

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.020

# 对角双拉杆单缸锁模在大型吹塑机中的应用及节能效果

陆建国, 钱伟

(宁波金戈智能装备有限公司, 浙江宁波 315000)

**摘要:** 针对传统液压直接锁模系统力分布不均与能耗高以及模具磨损快等问题, 研究对角双拉杆单缸中心锁模系统在大型吹塑机中的应用效果。采用理论分析和有限元数值模拟相结合的办法, 深入探究系统的力学特性和技术优势, 以带有外拉杆设计的对角双拉杆单缸中心锁模系统(简称对角双拉杆系统)与传统内拉杆四缸液压直接锁模系统(简称传统系统)作为研究对象进行对比实验, 从锁模力分布特性、模具变形控制、能耗效率以及产品质量等多个维度进行系统评估, 采用高精度传感器测量锁模力分布与监测模具变形量, 并对生产出的 500 件样品开展质量检测分析。结果表明, 对角双拉杆系统与传统系统相比在各个方面都有显著改善, 力传递效率从 68.7% 提升到了 89.3%, 高负荷条件下锁模力分布差异系数仅是传统系统的 19.7%, 模具中心与边缘最大变形差从 0.23 mm 降低到了 0.08 mm, 满负荷运行时功率降低了 19.4%, 产品合格率从 85.8% 提高到 95.6%, 壁厚变异系数从 13.3% 降至 5.2%。在实际应用案例中, 对储水桶生产线进行改造后的产能提升 14.7%, 能耗降低 21.2%, 投资回收期仅 7 个月。对角双拉杆系统凭借独特的力学传递结构, 实现了锁模力的均匀分布与能量的高效利用, 在产能提升、质量改善以及能耗降低与维护成本减少等方面取得显著效益, 为吹塑设备技术升级提供了重要技术路径。

**关键词:** 对角双拉杆; 单缸中心锁模; 吹塑成型; 模具变形; 能耗效率

**中图分类号:** TQ320.5+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0157-10

## Application and energy-saving effect of diagonal dual-tie-bar single-cylinder clamping in large blow molding machines

LU Jianguo, QIAN Wei

(Ningbo Jinge Intelligent Equipment Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

**Abstract :** Addressing issues of uneven force distribution, high energy consumption, and easy wear of moulds in traditional hydraulic direct clamping systems, the application effect of diagonal dual-tie-bar single-cylinder central clamping system in large blow molding machines was investigated. A combined approach of theoretical analysis and finite element numerical simulation was employed to investigate the mechanical characteristics and technical advantages of the system. Comparative experiments were conducted between the diagonal dual-tie-bar single-cylinder central clamping system with external tie-bar design (abbreviated as the diagonal dual-tie-bar system) and the traditional internal tie-bar four-cylinder hydraulic direct clamping system (abbreviated as the traditional system) as research subjects. Systematic evaluation was performed across multiple dimensions including clamping force distribution characteristics, mould deformation control, energy efficiency, and product quality. High-precision sensors were used to measure clamping force distribution and monitor mould deformation, and quality inspection and analysis were conducted on 500 production samples. The results show that the diagonal dual-tie-bar system demonstrates significant improvements over the traditional system in all aspects. Force transmission efficiency increases from 68.7% to 89.3%, the clamping force distribution deviation coefficient under high-load conditions is only 19.7% of that in the traditional system, maximum deformation difference between the center and edge of the mould reduces from 0.23 mm to 0.08 mm, and power consumption is decreased by 19.4% during full-load operation. Product qualification rate improves from 85.8% to 95.6%, wall thickness variation coefficient decreases from 13.3% to 5.2%. In practical application cases, following production line transformation for water tank manufacturing, the production capacity

**通信作者:** 钱伟, 主要从事注塑机、吹塑机研究

**收稿日期:** 2025-06-26

**引用格式:** 陆建国, 钱伟. 对角双拉杆单缸锁模在大型吹塑机中的应用及节能效果[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 157-166.

LU Jianguo, QIAN Wei. Application and energy-saving effect of diagonal dual-tie-bar single-cylinder clamping in large blow molding machines[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 157-166.

is increased by 14.7%, energy consumption is reduced by 21.2%, and the investment payback period is only 7 months. The diagonal dual-tie-bar system achieves uniform clamping force distribution and efficient energy utilization through its unique mechanical transmission structure, and delivers significant benefits in production capacity increase, quality improvement, energy consumption and maintenance cost reduction, thereby providing an important technical pathway for blow molding equipment technology upgrades.

**Keywords :** diagonal dual-tie-bar ; single-cylinder central clamping ; blow molding ; mould deformation ; energy efficiency

包装行业以及汽车工业对大型中空塑料制品需求不断持续增长,这给吹塑设备锁模系统提出了更高技术要求,传统液压直接锁模系统在高压成型过程中存在锁模力分布不均、能耗高及模具磨损快等问题,严重影响产品质量和生产效率,现有的多缸液压锁模系统在维持锁模力稳定性方面存在固有缺陷,尤其在处理厚壁或特殊形状制品时易出现成型品质不稳定问题。

许多研究者对吹塑设备和锁模系统进行了研究。如高冲等<sup>[1]</sup>基于计算流体力学(CFD)流固耦合传热分析优化了吹塑模具冷却系统,改善了温度分布均匀性;贾然等<sup>[2]</sup>设计了基于PC的塑料吹塑机现场总线控制系统,实现了多层共挤工艺的精确控制;杨勇等<sup>[3]</sup>设计了塑料薄膜吹塑机厚度模糊控制系统,为吹塑设备的智能控制提供了技术基础;Park等<sup>[4]</sup>提出了基于模板压缩的膨胀注射成型工艺,通过液压系统实现熔体压缩和膨胀,提高了充模效率;Jin等<sup>[5]</sup>建立了注塑机锁模机构数学模型,研究了锁模力与机构变形的关系,为优化锁模系统设计提供了理论基础;Selvaraj等<sup>[6]</sup>综述了注塑机中机器学习模型的应用,为传统锁模系统技术改进指明了方向。而针对传统多缸液压锁模系统改进,现有研究主要集中在同步控制算法优化和结构参数改进方面。Feng等<sup>[7]</sup>基于机器学习方法对锁模概念进行了优化,通过有限元仿真和智能算法提高了锁模系统的刚度和精度。

然而,现有研究主要集中在传统多缸液压锁模系统的改进上,对新型锁模机构的设计理论与应用效果缺乏深入分析,传统锁模系统存在多缸同步控制难与力传递路径复杂以及能量损失严重等根本问题,需从系统设计理念上进行根本性创新。对角双拉杆单缸中心锁模系统通过独特力学传递结构,实现了锁模力的均匀分布与能量的高效利用,基于此,笔者提出X形交叉布局对角拉杆设计,构建自平衡力学系统,开发了一种对角双拉杆单缸中心锁模系统,为吹塑设备技术升级提供了新的解决方案。

## 1 对角双拉杆单缸中心锁模系统结构组成与工作原理

### 1.1 结构组成

对角双拉杆单缸中心锁模系统集成中央液压缸、对角拉杆组件、铰接连杆机构和锁模板四大核心部件,如图1所示(为便于理解受力分析,在后续相关图中采用了上下布局)。图1中, $F_0$ 为中央液压缸输出力; $F_1, F_2, F_3, F_4$ 分别为作用在锁模板四个角点的锁模力, $\alpha$ 为拉杆和水平面形成的夹角,其典型数值处于 $30^\circ \sim 45^\circ$ 范围内。中央液压缸置于系统中央位置充当主动力源,其产生的推动力经由特殊设计的对角拉杆组件分配到锁模板的四个角点;拉杆采用X形交叉布局方式构建出力学平衡的整体框架;铰接连杆机构承担着将中轴推力转换成对角拉力的功能,保证锁模工序中的力得到有效分配;锁模板充当受力末端与模具直接接触,提供了分布均衡的夹紧压力。此种布局方案赋予系统自我平衡特性,大幅降低对多个液压缸同步操控的依赖程度,使得系统结构更加简单,减少了制造费用和设备故障概率。

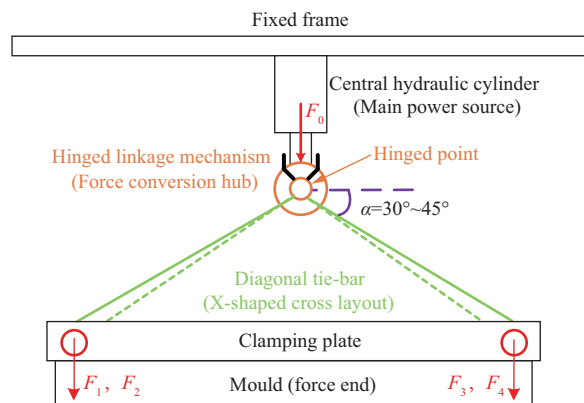


图1 对角双拉杆单缸中心锁模系统结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of diagonal dual-tie-bar single-cylinder central clamping system

### 1.2 工作原理

对角双拉杆单缸中心锁模系统按照力学传递与分解原理开展工作,液压系统驱动中央缸体产生轴向推力,此力通过铰接连杆机构传递到四根对角拉杆,在铰接点处分解成水平与垂直分量,拉杆对角布置让四个锁模点同时受到相等的力,以此确保

锁模力在模具表面的均匀分布。与传统多缸直接锁模系统相比较,该系统利用杠杆原理与力平行四边形原理,让单一缸体产生的推力经几何放大后均匀作用于模具表面各点,系统在锁模状态下形成稳定的力学闭环,能有效抵抗成型过程中的高压,且能因力学自平衡特性使模具变形最小化,对应的力学传递机制如图2所示。

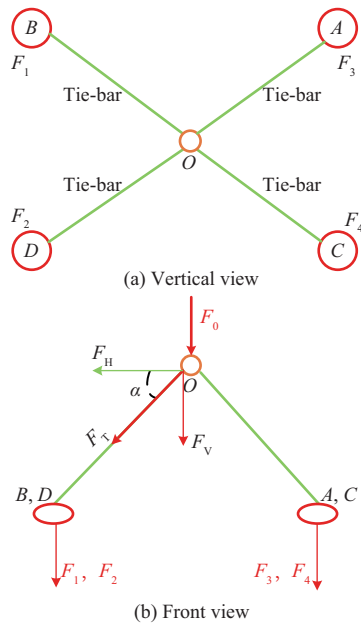


图2 力学分析图

Fig. 2 Force analysis diagram

### 1.3 力学特性分析

对角双拉杆结构形成了一个理想的自平衡力学系统,其受力特性可通过表1所示的力学特性参数精确描述。

#### 1.3.1 力学传递原理

结合图1和图2可以看到,中央液压缸所产生的轴向推力 $F_0$ 借助铰接连杆机构传递到四根对角拉杆之上,设定 $\alpha$ 为拉杆和水平面之间的夹角(其典型数值处于 $30^\circ$ 至 $45^\circ$ 范围)。单根拉杆在铰接点位置受力 $F_T$ 会分解成水平分量 $F_H$ 与垂直分量 $F_V$ ,鉴于

对角拉杆呈X形对称布置,水平分量 $F_H$ 彼此之间会相互抵消,垂直分量 $F_V$ 则形成作用于锁模板四个角点的锁模力。

#### 1.3.2 锁模力计算模型

当系统处于平衡状态时,图2中四个锁模点的受力关系满足式(1)。

$$F_i = (F_0/4) \cdot \sin \alpha \cdot (L_2/L_1) \cdot \eta \quad (1)$$

式中: $F_0$ 为中央液压缸输出力,单位kN; $F_i$ ( $i = 1, 2, 3, 4$ )为作用在锁模板四角点的锁模力,单位kN; $\alpha$ 为拉杆与水平面的夹角,单位 $^\circ$ ;  $L_1$ 为铰接连杆机构部分的输入力臂长度,单位mm;  $L_2$ 为输出力臂长度,单位mm;  $\eta$ 为力传递效率。

公式(1)综合考虑了铰接摩擦损失、拉杆弹性变形、液压系统效率等因素。公式(1)中,系数 $(1/4)$ 表示单缸输出力经对角拉杆分配到四个锁模点;  $\sin \alpha$ 代表拉杆力在垂直方向的投影系数;  $(L_2/L_1)$ 为杠杆臂比提供的力放大系数。

#### 1.3.3 力平衡特性

在理想状况之下,因为结构存在几何对称性,所以四个锁模点所受的力相等,即 $F_1=F_2=F_3=F_4$ 。该系统需要满足式(2)的平衡条件,从而使处于竖直方向上的力达到平衡状态。

$$4F_i = F_0 \cdot \eta_{\text{system}} \quad (2)$$

力矩平衡(以锁模板中心为基准)见式(3)。

$$(F_1 + F_2) \cdot a = (F_3 + F_4) \cdot a \quad (3)$$

式中: $a$ 为锁模点到中心垂直轴的水平距离;  $\eta_{\text{system}}$ 为系统的总效率数值。

这种自平衡特性让系统不需要复杂的多缸同步控制手段,从根本层面上保证了锁模力能够均匀分布。

#### 1.3.4 实测性能参数

实验测量表明,该系统的力传递效率高达89.3%,远高于传统系统的68.7%,力平衡特性使锁模板变形量控制在0.08 mm以内,比传统系统降低

表1 对角双拉杆单缸中心锁模系统的力学特性参数

Tab. 1 Mechanical characteristic parameters of diagonal dual-tie-bar single-cylinder central clamping system

| Parameters                                             | Symbol     | Typical values | Influencing factors                       |
|--------------------------------------------------------|------------|----------------|-------------------------------------------|
| Central hydraulic cylinder output force/kN             | $F_0$      | 300~1 200      | Hydraulic system pressure                 |
| Tie bar included angle with horizontal plane/ $^\circ$ | $\alpha$   | 30~45          | Structural design                         |
| Force arm ratio                                        | $L_2/L_1$  | 1.2~1.5        | Geometric configuration                   |
| Force transmission efficiency/%                        | $\eta$     | 85~92          | Material and machining accuracy           |
| Clamping force uniformity/%                            | $\delta$   | $\leq 4.2$     | Geometric tolerance and assembly accuracy |
| Mould deformation/mm                                   | $\Delta d$ | $\leq 0.08$    | Clamping force value and distribution     |
| Mould space increase rate (external vs internal)/%     | $\gamma$   | 15~25          | Structural design                         |
| Mould plate parallelism adjustment accuracy/mm         | $\beta$    | $\pm 0.05$     | Adjustment mechanism accuracy             |

了65.2%,这源于对角拉杆的几何配置使锁模力沿着最优路径传递,在减少能量损耗的同时确保了锁模力的均匀分布<sup>[8]</sup>。外拉杆设计额外提供了模板平行度调节功能,可以通过微调拉杆长度实现±0.05 mm的平行度精确控制,这一特性对于补偿模具制造精度不足尤为重要。

1.4 有限元数值模拟分析

为验证对角双拉杆单缸中心锁模系统设计优势,采用ANSYS Workbench 2023R1建立系统三维数值模型,模型包含对角拉杆与锁模板等核心部件,在中央液压缸位置施加轴向载荷进行静力学分析。有限元分析结果表明,该系统具有良好的力学平衡特性,锁模板四个角点应力分布呈现高度对称性,应力差异系数显著低于传统多缸系统,系统整体呈现平面变形特征且变形差较小,有利于保持模具平面度。四个锁模点的局部刚度差异很小,具有线性刚度特性。相比传统四缸直接锁模系统,对角双拉杆单缸中心锁模系统在多方面表现出显著优势,为后续实验验证提供理论基础。

2 实验设备设计与测试方法

2.1 实验设备

笔者采用两台中空吹塑机作为实验平台,两台设备均产自同一厂家,生产年份相同,主要技术参数基本一致。实验组设备为采用外拉杆设计(拉杆位于模板外侧不仅提供了更大的容模空间,还便于维护和调节)的KGH90A型对角双拉杆单缸中心锁模系统,锁模力为300 kN;对照组设备为KGB90A型传统内拉杆四缸液压直接锁模系统,锁模力为240 kN。

两台设备的主要技术参数对比见表2,除锁模系统外,核心参数基本一致,确保了对比实验的科学性和可靠性。

实验前对两台设备进行全面检修和校准,消除因设备状态差异导致的实验误差,同时将实验场地环境温度控制在(23±2)℃、相对湿度控制在50%±5%,减少环境因素对实验结果的影响。为确保对比实验的科学性,两台设备使用同一套模具(规格Ø350 mm×450 mm,P20钢,HRC30±2)与同批次中国石化集团生产的高密度聚乙烯原料(牌号5000S,批次号SH-HDPE-5000S-20230315)。工艺参数完全一致,加工温度180℃,吹气压力0.8 MPa,型坯挤出速度60 mm/min,冷却时间18 s。

2.2 测试方法

2.2.1 锁模力分布测试

为精确评估锁模力分布特性,在模具的四个角点安装如图3a所示的高精度压力传感器(型号HBM-P3MB,量程0~500 kN,精度±0.2%,德国HBM公司),传感器与如图3b所示的数据采集系统(型号NI CompactDAQ-9178,美国国家仪器公司)连接,采样频率设置为100 Hz,确保捕捉到锁模过程中的瞬时力变化<sup>[9]</sup>。测试采用阶梯式加载方案,锁模力从100 kN开始,按100,150,200,240,300 kN的测试点进行阶梯式加载,涵盖设备全部工作范围,每个测试点维持稳定状态30 s后开始记录数据,连续采集10 s。为保证数据可靠性,每个测试点重复测量5次,取平均值作为最终结果。

测试过程中,采用力分布差异系数( $C_D$ )作为锁模力分布均匀性的评价指标, $C_D$ 值越小,表明锁模力分布越均匀,计算公式见式(4)。

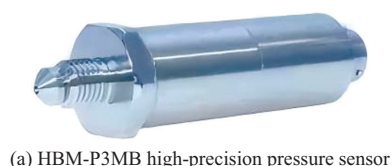
$$C_D = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (F_i - \bar{F})^2}{4}}}{\bar{F}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $F_i$ 为第*i*个角点测得的锁模力( $i=1,2,3,4$ ),单位kN; $\bar{F}$ 为四个角点的平均锁模力, $\bar{F}=(F_1+F_2+$

表2 实验设备主要技术参数对比

Tab. 2 Comparison of main technical parameters of experimental equipment

| Parameters                                      | Experimental group (with KGH90A external tie bar)                                          | Control group (with KGB90A internal tie bar)                    |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Clamping equipment model                        | KGH90A                                                                                     | KGB90A                                                          |
| Maximum clamping force/kN                       | 300                                                                                        | 240                                                             |
| Clamping system type                            | Diagonal dual-tie-bar single-cylinder central clamping system with external tie bar design | Internal tie bar four-cylinder hydraulic direct clamping system |
| Extruder screw diameter/mm                      | 90                                                                                         | 90                                                              |
| Extrusion pressure/MPa                          | 10                                                                                         | 10                                                              |
| Parison volume/L                                | 6.6                                                                                        | 6.6                                                             |
| Screw <i>L/D</i> ratio                          | 24:1                                                                                       | 24:1                                                            |
| Extruder motor power/kW                         | 45                                                                                         | 45                                                              |
| Effective mould space( <i>L</i> × <i>W</i> )/mm | 800×600                                                                                    | 700×550                                                         |
| Control system                                  | Mitsubishi 5U                                                                              | Mitsubishi 5U                                                   |



(a) HBM-P3MB high-precision pressure sensor



(b) NI CompactDAQ-9178 data acquisition system

图3 锁模力分布测试设备

Fig. 3 Testing equipment for clamping force distribution

$F_3+F_4)/4$ ,单位kN。

$C_D$ 值越接近0,表示锁模力分布越均匀。工程实践中, $C_D<5\%$ 视为优秀, $C_D\geq 15\%$ 则需要改进。

### 2.2.2 模具变形测量

模具变形测量采用双路径法,同时监测中心区域和边缘区域的变形差异,测量系统简图如图4所示。测量系统由如图5a所示的8个高精度电感式位移传感器(型号DTA-5G-3-CA,分辨率0.001 mm,德国Micro-Epsilon公司)组成,其中4个安装在模具中心区域(如图4中 $C_1, C_2, C_3, C_4$ 位置),4个分布在模具边缘位置(如图4中 $E_1, E_2, E_3, E_4$ 位置),位移数据通过如图5b所示的专用信号调理器处理后,输入同一数据采集系统,确保时间同步性。

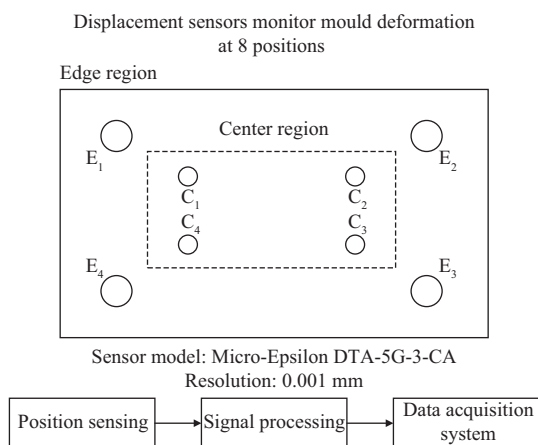


图4 测量系统简图

Fig. 4 Measurement system schematic diagram

测量采用与锁模力分布测试相同的加载方案,记录不同锁模力下的模具变形量,对每个测量点计算5次测量的平均值,并定义模具中心与边缘最大变形差( $\Delta d$ )作为评价指标。模具变形结果通过三维热图可视化,直观展示变形分布特征,并基于实测数据建立锁模力与变形差的函数关系。



(a) Micro-Epsilon DTA-5G-3-CA inductive displacement sensors (resolution:0.001 mm, 8 sensors for center and edge measurement)



(b) Micro-Epsilon MSC7401 dedicated signal conditioner (Single-channel LVDT controller with IP67 protection, 8 units for signal processing)

图5 模具变形测量检测仪器

Fig. 5 Detection instruments for mould deformation measurement

### 2.2.3 能耗测试

能耗测试通过高精度功率分析仪实时监测两种锁模系统的电能消耗,在空载运行(无模具)与低负荷运行(KGH90A为150 kN,KGB90A为120 kN)和满负荷运行(KGH90A为300 kN,KGB90A为240 kN)三种工况下进行。每种工况下设备连续运行8 h,以10 s为间隔记录参数,为模拟实际生产节拍,设定锁模-保压-开模循环时间为45 s,其中锁模时间15 s,保压时间20 s,开模时间10 s,测试过程中同时记录液压系统的工作压力与流量及油温等参数,建立能耗与液压参数的关联模型<sup>[10]</sup>。基于测试数据,计算两种系统在不同工况下的平均功率、单位产品能耗和能量转换效率,定量评价对角双拉杆单缸中心锁模系统的节能效果。

### 2.2.4 产品质量评估

为评估锁模系统对产品质量的影响,使用两种系统连续生产规格为 $\varnothing 350 \times 450$  mm的大型塑料容器,每种系统生产500件样品并保持材料(高密度聚乙烯)、加工温度(180 °C)、注射压力(10 MPa)、注射速度(60 mm/s)等工艺参数完全一致,以确保仅锁模系统存在差异。产品质量评估采用多维度综合分

析方法:首先通过德国 Krautkrämer 公司的 CL5 型超声波测厚仪(精度 $\pm 0.01$  mm)在产品的 24 个预定位置测量壁厚并计算标准偏差和变异系数来评价壁厚分布均匀性;接着采用水压测试法评估产品的密封性和强度,即将产品注满水并加压至 0.3 MPa 保持 5 min,记录压力降和渗漏情况;同时由三名经验丰富的质检员按照统一标准评估产品的外观缺陷(包括熔接线、缩痕、变形等)并对缺陷进行轻微、中等、严重三个等级的分级统计;最后使用三坐标测量机测量产品的关键尺寸,计算尺寸偏差和尺寸合格率以评价产品的尺寸稳定性。基于这四个方面的测试结果综合计算产品的合格率、缺陷率和质量稳定性指数,从而全面评估锁模系统对产品质量的实际影响。

### 2.3 数据处理方法

针对实验数据处理,采用多维度统计分析方法以确保结果的科学性和可信度。对于锁模力分布数据,通过方差分析(ANOVA)评估系统均匀性,计算各测试点的方差、标准差和变异系数,并通过 F 检验判断差异显著性( $P < 0.05$ );对于模具变形数据,采用多元回归分析,建立锁模力  $F$  与模具变形差  $\Delta d$  的函数关系: $\Delta d = a \cdot F + b$ ,通过相关系数  $R^2$  评价模型拟合优度。

对于能耗数据,使用配对 T 检验(Paired T-test)比较两种系统在相同工况下的功率差异,置信区间设为 95%,同时通过时间序列分析监测能耗波动趋势,识别潜在的能量损失点<sup>[11]</sup>。对于产品质量数据,采用质量控制图(X-R 图)分析工艺稳定性,计算过程能力指数  $C_{pk}$  评价质量控制水平。

在数据预处理时用巴特沃斯低通滤波器(截止频率 10 Hz)去除高频干扰,所有传感器数据按照时间戳进行同步对齐并且补偿 2 ms 传输延迟,每组实验都会进行 5 次重复测量,采用  $3\sigma$  准则来剔除其中的异常值,并计算 95% 置信区间。对于误差分析,通过标准砝码校准来修正系统误差,按照 JJF1059.1-2012 标准进行不确定度评定,最终让数据与理论计算值偏差控制在 5% 以内,重现性相对标准偏差小于 3%。

## 3 结果与分析

### 3.1 锁模力分布特性分析

带有外拉杆设计的对角双拉杆单缸中心锁模系统(KGH90A)(以下简称对角双拉杆系统)与传统内拉杆液压直接锁模系统(KGB90A)(以下简称传统系

统)在锁模力分布均匀性方面存在显著差异。表 3 详细记录了不同锁模力下两种系统的力分布差异系数,数据表明随着锁模力增加,两种系统的力分布差异系数均呈现增大趋势,但增长速率存在明显差异。对角双拉杆系统的力分布差异系数增长缓慢,从 100 kN 时的 2.3% 仅增至 300 kN 时的 4.2%,在整个工作范围内保持较低水平;而传统系统在相同条件下的力分布差异系数从 100 kN 时的 10.8% 增至 240 kN 时的 15.7%,变化幅度达 45.4%。在高负荷工况下(240 kN),对角双拉杆系统的力分布差异系数仅为传统系统的 19.7%,均匀性优势尤为突出。

表 3 不同锁模力下两种系统的力分布差异系数比较

Tab. 3 Comparison of force distribution deviation coefficients of two systems under different clamping forces

| Clamping force/kN | Force distribution deviation coefficient/% |                    | Improvement ratio/% |
|-------------------|--------------------------------------------|--------------------|---------------------|
|                   | Diagonal dual-tie-bar system               | Traditional system |                     |
| 100               | 2.3                                        | 10.8               | 78.7                |
| 150               | 2.5                                        | 12.4               | 79.8                |
| 200               | 2.8                                        | 14.1               | 80.1                |
| 240               | 3.1                                        | 15.7               | 80.3                |
| 300               | 4.2                                        | —                  | —                   |

方差分析结果表明,两种系统的力分布差异具有统计学显著性( $F=187.3$ ,  $P < 0.001$ )。对角双拉杆系统力分布均匀性的优势源于其独特的力学传递机制,力从中心单缸沿着对角拉杆均匀分解至四个锁模点形成自平衡的力学闭环,而传统系统依赖多缸协同,不可避免地存在同步误差和机械公差累积问题,导致力分布不均匀,特别是在高负荷条件下问题更加突出<sup>[12]</sup>。

### 3.2 模具变形分析

锁模力分布不均将直接影响模具变形状态,在最大锁模力下,带有外拉杆设计的对角双拉杆系统表现出近似平面的变形场,最大变形量为 0.12 mm,而传统系统呈现明显的碟形变形,中心区域变形量达 0.31 mm。对比分析发现,对角双拉杆系统的模具中心与边缘最大变形差( $\Delta d$ )为 0.08 mm,仅为传统系统(0.23 mm)的 34.8%,这种差异随锁模力增加而愈发显著,表明对角双拉杆系统在高负荷条件下保持模具平面度的能力更强。

通过回归分析,建立了对角双拉杆系统与传统系统的锁模力  $F$  与  $\Delta d$  的定量关系模型,分别见式(5)和式(6)。

$$\Delta d = 0.0025F + 0.012 (R^2 = 0.97) \quad (5)$$

$$\Delta d = 0.0076F + 0.036 (R^2 = 0.95) \quad (6)$$

从模型系数可见,传统系统的变形系数(0.007 6)比对角双拉杆系统(0.002 5)高出 204%,表明对角双拉杆系统对锁模力增加的适应性更强,模具变形对锁模力的敏感度显著降低,两个模型均具有较高的相关系数( $R^2 \geq 0.95$ ),证实了锁模力与模具变形之间存在稳定的线性关系。

通过有限元分析可以发现,在对角双拉杆系统下模具变形小的根本原因在于该系统四点锁模力比值接近 1:1:1:1,模具受力更加均衡,而传统系统

的四点锁模力比值约为 1.3:0.8:1.1:0.9,力分布不均导致模具发生弯曲变形。这种变形差异在实际生产中将直接影响产品壁厚分布和尺寸精度。

### 3.3 能耗效率比较

两种锁模系统在三种工况下的能耗测试结果见表 4。

由表 4 看出,在所有测试条件下,对角双拉杆系统均表现出显著的节能优势,且随着负荷增加节能效果更加明显。在满负荷运行条件下,对角双拉杆系统平均功率为 15.8 kW,比传统系统的 19.6 kW 降低了 19.4%。

表 4 两种锁模系统的能耗比较

Tab. 4 Energy consumption comparison of two clamping systems

| Operating Status | Diagonal dual-tie-bar system |                              | Traditional system |                              | Energy saving rate/% |
|------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------|----------------------|
|                  | Average power/kW             | 8-hour total consumption/kWh | Average power/kW   | 8-hour total consumption/kWh |                      |
| No load          | 4.8                          | 38.4                         | 5.7                | 45.6                         | 15.8                 |
| Low load         | 9.3                          | 74.4                         | 11.5               | 92.0                         | 19.1                 |
| Full load        | 15.8                         | 126.4                        | 19.6               | 156.8                        | 19.4                 |

按照电力碳排放因子 0.570 3 kg/kWh 计算,对角双拉杆系统的减排效果显著。在满负荷 8 h 运行中,对角双拉杆系统 CO<sub>2</sub> 排放为 72.1 kg,传统系统为 89.5 kg,减排 17.4 kg,减排率 19.4%。年运行 5 000 h 可节约电能 12 000 kWh,相应减少 CO<sub>2</sub> 排放 6.84 t。从产业角度看,若将对角双拉杆系统在国内 1 000 台同类设备中推广应用,CO<sub>2</sub> 年减排量可达 6 840 t,相当于植树 30 万棵的碳汇效应。这为塑料加工行业实现“双碳”目标提供了重要技术支撑。

图 6 展示了两种锁模系统满负荷运行各阶段功率对比。对角双拉杆系统不仅平均功率低,功率波动幅度也明显小于传统系统,峰值功率比传统系统降低了 17.8%,表明其能量需求更加平稳,有利于减轻电网负担并延长设备使用寿命<sup>[13]</sup>。

进一步分析发现,对角双拉杆系统能耗降低主要是源于三个方面的优化:首先是结构设计优化让力传递过程中的机械损耗大幅减少,力传递效率达到 89.3%,比传统系统的 68.7% 高出 20.6%;其次单缸设计有效简化了液压系统,减少了油管连接和阀门数量,进而降低了液压系统压力损失和泄漏现象;最后锁模力分布均匀性的改善直接减少了模具变形程度,降低了克服模具变形所需的额外能量消耗。这三个方面相互作用,共同推动了系统整体能耗的显著下降。经济效益分析表明,按照年运行 5 000 h 计算,对角双拉杆系统每年可节约电能约

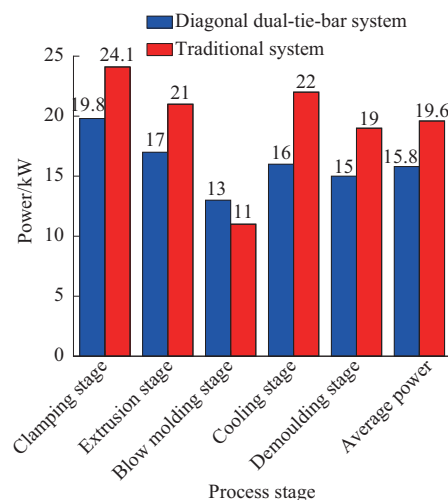


图 6 两种锁模系统满负荷运行各阶段功率对比

Fig. 6 Power comparison of two clamping systems during full-load cycling operation

12 000 kWh,以工业用电 0.85 元/kWh 计算,每台设备每年可节约电费约 10 200 元,若考虑降低的维护成本和提高的生产效率,经济效益更为显著。

### 3.4 产品质量评估

产品质量评估结果揭示了锁模系统对最终产品品质的直接影响。对角双拉杆系统生产的产品在壁厚均匀性、尺寸精度和外观质量等方面均优于传统系统,对角双拉杆系统生产的 500 件样品中合格品为 478 件,合格率达 95.6%,而传统系统生产的 500 件样品中合格品仅 429 件,合格率为 85.8%。相

对于传统系统,对角双拉杆系统将产品合格率提高 9.8%。缺陷分析显示,传统系统生产的产品主要缺陷为壁厚不均(占缺陷总数的 42.3%)及变形(占 27.5%)和熔接线明显(占 17.6%),这些缺陷与锁模力分布不均和模具变形有直接关联。

产品壁厚测量数据见表 5,对角双拉杆系统生产的产品壁厚均匀性明显优于传统系统,标准偏差(0.11 mm)仅为传统系统(0.28 mm)的 39.3%,变异系数从传统系统的 13.3%降至 5.2%。

表 5 两种系统生产产品的壁厚分布统计

Tab. 5 Wall thickness distribution statistics of products produced from two systems

| Statistical parameters    | Diagonal dual-tie-bar system | Traditional system | Improvement/% |
|---------------------------|------------------------------|--------------------|---------------|
| Average wall thickness/mm | 2.12                         | 2.10               | —             |
| Maximum wall thickness/mm | 2.32                         | 2.63               | —             |
| Minimum wall thickness/mm | 1.95                         | 1.62               | —             |
| Wall thickness range/mm   | 0.37                         | 1.01               | 63.4          |
| Standard deviation/mm     | 0.11                         | 0.28               | 60.7          |
| Variation coefficient/%   | 5.2                          | 13.3               | 60.9          |

压力测试结果显示,对角双拉杆系统生产的产品压力保持率为 97.3%,传统系统为 92.1%。尺寸精度检测数据表明,对角双拉杆系统生产的产品关键

尺寸合格率为 83.7%,传统系统为 65.2%,对角双拉杆系统的尺寸精度控制能力提高了 28.4%。

经济效益分析表明,提高 9.8%的合格率相当于每生产 10 000 件产品额外增加 980 件合格品,按每件产品 25 元计算,可增加产值 24 500 元<sup>[14]</sup>。

#### 4 应用案例分析

某塑料制品企业主要生产 500~5 000 L 塑料储水桶与化工容器,主要产品包括 500 L 储水桶(直径 800 mm、高度 1 000 mm)、1 000L 储水桶(直径 1 200 mm、高度 1 100 mm)、2 000L 储水桶(直径 1 400 mm、高度 1 300 mm)、5 000L 大型储水桶(直径 2 000 mm、高度 1 600 mm)等多种规格,该企业原有生产线使用传统四缸液压直接锁模系统,存在一些主要问题:锁模力分布不均会导致产品壁厚偏差较大,模具磨损情况严重且维修较为频繁,能源消耗处于偏高状态使得运行成本居高不下。2023 年初该企业投资大约 85 万元对一条主力生产线进行技术改造,采用对角双拉杆单缸中心锁模系统替代原有锁模系统,进而完成了生产工艺的全面改造升级,生产线改造前后的对比数据见表 6 (表 6 的案例数据基于该企业 2 000 L 规格储水桶生产线的改造效果)。

表 6 大型储水桶生产线改造前后对比数据

Tab. 6 Comparison data before and after transformation of large water tank production line

| Indicator category    | Specific item                                   | Before | After  | Improvement/% |
|-----------------------|-------------------------------------------------|--------|--------|---------------|
| Production efficiency | Monthly output/pieces                           | 15 000 | 17 200 | +14.7         |
|                       | Molding cycle/s                                 | 85     | 78     | -8.2          |
|                       | Monthly downtime/h                              | 32     | 18     | -43.8         |
| Product quality       | Qualification rate/%                            | 83     | 94.5   | +13.9         |
|                       | Wall thickness standard deviation/mm            | 0.38   | 0.15   | -60.5         |
|                       | Dimensional accuracy/%                          | 76     | 91     | +19.7         |
| Energy efficiency     | Power consumption per unit/kWh                  | 8.5    | 6.7    | -21.2         |
|                       | Monthly electricity cost/(10 <sup>4</sup> yuan) | 11.5   | 9.2    | -20           |
|                       | Hydraulic oil temperature/°C                    | 65     | 52     | -20           |
| Maintenance cost      | Mould repair cycle/months                       | 3      | 8      | +166.7        |
|                       | Annual maintenance cost/(10 <sup>4</sup> yuan)  | 18     | 12     | -33.3         |
| Economic benefits     | Monthly added profit/(10 <sup>4</sup> yuan)     | —      | 12     | —             |
|                       | Investment payback period/months                | —      | 7      | —             |

由表 6 看出,改造后综合效益显著,主要体现在产能提升近 15%,能耗降低超过 20%,产品合格率提高至 94% 以上,月均电费支出降低约 2.3 万元,同时设备稳定性大幅改善。经济效益评估考虑产能提升、质量改善、能耗降低和维护成本减少等因素,改造后每月新增利润约 12 万元,投资回收期为 7 个月左右,远低于企业设定的 18 个月目标,除产能提升

14.7%、能耗降低 21.2% 外,年减少 CO<sub>2</sub> 排放约 15.2 t,为企业绿色发展目标作出了积极贡献,该技术改造的显著经济价值为企业的可持续发展奠定了坚实基础。

#### 5 对角双拉杆单缸中心锁模系统的改进方向

虽然对角双拉杆单缸中心锁模系统在实际应用中展现了显著优势,但工程实践和理论分析表明该系

统仍有多方面改进空间。笔者基于实验数据和应用反馈,提出三个主要改进方向进一步提升系统性能和应用价值。

### 5.1 结构优化设计

现有对角双拉杆单缸中心锁模系统采用等截面拉杆设计,在力传递过程中存在应力分布不均的问题,特别是在拉杆与连接点交界处容易产生应力集中<sup>[15]</sup>。通过有限元分析技术对系统受力状态进行详细模拟,发现优化拉杆截面形状和连接节点结构可显著提高力传递效率,如图7所示,改进方案主要包括三个方面:一是拉杆渐变截面设计,该设计使拉杆中部稍细两端稍粗,从而使应力分布更加均匀;二是针对连接节点,采用球面接触结构代替传统平面接触,减少应力集中现象;三是采用拓扑优化技术对整体结构进行轻量化设计,在保证刚度的前提下减轻质量约15%。模拟计算显示,优化后的结构在1 200 kN锁模力条件下,最大应力降低约22%,变形减小约18%,同时系统响应速度提高约10%。变截面设计虽然增加了加工难度,但可通过数控加工技术实现,综合考虑成本增加约8%~10%,与性能提升相比仍具经济合理性。

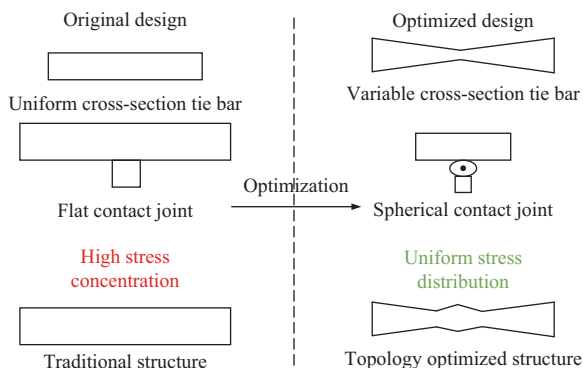


图7 结构优化设计前后对比图

Fig. 7 Comparison chart before and after structural optimization design

### 5.2 控制系统改进

当前对角双拉杆单缸中心锁模系统的控制主要基于压力控制,对锁模力的实际输出缺乏准确监测和反馈调节,导致实际工作中锁模力波动范围较大(约 $\pm 3.5\%$ ),改进方案是将比例压力控制技术与位置反馈系统结合,构建闭环控制架构实现锁模力的精确控制。具体实施路径包括在液压缸两端安装高精度压力传感器,在拉杆上安装应变片,实时监测系统实际受力状态,引入日本三菱电机株式会社5U系列PLC和美国穆格公司(MOOG Inc.)壁厚控制系统,构建高性能控制平台,采用模糊PID控制算

法,根据实时反馈数据动态调整液压系统输出。改进后的控制系统流程图如图8所示。

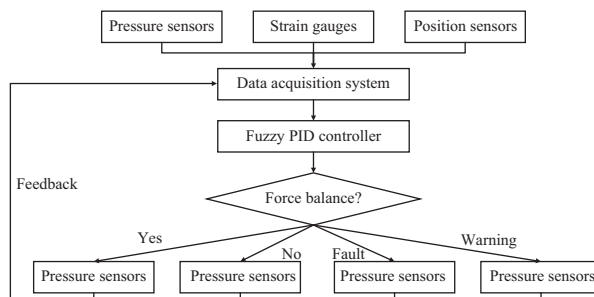


图8 改进后的控制系统流程图

Fig. 8 Flow chart of improved control system

试验结果表明,改进后的控制系统能将锁模力控制精度提高到 $\pm 1.2\%$ ,大幅优于原系统的 $\pm 3.5\%$ ,系统响应时间从原来的850 ms缩短至320 ms,动态稳定性显著提升。新控制系统还能够自动识别模具特性并优化锁模参数,适应不同规格模具的加工需求,具备故障诊断和预警功能,能够监测关键参数变化趋势,预判可能出现的问题,提前进行维护干预<sup>[16]</sup>。控制系统改进需增加的投入约为设备总成本的5%~7%,但通过提高产品质量稳定性和减少不良品率,投资回收期通常为8~10个月。

### 5.3 材料与加工工艺优化

对角双拉杆单缸中心锁模系统的关键零部件长期在高负荷高频率循环应力下工作,材料性能和加工精度直接影响系统的可靠性和使用寿命。通过对运行超过5 000 h的系统进行拆解分析,发现拉杆连接轴承、铰接轴和液压缸活塞是最易发生磨损的部件,针对这一问题提出优化方案:关键承载件从普通45号钢升级为42CrMo合金钢,提高材料强度约35%;铰接部位采用表面等离子氮化处理,形成深度约0.5 mm的硬化层,表面硬度从原来的HRC40提高到HRC58;液压缸内壁采用精密滚压工艺,表面粗糙度从 $Ra1.6$ 降至 $Ra0.4$ ,同时活塞采用碳纳米复合聚四氟乙烯密封圈,增强密封性和耐磨性。

耐久性测试表明经过材料和工艺优化后关键零部件的使用寿命显著延长。在模拟实际工况的加速寿命测试中,优化后的拉杆连接轴承寿命延长68%,铰接轴寿命延长55%,液压缸密封系统无泄漏且工作时间延长70%以上。长期运行数据显示优化后系统的年故障率降低约45%,计划外停机时间减少60%左右。实际应用证明,材料与工艺优化是提高对角双拉杆单缸中心锁模系统可靠性最经济

有效的途径之一。

## 6 结论

对角双拉杆单缸中心锁模系统在大型吹塑机中的应用效果显著。该系统通过优化力学传递路径实现了锁模力的均匀分布,显著提高力传递效率,改善锁模力分布均匀性,减少模具变形量,同时有效降低能耗。在产品质量方面合格率和壁厚均匀性均得到大幅提升,尺寸精度控制能力明显增强。大型储水桶生产成功案例表明使用该系统能为企业带来显著经济效益,随着结构优化设计、控制系统改进和材料与加工工艺优化等改进方向的实施,系统性能将进一步提升,使用寿命大幅延长,故障率明显降低。对角双拉杆单缸中心锁模系统不仅解决了传统锁模系统的技术瓶颈,其显著的节能减排效果也为塑料加工行业的绿色转型提供了重要技术路径,具有广阔的应用前景和推广价值。

## 参考文献

- [1] 高冲,刘淑梅,谢硕,等.基于CFD流固耦合传热的吹塑模具冷却系统优化[J].塑料,2019,48(2):94-97.  
GAO Chong, LIU Shumei, XIE Shuo, et al. Optimization of the cooling system of blowing mould based on fluid-solid coupled heat transfer analysis method[J]. *Plastics*, 2019, 48(2):94-97.
- [2] 贾然,李苗.基于PC的塑料吹塑机现场总线控制系统设计[J].塑料工业,2017,45(9):78-81.  
JIA Ran, LI Miao. Control system design of plastic blow molding machine based on PC[J]. *China Plastics Industry*, 2017, 45(9):78-81.
- [3] 杨勇,季刚.塑料薄膜吹塑机厚度模糊控制系统设计[J].机床与液压,2015,43(14):158-161.  
YANG Yong, JI Gang. Design of thickness fuzzy control system for blow film machine[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2015, 43(14):158-161.
- [4] PARK J H, KIM S K. Expansion injection molding process using clamping force for melt compression[J]. *Polymers*, 2024, 16(3). DOI:10.3390/polym16030424.
- [5] JIN Z M, ZHANG Y J, WANG X L, et al. Microstructure of injection moulding machine mould clamping mechanism: Design and motion simulation[J]. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2017, 2(3):101-108.
- [6] SELVARAJ S K, RAJ A, RISHIKESH MAHADEVAN R, et al. A review on machine learning models in injection molding machines [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022. DOI:10.1155/2022/1949061.
- [7] FENG Q, MAIER W, STEHLE T, et al. Optimization of a clamping concept based on machine learning[J]. *Production Engineering*, 2022, 16(1):9-22.
- [8] 肖成龙,黄汉雄,曾盛渠.基于PSO的变模温吹塑模具电加热系统设计优化[J].塑料工业,2022,50(11):95-100.  
XIAO Chenglong, HUANG Hanxiong, ZENG Shengqu. Optimal design of electric heating system in variotherm blow mold by particle swarm optimization[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(11):95-100.
- [9] 陈淑英.大容量挤注成型机及塑料增强材料的发展及前景[J].塑料科技,2015,43(6):98-100.  
CHEN Shuying. Development and prospect of high-capacity plastic injection molding machine and plastic reinforced materials[J]. *Plastics Science and Technology*, 2015, 43(6):98-100.
- [10] 王福玲.绿色发明创造的GLM-36000大型塑料包装注射成型设备及工艺[J].塑料包装,2017,27(5):1-8.  
WANG Fuling. GLM-36000 large plastic packaging injection molding equipment and process of green invention creation[J]. *Plastics Packaging*, 2017, 27(5):1-8.
- [11] HSIEH Y C, LIN H F. Energy-saving manufacturing technology for heating of injection stretching blow molding machine[J]. *Sensors and Materials*, 2020, 32(8):2 755-2 770.
- [12] CHEN Y W. Key technology of hydraulic system design of large-scale blow molding machine[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 713-715:118-121.
- [13] 洪炼.注塑机锁模动模板设计要点分析[J].机电信息,2024(24):41-44.  
HONG Lian. Analysis of design key points for movable platen of injection molding machine clamping unit[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2024(24):41-44.
- [14] 王佳赞,李国平,柳丽,等.三板式注塑机锁模状态下动模板应力与疲劳分析[J].机械制造,2021,59(3):28-31,64.  
WANG Jiayun, LI Guoping, LIU Li, et al. Analysis of stress and fatigue of movable platen in clamping state of two-platen injection molding machine[J]. *Machinery Manufacturing*, 2021, 59(3):28-31, 64.
- [15] 石志义,李国富.基于响应面分析法中空吹塑制品壁厚分布的优化设计[J].宁波大学学报(理工版),2022,35(2):73-78.  
SHI Zhiyi, LI Guofu. Optimization design of wall thickness distribution of hollow blow molded products based on response surface analysis[J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2022, 35(2):73-78.
- [16] 郭蕊,刘西霞,杨忠志,等.基于正交试验的中空灯笼吹塑成型的数值模拟及工艺参数优化[J].塑料工业,2023,51(4):88-92,116.  
GUO Rui, LIU Xixia, YANG Zhongzhi, et al. Numerical simulation and process parameter optimization of blow molding of hollow lantern based on orthogonal test[J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(4):88-92, 116.