

文章编号：0258-0926(2014)03-0042-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.03.0042

压紧弹簧两点接触下的吊篮法兰 LOCA 工况应力分析

方 健, 段远刚, 冉小兵, 戴长年

深圳中广核工程设计有限公司, 广东, 深圳, 518124

摘要：对欧洲三代压水堆（EPR）吊篮法兰在两相失水事故（LOCA）瞬态下压紧弹簧“两点接触”状态下的载荷计算方法和 EPR 堆内构件吊篮法兰在 LOCA 工况下的受载特点进行分析。采用 SYSTUS 程序建模计算两相 LOCA 时吊篮法兰与压紧弹簧“两点接触”时的应力水平，通过与 LOCA 动态响应等效换算获得 LOCA 工况下的应力响应，并根据压水堆核岛机械设备设计和建造规范（RCC-M）的具体要求进行吊篮法兰应力评定。

关键词：吊篮法兰；压紧弹簧；两相 LOCA；两点接触

中图分类号：TL35 **文献标志码：**A

0 前 言

吊篮法兰位于反应堆压力容器（RPV）支承凸台、压紧弹簧、上部堆内构件法兰和 RPV 顶盖法兰之间（图 1），通过压紧弹簧保持堆内构件的竖直稳定性。当发生反应堆冷却剂失水事故（LOCA）时，在初始阶段，RPV 内压力急剧下降，冷却剂在 RPV 顶部将瞬时出现局部两相状态。在欧洲三代压水堆（EPR）中将这一现象称为两相 LOCA 瞬态。

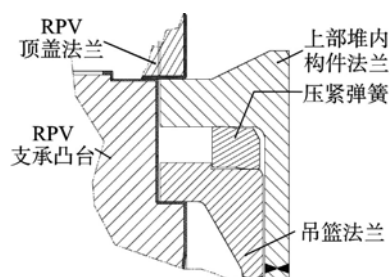


图 1 吊篮法兰结构示意图

Fig. 1 Structure of Core Barrel Flange

对吊篮法兰进行 LOCA 工况下的应力分析时，一般认为压紧弹簧处于正常接触状态，即与吊篮法兰“单点接触”（整体圆周方向上为线接触），直接施加 LOCA 工况下的载荷（力、弯矩或位移响应）。事实上，LOCA 事故工况下，压紧

弹簧可能已经被完全压缩，压紧弹簧与吊篮法兰的接触模式已由“单点接触”变成了“两点接触”（整体圆周方向上为两处线接触）。

本文通过分析 EPR 堆内构件吊篮法兰事故工况下的受载特点，研究两相 LOCA 瞬态时压紧弹簧载荷计算方法并分析吊篮法兰的应力状态。根据反应堆在 LOCA 下的结构动态响应分析结果，采用 LOCA 动力学响应与两相 LOCA 瞬态下的吊篮法兰响应进行等效换算的方法，计算 LOCA 事故工况时吊篮法兰与压紧弹簧“两点接触”状态下的应力水平。并采用 SYSTUS 程序进行 LOCA 事故工况下吊篮法兰的应力分析。

1 两相 LOCA 瞬态下压紧弹簧载荷分析

两相 LOCA 瞬态时，在上部堆内构件法兰上、下表面产生较大压差 ΔP 。该压差通过压紧弹簧传递给吊篮法兰。

两相 LOCA 在上部堆内构件产生的载荷为：

$$F_p = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \Delta P \quad (1)$$

式中， D 为上部堆内构件法兰直径。

该载荷全部作用在压紧弹簧上，保守考虑为线载荷，线载荷为：

$$T = \frac{F_p}{2\pi R_t} \quad (2)$$

式中, R_t 为上部堆内构件法兰与压紧弹簧顶部接触点的半径。

两相 LOCA 时, 吊篮法兰上的压紧弹簧载荷情况如图 2 所示。

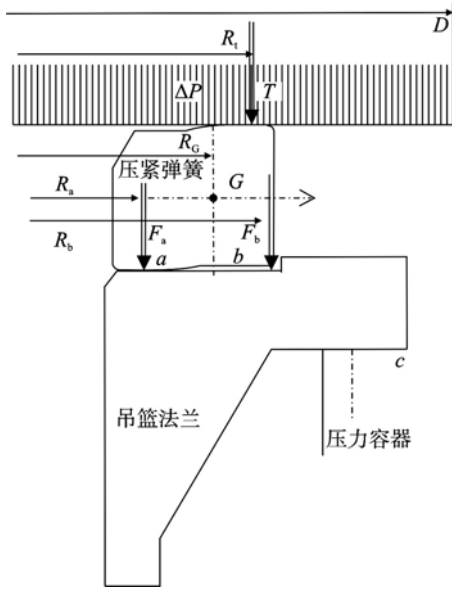


图 2 吊篮法兰两相 LOCA 下压紧弹簧载荷示意图
Fig. 2 Loads Applied by Hold down Spring under Two Phase LOCA

发生两相 LOCA 时, 由于压差 ΔP 较大, 压紧弹簧被完全压缩, 压紧弹簧与吊篮法兰接触位置会出现“两点接触”, 如图 2 中 a 和 b 两处。此时, 在吊篮法兰顶部产生载荷 F_a 和 F_b , 保守考虑为线载荷。竖直方向力载荷平衡方程如下:

$$2\pi R_a F_a + 2\pi R_b F_b = 2\pi R_t T \quad (3)$$

式中, R_a 、 R_b 为接触点 a 、 b 两处的半径。

力矩平衡方程如下:

$$\begin{aligned} & 2\pi R_a F_a (R_a - R_G) + 2\pi R_b F_b (R_b - R_G) \\ & = 2\pi R_t T (R_t - R_G) + M_{lim} \cdot 2\pi R_G \end{aligned} \quad (4)$$

式中, G 点为压紧弹簧质心; R_G 为压紧弹簧质心半径; M_{lim} 为压紧弹簧最大回弹力矩。

在 a 处接触前 ($F_b=0$) 瞬间, 此时 a 处的载荷最大为 $F_{lim,a}$:

$$\begin{aligned} & 2\pi R_a F_{lim,a} (R_a - R_G) \\ & = 2\pi R_t T (R_t - R_G) + M_{lim} \cdot 2\pi R_G \end{aligned} \quad (5)$$

根据压紧弹簧刚度关系式, 有:

$$F_{lim,a} = \frac{Kh}{2\pi R_a} \quad (6)$$

式中, K 为压紧弹簧刚度; h 为 b 处接触前压紧弹簧的压缩量。可求得:

$$M_{lim} = \frac{R_a (R_a - R_t)}{R_G} F_{lim,a} \quad (7)$$

最后可求得:

$$F_a = \frac{R_G}{R_a (R_a - R_b)} M_{lim} - \frac{R_t (R_b - R_t)}{R_a (R_a - R_b)} T \quad (8)$$

同时可求得 F_b 值。

2 两相 LOCA 瞬态下吊篮法兰应力分析

2.1 计算模型

基于 SYSTUS 软件, 建立 1/4 三维有限元模型进行分析:

(1) 考虑端部效应, 模型中含部分吊篮筒体。

(2) 考虑出口管嘴接触载荷对吊篮法兰的影响, 模型中包含了出口管嘴。

2.2 载荷及边界条件

保守地考虑, 两相 LOCA 时, 假定吊篮法兰和压力容器支承凸台之间的约束为: 对沿着法兰圆周位于实际接触区域中间位置 c 处 (图 2) 竖直方向进行约束。

分析两相 LOCA 载荷下的应力时, 除考虑压紧弹簧载荷外, 还需考虑静态机械载荷的影响。吊篮法兰主要承受以下载荷: ①两相 LOCA 引起的压紧弹簧对吊篮法兰的载荷; ②下支承板及相连部件重量; ③吊篮及反射层重量; ④作用在下支承板上的水力载荷; ⑤作用在吊篮和反射层上的水力载荷; ⑥燃料组件作用在下支承板上的载荷; ⑦出口管嘴接触载荷。

2.3 分析结果

两相 LOCA 下, 吊篮法兰应力分布见图 3。

两相 LOCA 下, 应力最大处位于吊篮法兰与筒体焊缝位置。吊篮法兰应力路径 4 和路径 1 (图

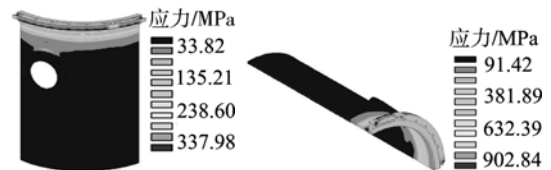


图 3 吊篮法兰两相 LOCA 下应力分布
Fig. 3 Stress Layout of Core Barrel Flange under Two Phase LOCA

4), 2个位置的一次薄膜应力 P_m 及一次薄膜应力加弯曲应力 P_m+P_b 如表1所示。

两相 LOCA 下, 吊篮法兰竖直方向最大变形为 1.68 mm。

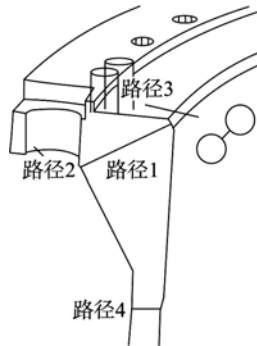


图4 吊篮法兰应力路径位置示意图

Fig. 4 Stress Paths of Core Barrel Flange

表1 两相 LOCA 下吊篮法兰应力水平

Table 1 Stresses of Core Barrel Flange under Two Phase LOCA

位置	P_m /MPa	P_m+P_b /MPa
路径1	13.86	74.49
路径4	69.32	185.2

3 LOCA 工况下吊篮法兰应力分析

EPR LOCA 工况主要考虑安注管破口、波动管破口和余热排出管 (RHR) 破口。根据反应堆动力学吊篮法兰的动态响应分析结果, 吊篮法兰竖直方向最大位移为 0.77 mm。

采用 LOCA 动力学响应与两相 LOCA 下的吊篮法兰响应进行等效换算方法, 即吊篮法兰 LOCA 下应力水平为两相 LOCA 时的 $0.458=0.77/1.68$ 倍, 根据表1可得 LOCA 下吊篮法兰的应力水平, 见表2。

根据 RCC-M D 级应力评价准则^[1], 将 LOCA 工况下的应力水平与地震及静态机械载荷应力进

行组合叠加, 结果见表3。

分析结果表明, 安全裕量为 1.49, 满足 RCC-M 要求。同时, 在相同的计算模型和边界条件下, 分析了考虑压紧弹簧单点接触的情况: LOCA 工况下, 吊篮法兰最大应力值 (路径4) 为 $P_m=40.2$ MPa, $P_m+P_b=96.5$ MPa。与表2对比, 两点接触时应力水平比单点接触更低一些。

表2 LOCA 工况下吊篮法兰应力水平

Table 2 Stresses of Core Barrel Flange under LOCA

位置	P_m /MPa	P_m+P_b /MPa
路径1	6.35	34.14
路径4	31.77	84.88

表3 LOCA 工况下吊篮法兰应力评价

Table 3 Stresses Evaluation of Core Barrel Flange under LOCA

位置	P_m /MPa	P_m+P_b /MPa
LOCA	31.77	84.88
地震	22.28	59.53
静态机械载荷应力	57.24	126.2
许用应力	269	403
安全裕量	2.42	1.49

4 结论

本文建立了吊篮法兰在与压紧弹簧两点接触状态下, 压紧弹簧载荷计算方法和 LOCA 工况下应力分析方法。计算结果表明, 两点接触时, 吊篮法兰的应力水平比单点接触时更低一些, 更加真实和准确地反映了吊篮法兰 LOCA 工况下实际应力水平。此方法也可供其他项目电站堆内构件应力分析参考。

参考文献:

- [1] RCC-M Edition 2007. Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands [S]. 2007.

Analysis of Core Barrel Flange in LOCA under Two Point Contact with Hold Down Spring

Fang Jian, Duan Yuangang, Ran Xiaobing, Dai Changnian

China Nuclear Power Design Company, LTD., Guangdong, Shenzhen, 518124, China

Abstract: To obtain the real contact condition between core barrel flange and hold down spring, and to obtain accurate results of analysis of Core Barrel Flange in the Case of LOCA, this paper introduced the main loads applied on CERP core barrel flange, especially, the load applied by hold down spring in the case of two-phase LOCA under the mode of “two point contact”. This paper presented an analysis of core barrel flange in LOCA condition based on SYSTUS, obtained the stresses of core barrel flange in LOCA condition by comparing displacements and estimated the behavior of core barrel flange according the rules of RCC-M.

Key words: Core barrel flange, Hold down spring, Two-phase LOCA, Two point contact

作者简介：

方 健（1981—），男，工程师。2006年毕业于华中科技大学机械设计及理论专业，获硕士学位。现从事反应堆结构设计方面的研究工作。

段远刚（1966—），男，研究员级高级工程师。1989年毕业于天津大学船舶工程专业，获学士学位。现从事反应堆结构设计方面的研究工作。

冉小兵（1969—），男，高级工程师。1993年毕业于哈尔滨船舶工程学院机械设计及制造专业，获学士学位。现从事反应堆结构设计方面的研究工作。

（责任编辑：张祚豪）