

核电厂密封段加速寿命试验研究

龚碧颖¹, 徐峰¹, 龙云飞²

(1. 上海核工程研究设计院, 上海 200233; 2. 中核苏阀科技实业股份有限公司, 江苏 苏州 215129)

摘要:堆芯中子注量率测量系统是30万千瓦核电厂监测系统的重要组成部分之一。该系统中的密封段要在工作温度不大于100℃、设计压力为17.16 MPa条件下满足长期密封要求。根据Arrhenius定律及《机械密封试验方法》,计算出了保证密封段正常工作5 a不泄漏需在240℃条件下进行加速寿命试验所需的试验时间。同时还制定了密封段加速寿命试验方案并进行了加速寿命试验,对试验测量参数进行了分析。分析结果表明密封段满足正常工作5 a不泄漏的要求。密封段加速寿命试验是密封段型式试验的重要步骤,还可作为其它密封设备加速寿命试验的参考。

关键词:核电厂;密封段;加速寿命试验;Arrhenius定律;型式试验

中图分类号: TG760.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)02-0111-04

Research of Accelerated Life Test of Nuclear Power Station Seal Assembly

GONG Bi-ying¹, XU Feng¹, LONG Yun-fei²

(1. Shanghai Nuclear Engineering and Design Institute, Shanghai 200233, China;

2. CNNC Sufa Technology Industry Co. Ltd., Suzhou 215129, China)

Abstract: Incore instrumentation system is one of the important parts of 300,000 kW nuclear power station. Seal assembly of incore instrumentation system should keep working for long time without leakage under the condition of temperature up to 100℃ and design pressure of 17.16 MPa. In order to ensure seal assembly 5 years working time under its actual working condition, testing time of accelerated life test under 240℃ was calculated based on Arrhenius law and mechanical seal test method. Accelerated life test scheme was worked out; accelerated life test was carried out; and test parameters measured were analyzed. The result showed that seal assembly can work 5 years without leakage under its actual working condition. Seal assembly accelerated life test is an important step of seal assembly type test. The purpose was to provide reference for accelerated life test of other seal components.

Key words: nuclear power station; seal assembly; accelerated life test; Arrhenius law; type test

堆芯中子注量率测量系统是30万千瓦核电厂监测系统的重要组成部分之一,在反应堆启动和运行期间用于测量反应堆堆芯的中子注量率分布,同

时还用于监测堆芯功率畸变、积累燃耗数据。因此,堆芯中子注量率测量系统不但对核电厂的安全可靠地启动、运行至关重要,而且还保证了核电厂的经济

收稿日期: 2011-12-01

作者简介: 龚碧颖(1979—),女,上海人,工程师,从事反应堆本体相关设备的设计工作。

性。该系统通过导向管从反应堆压力容器底部贯穿件穿出,通过测量通道将数据传输到堆芯中子注量率测量控制和数据处理装置中。该系统由可移动探测器、机械部件、电气设备和测控设备等构成。其中机械部件包括手动阀、密封段、止回阀、电动阀、导向管以及指套管。回路一由反应堆压力容器、蒸汽发生器、主泵组成,冷却液在回路一中将链式反应所产生的热量通过蒸汽发生器传递给回路二。在反应堆正常运行期间,手动阀常开,回路一冷却液沿指套管外壁经手动阀流至密封段上游密封处,使得密封段的上游密封构成了回路一压力边界。因此密封段的性能对于保持回路一压力边界的完整性起着相当重要的作用。为了监测密封段的密封性能,在密封段上游密封和下游密封之间安装有泄漏探测器。

为了保证密封段的使用效率,要求密封段在一定的换料周期内无更换。对30万千瓦核电厂而言,要求密封段在正常工作条件下连续工作5a无需更换。在密封段样机制作完成后需要对密封段样机进行型式试验(包括静态试验和运转试验),其中运转时间不少于100h^[1]。对于密封材料的密封试验,国际上已经有较为成熟的加速寿命试验方法以及试验数据^[2-3],橡胶类材料的温度满足Arrhenius定律,通过有限元法计算出温度对密封性能的影响^[4]。丹麦ERIKS在空气介质中对材料为NBR的密封圈及材料

EPDM的密封圈进行了寿命试验,并计算出了其寿命与工作温度的关系。由于密封段结构是由多种密封元件的组合密封,而且加工及装配参数对密封性能也有一定的影响,因此密封段样机仍需进行加速寿命试验。笔者就此问题进行了试验研究。

1 基于Arrhenius定律的密封段加速寿命计算

1.1 密封段的结构及其设计参数

密封段在手动阀下游,与手动阀焊接,它的下游是连接管组件、止回阀和电动阀。指套管从密封段中间穿过,其拖出端限位块通过密封段下游密封螺母压紧固定。密封段通过密封件与指套管外表面配合,对导向管内的回路一冷却剂进行密封,是回路一的压力边界。密封段由上游密封、下游密封、上游反压接口(由图1中的压缩空气嘴和弹簧密封圈组成)、泄漏探测器组成,密封段的结构如图1所示。其中,泄漏探测器的两个电极在正常状态时因绝缘而不能导电,当上游密封失效时,两个电极产生信号报警。上游密封和下游密封由密封段体、半圆环、O形环、压紧螺母和其它一些零部件组成。其中密封段的上、下游密封的O形环部分采用如图2所示的公、母密封及O形圈的组合密封方式。这种具有强压缩能力和特殊形状的密封结构可在静态工况下实

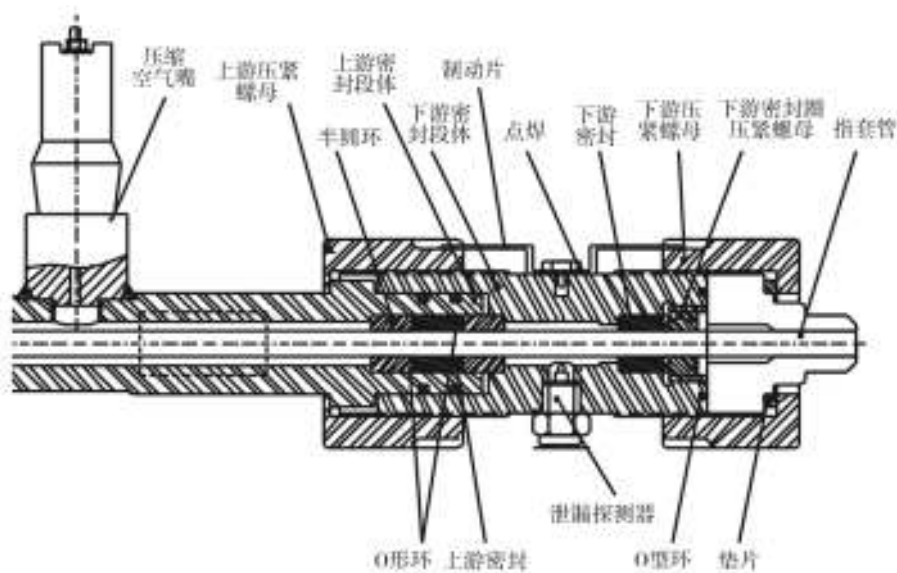


图1 密封段结构

Fig. 1 Seal assembly structure

现完全密封,同时加强了密封段的长期密封性能;通过调节上、下游密封的压紧螺母的拧紧力矩则可以控制O形圈的初始变形量。采用上、下游密封设计能够更好地防止回路一冷却剂的泄漏。当上游密封出现泄漏时,泄漏探测器发出信号,在控制柜上报警,而此时下游密封仍能继续保持密封作用,防止了回路一冷却剂泄出。

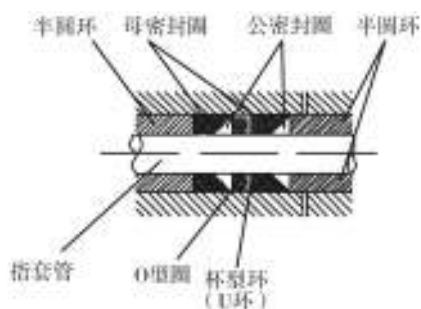


图2 O形环的组合密封

Fig. 2 Assembled seal of O-ring

密封段体的材料为304L,密封圈的材料为硅橡胶。指套管直径为7.5 mm,导向管的内径为10.2 mm,段体长约235 mm。密封段的正常工作温度不大于100℃,最高工作压力为15.5 MPa,设计压力为17.16 MPa,上游压紧螺母的拧紧力矩为60 N·m,下游压紧螺母的拧紧力矩为50 N·m。为降低拧紧时的受力不均,在操作中要求初始拧紧力矩略大于要求的力矩,而后再拧松至50 N·m,同时要求密封段正常工作5 a不更换。

1.2 密封段加速寿命计算

为了减少密封段运转试验时间、缩短密封段研制周期,对密封段进行超设计条件下的加速寿命试验,然后通过Arrhenius定律计算出密封段在正常工作条件下的寿命值。根据ASME QME-1—2002^[2]所表达的Arrhenius定律,有:

$$t_2 = t_1 \exp \left[E_a / k_B \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (1)$$

式中: T_1, T_2 分别是热力学温度,K; t_1, t_2 分别是温度为 T_1, T_2 的寿命; E_a 是活化能,eV; k_B 是玻尔兹曼常数, $k_B=0.8617 \times 10^{-4}$ eV/K。

大多数弹性体的材料活化能通常在0.75~0.85 eV之间^[2]。由于较低的活化能数值在加速老化测试中预测寿命时可产生保守的结果,式(1)中的活化能

取0.75 eV进行计算。

2 密封段加速寿命试验

2.1 试验方案

为了避免个体差异对加速寿命试验可信度的影响,选用3台试验样机同时进行密封段加速寿命试验。为了减少试验时间,且由于密封元件在超过其最高使用温度后会迅速老化、龟裂、变硬及失去弹性从而严重影响密封元件的寿命^[9],因此试验温度定为240℃(硅橡胶材料的最高使用温度为315℃)。

试验时,使密封段在240℃及最高工作压力条件下试验直至泄漏探测器报警时间 t_1 小于100 h,从而根据式(1)推算出密封段在其工作温度及设计压力条件下的寿命。取 $T_1=513.15$ K, $T_2=373.15$ K,根据 t_1 计算出 T_1 时密封段能够运行的时间 t_2 ,即为密封段正常条件下的寿命。

当试验时间超过100 h仍不发生泄漏时,则以100 h进行计算,同时停止试验,根据式(1)推算出密封段在其工作温度及设计压力条件下能够正常运行的最短寿命。当 $t_1 \geq 100$ h时,即密封段加速寿命试验连续工作100 h不泄漏。根据式(1)计算得到 $t_2 \geq 58\,035$ h ≈ 6.6 a,由此可证明密封段可以在其工作温度条件下满足连续工作5 a不泄漏。

2.2 试验装置

密封段加速寿命试验是验证新研制的堆芯中子注量率测量系统密封段性能型式试验的重要步骤。经型式试验鉴定合格后,密封段方能正式投入生产。

密封段加速寿命试验在百万千瓦级核电站阀门试验台架上进行,系统由稳压器、高压泵、管道回路、补水箱等组成。其中,稳压器的作用是使试验系统保持在恒压下,其压力波动保持在 $\pm 5\%$ 内。由于实际指套管是端部密封的,系统在密封段上游密封处密封,为了使系统能够保持恒温恒压,采用等外径的空心模拟指套管进行试验,并在高压泵的作用下,使去离子水介质在系统中实现循环流动从而对密封段试验样机实现保温保压。

为缩短试验时间,将3台密封段并联接入试验回路。为了避免介质对试验管道的腐蚀,试验采用

去离子水介质。泄漏探测器对去离子水不会产生反应,试验中在密封段上、下游之间加少量氯化钠晶粒,当密封段上游密封发生泄漏时,去离子水介质会漏过上游密封并溶解氯化钠晶粒,从而使泄漏探测器发出报警信号。为了减少密封段处的温度损失,用泡沫材料将密封段包裹完整。

2.3 结果及讨论

2.3.1 试验结果

该回路稳压器的最高压力只能达到 15.0 MPa。启动试验系统,当稳压器压力达到 15.0 MPa 且温度达到 240 °C 时开始计时,每隔 1 h 记录一次系统的压力及温度,运行 100 h 期间泄漏探测器未发出报警信号,密封段无泄漏。选取其中 24 h 的试验回路的温度和压力的记录,见表 1。

表 1 回路温度和回路压力记录表

Table 1 Record of test cycling temperature and pressure

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|-----|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 试验时间/h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 温度/°C | 239 | 240 | 239 | 241 | 241 | 239 | 237 | 238 | 239 | 240 | 238 | 240 |
| 回路压力/MPa | 15 | 15.1 | 15.1 | 15 | 15.1 | 14.7 | 14.6 | 14.8 | 14.9 | 14.6 | 14.9 | 14.8 |
| 试验时间/h | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 温度/°C | 242 | 238 | 239 | 239 | 240 | 238 | 239 | 238 | 239 | 240 | 239 | 239 |
| 回路压力/MPa | 15 | 15.1 | 15 | 15 | 15.1 | 15 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 15 | 15.1 | 15.1 |

$$\frac{dt}{dT} / t = - \frac{E_a}{k_B T^2} = - 0.033$$

在表 1 的 24 个温度测点中,温度的均值为 240 °C,偏差为 ± 1.34 °C。密封段在 240 °C 的最短寿命为 100 h,那么温度偏差所引起的寿命偏差为 ± 4.42 h。根据式(1)可以得到,试验温度偏差对 100 °C 时密封段的寿命影响约为 ± 0.29 a。在 17.16 MPa 及试验温度条件下,密封段的最短寿命为 6.31 a。

2.3.3 密封性试验

试验压力的高低对密封段的损坏有较大的影响,压力越高,其它的因素对密封件的性能影响就越大。由于试验条件的限制,试验压力只能达到 15.0 MPa。由于国内还没有关于压力与密封件寿命的试验研究成果的定量分析成果,因此暂不能进行压力与密封段寿命的定量分析。

对完成了上述热老化试验后的密封段进行了试验压力为 17.16 MPa 保压 30 min 的密封性试验。试

2.3.2 试验温度对密封段寿命的影响分析

试验温度与寿命关系的 Arrhenius 定律表达为^[6]:

$$\ln t = \frac{E_a}{k_B T} + B \quad (2)$$

式中: B 是常数项。对式(2)求导数,得到:

$$\frac{dt}{dT} = - \frac{E_a}{k_B T^2} \exp\left(\frac{E_a}{k_B T} + B\right) \quad (3)$$

从式(3)中可以看出, T 越高,寿命变化受温度变化的影响越小。根据式(3),寿命随温度的变化值与寿命的比值为:

$$\frac{dt}{dT} / t = - \frac{E_a}{k_B T^2} \exp\left(\frac{E_a}{k_B T} + B\right) / \exp\left(\frac{E_a}{k_B T} + B\right) = - \frac{E_a}{k_B T^2} \quad (4)$$

在温度为 240 °C 的条件下寿命随温度的变化值与寿命的比值为:

验结果表明,密封段仍能正常工作且不发生泄漏。密封性试验结果表明密封段能够满足正常工作 5 a 不泄漏的要求。

3 结论

根据 Arrhenius 定律及《机械密封试验方法》,计算出了为保证密封段正常工作 5 a 不泄漏需在 240 °C 条件下进行加速寿命试验所需的试验时间及试验压力。根据《机械密封试验方法》制定了密封段加速寿命试验方案并进行了加速寿命试验,同时对试验参数进行了分析,分析结果表明密封段满足正常工作 5 a 不泄漏的要求。

对于密封段这一新研制产品,暂不了解其真正的工作寿命。采用文中的试验方案既能节省试验时间,还能验证密封段产品的使用寿命是否满足要求,从

(下转第 124 页)

参考文献:

[1] 吴仁荣. 船用离心泵的运行振动和减消措施[J]. 机电设备, 2004(6): 37—39.

[2] 王新海, 杜喆华, 穆岩, 等. 船用离心泵减振改进数值模拟分析研究[J]. 船舶工程, 2011(2): 125—129.

[3] 唐辉, 何枫. 离心泵内流场的数值模拟[J]. 水泵技术,

2002(3): 3—9.

[4] MIGUEL Asuaje, FARID Bakir, SMAINE Kouidri. Numerical Modelization of the Flow in Centrifugal Pump: Volute Influence in Velocity and Pressure Fields [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2005(3): 244—255.

[5] 朱保林. 离心泵内流三维数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2005.

(上接第 110 页)

[2] 舒德学, 杨晓然, 罗勇. 纯锌在热带海洋环境下的大气腐蚀行为及规律[J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 45—48.

[3] 王光雍, 王海江, 李兴濂, 等. 自然环境的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996: 29—31.

[4] 翁诗甫. 傅里叶红外变换光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 291—342.

[5] 屈庆, 严川伟, 张蕾, 等. Zn 初期大气腐蚀中 NaCl 和 SO₂ 的协同效应[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1273—1276.

[6] 严川伟, 高天柱, 史志明, 等. NaCl 对含 SO₂ 环境中 Zn 大气腐蚀的影响[J]. 金属学报, 2000, 36(3): 272—274.

[7] 屈庆, 严川伟, 白玮, 等. SO₂ 存在下 NaCl 沉积量对 Zn 大气腐蚀的影响[J]. 金属学报, 2001, 37(1): 72—76.

[8] 屈庆, 严川伟, 曹楚南. 用石英晶体微天平研究 NaCl 对 Zn 大气腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(3): 139—141.

[9] 屈庆, 严川伟, 万晔, 等. NaCl 沉积对 Zn 的大气腐蚀产物影响的 FTIR 光谱研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(1): 16—18.

[10] 严川伟, 史志明, 林海潮, 等. Zn 在 SO₂ 环境中大气腐蚀初期表面特性研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(3): 151—153.

(上接第 114 页)

而提高了试验效率, 缩短了产品研制周期, 在工程领域具有一定的借鉴价值。

参考文献:

[1] GB/T 14211—2010, 机械密封试验方法[S].

[2] ASME QME-1—2002, 核电厂用能动机械设备的资格鉴定[S].

[3] 周漪. 某弹用硅橡胶密封材料贮存寿命预测[J]. 装备环

境工程, 2010, 7(5): 65—68.

[4] ISO 11346:2004(E), Rubber, Vulcanized or Thermoplastic—Estimation of Life-time and Maximum Temperature of Use [S].

[5] 徐世君. 温度对机械密封的影响及分析方法[J]. 机械制造与研究, 2007, 36(5): 82—83, 88.

[6] ISO 2578—1993, Plastics—determination of Time-temperature Limits after Prolonged Exposure to Heat[S].

(上接第 117 页)

[6] 陈旭, 梁平, 李晓刚, 等. 管线钢应力腐蚀开裂的影响因素[J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 21—26.

[7] 林冠发, 相建民, 常泽亮, 等. 3 种 13Cr110 钢高温高压 CO₂ 腐蚀行为对比研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(5): 1—4.

[8] 王彬, 张静, 杜敏. 咪唑啉类缓蚀剂对含饱和 CO₂ 的模拟油田采出液中 Q235A 钢的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 16—20.

[9] 王任芳, 陈云, 许林, 等. 咪唑啉类缓蚀剂的合成及其缓蚀性能评价[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2006, 23(1): 39—40.

[10] 徐宝军, 滕洪丽, 王金波, 等. 咪唑啉衍生物缓蚀剂的研究[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(8): 340—344.

[11] 黄红兵, 李辉, 谷坛, 等. 四川含硫气田缓蚀剂及应用技术研究[J]. 石油与天然气化工, 2002, 31(1): 54—58.

[12] 刘元清, 贾丽, 李志远, 等. 油田污水中咪唑啉缓蚀剂浓度检测技术研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2002, 19(4): 57—59.

[13] 于剑祥, 王林海, 魏强. 显色反应法的改进——海上油田高硬污水缓蚀剂浓度检测[J]. 中国海上油气, 2009, 21(4): 264—266.

[14] 焦其正, 付朝阳, 王丽荣, 等. 油气田用咪唑啉类缓蚀剂浓度的检测方法[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 131—133.