

100 型主泵密封室螺栓卡涩故障的分析与处理

袁伟刚 屈福林 王成名 毛文军

中广核核电运营有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i1.11416

[摘要] 100型主泵为法国热蒙设计制造,广泛应用于全球核电站,其密封室螺栓多采用热紧螺栓。本文主要针对密封室螺栓卡涩故障,从设备结构、运行工况等因素进行分析研究,研发了一种密封室螺栓卡涩故障的处理方法,实践表明,此方法可满足100型主泵密封室螺栓卡涩问题的在线应急处理需求,并提出有效防止螺栓腐蚀卡涩的解决方法。为企业关键生产设备维护、成本节约、机组安全运行等方面提供有益借鉴。

[关键词] 主泵密封室; 螺栓卡涩; 螺纹修复; 应力校准

中图分类号: TB752+.4 **文献标识码:** A

Jamming Analysis and Treatment on No.1 Seal Housing Bolt of Reactor Coolant Pump[Model 100]

Weigang Yuan Fulin Qu Chengming Wang Wenjun Mao

China Nuclear Power Operations Co.,Ltd.

[Abstract] The model 100 reactor coolant pump is designed and manufactured by JSPM, which is widely used in the nuclear power plants all over the world. The No.1 seal housing flange is generally tightened by heat tightening bolts. This paper analyzes and studies the reasons of the failure from the equipment structure, operation conditions and other factors, and develops a method to deal with the failure of the No.1 housing bolt jamming. The practice shows that the method can meet the emergency treatment requirements of the bolts jamming of model 100 reactor coolant pump No.1 seal housing, and proposes effective solutions to prevent bolt corrosion and jamming. It provides useful feedback for maintenance of important equipment, cost saving and safe operation of nuclear utilities.

[Key words] RCP seal housing; bolt jamming; thread repair; stress check

引言

反应堆冷却剂泵简称主泵,其功能在于驱动冷却剂在一回路循环流动冷却反应堆堆芯。主泵密封室螺栓为核电站一回路压力边界紧固螺栓,其可靠性直接影响压力边界的完整性,进而影响到反应堆的安全运行。

本文主要介绍主泵密封室螺栓卡涩故障处理实践,解析影响密封室螺栓卡涩的原因,介绍一种安全可靠的在线处理方法,旨在提升卡涩问题的处理方案及评价工艺,给予生产维修指导方法,提升主泵密封边界紧固螺栓的可靠性,保证一回路边界安全可靠。

1 研究的目的与意义

首先,主泵密封室螺栓为一回路压力边界的紧固件,为主泵承压部件提供预紧力,防止主泵边界出现一回路介质损失。主泵密封室为安全1级设备,密封室螺栓螺纹损伤具有较大风险,一旦损坏热屏底孔将需要整体更换水力部件,将造成关键部件损

坏、检修成本、大修工期等巨大经济损失。因此,研究主泵密封室螺栓卡涩问题并制定稳妥处理方案,给予业界同行运维经验,意义重大。

2 案例与数据收集

近年来,国内核电站发生多起主泵密封室螺栓卡涩无法正常拆卸的事件。本文搜集国内A核电站和B核电站发生的3起密封室螺栓卡涩故障处理实践案例,并开展调查研究,具体事件信息如下:

(1)2022年3月16日,A核电站执行密封室螺栓拆卸工作,4#螺栓卡涩无法松动,破拆后检查第5、8、9扣螺纹损伤。

(2)2022年4月9日,A核电站执行密封室螺栓拆卸,4#、7#螺栓无法正常拆卸,通过破拆4#、7#螺栓后检查底孔螺纹无损伤。

(3)B核电站2022年9月3日,B核电站执行密封室螺栓拆卸工作,10#螺栓无法拆卸,破拆后检查第9扣螺纹存在螺纹齿顶损伤。

通过以上案例发生情形及结果表明,密封室螺栓卡涩,通过破拆均能保证底孔螺纹的安全,实施螺栓破拆是最可靠的维修策略。

3 原因分析

通过3起事件分析,发现卡涩的密封室螺栓均为工程安装后首次拆卸,卡涩主要原因为:原始安装时螺纹润滑不良,并且运行期间,因核岛环境湿度、温度变化及密封返水等因素造成在螺纹内部形成锈垢,阻塞螺纹啮合间隙,导致螺栓拆卸时出现卡涩,甚至损伤底孔螺纹。下面从设备材料、结构和使用工况等方面进行深入分析、锁定原因。

3.1 设备介绍

主泵密封室螺栓为中空结构,用于螺栓加热及伸长量测量,螺纹规格为M52*3*213/78,光杆部位直径为 $\phi 47.30\text{mm}$,因此,螺栓强度最薄弱部位为光杆部分,螺栓紧固及承压后主要靠光杆区域发生弹塑性变形提供紧力,对螺栓光杆部位的检查尤为关键。密封室螺栓与热屏底孔采用6g/6H的精制紧固配合,螺栓为核级合金钢(40NCD7.03C级)棒材整体锻造,热屏底孔为不锈钢材料(Z2 CN 19-10),螺栓非抗腐蚀材料。

主泵设计上在热屏法兰处设置泵腔引漏管线,但因系统返水不可避免,且螺栓螺纹部分完全旋入底孔后在螺杆位置形成环形凹腔,极易聚集残水,运行期间形成潮湿环境,长期运行导致螺纹部分形成腐蚀产物。因此,密封室螺栓在调试检修期间易处于潮湿的环境。

3.2 工况分析

潮湿环境是主泵密封室螺栓卡涩的主要原因之一。在其全寿命周期内,安装调试期和检修期会导致系统返水,下面从大修窗口系统返水的情形进行分析,制定改进措施,降低密封室螺栓浸水风险。

(1)主泵靠背轮的松脱与连接工作导致密封端部返水。主泵靠背轮的松脱与连接需要投运轴封注入水以冲洗和润滑密封部件并阻止一回路介质返涌污染密封环境;此时轴封注入由容控箱供水,压力2.5bar,一回路最大压力1bar。如果注入流量过大,系统无法及时疏水,在3级串联密封面开启的时候形成开路极易导致三号密封上部返水,此水含有硼酸,进入螺栓底孔,极易造成螺栓锈蚀。

(2)三号密封注入水罐的冲洗和排空工作导致密封端部返水。由于系统管路设计缺陷,三号密封溢流管线、泵腔引流管与三号密封注入罐排空管线汇集同一母管,再流入废液收集罐,如果三号密封注入罐排水阀全开必然造成泵腔内返水。

(3)废液收集系统管路阻塞或不畅。泵腔引漏管处于热屏法兰面,此部位极易积垢并导致引漏管线堵塞,由前两项原因造成的返水不易疏散,并聚集在热屏法兰处,长时间浸泡密封室螺栓。

(4)螺栓初始安装期间润滑不良。

4 螺栓卡涩处理方法

该螺栓如发生卡涩,为保护热屏内螺纹不受损伤,需对卡涩

螺栓实施破拆。因破拆过程中涉及辐射防护内污染、系统防异物、操作不当损坏热屏内螺纹等重大风险,对于密封室螺栓是否实施破拆要谨慎决策。

4.1 螺栓破拆原则

密封室螺栓紧固力矩值为3381N·m($T=K\cdot F_0\cdot d=0.1\times 650198\times 52=3381\text{N}\cdot\text{m}$),同时,借鉴国外经验反馈主泵密封室螺栓冷拉紧固力矩为3050N·m,制定螺栓破拆原则:螺纹部分灌入松动剂WD40,再次加热拆卸,拆卸力矩不超过2000N·m(保守考虑),如仍无法拆卸,则直接启动螺栓破拆工作。

4.2 螺栓破拆过程

破拆流程分别除螺栓头部、切割或钻除光杆部分、钻削热屏内孔内螺杆三个阶段,具体如下:

第一阶段:做好泵腔防异物封堵措施,螺栓头部剔除高度需低于密封室法兰面。螺栓头部剔除后,需对泵腔铁屑清理干净,为下一步拆密封室、石墨轴承做准备,拆卸石墨轴承前对石墨内径与泵轴缝隙进行检查确保无铁屑,防止拆卸过程导致石墨面和轴颈划伤。

第二阶段:做好轴承室防异物,钻床支架朝泵轴方向架设,注意不要磕碰到泵轴,采用等高块降低台板高度,泵轴使用橡胶板防护,电机支撑腔防异物布置同第一阶段。

第三阶段:利用螺栓中心孔进行找中,确保空心钻头沿着螺栓底径垂直钻屑,且必须保证不损伤热屏底孔螺纹,最后采用气动刻磨机打磨齿底,直至螺牙从底孔内完整剔除。

4.3 螺纹修复处理

螺纹缺陷处理主要针对热屏底孔,螺栓破拆后优先对底孔螺纹进行清理,并目检螺纹状态。针对螺纹缺陷实施修复,使用专用丝锥(M52*3 H2)进行回牙,修复后螺纹按照如下要求进行检查:

- (1)目视检查螺纹工作面是否存在缺陷;
- (2)采用标准塞规检查:通规手动可轻松旋入螺纹底部无卡涩;止规旋入深度 ≤ 2 扣螺牙卡死;
- (3)如有牙伤缺陷则需对螺纹进行拓模检查,准确测量缺陷尺寸数据,通过力学计算对螺纹强度重新校准,确保螺纹力学性能满足RCC-M要求。

5 热屏底孔螺纹缺陷计算评估

5.1 法规要求

主泵密封室螺栓按照RCC-M M2312 C级要求制造,热屏法兰按照RCC-M M3301(材质:Z2 CN 19-10控氮)要求制造;查询RCC-M Z篇^[1],各温度下的许用应力如表1所示。

表1 材料力学性能数据表

牌号	尺寸/mm	抗拉强度 S_u , MPa	许用应力强度 S_m , MPa						
			50℃	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	350℃
Z2CN19-10(控氮)	$\phi > 150$	483	138	138	138	130	122	115	111
40NCD7.0 3 C级	$x \leq 300$	1069	318	306	297	288	280	271	258

5.2 螺纹剪切应力校准计算

由表1可知,热屏法兰材料的抗拉强度远低于密封室螺栓,因此,仅需对热屏法兰的螺纹底孔的剪切强度进行校核。热屏底孔螺纹展开^[2]后整个螺纹副的理论累计剪切面积 AS_n 计算式为:

$$AS_n = \frac{L_e}{p} \cdot \pi \cdot D \cdot b \quad (1)$$

其中, L_e 为螺纹副啮合长度, mm ; p 为螺距, mm ; D 为螺纹直径, mm ; b 为剪切宽度 mm 。

在校准热屏法兰螺纹强度时,需考虑受损螺纹对整体结构强度的影响。测量累计受损螺纹弧长 L , 保守计算, 假设受损螺纹完全缺损, 则, 实际累计剪切面积 AS_n' 与理论累计剪切面积 AS_n 之间存在以下关系:

$$k = \frac{AS_n'}{AS_n} = 1 - \frac{L/\pi \cdot D}{L_e/p} \quad (2)$$

表2 A核电站螺纹修复后剪切强度校核

工况类型	设计剪切力 τ, MPa	k	计算剪切应力 τ', MPa	RCC-M 剪切应力限值 值 $[\tau], MPa$
设计工况	32.38	0.993	32.61	66.6 @ 343℃
运行及扰动工况	80.4		80.97	82.8 @ 150℃
紧急工况	77.61		78.16	82.8 @ 120.7℃
水压试验工况	80.41		80.98	82.8 @ 60℃
事故工况	RCC-M 不做要求			

以A核电站主泵螺纹受损情况为例:受损螺纹弧长 $L=28mm$,代入式(2),则 $k=0.993$ 。根据A核电站主泵承压边界计算报告可

查询机组在设计/运行扰动/紧急/水压试验工况下螺纹副的最大轴向拉力及相应工况下热屏法兰的工作温度 T 。根据工作温度 T 查表1,通过插值法可计算各工况下的RCC-M许用剪切应力限值 $[\tau]$ 。计算A核电站最终校准剪切应力 τ' ,并与RCC-M许用剪切应力 $[\tau]$ (见表2)比较,根据计算结果可知:A核电站热屏法兰螺纹底孔修复后,螺纹计算强度仍满足RCC-M要求^[3]。

6 结束语

由于主泵设计、管路布置、维修工艺等因素影响,主泵密封室螺栓存在无法正常拆卸的风险,因此,需对维修工艺进行优化:(1)主泵靠背轮松脱与连接工作时,需对主法兰与密封室间隙进行防护,避免水流入螺纹底孔,并严格控制轴封注入流量,按照200L/h控制。(2)三号密封注入罐冲洗及排空工作应防止返水。(3)定期对主法兰引漏管线通畅性进行检查。(4)密封室螺栓安装时,规范涂抹润滑剂:将N7000润滑剂在螺栓的螺纹部分均匀涂抹一层且不堆积。

密封室螺栓材料强度远高于热屏法兰材料,应控制拆卸力矩 $\leq 2000Nm$ 。若螺栓仍无法正常拆卸,应制定妥善的螺栓破拆方案,以保护热屏法兰底孔螺纹。对底孔进行清理、修复后应进行仔细的目视检查,如螺牙存在损伤应按照规定进行强度校核,以保证压力边界的绝对安全。

[参考文献]

- [1] AFCEN. 压水堆核岛机械设备设计和建造规则(RCC-M)[S]. 上海:上海科学技术文献出版社,2010.
[2] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
[3] 中国国家标准化管理委员会. 普通螺纹公差[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

作者简介:

袁伟刚(1988--),男,汉族,广东深圳人,高级工程师,大学本科,从事核电站泵类设备的运维管理。