

核电阀门气动执行机构隔膜成品检验方法

李凤洋, 田尧, 周来

中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518000

摘要: 核电阀门气动执行机构隔膜是保证阀门动作的关键部件。近几年隔膜质量的不稳定, 已导致多起影响核电机组安全的事件。当前对于隔膜的质量控制方式主要为外观检查。由于国内外没有适用隔膜成品的性能检验标准, 只能参考相似产品的通用标准, 导致检验方法和结果存在较大差异。因此, 本文针对核电阀门气动执行机构隔膜成品的检验方法进行探讨。参考隔膜设计研发和历史检验经验, 结合隔膜的功能和结构特点, 制定了合理可行的专用检验规程。

关键词: 核电站; 气动阀门; 隔膜; 检验; 质量控制

Development and Application of an Inspection Protocol for Diaphragms in Pneumatic Actuators of Nuclear Power Valves

Li Fengyang, Tian Yao, Zhou Lai

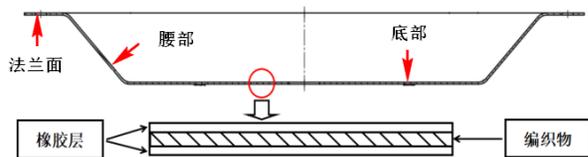
CGN Nuclear Power Operation Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract: The diaphragm in nuclear valve pneumatic actuators serves as a critical safety component for valve operation. Recent quality fluctuations have triggered multiple safety incidents in nuclear power plants. Current quality control primarily relies on visual inspection, while the absence of applicable performance testing standards for diaphragm products necessitates reference to generic standards for similar components, resulting in significant discrepancies in testing methodologies and outcomes. This paper proposes an inspection protocol developed through comprehensive analysis of diaphragm design parameters, historical inspection data, and functional-structural characteristics. The established protocol provides standardized technical specifications for performance verification of diaphragm products in nuclear applications, effectively addressing existing quality control challenges.

Keywords: nuclear power plant; pneumatic actuator; diaphragm; inspection protocol; quality control

一、背景描述

当前国内在运的57台核电机组中, 其中41台为二代轻水堆核电机组, 如M310、CPR1000等。该技术路线的核岛阀门主要驱动方式为气动和电动, 其中重要调节类阀门均为气动控制。气动执行机构的主要结构形式为隔膜式, 主要部件包括膜盒、隔膜、弹簧。隔膜是保证阀门动作功能的关键部件, 隔膜的基础结构为橡胶+编织物。编织物可以位于橡胶层的中间, 也可以位于橡胶层的一侧(非气源侧)。编织层位于中间的隔膜结构形式和各区域的名称如图1所示, 后文所指的位置名称以该示意图为准。



> 图1 隔膜结构及区域名称图

隔膜可以将气源压力转换为驱动阀门的推力, 进而完成阀门的开关或流量控制。根据近5年的使用情况, 隔膜产品质量并不稳定, 多次出现裂纹、喷霜等异常。隔膜失效会影响阀门的密封或

调节能力, 进而影响核电站的安全稳定运行。

为了保证对隔膜质量的有效控制, 需要在验收前进行性能检验。但目前国内外并没有可执行的检验标准。经与隔膜生产厂家了解, 隔膜的质量控制主要为对橡胶和编织物分别进行性能检验(均有可执行的检验标准)。在隔膜整体硫化完成后主要对进行整体的破裂强度检验。而隔膜交货到阀门厂家后, 则主要对外观和尺寸进行检查。隔膜作为阀门动作的关键零部件, 除了承受气源压力外, 还需要承受隔膜盒的压紧变形、阀门动作疲劳、工况环境老化等综合因素, 因此隔膜成品需要依据功能和结构特点制定更为适用的检验方法。

二、隔膜成品检验项目的确定

根据隔膜各区域的实际工作状态, 参考多起国内核电气动执行机构隔膜破裂事件的原因分析结论, 结合该橡胶及制品行业的常用检验方法, 制定的隔膜成品检验项目共8个方面。

(一) 隔膜尺寸检验

尺寸的准确性和均匀性, 可以快速确认隔膜的可用性。

（二）隔膜硬度检验

隔膜成品的表面硬度离散度可以体现隔膜在硫化成型过程中的均匀性。如果同一张隔膜不同部位的表面硬度偏差较大，说明质量控制存在异常。

（三）隔膜剥离强度检验

剥离强度代表着隔膜橡胶与编织物的粘合情况。隔膜的法兰面通过螺栓紧固在隔膜盒的密封面上，施加的紧固力矩既要满足气源压力的密封要求，也要保持隔膜在阀门动作中维持原有位置，不发生内缩和褶皱。隔膜在较大压力下动作时，如果剥离强度较低，容易导致橡胶与编织物分层，进而导致隔膜失效。

（四）隔膜屈挠疲劳检验

常用的疲劳检验方法有拉伸和屈挠两种。考虑隔膜在实际工况中主要为屈挠形动作，基本没有拉伸的情况，因此选取屈挠疲劳形式。

（五）隔膜破裂强度检验

隔膜破裂强度作为隔膜生产厂家出厂的试验项目，可以检验隔膜整体的承压能力。

（六）隔膜成品压缩永久变形

压缩永久变形是反映橡胶材料回弹性和抗变形能力的指标。压缩永久变形越小，则材料的回弹能力越好，抗变形能力越强。压缩永久变形能力差会严重影响隔膜安装后的状态，隔膜的法兰面、中心孔等装配压缩部位在不长的时间内就会出现内缩、漏气的异常。参考历史对失效隔膜的第三方检验结果，该指标存在异常的比例较高。因此，对于隔膜成品进行压缩永久性变形测试是很有必要的。

（七）拉伸强度和拉伸伸长率

拉伸强度是表征橡胶隔膜抵抗拉伸破坏极限的能力，是评价橡胶隔膜力学性能的重要指标之一。在阀门动作过程中，隔膜的拉伸强度需要满足相应的数值，以保证隔膜不会在动作中过载断裂。拉伸伸长率是体现橡胶延展性的重要指标，也能用于判断橡胶老化的程度。

（八）加速老化试验方法

热空气加速老化和耐热试验是评价隔膜长期相对的耐热性，和自然老化后性能的方法。通过对比老化试验前后的检验结果，可以了解隔膜在现场工况下长时间运行后的状态变化。

三、隔膜成品检验方法的确定

因气动执行机构的推力受阀门不平衡力、密封力、气源压力等影响会有不同，隔膜所需的有效承压面积也会不同。核电站常用的隔膜底部直径为 $\leq 40\text{cm}$ 。检验按照已有的参考标准执行时，试样尺寸较大或取样数量较多，会导致用于取样的隔膜消耗数量大幅增加。特别是底部直径 $<20\text{cm}$ 的隔膜，完成所有取样预计需要10片以上。取样数量多可能会导致同一检验项目出自不同的隔膜，增加检验结果的偏差度，同时也会对现场保障带来不利影响。综合质量监控和经济因素，取样的总体原则为：取样尺寸和数量参考历史送检的情况在满足检验目标的情况尽量减小，但检

验结果的判定标准更为严格，如从取中间值/平均值改为取最小值。对于出现结果异常的检验项目，则采用复检再次验证。

各检验项目的取样要求、检验方法详述如下：

（一）隔膜尺寸检验

参考HG/T 3050.3^[1]执行，测量过程中应尽量使隔膜与厚度计上下垂足面平行，如隔膜不平整，可参考GB/T 2941^[2]第7章施加规定压力而不引起任何明显变形。用卷尺对隔膜外径等尺寸进行检测，隔膜应放于平面，量取时隔膜不能变形。

（二）隔膜硬度检验

考虑隔膜厚度较薄，且编织物的硬度远大于橡胶的硬度，隔膜成品硬度的测量结果会受到测量点是否在编织物脉络上的影响。因此，硬度检验需要在每个位置测量3次取中间值，不同测量位置两两相距至少6mm。每个隔膜至少应测量法兰面圆周方向对称12个位置。

如需计算离散值则只需计算隔膜法兰面的硬度偏差，原则是用最大值或最小值与平均值之差，公式如下：

$\{S_{\text{Max}}-(S_1+\dots+S_{12})/12;(S_1+\dots+S_{12})/12-S_{\text{Min}}\}$ 取大值。记录离散值。

说明： S_1 为第一个测量点的平均值； S_{Max} 是所有平均值中的最大值； S_{Min} 是所有平均值中的最小值。12是测量位置数量。

（三）隔膜剥离强度检验

该检验项目总体参考GB/T 532^[3]执行。根据历史检验经验，隔膜剥离强度受编织物的方向影响较大。因此，取样裁切方向必须与编织物的编织方向分别相同，检验时也需要保证剥离方向与编织方向相同。根据隔膜结构，腰部编织物走向不平行，法兰面有较多的螺栓孔，取样位置应选取为隔膜底部。

试样长度考虑动夹持器的宽度和剥离过程的稳定性，应不小于130mm（若该长度因隔膜尺寸达不到，取隔膜底面最大值）。该试样尺寸较大，老化前后取样数量较多，因此取样数量从三个改为横向和纵向各取样2个，检验结果从国标的选取三个试样结果的中位数改为取两个试样结果的最小值。

（四）隔膜屈挠疲劳检验

日常运行时隔膜的动作部位为腰部，因此屈挠疲劳试样应从隔膜腰部截取，更能体现隔膜在实际阀门动作中的特征。

橡胶及涂覆织物的屈挠疲劳国标为GB/T12586^[4]和GB/T13934^[5]。GB/T12586适用于橡胶成品，但屈挠方式与隔膜的实际工况不同，GB/T13934的屈挠方式与隔膜实际工况相同，但检验对象为纯橡胶，且样件外形需要单独成型模压。因此操作方法需综合考虑2个国标执行，取样根据总体原则，试样尺寸适应减小，尺寸长度 $\geq 125\text{mm}$ 、宽度 $25\pm 1\text{mm}$ 、厚度按照每种型号隔膜实际厚度。试样数量至少3个。

（五）隔膜破裂强度检验

考虑到液压法的试验介质为液体，与隔膜实际工况的压缩空气均为流体，特性更为相近，因此该检验内容推荐优先参考GB/T20027.2^[6]液压法执行，如不具备液压法条件，可参考GB/T20027.1^[7]钢球法执行。

（六）隔膜成品压缩永久变形

当前国内外标准中没有适用于隔膜成品的压缩永久变形检验方法。仅有橡胶的 GB/T7759.1^[8]。考虑隔膜主要为橡胶 + 编织物组成，而编织物的压缩变形较小，因此可以参考该橡胶的标准进行检验。但因为橡胶和编织物之间为粘接关系，编织物间也存在间隙，因此对于隔膜成品检验结果的判定相较于纯橡胶试样可以放宽。

（七）拉伸强度和拉伸伸长率

该检验项目总体参考 HG/T2580^[9] 执行。根据历史检验经验，隔膜拉伸强度受编织物的方向影响较大。因此，取样裁切方向必须与编织物的编织方向分别相同，取样位置也应选取为隔膜底部。HG/T2580 中拉伸试验的样件尺寸较大，数量较多。基于前述取样的总体原则，试样数量从 5 个调整为 3 个，取值标准维持原有的平均值。试样的尺寸方面，参考历史检验的经验，宽度从 HG/T2580 中的 $50 \pm 0.5\text{mm}$ 调整为 $15 \pm 0.5\text{mm}$ ，长度从 $100 \pm 1\text{mm}$ 调整为 $\geq 75\text{mm}$ ，厚度为隔膜本身厚度。

（八）加速老化试验方法

橡胶及涂覆织物的加速老化标准为 GB/T3512^[10] 和 GB/T24135。其中 GB/T3512 的检验对象为纯橡胶，GB/T24135 的检验对象为橡胶或塑料涂覆织物，但 4 种检验方法主要针对涂覆织物的挥发性、耐湿热性能等，与隔膜的工况不一致。根据隔膜的结构为橡胶覆盖编织物，相对更适用于 GB/T3512。且上述 2 个国标对于检验设备（老化箱）的要求一致，因此该检验项目选取参考 GB/T3512 执行。

为保证不同隔膜之间的检验结果能够对比参考，对于加速老化的温度和时间进行统一规定如下：一般选取的老化条件为 100°C 、168 小时。考虑三元乙丙橡胶的耐温更高，为验证其更长时间的老化性能，对该类橡胶隔膜也可以选取 138°C 、100 小时。老化温度精度要求为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，老化时间精度要求为 ± 2 小时。

四、应用与结论

该检验方法已在中广核集团 5 个核电基地开展应用，涉及国内外 11 个阀门厂家、10 个隔膜生产厂家。检验结果相较国标更为准确，与现场实际日常使用后的反馈情况基本一致。对于部分检验结果不符合要求的隔膜，提前通过复验后换货等方式进行处理，保证了库存隔膜的质量可用性，有效提高了隔膜的质量控制水平，使用效果良好。

该检验方法内容全面，更符合核电阀门气动执行机构隔膜产品的功能和结构特点，可综合量化评估隔膜的质量水平，并填补了国内在这一技术领域的空白。各检验项目操作方法标准化，保证了检验结果的一致性，有效减少了返工比例和制样次品率，降低了检测成本，提高了检验效率。同时，检验标准化后也可对不同型号、不同厂家的隔膜检验数据进行类比。对于即使隔膜生产厂家无法提供原设计性能参数的隔膜，也能参考其他同类型隔膜的检验结果评估该隔膜的质量水平。从而保障重要气动阀门的可靠性，保障核电站安全稳定运行。

参考文献

- [1]HG/T 3050.3-2020, 橡胶或塑料涂覆织物整卷特性的测定第 3 部分: 测定厚度的方法 [S].北京: 化学工业出版社, 2020.
- [2]GB/T 2941-2006, 橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序 [S].北京: 中国标准出版社, 2007.
- [3]GB/T 532-2008, 硫化橡胶或热塑性橡胶与织物粘合强度的测定 [S].北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4]GB/T 12586-2003, 橡胶或塑料涂覆织物 耐屈挠破坏性的测定 [S].北京: 中国标准出版社, 2008.
- [5]GB/T 13934-2006, 硫化橡胶或热塑性橡胶屈挠龟裂和裂口增长的测定 [S].北京: 中国标准出版社, 2007.
- [6]GB/T 20027.2-2017, 橡胶或塑料涂覆织物 破裂强度的测定第二部分: 液压法 [S].北京: 中国标准出版社, 2017.
- [7]GB/T 20027.1-2016, 橡胶或塑料涂覆织物 破裂强度的测定第 1 部分: 钢球法 [S].北京: 中国标准出版社, 2016.
- [8]GB/T 7759.1-2015, 硫化橡胶或热塑性橡胶压缩永久变形的测定第 1 部分: 在常温及高温条件下 [S].北京: 中国标准出版社, 2015.
- [9]HG/T 2580-2022, 橡胶或塑料涂覆织物拉伸强度和拉伸伸长率的测定 [S].北京: 化学工业出版社, 2022.
- [10]GB/T 3512-2014, 硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验 [S].北京: 中国标准出版社, 2015.