

核级转子流量计测量管段应力分析与评定

李海龙¹, 罗仕宇², 李晓轩¹, 王鲁波¹

(1. 中国原子能科学研究院 快堆工程部, 北京 102413; 2. 承德热河克罗尼仪表有限公司, 河北 承德 067000)

摘要:为论证流量计在各种工况下是否保持结构的完整性, 利用有限元分析软件 ANSYS 对流量计测量管段进行分析和改进。利用计算结果, 严格按照 RCC-M 规范对转子流量计测量管段作了应力评定。应力分析评定结果表明, 转子流量计测量管段满足 RCC-M 对安全 3 级设备结构完整性的要求。

关键词:流量计; RCC-M 规范; 应力评定

中图分类号: TB122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2008)S1-0524-04

Stress Analysis and Assessment
for Measurable Part of Variable Area Flowmeter

LI Hai-long¹, LUO Shi-yu², LI Xiao-xuan¹, WANG Lu-bo¹

(1. Research Center of Fast Reactor, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;
2. Chengde Rehe-KROHNE Meters Co., Ltd., Chengde 067000, China)

Abstract: Under different conditions whether the structural integrity of the variable area flowmeter can be ensured was demonstrated. In the paper, using the finite element analysis software ANSYS, the model on measurable part of the variable area flowmeter was built and modified. Utilizing the calculation results, the stress assessment of the variable area flowmeter was carried out strictly according to the RCC-M codes. And it shows that measurable part of variable area flowmeter is satisfied with the requirement of RCC-M.

Key words: variable area flowmeter; RCC-M codes; stress assessment

受承德热河克罗尼仪表有限公司的委托, 对核安全 3 级设备垂直安装式转子流量计 H250/RRL/M9(下称流量计)按 RCC-M 规范进行应力分析与评定。内容包括在各种工况下流量计是否保持结构的完整性, 即是否满足强度要求。

原流量计的测量管采用变颈段结构, 应力分析表明变颈段的环向应力超过限值 1 倍以

上。为改变测量管的承载能力, 测量管改为本工作的夹套结构。此外, 原流量计的法兰与标准法兰相比孔径被扩大, 刚度减弱, 法兰锥颈小端的纵向应力和大端的径向应力均超过限值。为提高法兰的刚度, 增加法兰盘厚度。本文仅给出流量计测量管段的评定, 流量计屈曲的评定和法兰的评定另文给出。

1 设备与载荷

流量计为核安全 3 级抗震 II 类设备,测量介质为设冷水(温度小于 90 ℃),设计压力为 4.0 MPa。流量计承受的外载荷包括自重(包括指示器、浮子等全部结构及测量管内含液体质量)、地震力、管道极限载荷、内压和法兰力矩。对于测量管的应力强度分析,法兰力矩包括管道极限载荷、地震、自重的作用,但在设备质量有较大偏心并在地震作用下,偏心质量所增加的力与力矩不能忽视。指示器螺栓的应力主要来自地震载荷和自平衡的螺栓预紧力(非外载荷,不包括在外载荷表中)。不同工况下的载荷列于表 1。

流量计模态分析提供的第 1 阶模态是指示器的梁式振型,自振频率为 91 Hz,高于 33 Hz。按阀门抗震要求,采用静力计算,两级地震载荷 SL-1 与 SL-2 分别用 3.2g 和 4g 加速度引起的惯性力代替。

2 依据的规范标准

- 1) RCC-M (1993)第 I 卷第 A 篇、C 篇、D 篇、H 篇、Z 篇和第 II 卷^[1];
- 2) 核电厂抗震设计规范 GB 50267—97^[2];
- 3) ASME(1995)第 III 卷附录 XI、Ⅻ、第 II 卷 D 篇^[3]。

3 计算方法和计算软件

采用有限元方法和 ANSYS 程序。

4 测量管的应力计算与评定

4.1 计算模型

采用实体元对结构进行离散,总体计算模

型示于图 1。内夹套的模型示于图 2。模型中扣除了板腐蚀裕量 0.2 mm。为方便计算,上、下法兰也包括在计算模型中,但法兰的评定未在本节给出。

对于指示器,在有限元模型中模拟了底板,而指示器质量用集中质量代替。集中质量位于指示器的实际质心位置,集中质量和指示器通过 link8 单元连接,该单元仅起传递载荷的作用。指示器和测量管通过两个螺栓连接,其受力状态包含梁的特性,因此,也用实体描述。螺栓的直径取名义直径 8 mm。

位移边界条件:在下法兰的密封载荷作用圆施加零轴向位移,下法兰其它位移边界条件仅用于限制刚体位移,此外再无位移约束。

4.2 计算结果

1) 内压

在 4.0 MPa 内压作用下第 1 主应力图示于图 3。试验工况下的应力值为图 3 所示的 1.5 倍。

为观察方便,变形是经放大处理的。从图形上看,在内夹套与外管接触点的位移相对相邻点的位移较小,一方面是因内夹套与外管的连接在局部增加了壁厚,另一方面是未考虑过盈配合的效果。

2) 各工况

图 4 显示了正常工况、异常工况、紧急工况和事故工况的第 1 主应力图。实际计算的方案较多,图中显示的载荷仅包括内压和法兰力矩,法兰力矩的方向向左(从测量管中轴起,背向指示器螺栓的方向),该方向的法兰力矩与其它载荷组合适宜求测量管的总体薄膜应力。

表 1 流量计承受的外载荷
Table 1 Loads applied on flowmeter

| 工况 | 总质量/kg | 内压/MPa | 法兰力矩/ (N·m) | 管道极限载荷 | | 地震作用 |
|------|--------|--------|----------------|---------|----------|------|
| | | | | 力/N | 力矩/(N·m) | |
| 设计工况 | 6.44 | 4.0 | 199 | — | — | — |
| 正常工况 | 6.44 | 4.0 | 199 | 725.9 | 110.6 | — |
| 异常工况 | 6.44 | 4.0 | 397 | 798.5 | 121.7 | SL-1 |
| 紧急工况 | 6.44 | 4.0 | 586 | 871.0 | 132.7 | — |
| 事故工况 | 6.44 | 4.0 | 586 | 1 161.4 | 177.0 | SL-2 |
| 试验工况 | — | 6.0 | — | — | — | — |

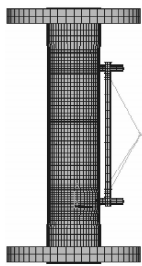


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

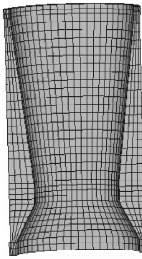


图 2 内夹套(剖面)有限元模型

Fig. 2 Finite element model of interlayer (section)

4.3 评定

本节的应力数值包含了全部载荷的作用,有内压、法兰力矩、地震载荷、法兰螺栓的载荷与指示器螺栓的预紧力。

1) 测量管评定

应力评定只涉及总体一次薄膜应力 σ_m 以及局部薄膜应力与一次弯曲应力之和 σ_m (或 σ_1) + σ_b 。根据流量计的结构特点,评定部位示于图 5。评定只关心测量管的下半部,从 2 区中部至锥颈小端。总体薄膜的评定点取在远离总体结构不连续处,即图中各区中点,局部薄膜评定点取在总体结构不连续处,即各区交界及指示器螺栓与测量管交界。一次弯曲应力未在

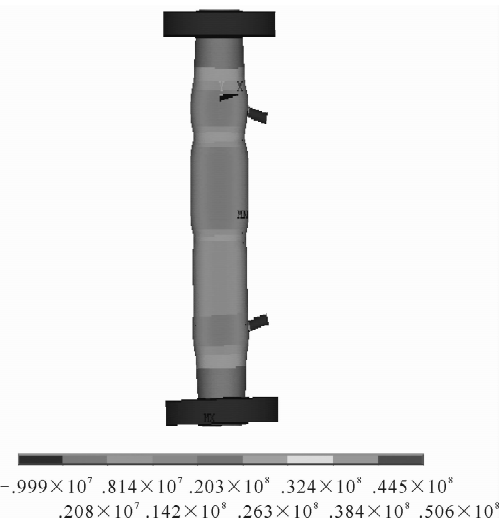


图 3 内压作用下第 1 主应力图

Fig. 3 The first principle stress under pressure

不连续区域选取,所需的一次弯曲应力用精确解计算,或在紧连的远离总体结构不连续区选取。弯矩引起的一次弯曲与总体一次薄膜应力 σ_m 相加按总体一次薄膜应力评定。

薄膜应力、薄膜应力加一次弯曲应力与相应的许用应力比较可看出,测量管满足评定要求。

2) 指示器螺栓评定

指示器和测量管通过两个螺栓连接,型号为 M8 mm × 27 mm,计算模型中螺栓直径是名义直径 8 mm。螺栓承受的应力是对螺纹根部面积而言的,因此,用于评定的应力应乘以因子 k_i 。对于薄膜应力, k_1 = 螺栓名义截面面积/螺纹根部面积 = 1.58; 对于弯曲应力, k_2 = 螺栓名义抗弯截面系数/螺纹根部抗弯截面系数 = 1.99。

安全 3 级设备的 A 级准则奥氏体钢螺栓许用值为:许用拉伸应力 $F_{tb} = 0.85 \times 0.3S_u = 0.85 \times 520 \times 0.3 = 132 \text{ MPa}$; 许用剪切应力

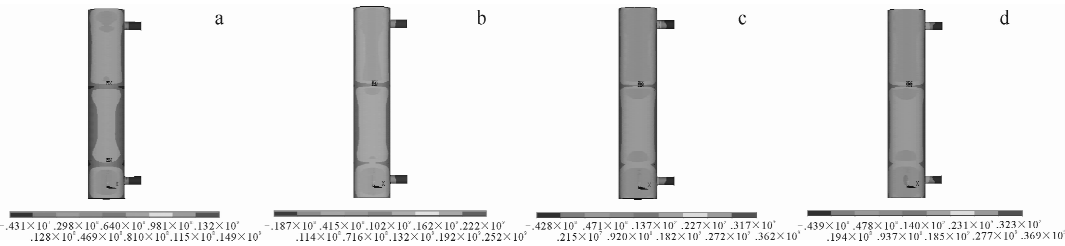


图 4 流量计第 1 主应力图

Fig. 4 The first principle stress of flowmeter

a——正常工况;b——异常工况;c——紧急工况;d——事故工况

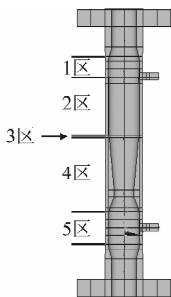


图 5 评定分区示意图

Fig. 5 Scheme of evaluate divides

$F_{vb} = 0.85 \times S_u / 8 = 0.85 \times 520 / 8 = 55 \text{ MPa}$; 拉伸与剪切组合 $f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 < 1$ 。

许用支承压应力 $F_p = \min(S_u L / 2d, 1.5S_u) \times 0.85 = 221 \text{ MPa}$ 。其中: L 为在载荷方向上螺栓中心线到被连接零件最近棱边的距离, 约 8 mm; d 为螺栓的公称直径, 为 8 mm。

指示器螺栓的受力状态含梁特性, 应评定与弯曲有关的载荷: 许用弯曲应力 $F_b = 0.85 \times 0.66S_y = 117.8 \text{ MPa}$; 拉伸与弯曲组合 $f_a / F_a + f_{bx} / F_{bx} + f_{by} / F_{by} < 1$ 。其中: f_a 即 f_t ; F_a 即 F_{tb} ; $F_{bx} = F_{by} = F_b$ 。

事故工况的计算结果用 A 级准则评定如下: 拉伸应力 $f_t = 48.2 \text{ MPa} < F_{tb}$; 剪切应力 $f_v = 2.4 \text{ MPa} < F_{vb}$; 拉伸与剪切组合 $f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 = 0.14 < 1$ 。

支承压应力 $f_p = P(t, d) = 1.9 \text{ MPa} < F_p$,

其中, 支承力 $P = 75.4 \text{ N}$, 指示器底板厚度 $t = 5 \text{ mm}$ 。拉力与弯曲引起的拉伸应力与弯曲应力和 $f_b = 66.8 \text{ MPa} < F_b$, $f_{bx} = 18.6 \text{ MPa}$, $f_{by} = 9.2 \text{ MPa}$; 拉伸与弯曲组合 $f_a / F_a + f_{bx} / F_b + f_{by} / F_b = 0.74 < 1$ 。

在上述评定中许用应力取自正常工况 A 级准则, 而载荷取自最严重的事故工况, 这样处理是保守的。根据以上结果可看出, 指示器螺栓满足各工况评定要求。在上述评定中, 施加的载荷包括了指示器螺栓预紧力限值, 而不是实际值, 如有确切的实际值, 应当用实际值进行计算, 计算结果会有更大余地。

5 结论

从上述应力分析与评定可看出, 转子流量计测量管段满足 RCC-M 对安全 3 级设备结构完整性的要求, 即满足强度的要求。

参考文献:

- [1] 核工业部第二研究设计院. RCC-M 1993 版[M]. 北京: 核工业部第二研究设计院, 1996.
- [2] 国家技术监督局、建设部. GB 50267—97 核电厂抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1998.
- [3] ASME 锅炉及压力容器学会核动力分委员会. 锅炉及压力容器规范 ASME(1995) 第 III 卷附录 XI、XII[S]. 美国: 美国机械工程师学会, 1995.