

硫化机中心机构防内漏组合密封装置的设计及运用

徐祥，蒲晓东，余进塘

(贵州轮胎股份有限公司，贵州 贵阳 550001)

摘要：硫化工序是轮胎制造的核心关键工序，其运行稳定性直接决定轮胎成品的质量精度与生产效率。硫化机中心机构作为硫化工序的核心执行单元，承担着轮胎胎胚定型定中、加热介质传递、成品轮胎取放等多重职能。现有中心机构存在密封性能易失效、密封组件拆装烦琐等问题，不仅造成加热介质泄漏与能源损耗，还因频繁维护停机降低生产效率、增加运维成本。针对上述痛点，本文通过重构中心机构结构、研发防内漏组合密封装置，结合有限元仿真与实际工况测试，对优化后构件的导热均匀性、密封可靠性等关键指标开展系统分析。基于仿真与试验结果优化形成的硫化机中心机构及防内漏装置方案，兼具实用性与经济性，为解决行业现有技术难题提供了技术支撑。

关键词：中心机构；硫化机；导热系数；密封性能；防内漏装置

引用论文：徐祥，蒲晓东，余进。塘硫化机中心机构防内漏组合密封装置的设计及运用[J]. 橡塑技术与装备，2026，52(10):83-90.

中图分类号：TQ330.47

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2026)10-0083-08

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.10.016

0 前言

我国的制造业正在由集约型向智能化转型的过程中，信息化和数字化技术的应用也越来越深入，是轮胎行业升级的主要推动力。由于部分企业受自身资源约束，不能进行大规模的设备更新和技术革新，通过易损件进行改良以达到降本增效的目的，成为这类企业突破发展瓶颈的重要途径。

硫化机中心机构密封性能好坏直接决定硫化介质泄漏量及温度场是否均匀，是保证硫化工艺稳定的决定性因素。本文以硫化机中心机构的密封性优化为中心，通过建立密封性能计算模型的方法，对实际工况下胶囊内部温度场分布、流体流动情况等重要参数进行分析，并提出优化设计防内漏组合密封装置的方案。该设计可以减小中心机构对密封件的依赖程度，利用密封组件的互换性快速更换，减少由于密封件更换造成的停机损失，提高硫化工艺的稳定性，从而达到轮胎生产效率和产品质量双提升的目的。

1 温度对橡胶硫化的影响及工程控制

内温属于轮胎硫化过程中的关键控制要素，它与橡胶分子的交联反应程度以及交联网络的均匀情况有着紧密联系，从而对轮胎的物理性能、尺寸精确度乃

至寿命产生影响^[1]。本文从作用机理、影响规律和工程控制要点进行综合分析。

1.1 内温对橡胶交联反应的作用机理

轮胎硫化的本质是橡胶分子在硫化剂和促进剂的作用下，经过热活化交联反应生成三维网状结构的过程。内温是这个过程的能源，它影响的是反应速率和交联网络结构两个方面。

反应速率：根据阿累尼乌斯方程，交联反应速率与温度呈指数关系，公式为：

$$k=A_E \frac{K}{RT}$$

式中：

k — 是交联反应的速率常数；

E — 反应的活化能；

R — 气体常数；

T — 绝对温度。

内温越高，交联反应越快，达到正硫化点所需时间就越短；内温不足，反应速率太慢，硫化周期就会延长。

交联网络结构：内温均匀性影响交联密度分布。

作者简介：徐祥（1993—），男，本科，工程师，主要从事橡胶设备、模具技术方面的工作。

当模具型腔内部温差较小时,橡胶各部位的交联密度相同,轮胎硫化后力学性能均衡;如果内温分布不均匀,则高温处交联过度,低温处交联不足,直接导致轮胎出现局部性能缺陷。

1.2 内温对轮胎性能的影响

轮胎硫化的过程是橡胶大分子链发生化学交联反应的过程,包括橡胶分子与硫化剂及其他配合剂之间发生的一系列化学反应,以及在形成网状结构时伴随发生的各种副反应,使其具有一定强度的同时,还拥有弹性和耐磨性。

轮胎内温异常(过高、过低、分布不均)从物理机械性能、尺寸精度、使用寿命三个角度都会对轮胎整体性能产生较大影响,因此内温的均匀性和稳定性是保证轮胎性能和可靠性的主要因素之一^[3]。

1.3 硫化内温的工程控制要点

内温均匀性控制,密封装置密封性能的好坏决定硫化介质泄漏和流通。良好的密封结构可以减少介质的泄露,防止型腔局部产生冷区;使硫化介质均匀分布在型腔内,减小型腔内温度差。

温度与压力协同控制,在内温和型腔压力呈正相关的条件下,稳定的密封性能可以保证压力不变,进而保持内温不变。正硫化阶段要严格按工艺曲线控制内温,防止由于压力波动引起内温急剧上升或者下降。

硫化工艺匹配性,不同规格轮胎的胶料配方不一样,需要的硫化内温也不同。根据胶料的硫化特性曲线确定最优的内温参数,利用密封装置、温控系统一起进行工艺参数的精确控制。

2 硫化机中心机构泄漏成因分析

2.1 密封结构设计缺陷

密封结构设计不合理属于泄漏的先天性隐患,主要表现在三个方面,一是密封形式不适应,单个O型圈密封不能满足硫化机0.8~2.5 MPa压力、150~200℃温度的工作要求,压力波动会造成渗漏^[4];二是密封面和密封槽加工精度不合格,表面粗糙度达不到Ra0.8 μm以下或者尺寸公差超差,破坏密封贴合效果^[5];三是缺少导向和防扭转结构,高频次径向摆动容易造成密封件扭曲失效^[6]。

2.2 工况环境与介质侵蚀作用

恶劣工况是造成密封失效的外在环境因素,温压循环冲击会造成密封件的疲劳老化、弹性衰减,加热介质中的杂质容易对密封面造成划伤,高温氧化物质

会使密封件硬化龟裂,车间粉尘和橡胶碎屑进入密封腔,会使密封件磨损加剧,在没有防尘防护的情况下密封件使用寿命会进一步下降^[7]。

2.3 安装与维护操作不规范

人为的操作不当,也会造成密封失效。主要问题有:密封件安装时没有涂专用润滑脂,暴力装配或者安装方向错误;维护周期不合理,只更换主密封件而使密封腔不干净;设备调试参数偏差,造成密封件承受额外的冲击和偏磨。

2.4 材料性能衰减与选型不当

密封材料匹配度低、性能衰减为密封泄漏原因的内部因素,丁腈橡胶耐温性能差、氟橡胶等高性能材料选型和工况不匹配^[8],高温高压时密封材料会发生热氧老化,导致硬度升高、弹性降低;低质量再生密封件存在内部缺陷,尺寸稳定性不好,容易破裂或变形^[9]。

综上所述,提高中心机构密封可靠性的途径可以从改进密封结构、加强工况防护、规范操作维护、选用密封材料四个方面着手实施。

3 防内漏组合密封装置设计

基于原中心机构密封装置的基准尺寸,结合泄漏成因分析,以复合密封结构为核心^[10]、组件快速更换为设计切入点,研发中心机构防内漏组合密封装置,同时优化装置的模块化快装结构,实现密封组件的便捷拆卸与维护。

3.1 原密封装置结构问题

原中心机构密封装置以单一O型圈为核心密封元件(图1),无耐磨防护与防尘结构,在高温高压工况下易出现密封件挤出、磨损、扭曲等问题,且密封组件为整体式结构,拆装繁琐,维护耗时较长。

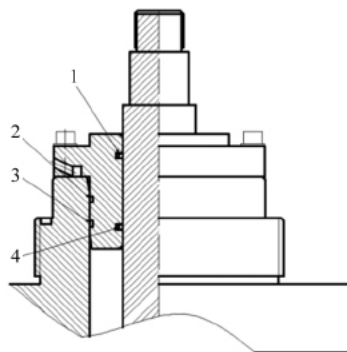


图1 原密封装置图

3.2 防内漏组合密封装置结构设计

防内漏组合密封装置采用 O 型圈 +YXD 密封圈 + 耐磨环 +V 型组合密封 + 防尘圈五层复合密封结构(图 2), 各组件协同作用形成高效密封屏障, 同时解决了原装置的结构缺陷。

耐磨环通过物理隔离, 减少主密封件与活塞杆的直接摩擦损耗, 延长密封件使用寿命;

耐磨环与 V 型组合密封形成阶梯式支撑结构, 有效抑制高压工况下密封件的挤出变形问题;

防尘圈可阻挡车间粉尘、橡胶碎屑进入密封腔, 避免密封件磨损失效; 最后采用模块化快装结构, 密封组件可独立拆卸、快速更换, 大幅缩短维护时间。

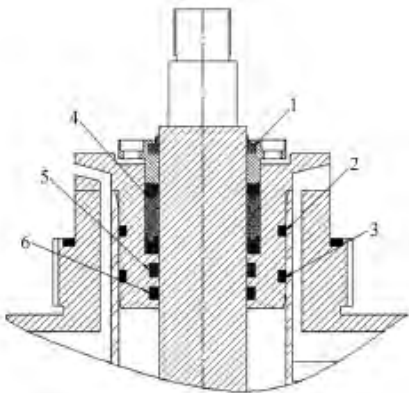


图 2 防内漏组合密封装置

4 防内漏组合密封装置密封选型及其符合验证

4.1 O 型密封圈性能参数验证

根据材料选型, 基于现状及设备固有尺寸, O 型密封圈尺寸为 85×5.5,

$$W=\frac{d_0-H}{d_0}\times 100\%$$

W— 压缩率;

d_0 —O 型圈的截面直径;

H— 密封沟槽的深度。

现行密封槽槽深 4.5 mm,

则: $W=\frac{d_0-H}{d_0}\times 100\%=18.1\%$, 则符合要求。

沟槽填充率 (K) — 防止 O 型圈挤出的关键。

$$K=\frac{A_{\text{O 圈}}}{A_{\text{沟槽}}}\times 100\%$$

K— 填充率 (推荐取值 75%~90%, 低于 75% 易导致 O 型圈窜动, 高于 90% 无变形空间);

$A_{\text{O 圈}}$ —O 型圈的截面面积。

$A_{\text{沟槽}}$: 密封沟槽的截面面积, 矩形沟槽为 $A_{\text{沟槽}}$

$=b\cdot H$ (b 为沟槽宽度)。

$$K=\frac{A_{\text{O 圈}}}{A_{\text{沟槽}}}\times 100\%=(23.75/27)\times 100\%=87.96\% \text{ 符合}$$

要求。

接触应力 (P_c) 密封性能的直接判定依据。

$$P_c=E\times \frac{W}{100}\times \frac{1}{1-u^2}$$

P_c —O 型圈与密封面的接触应力, MPa;

E—O 型圈材料的弹性模量 (MPa, 丁腈橡胶 NBR 通常为 10~30 MPa, 氟橡胶 FKM 通常为 20~40 MPa);

W— 压缩率, %;

μ — 材料的泊松比 (橡胶类通常取 0.45~0.5)。

$$P_c=E\times \frac{W}{100}\times \frac{1}{1-u^2}=7.45 \text{ MPa}$$

密封判断条件: $P_c\geq P_m+P_s$ 。

P_m — 密封介质的工作压力, MPa;

P_s — 安全余量 (MPa, 通常取 0.5~1.0 MPa, 高压工况需增大)。

现场工作介质为 2.8 MPa, 安全余量为 1.0 MPa, P_c 为 7.45 MPa, 则符合要求。

4.2 V 型密封圈选型与泄漏量验证

V 型密封圈依靠过盈配合使唇尖预变形实现低压密封, 压力升高时密封能力同步增强^[11]; 过盈量需根据介质是否含颗粒调整: 无颗粒时取小值以保证润滑, 含颗粒时取大值以减薄液膜、减轻磨损; 增大唇口角度可提升带回液体能力、降低泄漏量^[12]。

根据活塞杆密封示意图 (图 3) 及动密封表面液膜及液膜压力示意图 (图 4), 结合现有中心机构活塞杆运动速度为 1 m/s、活塞杆直径为 50 mm, 对密封装置进行 V 型密封圈选型, 具体选型如表 1。

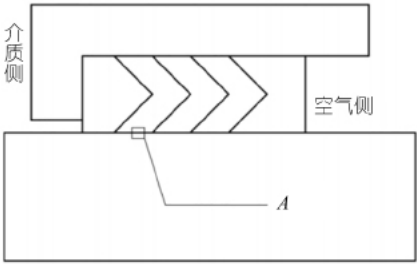


图 3 活塞杆密封示意图

表 1 密封圈选型尺寸

密封圈组合总厚 /mm	内圈过盈量 /mm	外圈过盈量 /mm	唇口角度 /°
40	0.1	0.1	2

对所选择的材料进行装配后, 计算单个部件的泄漏量。

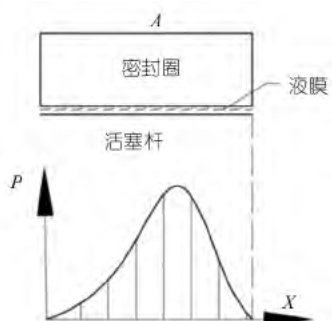


图4 动密封表面液膜及液膜压力示意图

$$Q = \frac{\pi d s^3}{12 \eta L} \Delta P$$

式中：

d —轴径，mm；

s —填料与轴半径间隙，mm；

η —液体流动黏度，Pa·s；

L —填料与轴接触长度，mm；

ΔP —填料两侧的压差，Pa。

通过实际计算：

$$Q = 0.3805 \text{ mm}^3/\text{s}$$

基于数值计算的泄漏量结果与《机械设计手册》（成大仙，第五版）表 10-3-9 规范对比，满足设计指标^[13]。鉴于软填料密封存在非线性行为，额外开展温度场测试与有限元仿真分析，进一步验证了优化方案的可靠性与可行性。

5 密封装置温压测温试验

为验证防内漏组合密封装置对硫化温压稳定性的提升效果，选取 8.25-16-16E-2Y 轮胎为试验对象，在同机型硫化机上分别安装防内漏组合密封装置、原密封装置，开展同一规格轮胎的硫化生产试验，实时检测并记录硫化周期内的型腔温度与压力数据，对比分析温压变化曲线（图 5、图 6）。

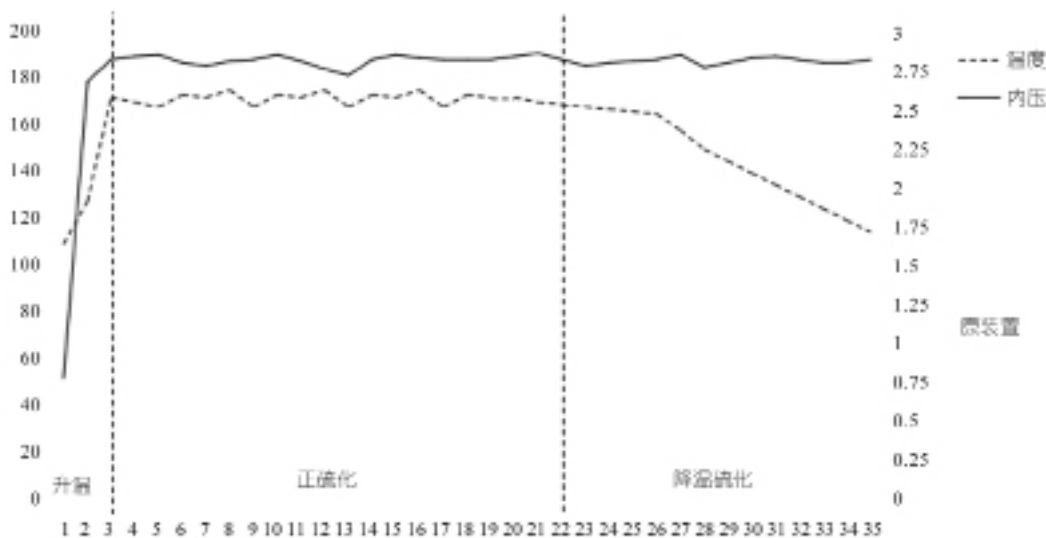


图5 原密封装置硫化周期内温度-内压变化曲线

试验结果表明，原密封装置正硫化及次硫化时温压参数均满足工艺规范要求，但是防内漏组合密封装置的温压稳定性比原密封装置高很多。

原密封装置由于密封性能不好，造成局部介质微渗漏现象，引起型腔的温压产生周期性波动，曲线有明显的峰值和谷值交替出现的情况。

防内漏组合密封装置依靠复合密封结构改善了密封界面的贴合程度和可靠性，有效避免了硫化介质的渗漏，型腔温度压力一直维持在一个稳定的范围内，波动幅度明显减小，曲线走势较为平稳。

6 密封装置内部流体试验

6.1 仿真模型构建

根据原密封装置和防内漏组合密封装置的关键结构尺寸（图 7、图 8），用 SOLIDWORKS 软件来建立三维几何模型。为了提高仿真效率，在保证计算精度的基础上，对模型进行合理的简化，只保留了密封件、流道等重要的结构，为后面流体动力学的分析提供了一个可靠的几何基础。

在此基础上，基于计算流体动力学方法，对两类机构内部的流体流动特性展开系统性仿真分析，最终获取的流体运动轨迹、流量分布等关键模拟结果如下

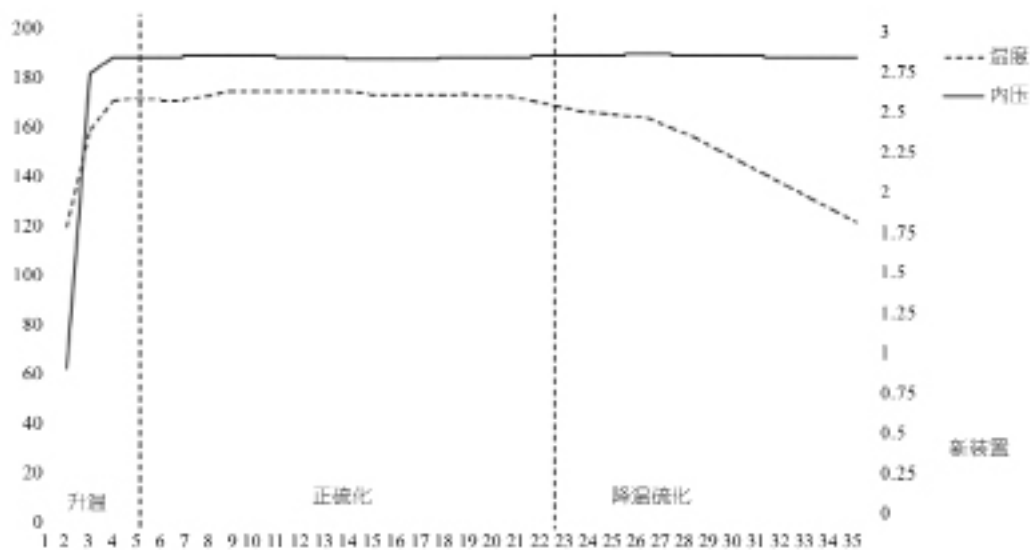


图 6 防内漏组合密封装置硫化周期内温度 - 内压变化曲线

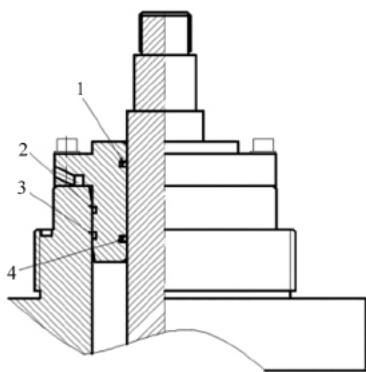


图 7 原密封装置示意图

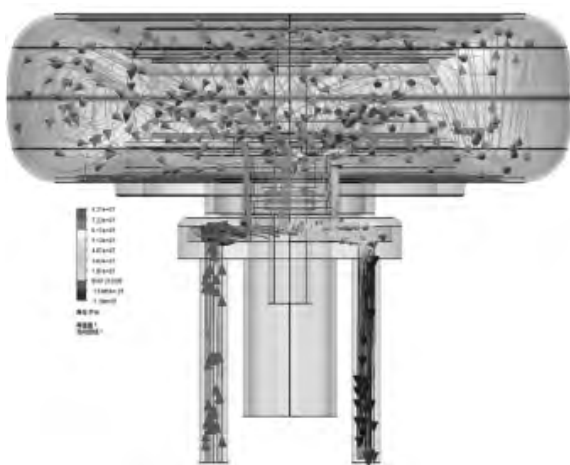


图 9 原密封装置的流体运动图

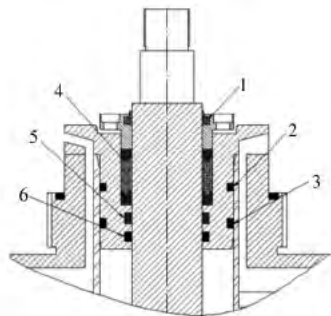


图 8 防内漏组合密封装置示意图

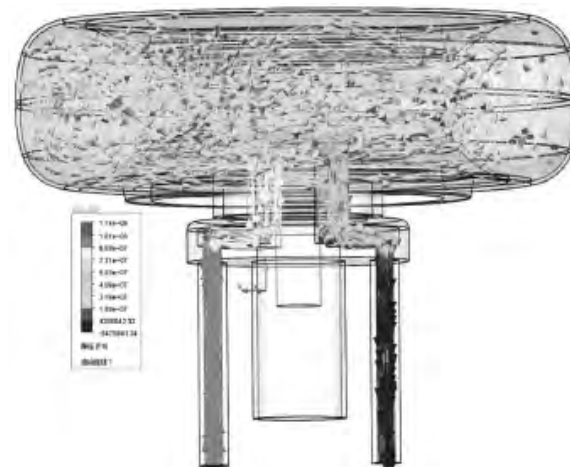


图 10 防内漏组合密封装置的流体运动图

列各图所示（图 9、图 10）。

6.2 仿真结果分析

通过原密封装置与防内漏组合密封装置内部的流体运动轨迹、流量分布等关键数据（图 9、图 10），分

析结果表明：

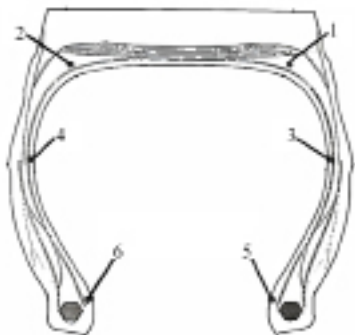
防内漏组合密封装置内部流体运动轨迹的均匀性显著优于原装置，流动路径的一致性与稳定性更高，有效降低了局部流场畸变、湍流扰动等不利因素的影响；

流体分布均匀性的提升可保障硫化介质在型腔内部的均匀传递，进一步优化轮胎硫化的温度场分布，为提升硫化工艺可靠性提供了良好的流体动力学基础。

7 密封装置温度特性试验

7.1 试验方案设计

为了定量地评价防内漏组合密封装置对轮胎硫化内温均匀性的改善效果，在轮胎胎里相应位置设置 6 个温度测量点（图 11），分别分布在胎里肩部、胎侧、趾口等关键部位，完整记录硫化升温过程中各个测点的温度变化曲线。



1—上模胎里肩部；2—下模胎里肩部；3—上模胎里胎侧；
4—下模胎里胎侧；5—上模胎里趾口；6—下模胎里趾口

图 11 轮胎测温点示意图

保持硫化压力、蒸汽温度、硫化时间等工艺参数完全一致，在同一台硫化机上分别装配原密封装置和防内漏组合密封装置，使用规格统一的同一批次胎胚进行平行对比试验，使用高精度温度传感器实时采集胎胚内部温度数据，并绘制温度—时间曲线（图 12、图 13）对不同装置下胎胚升温速率和内温场均匀性进行对比分析，为装置优化效果提供量化的验证依据。

7.2 试验结果分析

7.2.1 改进前温度特性

原密封装置的测温曲线（图 12）显示各个测点的温度曲线差别很大，升温速度很慢，不同部位的温度相差较多，温度场均匀性不好；端部测点温度明显滞后于上、下部测点，说明装置内部热传导效率低，与有限元仿真中热流分布不均的结论相同。

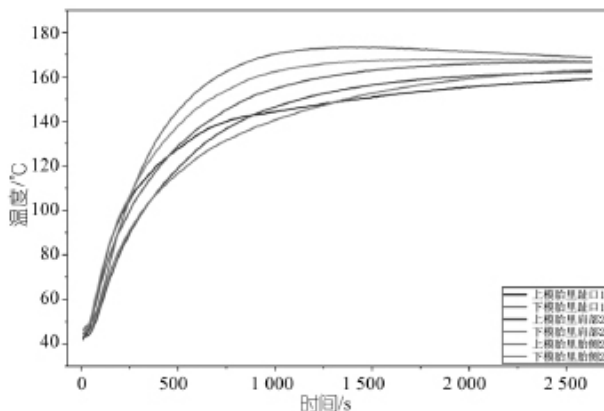


图 12 原密封装置测温曲线

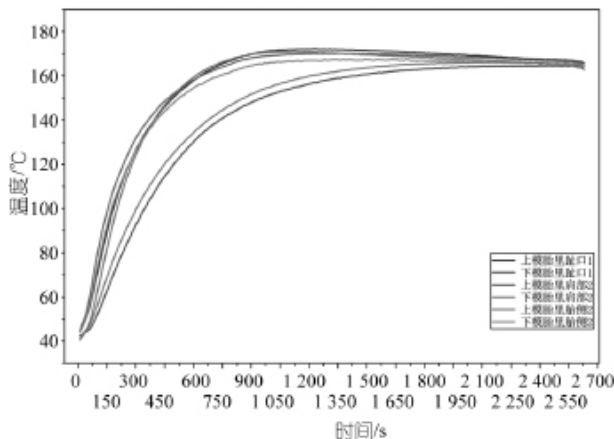


图 13 防内漏组合密封装置测温曲线

7.2.2 改进后温度特性

经过改进后的防内漏组合密封装置测温曲线如图 13 所示，各个测点温度曲线重合度高、升温快、相同时间内达到更高的温度，热响应效率提高；各测点间温差小、温度场分布更均匀，防止局部过热、温度滞后等问题，满足设计要求。

7.3 试验与仿真结果对比

试验结果与有限元仿真结果在升温速率与温度场分布趋势上高度吻合，试验中观察到的升温速率提升、温度均匀性改善，与仿真中结构优化实现的热传导效率提升、热流分布均匀化结论相互印证。该结果不仅证实了防内漏组合密封装置温度性能达到预期指标，也为装置结构优化的有效性提供了直接试验依据。

8 密封装置性能及耐久性试验

8.1 试验数据统计

为验证防内漏组合密封装置的性能优势，选取 LHJ-180、LHJ-182、LHJ-186、LHJ-190、LHJ-193、LHJ-196 共 6 台同型号硫化机，采用同平台性能

比对法开展防内漏组合密封装置、原密封装置的耐久性试验，试验过程中保持运行参数、生产工况及维护

标准一致，仅更换密封装置结构形式，记录装置从投用至密封失效的实际使用时长。防内漏组合密封装置

表 2 防内漏组合密封装置与原密封装置使用时长对比表

试验机台	使用时长 /h					
	LHJ-180	LHJ-182	LHJ-186	LHJ-190	LHJ-193	LHJ-196
原结构密封装置	268	242	216	226	207	262
防内漏组合密封装置	4 305	4 208	4 318	3 986	4 123	4 322

及其原密封装置的密封实际使用时长统计结果如表 2 所示。

8.2 试验结果分析

原密封装置的平均使用时长仅为 236 h，单台最长 268 h、最短 207 h，使用寿命较短且没有明显性能优势；

防内漏组合密封装置的平均使用时长为 4 210 h，单台最大 4 322 h、最小 3 986 h，各个机台使用时长比较稳定，没有出现明显的密封性能衰减；

防内漏组合密封装置的平均使用时间比原来的装置提高了约 17 倍，延长了硫化机密封系统的工作寿命，从而降低了由于密封失效造成的停机维护次数。

9 结论

本文通过对硫化机中心机构泄漏成因进行分析，并设计出一种防内漏组合密封装置，采用计算、流体仿真及测温试验，与实际工况数据相结合的方法来检验装置的密封性能、温压稳定性和流体特性，得出如下结论：

(1) 选型设计满足工况要求，O 型圈和 V 型密封圈的选型和参数计算都符合密封性能的要求，泄漏量满足行业标准；有限元仿真和实际试验结果表明，防内漏组合密封装置的中心机构温度场均匀性、流体分布均匀性、温压稳定性、使用时长相比较原密封装置有所提升。

(2) 维护方便达到设计目的，防内漏组合密封装置采用主密封、辅助密封、防尘圈、耐磨环、O 型圈组成复合密封结构，配合模块化快装方式，使密封件可以独立拆卸、快速更换，大大减少设备检修时间，

降低维护人工费用。

(3) 技术方案具有实用性及经济性，本方案依靠结构的优化和密封材料选型来从基础上消除原有的中心机构泄漏问题，提升硫化过程工艺的稳定性，不需要做大规模设备更新，只依靠易损件改进来降低成本提高效率，更有利于资源有限的轮胎生产企业的技改实施，具有相应的推广价值。

参考文献：

[1] 蔡磊,宗鑫,张萍,等.防内漏组合密封装置硫化温度对绿色轮胎胎面胶结构与性能的影响[J].中国科学:化学,2021,51(04):476-484.

[2] 王月.轮胎硫化温度场的有限元分析[D].东北大学,2009.

[3] 王滔.轮胎硫化胎里温差的改善[J].橡胶科技,2024,22(10):588-590.

[4] 吕爱平.O型圈的选型与应用[J].黑龙江造纸,2020,48(03):29-36.

[5] 梁鹤,王腾飞,王文中,等.表面粗糙度对橡塑O形圈往复密封性能的影响[J].润滑与密封,2024,49(02):26-35.

[6] 张晓东,余鑫,张毅,等.基于ABAQUS的橡胶密封圈应力松弛分析[J].润滑与密封,2020,45(01):124-128.

[7] 王德妙,郑忠兴,黄维纪,等.石油管道阀门的密封性改进及应用[J].阀门,2025,6:675-680.

[8] 李晓波,樊文渊,高勇.O形密封圈装配损坏原因分析及改进措施[J].金属加工(冷加工),2025,12:86-88.

[9] 方艳峰.介质温升对流体静压型机械密封性能影响的研究[J].流体机械,2016,44(12):46-49.

[10] 高军,王鹏远.单O型密封圈实现双面密封问题的探究[J].河南科技,2019,1:41-43.

[11] 付亚康.液压往复密封用V型密封圈密封性能研究[D].天津大学,2020.

[12] 谭蔚,付亚康,王建军,等.V型密封圈结构参数对密封性能影响研究[J].化工机械,2020,47(05):594-600+625.

[13] 成大仙.机械设计手册(第五版):单行本.润滑与密封.化学工业出版社,2010.1.

Design and application of combined sealing device for preventing internal leakage in the central mechanism of curing press

Xu Xiang, Pu Xiaodong, Yu Jintang

(Guizhou Tire Co. LTD., Guiyang 550001, Guizhou, China)

Abstract: The curing process is the core and key process in tire manufacturing, and its operational stability directly determines the quality precision and production efficiency of finished tires. The central mechanism of the curing press, as the core execution unit of the curing process, undertakes multiple functions such as tire blank shaping and centering, heating medium transfer, and finished tire retrieval and placement. The existing central mechanism has problems such as easy failure of sealing performance and cumbersome disassembly and assembly of sealing components, which not only cause leakage of heating medium and energy loss but also reduce production efficiency and increase operation and maintenance costs due to frequent maintenance downtime. In response to the above pain points, this paper conducts a systematic analysis on key indicators such as thermal conductivity uniformity and sealing reliability of optimized components through reconstructing the structure of the central mechanism, developing an anti-internal leakage composite sealing device, and combining finite element simulation with actual working condition testing. The optimized central mechanism of the curing press and anti-internal leakage device scheme based on simulation and experimental results are both practical and economical, providing technical support for solving existing technical challenges in the industry.

Key words: central mechanism; curing press; thermal conductivity; sealing performance; anti-internal leakage device

(R-03)

15 亿！远星橡胶成第三家印尼建厂的中国胎企

1.5 billion! Yuanxing Rubber becomes the third Chinese tire company to establish a factory in Indonesia

2026 年中爪哇投资商业论坛于印尼雅加达举办，本次论坛参会规模约 400 人，达成超 190 万亿印尼盾潜在投资意向。会上，中国轮胎企业远星橡胶正式承诺，落户巴塘工业特区建设轮胎生产工厂。

该项目总投资 4 万亿印尼盾，折合人民币约 15 亿元，厂区占地约 40 公顷，企业计划将印尼区域总部设立于新工厂内。工厂定位出口导向型生产基地，同步助力完善当地制造业产业链。项目已于今年 3 月完成签约，预计 2027 年正式动工，产品重点聚焦摩托车轮胎品类。

巴塘工业特区属于中印尼共建“一带一路”“两国双园”重点项目。至此，远星橡胶成为继中策、赛轮之后，第三家落地印尼建厂的中国轮胎企业。依托当地市场区位优势，此次海外建厂，将助力企业拓展东南亚及全球海外市场版图。

摘编自“聚胶”

(R-03)

