

文章编号: 0258-0926(2014)04-0101-04

螺纹套修复核电设备螺纹孔的核安全审查要点

孙海涛, 常 猛, 王宝祥, 高 晨, 凌礼恭, 马若群, 贾盼盼

环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082

摘要: 加装螺纹套是修复核电设备法兰螺纹孔损伤的一种常用手段, 被损螺纹可得到快速有效地修复, 且螺纹的承载能力和抗疲劳能力得到提高。在螺纹套修复不符合项的核安全审查过程中, 应对标准符合性、螺纹套的材质、实施方案、服役分析、跟踪措施等方面进行全面审查, 以保证修复的可靠性和质量。

关键词: 螺纹孔; 修复; 螺纹套; 核安全审查

中图分类号: TK124 文献标志码: A

0 前 言

在国内核电设备法兰螺纹制造和使用过程中, 因螺纹孔加工不当使螺纹尺寸超差、螺牙损伤, 因螺栓加载操作的失误、外来异物的作用导致螺纹孔的螺牙损伤, 因螺纹孔的保护不当造成螺纹的腐蚀生锈, 都会引起法兰内螺纹的失效。而对损伤螺纹的修复, 在不能采用铣削进行简单处理的情况下, 加装螺纹套是一种简易而可靠的修复方法。这也是近几年来法兰螺纹孔损伤不符合项中申请方较多采用的一种修复方法。

螺纹套的适用标准、材质、安装方式到承载分析、疲劳分析等多方面都可能影响其功能和服役, 因此在法兰螺纹孔损伤不符合项的核安全审查中, 针对以上各项要素都应进行细致审查。

1 用螺纹套修复法兰螺纹

对受损法兰螺纹的维修, 加装螺纹套是国内较为成熟的螺纹修复方法之一。

螺纹套为内外螺纹同心螺旋线弹簧状圈体, 使用专用工具加载扭力使螺纹套弹性收缩(在自由状态下螺纹套的直径比待嵌入的法兰螺纹稍大), 进入法兰螺纹后膨胀固定, 这样螺纹套便形成新的高精度标准内螺纹。除此之外, 未加装螺纹套前, 法兰螺纹孔大部分应力集中在上面少数几扣螺纹上(大约只有 1/3 的丝扣承担了大部分载荷), 而加装螺纹套后能使螺栓载荷均匀地分布到螺纹全长, 从而提高螺纹的承载能力^[1]。

2 螺纹套修复的核安全审查要点

近几年核电站重要设备法兰螺纹孔损伤不符合项案例较多, 如: 秦山二期 4 号机组 2 台蒸汽发生器(SG)人孔螺纹锈蚀不符合项、红沿河 1 号机组第 3 台 SG 下封头 6 个人孔螺纹损伤不符合项、宁德核电工程 1 号机组 3 号 SG 眼孔位置处一螺纹孔损伤不符合项等。

本文结合以上案例的审查经验, 着重从规范符合性、材质要求、制造质量、服役分析和检查措施等几个方面阐述审查的要点。

2.1 与标准、规范规定的符合性审查

国内核电站机械设备的检查和维修主要依据美国机械工程师学会(ASME)锅炉及压力容器规范和法国压水堆核电站机械设备在役检查规范(RSEM), 因此核安全审查应首先关注采用螺纹套修复是否满足相应的规范标准。而在 2 种规范中均对螺纹套的使用有相关规定。

ASME 规范 XI 卷 IWA-4230 规定承压部件中的内螺纹可按要求适用“1、2、3 级螺纹嵌入件”更换, 相关要求包括: 螺纹套材质要求、质量保证、材料制造和安装依据。

RSEM 规范附录“8.1 纠正性维修干预方法”中第 III 节给出了使用螺纹衬套修复 SG 或稳压器(PZR)上内螺纹的指导, 包括适用范围、采用工艺、使用工具、特殊要求、螺纹衬套的更换和文件要求等内容。

另外, 在螺纹套的制造和使用还可参考以下

标准：中国 GJB 119.4A《普通型钢丝螺套通用规范》、美国航空航天标准 NAS M 8846《钢丝螺套通用规范》、欧洲航空航天标准 EN2943《自锁钢丝螺套技术规范》、英国国家标准 BS 4377(1991)《自由旋转型钢丝螺套》、欧洲航空航天标准 EN 2942:1998《镀银耐热镍基合金 Inconel X750》。

在审查用螺纹套修复螺纹不符合项时，首先应确定设备螺纹制造依据的规范，根据所依据规范来确定螺纹套修复应满足的规范条款，当然其他规范条款的细节要求也可作为参考。

2.2 螺纹套材质的审查

一般螺纹套可选用不锈钢、铜合金、高温合金等材质，但由于螺纹套材质的选择直接影响其承载力和服役寿命，因此对于螺纹套的材质审查是核安全审查的重点之一，包括材料的强度、线性膨胀系数和热处理规范等。

对于加到螺纹连接件上的规定载荷，应满足 ASME 建造规范的设计要求。在建造规范中未列的材料，一次应力不应超过所用材料最小规定屈服强度 2/3 或最小规定抗拉强度 1/4 中的较小值。RSEM 规范则直接要求采用铬-镍-铁合金（牌号：NC15FeNbA），并按按照法国压水堆核岛机械设备设计和建造规则（RCC-M）M4104 的规定进行制造采购。法国标准的 NC15FeNbA 对应美国 ASTM B637 标准中的 UNS N07500 Inconel X750，二者在化学成分要求上无差异。

目前国内核用电用螺纹套通常采用高强度的钢可镍冷轧合金钢（即 NC15FeTNbA、Inconel X750、GH4145）丝冷拉成菱形加工制造。如使用其他材质的螺纹套，其成分、性能等达不到要求，建议不予以批准或谨慎对待。

同时在核安全审查时，还应提交螺纹套的材料验收报告。例如，ASME 规范要求：螺纹套应有材料试验合格报告，以便能在最终成形前对物项、材料规格、化学成份、等级或级别，以及机械性能和热处理条件进行追溯。在审查材料验收报告中，应重点审查：材料化学成分是否满足标准要求，NC15FeTNbA 合金的成分要求见表 1；材料力学性能是否满足标准要求（如 NC15FeTNbA 的室温抗拉强度要求大于 1140 MPa）；材料的热处理状态是否满足标准要求（固溶热处理+时效硬化）；锻件的无损探伤

表 1 NC15FeTNbA 合金的化学元素成分

Table 1 Chemical Composition of NC15FeTNbA

元素		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
含量/%	上限	—	—	—	—	—	14.00	—
	下限	0.080	0.50	1.00	0.010	0.010	17.00	70.00
元素		Al	Fe	Cu	Co	Ti	Nb+Ta	
含量/%	上限	0.40	5.00	—	—	2.25	0.70	
	下限	1.00	9.00	0.50	0.20	2.75	1.20	

结果。

2.3 加装螺纹套方案和作业的审查

加装螺纹套进行核电设备螺纹修复的主要作业步骤为：扩孔-丝攻-中间检查-加装螺纹套-冲断安装柄-安装后检查^[2]。螺纹套加装的方案和作业应满足相应规范标准，如 RSEM A8000 和 ASME IWA4000 的相关要求，对于螺纹套加装方案和作业的审查应重点审查以下几点：

(1) 返修前确认。对受损内螺纹进行机械加工，去除受损螺牙后应进行清理和干燥，并对新螺纹实施目视检查和尺寸检查，一方面确认是否满足标准和螺纹衬套供应商的图纸尺寸要求，另一方面确认原螺纹处的损伤得到完全消除。因此在核安全审查过程中应关注相关工艺流转卡和质量计划中是否对以上环节有明确的质量控制点。

(2) 工艺、人员的评定。根据 RSEM 规范的要求，应按照规范 A8331 和 A8332 的规定进行维修操作评定（QOM），包括程序评定、人员考核、专用工具评定和环境条件等。因此，在核安全审查中应对螺纹套加装的工艺及工具等评定报告予以关注，经评定合格的工艺和工具才可用于实施维修操作。

(3) 模拟试验。因加装螺纹套需要对原法兰螺纹进行扩孔加工，因此有必要在真实产品扩孔加工前，实施模拟试验以验证返修技术尤其是扩孔技术的可靠性，以保证加工后法兰螺纹孔的精度和尺寸要求。在核安全审查中，应注意审查模拟试验的代表性，如模拟体材料的选择、模拟体的尺寸、工序的完整性和模拟试验的检查手段等。

(4) 水压试验。加装螺纹套对螺纹孔进行的修复作业，会对设备已实施的水压试验结果产生影响。其中根据 RSEM B8500 的规定按照 A8541 划分维修作业对设备影响的严重程度分级，采用螺纹套对 SG 和 PZR 人孔螺纹孔的修理属于“2

级”，作业可能导致以前的法定水压试验结果无效，因此还应对加装螺纹套修复后设备水压试验的必要性进行审查，包括申请免除水压试验理由。

2.4 螺纹套的服役功能审查

通过扩孔并加装螺纹套对核设备法兰螺纹孔进行修复，将对设备法兰螺纹孔、对应螺栓的服役及法兰密封产生影响，核安全审查应重点关注几方面：扩孔加装螺纹套对法兰密封性分析；

对螺栓和螺纹孔连接在各种工况（设计工况、第二、三、四类以及水压试验工况）下的力学分析评价，包括对螺栓螺纹剪切强度的分析评价；

螺纹套与法兰螺纹孔螺纹的承载分析；螺栓与螺纹套的寿期疲劳分析影响。

目前，针对国内核设备螺纹套的连接强度和疲劳研究，缺少系统有效的分析方法，相关试验研究开展的也很少。

2.5 修复后的检查措施审查

采用螺纹套进行法兰螺纹修复，经目视检查和尺寸检查合格后，核安全审查还应提出或关注后续的跟踪检查措施。

2.5.1 修复后的检查要求 应重点关注螺纹套加装后的检查要求和检查结论。一般来说，实施螺纹套安装后应进行目视检查和尺寸检查。

目视检查的验收应无划痕、跳痕、撕裂等影响内螺纹尺寸的缺陷。螺纹精度主要参数包括螺距、牙形和中径，因此尺寸检查应包括根据 ISO 1502—1996 要求完成的螺纹测量，利用螺纹通止规检查螺纹直径和检查孔的对中、位置度、垂直度，以上也是 RSEM 规范的明确要求。一般螺纹套螺纹的尺寸和精度应符合 GB/T 196《普通螺纹基本尺寸》和 GB/T 197《普通螺纹 公差与配合》的规定。

2.5.2 役前检查和在役检查要求 根据规范的要求，对于维修后的设备或部件应完成役前检查以建立在役检查的零点，如对螺纹孔实施目视检查、超声或/和涡流检查。这也是此类设备不符合项核安全审查的要点之一。

针对红沿河 1 号机组 SG 下封头人孔螺纹损伤不符合项，核安全审查提出的跟踪措施：要求申请者加强对 SG 人孔螺纹孔的后续跟踪检查，依据承诺在一回路水压试验后的役前检查及随后的连续两次在役检查对人孔全部螺纹孔实施目视

检查和入孔韧带区的超声检查，如发现损伤扩展，需上报相关单位。

宁德核电厂 1 号机组 SG 眼孔由于水压试验拆装螺栓不当，导致螺纹孔损伤，制造厂通过加装螺纹套进行了返修。同时鉴于设备已完成水压试验，考虑到增加螺纹套需对眼孔螺栓孔进行扩孔对水压试验的影响，核安全审查要求该不符合项需在现场二次侧水压试验后再实施检查合格后才能关闭。

在处理秦山核电二期 4 号机组 SG 人孔螺纹锈蚀不符合项时，申请者根据核安全审查要求，采用螺纹套对人孔螺纹进行修复，并经过水压试验后对螺纹套采用内窥镜进行目视检查，确认无异常后方验收通过。

因此，针对类似问题，要考虑加装螺纹套返修节点与机组冷、热态功能试验及水压试验的关系。在审查中应结合返修时机，对返修后的跟踪检查措施（包括役前检查）提出相应要求。当然，如法兰螺纹孔存在裂纹类缺陷风险，还应增加螺纹孔韧带区的超声检查要求。

2.6 经验反馈的审查

不符合项的分析和处理的最重要目的之一是经验反馈。因此，核安全审查还应重视申请方对不符合项处理所做的经验反馈工作，包括对所涉及设备的后续管理措施，对其他机组类似设备的管理反馈等。在处理秦山核电二期扩建工程 SG 人孔螺纹锈蚀不符合项时，申请者承诺加强核岛主设备维护保养的管理，做好经验反馈工作，保证主设备的质量和运行安全。

当然针对由于螺栓安装不当造成的法兰螺纹孔损坏，就需要反馈到后续螺栓的安装过程控制中，需要严格按照安装技术规格书执行，防止在螺纹咬死状态下强行加载等错误操作，尤其是反应堆压力容器的整体螺栓安装操作。

3 总 结

螺纹套用于核电设备法兰螺纹孔的修复，应从以上几个方面实施全面的核安全审查，对以上各个环节实施严格的质量控制，包括合理的选材、可靠的加装方案和作业、有效的试验/检查措施，采用螺纹套修复后的设备螺纹孔可以满足相关技术规范的要求，保证设备法兰密封的完整性，进一步保障核设备的质量和运行安全。

参考文献：

[1] 石海明. 钢丝螺套的应用及其安装[J]. 机械工业标准化与质量, 2001, (12): 29-32.

[2] 王梅芝. 卫星总装中钢丝螺套装配工艺[J]. 航天环境工程, 2008, 25(6): 598-600.

Key Points of Nuclear Safety Review on Thread Remediying with Threaded Inserts

Sun Haitao, Chang Meng, Wang Baoxiang Gao Chen,
Ling Ligong, Ma Ruoqun, Jia Panpan

Nuclear and Radiation Safety Center, SEPA, Beijing, 100082, China

Abstract: Fitting threaded inserts is a common means of remediying of internal threads deterioration founded in flange of nuclear equipments, by which defective internal threads can be repaired rapidly. Moreover, the bearing capability and anti-fatigue capability can be improved. During nuclear safety reviewing on non-conformance of threads deterioration, more attention need to be paid to the conformance with standards, material of inserts, implementing program, service analysis, inspection measures and feedback in order to ensure the reliability and quality of threads remedy.

Key words: Threads damage, Remedy, Threaded inserts, Nuclear safety review

作者简介：

孙海涛（1979—），男，高级工程师。2005年毕业于北京理工大学材料加工工程专业，获硕士学位。现从事核电厂机械设备、材料核安全审评和研究。

常猛（1979—），男，高级工程师。2009年毕业于清华大学核能与核技术工程专业，获硕士学位。现从事核安全审评和研究。

王宝祥（1977—），男，高级工程师。2006年毕业于中国原子能科学研究院粒子物理与原子核物理专业，获硕士学位。现从事核与辐射安全领域的科研工作。

（责任编辑：孙 凯）