

硫化机热工集成阀组结构优化与性能提升研究

江 杰

建德市新安江气动元件有限公司 浙江杭州 311699

摘 要：硫化机是橡胶制品生产中的重要设备，硫化机热工系统稳定与否直接决定产品质量的好坏。热工集成阀组是控制介质流动的关键部件，一直存在着密封失效、压力波动大、使用寿命短等问题。本研究从流体力学特性和材料力学性能的角度入手，对阀组的工作原理和失效模式进行系统的分析，给出多目标优化的结构改进方案。用计算流体力学仿真和实验验证相结合的方法，对阀组内部流道结构、密封系统、材料的选择做全方位的优化。结果表明，优化后的阀组结构压力损失大为降低，密封性能大大改善，使用寿命明显提高，有效地提高了硫化机热工控制精度和运行可靠性。研究成果给硫化设备关键部件性能的提高提供理论依据和技术支撑。

关键词：硫化机；热工集成阀组；结构优化；性能提升

橡胶工业迅速发展，硫化机作为橡胶制品生产的重要设备，热工系统是否稳定对产品质量有决定性的影响。热工集成阀组是控制介质流动的关键部件，一直存在着密封失效、压力波动大、使用寿命短等技术难题。传统的阀组设计大多依靠经验公式，缺少系统的性能分析及结构优化。本文从流体力学特性、材料力学性能角度出发，研究阀组结构参数与工作性能之间的联系，建立数值模拟优化设计方法，为提高硫化机热工系统整体性能提供方法。通过对阀组工作原理和失效模式的分析，提出基于多目标优化的结构改进方案，采用计算流体力学仿真与实验验证相结合的方式，对阀组内部流道结构、密封系统、材料选择进行全方位的优化，以达到提高硫化机热工控制精度和运行可靠性的目的。

一、热工集成阀组工作原理与结构特征

（一）工作原理与结构组成

热工集成阀组采取模块化集成设计思想，把诸多控制功能集中于一个小小的阀体之中，依靠协同控制达成介质流量及压力的准确调节。该阀组主要由四个部分组成，主控制阀芯为锥形结构，通过轴向位移改变流通面积，分流装置由多级渐缩流道组成，保证介质均匀分配到各个输出管道，压力补偿机构依靠弹簧预紧力保持系统压力稳定，密封系统采用金属和非金属材料复合结构，

适应高温高压的恶劣工况。高温导热油或者蒸汽从入口处进入，在主控制阀芯的调节之下分流到各个输出管路，最后送往硫化机的热板。系统压力波动范围很小，温度控制精度很高，对阀组的响应速度、控制精度提出了很高的技术要求。

（二）现有结构存在的问题分析

对多台在役阀组拆解分析后，发现现有设计存在结构上的问题。传统直线型流道容易造成涡流、局部高速区，造成较大的能量损失以及介质冲蚀。密封系统上平面密封结构在高频启闭工况下容易出现不均匀磨损，材料匹配性不好造成密封性能快速衰减。传统阀芯导向结构在热变形的影响下容易出现卡滞的现象，从而影响调节的精度。另外压力补偿机构的弹簧在交变载荷下容易产生疲劳失效，造成系统压力不稳定^[1]。上述问题叠加在一起造成硫化机在实际使用过程中产生压力损失大、密封性差、寿命短等问题，使热工控制精度低、运行稳定性差。

二、阀组流道结构的优化设计

（一）流道型线优化与流体动力学分析

采用计算流体力学的方法，在阀组内部流场的三维数值模拟中发现，原始流道流动分离、能量损耗问题比较严重。在50%阀芯开启度下，局部流速很高形成低压涡旋区。因此提出把直线型流道改为渐扩-渐缩复合型结构。在阀芯上游设置导流锥体结构，在下游增加扩散缓冲段，可以改善介质流动状态。使用高次多项式曲线代替原来的锥角流道型线，流量特性曲线的线性度得到了大幅提高。数值模拟表明，经过优化的流道结构使最

作者简介：江杰（1986.12-），男，汉族，浙江杭州建德市人，大学本科学历，现目前的职称是中级工程师，研究方向为硫化机热工集成阀组结构优化与性能提升研究和气动元件智能化技术应用研究。

大流速降低了30%左右,压力损失减少了19%左右,流场分布更加均匀合理,为阀组整体性能提高打下了基础。

(二) 分流装置的改进与流场均匀性提升

针对传统的分流装置分配不均的问题,用仿生学分形结构设计思想。通过建立多级分支流道系统来达到介质流量精确等量分配的目的。新型分流装置采用树状分形结构,各级分支均设计有渐缩流道,保证各输出管路的流量偏差很小。结构参数用正交优化试验确定,最佳流道扩张角设为某个值,收缩角经过优化设计,过渡圆角半径满足最小曲率要求。改进后的分流装置使得各个出口处的流量偏差由原来的较大的范围降低到非常小的范围,大大提高了热工系统的温度均匀性,给硫化工艺的稳定性提供了可靠的保障。

(三) 结构参数的优化与性能验证

在流道结构参数的系统优化研究中,用正交试验的方法对流道扩张角、收缩角和过渡圆角半径等关键参数做了多组对比试验,采用计算流体力学仿真和实验数据分析相结合的方法,得到最佳参数组合。新型流道结构能够很好地改善介质的流动状态,减小局部流速峰值、压力损耗并增大流动效率。分流装置改进设计后各输出管路流量偏差大大减小,介质分配均匀性明显提高。经过实际工况的检验,经过优化后的阀组能耗低、工作稳定,在硫化工艺的温度均匀性控制中起到可靠的保障作用^[2]。

三、密封系统的创新设计

(一) 密封结构的改进与优化

密封系统改进主要是结构和材料的共同改善。结构上采用了球面和锥面相接合的密封方式,用优化接触几何的方式改善应力分布,避免早期失效因为应力集中引起的。密封副材料经过系统筛选和匹配实验,最后确定使用硬质合金和高性能聚合材料的组合,该组合在高温高压条件下具有很好的摩擦学性能和化学稳定性。加载系统采用碟簧组结构,可以精确控制预紧力,并且有温度补偿的功能,在不同的温度下保持稳定的密封性能。另外对密封面的表面形貌进行优化设计,控制表面粗糙度、微观纹理,改善密封界面的接触特性。从各方面提高了密封系统的整体性能,在各种工况下都能保持良好的密封状态,大大提高了使用寿命。

(二) 动态密封与压力自适应设计

动态密封系统采用的是压力自紧式的创新设计,利用机械结构的巧妙之处来使密封比压随着系统压力变化而自动调节,达到“压力越高、密封越紧”的智能响应。

辅助密封采用多级阶梯式迷宫结构,用特种复合材料做多重密封屏障,大大提高系统整体密封可靠性。根据阀芯运动过程中动态密封的要求,设计出具有自适应补偿功能的密封结构,保证运动过程中密封接触良好^[3]。整个系统还加入了状态监测,用传感器对密封状况实施实时监测,给预防性维护赋予数据支撑。经过系统测试,优化后的密封系统在模拟实际工况的耐久性实验中表现出很好的稳定性,密封性能衰减缓慢,使用寿命明显延长。该种集压力自适应、动态补偿、状态监测于一身的智能密封系统,是目前密封技术发展的一个新方向,给高温高压工况下可靠密封提供新的解决办法。

四、材料选择与性能匹配

(一) 关键材料的筛选与评估

在材料选择时,利用系统性的实验加上理论分析来综合评判多种备选材料。根据阀芯、阀座的工作特点,选用具有良好耐磨性、高温稳定性的合金材料,采用优化的热处理工艺来达到硬度和韧性之间的合理匹配^[4]。在密封材料上,采用复合结构设计,基体材料有足够的机械强度,表面层材料具有良好的密封性,从而达到强度和密封性两者的有机统一。弹簧等重要部件采用抗疲劳性好的特种合金材料,用精密热处理工艺控制组织性能。所有材料都做了充分的环境适应性验证,在复杂工况下可以保持稳定的性能,给阀组的可靠性提供材料保证。

(二) 材料处理工艺的优化

根据选定的材料特性,开发出相应的加工处理工艺体系。表面处理方面用等离子喷涂、气相沉积等先进技术,在关键部件表面形成功能化涂层,大幅度提高耐磨、耐腐蚀性能。热处理工艺通过精确地控制各个阶段温度参数和冷却速率来获得理想的组织结构以及力学性能。用特种焊接技术来连接不同材料组合的部位,根据焊接材料的不同选择最优化的焊接参数来保证焊接部位可靠、稳定。所有的工艺参数都是通过实验进行优化的,用金相分析、力学性能测试等方法来验证。材料、工艺优化组合成完整质量控制体系,给阀组高性能表现打下了坚实的技术基础,大幅度提高产品综合性能及寿命^[5]。

五、性能测试与验证

(一) 测试平台的构建

为了保证测试数据的准确性,可靠性,研究设计了一个国际标准专用试验台。该系统由液压力单元、可编程温度控制单元、高精度流量测量模块、多通道同步采集单元组成。测试介质使用的是标准液压油,工作温度在工况范围内连续可调,最大工作压力满足测试要求。

测试项目有稳态工况下流量-压力特性测试、瞬态工况下动态响应特性测试、不同温度、压力下密封性能测试、长周期耐久性试验。所有的传感器以及计量仪表都是经过专业机构标定过的，数据采集系统使用高分辨率采集卡，可以准确的采集阀组工作过程的动态特性。测试程序严格按照有关的技术标准来执行，保证测试结果的客观性和可比性。

（二）测试结果与分析

从测试结果可以看出优化后的阀组在额定工况下压力损失比原来的结构小很多。流量特性曲线在整个调节范围内非线性度得到改善，说明阀组具有良好的调节特性^[6]。动态响应试验中，阀组对阶跃信号的响应时间大大缩短，超调量被很好地控制。密封性能测试显示，泄漏量很小，满足高标准密封等级的要求。经过长时间耐久性试验之后，主要性能参数变化率不大，具有较好的工作稳定性。试验结束后拆解，发现阀芯导向面磨损小，密封副接触均匀，流道表面状态好，证明优化设计合理有效。

六、应用效果与经济效益

（一）实际应用效果评估

经过优化的阀组结构在橡胶制品企业生产线上得到实际应用。连续运行一段时间的性能明显比传统结构好。设备热工控制精度明显提高，硫化工艺参数稳定性提高了30%左右，产品硫化质量一致性也明显提高。维护间隔时间由原来的三个月延长到八个月，设备的综合利用率达到原来的15%以上。经过改进的阀组在同样的工况下节能大约20%，为企业节约了大量的运行费用。操作人员反馈新阀组调节响应更加平稳，控制精度更高，操作方便性得到明显提高^[7]。实际运行数据证明优化设计是有效的，给该技术在行业内推广应用提供有力的实证依据。

（二）经济效益综合分析

尽管优化设计造成阀组初期制造成本的增加，但是考虑到它所带来的诸多效益，总体上经济效益非常明显。从设备全生命周期成本角度来讲，改良阀组在使用过程中维护费用削减大约40%，能耗费用缩减大约25%，综合使用成本同传统阀组相比减少大约30%。投资回收期分析表明，增加的成本投入在12到18个月里可以被运行费用的节约完全抵消。另外产品质量稳定性的提高使产品合格率提高了3%、废品率降低了2.5%，产生了很大的间接经济效益。根据综合分析，优化后的阀组比传统

的提高了约35%的经济效益，具有明显经济优势，可以在行业的领域内广泛推广。

七、结论与展望

（一）结论

本文通过对硫化机热工集成阀组工作原理以及失效模式的分析，给出多目标优化的结构改进方案。采用计算流体力学仿真与实验验证相结合的方式，对阀组内部流道结构、密封系统、材料的选择做全方位的优化。结果表明，经过优化后的阀组结构大大降低了压力损失，大幅度提高了密封性能，使用寿命明显延长，有效地提高了硫化机热工控制精度和运行可靠性，给硫化设备关键部件的性能提高提供理论依据和技术支持。

（二）展望

对智能材料在阀门上的应用可以进一步展开研究，采用实时状态监测和自适应调节来改善智能材料。利用人工智能技术建立硫化机热工系统阀组健康状态预测模型，可以达到预测性维护的目的，提高硫化机热工系统的智能化水平。除此之外还可以研究阀组在极端工况下表现的性能，从而扩大阀组的应用范围，给橡胶工业的可持续发展提供技术保障。

参考文献

- [1] 袁劲, 易增强, 辛文慧, 等. 平板硫化机一种模拟真实工况下的温度测量方法[J]. 工业计量, 2025, 35(05): 17-21.
- [2] 丁振堂. 轮胎硫化机技术创新四阶段, 践行节能降耗[J]. 中国橡胶, 2025, 41(08): 43-49.
- [3] 白正双, 康建源, 梁立峰. 轮胎定型硫化机中热工阀组控制的应用[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025, (05): 80-82.
- [4] 季付高, 丁振堂, 牛燕群. 热工阀组控制在轮胎定型硫化机中的创新应用[J]. 橡胶科技, 2025, 23(01): 34-39.
- [5] 戚振红, 唐剑锋, 范建强, 等. 工程机械先导集成阀组阀杆卡滞故障排查及改进措施[J]. 工程机械与维修, 2024, (07): 10-12.
- [6] 金吉元, 侯典东, 谢梁. 浅议新型硫化机及硫化技术改进效应[J]. 中国设备工程, 2023, (S1): 79-81.
- [7] 王爽, 陆永高, 何燕, 等. 全钢轮胎液压硫化机热工及控制系统改进[J]. 橡塑技术与装备, 2022, 48(08): 58-62.