

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.020

多材料兼容性汽车前灯灯座注塑模具集成设计

贾秋霜¹, 姜少燕¹, 刘晓燕¹, 孙建泉², 裴建勇²

(1. 潍坊职业学院, 山东潍坊 262737; 2. 潍坊永全模具科技有限公司, 山东潍坊 261057)

摘要: 针对汽车前照灯灯座多材料注塑成型的核芯难题, 提出一种集成式模具创新设计方案, 实现聚碳酸酯(PC)与滑石粉改性聚丙烯(PP+TD40)的高效兼容生产。通过构建多级浇注系统参数化模型, 采用模块化流道镶件切换技术: PC成型使用梯形截面冷流道与扇形浇口(宽5 mm, 厚1.5 mm), PP+TD40成型采用圆形截面潜伏式浇口($\Phi 1.2$ mm), 解决了材料流变特性差异导致的熔接痕与缩痕缺陷问题。创新性开发动态收缩率补偿方法, 针对关键装配特征(如密封槽、灯头孔)设计可更换镶件组, 通过芯部镶件高度差(0.1~0.2 mm)补偿材料收缩率差异(PC 0.5%~0.7%, PP+TD40 0.7%~0.9%), 将加工误差控制在 ± 0.02 mm。提出梯度冷却系统, 结合垂直水管与隔片式水井布局, 通过共轭传热优化实现模温分区控制(PC模温100~120 °C, PP模温60~80 °C), 模温均匀性提升至92%, 有效抑制厚薄突变区域的非均匀收缩。设计差异化顶出机构, PC采用多顶针均布方案, PP+TD40采用大面积蜂窝顶板, 结合脱模斜度 $\geq 2.5^\circ$ 及顶出速度分级控制(PC顶出速度 ≤ 50 mm/s, PP顶出速度 ≤ 30 mm/s), 顶出平衡度达0.93。侧抽芯机构采用表面氮化处理(洛氏硬度62~64)与耐磨块设计, 抵御矿物填充磨损。量产验证表明, 模具寿命突破30万模次, 产品合格率提升至96.7%。

关键词: 汽车前灯灯座; 多材料注塑成型; 集成式模具设计; 收缩率动态补偿; 梯度冷却系统; 顶出机构优化

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0155-09

Integrated design of multi-material compatible injection mould for automotive headlight sockets

JIA Qiushuang¹, JIANG Shaoyan¹, LIU Xiaoyan¹, SUN Jianquan², PEI Jianyong²

(1. Weifang Vocational College, Weifang 262737, China; 2. Weifang Yongquan Mold Technology Co., Ltd., Weifang 261057, China)

Abstract : To address the core challenges of multi-material injection molding for automotive headlight sockets, an integrated mold design scheme was developed to achieve efficient compatibility between polycarbonate (PC) and talc-modified polypropylene (PP+TD40). A parametric model of a multi-level gating system was established, employing modular runner inserts: trapezoidal-section cold runners and fan gates (5 mm width, 1.5 mm thickness) for PC, and circular-section submarine gates ($\Phi 1.2$ mm) for PP+TD40. This eliminated weld lines and shrinkage defects caused by rheological differences. A dynamic shrinkage compensation method was innovatively implemented via replaceable insert sets (e.g., core inserts with 0.1–0.2 mm height differential) for critical features (sealing grooves, lamp holes), compensating for shrinkage variances (0.5%–0.7% of PC, 0.7%–0.9% of PP+TD40) and controlling machining errors within ± 0.02 mm. A gradient cooling system with vertical channels and baffled wells was designed, enabling zonal temperature control (100–120 °C of PC, 60–80 °C of PP) through conjugate heat transfer optimization. This improved mould temperature uniformity to 92%, suppressing non-uniform shrinkage in thickness-transition zones. Differentiated ejection mechanisms were deployed: uniformly distributed ejector pins for PC and large-area honeycomb plates for PP+TD40, combined with demolding slope $\geq 2.5^\circ$ and graded control of ejection speed (PC ejection speed ≤ 50 mm/s, PP ejection speed ≤ 30 mm/s), for achieving ejection balance of 0.93. Nitride-treated surfaces (HRC 62–64) and wear-resistant blocks to withstand mineral abrasion were utilized in side cores. Production verification confirmed a mold lifespan exceeding 300 000 cycles and a qualification rate of 96.7%.

Keywords : automotive headlight socket ; multi-material injection molding ; integrated mould design ; dynamic compensation for shrinkage rate ; gradient cooling system ; ejection mechanism optimization

通信作者: 贾秋霜, 副教授/高级工程师, 主要从事模具设计与制造技术研究与教学工作

收稿日期: 2025-07-25

引用格式: 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.

随着汽车轻量化与造型美学要求的不断提升,车灯组件的精密化、集成化发展趋势对注塑成型技术提出了更高要求。前灯灯座作为承载光学组件与连接车身的结构件,其成型质量直接影响车灯总成的光学性能与密封可靠性。前灯灯座常用塑料包括:聚苯硫醚(PPS)、聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)、30%玻纤增强尼龙66(PA66-GF30)、耐候改性40%滑石粉填充聚丙烯(PP+TD40)、光学级聚碳酸酯(PC)。使用特点为:PPS耐热性优异($>220\text{ }^{\circ}\text{C}$),尺寸稳定,用于近光源区域^[1-3];PBT耐化学腐蚀、电绝缘性好、成本适中^[4-6];PA66-GF30高刚性、抗冲击,用于结构承重^[7-9];PP+TD40低密度、低成本、耐湿热老化、耐翘曲性好,在非高温区域应用广泛^[10-12];PC高透光、抗冲击^[13-16]。由于汽车主机厂家对同款但不同级前灯灯座有着不同用材要求,因而从生产成本要求出发,对前灯灯座的模具开发要求是一副模具能实现多种材料的注塑成型。然而,在复杂薄壁、多向倒扣及高尺寸精度的技术指标约束下,传统注塑模具面临多物理场耦合作用下的系统性技术挑战。

(1)结构设计方面,浇注系统热力学耦合失衡导致工艺窗口狭窄^[16-17]。单点浇口难以适配PC与PP+TD40等材料的流变特性差异,熔体前锋温度梯度引发熔接痕/缩痕等缺陷;分型面几何约束与成型结构复杂度形成矛盾空间,0.05 mm级灯头孔位精度与拔模斜度存在工艺冲突,传统经验设计易导致分型面飞边及定位误差累积。

(2)热力学控制方面,冷却系统相变传热效率不足^[12-15]。厚薄突变区域因热传导各向异性产生非均匀收缩,实测显示壁厚4 mm区域与2 mm区域的温差可达 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,导致尺寸超差率高达8.2%;热流道末端区域存在温度控制盲区,熔体黏度波动引发流延缺陷。

(3)机构可靠性层面,多向运动系统存在动力学干涉风险^[18-21]。四向抽芯机构中,滑块与斜顶的时序协同偏差超过0.5 s即会导致抽芯角度偏移;顶出系统拓扑布局与制品黏弹性恢复力的动态匹配不足,实验数据显示传统顶杆布局的应力集中系数达2.3,导致顶出变形率超限。

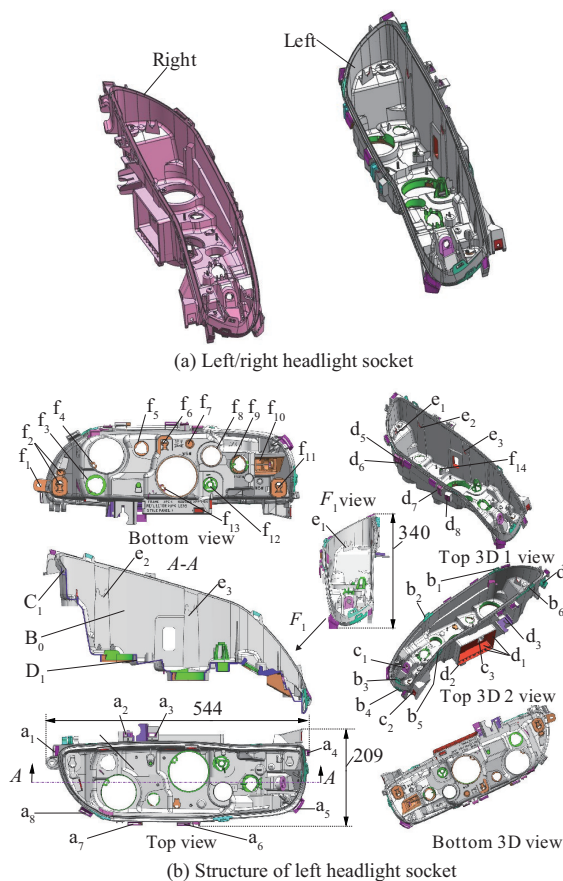
基于某汽车前照灯灯座生产材料为PC和PP+TD40的开发需求,笔者提出集成式模具创新设计方案。通过构建多级浇注系统参数化模型,实现PC

与PP+TD40材料的双模兼容成型;创新采用参数化分型面设计方法,将加工误差控制在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 以内;开发基于共轭传热的梯度冷却系统,使模温均匀性提升至92%;同时建立顶出机构多目标优化算法,成功将顶出平衡度提高至0.93。经量产验证,模具使用寿命突破30万模次,产品合格率提升至96.7%,为车灯精密注塑模具设计提供了新的技术范式。

1 某汽车前照灯灯座塑件

1.1 塑件结构

某汽车前照灯灯座由左/右两个镜像对称的塑件组成,两者结构形状如图1a所示。由于左/右两件结构对称,以下仅以左前照灯灯座为例进行分析。如图1b所示,该塑件模具结构设计的关键子特征包括以下几个部分。



B_0 —Three sided wall; C_1 —Sealing groove; D_1 —Bottom wall;
 a_0 — a_8 , b_1 — b_6 , c_1 — c_3 , d_1 — d_8 , e_1 — e_3 , f_1 — f_{14} —Feature number

图1 某汽车前照灯灯座塑件

Fig. 1 Plastic parts of a certain car headlight socket

(1)基础结构。

塑件主体由三面壁 B_0 及底面 D_1 构成,其中底壁

D_1 采用阶梯结构(见图1b中 F_1 向视图)。 B_0 上端口部设有一整圈截面为U形的密封槽 C_1 。

(2)外壁特征。

沿密封槽 C_1 外侧周边分布有以下特征:8个扣槽 $a_1 \sim a_8$ (见图1b中俯视图),6个扣边槽 $b_1 \sim b_6$ (见图1b中俯视图3D-2视图)。在 B_0 的一侧外壁上设有:侧边直孔 c_3 ,侧边矩形框槽 d_1 (孔 c_3 附近),钩块 d_2 (槽 d_1 下方),侧卡脚 d_3 ,斜槽弹夹 d_4 (见图1b中俯视图3D-2视图);另一侧外壁则设有侧孔 d_6, d_8 ,文字标识侧板 d_5, d_7 。

(3)内壁特征。

B_0 内壁及底壁 D_1 上设有3个片型弧形插脚 e_1, e_2, e_3 (见图1b中俯视图3D-1视图)。

(4)底壁特征。

底壁 D_1 上设置的特征有:灯孔 $f_3, f_4, f_5, f_8, f_9, f_{12}, f_{13}$;斜线孔 c_1, c_2 ;定位座 $f_1, f_2, f_6, f_7, f_{10}, f_{11}, f_{14}$ (见图1b中仰视图)。

该塑件外形包装尺寸为544 mm×29 mm×34 mm,设计年产量为25~35万件。

1.2 塑件材料使用要求

根据汽车品级的差异,综合考虑性能互补与成本优化,塑件材料选用PC和PP+TD40两种材料。

(1) PC材料特性及应用。

PC材料(牌号APEC 297,德国科思创股份有限公司)具有以下特点:优异的耐热性能,长期使用温度可达12℃,高抗冲击强度和良好透光性,优良的加工性能,便于注塑成型复杂结构。在高品级车型中,PC材料主要用于车灯塑件。其高耐温性可确保灯座在工作状态下的结构稳定性,抗冲击特性则能有效应对行驶中的振动和外部冲击。为保证材料性能,注塑前需进行12℃、6 h以上的预干燥处理,以避免水解导致的气泡或缺陷。同时,模具设计需充分考虑PC材料较低的成型收缩率(0.5%~0.7%)。

(2) PP+TD40材料特性及应用。

PP+TD40(牌号PP-KF08,广州金发科技有限公司)具有以下优势:高刚性和尺寸稳定性,优异的成本效益,良好的耐化学腐蚀性和低吸湿性。在中、低品级车型中,PP+TD40材料主要用于车灯塑件。添加40%滑石粉显著提升了材料的弯曲模量和热变形温度(可达11℃),使其能够承受机械载荷并保持高温下的几何稳定性。该材料的成型收缩率约为0.7%~0.9%,可确保灯座装配精度和长期耐疲劳

性。与PC相比,PP+TD40材料成本降低约3%~4%,在满足性能要求的前提下有效控制了整车制造成本。

两种材料的合理选用,既满足了高温区域的结构强度需求,又实现了非核芯部件的轻量化与经济性平衡。

2 成型难点及解决措施

塑件采用双料注塑成型,即一副模具需要应对两种不同材料的生产,材料的收缩差异性等影响模具整体结构设计,如何在模具中平衡两种不同材料带来的成型差异,保证两种材料都能在模具中获得较好成型是本模具设计的一大难点。同一副模具先后用于PC和PP+TD40塑料的注塑生产,由于两种材料在收缩率、热性能、流动性及磨损性等方面存在显著差异,模具设计需特别关注以下核芯难点和需避免的关键错误:

2.1 成型核芯难点

(1)收缩率差异导致的尺寸失控。

PC收缩率为0.5%~0.7%(低收缩,但各向同性);PP+TD40收缩率为0.7%~0.9%(因高填充,收缩率更高且各向异性明显)。因此若模具型腔按PC收缩率设计,切换至PP+TD40时,因收缩率差异会导致尺寸偏大(尤其是厚度方向),需动态补偿。

(2)温度管理冲突。

PC加工温度为280~320℃(高温需求);PP+TD40加工温度为220~260℃(低温但需快速冷却)。因此模具需兼容高温和低温工艺,否则残留热应力会导致变形或结合不良。

(3)材料磨损与模具寿命。

PC材料对模具具有低磨损性,而PP+TD40则为高比例矿物填充(TD40)材料,对模具型腔、流道、浇口造成严重磨蚀。因此模具钢材选择不当会导致快速磨损,影响精度和表面质量。

(4)脱模与顶出系统适配性。

PC刚性高,脱模需较大顶出力;PP+TD40因矿物填充脆性增加,顶出易开裂。因而同一套顶出机构需兼顾两种材料的力学特性,否则会导致拉伤或破裂。

(5)流道与浇口设计矛盾。

PC高黏度,需大流道和浇口尺寸;PP+TD40流动性好但剪切敏感,小浇口易导致填充不足或材料降解。流道系统需兼顾两种材料的流动特性,否则

切换时需频繁调整工艺参数。

2.2 关键解决措施

(1)采用收缩率动态补偿设计。

针对有装配要求的关键特征的成型,采用局部镶件调整尺寸的办法来使型腔尺寸分段补偿。PC成型时,型腔尺寸按直径 $D_{pc}=D_0 \times (1+0.006\ 5)$ 设计;PP+TD40成型时,型腔尺寸按 $D_{pp}=D_0 \times (1+0.007\ 5)$ 设计,通过可调镶件或模块化型腔实现动态适配。

(2)温度分区与快速切换。

设计独立的温控通道,以保证PC成型时,模具温度设为100~120℃(减少内应力);PP+TD40成型时,模具温度能降至60~80℃(加快冷却,减少变形)。设计多回路冷却系统,可以通过阀门切换控制不同温度控制要求。

(3)耐磨材料与表面处理。

模具钢材选择中,型腔和流道采用高硬度工具钢1.2344,硬度HRC 48~52;浇口区域使用粉末冶金钢ASP-23,增强抗磨损能力。成型部位表面处理:镀硬铬,厚度0.01~0.03 mm,减少矿物填充材料的磨蚀。

(4)脱模系统优化。

顶出机构设计中,对PC采用均匀顶出(多顶针布局),顶针直径 ≥ 6 mm;对PP+TD40采用大面积顶板,避免局部应力集中导致开裂。优化脱模斜度配置,脱模斜度 $\geq 2.5^\circ$ (PP+TD40矿物填充材料易黏模)。

(5)流道与浇口的模块化设计。

对两种材料浇注系统设计中,采用模块化流道系统,即采用可更换流道+浇口镶件方法,使用不同流道和浇口镶件。PC用大截面流道,PP用低剪切设计。

(6)工艺切换措施。

生产中,切换材料前需彻底清除PC残留(高温下PC易碳化),避免污染PP+TD40。PC生产结束后,模具需降温至PP+TD40的工艺温度后再开始注塑,防止热冲击。参数重置,调整注射速度(PC低速高压,PP中速中压)、保压时间(PC延长20%~30%)。

3 模具设计

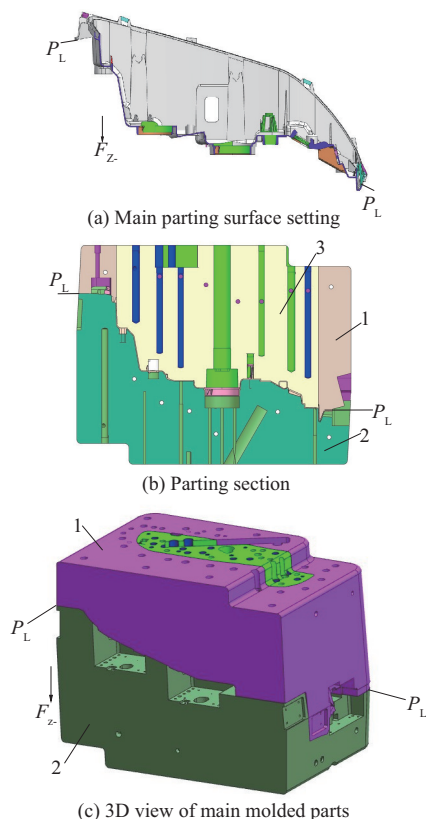
模具设计中,由于左/右前照灯灯座为镜像对称关系,故其模腔在软件中的3D设计只需做一个模腔的设计,另一模腔只需按镜像对称关系复制即可^[22-25]。以下模具模腔的设计主要针对左前照灯灯

座的模腔进行设计。

3.1 左前照灯灯座模腔分型及成型件设计

(1)模腔主要成型件分型设计。

如图2a所示,在选择开模方向 F_z 与灯孔 f_{13} 孔轴向共线的前提下,主分型面选择沿塑件最大轮廓线(密封槽 C_1 外侧边缘)设置主分型面 P_L (见图2a),与车灯弧面贴合,闭模时均匀施力,能确保塑件主体结构(三面壁 B_0 及底壁 D_1)顺利脱模,同时能最简化塑件的整体模具结构。 P_L 面优化为采用延伸面和网格面构建,避免尖角和薄钢;插穿角度设计 $\geq 7^\circ$,减少磨损并提高定位精度。分型面内部破孔设计中对灯头孔等关键部位采用镶件结构,拔模斜度控制在 0.5° 以内,并通过倒扣纹或加强筋防止塑件黏定模。分型获得的主要成型件型腔镶件1和型芯镶件2如图2b、图2c所示。针对 B_0 内壁成型件的设计,从型腔镶件1中单独分割出芯部镶件3,不同材料成型时,芯部镶件3可更换,以补偿PC与PP+TD40的收缩差异。两个芯部镶件3高度差为0.1~0.2 mm,对应两种材料收缩率差值(0.2%)。密封槽



P_L —Main parting surface; F_z —Mould opening direction; 1—Main cavity insert; 2—Main core insert; 3—Cavity core insert

图2 模腔主要成型件设计

Fig. 2 Design for main molded parts of mould cavity

C_1 的U形截面区域采用芯部镶件3镶拼式结构,通过精密研磨保证闭合精度(配合间隙 ≤ 0.02 mm)。

(2)局部分型设计。

由于装配尺寸控制需要,8个扣槽 $a_1 \sim a_8$ 的成型件需能更换,如图3a、图3b所示,针对8个扣槽 $a_1 \sim a_8$,每个扣槽设计了独立镶件 $I_{a1} \sim I_{a8}$, $I_{a1} \sim I_{a8}$ 中单个镶件为一组,包括上下两个,如上镶件 I_{a7} 和下镶件

I_{a7}' ,以方便两种不同材料成型此处时对精度尺寸进行控制。针对6个扣边槽 $b_1 \sim b_6$ 的成型与脱模设置了对应的侧抽芯滑块头,分别为滑块头 $S_{b1} \sim S_{b6}$,滑块头 $S_{b1} \sim S_{b6}$ 两种材料可通用,无须更换。

针对 c_3, d_1, d_2, d_3 的成型与脱模,集成使用滑块头 S_{c3} 进行成型和侧抽芯脱模。针对 d_4 成型,为便于成型件加工,设置成组镶件 I_{d4} 。针对 d_5, d_6 的成型与脱模集成使用滑块头 S_{d5} 进行成型和侧抽芯脱模。针对 d_7, d_8 的成型与脱模集成使用滑块头 S_{d7} 进行成型和侧抽芯脱模。滑块头 S_{c3}, S_{d5}, S_{d7} ,镶件 I_{d4} 两种材料通用,无须更换。斜线孔 c_1, c_2 则分别设置滑块头 S_{c1}, S_{c2} 实施成型和抽芯脱模,滑块 S_{c1} 需更换。

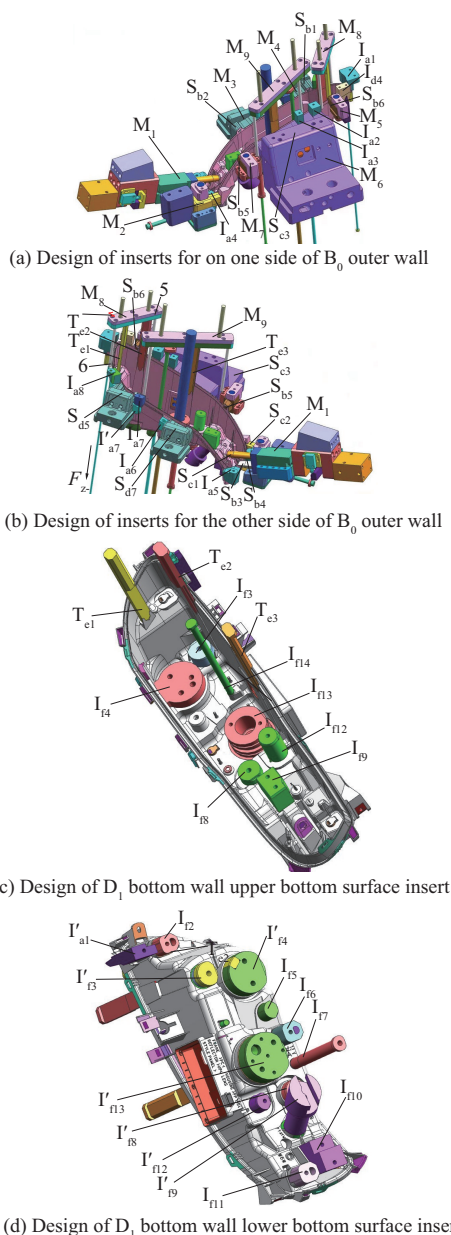
针对内壁特征中的3个片型弧形插脚 $e_1 \sim e_3$,设计了3个强制脱模推片杆 $T_{e1} \sim T_{e3}$ 实施成型和强制脱模,此3个成型件在两种材料成型时共用。

针对底壁特征中的局部成型件,如图3c、图3d所示,定位座 f_1 的成型集成在镶件 I_{a1} 上。 $f_2 \sim f_{14}$ 则分别设置独立镶件 $I_{f2} \sim I_{f14}$ 进行成型,其中第一组镶件 $I_{f2}, I_{f3}, I_{f6}, I_{f7}, I_{f10}, I_{f11}, I_{f14}$ 为单侧成型镶件(单个),第二组镶件 $I_{f3}/I_{f3}', I_{f4}/I_{f4}', I_{f8}/I_{f8}', I_{f9}/I_{f9}', I_{f12}/I_{f12}', I_{f13}/I_{f13}', I_{f3'}/I_{f3'}, I_{f4'}/I_{f4'}, I_{f8'}/I_{f8'}, I_{f9'}/I_{f9'}, I_{f12'}/I_{f12'}, I_{f13'}/I_{f13'}$ 为双侧成型镶件(一组2个)。换塑料材料注塑时需要更换的镶件为第二组镶件。

3.2 脱模机构设计

(1) B_0 外壁周边侧抽芯脱模机构。

针对侧边直孔 c_3 、钩块 d_2 、斜槽弹夹 d_4 等侧向特征的成型与脱模,简化抽芯方向,优先采用常规滑块(动模侧)而非斜滑块,避免复合抽芯角度;使用“滑块+斜导柱+定位夹”结构,确保动作稳定。在滑块接触面添加 5° 耐磨块,减少磨损并延长寿命。基于此,设计了 $M_1 \sim M_7$ 共7个滑块侧抽芯机构用于这些特征滑块头的侧抽芯驱动。其中,机构 M_1 为油缸驱动定模斜滑块先抽芯机构,其斜滑块体带动其上的滑块头 S_{c1}, S_{b3} 实施斜向抽芯,抽芯距离15 mm,液压缸行程余量20%(总行程18 mm)。机构 M_2 为斜导柱驱动型滑块机构,其滑块体带动其上的 S_{c2}, S_{b4} 实施水平侧向抽芯。机构 M_3, M_4, M_5, M_6, M_7 为斜导柱驱动型滑块机构,都采用斜导柱+弹簧复位,斜导柱角度 18° ,抽芯距离7 mm,运动精度控制:滑块导轨配合间隙 ≤ 0.015 mm。对应的各滑块头 $S_{b2}, S_{b1}, S_{b6}, S_{c3}, S_{b5}$ 直接从各自的滑块体上加工而获得,滑块头工作面采用表面氮化处理(洛氏硬度62~64),抵抗



$I_{a1}/I_{a1}' \sim I_{a8}/I_{a8}'$ —Buckle groove inserts; $S_{b1} \sim S_{b6}, S_{c1} \sim S_{c3}, S_{d5}, S_{d7}$ —Slider head; $T_{e1} \sim T_{e3}$ —Push rod; $I_{d4}, I_{d2}, I_{d3}/I_{d3}', I_{d4}/I_{d4}', I_{d5}, I_{d6}, I_{d7}, I_{d8}/I_{d8}', I_{d9}/I_{d9}', I_{d10}, I_{d11}, I_{d12}/I_{d12}', I_{d13}/I_{d13}', I_{d14}$ —Partial inserts; $M_1 \sim M_9$ —Demoulding mechanism number; 4—Spring; 5—Combination small push board; 6—Reset rod

图3 局部成型件设计

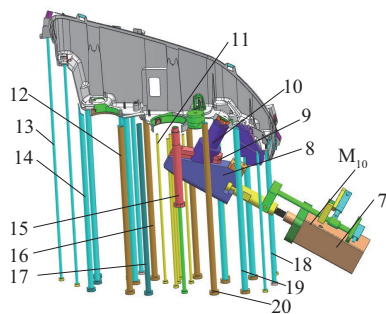
Fig. 3 Design of partial molded part

PP+TD40的矿物磨损。

(2)定模先顶出强制脱模机构。

针对3个强制脱模推片杆 $T_{c1} \sim T_{c3}$ 的驱动需要,设计了机构 M_8, M_9 用于推片杆 $T_{c1} \sim T_{c3}$ 的驱动,其中机构 M_8 用于驱动 T_{c1} 和 T_{c2} ,机构 M_9 用于驱动 T_{c3} , M_8, M_9 结构相同,以 M_8 为例,机构安装在模具定模板内, T_{c1} 和 T_{c2} 安装在组合推板5上, P_L 面打开时由6个弹簧4推动组合推板5按 F_z 向下行,将塑件从型腔镶件1中推出,推出后,由于包紧力的作用,塑件留在动模一侧,塑件的 e_1, e_2 与 T_{c1}, T_{c2} 强制分离。 P_L 面闭合时,动模通过复位杆6将组合推板5按 F_z 向的反向压回而复位。

(3)动模油缸斜抽芯机构。针对 I_{19}' 的驱动,由于其为斜向抽芯,需要设置一个转向驱动机构 M_{10} 用于其抽芯,如图4所示,镶件 I_{19}' 由油缸7驱动的中间滑块8驱动,中间滑块8上设置T型导轨10,导轨10带动镶件 I_{19}' 斜向抽芯。

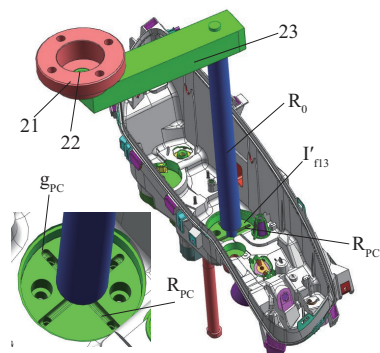


7—Oil cylinder; 8—Middle slider; 9—Guide rail; 10—Insert I_{19}' ;
11— Pulling rod; 12~14, 16~20—Ejector pin; 15—Ejector Sleeve;
 M_{10} —Demoulding mechanism number
图4 机构 M_{10} 及顶出机构设计

Fig. 4 Design of M_{10} mechanism and ejection mechanism components

3.3 浇注系统设计

由于需要采用两种材料注塑,PC与PP+TD40对浇注系统的要求有所不同,因而模具中通过模块化切换更换流道镶件 I_{f13}/I_{f13}' 来实现此种需要,如图5所示。浇注系统采用冷热流道相结合的复合式浇注系统进行浇注,对应于PC注塑的流道镶件 I_{f13}/I_{f13}' ,PC流道镶件采用梯形截面(宽深比2:1),4条冷流道 R_{PC} ,每条对应1个扇形浇口 g_{PC} (宽度5 mm,厚度1.5 mm),开设在孔 f_{13} 圆周上,保证高黏度PC充分填充。对应于PP+TD40材料的流道镶件 I_{f13}/I_{f13}' ,其上的流道采用圆形截面(减少剪切热),浇口 g_{PP} 为潜伏式浇口(直径 $\Phi 1.2$ mm),避免浇口残留影响外观。热嘴 R_0 采用针阀式热流道实施精准控制填充。



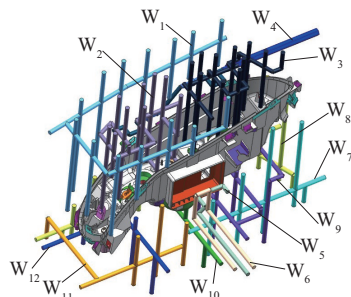
21—Location ring; 22—Sprue bushing; 23—Hot runner plate;
 R_0 —Hot runner nozzle; R_{PC} —PC material cold runner;
 g_{PC} —PC material gate; I_{f13} —The same as Fig.3

图5 浇注系统设计

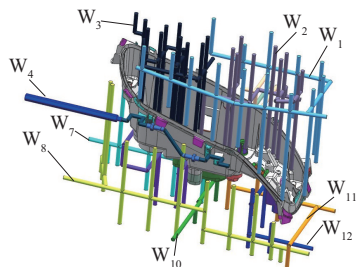
Fig. 5 Design of gating system

3.4 冷却系统设计

冷却设计中,采用垂直式水管与隔片式水井组合,确保冷却水均匀覆盖型腔,厚壁处加强冷却,间距控制在15~25 mm,冷却通道布局如图6所示。由于成型PC时,模具温度要求较高,故以PC冷却为基准设计冷却水路(模具温度100~120 $^{\circ}\text{C}$)。采用温度分区设计直列式冷却通道($\Phi 10$ mm),密集排布于底壁 D_1 及侧壁 B_0 区域,加速冷却。冷却水环绕热嘴 R_0 区域,防止热流道流延或残留。型腔镶件1内设置的水路为 W_1 ,芯部镶件2内开始的水路为 W_2, W_3 ,型芯镶件3内开设的水路为 $W_7 \sim W_{12}$ 。滑块头 S_{b2}, S_{b1}



(a) 3D view of design of water way



(b) 3D view of design of water way for one other

$W_1 \sim W_{12}$ —Cooling water way number

图6 冷却水路设计

Fig. 6 Design of water way

开设水路 W_4 , 滑块头 S_3 内开设水路 W_5 , W_6 。各管道通过电磁阀控制回路冷却系统, 以方便进行高低速循环切换。

3.5 顶出系统设计

结合图4所示, 针对PC材料的顶出方案中, 顶针需均布, 顶出速度 ≤ 50 mm/s, 顶出行程 20 mm, 避免刚性冲击。顶针头部表面镀铬防划层, 减少顶出过程中对成品的划伤, 减少与PC的摩擦黏附。针对PP+TD40材料顶出方案中, 需要使用大面积顶板(覆盖底壁 D_1 80%区域), 顶板表面设计蜂窝状减重结构, 顶出速度 ≤ 30 mm/s, 防止脆性断裂。经综合衡量后, 选用PC料顶出方案, 增加顶杆数量并合理分布, 脱模斜度至少设计为 2.5° , 确保顶出平稳, 顶出速度兼顾两种材料的顶出速度要求^[26]。为此, 顶出机构中主要配置顶针进行顶出, 设置了多种直径规格的顶针 12~14, 16~20, 以及单根推管 15。顶针顶出后重复定位精度 ± 0.02 mm, 顶针与型芯上的顶针孔间隙控制在 0.02~0.03 mm 以内, 以避免溢料。顶出系统配备的复位与导向构件中, 先复位弹簧(预压力 5 mm)与导柱导套(间隙 0.01 mm), 可确保顶出精度。

3.6 模具整体结构及工作原理

(1) 模具结构。

模具的定、动模结构如图7a、图7b所示, 模具结构设计为一种两板模具, 一模两腔布局, 左腔 V_L 用于成型左前照灯灯座, 右腔 V_R 用于成型右前照灯灯座。以左腔 V_L 为例, 定模内集成设置的侧抽芯机构有 M_1 , M_8 , M_9 , 动模一侧则集成设置了机构 $M_2 \sim M_7$ 及 M_{10} 。单腔的顶出系统、浇注系统、冷却系统分别按图4、图5、图6所示布置。模具单次开模, 单次顶出。模架尺寸 1 200 mm×800 mm×500 mm, 材料为 S50C 钢。型腔与型芯采用 1.2344 工具钢, 硬度为 48~52, 表面镀硬铬(0.02 mm)。采用模块化设计方式, 流道、浇口、侧抽芯滑块等关键部件设计为可拆卸镶件, 支持快速更换与维护。

(2) 整体结构安装及工作原理。

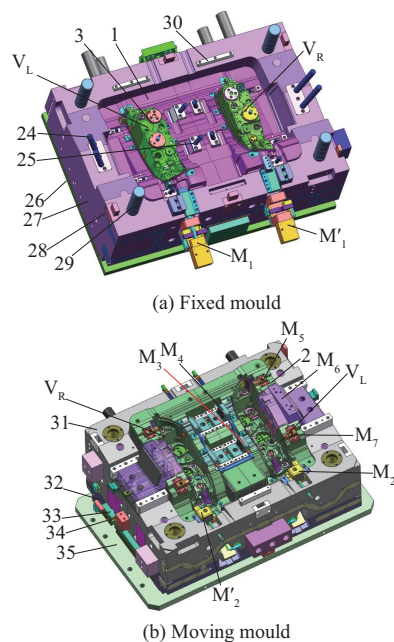
模具整体结构安装如图8所示。以PC料注塑为例, 模具的工作原理如下。

①合模。

模具闭合, 等待注塑。

②注射。

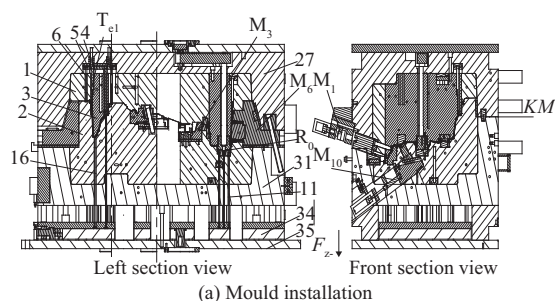
注塑机通过机筒喷嘴、热嘴 R_0 对模腔实施浇



1~23, $M_1 \sim M_{10}$ —The same as Fig.2, Fig.3, Fig.4, Fig.5; $V_L \sim V_R$ —Mould cavity number; 24, 25—Angle pin; 26—Upper clamping plate; 27—Fixed mould plate; 28—Side lock; 29—Guide pin; 30—Position lock; 31—Moving mould plate; 32—Mould foot; 33—Ejector retainer plate; 34—Ejector plate; 35—Moving clamping plate

图7 定模和动模结构

Fig.7 Structure of fixed mould and moving mould



(b) Physical plastic parts

1~35, R_0 , T_{e1} , F_z , $M_1 \sim M_{10}$ —The same as Fig.7

图8 模具安装及工作原理

Fig.8 Mould installation and working principle

注, 保压冷却完成后, 等待开模。

③机构 M_1 先抽芯。

模具打开前, 机构 M_1 先完成斜抽芯。

④KM面打开。

注塑机动模板带动模具动模按 F_z 向下行,模具在 KM 面处打开,打开过程中,机构 M_8, M_9 的弹簧4推动推板5顶出,从而推动镶件 $T_{c1} \sim T_{c3}$ 跟随塑件从芯部镶件3上顶出,随着 KM 面的进一步打开,塑件从镶件 $T_{c1} \sim T_{c3}$ 上强制拔出,而留在型芯镶件2上。 KM 面打开过程中,机构 $M_2 \sim M_7$ 各自的斜导柱驱动对应的滑块体完成侧抽芯动作。

⑤机构 M_{10} 抽芯。

KM 面完全打开后,机构 M_{10} 的油缸动作完成抽芯。

⑥顶出。

注塑机顶杆推动推板35顶出,从而推动拉料杆11、顶针16等将塑件从型芯镶件2上顶出,实现完全脱模。

⑦复位。

复位过程与开模过程相反。

需要指出的是,材料切换至PP+TD40时,更换流道镶件,调整冷却系统阀门,模具降温至 80°C 后开始注塑。

4 结论

针对汽车前灯灯座多材料注塑成型的技术难题,提出了一套集成式模具创新设计方案,并通过理论分析与工程实践验证了有效性。通过分型面的阶梯补偿、浇注系统的模块化设计、冷却系统的分区控制、顶出机构的差异化配置以及侧抽芯的高耐磨处理,该模具成功实现了PC与PP+TD40的高效兼容生产。通过构建多级浇注系统参数化模型,实现了PC与PP+TD40材料的双模兼容成型,解决了浇注系统热力学失衡导致的熔接痕与缩痕缺陷问题;采用参数化分型面设计与动态收缩率补偿方法,将加工误差控制在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 以内,显著提升了灯头孔位与密封槽的尺寸精度;开发的梯度冷却系统通过共轭传热优化,使模温均匀性提升至92%,有效抑制了厚薄突变区域的非均匀收缩;基于多目标优化算法的顶出机构设计,将顶出平衡度提高至0.93,降低了顶出变形与开裂风险。量产数据表明,该模具使用寿命突破30万模次,产品合格率提升至96.7%,验证了设计方案在工程应用中的可靠性与经济性。本设计为车灯精密注塑模具的多材料兼容设计提供了系统性解决方案,对汽车轻量化与智能化背景下的复杂结构注塑技术发展具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 章驰,胡倚萍,杜甜甜,等.聚芳硫醚功能塑料的生产工艺稳定性分析与优化[J].塑料,2023,52(5):83-88.
ZHANG Chi, HU Yiping, DU Tiantian, et al. Analysis and optimization of production process stability of poly (arylene sulfides)[J]. Plastics, 2023, 52(5):83-88.
- [2] 王金宝.聚芳硫醚的聚合、改性及应用进展[J].上海塑料,2023,51(4):7-12.
WANG Jinbao. Progress in polymerization, modification and application of polyphenylene sulfide[J]. Shanghai Plastics, 2023, 51(4):7-12.
- [3] 李小东,陈智,巨婷婷.聚芳硫醚的合成及其应用研究进展[J].广州化工,2019,47(19):17-18,21.
LI Xiaodong, CHEN Zhi, JU Tingting. Research progress on synthesis and application of polyphenylene sulfide[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 47(19):17-18, 21.
- [4] LIU S J, LIN M J, WU Y C. An experimental study of the water-assisted injection molding of glass fiber filled poly-butylene-terephthalate (PBT) composites[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(7/8):1 415-1 424.
- [5] BRAN A, CONSTANTIN N. Heat treatment by applying tempering at low temperature of WNR. 1.2083 steel, used in the injection molding of PBT reinforced with up to 45% fiberglass[J]. Materiale Plastice, 2015, 52(4):533-536.
- [6] KUMAR S, SINGH A K, PATHAK V K. Modelling and optimization of injection molding process for PBT/PET parts using modified particle swarm algorithm[J]. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2020, 27(3):603-615.
- [7] ARIF M F, MERAGHNI F, CHEMISKY Y, et al. *In situ* damage mechanisms investigation of PA66/GF30 composite: Effect of relative humidity[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58: 487-495.
- [8] WEI J L, SUN L Y, PAN W F. Study on the interfacial properties of bi-material structures manufactured by injection molding after compression[J]. Composite Structures, 2023, 309. DOI: 10.1016/J. COMPSTRUCT.2023.116740.
- [9] LEE M, LEE M H, LEE C K. The effect of warpage on carbon fiber-reinforced composites (CFRP) and glass fiber-reinforced composites (GFRP) due to the operation of a rapid cooling and heating device[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2025, 47(5). DOI: 10.1007/S40430-025-05478-0.
- [10] 丁婷婷.特种工程塑料的研究进展[J].现代塑料加工应用, 2022, 34(4):56-59.
DING Tinghui. Research progress of special engineering plastics [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2022, 34(4): 56-59.
- [11] VILLARROEL S, MORALES R A, SNCHEZ-SOTO M. Effect of molding parameters and orientation on the properties and skin-

- core structure of polypropylene plaques[C]// Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2009 (ANTEC 2009), Chicago, Illinois, USA:2009:2 098–2 102.
- [12] GONG Xinhui, CHEN Liangbi. Performances of tea dust/polypropylene composites under natural weathering[J]. *Acta Materialia Composita Sinica*, 2016, 33(7):1 437–1 445.
- [13] ZHANG C B, MA Y, FENG B, et al. Effects of montmorillonite on structures and properties of injection-molded polypropylene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(18). DOI:10.1002/app.47442.
- [14] HUANG M Z, NOMAI J, SCHLARB A K. The effect of different processing, injection molding (IM) and fused deposition modeling (FDM), on the environmental stress cracking (ESC) behavior of filled and unfilled polycarbonate (PC) [J]. *Express Polymer Letters*, 2021, 15(3):194–202.
- [15] KAMBER O. Forming behavior of ABS and PC polymers under plastic injection molding process[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2018, 134(1):365–370.
- [16] TZENG C J, YANG Y K, LIN Y H, et al. A study of optimization of injection molding process parameters for SGF and PTFE reinforced PC composites using neural network and response surface methodology[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(5):691–704.
- [17] 彭贤峰, 翁礼杰, 邵俊, 等. 新能源汽车PC灯罩的注塑模具设计[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(4):101–107.
- PENG Xianfeng, WENG Lijie, SHAO Jun, et al. Design of injection mould for PC lampshade of new energy vehicles[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(4):101–107.
- [18] 肖国华, 刘晓彬, 沈忠良. 分度环多滑块同步顶出和加速顶出机构的模具设计[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(4):116–123.
- XIAO Guohua, LIU Xiaobin, SHEN Zhongliang. Mould design of multiple sliders synchronous ejection and accelerated ejection mechanism for indexing ring[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(4):116–123.
- [19] 吴成龙, 刘斌. 翻盖塑料制品的模内合盖注射模设计[J]. *模具工业*, 2013, 39(12):58–60.
- WU Chenglong, LIU Bin. Design of injection mould with in-mould covering device of plastic flip cap[J]. *Die & Mould Industry*, 2013, 39(12):58–60.
- [20] 赵利颇, 王倩, 曹春雷, 等. 支架接头复杂脱模机构注塑模设计[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(7):92–96, 107.
- ZHAO Lipo, WANG Qian, CAO Chunlei, et al. Design of injection mold with complex core-pulling mechanisms for connector with bracket[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(7):92–96, 107.
- [21] 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.
- CHEN Jie, WANG Xingyang. Optimization design of injection mold for vehicle GPS locator[J]. *Plastics Science and Technology*, 2021, 49(2):70–73.
- [22] 黄立君, 高志刚. 小型电动汽车信号器外壳注射模设计[J]. *塑料*, 2024, 53(4):105–110.
- HUANG Lijun, GAO Zhigang. Design of Injection mold for the signal shell of small electric vehicles[J]. *Plastics*, 2024, 53(4):105–110.
- [23] 夏雨, 高云霄. 汽车空调管接头复杂塑件注塑模设计[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(10):100–108.
- XIA Yu, GAO Yunxiao. Design of injection mould for complex plastic parts of automobile air conditioning pipe joint[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(10):100–108.
- [24] 马如远. 双联斜齿轮斜齿脱模机构及改进型三板模设计[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(1):98–102, 115.
- MA Ruyuan. Design of helical tooth demoulding mechanism and improved three-plate mould for duplex helical gear[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(1):98–102, 115.
- [25] 杨秋合, 杨安. 微型离心泵泵叶三层式滑块机构三板模具设计[J]. *中国塑料*, 2020, 34(7):97–103.
- YANG Qiuhe, YANG An. Design of three-plate mold with three-layer slider mechanism for micro centrifugal pump[J]. *China Plastics*, 2020, 34(7):97–103.
- [26] 张玉军. 采用两次开模的7个斜锥形管塑料盖模具设计[J]. *模具技术*, 2025(1):53–58.
- ZHANG Yujun. Mold design of a ring cover consisting of seven inclined tapered tubes[J]. *Die and Mould Technology*, 2025(1):53–58.