

# 双层四模轮胎硫化机设计研发与制造 关键技术研究

吴宏阳, 李飞虎

(双钱集团(安徽)回力轮胎有限公司, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** 本文主要研究双层四模轮胎硫化机在半钢子午线轮胎硫化中的应用。双层四模硫化是指1台硫化机四模同步控制。研究表明, 与传统单层双模硫化机相比, 该双层四模轮胎硫化机的设备占地降低41%, 产能较单层双模提升180%, 单位轮胎能耗降低22%。

**关键词:** 半钢子午线轮胎; 四模硫化; 双层硫化

**引用论文:** 吴宏阳, 李飞虎. 双层四模轮胎硫化机设计研发与制造关键技术研究[J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(10):32-36.

**中图分类号:** TQ330.47

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1009-797X(2026)10-0032-05

**DOI:** 10.13520/j.cnki.rpte.2026.10.006

当前轮胎产业面临“提质、降本、增效”三重需求: 一方面, 高端轮胎对硫化精度(如花纹清晰度、胎体均匀度)要求提升, 传统单层硫化机温控误差( $\pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )难以满足; 另一方面, 车间土地成本上涨, 单层设备“占地大、产能低”的矛盾凸显(单台双模硫化机占地 $36\text{ m}^2$ , 包括后充气装置, 以每条轮胎硫化时间为 $11.5\text{ min}$ , 计算, 日均产能约250条)。双层四模硫化机通过“上下双层+每层双模”的创新布局, 可实现“占地近乎不变、产能接近翻倍”同样的硫化轮胎日产可达到450条左右, 但需突破三大技术难点和瓶颈:

**结构稳定性难点和瓶颈:** 双层布局导致机架受力复杂, 易出现变形或振动传递, 影响硫化精度。

**同步控制难点和瓶颈:** 四套模具(双层四模)需实现开合模、温控、加压同步, 相对于传统单层双模控制逻辑比较难控制。

**维护便捷性难点和瓶颈:** 上层模具离地高、上层模具空间较小, 后期检修与换模难度大。

为解决传统单层双模硫化机“产能低、占地广、能耗高”的行业痛点, 本文以双层四模轮胎硫化机为研究对象, 系统开展设计研发与制造全流程技术攻关。

通过三维建模(SolidWorks)、有限元仿真与工业制造生产的验证, 突破双层结构受力平衡、四模同步控制、高效温控及精密制造等核心技术, 研发出适配12"~17"轿车轮胎的硫化设备。

经6个月工业应用生产, 硫化合格率稳定在99.7%, 为轮胎产业规模化、绿色化生产提供关键装备支撑, 也为多模硫化机技术升级提供理论与实践参考。

本论文围绕上述瓶颈, 构建“设计—仿真—制造—验证”一体化技术方案, 推动设备产业化落地。

## 1 双层四模轮胎硫化机核心设计技术

### 1.1 双层四模整体布局与结构优化

#### 1.1.1 空间布局与干涉规避分析

采用“对称式双层框架”设计: 上层、下层模具中心距设定为 $2\ 060\text{ mm}$ , 每层2套模具横向间距 $840\text{ mm}$ , 通过SolidWorks运动仿真模拟开合模轨迹, 上层和中层单独同时开合。中层开合行程 $1\ 400\text{ mm}$ , 油缸采用 $\Phi 100$ , 速度 $7\text{ s/次}$ , 上层开合行程 $2\ 570\text{ mm}$ , 油缸采用 $\Phi 100$ , 速度 $13\text{ s/次}$ , 确保上下层、左右模无机械干涉。机架选用Q355高强度钢结构件, 开合模导向采用直线导轨HGW-55CB, 左右各两个直线导轨。锁模采用圆柱结构形式锁模, 横向插入左右两侧的机架预设的空位, 圆柱锁模采用45#调质材处理, 尺寸为 $\Phi 120\times 400\text{ mm}$ , 机架锁孔位采用蛋形孔形,

**作者简介:** 吴宏阳(1987—), 男, 本科, 主要研究方向为半钢子午线轮胎硫化生产工艺与过程管理。

竖立设置,方便圆柱锁头插入。中层和上层开模位锁定,机架锁孔位采用圆孔形结构,锁头采用圆柱体结构形式。锁模油缸放置在固定底座上,每套锁模主油缸采用锁模主油缸尺寸: $\Phi 180 \times 500 \text{ mm} \times 4$ ,最大合模力达到 1 900 kN,由于设计采用框架式机架,模具采用叠加式设计,故减少材料用量 25%,整机重量降至 32 t (较同产能传统设备轻 23% 左右)。

### 1.1.2 受力平衡于振动控制

基于有限元进行静力学和动力学受力仿真分析。

静力学仿真:满负荷硫化(四模同时保压 16 MPa)时,机架最大变形量 $\leq 0.12 \text{ mm}$ ,应力集中区域(锁紧插销孔处)应力值 $\leq 160 \text{ MPa}$ (Q355 屈服强度 345 MPa),安全系数 $\geq 2.15$ 。

动力学仿真:在开合模冲击工况下,通过下层模具底部“橡胶缓冲垫”(橡胶硬度 80 邵氏硬度),将设备振动幅度控制在 0.05 mm 以内,避免振动传递导致上层模具位移。

## 1.2 四模同步控制技术研发

### 1.2.1 同步锁模与开合模系统

采用“总液压驱动+分伺服调节”复合控制方案。

总油路:通过 1 台 5.5 kW 和 1 台 37 kW 伺服电机驱动液压泵提供液压动力,确保四模锁模力稳定输出(波动 $\pm 5 \text{ kN}$ );以及控制操作动作。

伺服调节:每套中层和上层模具配备独立的升降油缸装置,由伺服电机控制和提供动力,动作时间快,反应速度快(响应时间 $\leq 50 \text{ ms}$ ),PLC 基于模拟量 PID 算法实时修正伺服电机的转速,和流量,实现四模开合模同步误差 $\leq 0.5 \text{ mm}$ (传统设备同步误差 $\geq 2 \text{ mm}$ )。

左右上下模采用单独油缸+伺服液压控制,保证上下开合模同步运行,大大节省了开合模的时间(节省开合模时间 3~4 s),提高了生产效率。

### 1.2.2 四模同步温控系统

构建“集中供热+分模控温+保温优化”三级温控体系。

集中供热:每台双层四模硫化机的蒸汽管道采用高压蒸汽 $\Phi 40$ 总管进入(压力 1.6 MPa,温度 201 $^{\circ}\text{C}$ ),为四模提供硫化内热源。

热板加热蒸汽 $\Phi 25$ 为四模热板和模套提供热源;热板和模套采用单独蒸汽流量调节阀,共 4 套调节阀装置(调节精度 $\pm 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ),采用四套温度传感器,采用模拟量 PID 算法控制单模温控精度 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ,四模内间温差 $\leq 2.0^{\circ}\text{C}$ 。

保温优化:上层硫化室外侧加装 25 mm 厚硅酸铝棉保温层(导热系数 $\leq 0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),解决双层四模硫化机设备“上层散热快、温差超 2 $^{\circ}\text{C}$ ”的问题。

## 1.3 自动化与维护便捷性设计

### 1.3.1 全流程自动化集成

配置全自动独立的机械手装置。

(1) 存胎机械手装置:负载 200 kg,定位精度 $\pm 1.0 \text{ mm}$ ,机械手存胎架可存胎不同规格轮胎(直径 510~850 mm),左右各设置两套上下层存胎机械手存胎架装置,下层存胎机械手存胎架装置为固定设置,上层机械手存胎架装置为上下可移动,下方位置可方便放置轮胎操作,上方位置方便抓轮胎操作。

(2) 装胎机械手装置:负载 500 kg,定位精度在 $\pm 1.0 \text{ mm}$ ,装胎机械手可抓胎不同的规格轮胎(轮胎尺寸:12"~17",轮胎外径为:510~850 mm)

(3) 采用视觉监视,可控制或观察轮胎定型时的状态,可设别轮胎定型的偏差,并及时提醒或提示。

### 1.3.2 维护便捷性优化

(1) 考虑到上层操作和维修,把安装基础位于操作 0.00 面以下(-1 350)左右,便于下层和上层的维修或操作。

(2) 上层检修:设计可翻转检修平台(承重 300 kg,翻转角度 0~90 $^{\circ}$ ),平台配备安全护栏与照明,检修人员可快速进入上层空间。

(3) 设置了换模位置,上层活动梁(上模安装螺栓位置)离 0.00 面以上(+1 560 mm)左右,便于下层模具和上层模具的更换或操作。

(4) 合模加压液压油缸装置,设置在下底座处。便于维修或操作。

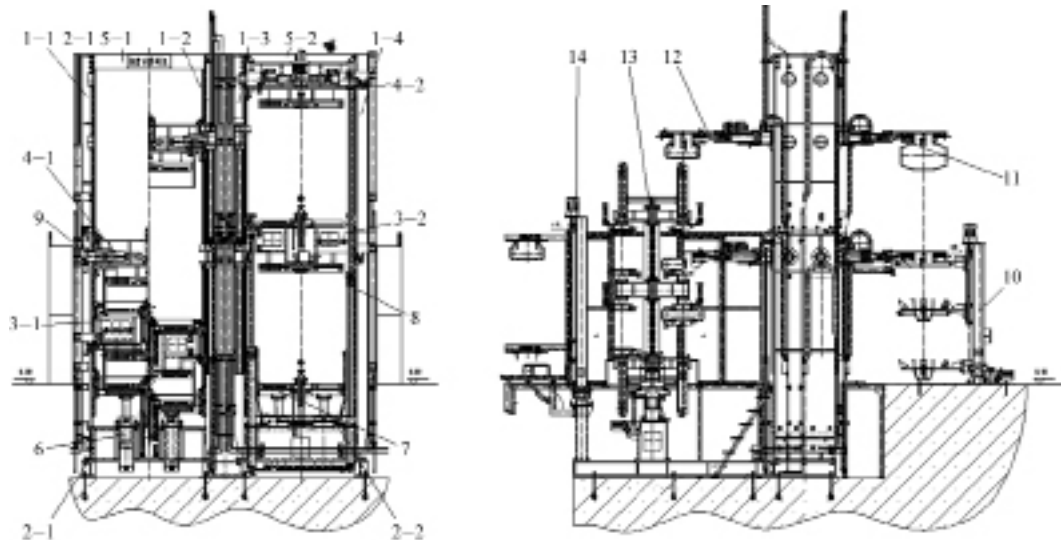
(5) 可实施在线检测和诊断,关键部件(如温度、压力以及伺服电机等)均预留了 RS485 接口,可将实时监测数据上传至云端平台,支持设备故障预警和远程设备故障诊断等。

## 2 双层四模硫化机制造工艺改进

### 2.1 机架关键部件加工

(1) 左右立柱:采用“焊接结构件—时效处理—数控镗铣削加工—数控检测”等工艺,左右平面平行度误差 $\leq 0.015 \text{ mm/m}$ ,

(2) 上层、中层和底座等横梁:采用“焊接结构件—时效处理—数控镗铣削加工—数控检测”等工艺,上下平面平行度误差 $\leq 0.015 \text{ mm/m}$ ,确保双层



双层四模硫化机图示说明:1-1、1-2、1-3、1-4—机架立柱;2-1、2-2—左右底座;3-1、3-2—左右中层活动横梁;4-1、4-2—左右上层活动横梁;5-1、5-2—左右顶层横梁;6—合模锁力油缸装置(左右各4套油缸);7—中层开合模油缸;8—上层开合模油缸;9—左右锁模圆柱插销锁模装置;10—左右存胎装置(上下层);11—左右装胎机械手装置(上下层);12—左右取胎装置(上下层);13—左右后充气装置(2×4工位,前后旋转式);14—出胎机械手装置(上下层)

图1 双层四模液压硫化机图

模具安装基准一致。

## 2.2 模块化装配与精密调试

### 2.2.1 模块化装配流程

(1) 将设备拆分为12大独立模块(左右立柱、上层活动梁、中层活动梁、下层底座、存胎器装置、装胎器装置、取胎器装置、前后旋转式后充气装置、出胎器装置、硫化热工管路控制、液压控制和电气控制系统等),通过专用工装台预装(工装定位精度 $\pm 0.02$  mm)。

(2) 左右立柱和上层、中层和底座横梁等4个模块:预装立柱、横梁,确保立柱与横梁之间的平行度和垂直度,分别为 $\leq 0.02$  mm。

(3) 四模温控模块:预装蒸汽管道、流量阀、传感器,测试单模温控响应速度( $\leq 0.1$  s)。

(4) 自动化上下抓取胎胚和轮胎模块:四套(存、装、抓、取)机械手装置、视觉系统,调试定位精度( $\pm 0.1$  mm)。

采用模块化预装工艺方式完成总装,周期较传统散装周期可缩短30%左右,由原来2个月缩短到45天左右。

### 2.2.2 分阶段精密调试

(1) 同步性调试:设定“空载→半载→满载”三阶段测试,空载时四模开合同步误差 $\leq 0.3$  mm,满

载(锁模力1 900 kN)时同步误差 $\leq 0.5$  mm。

(2) 四模温控调试:模拟硫化工况(温度200℃、压力16 MPa)连续运行48 h,记录四模温度数据,通过微调蒸汽流量调节阀,使四模热板温差 $\leq 1.5$ ℃

(3) 整机联动试车:从存胎开始—上下环、机械手自动装胎—定型—合模—加压硫化—正硫化—硫化结束—上下环、机械手自动取胎—上后充气—取胎上成品胎输送线,全自动运行比较平稳可靠,运行72 h无故障。

## 3 性能验证与工业应用

以设计研发双层四模液压硫化机为对象,在轮胎企业开展1年多工业生产验证(硫化生产195/65R15轿车轮胎),检验和测试的关键性能指标如下:

### 3.1 性能

#### (1) 室内性能

在采用双层四模硫化的半钢子午线轮胎的一些代表规格进行试验,并进行成品性能测试对比。结果表明,双层四模硫化轮胎的各项性能测试均优于国标性能要求。

#### (2) 均匀性、动平衡

我们选取正常量产的规格进行均匀性和动平衡测

表 1 高速、耐久、强度、脱圈阻力测试结果

| 项目   | 规格           | 测试方法          | 国标性能要求  | 双层四模测试        |
|------|--------------|---------------|---------|---------------|
| 高速   | 195/65R1591V | GB/T4501—2023 | 60 min  | 84 min/91 min |
| 耐久   | 195/65R1591V | GB/T4501—2023 | 35.5 h  | 107.5 h       |
| 脱圈阻力 | 195/65R1591V | GB9743—2015   | 8 890 N | 9 979 N       |
| 强度   | 195/65R1591V | GB9743—2015   | 295 J   | 531 J         |

表 2 外缘测试结果

| 项目 | 规格           | 测试方法         | 国标要求           |                |           | 双层四模轮胎测试结果 |        |           |
|----|--------------|--------------|----------------|----------------|-----------|------------|--------|-----------|
|    |              |              | 外直径/mm         | 总宽度/mm         | 磨耗标记高度/mm | 外直径/mm     | 总宽度/mm | 磨耗标记高度/mm |
| 外缘 | 195/65R1591V | GB/T521—2023 | 635<br>628—642 | 201<br>193—205 | 不小于 1.6   | 634        | 204    | 1.9       |

试对比验证，发现双层四模硫化机对均匀性动平衡影响较小，在可控范围内，可以满足要求，下表为双层四模硫化轮胎与传统单层双模的均匀性动平衡数据对比（以 195/65R1591V 产品为例）：

3.2 产能和精度

经过近 6 个月持续生产使用统计，日均生产 450 条（较单层双模提升 180%）。

表 3 双层四模硫化机对均匀性动平衡的影响

| 类别   | 序号 | 均匀性检测结果 |      |      |      |       | 动平衡检测结果 |       |       |
|------|----|---------|------|------|------|-------|---------|-------|-------|
|      |    | RFV     | R1H  | LFV  | L1H  | CON   | Static  | UPPER | LOWER |
| 单层双模 | 1  | 7.15    | 5.23 | 4.12 | 3.18 | -3.06 | 358.9   | 15.26 | 18.9  |
|      | 2  | 6.73    | 5.16 | 4.23 | 3.16 | -1.35 | 600     | 5.16  | 21.02 |
|      | 3  | 6.45    | 4.52 | 3.22 | 2.18 | -1.65 | 455.8   | 10.25 | 16.12 |
|      | 4  | 5.16    | 4.23 | 3.12 | 2.16 | -2.03 | 288.9   | 4.61  | 13.78 |
|      | 均值 | 6.11    | 4.64 | 3.52 | 2.5  | -1.68 | 448.23  | 6.67  | 16.97 |
| 双层四模 | 1  | 7.56    | 6.62 | 4.65 | 4.84 | -2.15 | 481.5   | 15.03 | 6.98  |
|      | 2  | 8.16    | 6.58 | 4.56 | 4.36 | -3.5  | 699.8   | 19.94 | 12.83 |
|      | 3  | 9.12    | 8.16 | 5.16 | 4.82 | -3.26 | 479.05  | 30.12 | 15.16 |
|      | 4  | 8.15    | 6.43 | 5.48 | 5.19 | -3.56 | 455.6   | 15.89 | 16.17 |
|      | 均值 | 8.25    | 6.95 | 4.96 | 4.8  | -3.12 | 528.99  | 20.25 | 12.79 |

3.3 耗和稳定性

单位轮胎硫化能耗 0.8 kW·h（较传统设备降低 22%），设备连续运行故障率 0.35%/ 年（低于设计目标 0.4%/ 年）。

3.4 生产灵活性

支持 12~17 英寸轮胎无限制更换规格要求，换模时间 35 min/ 次，满足轮胎企业产量提升需求。

4 结论

本文通过双层四模轮胎硫化机的设计研发与制造，验证了“多模化、自动化、低能耗”的硫化装备发展方向，核心成果如下：

- （1）突破双层结构受力平衡与四模同步控制技术，解决了“高产能与高精度”的矛盾。
- （2）优化精密制造与模块化装配工艺，提升设备

稳定性与维护便捷性。

- （3）业应用表明设备可满足轮胎规模化生产需求，具备显著经济与环境效益。

5 未来研发可向几个方向的深化

- （1）材料和结构的创新：采用更好的结构和材料，使硫化机整机强度增加或重量减轻。
- （2）智能升级：集成数字孪生技术，实现设备全生命周期虚拟仿真与故障预警（准确率≥ 95%）。
- （3）绿色转型：采用电加热氮气直接硫化，减少或取消蒸汽硫化；提高或提升运行同步精度（投标误差率≤ 0.5 mm）。
- （4）进一步提高或提升与前道工艺工序或后道工艺工序的自动化衔接，减少人为干预，使设备的自动化率提升到 95% 以上。

## Research on the design, development and manufacturing key technologies of double-layer four-mold tire curing press

Wu Hongyang, Li Feihu

(Double Coin Group (Anhui) WarriorTire Co. LTD., Wuhu 241000, Anhui, China)

**Abstract:** This article primarily investigates the application of a double-layer four-mold tire curing press in the curing of semi-steel radial tires. Double-layer four-mold curing refers to the synchronous control of four molds on one curing press. The research results indicate that, compared to traditional single-layer dual-mold curing presses, this double-layer four-mold tire curing press reduces equipment footprint by 41%, increases production capacity by 180% compared to single-layer dual-mold, and reduces energy consumption per tire by 22%.

**Key words:** semi-steel radial tire; four-mold vulcanization; double-layer vulcanization

(R-03)

## 炭黑逼近万元关口，轮胎成本压力再度升级

Carbon black nearing the 10,000 yuan mark, tire cost pressure escalating again

2026年9月8日，内蒙古广聚新材料高温煤焦油拍卖成交5 910~6 150元/t，较起拍价单次上涨超1 400元，较上周同期涨近1 500元，逼近2022年12月约6 650元的历史高点。市场关于炭黑“万元时代”的讨论迅速升温。

煤焦油占炭黑生产成本约70%~80%，炭黑又占轮胎成本约15%。煤焦油单吨涨上千元，先压缩炭黑厂利润，再推动炭黑涨价，最终传导至轮胎制造成本。

炭黑已在跟涨。截至9月初，N220市场价约9 628元/t，同比涨近36%；N330主流8 500~8 800元/t，单日涨幅曾达550元。炭黑样本开工率约65%，供应并不宽松。

但轮胎厂对高价炭黑接受度有限，半钢产能利用率约65%，全钢约65%，均以刚需采购为主。

成本端压力已经显现。8月下旬以来，风神、三角、万力、正新、玛吉斯等超20家企业发布调价通知，主流涨幅2%~3%。但8月全钢胎原材料成本指数同比涨15%，调价幅度远未覆盖成本涨幅。

若煤焦油维持高位，炭黑新单仍有上调压力，轮胎企业9月中下旬补涨概率较大。但需求端并不配合：7月全钢、半钢开工环比下滑，过半工厂订单回落，经销商对涨价接受度有限。

轮胎厂大幅提价可能导致渠道减少备货，不提则单胎毛利继续被原料吃掉。结果更可能是分批小涨、按型号调整。

后市看三个变量：焦化开工能否回升、炭黑厂利润与开工率、轮胎终端走货情况。若焦化低开工持续整个四季度，炭黑成本高位运行，轮胎行业再度集体调价就不仅是预期，而是成本账逼出来的结果。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)

