

罗飞华 赵冬冬 卢祺 徐永标

摘要: 文章对于国家核安全局重点关注的紧固件专项中的核电厂主蒸汽、主给水主管道横向限制件锚固螺栓问题做了深入研究,制定了锚固螺栓的更换方案,正式实施前通过现场试验发现问题,及时对方案进行修正,成功完成了所有锚固螺栓的更换工作。作者还对大尺寸带载螺栓的破坏性拆除方法做了大量思考,结合工程实践,给出了一种有效的解决方案。

0 引言

秦二厂核查了4台机组 RCCM 规范 1、2、3 级、S1、S2 级 1E 级和非 RCCM 规范级别但有 SSE 抗震级要求的国产设备所用紧固件。其中 3、4 号机组 VVP 主蒸汽、ARE 主给水管道的横向限制件锚固螺栓,采用取样(截取部分长度)重组的方法做冲击试验,抽样结果均不合格。

核电站中的核岛、常规岛和辅助厂房都布置有许多高能管道,这些管道在长期服役过程中由于内部缺陷、管道老化,疲劳应力或遭遇地震等偶然事故工况下,极有可能产生破裂。

图 1 主给水管道横向限制件

1.2 横向限制件结构功能

防甩击限制器由外框架、垂直限制件、侧向限制件、横向限制件和调整垫片组成。横向限制件与管道固定在一起,随管道一起运动,外框架固定在锚固板上,两者之间形成滑动面,从而使管道可以沿轴向滑动,不可横向运动。

查阅安装记录与安装技术要求,主蒸汽、主给水横向限制件锚固螺栓均采用螺栓拉伸机拉伸紧固,锚固螺栓信息如表 1。

2.1 初版方案

用螺栓拉伸机拆卸旧螺栓；按照《0401AT312 主蒸汽横向限制件安装技术要求》以及《0401AT313 主给水横向

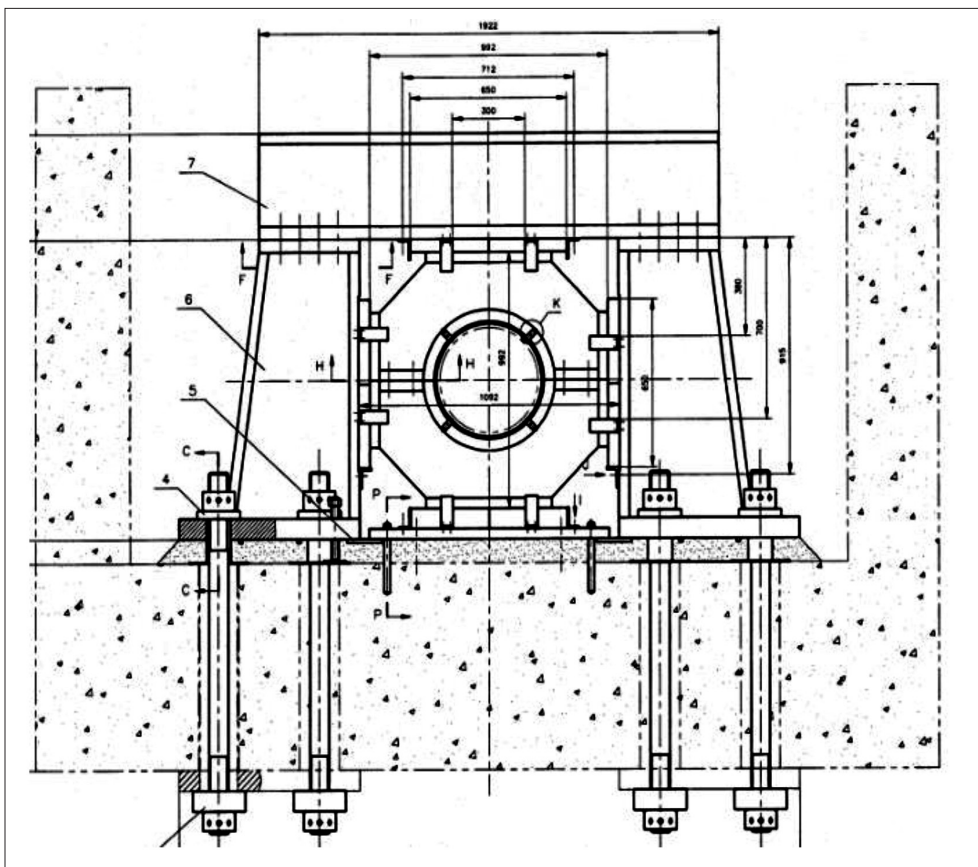


图 1 主给水管道横向限制件

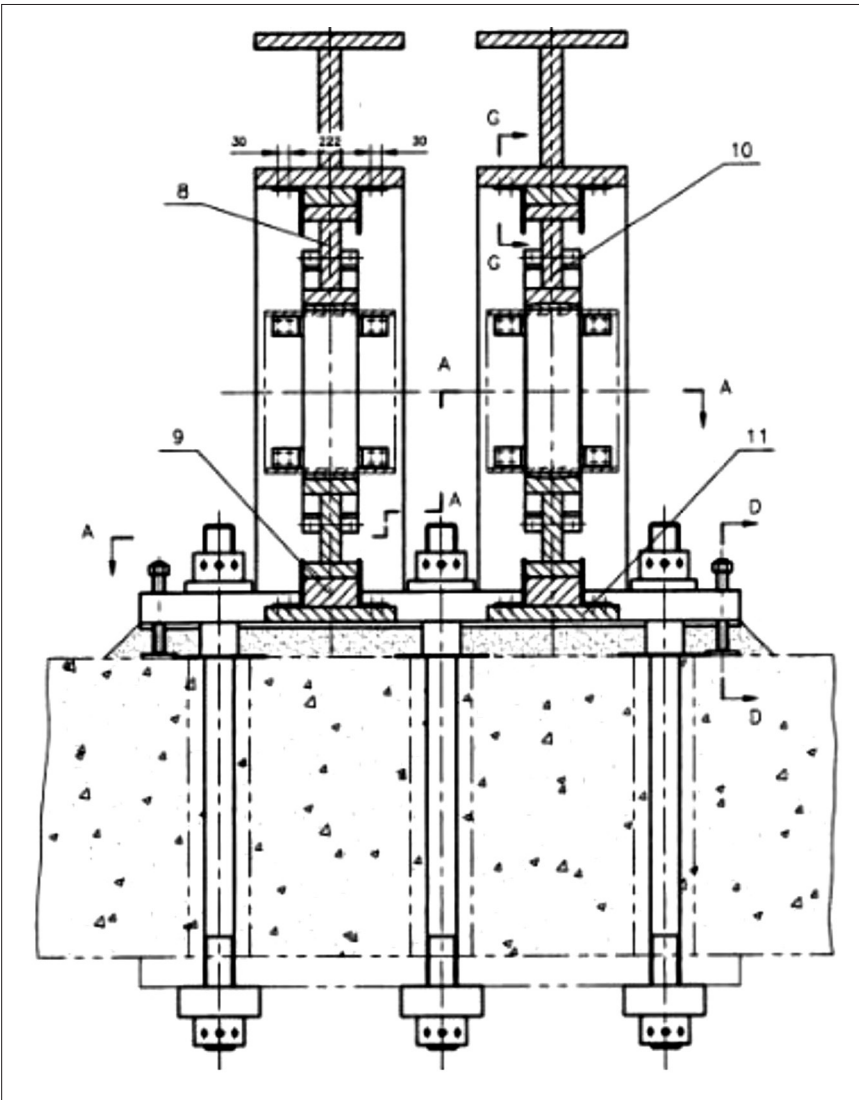


图 2 主给水管道横向限制件侧视图

表 1 螺栓信息

物资名称	螺栓数量 (套 / 台)	螺栓规格 /mm	单根螺栓 重量 /Kg	最终残余 拉伸力 /N
VVP 主蒸汽管道横向限制件 锚固螺栓	8	M80*6-6g*1710	67.5Kg	205×104
ARE 主给水管道横向限制件 锚固螺栓	6	M80*6-6g*1400	55Kg	170×104

限制件安装技术要求》中的锚固螺栓紧固要求完成新锚固螺栓的预紧；锚固螺栓更换按照“拆一根，装一根”的方式进行；横向限制件同一侧仅允许一根锚固螺栓处于施工状态，以防止锚固螺栓更换过程中主蒸汽 / 主给水管道发生位移。

为确保大修期间顺利完成锚固螺栓全部更换的目标，大修前两个月组织试拆，验证方案的可行性，以便及时发现问题并作出调整。

2.1.1 初次试拆

试拆对象为随机选取的三根 VVP 横向限制件锚固螺栓，分别编号 VVP-1，VVP-2，VVP-3。按照方案对

VVP-1 试拆：在油压升到 1388bar（拉伸力为 $226 \times 104\text{N}$ ）后，锚固螺栓正常拉伸变长，螺母已与结合面分离，但用拨杆无法转动螺母。检查螺纹副表面状况良好（无杂质、无油漆、螺纹完整），通过加强润滑，加长力臂等多种尝试无效后，判断锚固螺栓与螺母咬死。

2.1.2 再次试拆

尝试对 VVP-1，VVP-2，VVP-3 三根螺栓进一步预处理，创造螺栓拉伸最佳工作条件：(1) 螺纹表面清理；(2) 加强润滑；(3) 打磨底板，加工找平。

经过充分预处理后，再次尝试拆除 VVP-1：锚固螺栓拉伸后，螺母与底板有明显间隙（螺母此时不承受拉力），仍然无法转动螺母。VVP-2、VVP-3 状态同 VVP-1。

再次试拆没有达到预期，却意外发现 VVP-1 锚固螺栓楼板下方的垫片与楼板之间已有间隙，且螺母能够拆卸。基于 VVP-1 的“成功”经验，在再次拆除 VVP-3 的过程中，螺栓拉伸机与锚固螺栓咬死，拉伸机无法取下（拉伸机本体可以转动），试拆工作终止。

2.2 新方案的制定

2.2.1 初版方案分析

从试拆实践发现，拉伸拆除旧锚固螺栓的过程中阻碍重重，试拆的 3 根锚固螺栓无一顺利，或螺母与锚固螺栓咬死，或拉伸机与锚固螺栓咬死，需重新评估方案的可行性。

检查唯一“成功”拆下的 VVP-1 锚固螺栓，发现有如下几个特征：

(1) 螺栓与螺母的螺纹规格 M80*6 无误；

(2) 锚固螺栓实测长度 1716mm，螺栓发生塑性变形，伸长 6mm；

(3) 螺纹部分直径不均匀，最大差值 2mm；螺纹部分与螺杆主体明显不同心，最大不同心度 0.6mm（见图 3）。

由此可以说明，锚固螺栓存在明显的质量问题：

(1) 锚固螺栓的抗拉强度不符合要求，正常拉伸出现塑性变形。抗拉强度不足的影响不仅体现在螺栓塑性拉长，还体现在螺纹塑性变形会导致螺栓与螺母咬死。

(2) 锚固螺栓的螺纹加工精度差，螺纹段出现明显的粗细不均以及螺纹段与螺杆主体不同心。粗细不均会导致拉伸过程中螺纹受力不均，导致受力螺纹应力过度集中而损坏；不同心会导致螺纹段有弯曲变形的趋势，进一步加剧螺纹受力不均。

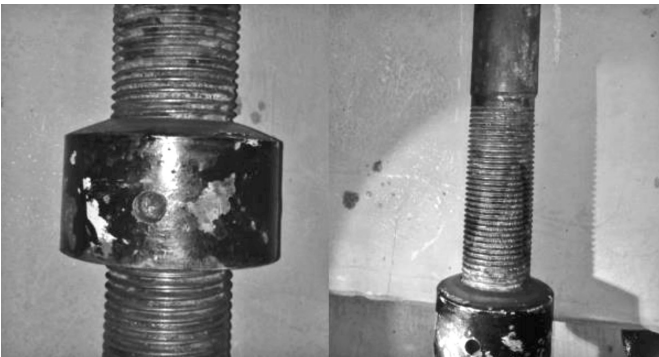


图 3 锚固螺栓螺纹直径不均，不同心

由此可以得出结论，VVP 主蒸汽管道横向限制件锚固螺栓不宜采用常规拉伸方法拆除。

2.2.2 新方案的制定

如上，已知 VVP 主管道横向限制件锚固螺栓存在较大质量问题；又知 ARE 主管道横向限制件锚固螺栓与 VVP 主管道横向限制件锚固螺栓为同一批次，因此可以判断 ARE 主管道横向限制件锚固螺栓也存在同样质量问题。考虑到对拉伸机的保护及大修施工工期需求两方面因素，对包含 VVP-3 在内的剩余 55 根（单机组 56 根）锚固螺栓采用破坏性拆除方法。

注：根据秦山核电紧固件专项工作组第 21 次会议纪要，针对秦二厂 3、4 号机组 ARE/VVP 系统紧固件更换工作中出现螺栓拉伸变形难以取出问题，同意采用破坏性拆除方案。

(1) 破坏性拆除方法

螺栓破坏性拆除主要有机械加工、EDM、MDM 三种方式，常规机械加工大尺寸（本处 M80）螺栓耗时很长，不符合工期需求；EDM、MDM 准备周期长，都难以满足

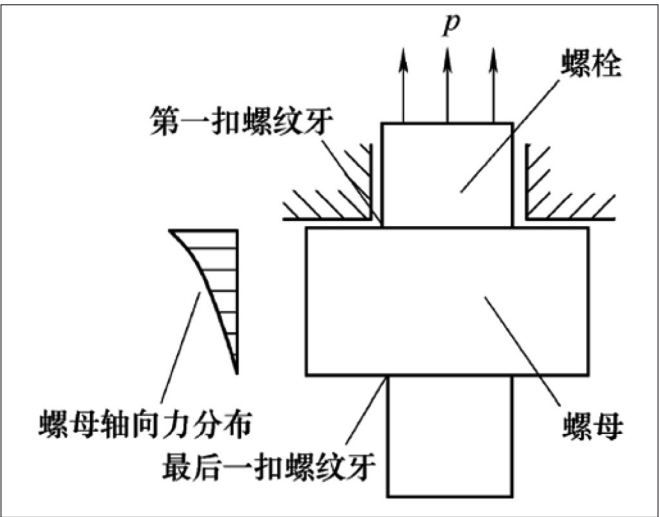


图 4 螺纹副承载示意图

工期需求。

除此之外，三种破拆方法都仅仅针对螺纹咬死的单一故障。而 VVP 主管道横向限制件锚固螺栓与 ARE 主管道横向限制件锚固螺栓处于受力带载状态，残余拉伸力分别为 $205 \times 104 \text{ N}$ 与 $170 \times 104 \text{ N}$ 。

采用 EDM、MDM 加工，电极靠近螺栓端面，放电加工到螺栓预紧力释放瞬间可能引起电极甚至设备的损坏。

(2) 螺栓载荷分析

分析螺栓载荷分布，螺纹牙间载荷第一扣处最大，且载荷主要集中在前几扣，前三扣载荷占总载荷的 60% ~ 70%；同时螺纹牙根部存在严重的应力集中，最大应力一般出现在第一扣螺纹牙根部（见图 4）。

(3) 破坏性拆除方法的确定

VVP 主管道横向限制件锚固螺栓与 ARE 主管道横向

表 2 风险分析

序号	风险类型	防范措施
1	使用专用工具导致的风险	作业前注意专用工具的有效期限，并检查专用工具完整性和可靠性。
2	高空作业人员坠落风险	高空作业前检查登高设施、工具牢固可靠，同时正确佩戴个人防护用品，系安全带，严禁倚靠护栏，工作人员精神状态需保持良好。
3	高空作业坠落物品风险	高空作业地点有可靠地平台，使用的工具等物品做好防坠落措施。注意使用工具时做好固定措施，铺设使用工具摆放布，工作前后轻点工器具，派专人监护实施。
4	高空作业攀爬风险	攀爬作业时手中禁止拿工具、物品，攀爬前检查攀爬设施要牢固，并按照规定。
5	液压工具作业风险	操作液压工具时，仔细检查油管接头，并在升压时尽量远离液压缸及接头部位。
6	使用电动工具触电风险	确保工具在检验期内，工作人员穿戴好个人防护用品，并铺设好场地。
7	螺纹咬死风险	安装前检查螺纹状况，并清理干净，对螺纹部分适量涂抹螺纹防咬剂。
8	拉伸过程中断裂风险	拉伸过程中禁止人员站立在拉伸机、螺栓上方，对螺栓拉伸机进行固定保护，防止螺栓断裂时造成人员伤害。
9	取芯钻钻偏风险	设计加工专用中心定位工具，对取芯钻提供对中支持
10	预紧力释放后螺栓从下方突然坠落风险	在螺栓下方设置专用的防坠落护板，用螺母分别固定在作业螺栓与临近螺栓端部，螺栓下坠后由防坠落护板支撑； 对于下部螺纹露出螺牙不足 3 牙的螺栓，在加装专用延长套后使用防坠落护板。
11	螺栓安装过程中起重风险	设计专用起重工具，保证安装过程中螺栓的安全就位。
12	拉伸机损坏风险	正确使用螺栓拉伸机，防止超压； 进行螺栓拉伸前，将地板打磨平整，防止拉伸机偏载造成损坏。

限制件锚固螺栓处于带载状态，螺栓残余拉伸力大。从螺栓副载荷分析可知，锚固螺栓螺纹破坏到最后几扣时，锚固螺栓的残余拉伸力超过剩余螺纹的承载能力使得螺纹断裂，拉伸力会突然释放。

综合考虑工期、成本、安全性多个方面，最终确定采用改进的机械加工的方式对锚固螺栓进行破坏性拆除，即用便携式磁力钻+取芯钻头的组合，对锚固螺栓进行破坏性拆除。

注：在正式确定此种方法之前，还尝试过将螺母劈开的方式破坏性拆除，在只剩下两半螺母时，锚固螺栓预紧力并没有得到释放，最终采用 $\phi 76$ 的取芯钻对螺纹直接实施破坏，预紧力释放瞬间出现断裂螺母蹦开情形，有安全风险。

3 项目实施

锚固螺栓更换主要由两部分组成：旧螺栓的破坏性拆除，以及新螺栓的安装。旧螺栓的破坏性拆除方案在 3.2.2 节已确定，新螺栓的安装技术要求见 3.1 节。

3.1 风险控制

对锚固螺栓破拆及新螺栓安装进行详细分解，逐一识别风险，制定防范措施见表 2。

3.2 实施与进度

锚固螺栓破坏性拆除方法是明确的，但实际实施过程中仍然有不少问题。初期没有经验，磁力钻经常卡死，钻头频繁损坏，最差的时候一天仅能顺利拆除一根螺栓，进度堪忧。为此增加一组破拆人员，三组拆除工作同步进行。

在不断的尝试改变优化钻削的速度、力度后，钻削破拆工艺逐渐成熟。螺栓预紧力释放瞬间作业人员的神经也不再紧绷，“嘭”的一声闷响，螺栓预紧力顺利释放（见图 5 预紧力释放瞬间螺纹崩裂），美其名曰“响炮”；钻着钻着，没有征兆突然间螺栓掉下去了，“哑炮”。

破拆工作的顺利开展保证了项目的如期完成。历时 10 天完成了 54 根螺栓的更换工作，最后一根水泥封死的螺栓也在 5 天后更换完成。

锚固螺栓更换用到了 3 台便携式磁力钻，100 个取芯钻头，2 台螺栓拉伸机，5 项新发明的专用工具，和 4 个单位近 20 名作业人员。

4 结语

秦二厂 4 号机组 56 根 VVP 主管道横向限制件锚固螺栓与 ARE 主管道横向限制件锚固螺栓更换工作几经曲折，方案多次修正，最终取得成功，有几点总结：

(1) 螺栓咬死现象在电厂经常发生，一方面，要尽可能采取措施避免咬死现象的发生；另一方面，对于咬死螺栓的拆除也有些成熟的方法。但对于带载螺栓的破坏性拆除，特别是预紧力大的大尺寸拉伸螺栓的破坏性拆除，本文提供新的思路。



图 5 破拆预紧力释放瞬间螺纹崩裂

(2) 安全是核电厂的生命线，重要设备的质保贯穿设计、制造、检验、安装、调试、生产运营各个环节。从 VVP 主管道横向限制件锚固螺栓与 ARE 主管道横向限制件锚固螺栓来看，从螺栓制造环节，检验环节，安装环节，监理环节均存在问题。

(3) 核电行业的健康发展，不仅需要核安全监督机构的有力监督，更依赖于各个核电机组的安全稳定运营。而核电机组安全运营，从根本上是要求核电从业者具有高度责任心，从制度上也需建立适当的问责机制。

参考文献：

- [1] 陈铁鸣, 王连明. 机械设计 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [2] 贝秋生. 载丝螺栓咬死原因分析和处理方案 [J]. 设备管理与维修, 2009,7:14-17
- [3] 陈海平. 螺纹副承载的分布规律 [J] 机械工程学报, 2010, 46 (9) : 171-177.
- [4] 周陵. 螺纹拧紧标准的思考 [J] 标准科学, 2011,1:27-29.
- [5] 刘金贵. 百万千瓦核电站主蒸汽超级管道横向限制件焊接缺陷分析 [J]. 机械制造文摘 - 焊接分册, 2016,2:36-37.
- [6] EJ335-88, 压水堆核电厂假想管道破裂事故防护准则 [S]. 北京: 中华人民共和国核工业部, 1988.
- [7] 孙嘉麟. 核电站主管道—限制件系统甩击过程的数值模拟与简化分析 [J]. 哈尔滨工业大学工学硕士学位论文, 2014, 1-3.