

文章编号: 0258-0926(2016)S1-0006-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0006

核电厂反应堆容器主螺栓-螺孔 配合间隙分析与控制

胡运峰, 苟渊, 李峰培, 江杰全, 牟华明, 张宏祥, 白凯

中国核动力研究设计院成都海光核电技术服务有限公司, 成都, 610041

摘要: 反应堆压力容器主螺栓旋入过程中, 主螺栓与主螺孔的配合间隙不但与主螺栓的旋入转速值和相对主螺孔的对中精度有密切的关系, 而且关系到主螺栓卡涩后能否被有效取出及主螺孔表面是否被破坏。通过对螺纹副配合间隙与相关因素的定量分析, 给出了主螺栓旋入时的转速选择和对中要求的具体数值。为了获得稳定的、理想的螺纹副配合间隙, 不但应从螺纹副制造端加以控制, 还须在装配阶段进行配对优化。

关键词: 配合间隙; 旋入转速; 对中性; 精度控制; 优化措施

中图分类号: TL941 文献标志码: A

Analysis and Control of Fit Clearance between Main Bolt and Its Hole in Nuclear Reactor Pressure Vessel

Hu Yunfeng, Gou Yuan, Li Fengpei, Jiang Jiequan,
Mu Huaming, Zhang Hongxiang, Bai Kai

Chengdu Haiguang Nuclear Power Technology Service Co. Ltd, NPIC, Chengdu, 610041, China

Abstract: When the main-bolt screws into the reactor pressure vessel, the fit clearance of the main-bolt and its hole is related not only to the speed value of the bolts and the alignment accuracy, but also the effective removing of the main-bolt and the damage of the hole surface. The selection of the main-bolt's spinning-speed and the specific values of centering requirements are given by the quantitative analysis of the thread fit clearance. In order to obtain a stable ideal thread pair fit clearance, we should control the manufacturing of the thread and optimize the assembly process.

Key words: Fit clearance, Screwing speed, Centering, Precision Control, Optimization measures

0 前言

核电厂反应堆压力容器主螺栓的旋入是电厂换料大修过程中的关键路径。在实际工程案例中, 依靠经验选取旋入参数(如转速、驱动转矩)导致主螺栓卡涩的事件时有发生, 造成电厂工期延误。因此, 各电厂对主螺栓安装工艺技术愈加重视。

粗糙度、鳞状波纹、磕碰、螺牙尖楞、毛刺和翻边, 以及螺牙变形、撕裂、磷化层薄膜是否脱落等, 在装入主螺栓之前进行的螺纹表面质量检查中很容易发现、修复和解决; 而由于主螺栓、

主螺孔制造精度不够, 螺纹副配合间隙不合理, 主螺栓旋入速度、扭矩及平衡力等参数的选择不当是造成主螺栓卡涩事件的一大主要原因。为了有效避免反应堆主螺栓发生卡涩, 有必要从相关主螺栓的旋入工艺技术方面来深入分析造成主螺栓卡涩的问题, 以便制定出相应的改进措施, 进一步完善现有的主螺栓旋入技术。

1 主螺栓旋入工艺技术分析

与主螺栓旋入紧密相关的工艺参数有: 螺纹

收稿日期: 2015-09-19; 修回日期: 2016-03-11

作者简介: 胡运峰(1963—), 男, 高级工程师, 现从事核电检修技术开发工作

副配合间隙、旋转速度、驱动扭矩，以及平衡主螺栓力量大小和起始安装时螺栓螺孔的对中性要求。

1.1 螺纹副配合间隙与主螺栓卡涩的相关性分析

主螺栓在旋入时如果发生卡涩，则会产生卡涩扭矩(M)； M 的大小决定主螺栓能否被顺利取出及是否受到破坏。某核电厂发生的一次主螺栓卡涩事件表明，主螺栓与主螺孔的配合间隙(δ)偏小是造成主螺栓卡涩的主要原因。主螺栓旋入转速 n 为：

$$n^2 = \delta M / K \quad (1)$$

$$K = \pi m p (R_1^2 - R_2^2) / 3600$$

式中， m 为主螺栓质量； p 为螺距； R_1 为外径； R_2 为内径； K 为主螺栓固有的带量纲的特性系数，与 m 、 p 、 R_1 、 R_2 有关。

以三门核电厂为例， K 为0.125，根据式(1)计算得到的 n 和 M 表明，为了防止主螺栓意外卡涩后造成螺孔损坏，当 δ 为0.6~0.7 mm时，主螺栓的旋入速度不宜超过25 r/min。由此可见，若要完全实现对主螺孔的保护，除了限制主螺栓的驱动扭矩外，还须调整和约束不同配合间隙下的主螺栓旋入速度。为保护主螺孔不在主螺栓意外卡涩时损坏，且提高装配效率， δ 应控制在0.6~0.8 mm。

1.2 螺纹副配合间隙与对中性分析

主螺栓安装过程中，需要与主螺孔具有良好的对中性。当对中误差 B 引发主螺栓螺纹外沿和主螺孔螺纹表面发生干涉时，主螺栓允许最大 B 为：

$$B = L \delta_a \tan(\alpha/2) / d_1 \quad (2)$$

式中， d_1 为主螺栓螺纹大径； δ_a 为主螺栓已进入主螺孔后，螺纹中径与主螺孔中径在径向上的平均配合间隙； L 主螺栓长度； α 为螺纹牙型角。三门核电厂的主螺栓最大 B 为5.21 δ 。

对不同的 δ_a 计算 B 可知，要保证主螺栓能够顺利旋入主螺孔，对中误差力求尽量偏小，螺纹副配合间隙力求合理偏大。当合理间隙为0.6 mm时，则主螺栓偏离主螺孔的最大允许误差为3.12 mm。

如果 B 与 δ_a 不满足式(2)的关系，则主螺栓旋入时，其螺纹外侧和螺孔表面发生严重摩擦，

螺纹副表面会产生划伤、沟痕和粗糙度增加。随着主螺栓旋入深度的增加，摩擦、划伤愈加严重，若旋入设备无法自适应对中，就很容易引发主螺栓卡涩。这是整体式螺栓拉伸机更易引发主螺栓卡涩的可能原因之一（整体式螺栓拉伸机中的旋入装置的固定更加牢固）。

2 三门核电厂主螺纹副配合间隙的控制与优化措施

为了获得较佳的工作效率，应将配合间隙控制在0.6~0.7 mm，因此应首先从主螺栓、主螺孔的制造端加强控制。本文以三门核电厂中有关主螺栓、主螺孔的设计值、实际值为例进行计算分析。

2.1 主螺栓-螺孔配合间隙分布

主螺栓、主螺孔的制造精度通常符合正态分布。非能动百万千瓦级压水堆(AP1000)核电厂主螺栓的中径设计值为173.253~173.579 mm，主螺孔的中径设计值为173.675~174.097 mm；计算得出主螺栓、主螺孔的最大配合间隙为0.844 mm，最小配合间隙为0.096 mm。如果对制造精度符合正态分布的主螺栓与主螺孔仅做随机装配，则15.7%的配合间隙值分布在0.096~0.346 mm。某电厂卡涩事件中出现了14个主螺孔的中径值超出设计要求，超出比例达到24.1%，这表明主螺孔在制造过程中的质量过程控制能力严重不足。

2.2 螺纹副配合尺寸的控制与优化

要获得理想的螺纹副配合间隙，首先应加强主螺栓与主螺孔生产过程中的质量控制。制造厂商通常只要将质量控制能力指数维持在1.33以上，就能满足主螺栓、主螺孔的制造精度，达到设计要求，且不会加大生产控制成本。而核安全级设备中的反应堆容器上的主螺孔、主螺栓的制造应进一步提高其制造等级和质量控制。

2.3 主螺栓螺母质量控制与优化

三门核电厂47根主螺栓（其中2根备用）中径均值为173.357 mm，标准差为0.032。为了和主螺孔有最大的合理可控的配合间隙，将主螺栓中径均值相对于规格均值减小了0.07 mm，同时把中径值的离散量控制在非常狭小的区域内，其质量过程控制能力指数达到了3。

由于三门核电厂目前还没有反应堆容器主螺孔相关的具体尺寸,但与主螺栓配合的主螺母在尺寸控制方面具有同样的原理。主螺母中径均值为 174.011 mm,相对规格限均值增大了 0.12 mm,标准差为 0.0133,总体离散量控制在 0.08 的区域内,其质量过程控制能力指数达到了 5.28。

经过对螺纹副制造阶段的优化控制,其随机配合间隙不但完全满足设计要求,且将间隙区间控制在 0.52 ~ 0.8 mm 内,较设计间隙区间 (0.096 ~ 0.844 mm) 收窄了 0.468 mm 的带宽,并使间隙均值增大了 0.19 mm。

2.4 主螺栓装配前螺纹副配合间隙的进一步优化

为了进一步获得稳定可靠的螺纹副配合间隙,为主螺栓旋入过程提供良好保证,还应对螺纹副进行优选组对配合,即分别将主螺孔、主螺栓的实测中径值从大到小依次排列,再按排列名次相同的进行组对装配,将会获得更加稳定的配合间隙。

通过优化配对,螺栓、螺母的配合间隙控制在 0.62~0.69 mm,与随机配合间隙的对比可以看出,经过配对的优化后,配合间隙的分布带宽仅是随机配合间隙 (0.52~0.8 mm) 的分布带宽的 0.25,因此将主螺栓与主螺孔中径值排序并配对优化是稳定其配合间隙的必要方法。

3 结 论

反应堆压力容器主螺栓旋入工艺涉及的因素较多,主螺栓与主螺孔合理的配合间隙应视为其首要因素,不但应从主螺栓、主螺孔的制造源头进行最优控制,且在装入前应进行配对优化,以获得更加科学、稳定的螺纹副配合间隙。其次,从保护主螺孔的角度出发,还应合理选择主螺栓的旋入速度。再者,应该选择更加先进的旋入设备,提高主螺栓的对中性能。

(责任编辑:王中强)