

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.003

高温气冷堆氦气截止阀在线研磨维修方法研究

董岱林¹, 吴肖², 武怡明³, 冯伟¹, 胡宇宙¹

(1. 中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 华能核能技术研究院有限公司, 上海 200126; 3. 华能山东石岛湾核电有限公司, 山东 荣成 264300)

摘 要: 高温气冷堆氦气截止阀用于通断反应堆回路中的氦气, 其密封性能对反应堆的安全运行至关重要。针对氦气截止阀在使用过程中密封性能下降且无法从系统回路中拆卸这一问题, 设计一种在线研磨维修设备及截止阀模拟体和试验台架, 通过试验验证了氦气截止阀在线维修的可行性和良好效果。

关键词: 核电; 高温气冷堆; 截止阀; 在线研磨; 维修方法

中图分类号: TH138.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0019-04

Research on Method of On-line Grinding and Maintenance for Helium Gas Isolation Valve in High Temperature Gas Cooled Reactor

DONG Dailin¹, WU Xiao², WU Yiming³, FENG Wei¹, HU Yuzhou¹

(1. Key Laboratory of Nuclear Reactor System Design Technology, China Nuclear Power Research and Design Engineering Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. Huaneng Nuclear Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200126, China;

3. Huaneng Shandong Shidaowan Nuclear Power Co., Ltd., Rongcheng, 264300, China)

Abstract: Helium gas isolation valve used in high temperature gas cooled reactor in nuclear power plant is applied to open and shut the helium in the reactor circuit, and its sealing performance plays a crucial role in the safe operation of the reactor. To cope with the decrease of the sealing performance of helium gas isolation valve and the failure of the valve disassembling from the system, an on-line grinding maintenance equipment is designed based on the sealing surface of helium gas isolation valve. The sealing performance test verifies the feasibility and effectiveness of on-line grinding maintenance of the helium gas isolation valve simulant.

Keywords: nuclear power; high temperature gas cooled reactor; isolation valve; on-line grinding; maintenance

0 引言

高温气冷堆作为第 4 代反应堆, 其安全性较第 3 代反应堆有着较大的提高。氦气作为高温气冷堆回路中的冷却剂, 有效控制其在回路中的通断对反应堆安全运行至关重要。在高温气冷堆中, 通常用截止阀来控制回路中氦气的通断, 随着运行时间的延长, 由于截止阀密封面间的相互摩擦、挤压、剪切, 加上高速氦气冲蚀作用, 会造成密封面不同程度的损伤, 导致截止阀密封性能降低^[1]。

大部分截止阀与回路的连接形式为焊接连接, 其拆卸困难, 因此有必要对氦气截止阀开展在线研磨维修。本文提出一种针对氦气截止阀密封面在线维修方法, 并设计出相应维修设备, 有效缩短了氦气截止阀维修周期, 节约了核电运行成本。

1 氦气截止阀失效形式

高温气冷堆氦气截止阀使用过程中处于高温、高压和高速流体作用下, 截止阀频繁启闭, 密封面极易受到损伤而产生缺陷, 影响阀门的密封性能, 即使阀门密封面采用优良的耐磨损、耐冲蚀、耐腐蚀和高温抗蠕变性能的硬质合金, 也无法完全避免阀门密封面在使用中产生密封面损伤^[2], 密封面损伤一般体现在以下几个方面^[3], 如图 1 所示。

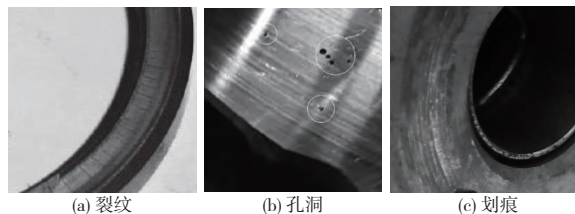


图 1 密封面常见缺陷

基金项目: 国家科技重大专项项目 (2017ZX06906009)

第一作者简介: 董岱林 (1984—), 男, 湖北孝感人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为核反应堆及回路系统检维修, dongdl2003@163.com。

1) 裂纹缺陷

氦气截止阀密封面工作时不仅承受着高温高压,还受到热交变应力的冲击,因此在密封面可能产生微小裂纹。

2) 孔洞缺陷

由于密封面在堆焊过程中存在部分气体未逸出,在使用中随着流体的不断冲刷导致截止阀密封面逐渐减薄,最终导致气孔露出。

3) 划痕和微小凹坑

由于气体中含有的微小杂质,在阀门不断启闭过程中,对截止阀密封面造成微小凹坑和划痕。

据统计,第1种和第2种损伤数量之和不到截止阀损伤总数的10%;大部分密封性能下降或失效是密封面划痕和微小凹坑导致。因此本文仅针对密封面划痕和微小凹坑维修开展研究。

2 截止阀维修方案

2.1 截止阀维修方案研究

因高温气冷堆氦气截止阀和系统回路焊接不可拆卸,且作业环境具有放射性,应尽可能缩短维修时间,减少人员所受辐照剂量。

对于密封面的划痕和微小凹坑,采用研磨方式即可对缺陷进行修复。现有研磨方式有3类:手工研磨、半自动研磨、全自动研磨。其中手工研磨对装置的要求较低,主要依赖研磨工人的经验和熟练程度,不熟练研磨工人容易造成截止阀报废,风险高,同时工人劳动强度大;半自动设备需要工人的辅助程度略有差别,但都需要人工干预,工人对设备动作程序需熟练掌握,干预不当容易引起密封面一定程度损伤;全自动研磨能够最大程度解放人力,也不依赖经验,但对设备的自动化、可靠性、安全性以及作业参数提出了较高要求^[4-5]。

综合以上分析,采用全自动在线研磨设备,其具有以下特点:

- 1) 小型轻便,便于人员搬运;
- 2) 安装效率高,安装控制在5 min以内;
- 3) 全自动化作业,过程不需要人工干预;
- 4) 适应性好,能够适应不同型号的阀门;
- 5) 作业参数经过反复验证。

2.2 研磨效果影响因素分析

对于阀座及阀芯密封面,采用回转研磨方式对其进行修复。经分析,影响研磨效果的因素包括磨具材料、回转同轴度、压紧力、旋转速度以及

研磨时间。这些因素之间具有关联性,定性分析具有以下特性:

1) 不同的磨具材料具有不同硬度及颗粒度,硬度及颗粒度越高,研磨效率越高,但研磨精度不易控制;

2) 磨具回转中心与密封面几何轴心的同轴度精度越高越好;

3) 磨具与密封面之间的压紧力越大,研磨效率越高,但研磨精度不易控制;

4) 磨具转速越高,研磨效率越高,但研磨精度不易控制,且磨具高转速会影响上述同轴度;

5) 研磨时间受上述几个因素综合影响,且研磨时间需经过大量试验测试。

根据以上分析,研磨过程应遵循以下流程,如图2所示。

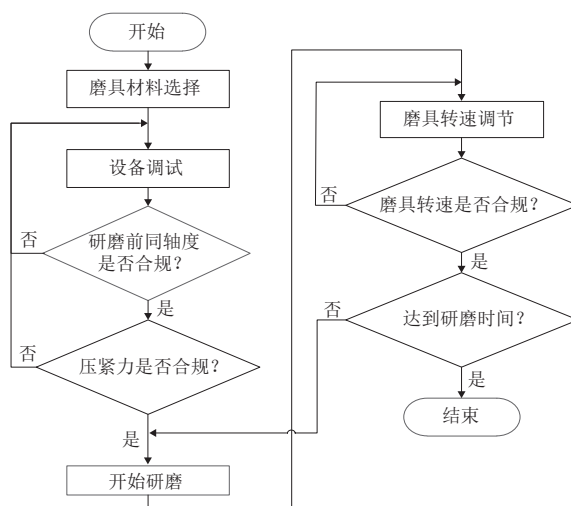


图2 研磨影响因素分析流程

研磨维修过程中密切关注密封面形位公差、表面粗糙度、外貌等特征指标,若特征指标达标,则回装阀门阀芯。上述作业参数(磨具材料、压紧力、同轴度、旋转速度、研磨时间)和特征指标(形位公差、表面粗糙度、外貌)是本课题的重要研究成果,部分内容不作详细介绍。

3 在线维修设备

3.1 阀座研磨设备

1) 设备介绍

针对阀座不可从回路中拆卸的特点,同时考虑到小型轻便、安装及作业效率高等要求,阀座研磨工具主要结构包括:气动马达、联轴器、定心工装、耐磨轴套、传动轴以及仿形磨头,如图3所示。

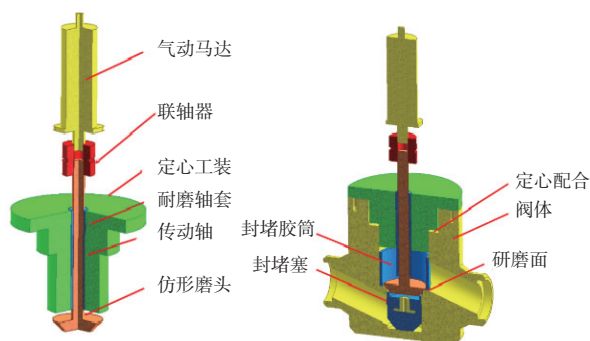


图3 阀座研磨设备示意图

a) 气动马达:采用进气节流阀调节压缩空气流量从而调节气动马达转速。

b) 联轴器:用于连接气动马达的输出轴和传动轴,带动仿形磨头做旋转运动。

c) 定心工装:设计加工系列化的定心工装,以阀体的内腔壁面作为定位基准,将精加工后的PEEK工程塑料以精密的配合公差嵌套在阀体的内腔壁面上(同轴度误差约 $\pm 0.02\text{ mm}$)。定心工装的内孔与耐磨轴套紧密配合(同轴度误差小于 $\pm 0.04\text{ mm}$),传动轴穿过耐磨轴套形成间隙配合(同轴度误差小于 $\pm 0.04\text{ mm}$),仿形磨头相对于阀座密封面的同轴度误差小于 $\pm 0.08\text{ mm}$ 。

d) 仿形磨头:设计加工不同材料系列化的仿形磨头,其形状根据阀座内锥密封面轮廓定制,成型角满足密封面轮廓精度要求。

2) 关键点

对于阀座研磨设备,关键在于保证仿形磨头回转中心和阀座密封面轴心的同轴度以及研磨时仿形磨头与密封面之间的压紧力。

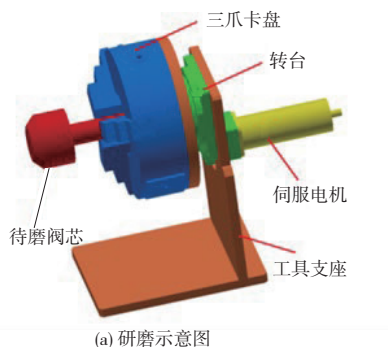
对于同轴度控制,主要有以下措施:a) 仿形磨头与传动轴之间用球铰连接,使其具有自适应性;b) 控制定心工装形位公差,使其与阀座法兰面贴合紧密,提高定位精度;c) 增大传动轴与定心工装之间的配合长度,减小传动轴的转动偏移量。

对于压紧力控制,利用设备自身质量来实现。通过计算各部件的质量,将压紧质量控制在合理范围。

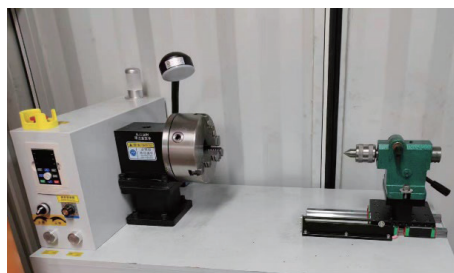
3.2 阀芯研磨设备

1) 设备介绍

由于阀芯可以从回路中拆卸下来,因此可以将其安装到所设计的设备上研磨维修。阀芯研磨设备类似于一台小型卧式车床,其主要结构包括三爪卡盘、转台、伺服电机以及工具支座等,如图4所示。



(a) 研磨示意图



(b) 实物图

图4 阀芯研磨示意图及实物图

a) 三爪卡盘:用于固定阀芯,且保持阀芯处于回转中心。

b) 转台:内置有减速齿轮副,用于适当降低回转轴转速,同时也确保了足够的转矩输出。

c) 伺服电机:其速度可调,对三爪卡盘转速进行精确控制。

d) 工具支座:用于固定和转动阀芯研磨工具。

三爪卡盘带动阀芯定速旋转后,不同材料的仿形磨头通过研磨设备尾部顶轴对阀芯密封面研磨。

2) 关键点

对于阀芯研磨设备,关键在于保证仿形磨头回转中心和阀芯密封面轴心的同轴度以及研磨时仿形磨头与密封面之间的压紧力。

对于同轴度控制,主要有以下措施:a) 调整三角卡盘和尾锥顶丝之间的同轴度,使其在一定精度范围内;b) 增大阀芯装夹长度,使其和三角卡盘同轴度有保证;c) 控制阀芯转速,使其动态效应降低。

对于压紧力控制,则通过设备尾锥后部压力传感器进行精确控制。

4 试验验证

为研究维修后截止阀密封面的特征指标以及作业参数,设计了若干型号阀门模拟体以及一套试验台架,对研磨后的截止阀进行密封性能验证。

4.1 截止阀模拟体

对截止阀模拟体模拟高温气冷堆回路中的截止阀人为制造一些缺陷,再对这些缺陷进行研磨处理,最后通过试验台架测试其密封性能,验证维修效果。

根据实际的截止阀对截止阀模拟体进行了简化,去掉了电动头等部分,只保留了阀体(阀座)、阀芯、阀杆、阀盖、填料、拨杆(手轮)等关键零件。截止阀模拟体的主体材料为奥氏体不锈钢,密封面为硬质合金,如图5所示。

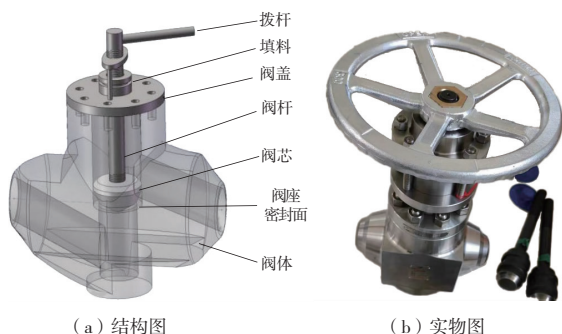


图5 截止阀模拟体结构图及实物图

4.2 试验台架

试验台架由伺服电机、联轴器、直线导轨、丝杠、四通、压力表、压力引入管、凹凸面法兰、氦气截止阀模拟体、尼龙密封垫、压力引出管、检漏口、拉杆、保温层、卡盘、支撑管夹、滑台等组成,如图6所示。其功能主要是用于氦气截止阀模拟体的夹持固定以及后续一系列气密封、氦气检漏测试等。

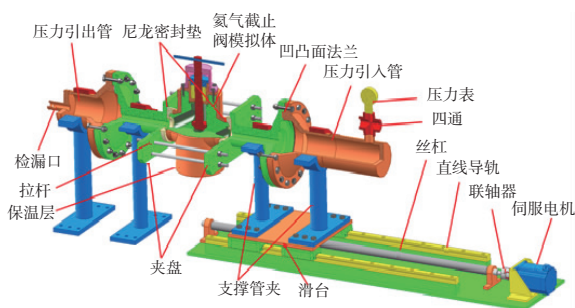


图6 氦气截止阀维修研磨试验台架

滑台、丝杠、直线导轨、轴承座、联轴器、伺服电机以及固定底板共同组成了滑台组件,其用于调节夹盘之间的间距以适应不同型号的阀,阀长度差值约为730 mm,预留一定的余量,将滑台行程设计为900 mm。单根直线滑轨额定负载3 280 kg,滑台底部采用一对直线滑轨支撑,其负载能力超过6 000 kg,远大于最大型号氦气截止阀模拟体质量1 935 kg。

4.3 截止阀密封试验

当氦气截止阀关闭时,压缩空气通过入口管道充入,进入氦气截止阀腔体,达到测试压力后进行保压。先检测氦气截止阀的填料密封性能,以免对后续密封面密封性能测试造成干扰。

该装置设置有旁路压缩空气管路,在检测完氦气截止阀填料密封的密封性能后,用压缩空气快速吹扫整个测试回路中的氦气,为后续对其余氦气截止阀密封性能检测创造条件,避免回路中残留的氦气对出口管道的氦检漏仪表形成干扰。

当氦气截止阀关闭时,压缩氦气通过入口管道充入,进入氦气截止阀腔体,达到测试压力后进行保压。可通过出口管道的氦气检漏仪表检测截止阀的阀座与阀芯密封面的密封性能。氦气截止阀密封性能测试回路如图7所示。

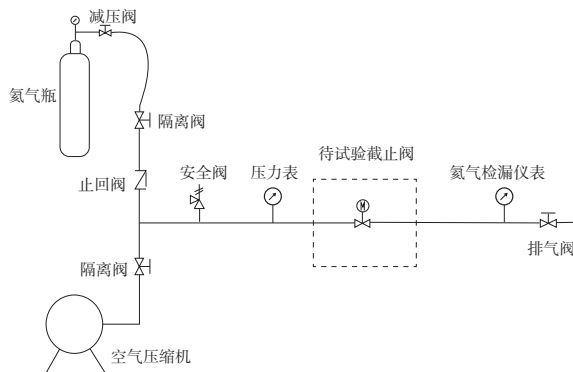


图7 氦气截止阀密封性能测试回路图

氦气截止阀密封性能测试过程如图8所示。

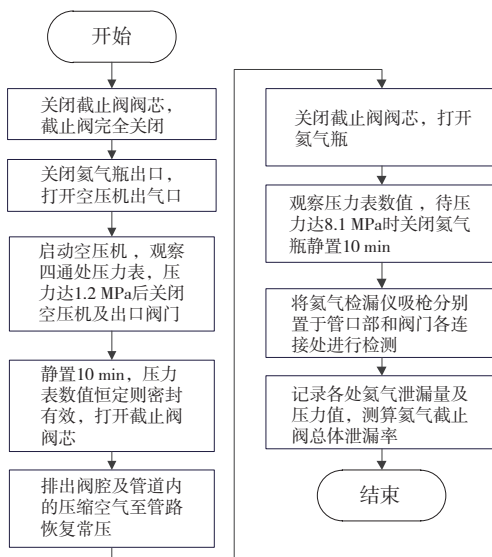


图8 氦气截止阀密封性能测试过程

(下转第56页)

- composites reinforced by TiB₂ [J]. Journal of Alloys and Metallurgical Systems, 2024, 7: 100093.
- [25] DAMMAK M, BOUHAMED A, JRAD H, et al. In situ experimental characterization and numerical investigation of Fe - TiB₂ Steel Matrix Composite behavior considering fully coupled damage model: simulation during incremental forming process [J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107741.
- [26] FARID A, GUO S J, CUI F G, et al. TiB₂ and TiC stainless steel matrix composites[J]. Materials Letters, 2007, 61(1): 189-191.
- [27] BARON C, SPRINGER H, RAABE D. Efficient liquid metallurgy synthesis of Fe-TiB₂ high modulus steels via in situ reduction of titanium oxides [J]. Materials & Design, 2016, 97: 357-363.
- [28] LIU J, CHEN W P, CHEN L, et al. Microstructure and mechanical behavior of spark plasma sintered TiB₂/Fe-15Cr-8Al-20Mn composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 886-894.
- [29] 王振廷, 高红明. 氩弧熔铸 TiC-TiB₂/Fe 复合材料的组织与耐磨性[J]. 黑龙江科技大学学报, 2014, 24(4): 393-396.
- [30] KATO H, MATSUMOTO K, ITO Y, et al. Milling of TiB₂ particle reinforced high - modulus steel [J]. International Journal of Automation Technology, 2024, 18(3): 358-365.
- [31] LI C D, LI Y L, ZOU Y Z, et al. Thermal fatigue performance enhancement of new high - Cr martensitic die steels based on overall microstructure manipulation by trace TiC-TiB₂ nanoparticles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 901: 146468.
- [32] SALMAN OO, GAMMER C, ECKERT J, et al. Selective laser melting of 316L stainless steel: influence of TiB₂ addition on microstructure and mechanical properties[J]. Materials Today Communications, 2019, 21: 100615.
- [33] ALMANGOUR B, GRZESIAK D, YANG J M. Rapid fabrication of bulk - form TiB₂/316L stainless steel nanocomposites with novel reinforcement architecture and improved performance by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680: 480-493.
- [34] HU H, WEN S F, DUAN L C, et al. Enhanced corrosion behavior of selective laser melting S136 mould steel reinforced with nano - TiB₂ [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105588.
- [35] WEN S F, HU H, ZHOU Y, et al. Enhanced hardness and wear property of S136 mould steel with nano-TiB₂ composites fabricated by selective laser melting method[J]. Applied Surface Science, 2018, 457: 11-20.
- [36] ALMANGOUR B, KIM Y K, GRZESIAK D, et al. Novel TiB₂ - reinforced 316L stainless steel nanocomposites with excellent room - and high - temperature yield strength developed by additive manufacturing [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 156: 51-63.

收稿日期: 2023 - 07 - 21

(上接第 22 页)

5 结语

1) 设计了研磨维修设备、截止阀模拟体和试验台架, 研究出高温气冷堆氦气截止阀维修的作业参数和特征指标。

2) 按照所述思路对阀门维修研磨后, 经阀门密封性测试, 结果达到内漏标准, 验证维修方法可行。

3) 所研制的维修设备可用于高温气冷堆氦气截止阀密封面的维修, 经试验证明效果良好。

参考文献:

- [1] 胡明, 毛彦恒. 天然气流速过快导致双作用节流截止

阀失效分析及对策[J]. 管道技术与设备, 2018(4): 30-32, 46.

- [2] 胡静波, 汤文成. 安全壳通风隔离阀密封性能的有限元分析[J]. 机械制造与自动化, 2008, 37(1): 29-32.
- [3] 彭俊杰. 核电站气动截止阀常见故障及维修[J]. 现代制造技术与装备, 2018, 54(6): 140, 142.
- [4] 任立斌, 钟亮, 丘贵彬, 等. 核电厂阀门密封面常见缺陷及焊接修复策略[J]. 设备管理与维修, 2023(9): 87-90.
- [5] 张威. 阀门密封技术研究现状及发展趋势分析[J]. 阀门, 2020(5): 21-24.

收稿日期: 2024 - 02 - 23