

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.020

烟雾报警器外壳注塑模具设计及工艺参数优化

赵恬玉, 钱哲, 韩正宇, 冯文
(江苏海洋大学机械工程学院, 江苏连云港 222005)

摘要: 针对烟雾报警器外壳复杂的薄壁结构及塑件内壁多向卡扣导致的脱模难度大、外观面无成型痕迹要求高、薄壁特征易出现翘曲变形等核心技术难题,采用一模二腔注塑模具,设计拉-推复合递进式脱模机构,通过定模拉扣与动模拉板的时序配合,先由斜销驱动侧滑块完成内侧抽芯动作,再通过多顶杆均衡排布的顶出系统实现塑件平稳整体脱模,同步完成了隐蔽式点浇口浇注系统与对称循环冷却系统的匹配设计,解决熔体均匀填充、塑件均衡冷却与外观质量控制的工程问题。基于UG软件完成模具三维建模,借助Moldflow软件实现注塑成型全过程的数值模拟;以塑件翘曲变形量为优化目标,选取模具温度、熔体温度、注射时间为关键影响参数,利用BP神经网络构建翘曲变形量与注塑工艺参数之间的非线性映射模型,结合遗传算法确定模具温度30℃、熔体温度200℃、注射时间1.915s为最优注塑工艺参数。利用Moldflow仿真模拟得到最优工艺参数中最大翘曲变形量为0.1132mm,相比于初始工艺参数翘曲变形量0.3250mm降低了65.17%。优化后的工艺参数可显著降低塑件翘曲变形量,提升产品尺寸精度与成型合格率,有效减少成型缺陷、降低试模成本、提高生产效率,可为同类带内侧卡扣的薄壁安防塑件注塑模具设计与工艺优化提供可靠的技术参考。

关键词: 烟雾报警器外壳;模具设计;翘曲变形;BP神经网络;遗传算法

中图分类号: TQ320.52, TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0173-09

Injection mold design and process parameter optimization of smoke alarm shell

ZHAO Tianyu, QIAN Zhe, HAN Zhengyu, FENG Wen

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: To solve the core technical difficulties in demolding, high requirements for the absence of forming marks on the surface, and the tendency for the thin-walled feature to undergo warpage deformation problems led by the complex thin-walled structure of the smoke alarm housing and the multi-directional snap-fit on the inner wall of the plastic part. An injection mold with two-cavity was designed. A pull-push compound progressive demolding mechanism was developed through the sequential coordination of a fixed mold latch and a moving mold pull plate, the side slider was first driven by an angle pin to complete the internal side core-pulling action. Then, an ejection system with a balanced arrangement of multiple ejector pins was used to achieve smooth overall demolding of the part. Simultaneously, a hidden pinpoint gating system and a symmetric circulating cooling system were designed in a matched manner, resolving the engineering problems of uniform melt filling, balanced part cooling, and appearance quality control. Three-dimensional modeling of the mold was performed using UG software. Numerical simulation of the entire injection molding process was performed using Moldflow software. Taking the warpage deformation part as the optimization objective, mold temperature, melt temperature, and injection time were selected as the key influencing parameters. A nonlinear relationship model between the warpage deformation and the injection process parameters was constructed using a BP neural network. Combined with a genetic algorithm, the optimal process parameters were determined as follows: mold temperature of 30℃, melt temperature of 200℃, and injection time of 1.915s. When the optimal parameters are used in the Moldflow simulation, the maxi-

基金项目: 连云港市博士后基金项目(LYGBSH2025014),江苏省青年科技人才托举工程项目(JSTJ-2024-291),江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX25_2115)

通信作者: 冯文,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为模具设计与制造及晶界工程

收稿日期: 2026-04-15

引用格式: 赵恬玉,钱哲,韩正宇,等.烟雾报警器外壳注塑模具设计及工艺参数优化[J].工程塑料应用,2026,54(6):173-181.

ZHAO Tianyu, QIAN Zhe, HAN Zhengyu, et al. Injection mold design and process parameter optimization of smoke alarm shell[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 173-181.

mum warpage is 0.113 2 mm, which is 65.17% lower than the warpage deformation of 0.325 0 mm obtained with the initial process parameters. The optimized process parameters significantly reduce the warpage part, improve dimensional accuracy and molding yield, reduce molding defects, lower trial-mold costs, and increase production efficiency. This study provides a reliable technical reference for the design and process optimization of injection molds for similar thin-walled safety plastic parts with internal clips.

Keywords: smoke alarm housing; mold design; warpage deformation; BP neural network; genetic algorithm

塑料因具有轻量化、易加工、耐腐蚀及性价比高等优点,在交通运输、电子电器、家用电器、航空航天等多个制造领域得到规模化应用,注塑模具的需求量也随之日益增长^[1-2]。注塑模具作为现代制造业的核心装备,其发展始终与材料科学、加工技术、数字化技术及市场需求紧密相关^[3-4]。通过UG与Moldflow软件的技术衔接,可实现“设计-仿真-优化”的闭环流程,预测收缩、翘曲等成型缺陷,提高模具生产效率,缩短制造周期^[5]。

针对注塑模具成型质量的工艺参数,因其影响参数众多且与成型质量存在复杂的非线性关系,采用传统试错法进行工艺参数优化存在成本高、效率低的局限性^[6-7]。将数值模拟技术与智能算法相结合是实现多目标工艺参数协同优化行之有效的新途径^[8-9]。赵勇杰等^[10]以发动机减振器环形薄壁尼龙66轴承为研究对象,建立了能有效预测塑件翘曲变形量、填充率及锁模力等关键成型指标的拟合模型,并通过NSGA-II遗传算法获得最优注塑工艺参数组合使塑件翘曲变形量达到最小。高洪晨等^[11]针对某空气净化器外壳,运用正交试验设计,建立了可有效预测塑件翘曲变形的BP神经网络预测模型,并借助遗传算法完成了注塑工艺参数的全局优化。王晓东等^[12]以插线板上盖注塑件为研究对象,通过较少实验次数找出各工艺参数对成型过程的主要影响规律,并根据各指标数据的波动程度自动分配权重,以此构建同时考虑塑件成型质量与生产能耗的BP神经网络模型,并通过遗传算法进行全局寻优,从而获得成型质量与能耗俱佳的注塑工艺参数方案。

本文针对烟雾报警器外壳进行注塑模具设计,完成了对浇注系统、成型部件、脱模机构以及冷却系统的结构设计。利用Moldflow仿真平台研究了模具温度、熔体温度和注射时间对塑件翘曲变形量的影响。在此基础上,通过人工神经网络与遗传算法相耦合的方法实现了工艺参数的优化,研究结果对该类塑件的模具结构设计和工艺参数优化具有参考价值。

1 塑件结构及工艺分析

1.1 塑件结构分析

图1为烟雾报警器外壳塑件的三维模型。整体呈扁平盘状,表面特征包括光滑的外壁、用于安装与散热的凸起结构、八个方向各异的固定卡槽、装配所需的卡扣结构以及表面分布的进烟口,属于典型复杂结构塑件。通过实体测量得到塑件壁厚为1.5 mm,最大外形尺寸为100 mm×25 mm。基于该塑件的结构特点,其注塑模具设计需重点关注表面质量、内部卡扣脱模及其翘曲变形问题。

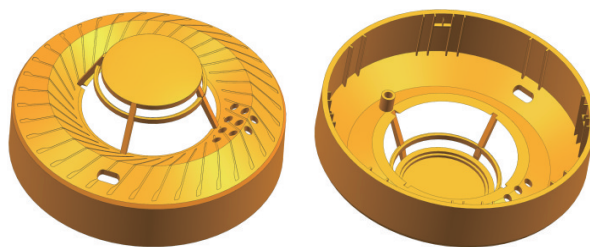


图1 烟雾报警器外壳三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of smoke alarm housing

塑件上壳体顶面为外观面,不允许留有浇口或顶出痕迹,因此必须合理选择浇口形式与位置,在保证充填质量的前提下维持外表面光滑。侧壁内部的卡槽及卡扣结构使得型芯部位需要设计抽芯机构,以确保塑件能够顺利脱模并满足成型要求。同时,安装固定卡槽的精度较高,对塑件翘曲变形有严格限制,需通过优化分型面来保证成型质量。此外,塑件整体属于薄壁零件,对熔体填充时间及冷却均匀性提出了较高要求,设计时需综合考虑充填与冷却的平衡。

1.2 材料选择

烟雾报警器外壳的材料选择需综合权衡阻燃性能、力学强度、成型工艺性及经济成本,其中阻燃性能为首要考量指标。作为长期通电的安防设备,外壳材料须具备UL 94 V-0等级的阻燃能力,以确保在火灾初期不会因自身熔化或燃烧而导致报警失效。

普通丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)本身不具备阻燃性,燃烧时易产生熔融滴落现象,无法

满足安防产品的防火安全要求,因此本研究选用阻燃改性ABS材料。该材料在保留普通ABS综合力学性能优异、加工流动性好、尺寸稳定性高的基础上,通过添加阻燃剂实现了UL 94 V-0级别的阻燃效果,其相对密度约为 1.05 g/cm^3 ,成型收缩率为 $0.4\%\sim 0.7\%$,适用于结构较为复杂的中小型外壳。此外,阻燃改性ABS材料仍保持良好的流动性,能够实现薄壁复杂结构的精密成型,有效填充卡槽、卡扣等局部细微部位,完全满足烟雾报警器外壳的成型要求与使用安全标准。

2 烟雾报警器外壳注塑模具设计

2.1 模具浇注系统设计

浇注系统设计是注塑模具的核心环节,直接影响注塑件的充填效率、缺陷控制和产品质量^[13]。针对烟雾报警器外壳环壁均匀且带结构性的塑件,选择合适的浇口位置可以使填充过程更加均匀,降低变形、填充不均,避免空洞、熔接线的产生^[14]。

通过Moldflow软件对最佳浇口位置分析,浇口位置权重分析结果如图2所示。塑件整体区域对浇口位置的匹配性较高,方便注塑,且蓝色区域匹配性最高,但塑件外表不应有明显的浇注痕迹,以避免影响塑件的美观,因此需将浇口位置设计于内侧较为隐蔽的区域。对于注塑模具而言,将浇口位置设置在塑件内侧,将使得塑件注塑过程和脱模过程的难度增加。考虑到外观要求和结构设计方面,本文采用点浇口浇注系统,设置分型面位于塑件底部,浇口位置设置于塑件靠近底部的侧壁位置(见图3),既不影响产品外观又便于脱模。

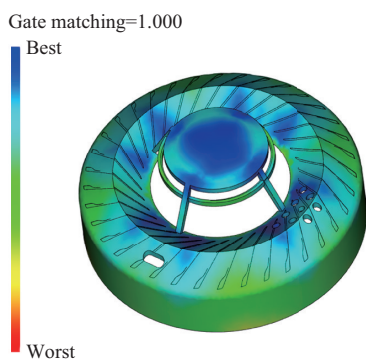


图2 烟雾报警器外壳三维模型浇口位置分析结果

Fig. 2 Analysis results of gate location for the three-dimensional model of the smoke alarm housing

浇注系统主流道的入口直径为 6 mm ,设计 5° 的锥度,便于冷却后浇注系统凝料的脱模。分流道设置为圆形截面,直径为 8 mm 。分流道进入型腔的

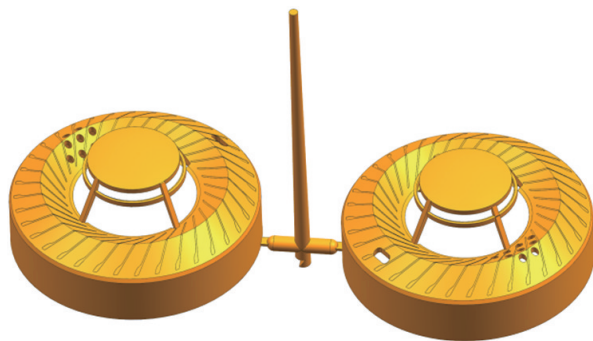


图3 烟雾报警器外壳模具的浇注系统

Fig. 3 Gating system of the smoke alarm housing mold

浇口为 $2\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,其加工效率较高,并能保证熔融塑料从主浇道平稳、均衡地分布到模具型腔的各个部分。

2.2 模具结构设计

2.2.1 定模模具结构

图4为模具定模部分的结构设计。型腔采用一体式结构,以避免拼接痕迹,同时提高结构强度与刚性,并减小热处理过程中的变形^[15-16]。塑件表面的小圆孔及腰孔均由型腔结构直接成型。此外,模具外侧设有拉扣结构,该结构固定于定模板上,用于控制内部侧抽运动的起始时序,确保侧抽运动在顶出运动之前完成,从而实现顺序脱模。本模具中,拉扣的滑槽长度设置为 130 mm ,该行程足以保证塑件脱模后能够从模具中安全取出。

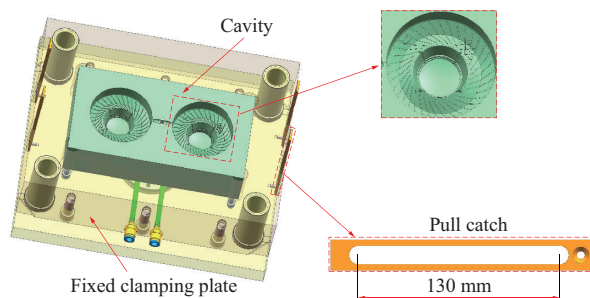


图4 定模模具结构

Fig. 4 Structure of the fixed mold

2.2.2 动模模具结构

图5为动模部分模具结构。其成型组件主要由型芯与侧滑块构成。因模具采用一模二腔布局,共需八组侧抽机构。支撑板上方设置有拉板,该拉板通过拉杆与定模部分的拉扣相连;拉板上方固定有八个斜销,分别对应于八个侧滑块。图5中的局部放大视图展示了侧滑块在型芯上的具体位置。

受塑件外形制约,型芯设计为外凸式结构,其顶部的脊状异形特征对侧滑块的行程及机构尺寸

形成空间约束。卡扣位于塑件侧壁内侧下部,其上方对应区域的型芯须与侧抽机构同步抽离。塑件内部卡扣的内深为 1.53 mm。为保障卡扣顺利抽脱,设定抽回行程为 2 mm,并要求弹簧压缩行程大于 2 mm,由此对滑块的几何尺寸提出严格限定。在满足上述尺寸与空间限制的前提下,侧滑块通过斜销与拉板的固定配合,与型芯共同构成内侧抽芯区域的成型结构。此外,推板与支撑板上固定有顶杆及拉料杆,形成塑件的顶出系统。

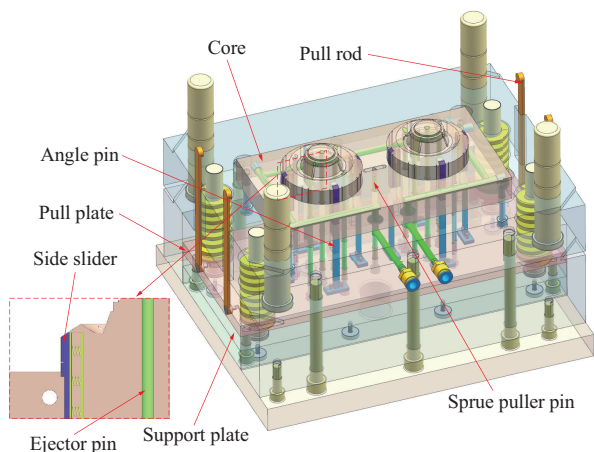


图5 动模模具结构

Fig. 5 Structure of the moving mold

2.3 拉-推复合递进脱模机构设计

根据塑件的结构特点,脱模机构需侧抽运动与顶出运动递进顺序运行,结合型芯外形特点,采用拉-推复合递进脱模机构进行塑件的脱模。

2.3.1 拉出侧抽脱模机构

拉出侧抽脱模机构主要由拉扣、拉杆、拉板、斜销、侧滑块及弹簧片构成。图6为该脱模机构的工作过程示意图。图6a为模具闭合状态,在此状态下,弹簧处于预松弛状态,推动侧滑块紧贴型芯。待塑件填充冷却完成后,动模部分开始运动。拉扣固定于定模板,拉杆固定于拉板。开模初期,拉板随动模部分一同运动。当拉杆运动至拉扣的最大行程处(设定为 130 mm,该行程足以保证塑件脱模后可从模具中安全取出)时,拉杆被拉扣限位,从而带动拉板停止运动,如图6b所示。动模部分继续前进,拉杆使拉板保持静止,进而限制固定于拉板上的斜销的运动。与此同时,型芯带动侧滑块继续移动。侧滑块与斜销之间的贴合摩擦促使侧滑块沿斜销的斜面滑动,从而实现侧向抽出动作,该运动行程距离达到 2 mm,超过卡扣长度 1.53 mm,足以

实现侧抽机构的顺利脱模,如图6c所示。至此,完成塑件的内部侧抽脱模。

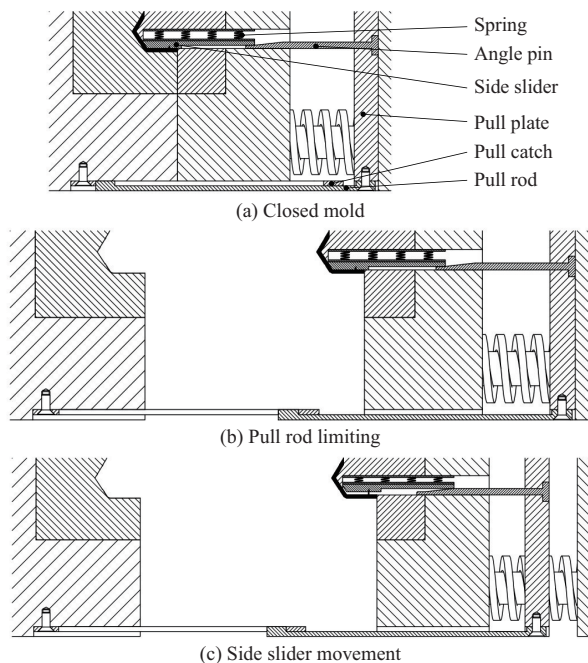


图6 拉出侧抽脱模机构

Fig. 6 Pull-out side core-pulling demolding mechanism

2.3.2 推出脱模机构

推出机构采用顶杆顶出方式,经脱模力校核,以确保塑件顺利脱模。顶杆的排布需确保顶出平稳、受力均匀^[17],尤其应注意小圆孔及点浇口附近区域,防止因局部应力集中导致塑件破裂。顶杆位置布局如图7所示。共设置12个顶杆,分为 $\Phi 6$ mm和 $\Phi 3$ mm两种型号,所选顶杆的数量与直径,在满足脱模力要求的前提下,可避免损伤塑件表面。顶杆主要布置于塑件四周靠近卡槽的部位。由于卡槽壁厚较薄,受力不均易导致卡槽破碎,顶杆设置于此可使卡槽脱模时受力均匀。此外,塑件顶部小孔排布紧密,孔间余料较薄,若顶出力不均匀,易造成

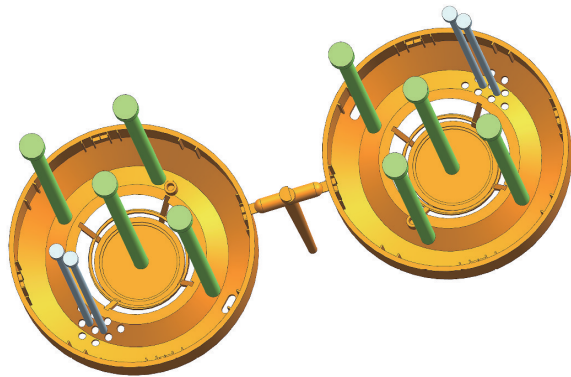


图7 动模模具结构顶杆位置布局

Fig. 7 Layout of ejector pin positions in the moving mold structure

孔间间隙破裂,显著降低产品合格率。为此,在小孔密集部位设置两根顶杆,以实现推出力的均匀施加,提高成型成功率。

2.4 模具冷却系统设计

冷却系统是保障塑件快速成型与高质量成型的关键。模具采用对称分布的冷却水路系统,使冷却水均匀分布于塑件两侧,如图8所示,从而加快冷却、保证成型质量,避免因温差过大产生变形或内应力。水道中心与型腔表面的距离通常为水道直径的1.5~3倍,水道间距为水道直径的3~5倍,即选用10 mm的水道直径可以满足冷却水路的布局和流量控制。而水道随注塑件的排列方式进行设计,采用矩形回路,其冷却液体的流向应与熔融塑料的填充方向大致相反,这样可以更均匀地冷却,也减

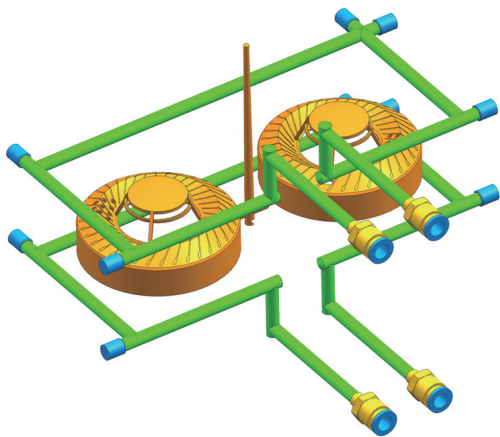


图8 冷却水路排布图

Fig. 8 Layout of cooling water channels

少了流动前端与末端之间的温差。

2.5 烟雾报警器外壳注塑模具工作原理

图9所示为烟雾报警器外壳注塑模具的主要结构。该模具用于成型带有内侧卡扣的塑件,其核心工作原理是利用拉杆机构,在开模顶出前优先通过侧滑块使塑件从内侧卡扣中脱出。整个工作过程分为合模与注射、开模与顶出、复位三个阶段。

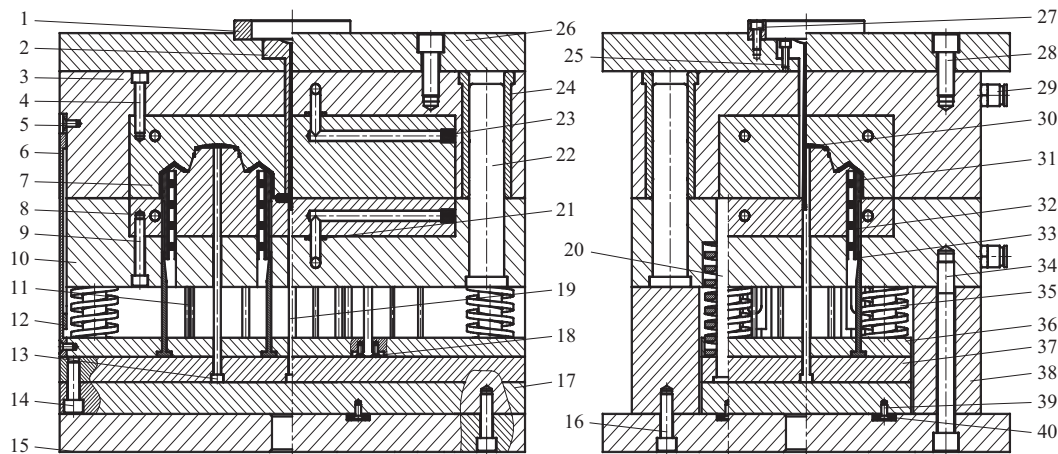
2.5.1 合模与注射阶段

模具闭合阶段,在注塑机驱动下,动模与定模部分闭合,定模板3与动模板10之间的分型面紧密贴合。斜销33的头部平面部分与侧滑块31依靠弹簧32的弹性力紧密贴合,侧滑块31与型芯8配合处于成型位置。拉杆6的滑销位于拉扣12的顶部位置,复位杆20顶端紧贴定模部分分型面,弹簧35的弹性力使支撑板37和推板17紧贴动模座板15。

注射时,注塑机将ABS塑料颗粒加热至熔融状态,通过喷嘴向浇口套2注入熔融树脂,熔体在由型腔7、型芯8及侧滑块31构成的封闭腔体中进行填充、保压及冷却,最终成型。

2.5.2 开模与顶出阶段

开模时,注塑机拉动动模部分向下运动,模具首先从定模板3与动模板10之间的主分型面打开。拉料杆19拉动浇注系统凝料使其与注塑机喷嘴分离。由于塑件冷却收缩后包裹在型芯8上,且侧滑块31与型芯8在开模初期仍保持配合状态,故塑件



1—Locating plate; 2—Sprue bushing; 3—Fixed clamping plate; 4, 5, 9, 14, 16, 18, 25, 27, 28, 34, 39—Socket head cap screw; 6—Pull rod; 7—Cavity; 8—Core; 10—Moving clamping plate; 11, 13—Ejector pin; 12—Pull catch; 15—Moving mold base plate; 17—Ejector plate; 19—Sprue puller pin; 20—Return pin; 21—Seal ring; 22—Guide pillar; 23—Piston; 24—Guide bushing; 26—Fixed mold base plate; 29—Nozzle; 30—Plastic part; 31—Side slider; 32, 35—Spring; 33—Angle pin; 36—Pull plate; 37—Support plate; 38—Spacer block; 40—Stop pin

图9 烟雾报警器外壳注塑模具

Fig. 9 Injection mold for the smoke alarm housing

随动模部分一同运动。

当开模行程达到拉扣12的极限行程(130 mm)时,拉杆6使拉板36停止运动。固定于拉板36上的斜销33与侧滑块31之间产生相对摩擦运动,迫使侧滑块31沿斜销33的斜面方向向塑件内部运动,从而完成与塑件卡扣的分离,此时弹簧32处于压缩状态。侧抽运动完成后,动模部分继续运动,推板17与注塑机上的顶模块接触。顶模块推动推板17及支撑板37,进而带动固定于其上的顶杆(11,13)及拉料杆19产生顶出运动。随着动模部分继续后退,顶杆将塑件30从型芯8上强制顶出,实现塑件与型芯的分离,完成顶出运动,以便塑件顺利从模具中取出。

2.5.3 复位阶段

注塑机带动动模部分反向运动。首先进行顶杆(11,13)及拉料杆19的复位,当止动销40与动模座板15接触时,顶杆及拉料杆复位完成。随着合模运动继续进行,侧滑块31跟随动模部分移动。当闭模行程减小至一定程度,侧滑块31与斜销33的斜面部分分离,侧滑块31完成复位。待支撑板37与拉板36贴合后,动模部分带动拉板36共同运动。当复位杆20与定模部分充分接触时,模具完全闭合,完成一个工作循环。

本次烟雾报警器外壳注塑模具设计巧妙运用拉杆拉出机构,该机构的工作起止时间随拉扣的行程长短决定,通过控制拉滑销行程槽的长度可调节拉板拉出的启动时机,从而实现模具的顺序脱模。该设计为多级顺序脱模提供了一种简便可靠的实现方式。

3 翘曲变形分析

利用Moldflow软件对烟雾报警器外壳塑件进行翘曲变形仿真分析,首先进行三维模型的导入,该塑件模型属于薄壁壳体类零件,零件壁厚相对均匀,宜选择双层面网格模式对其进行网格划分。在网格划分过程中,需兼顾网格匹配率与纵横比的要求,以确保分析的高效率与高精度。图10为完成网格划分后的模型,共计网格39 248个,其中最大与最小纵横比分别为23.77和1.16,平均纵横比2.75,网格匹配百分比86.4%,相互百分比为84.2%。塑件薄壁区域网格无缺失,曲面网格无畸变,流道网格连续,表明适合双层面网格进行分析。

烟雾报警器外壳的成型过程采用“冷却+充填+保压+翘曲”分析序列。通过分离翘曲原因可知造

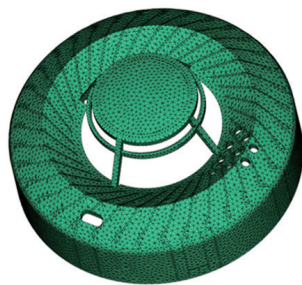


图10 烟雾报警器外壳的网格模型

Fig. 10 Mesh model of smoke alarm housing

成塑件翘曲变形主要的影响因素是由收缩不均导致的。采用模具温度50℃,熔体温度240℃,注塑时间1.4 s,作为初步分析的工艺参数,其余工艺参数选择默认。图11为该工艺参数下塑件翘曲变形的模流分析结果。由图11可知,塑件的翘曲变形量为0.325 0 mm。

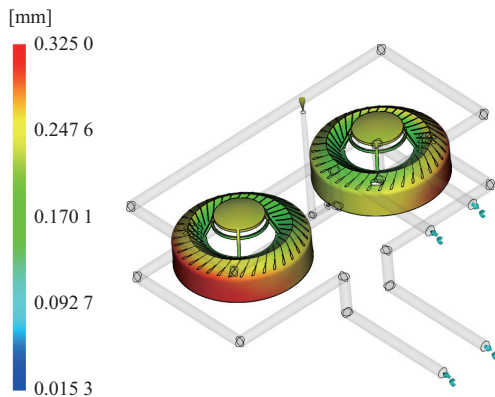


图11 烟雾报警器外壳的翘曲变形分析结果

Fig. 11 Analysis results of warpage deformation of smoke alarm housing

4 注塑工艺参数优化

为准确获取注塑工艺参数与翘曲变形量之间的非线性映射关系,借助BP神经网络强大的非线性拟合能力,构建了二者间的数学模型,再结合GA遗传算法全局择优特性可以解决注塑工艺参数优化的非线性复杂函数寻优问题^[18-19]。

4.1 BP神经网络构建

BP神经网络是一种典型的多层前馈神经网络,其信号沿正向传递,而误差则沿反向传播,工作机制表述为:输入层样本数据经隐含层神经元传递至输出层,当期望结果达不到预期输出会计算出预测误差并反向传导,通过多次迭代调整各层神经元连接权重,以均方误差最小值为目标输出期望结果。

BP神经网络模型的输入层神经元由模具温度、熔体温度和注射时间三个工艺参数构成,输出层包含1个神经元,对应塑件的翘曲变形量。隐含层的

节点数通常通过经验公式确定,见式(1)。隐含层节点数过少易欠拟合,过多则引发拟合和训练效率下降,需平衡模型精度与泛化能力^[19]。通过试错法发现,当隐含层的节点数为8时,BP神经网络训练后获得最小均方误差。图12为构建的BP神经网络模型,采用3-8-1模型结构,以此提高训练精度。

$$s = \sqrt{R + K} + a \quad (1)$$

式中: s 为隐含层节点数; R 为输入层节点数; K 为输出层节点数; a 为常数,取值1~10。

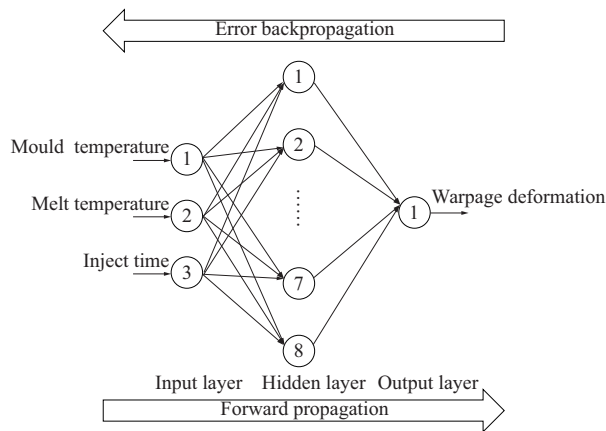


图12 BP神经网络模型结构

Fig. 12 Model structure of BP neural network

设置模具温度为30、50、70℃;选择熔体温度为200、220、240℃;选择注射时间为1.0、1.4、1.8、2.2 s,采用Moldflow软件对塑件浇注过程进行填充、保压、冷却、翘曲分析,随后统计36组模拟得到的翘曲变形量,结果列于表1。

为使神经网络模型预测结果更加精准,随机选取30组数据构成训练样本集,其余6组作为预测样本集。在BP神经网络训练过程中,训练函数采用trainlm函数,输入层传递函数选用非线性的tansig函数,输出层传递函数选用线性的purelin函数。整个计算过程基于拟牛顿算法,该算法收敛迅速、迭代步数较少,设定最大训练次数为300次,目标最小误差设置为0.00001。为缩小输入与输出变量的取值范围,加快网络迭代收敛并提升计算精度,依据公式(2)对原始数据集进行归一化处理,使所有数据转化为0到1之间的数^[8,20]。

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_i$ 为归一化后的样本数据; x_i 为输入或输出数据; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为数据的最大值与最小值。

图13为测试样本集翘曲变形量的仿真值和网

表1 模拟仿真结果

Tab. 1 Simulation results

No.	Mould temperature/℃	Melt temperature/℃	Inject time/s	Warp deformation/mm
1	30	200	1.0	0.340 4
2 [#]	30	200	1.4	0.312 8
3	30	200	1.8	0.117 4
4	30	200	2.2	0.129 6
5	30	220	1.0	0.338 5
6	30	220	1.4	0.306 1
7	30	220	1.8	0.289 5
8	30	220	2.2	0.115 4
9 [#]	30	240	1.0	0.338 2
10	30	240	1.4	0.325 7
11	30	240	1.8	0.314 7
12	30	240	2.2	0.297 2
13 [#]	50	200	1.0	0.339 8
14	50	200	1.4	0.309 0
15	50	200	1.8	0.118 1
16	50	200	2.2	0.127 2
17	50	220	1.0	0.338 4
18	50	220	1.4	0.305 9
19 [#]	50	220	1.8	0.289 2
20	50	220	2.2	0.115 1
21	50	240	1.0	0.337 6
22	50	240	1.4	0.325 0
23	50	240	1.8	0.314 6
24	50	240	2.2	0.297 4
25	70	200	1.0	0.338 8
26	70	200	1.4	0.309 7
27 [#]	70	200	1.8	0.123 3
28	70	200	2.2	0.128 2
29	70	220	1.0	0.338 2
30	70	220	1.4	0.305 8
31	70	220	1.8	0.288 5
32 [#]	70	220	2.2	0.115 1
33	70	240	1.0	0.337 5
34	70	240	1.4	0.324 9
35	70	240	1.8	0.314 0
36	70	240	2.2	0.214 4

Notes: # denotes testing specimen.

络预测值结果对比。从图13可知,BP神经网络模型的预测结果与仿真值基本吻合,表明BP神经网络模型具有较高的准确性,能够较准确地反映变量之间的关系。

4.2 GA算法寻优

基于所建BP神经网络模型,建立工艺参数与翘曲变形量之间的函数映射关系。以翘曲变形量为适应度函数,选取熔体温度(A)、模具温度(B)及注射时间(C)三个工艺参数为决策变量,利用遗传算法的选择、交叉和变异操作,求解最小翘曲变形量及其对应的最优工艺参数。遗传算法相关参数设定

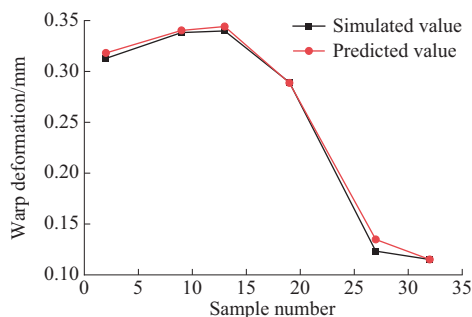


图13 测试样本集翘曲变形量的仿真值和网络预测值结果对比

Fig. 13 Comparison of the simulated and predicted of warpage deformation for testing dataset

为:初始种群规模 50,最大进化代数 150,交叉率 0.8,变异率 0.1。建立的最小翘曲变形量 $f_{\min}$ 的数学模型如式(3)所示。

$$f_{\min} = f(A, B, C) \begin{cases} 30 \leq A \leq 50 \\ 200 \leq B \leq 240 \\ 1.0 \leq C \leq 2.2 \end{cases} \quad (3)$$

通过遗传算法全局寻优,得到最优工艺参数组合:模具温度 30 °C、熔体温度 200 °C、注射时间 1.915 s。将其输入 Moldflow 软件进行翘曲变形分析,结果如图 14 所示,此时翘曲变形量为 0.113 2 mm,相比于初始工艺参数翘曲变形量 0.325 0 mm 降低了 65.17%,验证了工艺参数优化算法的可靠性。

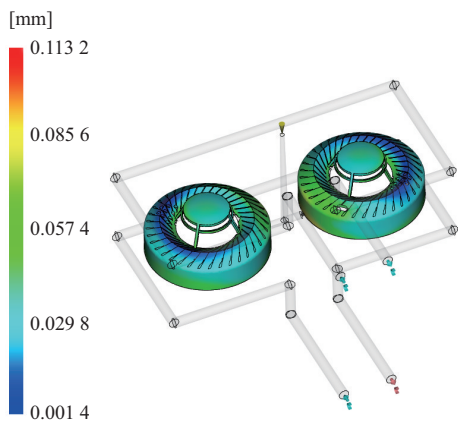


图14 优化工艺翘曲变形分析结果

Fig. 14 Analysis result of optimized warpage deformation

5 结论

(1)针对带多向内侧卡扣 ABS 材质的烟雾报警器薄壁外壳塑件,完成了一模二腔注塑模具整体方案设计,设计拉-推复合递进式脱模机构,通过定模拉扣与动模拉板的时序配合,先完成 2 mm 行程的内侧抽芯动作,再通过 12 根均衡排布的顶杆实现塑件平稳整体脱模,同步完成隐蔽式点浇口浇注系统与对称循环冷却系统的匹配设计,有效解决了该类

塑件脱模难度大、外观面无成型痕迹要求高、熔体填充不均、冷却失衡的工程难题。

(2)以塑件翘曲变形量为优化指标,将模具温度、熔体温度、注射时间为关键影响参数,构建了 3-8-1 型 BP 神经网络模型,模型预测结果与仿真值高度吻合,可精准表征注塑工艺参数与翘曲变形的内在关联。经遗传算法全局寻优的结果表明,最优工艺参数为:模具温度 30 °C、熔体温度 200 °C、注射时间 1.915 s。

(3)经 Moldflow 软件验证,塑件于最优工艺参数条件下的最大翘曲变形量为 0.113 2 mm,较初始工艺参数下的 0.325 0 mm 降低了 65.17%,显著降低塑件翘曲变形缺陷,提升产品尺寸精度与成型合格率,有效提高生产效率、降低试模成本。

参考文献

- [1] 林朗.工程塑料在电气设备方面的应用[J].塑料工业,2024,52(2):187.
LIN Lang. Application of engineering plastics in electrical equipment[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(2):187.
- [2] 刘勇奇,罗文彬.工程塑料在智能家居设计中的应用[J].塑料工业,2024,52(9):176-177.
LIU Yongqi, LUO Wenbin. Application of engineering plastics in smart home design[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(9):176-177.
- [3] 任佳俊,孙文选,杨冰倩,等.浅析注塑模具技术在当下的应用及未来发展[J].南方农机,2018,49(23):186.
REN Jiajun, SUN Wenxuan, YANG Bingqian, et al. Analysis on the application and future development of injection mold technology at present[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(23):186.
- [4] 周孝林.我国注塑模具关键技术的应用分析[J].现代经济信息,2016(7):356.
ZHOU Xiaolin. Application analysis of key technologies of injection mould in China[J]. Modern Economic Information, 2016(7):356.
- [5] 郭晓鑫.注塑模 CAD/CAE/CAM 技术的发展和应[J].现代制造技术与装备,2020,56(6):161-162.
GUO Xiaoxin. Development and application of injection mold CAD/CAE/CAM technology[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, 56(6):161-162.
- [6] 江丽珍,杨建荣,黄凌森,等.基于 CAE 的座椅托板注塑模具设计及成型工艺优化[J].合成树脂及塑料,2025,42(1):59-63, 86.
JIANG Lizhen, YANG Jianrong, HUANG Lingsen, et al. Design of injection mold and optimization of forming process for seat pallet based on CAE[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2025, 42(1):59-63, 86.
- [7] 张晓光,孟泉,程志超.基于 Moldflow 的无人机探照灯灯筒模流

- 分析[J].合成树脂及塑料,2025,42(6):59-63.
- ZHANG Xiaoguang, MENG Xiao, CHENG Zhichao. Mold flow analysis for UAV searchlight based on Moldflow[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2025, 42(6):59-63.
- [8] 李敏,李显宁.基于BP神经网络的车门内饰板注塑成型工艺参数优化[J].合成树脂及塑料,2025,42(6):64-67.
- LI Min, LI Xianning. Optimization for injection molding process parameters of car door interior panels based on BP neural network[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2025, 42(6):64-67.
- [9] 黄关山,朱金婷.基于响应面代理模型及遗传算法的汽车引擎盖注塑成型工艺优化[J].塑料科技,2024,52(12):125-128.
- HUANG Guanshan, ZHU Jinting. Optimization of car hood injection molding process based on response surface surrogate model and genetic algorithms[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(12):125-128.
- [10] 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 Rongchuan, 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.
- [11] 高洪晨,薛松,肖梦曦,等.基于正交试验与BP神经网络-遗传算法的空气净化器外壳注塑工艺参数优化[J].精密成形工程,2023,15(8):204-210.
- GAO Hongchen, XUE Song, XIAO Mengxi, et al. Optimization of air purifier shell injection molding process parameters based on orthogonal experiment and BP neural network-genetic algorithm[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(8):204-210.
- [12] 王晓东,王权,郑佳玉,等.基于GA-BP神经网络的注塑质量与能耗的工艺参数优化[J].工程塑料应用,2023,51(2):67-73.
- WANG Xiaodong, WANG Quan, ZHENG Jiayu, et al. Optimization of injection molding parameters for quality and energy consumption based on genetic algorithm and BP neural network[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):67-73.
- [13] 王静,刘浩,陈川,等.大型复杂薄壁汽车门板热流道注塑模全3D结构设计[J].工程塑料应用,2025,53(11):154-160.
- WANG Jing, LIU Hao, CHEN Chuan, et al. Full 3D structural design of hot runner injection mould for large and complex thin-walled automotive door panels[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11):154-160.
- [14] 田玉晶,董浩,孙晓宇.热敏打印机底壳注塑模具设计及工艺优化[J].塑料科技,2025,53(1):152-156.
- TIAN Yujing, DONG Hao, SUN Xiaoyu. Injection mold design and molding process optimization of thermal printer bottom shell[J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(1):152-156.
- [15] 石波,郝加杰.汽车雾灯装饰盖倒装双色注塑模设计[J].工程塑料应用,2022,50(2):112-116,122.
- SHI Bo, HAO Jiajie. Design of inverted double color injection mold for automobile fog lamp decoration cover[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):112-116, 122.
- [16] 张广冬,黄翔.以制品几何精度为目标的塑料挤出模具优化设计方法[J].机械工程学报,2023,59(8):142-150.
- ZHANG Guangdong, HUANG Xiang. Optimization design method of plastic extrusion die for product geometric accuracy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(8):142-150.
- [17] 周俊杰,陈秋凡,冯文,等.基于Moldflow的排水泵过滤网注塑工艺优化与模具设计[J].工程塑料应用,2024,52(1):109-115.
- ZHOU Junjie, CHEN Qiufan, FENG Wen, et al. Injection molding process optimization and mold design of drainage pump filter based on Moldflow[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1):109-115.
- [18] 林煌旭,孔选,陆将男,等.基于GA-BP算法的汽车前端框架翘曲变形优化及验证[J].工程塑料应用,2025,53(1):90-97.
- LIN Huangxu, KONG Xuan, LU Jiangnan, et al. Optimization and verification on warping deformation of automotive front-end frame based on GA-BP algorithm[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1):90-97.
- [19] 杨智勇,陶源彪,陈奕帆,等.基于GA-BP神经网络的G20CrNi₂MoA轴承套圈渗碳热处理工艺优化[J].清华大学学报(自然科学版),2026,66(2):335-345.
- YANG Zhiyong, TAO Yuanbiao, CHEN Yifan, et al. Optimization of carburizing heat treatment process for G20CrNi₂MoA bearing ring based on genetic algorithm-backpropagation neural network[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2026, 66(2):335-345.
- [20] 张晗,王明伟,蔡世铭,等.基于贝叶斯正则化神经网络的卡车轮罩横梁注塑工艺多目标优化[J].工程塑料应用,2025,53(10):95-103.
- ZHANG Han, WANG Mingwei, CAI Shiming, et al. Multi-objective optimization of injection molding processes for truck wheel cover cross beams based on Bayesian regularized neural networks[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10):95-103.