

Research and Application of Localization of Diaphragm Actuators for Critical Pneumatic Valves in Nuclear Power Plants

Yao Tian Fengyang Li Pudong Ma Shuancheng Li Feng Du

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

The diaphragm is a core component of pneumatic valves, playing a crucial role in their movement, yet it is also a frequent weak point prone to failures. In China, the diaphragms of critical pneumatic valves in nuclear power plants have long relied on imports, and in recent years, quality issues have emerged one after another, posing a serious threat to the safe and stable operation of nuclear power units. Against this background, research and development for domestically produced diaphragms have been carried out. Through the study of the characteristics of different types of diaphragms and the analysis of failure cases, targeted improvement strategies were formulated, and a complete mass production process and quality assurance system were established. This led to the successful development of domestic diaphragms with excellent overall performance, effectively improving the reliability of critical valves and ensuring the stable operation of nuclear power units.

Keywords

Pneumatic valve; diaphragm; nuclear power plant

核电厂关键气动阀门执行机构隔膜国产化研究及应用

田尧 李凤洋 马普东 李栓成 杜锋

中广核核电运营有限公司, 中国·广东 深圳 518124

摘 要

隔膜为气动阀门核心部件, 承担着重要的运动功能, 却也是故障频发的薄弱环节。我国核电厂关键气动阀门的隔膜长期依赖进口, 近年来质量问题层出不穷, 对核电机组安全稳定运行构成了严重威胁。在此背景下开展了隔膜的国产化研发工作, 通过对不同类型隔膜的特性研究及失效案例分析, 针对性地制定了改进策略, 并建立了完善的量产工艺流程和质量保障体系, 成功研发出综合性能优异的国产隔膜, 有效提升了关键阀门的可靠性, 确保了核电机组的稳定运行。

关键词

气动阀门; 隔膜; 核电厂

1 引言

气动执行机构隔膜是核电厂气动阀门的核心运动部件, 也是容易失效的薄弱环节, 是核电厂气动阀门安全稳定运行的重要影响因素, 其失效将导致气动阀门无法动作而功能丧失, 从而影响核电厂相关系统的功能, 严重时可能会导致跳机跳堆^[1-3]。气动执行机构橡胶隔膜属于橡胶和织物的复合制品, 要求隔膜产品具有较好的机械强度, 同时作为运动部件要求其具有较好的疲劳性能(伸张疲劳及弯曲疲劳)^[4-5]; 橡胶隔膜产品对于橡胶配方控制、加强织布选材、浸胶硫化工艺、性能检测的要求都较高, 只有这些工艺和技术要求都实现并得到有效保障, 才能生产出符合设计要求的隔膜产品。

目前国内、外缺乏针对气动隔膜产品的性能要求、生产制造及成品检验的相关标准, 根据气动隔膜的使用经验反馈及失效原因分析, 总结了气动隔膜的常见失效类型及原因, 针对性地制定了缺陷改进策略, 对材料强度、粘合强度、耐疲劳及耐老化性能等关键进行提升和优化, 使得隔膜产品的综合性能达到最优, 能够适用于所匹配的气动执行机构; 同时, 为了克服橡胶隔膜制品质量离散性大、批次质量控制难度大的困难, 研究并建立了完善的气动执行机构隔膜量产工艺流程及质量保证体系, 从而有效保障了不同批次隔膜的质量稳定性。

2 气动执行机构隔膜技术要求

2.1 隔膜功能原理

隔膜按照应用的阀门类型可分为气动调节阀隔膜和气动开关阀隔膜两类, 调节阀隔膜动作频次高, 开关阀开关频次相对较低。在压缩空气作用下, 隔膜及其固定压板克服弹

【作者简介】田尧(1994-), 男, 中国广东深圳人, 硕士, 工程师, 从事化工过程机械研究。

簧力并带动气动杆向上运动，失气后在弹簧力推动下带动气动杆向下运动。隔膜作为受力部件需要有足够的强度保证不会破裂，同时需具备良好的屈挠性能和粘接性能，以保证在运行期间不发生开裂、鼓包等。

2.2 隔膜结构形式

隔膜形状需与气动执行机构结构匹配，核电厂气动执行机构隔膜通常设计形状有碟形隔膜、波形隔膜以及桶形隔膜三种；隔膜由橡胶和织物骨架两种材料模压组成，橡胶层主要用于保证隔膜的密封，织物骨架对隔膜起到增强作用。根据橡胶材料和织物骨架的组合方式不同，分为织物骨架在橡胶层内部以及织物骨架在橡胶层表面两种。

2.3 隔膜常见失效类型及原因分析

近年来，多个核电厂均频繁出现隔膜失效事件，经大量统计及分析，气动执行机构隔膜常见的失效类型有耐疲劳性能差、粘合性能差、织物强度低、耐老化性能差以及批量制造的工艺、尺寸控制差等。隔膜失效的主要表现形式为橡胶层开裂、隔膜鼓包，分层、隔膜贯穿性撕裂、螺栓孔出现水滴状或被压溃破坏、螺栓孔不对中，厚度不均匀，表面有气泡凹坑等。隔膜失效模式及对应的失效原因分析见表1：

表1 隔膜失效模式及原因分析

序号	失效现象	原因分析
1	隔膜橡胶层开裂	①橡胶材料耐疲劳性差。
		②橡胶材料硬度过大。
		③隔膜厚度设计不当。
2	隔膜贯穿性撕裂	①织物材料强度低。
		②织物材料耐撕裂性能差。
		③隔膜设计厚度偏低，强度不足。
		④气源压力超过隔膜设计承受压力范围。
3	橡胶与织物鼓包，分层	①橡胶层与织物层粘合性能差。
		②橡胶层与织物层直接贴合，未加粘合工艺。
4	螺栓孔出现水滴状或被压溃破坏	①紧固力矩设置不当。
		②织物抗撕裂性能不足。
		③隔膜耐压缩永久变形能力差。
		④气源压力超过隔膜设计承受压力范围。
5	螺栓孔不对中，厚度不均匀，表面有气泡凹坑等	①硫化及冲剪模具尺寸精度差。
		②橡胶胶片及隔膜成品的成型工艺控制差。
		③硫化工艺控制差，硫化不均匀。
		④缺乏量产质量控制手段。

3 气动执行机构隔膜国产化研制

根据隔膜使用经验反馈及失效原因分析，制定了隔膜质量提升技术方案，对橡胶及织物的拉伸强度、老化后的压缩永久变形、屈挠疲劳、粘合强度等参数进行提升和优化，在隔膜配方研制阶段进行调配和试验，最终确定最优化的橡胶和织物配比方案，使得隔膜产品的性能达到最优，能够适

配所匹配的气动执行机构。

3.1 原材料试验筛选

根据隔膜结构及应用环境特点，采用多种胶料和多种配方进行了大量的试验筛选，经过对比分析，确定了四种隔膜专用橡胶材料；并经试验筛选了三种隔膜专用织物骨架材料。其中四种橡胶材料分别为常规岛阀门隔膜用 HNBR 橡胶（胶料牌号 7701-12）、核岛调节阀隔膜用 EPDM 橡胶（胶料牌号 4404-2）、核岛开关阀隔膜用 EPDM 橡胶（胶料牌号 4407-2）以及可用于常规岛及核岛阀门隔膜的 EPDM 橡胶（胶料牌号 4407-2-2）。橡胶材料的检测结果均符合研制技术规格书及鉴定大纲要求，极大提升了隔膜用原材料的强度及耐疲劳、老化性能。

3.2 橡胶夹织布粘结硫化工艺

隔膜产品主要由橡胶和织布复合而成，其粘结和硫化工艺对成品的影响很大。本项目针对研制定型的不同胶料和织布，进行了大量的粘结工艺和硫化工艺的试验研究。经对比测试，对粘结胶和粘结工艺进行了固化，并确定了硫化工艺所需的几项关键指标（硫化温度、硫化压力、硫化时间），以及硫化抽真空工艺。橡胶夹织布的试样测试结果见表2（以核岛 RCV046VP 隔膜为例）。测试结果表明，国产隔膜橡胶夹织布试样的粘合强度、耐疲劳性能等关键性能指标优异且稳定，可有效避免隔膜产品出现分层、鼓包等缺陷，并有效提升了隔膜产品的耐疲劳及耐老化性能。

表2 橡胶夹织布的试样测试结果

序号	试验项目	数值
1	粘合强度	≥3.5KN/m
2	屈挠疲劳	> 50 万次
3	爆破强度	≥18bar
4	热老化+辐照老化后粘合强度	≥2.5KN/m
5	热老化+辐照老化后屈挠疲劳	> 50 万次
6	热老化+辐照老化后爆破强度	≥18bar
7	-40℃/168h 冷冻后屈挠疲劳	> 50 万次

3.3 隔膜仿真计算

隔膜初步设计后，采用动态仿真方法分析隔膜应力敏感部位，验证尺寸合理性以及疲劳性能、强度等各项性能指标。并根据仿真结果优化设计方案。经仿真计算通过后进行隔膜成品的检测及试验。仿真结果显示，气动执行机构隔膜最大的应变分布在隔膜在拉伸运动时的屈挠部位。同时仿真结果也表明，国产研制隔膜成品的橡胶及织物的最大应变值均低于材料本身的断裂伸长率，可有效避免隔膜产品出现橡胶层开裂或织物骨架贯穿性撕裂问题。

3.4 隔膜成品的检测及试验

在隔膜成品的性能验证中，进行了外观尺寸检测、台架保压试验、10 万次台架动作试验等。开发设计的试验台架可全面模拟气动执行机构隔膜实际运行工况及极端工况。隔膜成品的各项检测结果表明，研制的国产隔膜尺寸、硬度

均匀性、密封性能、老化前后疲劳动作性能等均满足阀门气动执行机构 10 万次开关动作要求，且在极限工况下仍具有一定的安全裕度。

4 制造工艺开发及质量离散性控制方案

4.1 制造工艺开发

为保障橡胶隔膜备件的加工精度，避免出现国外隔膜频繁出现的尺寸精度低、不同膜片差异大等问题，国产隔膜的胶料采用注射成型工艺，隔膜成型采用急冷急热等工艺，同时设计开发了一套专用硫化模具和冲剪模具，可实现一次加工成型保证了隔膜的精度，提高了膜片的加工质量。

4.2 隔膜质量离散性控制方案

橡胶隔膜制品质量离散性控制为行业难题，借助创建的检验试验体系，该项目首次完整固化了隔膜从原材料采购、到制造过程检测、再到成品出厂的一系列制造、工艺、检验流程文件库，每个工序/检验有要求、有记录、有检查，编写了采购技术规范、标准质量计划、到货验收技术规范，保障隔膜供货中始终质量稳定。

5 国产研制隔膜应用成果

5.1 成果应用情况

该项目成功研制的十余种国产隔膜已在国内多个核电厂推广应用，最长使用时间已接近超过 3C，彻底打破了国外垄断，实现了该关键品类备件的自主化制造供应，有效保障了核电机组的安全稳定运行。国产隔膜已安装使用在多个系统的重要敏感气动阀门位置，如 ARE 主给水流量调节阀及旁路调节阀、GCT 大气排放阀、RRI 系统 SED 补给流量调节阀等。国产隔膜的综合性能优于国外同类产品，产品性能稳定，使用情况良好。

5.2 应用前景

该项目的研究成果有效解决了核电厂关键气动阀门执

行机构隔膜备件的自主供货问题，实现了该关键核心备件的供应可控、技术可控、质量可控，并在一定程度上拉动了国内橡胶隔膜产业链的升级，未来将大幅提升国内外核电厂气动阀隔膜的产品质量，以及橡胶隔膜领域的设计、制造、检验等技术能力。

该项目研制的隔膜专用橡胶材料及织物材料，可以满足多种型号和类型的气动执行机构隔膜使用，后续可在此研究基础上进行其它种类隔膜产品的设计开发及应用，研究成果不仅可在国内外核电领域气动阀门执行机构上应用，也可推广至化工领域以及其它有气动执行机构隔膜使用需求的相关行业和领域。

6 结语

该项目从隔膜使用经验及失效原因分析出发，制定了隔膜质量提升技术方案，研制出了综合性能优异的国产隔膜；同时还建立了完善的隔膜量产工艺流程和质量控制体系，用于保障批量供货阶段的质量稳定性。研发的国产隔膜性能优异且质量稳定，已在国内多个核电厂投入使用，有效提升了核电厂关键气动阀门的可靠性，保障了核电机组的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 徐翠翠, 徐春安. 阀门气动执行器膜片失效分析与解决方案[J]. 阀门, 2018(3):44-45.
- [2] 赵鹏宇, 孙黎. 核电厂气动阀隔膜失效性能分析[J]. 科技视界, 2019(28):78-79.
- [3] 牟杨. 核电厂阀门执行机构橡胶膜片外漏浅析: 中国核学会 2023 年学术年会[C], 中国陕西西安, 2023.
- [4] 韩德仁. 大型橡胶膜片的研制[J]. 橡胶工业, 1994(8):483-485.
- [5] 朱益国, 曹丹, 朱孟康, 等. 核电气动橡胶隔膜材料热老化机械性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2020,49(2):17-22.