

ACP1000 堆型 RVD 系统中不同核安全级别管道的应力分析与评定

刘贺同, 高齐乐, 党俊杰

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: **目的** 保证 RVD 系统管道的应力评定能够满足 RCCM 规范要求, 保证 RVD 系统能够正常运行。**方法** 首先探究弯头的柔性系数对不同核安全级别管道在应力计算上的影响; 其次, 借助管道分析软件 PIPESTRESS 对 RVD 管道系统最初版本的布置设计进行分析与评定, 并分析应力过大的原因。考虑到柔性系数的影响, 对不同核安全级别管道布置采取不同的调整方法, 降低管道在各个工况下的应力。**结果** 经过修改后的 RVD 系统管道应力满足 RCCM 规范要求。**结论** 通过对 RVD 系统管道的应力的分析与评定, 掌握了此类问题的解决方法, 总结了设计中应注意的问题, 为核电站中的管道设计提供参考。

关键词: ACP1000 堆型; 柔性系数; RVD 系统; 应力分析与评定

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.011

中图分类号: O342

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0054-06

Stress Analyzing and Evaluating of Different Rank Pipes of RVD System of ACP1000 Reactor

LIU He-tong, GAO Qi-le, DANG Jun-jie

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing 100840)

ABSTRACT: Objective To ensure that stress analyzing and evaluating of the RVD system could meet requirements of RCCM code and the RVD system could run properly. **Methods** Firstly, the effect of flexibility coefficient on evaluating different rank pipes of the model in different codes was analyzed. Then with the help of PIPESTRESS software, the first version of piping layout for the RVD piping system was analyzed and evaluated, and the causes of excessively high stress were analyzed. Considering the effect of flexibility coefficient, different adjustment methods was applied to different rank pipes, the stress of each loading case was depressed. **Results** The modified RVD piping system satisfied the RCCM code. **Conclusion** By analyzing and evaluating the RVD piping system, the way for solving similar problems was achieved; and the problems of the design of the piping system was summarized, which can be a guidance of piping system design of nuclear power plant.

KEY WORDS: ACP1000 reactor; flexibility coefficient; RVD system; stress analyzing and evaluating

核电站中存在大量的管道系统, 管道在内压、自重、温度、地震等内外载荷作用下的应力状态复杂。对管道进行应力分析与计算, 是研究管道在各种载荷作用下产生的力、力矩和应力, 从而作出对于管道安

全性的评价, 保证管道自身和其所连接设备、支架的安全。本文的研究目的是对 ACP1000 堆型核电站中核岛疏水排气系统 (RVD) 管道进行应力评定, 使整个管道系统的应力评定能够满足 RCC-M 规范要求。

收稿日期: 2000-00-00; 修订日期: 2000-00-00

作者简介: 刘贺同 (1989—), 男, 黑龙江人, 硕士, 主要研究方向为反应堆结构力学。

文中评定的 RVD 管道涉及核一级与核二级管道,核一级管道没有锚固点作为边界,而是通过阀门与核二级管道相连接,造成整个管道系统的工况复杂。RCC-M 规范^[1]对于核一级与核二级管道的评定并不相同,准则中所考虑的载荷工况和评定方程区别很大。除此之外,由于不同核安全级别管道柔性系数的计算方法不同,核一级与核二级管道的计算方法也有所不同,这使得管道应力超出规范要求时,对于两个级别管道的修改方式也有可能不同。

文中首先采用有限元分析软件 PIPESTRESS 探究弯头的柔性系数对不同安全级别管道在应力计算上的影响,并对 RVD 管道进行计算与评定。得到初步结果后,依据柔性系数的影响结果,分别对核一级与核二级管道的设计进行修改,使整个管道系统满足规范要求。

1 柔性系数的影响

1.1 弯头柔性系数的影响分析

对接焊弯头在由直管段推压制造的过程中,弯头的柔性会增为直管的 k 倍^[2-3](k 为弯头的柔性系数)。RCC-M 规范中,对于弯头柔性系数有明确的规定,对于核二级管道,根据 C3680 中的规定, k 是一个只与弯曲半径和管道尺寸有关的参数。

$$k = \frac{1.65}{h} \quad (1)$$

式中: $h=tR/r^2$ 。 R 为弯曲半径; r 为横截面的平均半径; t 为弯头的名义壁厚。

对于核一级管道,根据 RCC-M 规范 B3684.1 中的规定,在满足一定条件的前提下:

$$k = \frac{1.65}{h} \left(\frac{1}{1 + \frac{Pr}{tE} X_k} \right) \quad (2)$$

式中: P 为管道内压; $X_k=6(r/t)^{4/3}(R/r)^{1/3}$; E 为管道弹性模量。

从以上规范规定可以看出,一级管道弯头的柔性系数除了与弯曲半径和管道尺寸有关外,还与管道的材料性质及内压有关。例如,采用 PIPESTRESS 建立一个外径 273 mm,壁厚 4.19 mm 的 90°短半径弯头模型(如图 1 所示),弯头所用的材料为 022Cr19Ni10,力学性能等同于 RCCM 规范中的 Z2CN1810,PIPESTRESS 软件可以调用 RCCM 规范中该型材料在各温度下的材料属性(如弹性模量、热胀系数等)。将弯头一端固定,压力为 6 MPa,分别按照核一级和核二级管道进行计算,得到核一级和核二级管道的柔性系数分别为 9.46、18.67。

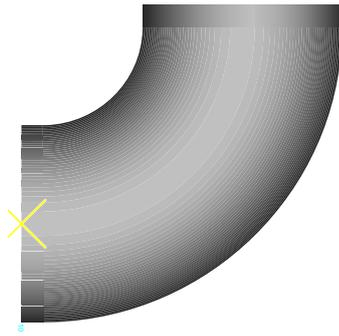


图 1 弯头模型

由此可见,当弯头作为核一级管道考虑时,柔性系数变小,这种影响是不容忽略的。为了进一步说明内压对柔性系数的影响,文中对该弯头柔性系数随内压的变化进行计算,结果如图 2 所示。可以看出,在核二级管道的计算模式下,柔性系数没有变化,而核一级管道计算模式下弯头柔性系数随着设计压力的增加而降低。在设计压力比较低的情况下,核一级与核二级管道的柔性系数相近,但是随着设计压力的升高,不同核安全级别管道弯头柔性系数的差距就随之变大了。

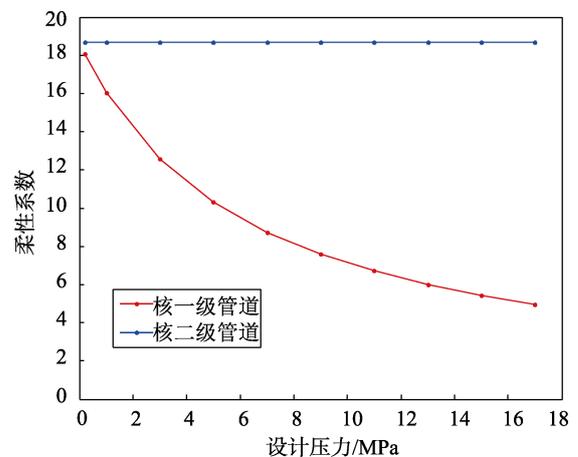


图 2 弯头柔性系数随设计压力的变化曲线

1.2 柔性系数对管道应力的影响

在工程中,对于热膨胀应力过高的直管,可以通过设置弯头弯管的方法增加管道的柔性,降低热胀应力^[4-5],这也在核二级管道的计算评定中得到了应验^[6-7]。采用 PIPESTRESS 软件建立一个外径 273 mm、壁厚 4.19 mm 的 T 字管道模型以及一个增设了 π 型弯的模型(如图 3 所示),管道材料性质与 1.1 节中的弯头相同。对 100 °C 下的模型在不同内压下的热膨胀应力按照核一级管道的计算模式进行计算,计算结果见表 1。可以看出,对于设计压力比较低的核一级管道,通过增设 π 型弯的方式可以有效降低热膨胀应力,但是对于设计压力比较高的,效果不是很理想。

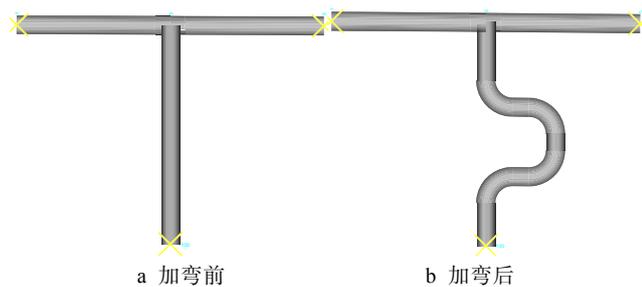


图3 T字管道模型

表1 设计压力为时管道的热膨胀应力

工况	计算应力/MPa	
	设计压力 0.1 MPa	设计压力 15 MPa
加弯前	热膨胀	397.06
加弯后		208.94

表2 RCC-M 一级管道许用应力极限

载荷工况	准则级别	载荷	方程	RCC-M B 3650 极限
设计工况	0级	自重+地震	9	$\leq 1.5S_m$
	A级	自重+热胀+地震	10	$\leq 3S_m$
正常工况	A级	热膨胀	12	$\leq 3S_m$
	A级	自重+地震	13	$\leq 3S_m$
			9'	$\leq 2.5S_m$
事故工况(1)	D级	自重+地震	9	$\leq 3S_m$
			9''	$\leq 2S_m$

注：在事故工况下，PIPESTRESS 程序同时计算 9、9'、9'' 三个方程，应力比取三个方程中的最大值。当方程 10 未满足要求时，方程 12、13 要同时满足

表3 RCC-M 二级管道许用应力极限

载荷工况	准则级别	载荷	方程	RCC-M C 3650 极限
设计工况	0级	内压+自重	6	$\leq 1.0S_h$
热膨胀	A级	热膨胀	7	$\leq 1.0S_a$
		自重+热膨胀	8	$\leq 1.0(S_h+S_a)$
		自重+地震	10	$\leq 1.2S_h$
异常工况	B级	自重+地震	10'	$\leq 1.9S_h$
			10''	$\leq 2.0S_h$
事故工况(2)	D级	自重+地震	10	$\leq 2.4S_h$
			10''	$\leq 2.0S_h$

注：当热膨胀应力超过 $1.0S_a$ 时，即没有满足方程 7 的要求，可用方程 8 继续校核热膨胀应力与自重应力之和是否小于 $1.0(S_h+S_a)$ ，如满足方程(8)，则此工况热胀应力满足规范要求。在事故工况下，若 $PD/2t \leq S_h$ (P 为管道设计压力， D 为管道外径， t 为管道壁厚)，PIPESTRESS 程序同时计算 10、10' 两个方程，应力比取两个方程中的最大值；若 $PD/2t > S_h$ ，PIPESTRESS 程序同时计算 10、10'' 两个方程，应力比取两个方程中的最大值

2.2 RVD 管道应力分析及评定

利用 PIPESTRESS 软件进行建模，得到初始模型模型如图 4 所示，虚线内为核一级管道，各管线参数见表 4，管道的材料为 022Cr19Ni10，力学性能等同于 RCCM 规范中的 Z2CN1810。管道的地震分析中采

2 RVD 系统管道的应力评定

2.1 评定准则

为保证 RVD 系统能够正常运行，其管道应力需要满足 RCCM 规范要求。文中所计算的管道分为 RCC-M 核一级与核二级管道。表 2 与表 3 给出了各载荷工况下需要满足的 RCCM 准则中各方程所对应的许用应力极限。在核一级管道的评定中，0 级与 A 级准则中的地震载荷为 OBE 地震载荷，D 级准则中地震载荷为 SSE 地震载荷。在核二级管道的评定中，B 级准则中的地震载荷为 OBE 地震载荷，D 级准则中地震载荷为 SSE 地震载荷。表 2 中的 S_m 代表材料在设计温度下的基本许用应力强度，表 3 中的 S_h 代表热态下的许用应力极限， S_a 代表针对热膨胀的许用应力极限。

用单层反应谱法进行分析，计算中使用反应堆厂房标高 6.5 m、阻尼比 2% 的反应谱。通过计算得到各工况下的结果见表 5 和表 6，表 5 给出了一级管道每个 RCC-M 方程的最大计算应力；表 6 给出了二级管道每个 RCC-M 方程的最大计算应力。可以看出，二级管道均满足准则要求；对于核一级管道而言，综合考

表 4 管线参数

管线号	外径/mm	壁厚/mm	管道线重 /(kg·m ⁻¹)	介质线重 /(kg·m ⁻¹)	保温线重 /(kg·m ⁻¹)	设计温 度/°C	设计压力 /MPa	抗震 级别	规范级别	安全 等级
RVD0001	26.7	5.56	2.889	0.191	3.812	360	17.13	1I	1	1
RVD0002	26.7	5.56	2.889	0	0	360	17.13	1I	1	1
RVD0003	26.7	2.11	1.279	0	0	60	0.2	1I	2	2
RVD0004	26.7	5.56	2.889	0	0	360	17.13	1I	1	1
RVD0005	21.3	2.11	0.998	0.229	0	60	0.2	1I	2	2

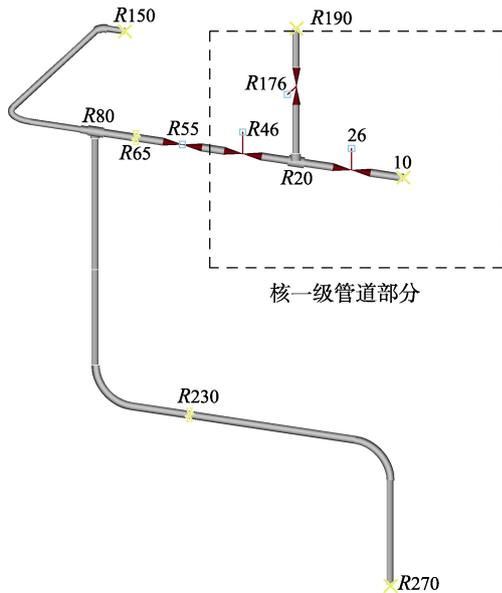


图 4 管道模型

考虑自重、热胀和地震影响的方程 10 应力比达到了 2.252，用于评定热胀应力的方程 12 应力比达到了 2.229，超出准则要求。因此，评定得出的结论为：该管系的应力评定不符合 RCCM 规范的要求，需要进行修改。

2.3 RVD 管道的修改

为了进行管道布置修改，首先对导致各工况应力过大的原因进行分析。在初步分析中，0 级、A 级、D 级准则中考虑自重与地震工况的应力评定结果均满足规范要求，且应力比均在 0.4 以下。由此可得，在初步计算分析中，导致计算模型没有达到规范要求的工况为热膨胀工况。

管道的温度变化会产生热胀位移，而由于管道上刚性支架的约束，这种膨胀位移只能按既定的方式释放。从图 5 中可以看出，热胀应力比较大的位置主要分布在三个区域，分别位于两个固定支架处以及三通右侧。温度变化造成管道热胀冷缩导致的热胀应力和管道热位移、管径、壁厚、管道布置走向、温度高低等多种因素相关，原因复杂，但是大部分都是由于温度过高与管道柔性不够造成的。增加管道柔性可以有效降低热膨胀应力，根据第 1 节的结论，由于管道设计压力高达 17.13 MPa，增加 π 弯的方式并不是最佳解决方案，由于节点 10 处的固定支架位置与支架形式无法调整，所以需要调整立管处固定支架的位置，扩大管道的计算边界。新修改的管线模型如图 6 所示。修改前后核一级管道部分的热胀应力见表 7，从

表 5 一级管道部分的最大计算应力

准则级别	载 荷	方程	节点	计算应/MPa	许用极限/MPa	应力比
0	自重+地震	9	R30	46.91	141.00	0.333
	自重+热膨胀+地震	10	R10	728.25	282.00	2.582
A	热膨胀	12	R10	648.41	282.00	2.299
	自重+地震	13	R30	109.14	282.00	0.387
D	自重+地震	9''	R10	48.45	282.00	0.308

表 6 二级管道部分的最大计算应力

准则级别	载 荷	方程	节点	计算应力/MPa	许用极限/MPa	应力比
0	内压+自重	6	R50	8.37	108.00	0.078
	热膨胀	7	R50	179.83	162.00	1.110
A	自重+热膨胀	8	R50	188.20	129.60	0.697
B	自重+地震	10	R50	17.53	129.60	0.135
D	自重+地震	10'	R190	34.49	205.20	0.166

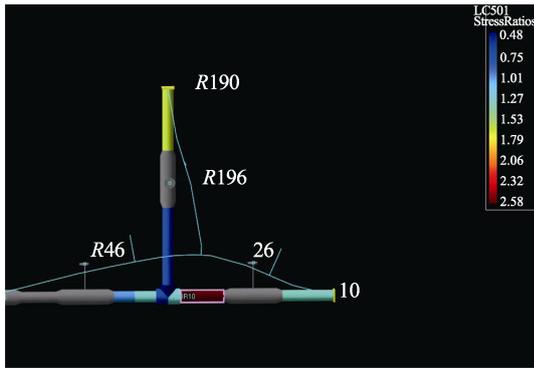


图5 热膨胀工况下管道的应力比

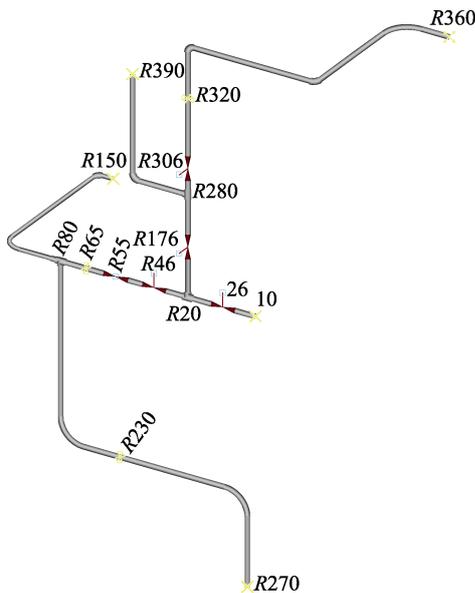


图6 修改后的模型

表7 核一级管道修改前后热膨胀工况最大应力结果的对比

规范等级	结点	计算应力/ MPa	许用极限/ MPa	应力比	
修改前	A级	R10	648.41	282.00	2.299
修改后	A级	R10	237.19	282.00	0.841

表7中的数值可知，修改后热胀应力明显下降，满足规范的要求。

经过修改后的模型，已经可以满足一级管道的规范要求，但是对于扩大计算边界后纳入计算范围

表12 一级管道部分的最大计算应力

准则级别	载荷	方程	节点	计算应/MPa	许用极限/MPa	应力比
0	自重+地震	9	R10	76.09	141.00	0.540
	自重、热膨胀、地震	10	R10	192.42	282.00	0.682
A	热膨胀	12	R10	54.96	282.00	0.195
D	自重+地震	13	R10	137.37	282.00	0.487
	自重+地震	9''	R10	87.00	282.00	0.617

的核二级管道，在修改后同样出现了热胀应力过大最后导致其不满足规范要求的情况，给出的计算结果见表8。

表8 核二级管道热膨胀工况最大应力结果

准则级别	方程	节点	计算应力/ /MPa	许用极限/ /MPa	应力比
A	7	R370	353.26	162.00	2.181
	8	R370	377.69	270.00	1.399

为了使管道满足 RCCM 规范的要求，需要再次对布置进行修改。利用计算结果绘制出应力比分布如图7所示。可以看出，热胀应力比较大的位置位于节点 R280 处三通一侧的 L 型管道上。

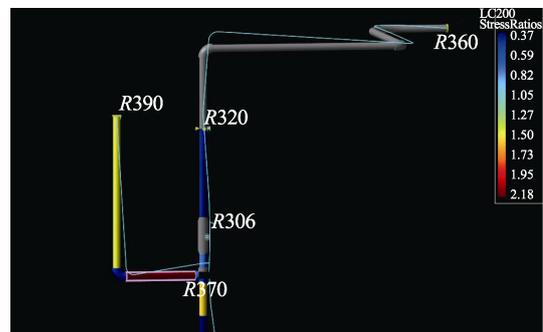


图7 热膨胀工况下管道的应力比云

为了进一步减小横管自由膨胀所受的限制，由于核二级管道弯头柔性系数不受设计压力影响，考虑在 L 型管道上加上 π 形弯头，这样通常能有效降低热膨胀应力比。从表9中可以看出，热膨胀应力比已经降到 0.843。表10与表11为计算模型在所有工况下的计算结果，管系模型的所有节点应力满足了 RCCM 规范的要求，因此此次修改方案可以采纳。最终的管道模型如图8所示。

表11 修改前后热胀工况结果的对比

规范等级	节点	计算应力/ /MPa	许用极限/ /MPa	应力比	
修改前	A级	R370	353.26	162.00	2.181
修改后	A级	R150	136.63	162.00	0.843

表 13 二级管道部分的最大计算应力

准则级别	载荷	方程	节点	计算应力/MPa	许用极限/MPa	应力比
0	内压+自重	6	R50	30.86	108.00	0.286
A	热膨胀	7	R150	136.63	162.00	0.843
	自重+热膨胀	8	R50	62.09	129.60	0.479
B	自重+地震	10	R50	98.31	129.60	0.479
D	自重+地震	10'	R190	31.96	205.20	0.296

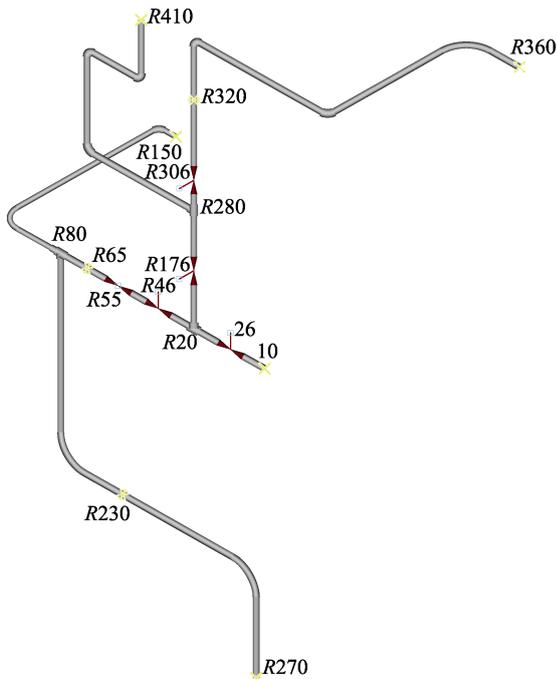


图 8 管道最终模型

通过对热膨胀工况的调整过程发现：热膨胀应力过大的时候，需要首先借助于现有的工具分析原因，然后找到对应的位置，通过调整支架或者降低管道的刚度来降低热膨胀应力^[8]。降低刚度的方法有很多，但是要结合实际情况来进行修改。在文中针对核一级与核二级管道的计算特点，采取了不同的修改方式，可以为今后的工程提供设计经验。

4 结语

利用 PIPESTRESS 软件，对不同核安全级别弯头柔性系数的区别进行分析，总结了管道压力对弯头柔性系数的影响规律，分析了柔性系数对管道计算评定造成的影响。依据不同核安全级别管道弯头柔性系数的区别，对未能通过应力评定的管道布置进行了分析和调整，突破了各个难点。总结了此类问题的解决方案，为今后的工程应用提供经验。

参考文献：

- [1] RCC-M, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands 2007 Edition[S].
- [2] 宁庆坤, 白旭娟. 含有弯头的核级混合管道模型计算[J]. 核动力工程, 2018, 39(S1): 119-121.
- [3] OLEG K. Parametric Study of Flexibility Factor for Curved Pipe and Welding Elbows[C]. Transactions SMiRT-22. San Francisco, California, 2013.
- [4] 孙亚春. 管道柔性设计-自然补偿浅谈[J]. 化学工程与装备, 2014(1): 96-100.
- [5] 宁庆坤, 田金梅. 二代改进型核电站管道系统分析与评定[J]. 核技术, 2013(4): 040612-1.
- [6] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 中国石化出版社, 2009
- [7] 唐永进. 压力管道应力分析的内容及特点[J]. 石油化工设计, 2008, 25(2): 20-24.
- [8] 刘树斌. 设备与管道力学分析设计手册[M]. 北京: 核工业第二研究设计院, 2003.