

反应堆压力容器主螺栓水压试验拉伸量 调整力学分析评价

陈涛^{1,2}, 聂照宇², 胡大芬², 徐晓²

(1. 核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 广东 深圳 518172; 2. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518172)

摘要: **目的** 针对某核电站反应堆压力容器主螺栓残余拉伸量与设计要求(1.63 ± 0.03) mm 有出入, 个别测试数据不在设计要求范围内的情况, 对出厂水压试验工况拉伸量验收值进行调整。**方法** 考虑上述拉伸量偏差对螺栓载荷的影响, 从应力、疲劳和密封角度展开系统分析, 对螺栓、螺纹、连接法兰及反应堆压力容器密封性能分别进行详细的力学评价。**结果** 根据评价结果, 对出厂水压试验工况拉伸量验收值进行两次调整, 最终确定为(1.68 ± 0.03) mm。**结论** 该机组反应堆压力容器出厂水压试验各项指标满足要求, 针对上述拉伸量调整的力学评价合理性得到有效验证。

关键词: 力学分析; 螺栓; 拉伸量; 水压试验; 核电站

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.002

中图分类号: TL351+.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0007-05

Study on the Adjustment of Reactor Pressure Vessel Main Bolt Residual Elongation during Individual Hydraulic Test

CHEN Tao^{1,2}, NIE Zhao-yu¹, HU Da-fen¹, XU Xiao¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, Shenzhen, 518172 China;

2. China Nuclear Power Design Company, Ltd, Shenzhen 518172, China)

ABSTRACT: Objective To adjust the acceptance value of residual elongation in the working condition of hydrostatic test to solve the problem that the values of residual elongation of reactor pressure vessel (RPV) main bolt during calibration experiment for individual hydraulic test condition are not consistent with the design requirement which is 1.63 ± 0.03 mm and some values are beyond the requirement range. **Methods** Considering the influence of the above difference on the bolt load, detailed analyses were carried out for the bolt, the bolt threads and connected flanges in the field of stress, fatigue and sealing of RPV. **Results** After two times of adjustment, new elongation values of 1.68 ± 0.03 mm were determined according to the analysis results. **Conclusion** Each testing index of the individual hydraulic test for the certain RPV satisfies the demand and the rationality of the numerical assessment is verified.

KEY WORDS: mechanics analysis; bolt; elongation; hydraulic test; nuclear power station

为便于运行期间的维修、换料等操作, 反应堆压力容器 (RPV) 采用分体结构, 顶盖法兰与容器法兰

间采用螺栓连接, 如图 1 所示^[1]。反应堆压力容器扣盖时, 由液压拉伸机对主螺栓分多次进行逐级拉伸,

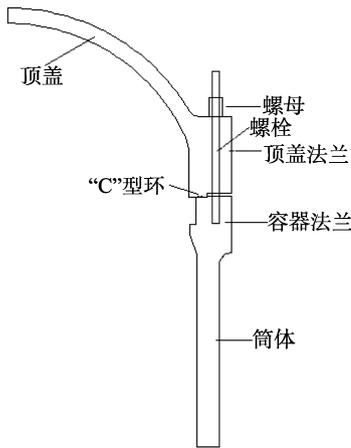


图1 反应堆压力容器螺栓连接

以一定的扭矩拧紧螺母后拉伸机卸压，最终螺栓获得一定的残余拉伸量及对应的拉伸载荷，从而实现主螺栓的预紧。拉伸机卸压后，顶盖法兰受压，螺栓拉伸量也随之减小，螺栓的残余拉伸量主要由螺栓刚度和

法兰刚度的相对关系确定^[2]，如图2所示。因此拉伸机拉伸时对应的螺栓最大拉伸量与拉伸机卸载后螺栓的残余拉伸量之间存在非线性关系。

正常设计流程下，先由设计方按线性刚度理论给出螺栓残余拉伸量的验收标准值^[3-5]，在工程上第一次预紧操作即出厂水压试验前再由制造厂进行拉伸量标定试验，进行双重验证，以确保主螺栓能够获得合适的残余预紧载荷。某核电站某机组主螺栓（M155 mm×4）拉伸标定试验后发现，个别螺栓残余拉伸量不满足上述设计要求，与验收标准值间的最大负偏差为 0.7 mm。如果仍按设计验收值进行操作，会导致个别螺栓预紧载荷偏小，对 RPV 密封性产生不利影响。因此，需要根据标定试验结果对拉伸量验收值进行调整，使存在偏差的螺栓载荷向设计值逼近。同时考虑上述拉伸量的变化对所有（包括不存在偏差）螺栓的影响，对相关部件开展力学分析评价。

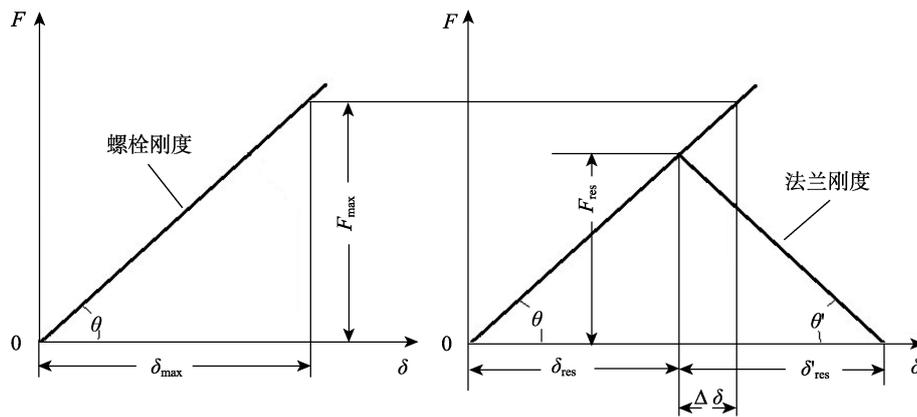


图2 预紧期间螺栓拉伸量调节

1 螺栓拉伸量及螺栓载荷

1.1 标定试验结果

螺栓标定试验通常抽取 1~2 根螺栓，在液压拉伸机输出的各级油压下执行螺栓的拉伸和卸载操作，并给出拉伸机卸压前、后螺栓的伸长量和应变。伸长量

通过拉伸测量杆测量，应变通过应变片测量。工程上将螺栓残余拉伸量作为验收指标的方式便于操作，但由于螺栓最大拉伸量与残余拉伸量之间非线性关系的存在，往往导致实际标定值与理论计算值之间存在偏差。

某核电站主螺栓标定试验结果见表 1，螺栓整体处于弹性变形阶段，拉伸载荷采用公式“应变×螺栓弹

表 1 螺栓标定试验及拉伸载荷计算结果

	螺栓拉伸机输出 油压/MPa	螺栓最大拉伸 量/mm	螺栓最大 应变	螺栓最大拉伸载荷 /(×10 ⁶ N)	螺栓残余拉伸 量/mm	螺栓残余 应变	螺栓残余拉伸载 荷/(×10 ⁶ N)
1#螺栓（不 存在偏差）	130	3.81	1.906	6.6	1.61	1.533	5.3
	插值	—	—	6.9	1.64	—	5.5
	插值	—	—	7.3	1.71	—	5.8
2#螺栓（存 在偏差）	140	4.10	2.157	7.5	1.73	1.685	5.9
	130	3.82	1.822	6.4	1.60	1.505	5.3
	插值	—	—	6.7	1.65	—	5.4
插值	—	—	—	—	1.67	—	5.5
	140	4.12	2.078	7.2	1.73	1.628	5.7

性模量×螺栓截面积”计算得到。水压试验工况残余拉伸载荷设计值为 5.5×10^6 N，在表 1 中通过线性插值得得，对应的标定螺栓残余拉伸量最大值为 1.67 mm，最小值为 1.64 mm，而残余拉伸量验收值为 (1.63 ± 0.03) mm，因此 2#螺栓拉伸量超出了设计验收范围。

1.2 拉伸量调整理论计算

为了保证所有螺栓拉伸量在设计范围内，初步确定残余拉伸量验收值调整为 (1.70 ± 0.03) mm，对应拉伸量下限为 1.67 mm，则 2#螺栓拉伸量满足设计要求。同时，拉伸量调整将对不存在偏差螺栓的载荷产生直接影响。1#螺栓残余预紧载荷较设计值增大，对 RPV 密封的影响虽已去除，但是对螺栓、螺纹及连接件应力及疲劳将产生不利影响，需综合考虑上述螺栓载荷变化开展力学分析评价。

2 力学分析及评价

由于上述偏差产生在设备制造过程中，文中部分分析数据是基于设计阶段已完成的计算获得的^[6]，此方法比重新开展疲劳计算节约大量人力物力，可为设备制造赢得宝贵时间。

2.1 螺纹疲劳分析

螺栓预紧后，运行期间反应堆压力容器承受内部冷却剂的温度、压力载荷作用，螺栓载荷将在初始预紧载荷上下浮动（如图 3 所示），从而使螺纹在交变载荷作用下产生疲劳。由于拉伸量调整仅涉及螺栓初始预紧载荷（图 3A 点）的变化，即应力幅值 H 可认为不变。因此，从以下两个角度对螺栓螺纹进行疲劳评价。

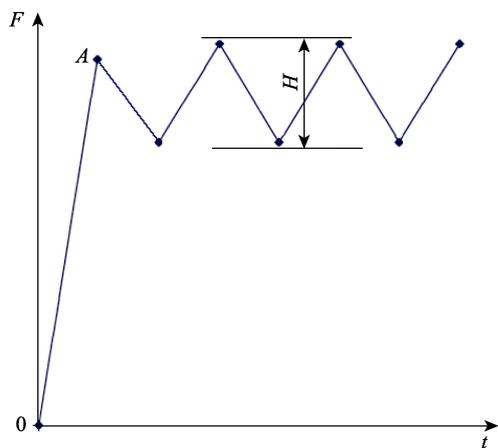


图 3 预紧及运行期间螺栓拉伸载荷随时间变化

2.1.1 比例算法

通过对比原始设计与拉伸量调整后螺栓预紧过程导致螺纹部位的载荷变化，按比例计算出调整后的

疲劳使用系数。设计情况下，1#螺栓出厂水压试验工况最大拉伸载荷为 6.6×10^6 N，拉伸量调整为 (1.70 ± 0.03) mm。从表 1 可知，最大拉伸载荷为 7.5×10^6 N，变化率最大达 13.6%，则调整后的螺纹疲劳使用系数可表达为：

$$U' = (U - A) + A \times (1 + K)^n$$

式中： U 为设计阶段疲劳累积使用系数， $U=0.901$ ； A 为设计阶段螺栓拉伸过程产生的螺纹疲劳使用系数， $A=0.407$ ； K 为拉伸载荷变化率， $K=13.6\%$ ； n 为疲劳使用系数与应力幅值间的比例系数，保守取 3^[7]； U' 为调整后的疲劳累积使用系数， $U'=1.091$ ，不满足规范要求^[8]。

2.1.2 拉伸量调整的影响

由于比例算法相对保守，采用更详细的计算方式：计算螺栓拉伸量调整后螺栓预紧过程实际产生的疲劳使用系数，再考虑其变化率，从而可评估拉伸量调整对螺纹疲劳使用系数的影响程度。

预紧期间拉伸载荷在螺杆截面产生的应力幅为：

$$S_{alt} = 1/2 \times S_p = 1/2 \times (F_{max}/A_\sigma)$$

式中： S_{alt} 为最大应力幅； S_p 为最大总应力； F_{max} 为螺栓最大拉伸载荷， $F_{max}=7.5 \times 10^6$ N； A_σ 为螺杆截面积。

对应上述应力幅下的允许循环次数可以从规范提供的疲劳曲线^[7]中插值得到，疲劳强度减弱系数取 4^[7]。可得，拉伸量调整后产生的疲劳使用系数 $A'=0.508$ 。再叠加考虑运行工况温度、压力载荷产生的疲劳使用系数，螺纹疲劳累积使用系数为：

$$U' = U + (A' - A) = 1.002$$

由此可见，该方法的计算结果仍不满足规范要求^[8]。

若将拉伸量验收值调整为 (1.70 ± 0.03) mm，螺纹疲劳性能无法满足规范要求，因此，需要适当降低螺栓初始预紧载荷。建议将拉伸量验收值重新调整为 (1.68 ± 0.03) mm，即拉伸量验收范围为 1.65~1.71 mm。根据表 1 插值得到 1#螺栓最大拉伸载荷为 7.3×10^6 N，按照第二种方法再次进行评价，螺纹总的疲劳使用系数为 0.986，满足规范要求^[8]。

拉伸量第二次调整后，1#螺栓残余拉伸载荷较设计值普遍增大，2#螺栓取拉伸量下限 1.65 mm 时，残余拉伸载荷较设计值偏小。因此，此次调整对螺栓、螺纹、连接件应力和疲劳以及 RPV 密封性均可能产生不利影响，需再次考虑上述拉伸量变化对所有螺栓载荷的影响，从而对相关部件开展力学分析评价。下面的分析均针对拉伸量第二次调整结果 (1.68 ± 0.03) mm 展开。

2.2 螺纹剪应力分析

螺栓螺纹平均剪应力保守取螺栓拉伸载荷的上线值计算：

$$\tau = F_{\max}/A_{\tau}$$

式中： F_{\max} 为水压试验工况下螺栓的最大拉伸载荷，考虑 1#螺栓残余拉伸载荷最大值 5.8×10^6 N，并施加水压试验工况内压载荷； A_{τ} 为螺纹剪切面积。可得 $\tau = 139.2 \text{ MPa} < 0.6S_m = 144 \text{ MPa}$ ，满足规范要求^[8]。

2.3 螺栓截面应力分析

螺栓截面应力同样取螺栓拉伸载荷的上限值计算。

平均应力评价：

$$\sigma_{\text{mean}} = F_{\max}/A_{\sigma}$$

可得 $\sigma_{\text{mean}} = 379.4 \text{ MPa} < 2S_m = 480 \text{ MPa}$ ，满足规范要求^[8]。

最大应力评价：

$$\sigma_{\max} = \sigma_S + \sigma_M$$

式中： σ_S 为螺栓截面薄膜应力； σ_M 为螺栓截面外圆周上的最大弯曲应力，位于螺栓与 RPV 中轴线所在平面的内侧。可得 $\sigma_{\max} = 496.5 \text{ MPa} < 3S_m = 720 \text{ MPa}$ ，满足规范要求^[8]。

2.4 法兰应力分析

法兰应力的评价内容包括^[8]：总体一次薄膜应力强度 $P_m < S_m$ ；局部一次薄膜应力强度 $P_1 < 1.5S_m$ ；总体一次薄膜+弯曲应力强度 $(P_m + P_b) < 1.5S_m$ 。

对于被连接的顶盖法兰和容器法兰，保守取螺栓拉伸载荷的上限值计算其应力。螺栓残余拉伸载荷设计值为 5.5×10^6 N，拉伸量调整后，1#螺栓残余拉伸载荷最大值为 5.8×10^6 N，变化率为 5.5%。顶盖法兰和容器法兰水压试验工况下原始最小裕量为 20%（来自设计阶段报告），保守地将顶盖法兰和容器法兰应力按线性比例放大，拉伸量调整后仍满足规范要求^[8]。

表 3 拉伸量调整后主要力学评价结果

	螺纹疲劳	螺纹剪切/MPa	螺杆平均应力/MPa	螺杆最大应力/MPa	顶盖法兰应力/MPa	容器法兰应力/MPa	RPV 密封
计算值	0.986	139.2	379.4	496.5	—	—	—
限值	1.000	144.0	480.0	720.0	—	—	—
裕量/%	1.4	3.3	20.9	31.0	> 14.5	> 14.5	> 50

注：裕量 = 1 - (计算值/限值) × 100%

4 结论

文中考虑螺栓拉伸量设计值与试验标定值的偏差，通过数值分析手段对水压试验工况下的拉伸量验收值进行调整。该反应堆压力容器已完成出厂水压试验，各项试验指标正常，试验期间未发生拉伸量或拉伸载荷异常情况。事实证明，文中拉伸量调整及对应的力学分析评价方案合理，论证准确，可以为工程中类似问题的解决提供借鉴。后续将进一步根据标定试验结果对拉伸量理论计算公式进行修正，从

2.5 RPV 密封分析

对于 RPV 密封性能，保守取残余拉伸载荷最小值进行分析。螺栓残余拉伸载荷设计值为 5.5×10^6 N，拉伸量调整后，2#螺栓残余拉伸载荷最小值为 5.4×10^6 N，变化率为 -1.8%。由于密封面局部结构特性、密封环压缩-回弹属性、法兰密封面接触单元等非线性因素的影响，密封分析的结论无法线性推导。修改螺栓残余预紧载荷，并考虑水压试验压力重新开展密封分析^[9]，可得上、下法兰分离量的裕量仍在 50% 以上，满足设计要求。

3 拉伸量调整目标值

基于上述分析评价，调整前后螺栓拉伸量、拉伸载荷及其变化率见表 2，力学评价结果见表 3。从应力、疲劳和密封角度综合考虑，既保证螺栓及连接法兰应力和疲劳分析裕量，又保证水压试验期间的 RPV 密封性能，经过两轮调整，残余拉伸量验收值最终确定为 $(1.68 \pm 0.03) \text{ mm}$ 。

表 2 调整前后螺栓拉伸量及拉伸载荷变化统计

	拉伸量/mm	拉伸载荷/($\times 10^6$ N)	载荷变化率/%
设计值	1.63±0.03	F_{\max} : 6.6	F_{\max} : 1.5~10.6
		F_{res} : 5.5	
调整值	1.68±0.03	F_{\max} : 6.7~7.3	F_{res} : -1.8~5.5
		F_{res} : 5.4~5.8	

注： F_{\max} 为螺栓最大拉伸载荷， F_{res} 为螺栓残余拉伸载荷

而减小螺栓拉伸量标定值与设计值之间的偏差，降低制造过程中拉伸量调整对设备安装及分析评价带来的多重影响。

文中不足在于未考虑残余拉伸量存在正、负偏差的螺栓间隔布置情况及安装过程中各螺栓之间的载荷调整作用^[10]。

参考文献：

- [1] 广东核电培训中心. 900MW 压水堆核电站系统与设备

- [M]. 北京: 原子能出版社, 2007.
- [2] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] ASME, Boiler & Pressure Vessel Code[S].
- [4] 李文霏. 螺栓绝对拉伸量与残余拉伸量的函数关系式研究[J]. 机电信息, 2016(36): 164-165.
- [5] 汤臣杭, 何劲松, 余平, 等. 基于金属与金属接触的蒸汽发生器螺栓预紧载荷研究[J]. 压力容器, 2014(6): 23-27.
- [6] 陈涛, 刘攀, 徐晓. 应堆压力容器主螺栓螺纹疲劳分析方法[J]. 压力容器, 2018, NO.2: 24-28.
- [7] RCC-M Edition 2007 Section I, Subsection Z I, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands[S].
- [8] RCC-M Edition 2007 Section I, Subsection B 3200, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands[S].
- [9] 熊光明, 邓小云, 段远刚, 等. CPR1000 反应堆压力容器密封性能模拟技术研究[J]. 核技术, 2013(4): 29-33.
- [10] 秦晓光. 压力容器冷态试验主螺栓拉伸及调整[J]. 工业技术, 2017(11): 141-143.