时顶针板复位不到位与滑块碰撞。鉴于POM材料成型温度较高,本模具采用循环水路与水井结合的冷却方式,其中单独设置一条水路对热流道进行冷却,开设铍铜冷却水路50对成型长镶件尾部进行冷却,开设直径为12 mm水井57对B、C段区域进行冷却,确保成型质量并缩短成型周期。

3.7 模具运动原理

注塑保压:熔融POM材料经主热流道后,进入分流板29内分流,由热射嘴30注入型腔后进行保压与冷却,直至产品达顶出温度。

开模顶出:在注塑机及内外定距分型机构作用下,PL1面先打开,下模镶件37脱离产品;随后PL2面打开,此时上模镶件32开始上部腰形孔的脱模,同时小镶针36也开始脱离产品,齿条下移20 mm后,上模镶件完全脱离出产品,同时小镶针后移3 mm,产品C段区域引气完成;继续开模,齿条4和8拉动左右滑块完成抽芯动作,随后产品由扁顶杆顶出。

合模复位:在弹簧67及强制拉回机构作用下,扁顶针复位。此时,因驱动左右滑块阻力大于PL1面的合模阻力,故PL1面先复位。由于齿条被浮块46和限位块47卡住,齿条将拨动齿轮旋转并带动左右滑块73和74复位,此时PL2面开始复位,当复位至拨块43与浮块46接触时,拨块挤压浮块内缩完成浮块与限位块47的限位解除,随后在齿轮作用下推动齿条复位,与此同时,动模板18作用于滑块74上,先压缩弹簧33进行排气镶件复位,然后整个滑块74再复位。插杆26推动滑动销25进入拉杆27内,完成动定模的锁紧,模具进入下个成型周期。

4 结论

(1)针对大长径比薄壁零件,运用Moldflow软件进行浇口及注塑工艺参数优化,得出最优成型工艺参数为模温105℃,料温224.4℃,注射时间1.306 s,最大注射压力77.52 MPa。对成型镶件进行型芯偏移分析,结果表明,与最佳浇口位置进胶相比,从A段区域距离断面10 mm处进胶,型芯的偏移

量优化83%。

(2)对产品的分型方案进行分析和优化,采用大滑块对产品B、C段外观面一体成型,既保证产品留在动模一侧又杜绝产品外观夹线的产生,保障了外观质量。

(3)创新性的设计了“齿条-齿轮-齿条”驱动滑块运动的脱模机构,同时对C段区域创新设计了排气镶针先抽芯机构,避免了填充时排气不良和脱模时产生负压等问题。设计了内外相配合的定距分型机构和开模顺序机构,保证了开合模顺序。

参考文献

- [1] 余佳欣,李光明,郑丽璇,等.基于多域正交空间协同演进的薄壁注塑件翘曲优化研究[J].精密成形工程,2023,15(2):151-159.
YU Jiaxin, LI Guangming, ZHENG Lixuan, et al. Warpage optimization of thin-walled injection molded part based on multi-domain orthogonal space co-evolution[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(2):151-159.
- [2] 袁甘林,辛勇.基于试验设计的圆柱薄壁塑件注塑成型收缩率预测[J].中国塑料,2014,28(6):82-87.
YUAN Ganlin, XIN Yong. Shrinkage prediction of cylindrical thin-walled parts in plastic injection molding based on design of experiments[J]. China Plastics, 2014, 28(6):82-87.
- [3] 张维合,冯婧,赵利平,等.汽车左前门板热流道大型薄壁注塑模设计[J].中国塑料,2024,38(12):143-147.
ZHANG Weihe, FENG Jing, ZHAO Liping, et al. Design of large and thin-walled injection mold with hot runner for left-front door panel of vehicles[J]. China Plastics, 2024, 38(12):143-147.
- [4] 黄岸,王齐龙,周洪福,等.基于Moldex3d的薄壁复杂零件的注塑优化[J].中国塑料,2023,37(6):59-65.
HUANG An, WANG Qilong, ZHOU Hongfu, et al. Injection molding optimization of thin-walled complex parts based on Moldex3d[J]. China Plastics, 2023, 37(6):59-65.
- [5] 覃岭,张继祥,冯伟,等.基于灰色关联-田口法的汽车后保险杠注塑工艺参数多目标优化[J].塑料,2022,51(6):72-78.
QIN Ling, ZHANG Jixiang, FENG Wei, et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for automotive rear bumper based on grey relational-Taguchi method[J]. Plastics, 2022, 51(6):72-78.
- [6] 郑悦,王权,吴飞飞,等.注塑模具型芯偏移优化研究现状及发展趋势[J].塑料工业,2023,51(6):16-23,29.
ZHENG Yue, WANG Quan, WU Feifei, et al. Research status and development trend of core shift optimization for injection mould[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(6):16-23, 29.
- [7] CHENG F J, CHANG C H, WEN C H, et al. Out-of-mold sensor-based process parameter optimization and adaptive process quality control for hot runner thin-walled injection-molded parts[J]. Polymers, 2024, 16(8). DOI:10.3390/polym16081057.

- [8] 苏锡焕. 基于Moldflow的模具镶件偏移CAE优化分析[J]. 模具技术, 2020(3):7-11, 49.
SU Xihuan. CAE optimization analysis of mould insert offset based on Moldflow[J]. Die and Mould Technology, 2020(3):7-11, 49.
- [9] 黄永程, 张彦霞. 基于Plackett-Burman的薄壁塑件注塑压缩成型多目标工艺参数优化[J]. 合成树脂及塑料, 2023, 40(4):46-49, 64.
HUANG Yongcheng, ZHANG Yanxia. Multi-objective process parameter optimization for injection compression molding of thin-walled plastic parts based on Plackett-Burman[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2023, 40(4):46-49, 64.
- [10] ROTH B, FRANK R, KLEFFEL T, et al. High-precision thin wall bipolar plates for fuel cell applications via injection compression molding with dynamic mold temperature control[J]. Polymers, 2022, 14(14). DOI:10.3390/polym14142799.
- [11] 陈飒飒, 何明光, 陶四平. 基于MoldFlow的型芯偏移分析及优化设计[J]. 模具工业, 2020, 46(1):22-25.
CHEN Sasa, HE Mingguang, TAO Siping. Analysis on core offset based on Moldflow and the optimization design[J]. Die & Mould Industry, 2020, 46(1):22-25.
- [12] 闫丽静, 张维合, 邓成林. 汽车A柱上护板大型复杂内侧抽芯注塑模设计[J]. 中国塑料, 2023, 37(7):110-114.
YAN Lijing, ZHANG Weihe, DENG Chenglin. Design of large injection mold with complex inner core pulling for door cladding under A-pillar of car[J]. China Plastics, 2023, 37(7):110-114.
- [13] 程越, 左桂兰. 基于CAE优化的新能源汽车空调风口下支板热流道模具设计[J]. 中国塑料, 2025, 39(6):110-117.
CHENG Yue, ZUO Guilan. Hot runner mould design for air-conditioning diversion exportation lower board of new energy vehicle based on CAE optimization[J]. China Plastics, 2025, 39(6):110-117.
- [14] 田科. 玻纤增强尼龙复合材料车门拉手座热流道模具设计[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6):47-54.
TIAN Ke. Design of hot runner mould for door handle seat with glass fiber reinforced nylon composite[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6):47-54.
- [15] 王晓华, 张彬, 肖国华. 手术LED小无影灯灯座注射模设计[J]. 模具工业, 2026, 52(1):51-55.
WANG Xiaohua, ZHANG Bin, XIAO Guohua. Design of injection mould for surgical LED small shadowless lamp lampholder[J]. Die & Mould Industry, 2026, 52(1):51-55.

(上接第163页)

- [13] 周福强. 压印法蓝宝石纳米图形衬底的制备及评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHOU Fuqiang. Preparation and evaluation of the nano-patterned sapphire substrates fabricated by imprint method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [14] 贺建芸, 吴国栋, 付俊杰, 等. 紫外光固化微压印工艺对有序微结构阵列形貌的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(11):74-78.
HE Jianyun, WU Guodong, FU Junjie, et al. Effect of UV curing microimprinting process on morphology of ordered microstructure arrays[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(11):74-78.
- [15] 孙文婧, 李可, 李凤娇, 等. 紫外压印过程中的微结构模板脱模分析[J]. 塑料, 2023, 52(2):151-155, 186.
SUN Wenjing, LI Ke, LI Fengjiao, et al. Template release mechanism of ultraviolet imprint lithograph[J]. Plastics, 2023, 52(2):151-155, 186.
- [16] JIANG W T, DING Y C, LIU H Z, et al. Two-Step curing method for demoulding in UV nanoimprint lithography[J]. Microelectronic Engineering, 2008, 85(2):458-464.
- [17] SHIRAI M, UEMURA K, SHIMOMUKAI K, et al. Effect of elastic modulus of UV cured resist on demolding force[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2016, 34(6). DOI:10.1116/1.4964511.
- [18] LI M J, CHEN Y L, LUO W X, et al. Nanoindentation behavior of UV-curable resist and its correlation with patterning defect in nanoimprint lithography[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2020, 30(6). DOI:10.1088/1361-6439/ab87ed.
- [19] ZHENG X, WANG Q, DU W Q. Effects of imprinting pressure on the damage of flexible composite mould and pattern quality during UV nanoimprinting[J]. Micromachines, 2019, 10(10). DOI:10.3390/mi10100706.
- [20] CHEN S L, WANG X J, WANG S X, et al. KH-570 Silane modification for enhanced graphene/silver nanocomposite brush plating: Process optimization and Tribo-corrosion properties[J]. FlatChem, 2025, 54. DOI:10.1016/j.flatc.2025.100957.
- [21] YANG Y Y, HU K, ZHANG T L, et al. Hydrophobic enhancement of alkali-activated artificial aggregates through KH-570 silane surface grafting: A combined experimental and molecular dynamics study[J]. Construction and Building Materials, 2026, 520. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2026.145934.
- [22] THEODORO T R, GODOY W M, LOTUFO N M, et al. Experimental and modeling of sulfonation of styrene-based resins cross-linked with DVB and TMPTA[J]. Chemical Engineering & Technology, 2025, 48(6). DOI:10.1002/ceat.70037.
- [23] JEONG O C, KONISHI S. Controlling the size of replicable polydimethylsiloxane (PDMS) molds/stamps using a stepwise thermal shrinkage process[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(8):2286-2289.