

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.017

汽车头枕发泡成型模具及环形自动化成型机设计

刘义考¹, 张琦²

(1. 湖州职业技术学院, 浙江湖州 313000; 2. 湖州普沃思模具有限公司, 浙江湖州 313000)

摘要: 针对乘用车头枕聚氨酯发泡塑料件自动化生产需求, 设计了一套发泡成型模具及12工位转盘式环形流水线成型机。选用半硬质聚氨酯泡沫体系作为发泡材料(模塑密度110~130 kg/m³、25%压陷硬度280~380 N、回弹率≥55%), 对模腔发泡过程进行了CAE仿真分析, 考察发泡时间、气泡半径分布、模腔温度场及压力场等关键参数。设计以上、下模腔体为核心的发泡模具, 上模腔体采用掀盖式开模结构, 下模腔体设置预埋钢杆骨架定位块及弹夹压紧机构; 开发了集成送料机构、注料机构和7个辅助机械手的12工位转盘式环形生产线(转盘外半径1 095 mm, 相邻工位夹角30°)。仿真结果表明, 充填过程平稳, 气泡平均半径为0.08~0.18 mm且分布均匀, 模腔最高温度为78~85 °C, 模腔最大压力约为0.15 MPa。采用样机试生产200件产品, 模塑密度为115~125 kg/m³, 25%压陷硬度为295~365 N, 预埋钢杆骨架位置偏差在-0.3~0.3 mm范围内, 最终成形产品合格率达98.5%。该设计将发泡模具与环形自动化成型机有机结合, 实现了头枕发泡塑料件从注料到取件的全流程自动化生产, 单件节拍周期为45 s, 理论产能为80件/h, 为同类产品模具及自动化成型机的开发和建设提供了完整的技术方案。

关键词: 聚氨酯发泡; 头枕模具; 环形流水线; 仿真分析; 转盘式成型机

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0156-09

Design of foaming mould and ring-shaped automated molding machine for automotive headrests

LIU Yikao¹, ZHANG Qi²

(1. Huzhou Vocational and Technical College, Huzhou 313000, China; 2. Huzhou Puresci Mould Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: Aiming at the automated production requirements of polyurethane foam plastic parts for passenger car headrests, a foaming mould and a turntable-type ring-shaped production line molding machine with 12 stations were designed. Semi-rigid polyurethane foam system with molded density of 110–130 kg/m³, 25% indentation load deflection of 280–380 N and rebound resilience of no less than 55% was selected as the foaming material. Simulation analysis with computer aided engineering (CAE) was conducted on the cavity foaming process to analyze the key parameters such as foaming time, bubble radius distribution, temperature field and pressure field of the cavity. A foaming mould consisting of upper and lower cavities was designed, with the upper cavity adopting a clamshell mould-opening mechanism and the lower cavity equipped with positioning blocks for the pre-embedded steel structural rod frame and clip-type clamping mechanisms. A turntable-type ring-shaped production line with 12 stations (turntable outer radius of 1 095 mm, adjacent station included angle of 30°) was developed, integrating a feeding mechanism, an injection mechanism and seven auxiliary manipulators. Simulation analysis results demonstrate stable filling behavior, uniform bubble distribution with an average radius of 0.08–0.18 mm, maximum cavity temperature of 78–85 °C, and maximum cavity pressure of approximately 0.15 MPa. Pilot production of 200 parts indicates a molded density of 115–125 kg/m³, 25% indentation load deflection of 295–365 N, pre-embedded steel structural rod frame position deviation between -0.3 mm and +0.3 mm, and the qualification rate of the final molding product reaches 98.5%. This design effectively combines the foaming mould with the ring-shaped automated molding machine to achieve fully automated production of headrest foam parts from material injection to part removal, with a

基金项目: 2024年湖州技能大师工作室立项项目(湖人社发[2024]29号), 湖州职业技术学院2026年横向课题(华和实业油缸阀板设计与加工立项项目)

通信作者: 刘义考, 学士, 高级实验师, 从事机械设计、模具设计与制造研究和教学

收稿日期: 2026-07-22

引用格式: 刘义考, 张琦. 汽车头枕发泡成型模具及环形自动化成型机设计[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9): 156–164.

LIU Yikao, ZHANG Qi. Design of foaming mould and ring-shaped automated molding machine for automotive headrests[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9): 156–164.

single-part cycle time of 45 s and a theoretical production capacity of 80 pieces/h, providing a complete technical solution for the development and construction of moulds and automated molding machines for similar products.

Keywords: polyurethane foaming; headrest mould; ring-shaped production line; simulation analysis; turntable-type molding machine

聚氨酯是一类主链上含有重复氨基甲酸酯基团($-\text{NH}-\text{COO}-$)的高分子材料,通过多元醇与多异氰酸酯的加成聚合反应制得。聚氨酯发泡成型的基本原理是:异氰酸酯与多元醇反应生成氨基甲酸酯聚合物,同时水与异氰酸酯反应原位产生 CO_2 气体,气体在聚合物基体中成核、长大,形成微孔泡沫结构^[1-2]。该工艺的核心优势在于可通过调整配方与工艺参数,实现从软质泡沫到硬质泡沫的宽性能范围调控,且发泡压力较低(通常为0.05~0.2 MPa),对模具的强度要求远低于注射成型。

聚氨酯发泡成型工艺在汽车内饰领域应用广泛,主要用于座椅、头枕、扶手、仪表板、方向盘等部件的生产^[3]。近年来,CAE仿真技术在聚氨酯发泡工艺优化中得到快速发展。Moldex3D化学发泡模块通过考虑熔胶在模腔中的固化动力学和发泡动力学,可准确预测充填和发泡阶段的动态行为^[4]。Beverte等^[1]研究了密封模具中硬质聚氨酯泡沫块的密度分布规律;Ren等^[5]探讨了模具热导率对聚氨酯海绵性能的影响机理;Wu等^[6]建立了柔性聚氨酯泡沫收缩模型用于罩杯成型过程控制。在模具设计方面,曹伟^[7]、刘子睿等^[8]对聚氨酯发泡模具防粘涂料性能进行了系统分析;王林富等^[9]对聚氨酯发泡模具加热管道进行了热分析与优化设计。在生产层面,金仁祥等^[10]介绍了一种新型汽车内饰件聚氨酯发泡生产线,圆形传送系统已广泛应用于汽车座椅和头枕的聚氨酯泡沫件生产。

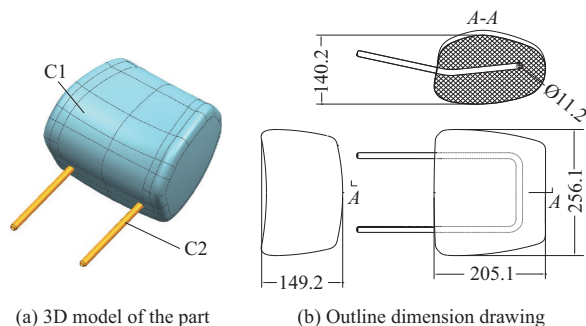
然而,现有研究大多将模具设计与生产线设计割裂开来,缺乏从塑件结构→CAE分析→模具设计→自动化生产线的系统性设计方法。此外,针对带有预埋钢杆骨架的头枕发泡塑件,其模具的预埋件定位精度、开合模自动化适配性等方面仍有待深入研究^[7,11-12]。

本文以某乘用车头枕发泡塑件为对象,系统开展从塑件结构分析、材料选型、CAE仿真验证到模具设计及12工位转盘式环形流水线成型机设计的完整研究,建立了一套面向自动化生产的头枕发泡成型系统解决方案,为同类产品的模具及生产线开发提供参考。

1 汽车头枕预埋钢杆骨架塑件分析

1.1 塑件结构

某汽车头枕为预埋钢制杆骨架发泡塑件,如图1所示。塑件由聚氨酯发泡体(C1)构成,中心部位预埋钢制结构杆架(C2,直径11.2 mm),用于头枕与座椅靠背的连接安装。塑件外形包装尺寸为149.2 mm×205.1 mm×256.1 mm,总体积5 389.9 cm³。为便于脱模,塑件拔模角度设计大于5°。该塑件体积较大、壁厚较厚,采用注射成型方式难以实现,适合采用聚氨酯浇注发泡成型工艺。



(a) 3D model of the part (b) Outline dimension drawing

C1—Polyurethane foam; C2—Pre-embedded steel structural rod frame

图1 汽车头枕发泡件示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of automotive headrest foam part (unit: mm)

汽车头枕作为乘用车的重要安全与舒适性部件,其发泡塑件结构设计需重点关注以下方面:壁厚分布方面,头枕发泡体壁厚较大且分布不均,中心区域厚度可达50 mm以上,需确保发泡过程中热量传递均匀;材料舒适性方面,需兼顾头部承托的柔软感与足够的支撑刚度;冲击缓冲性方面,头枕需在车辆碰撞时有效吸收冲击能量,保护乘员颈部,泡沫回弹率通常要求 $\geq 50\%$;外观造型与脑颈保护方面,塑件轮廓需符合人体工程学设计,前部曲面与后脑部贴合。

1.2 塑件材料选用

塑件选用 Covestro(科思创)公司 Bayfill® EA 6004 半硬质聚氨酯泡沫体系作为发泡材料。该材料为双组分全配方体系,专为汽车内饰吸能应用设计,A组分为改性二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)预聚体,B组分为聚醚多元醇、催化剂、泡沫稳定剂、发泡剂(水)及交联剂的混合物。材料典型性能参数见表1。

表1 Bayfill® EA 6004 发泡材料典型性能参数

Tab. 1 Typical properties of Bayfill® EA 6004 foam material

Properties	Value
Free-rise density/(kg·m ⁻³)	96
Molded density/(kg·m ⁻³)	110~130
25% indentation load deflection (ILD)/N	280~380
Rebound resilience/%	≥55
Tensile strength/ kPa	≥180
Elongation at break/%	≥120
Compression set (70 °C, 22 h)/%	≤10
Service temperature range/°C	-40 to 90

该材料具有以下特点:(1)能量吸收性能优异,该泡沫在撞击后能快速恢复形状,适合头枕的乘员头部冲击防护需求;(2)满足汽车内饰严格标准,符合HOLDEN HN 1152-2012及各大主机厂关于挥发性有机物(VOC)、雾化等环保要求;(3)半硬质特性适中,既提供足够的支撑刚度,又保证良好的乘坐舒适性;(4)加工适应性好,适用于低压浇注发泡工艺,与模具及生产线工艺匹配良好。

1.3 塑件成型过程及设备要求

塑件成型采用反应注射成型(RIM)工艺中的低压浇注发泡方法成型。具体的成型过程为:将A组分(改性MDI)与B组分(多元醇混合物)按设定配比(异氰酸酯指数=1.05~1.10)分别计量后,在混合头内高速撞击混合,混合均匀的液态反应物经浇注口注入预热至40~60 °C的模具模腔中;注入模腔后,反应物同时发生两种竞争反应,一是异氰酸酯与多元醇的凝胶反应,形成聚氨酯高分子网络,二是异氰酸酯与水的发泡反应,原位产生CO₂气体;气体在反应物中成核、长大,推动泡沫体膨胀并充满整个模腔;发泡过程中释放的反应热使模腔温度升高,加速固化反应;经3~8 min的保压固化后,泡沫体达到足够的交联程度和强度,即可开模取件。

基于此,塑件成型的设备要求主要包括:(1)双组分计量输送系统,精度±1%,流量范围200~800 g/s;(2)高压混合头,混合压力10~20 MPa;(3)模温控制系统,模温控制精度±2 °C,范围30~80 °C;(4)发泡模具,需承受0.05~0.2 MPa发泡压力,具备良好导热性[热导率≥150 W/(m·K)];(5)自动化辅助设备,包括预埋件安装、脱模剂喷涂、开合模、取件等自动化装置。

2 CAE分析

为验证塑件发泡成型的可行性并优化工艺参数,采用Moldex3D化学发泡模块对模腔发泡过程进行CAE仿真分析^[4]。仿真考虑了熔胶在模腔中的固化动力学和发泡动力学,通过求解质量守恒、动

量守恒、能量守恒及组分输运方程,预测充填和发泡阶段的动态行为。

CAE分析的基本输入参数如下:材料模型选用Bayfill® EA 6004的物性数据,模腔体积5 389.9 cm³,浇注口设于塑件底部中心位置;模具初始温度设定为45 °C,环境温度25 °C;总注入量按模腔体积的105%设定(补偿发泡过程中的收缩与排气损失),注入时间3.5 s;发泡剂为水(占B组分质量的2.5%~3.5%),CO₂产气量通过化学反应计量计算;重力方向沿塑件高度方向向下,模腔排气位置设于塑件最高点及分型面周缘。部分CAE分析结果如图2所示,主要分项结果分析如下。

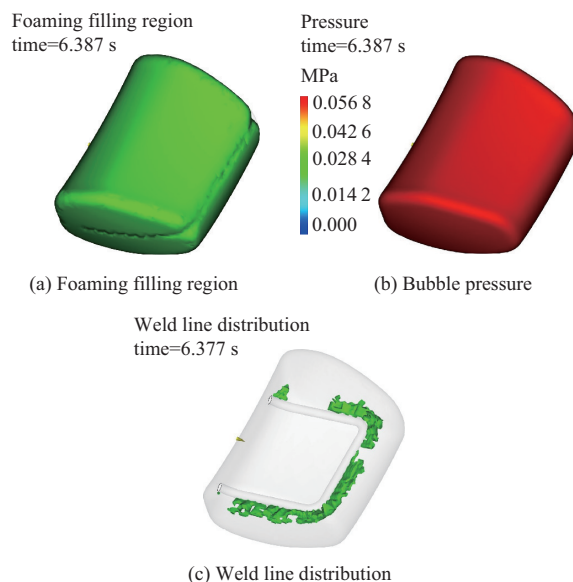


图2 CAE分析结果

Fig. 2 CAE simulation results

泡沫体完全充满模腔的时间约为42 s,其中注入阶段3.5 s,发泡膨胀阶段约38.5 s。过程中,发泡时间 $t=6.387$ s时充填状态如图2a所示,发泡前沿推进速度在模腔中部较快、边角区域较慢,符合聚氨酯发泡的典型流动特征。

充填顺序为由底部浇口向四周及顶部推进,最后充填区域为塑件顶部两侧,该区域设置了排气孔以排出残余空气。充填过程无明显的空气滞留区,表明浇口位置和排气设计较为合理^[13-16]。

模腔中心区域气泡平均半径0.12~0.18 mm,边壁区域因模壁冷却作用气泡稍小(0.08~0.12 mm),整体分布均匀,无局部粗大泡孔。

气泡内压力在发泡初期为0.12~0.15 MPa,随着发泡进行逐渐降低至0.05~0.08 MPa,在发泡时间 $t=6.387$ s时压力状态如图2b所示,压力分布均匀,有

利于泡孔结构的均一性^[17-19]。

发泡反应放热使模腔温度从初始 45 °C 上升至最高 78~85 °C(中心区域),模壁附近温度 55~65 °C。温度梯度控制在合理范围内,未出现局部过热(>100 °C)区域,可避免泡沫烧芯。

熔接线主要分布在塑件顶部和侧面棱线处,如图 2c 所示(发泡时间 $t=6.377$ s),这些位置设置了合理的排气结构,熔接强度满足要求。

发泡过程中模腔最大压力约为 0.15 MPa,远低于注射成型的模腔压力(10~30 MPa),对模具的强度要求较低。

模拟显示模腔内泡沫体最终质量为 620~650 g(对应模塑密度 110~130 kg/m³),与理论计算值吻合良好。

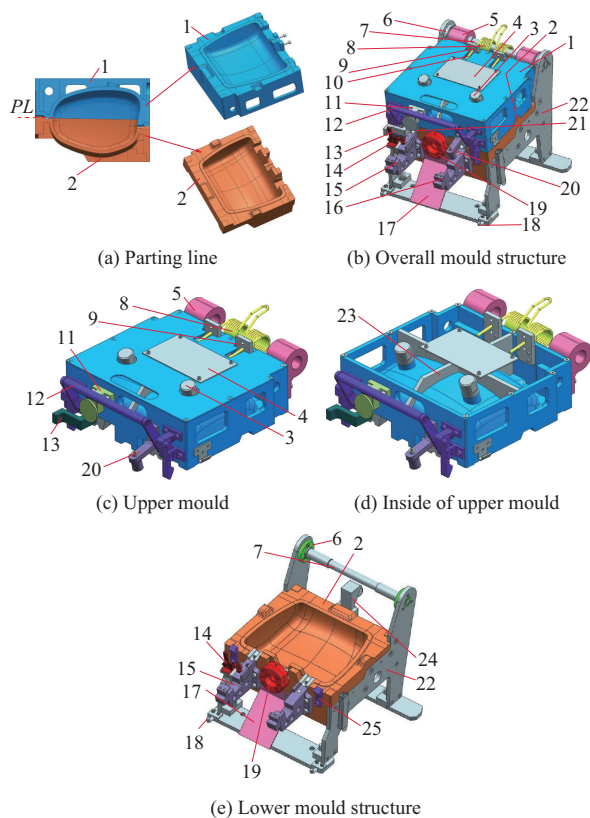
综合 CAE 分析结果可知:塑件在选定材料和工艺条件下的发泡充填过程平稳,气泡分布均匀,温度场和压力场均处于合理范围,成型可行性良好^[20-22]。CAE 分析同时验证了浇口位置、排气设计的合理性,为后续模具结构设计提供了可靠依据。

3 头枕发泡模具设计

3.1 头枕发泡模具分型及结构

头枕发泡模具设计基于以下依据:(1)分型面 PL 选在塑件最大外缘轮廓处,确保塑件能顺利从模具中取出,同时便于预埋件的安装定位;(2)脱模斜度设计为 5°;(3)在模腔最高点和分型面周缘设置排气槽,排气槽宽度 0.5~2 mm,深度 0.05~0.1 mm;(4)强度设计中,发泡压力约为 0.15 MPa,型腔壁厚按薄壁压力容器公式校核,并结合加强筋提高刚度;(5)采用强力风冷的冷却方式,在开模后由机械手夹持高压风嘴对模具进行吹风冷却。发泡模具设计结构如图 3 所示,分型以塑件的最大外缘轮廓为分型面(PL 面),获得上模腔体 1、下模腔体 2,如图 3a 所示。以分型面 PL 为边界,模具分为上模部分和下模部分。

上模部分主要包括上模腔体 1、磁力块 3、弹簧压板 4、铰接座 5、轴承 6、转动轴 7、开模辅助动力弹簧 8、压簧块 9、纵向肋板 10、缓冲器 11、锁模柄 12、弹夹防开锁板 13、弹夹 14、横向肋板 23。上模腔体 1 设置横向肋板 23 和纵向肋板 10 用以增强型腔结构强度,型腔壁厚按发泡压力 0.5 MPa 进行强度校核,经计算壁厚 15 mm 配合加强肋可满足强度要求。上模腔体 1 的侧壁安装 2 个铰接座 5,通过铰接



PL —Parting line; 1—Upper cavity; 2—Lower cavity; 3—Magnetic block; 4—Spring plate; 5—Hinged seat; 6—Bearing; 7—Rotating shaft; 8—Assisted mould-opening power spring; 9—Spring block; 10—Longitudinal rib; 11—Buffer; 12—Locking handle; 13—Clip anti-loosening plate; 14—Clip; 15, 16—Pre-embedded steel structural rod frame positioning blocks; 17—Baffle plate; 18—Latching foot; 19—Sprue bushing; 20—Press rod elastic seat; 21—Positioning magnetic block; 22—Lower mould support; 23—Transverse rib; 24—Spring retaining seat; 25—Lower latch.

图3 发泡模具设计结构

Fig. 3 Design structure of foaming mould

座 5,上模腔体 1 可以绕安装在下模支架 22 上的转动轴 7 旋转,实现上模腔体 1 与下模腔体 2 的掀盖式开模。轴承 6 用于保证该动作转动灵活。开模辅助动力弹簧 8 用于上模腔体 1 掀开时的辅助动力驱动,弹簧的一端经弹簧压板 4 压住后固定在上模腔体 1 内,另一端的扳手柄固定在下模一侧的弹簧扣座 24 上。磁力块 3 为磁力吸紧块,确保开模后上模腔体 1 可靠地处于开模状态,不发生合模误动作。缓冲器 11 用于送料机构的推进缓冲。锁模柄 12 与下模上的下扣钩 25 配合,用于模具闭合时的锁模。弹夹防开锁板 13 用于弹夹 14 的防松脱。压杆弹胶座 20 用于压紧塑件内预埋钢杆骨架的一端,弹夹 14 用于压紧塑件内预埋钢杆骨架的另一端。

下模部分主要包括下模腔体 2、弹夹 14、钢杆骨

架定位块15和16、挡料板17、扣脚18、浇口套19、压杆弹力胶座20、定位磁吸块21、下模支架22、弹簧扣座24、下挂钩25。钢杆骨架定位块15和16为对称布置的2组,用于安装预埋钢杆骨架,并通过弹夹14、压杆弹力胶座20分别压紧其两端。下挂钩25有2件,分别对应于锁模柄12的两端扣钩扣合连接,用于模具闭合锁模。浇口套19用于聚氨酯进料,其内孔直径12 mm,与注料机构喷嘴匹配。扣脚18用于模具在流水线机架转盘上的快速扣紧安装。挡料板17用于防止发泡原料在浇注时外溢。下模支架22用于下模腔体2的支撑以及上模转动零件的安装。

3.2 模具材料选用

上模腔体1和下模腔体2选用铝合金6061-T6作为模具材料,主要基于如下考虑:(1)优异的导热性,6061铝合金热导率约为 $167\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,远高于模具钢 $[45\sim 55\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$,能快速传导发泡反应热,缩短固化周期,提高生产效率;(2)轻量化,铝合金密度约为 $2.7\text{ g}/\text{cm}^3$,仅为钢材的1/3,大幅减轻模具质量,便于在流水线上快速装卸及开合模操作;(3)良好的加工性,铝合金切削加工性能优良,便于复杂型腔的数控加工;(4)表面处理适应性,通过硬质阳极氧化处理可在表面形成致密的 Al_2O_3 陶瓷层,显著提高耐磨性和抗黏附性,有效解决聚氨酯原料粘模问题。模具型腔表面粗糙度(R_a)须达到 $0.02\sim 0.05\text{ }\mu\text{m}$,确保制品表面光洁。

3.3 模具发泡成型工作原理

模具工作原理如下。

(1)开模时,上模一侧的锁模柄12被机械手拉住先往外扳动,其下端2个扣钩与下模上的2个下挂钩25脱钩。脱钩后,锁模柄12被机械手往上提,在开模辅助动力弹簧8的张力驱动下,上模腔体1及其上的其他零件一起绕转动轴7的轴中心线转动,从而打开模具,直到磁力块3被流水线机架转盘龙门架上的强磁铁吸住,而保持在终了位置。闭模前,上模腔体1、下模腔体2的内壁先被清理干净,然后喷涂脱模剂。随后预埋钢杆骨架被机械手放入钢杆骨架定位块15和16上,先被弹夹14锁紧固定(单边),然后机械手扳动锁模柄12驱动其复位闭合。

(2)闭合时,压杆弹力胶座20压住预埋钢杆骨架一端,而后锁模柄12的下端2个扣钩与下模上的2

个下挂钩25扣合,完成模具闭合。

(3)模具闭合后,注料机构通过浇口套19注入液态聚氨酯料。注入量根据模腔体积和模塑密度计算,为 $620\sim 650\text{ g}$ 。注入完毕,浇口套19的锁口机构自动锁闭,使模腔形成封闭模腔,等待液体聚氨酯料发泡。发泡过程中,模腔内产生的 CO_2 气体通过分型面周缘的排气槽和塑件最高点的排气孔排出。发泡完成后,开模取件,完成一个工作循环。

4 环形流水线成型机设计

为实现塑件的连续自动化生产,设计了一种12工位转盘式环形流水线成型机,如图4所示。

4.1 基本结构

环形流水线成型机结构分为以下几个部分:取送原料机构、12工位转盘机构、12副头枕发泡模具、7个辅助机械手。

4.1.1 取送原料机构

主要包括送料机构和注料机构。配料电机驱动输送泵将配比好的A、B组分原料输送给注料机构。注料机构的油缸动作驱动注射机构的喷嘴将原料通过模具上的浇口套注入模腔。送料机构和注料机构通过导轨架、支架等组合成的架子安装在转盘底座上。

4.1.2 12工位转盘机构

12个工位分别为工位A1至A12。工位A1为模具闭合后的注料工位,按逆时针转动方向布置A2至A12。12个工位的承载板为12块模具承载板,两个模具承载板之间使用结合板进行扇形间隔连接。每块模具承载板上设置有1个磁吸架,其上设置吸合磁铁,用于模具上模腔体打开时吸合磁力块。同时,模具承载板设置有2个拉扣,与模具上的2个扣脚扣合,用于模具在模具承载板上的扣紧安装。12块模具承载板均布置在转盘圆周上,两个模具承载板中心线夹角为 30° 。转盘外半径 $R_1=1\,095\text{ mm}$,安装结合板后最大外缘半径 $R_2=1\,598\text{ mm}$ 。转盘安装在垫盘上,垫盘安装在支撑圆台上。垫盘由中心齿轮轴驱动,中心齿轮轴由伺服驱动电机通过蜗杆减速箱驱动。

驱动系统设计计算:选用西门子1FK7系列伺服驱动电机,额定功率 5.5 kW ,额定转速 $2\,000\text{ r}/\text{min}$,额定扭矩 $26.3\text{ N}\cdot\text{m}$ 。蜗杆减速箱采用双导程蜗杆传动,传动比 $i=60$ 。转盘上所有跟随其转动的零部件总质量 m 约为 780 kg 。转动惯量 J 按圆盘转动惯量

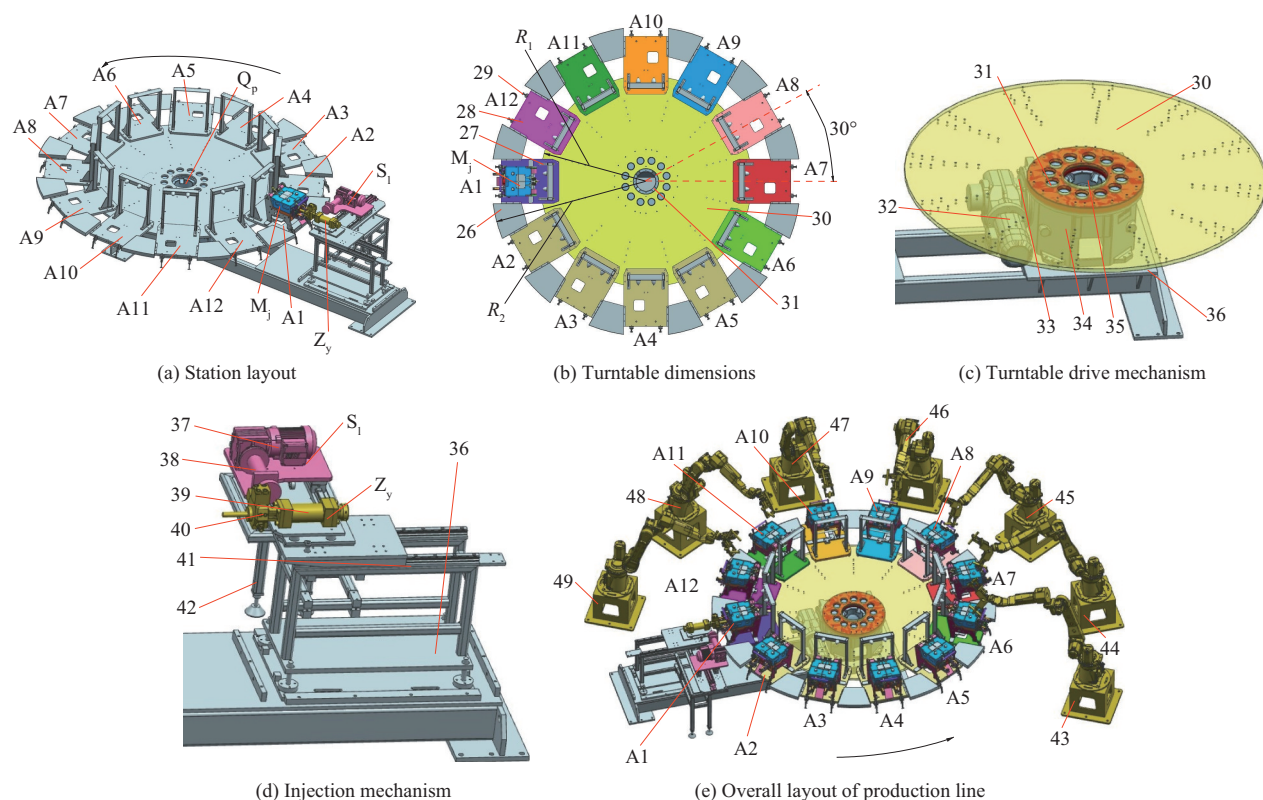


图4 12工位转盘式环形流水线成型机设计

Fig. 4 Design of turntable-type ring-shaped production line molding machine with 12 stations

公式估算,见式(1)。取等效回转半径 $R_e=0.9\text{ m}$,则 $J=315.9\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

$$J=\frac{1}{2}mR_e^2 \quad (1)$$

工位转换节拍时间设定为 45 s/工位 (转动时间 5 s ,定位停止时间 40 s),转盘角加速度 $\alpha=0.0209\text{ rad/s}^2$,启动转矩 $T=6.6\text{ N}\cdot\text{m}$,考虑摩擦及负载转矩(约 $15\text{ N}\cdot\text{m}$),总需求转矩约为 $21.6\text{ N}\cdot\text{m}$ 。经减速箱放大后($i=60$,效率 $\eta=0.75$),电机输出转矩需求值为 $0.48\text{ N}\cdot\text{m}$,远小于电机额定转矩 $26.3\text{ N}\cdot\text{m}$,选型满足要求。关键承载部件(转盘、垫盘、中心齿轮轴)的安全系数均按不低于3设计,齿轮轴采用40Cr合金钢(屈服强度 $\geq 785\text{ MPa}$),经强度校核满足要求。

4.1.3 12副头枕发泡模具

12个工位上,每个工位配置一副前述发泡模具。单副模具随着转盘的逆时针转动而完成一个塑件的发泡成型功能。

4.1.4 7个辅助机械手

为实现一副模具的完整成型功能,配置7个辅

助机械手(序号43~49)。各机械手选型如下:机械手43(风冷机械手)选用日本SMC公司的LEHZ系列电动夹爪配合高压风嘴,夹持力 30 N ;机械手44(开模机械手)选用瑞士ABB公司的IRB 1200小型工业机器人,负载 7 kg ;机械手45(取件机械手)选用瑞士ABB公司的IRB 1600小型工业机器人,负载 10 kg ,配备真空吸盘取件装置;机械手46(清扫机械手)选用日本SMC公司的LEHZ系列配合高压风嘴和毛刷;机械手47(装预埋件机械手)选用瑞士ABB公司的IRB 1200,配备视觉定位系统;机械手48(喷脱模剂机械手)选用日本SMC公司的LEHZ系列配合自动喷涂枪;机械手49(合模机械手)选用瑞士ABB公司的IRB 1200。所有机械手均由中央控制系统统一调度。

4.2 工作原理

以A1工位上的模具为例,工作过程如下。

(1)模腔注料(A1工位)。模具处于闭合锁模状态,注料机构通过浇口套向模腔注射进料,注入量

620~650 g,注入时间 3.5 s。进料完毕,浇口套阀门关闭。

(2)发泡成型(A1→A2→A3→A4→A5)。在伺服驱动电机驱动下,转盘逆时针旋转,模具按设定节拍(45 s/工位)由工位 A1 依次向 A2、A3、A4、A5 转移。转移过程中,模具内发泡成型逐步完成,总发泡时间约 3 min (4 个工位×45 s)。

(3)强风冷却(A5→A6)。模具由 A5 转移到 A6。机械手 43 的夹持风嘴使用高压空气(压力 0.6~0.8 MPa)对模具吹风冷却,冷却时间 40 s,将模具温度从约 80 °C 降至 50~55 °C。

(4)开模(A6→A7)。模具由 A6 转移到 A7。机械手 44 扳下锁模柄,在开模辅助动力弹簧驱动下将模具打开,上模腔体被磁力块吸合在磁吸架上保持开启状态。

(5)取件及检验(A7→A8)。模具由 A7 转移到 A8。机械手 45 将塑件从下模腔体中取出,并放置至检验工位。

(6)清扫(A8→A9)。模具由 A8 转移到 A9。机械手 46 的风嘴将上、下模腔体的残渣进行高压吹气

清扫。

(7)安装预埋钢杆骨架(A9→A10)。模具由 A9 转移到 A10。机械手 47 将钢杆骨架放置至模具的钢杆骨架定位块上,并扳动弹夹将钢杆骨架压紧。

(8)喷脱模剂(A10→A11)。模具由 A10 转移到 A11。机械手 48 向上、下模腔体的成型内壁上喷洒脱模剂。

(9)合模(A11→A12)。模具由 A11 转移到 A12。机械手 49 扳动锁模柄,将上模压至与下模闭合,锁模柄下端扣钩与下扣钩扣合锁紧。

(10)新工作循环(A12→A1)。模具由 A12 转移到 A1,重新开始第(1)至(9)步工作循环。

4.3 流水线动作时序

为确保各工位机械手和模具动作的协调性,本流水线采用时序控制,节拍周期为 45 s(含 5 s 转位和 40 s 定位停止时间)。单副模具从 A1 到 A12 完成全部工序后回到 A1,总循环时间为 540 s(9 min)。12 副模具同时并行工作,即每 45 s 完成一个塑件的注料,整线理论产能为 80 件/h。各工位的具体动作内容、持续时间及执行机构见表 2。

表 2 流水线各工位动作时序表

Tab. 2 Sequence of operations at each station in

Station	Action name	Action content	Action time/s	Actuating mechanism
A1	Mould cavity injection	Close the mould and inject the polyurethane mixture	3.5	Injection mechanism Z _y
A2	Initial foaming	The reactants foam and expand		
A3	Middle foaming	The foam body continues to grow		
A4	Late foaming	The foam basically fills the mould, and curing begins		
A5	Curing completed	Curing is basically complete		
A6	Forced air cooling	Cool with high-pressure air	40	Manipulator43
A7	Mould opening	Toggle the mould clamping handle and lift the upper mould	5	Manipulator44
A8	Part removal and inspection	Remove the molded part	5	Manipulator45
A9	Mould cavity cleaning	Blow off residue and flash	8	Manipulator46
A10	Insert installation	Place the locating block and press it firmly	10	Manipulator47
A11	Spraying release agent	Automatic spraying	5	Manipulator48
A12	Mould closing and clamping	Press down the upper mould and latch it	5	Manipulator49

5 工艺参数与生产验证

5.1 关键工艺参数

基于本机的关键工艺控制参数见表 3。

5.2 生产验证

为验证整套模具及流水线方案的实际可行性,在某汽车主机厂配套模具制造企业完成了样机试制与试生产,发泡成型模具如图 5a 所示。通过样机连续试生产 200 件头枕发泡塑件,发泡塑件如图 5b 所示,获得的关键指标如下:模塑密度为 115~125 kg/m³(目标值 110~130 kg/m³);25% 压陷硬度(ILD)为 295~365 N(目标值 280~380 N);对于外观缺

陷(气泡/烧芯/缺料),仅出现轻微表面气泡 3 件;对于预埋件位置偏差(λ), $-0.3\text{ mm}<\lambda<+0.3\text{ mm}$ (目标值 $-0.5\text{ mm}<\lambda<+0.5\text{ mm}$);批量检验后成形产品合格率为 98.5%。CAE 预测的模腔最高温度(78~85 °C)与实际测量温度(80~82 °C)偏差在 5% 以内;预测气泡半径(0.08~0.18 mm)与观测值(0.10~0.16 mm)基本吻合,验证了仿真模型的可靠性。

6 结论

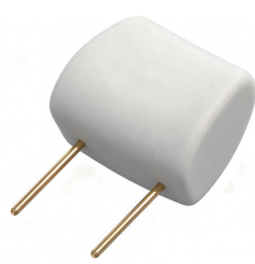
(1) 本文设计的汽车头枕发泡塑件选用 Covestro Bayfill® EA 6004 半硬质聚氨酯泡沫体系,模塑密度为 110~130 kg/m³,25% 压陷硬度为 280~

表3 关键工艺控制参数
Tab. 3 Key process control parameters

Process parameters	Control value	Remarks
Mould preheating temperature/°C	45±2	Station A12→A1
Component A temperature/°C	25±2	Modified MDI
Component B temperature/°C	25±2	Polyol mixture
Mixing pressure/MPa	15–20	High-pressure impingement mixing
Injection pressure/MPa	10–15	Mould cavity injection
Injection time/s	3.5	Metered injection
Injection weight/g	620–650	Corresponding to a molded density of 110–130 kg/m ³
Foaming time/s	~40	Station A1→A2
Curing time/min	~2.5	Station A2→A5
Cooling time/s	40	Station A6
Each station cycle time/s	45	Rotation 5 s + dwell 40 s



(a) Foaming mould



(b) Foamed plastic part

图5 发泡成型模具与塑件

Fig. 5 Foaming mould and plastic part

380 N,回弹率≥55%,满足乘用车头枕的安全与舒适性要求。

(2)基于Moldex3D化学发泡模块的CAE仿真分析表明:发泡充填时间约为42 s,气泡平均半径为0.08~0.18 mm且分布均匀,模腔最高温度为78~85 °C,无局部过热,模腔最大压力约为0.15 MPa。生产验证试验表明,CAE预测的模腔最高温度与实际测量温度偏差在5%以内;预测气泡半径(0.08~0.18 mm)与观测值(0.10~0.16 mm)基本吻合。各项指标均在合理范围内,验证了仿真模型的可靠性。

(3)设计的发泡模具以塑件最大外缘轮廓为分型面,上模腔体采用掀盖式开模结构,通过铰接座、转动轴和开模辅助动力弹簧实现自动开模;下模腔体设置钢杆骨架定位块和弹夹压紧机构,确保预埋钢杆骨架的精确定位。模具材料选用6061-T6铝合金,热导率为167 W/(m·K),兼顾导热性、轻量化和加工性。

(4)设计了12工位转盘式环形流水线成型机,转盘外半径为1 095 mm,12个工位沿圆周均布(夹角30°),集成送料机构、注料机构和7个辅助机械手,依次完成注料、发泡、风冷、开模、取件、清扫、装预埋件、喷脱模剂、合模等9个工序的自动化循环生

产。伺服驱动电机额定功率为5.5 kW,蜗杆减速箱传动比*i*=60,工位节拍周期为45 s,单副模具循环周期为9 min,整线理论产能为80件/h。

(5)本设计将发泡模具与环形流水线成型机有机结合,实现了汽车头枕发泡塑件从原料注入到成品取出的全流程自动化生产,为同类产品的模具开发及生产线建设提供了完整的技术方案。

参考文献

- [1] BEVERTE I, CABULIS U, ANDERSONS J. Estimation of density distribution in a rigid PU foam block manufactured in a sealed mold[J]. *Polymers*, 2026, 18(6). DOI:10.3390/polym18060733.
- [2] KONIORCZYK P, TRZYNA M, ZMYWACZYK J, et al. Study of polyurethane-polystyrene foaming dynamics using temperature measurements[J]. *Przemysł Chemiczny*, 2019, 98(8):1 259–1 263.
- [3] HAN S K, SONG M J, CHOI K, et al. Fabrication of biodegradable polyurethane foam scaffolds with customized shapes and controlled mechanical properties by gas foaming technique[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 306(7). DOI: 10.1002/mame.202100114.
- [4] CABRERA V H, SANDOVAL P, SILVA M, et al. Improvement of polyurethane foam growth behavior of within an aluminum mold with a comparison between a specialized software and applied tests[J]. *Materials Today:Proceedings*, 2022, 49:43–49.
- [5] REN Y, BU J F, RUAN M B, et al. Influence and mechanism of mold thermal conductivity on the properties of polyurethane sponges[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, 142(46). DOI:10.1002/app.57785.
- [6] WU L, YICK K L, NG S, et al. Modeling of flexible polyurethane foam shrinkage for bra cup moulding process control[J]. *Polymers*, 2018, 10(5). DOI:10.3390/polym10050472.
- [7] 曹伟. 聚氨酯汽车座椅发泡模具防粘涂料性能分析[J]. *粘接*, 2022, 49(7):45–47,60.
CAO Wei. Performance analysis of anti-sticking coating for polyurethane car seat foaming mold[J]. *Adhesion*, 2022, 49(7): 45 – 47,60.

- [8] 刘子睿,管东波,李金华.聚氨酯座椅发泡模具防粘涂料性能研究[J].合成材料老化与应用,2015,44(3):9-14.
LIU Zirui, GUAN Dongbo, LI Jinhua. The performance study of anti-sticking coatings applied in polyurethane seat foaming moulds[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2015, 44(3): 9-14.
- [9] 王林富,王栓虎,王琪娟. PU发泡模具加热管道的热分析与优化设计[J].塑料工业,2014,42(11):56-59.
WANG Linfu, WANG Shuanhu, WANG Qijuan. Thermal analysis and optimization design for heating pipe of PU foam mold[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(11):56-59.
- [10] 金仁祥,唐传赵.一种新型汽车内饰件聚氨酯发泡生产线[J].安徽科技,2008(7):48-50.
JIN Renxiang, TANG Chuanshao. A new type of polyurethane foam production line for automotive interior parts[J]. Anhui Science & Technology, 2008(7):48-50.
- [11] CHEN S C, CHANG C W, TSENG C Y, et al. Using P(pressure)-T(temperature) path to control the foaming cell sizes in microcellular injection molding process[J]. Polymers, 2021, 13(11). DOI: 10.3390/polym13111843.
- [12] JIANG X L, ZHAO L, FENG L F, et al. Microcellular thermoplastic polyurethanes and their flexible properties prepared by mold foaming process with supercritical CO₂[J]. Journal of Cellular Plastics, 2019, 55(6):615-631.
- [13] SHIU B C, HUANG C H, YANG H L, et al. Construction sheets made of high-performance flame-retardant nonwoven fabrics and combustion-resistant polyurethane foam: Preparation process and property evaluations[J]. Polymers, 2023, 15(4). DOI: 10.3390/polym15040953.
- [14] WANG J, ZHANG C X, DENG Y, et al. A review of research on the effect of temperature on the properties of polyurethane foams[J]. Polymers, 2022, 14(21). DOI:10.3390/polym14214586.
- [15] HERMAN A, VÁCLAV ŠTOURAČ, F, KYNCL J, et al. New design of polyurethane foam moulds for vibrational casted refractory materials[C]//Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium. Vienna:DAAAM International, 2018:1 231-1 238.
- [16] ZHAN H Y, ZHANG Z H, YANG A, et al. Multifunctional foams with oriented bimodal cellular structure and barbule-like surface fabricated by Bi-thermoplastic expanding microsphere mold-opening foaming[J]. Composites Part B: Engineering, 2026, 310. DOI:10.1016/j.compositesb.2025.113173.
- [17] YU S R, JIANG Y, XU L, et al. RNET-based multi-objective hybrid optimization for microcellular foam injection molding of fiber-reinforced plastic automotive front bumper[J]. Chemical Engineering Science, 2026, 331. DOI:10.1016/j.ces.2026.123942.
- [18] REN J Y, GUO Y Z, WANG S W. Optimal design of Celuka microporous foaming extrusion device and its bubble deformation induction mechanism[J]. Journal of Polymer Engineering, 2026, 46(4):350-361.
- [19] STEINECK S, RÄDEL F, CIUPACK Y, et al. Influence of temperature and cell gas composition on PU sandwich panels[J]. ce/papers, 2026, 9(2-3):1 454-1 458.
- [20] POLLÁK M, GORYL K. Development of a simulation computational model for hole detection and generation of robot tool movement for fitting mold preparation nozzles[J]. Machines, 2025, 13(11). DOI:10.3390/machines13111053.
- [21] FAZELI S, NAJAFI M, HAJI BAGHERIAN M, et al. Investigation of injection molding process parameters on the properties of EVA-based foams using response surface methodology[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2025, 57(7):1 275-1 294.
- [22] PENG Z Y, HUANG T H, ZHANG J X, et al. One-step fabrication of 3D polymer foams via a novel foaming process: Insights into foaming behavior and interfacial fusion[J]. Polymer, 2025, 336. DOI:10.1016/j.polymer.2025.128863.