

ACP1000 除气塔液体冷却器抗震分析设计

党俊杰¹, 李文默², 龙波¹, 刘贺同¹, 李贺¹

(1.中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2.中国电能成套设备有限公司, 北京 100080)

摘要: **目的** 对除气塔液体冷却器进行抗震分析, 以确保其在地震下必要的安全功能。**方法** 以福清5/6号核电工程为背景, 通过有限元软件 ANSYS 建立除气塔液体冷却器有限元模型, 采用反应谱法进行设备的抗震分析与评定。**结果** 通过抗震分析评定, 发现设备鞍座为设计薄弱区域, 故修改鞍座的结构形式, 包括新增筋板、增加壁厚, 使该设备的设计满足了相关规范的要求。**结论** 通过修改鞍座的结构形式, 确保其必要的安全功能得以实现, 满足实际工程的需要。

关键词: 除气塔液体冷却器; 反应堆冷却剂; 有限元; 抗震分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.012

中图分类号: TL362 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0060-05

Seismic Analysis and Design of ACP1000 Degassing Tower Liquid Cooler

DANG Jun-jie¹, LI Wen-mo², LONG Bo¹, LIU He-tong¹, LI He¹

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing 100840, China; 2. SPIC China Power Complete Equipment Co., Ltd, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: Objective To carry out seismic analysis for the degassing tower liquid cooler to ensure necessary safety function under the earthquake. **Methods** With FuQing 5/6 nuclear power station as an example, the finite element model of the degassing tower liquid cooler was established with software ANSYS, and the response spectrum method was adopted for seismic analysis and evaluation of the equipment. **Results** Through seismic analysis evaluation, the calculation process and characteristics of spectral analysis was learned and the weak area of equipment was found out. Therefore, the structure of the saddle was modified by increasing rib plate and wall thickness to make the equipment meet requirement of relevant code. **Conclusion** The structure of the saddle is modified to guarantee its functions and meet the needs of the practical engineering.

KEY WORDS: degassing tower liquid cooler; reactor coolant; finite element; seismic analysis

ACP1000 压水堆核电站是我国自主设计的第三代压水堆核电站, 核岛抗震设计采取 0.3g 地面加速度, 相比以前可参考的国内电站, 对设备抗震性能要求显著提高, 因此 ACP1000 设备抗震计算与评定工作尤为重要^[1-2]。文中对 ACP1000 压水堆核电站除气塔液体冷却器建立了 ANSYS 有限元模型, 考虑了附加水质量和管壳侧不同压力的影响, 对除气塔液体冷却器进行了抗震分析。计算结果显示, 该设备鞍座区域应力不能满足相关规范要求。在满足布置及其他限

制条件的前提下, 对冷却器进行修改, 降低了设备在地震工况下的应力, 使之满足相关规范要求。

1 设备结构

除气塔液体冷却器属于硼回收系统, 安全等级为 3 级, 规范等级为 RCC-M3 级^[3], 抗震类别为抗震 II 类。除气塔液体冷却器是由平盖、筒体、壳体和封头等组焊而成的圆筒形卧式换热器, 分成壳侧

与管侧。设备采用两个鞍式支座支撑，通过两个中间支座与下支座相连，下支座焊接到预埋板上。两

个支座一处为固定支座，而另一个为滑动支座。设备结构如图 1 所示。

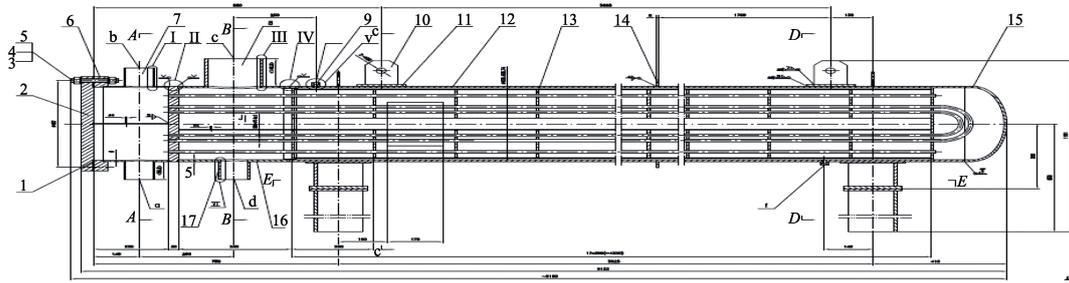


图 1 设备结构

2 载荷及评定限制

载荷包括设备自重、压力、接管载荷、地震载荷。其中压力在计算中采用设计内压（壳侧 1.35 MPa，管侧 1.1 MPa）。在计算接管载荷对设备的作用时，采用接管限制载荷，数据取自 Q/CNPE.J 101.8—2009^[4]。计算地震载荷时考虑 SL-1 地震和 SL-2 地震，SL-1 地震谱结构阻尼比取 2%，SL-2 地震谱取结构阻尼比

取 3%。

根据设备安全和规范级别，确定了文中研究设备容器承压壳体部分的应力评定应按照 RCC-M 规范 D3300 的要求进行。具体评定限制见表 1。

鞍座评定应按 RCC-M 规范 H1310 节规定，2 级和 3 级设备支撑件为 S2 级。S2 级支撑件必须遵守 H3300 节规定的设计准则。板式或壳式支撑件在不同设计准则的应力限值列于表 2 中。

表 1 容器评定应力限制

工况	准则	载荷组合	许用极限
设计工况	O 级	自重、设计压力、设计工况下的接管载荷	$\sigma_m \leq kS$
正常工况	A 级	自重、设计压力、设计工况下的接管载荷	$\sigma_m (\text{或} \sigma_L) + \sigma_b \leq 1.5kS$
异常工况	B 级	自重、最大运行压力、设计工况下的接管载荷×1.5、SL-1 地震	$\sigma_m \leq 1.1kS$ $\sigma_m (\text{或} \sigma_L) + \sigma_b \leq 1.65kS$
事故工况	D 级	自重、最大运行压力、设计工况下的接管载荷×2.0、SL-2 地震	$\sigma_m \leq 2.0kS$ $\sigma_m (\text{或} \sigma_L) + \sigma_b \leq 2.4kS$

表 2 鞍座评定应力限制

工况	准则	载荷组合	许用极限
设计工况	O、A、B 级	自重、内压、接管力×1.5、SL-1 地震	$\sigma_m \leq 1.0S$
正常工况			$\sigma_m + \sigma_b \leq 1.5S$
异常工况	D 级	自重、内压、接管力×2.0、SL-2 地震	$\sigma_m \leq \min(S_y, 0.5S_u)$
事故工况			$\sigma_m + \sigma_b \leq \min(1.5S_y, 0.8S_u)$

3 计算

3.1 计算模型

采用 ANSYS15.0 建立有限元模型^[5]，分为整体结构板壳元模型和局部区域实体元模型两部分。用整体结构板壳元模型计算筒体及支撑结构在自重、内压、接管力及地震作用下的应力。用壳单元（SHELL63）对平盖、筒体、及支承架建立有限元模型，板壳元模型中接管用一个质量单元模拟，通过 MPC 技术连接到压力边界上。接管的外部载荷直接施加到代

表接管的质量单元上，内压载荷施加于容器受压部分的所有内表面。整体结构板壳元模型如图 2 所示。

局部区域的实体元模型用来计算接管所受应力。利用三维实体单元（solid45）对局部接管区域进行建模，用来模拟内压和接管载荷对局部区域的作用，有限元模型如图 3 所示。

3.2 计算方法

设备抗震分析方法主要有三种：时程法、反应谱法和等效静力法^[6-9]。文中采用工程中常用的反应谱法进行计算。

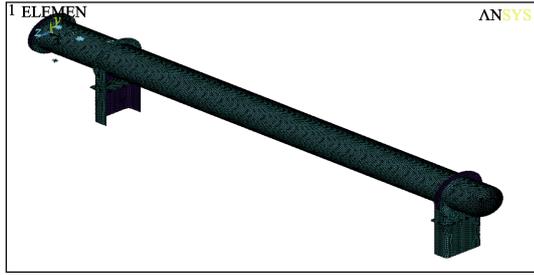


图2 整体结构板壳元模型

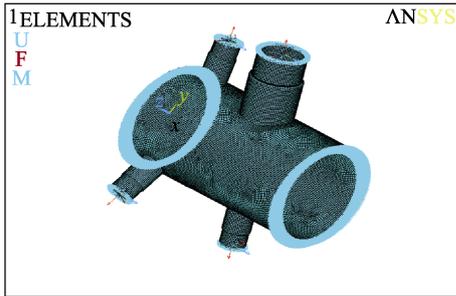


图3 接管局部模型

为了考虑容器中水的影响，在自重和地震载荷下，将内部水以平均密度的形式均布在筒体表面上。其中主筒体内水均匀分布在管板及主筒体表面，封头内水均匀分布在封头表面。地震载荷作用的计算采用BLOCK LANCZOS法提取结构模态，用响应谱法计算结构地震响应，用GRP法对各阶模态进行组合，用SRSS法组合三向地震作用。由于结构在出现刚性频率前，y和z两个方向振型参与质量均未达到90%，故保守地在三个方向对全部质量采用零周期加速度进行静力修正计算，再用SRSS法与上述谱分析计算结果进行组合^[10]。对自重、接管载荷以及地震载荷的计算结果，采用代数和相加或相减两种方式组合，再取其极大值对结构进行评定。

4 结果及讨论

4.1 筒体应力评定

根据上述有限元模型计算，得到筒体最不利工况下的薄膜和膜加弯曲应力结果，见表3和表4。D工况下筒体的薄膜、薄膜加弯曲的应力云如图4和图5所示。可以看出，各个工况下筒体的应力均满足RCC-M规范的相关要求。

表3 筒体薄膜应力结果

工况	最大薄膜应力 /MPa	许用应力 /MPa	比值
O/A	64.0	87.55	0.73
B	82.2	96.31	0.85
D	125.9	175.1	0.72

表4 筒体薄膜加弯曲应力结果

工况	最大薄膜加弯曲应力 /MPa	许用应力 /MPa	比值
O/A	101.7	131.3	0.77
B	138.2	144.5	0.94
D	176.2	210.1	0.84

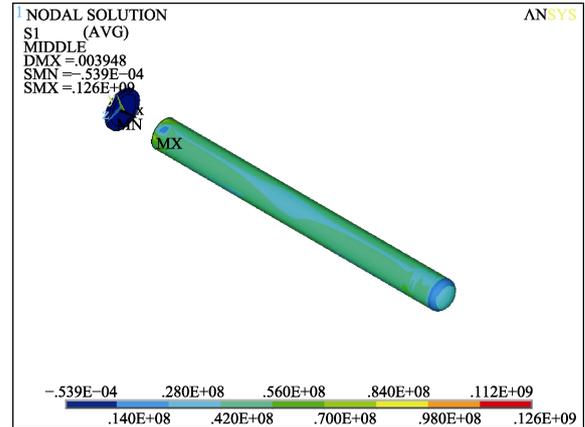


图4 D工况下筒体的最大薄膜应力

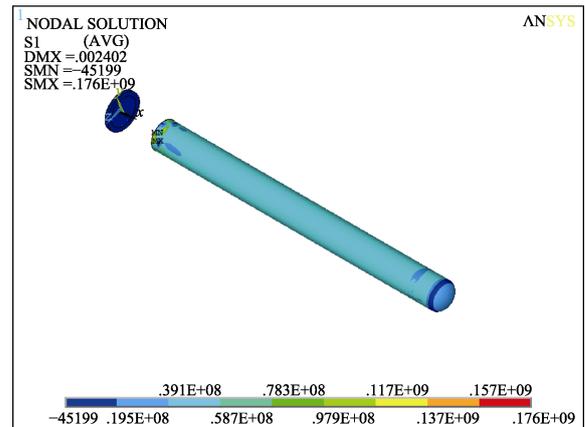


图5 D工况下筒体的最大薄膜加弯曲应力

4.2 鞍座应力评定

鞍座最不利工况下薄膜和膜加弯曲应力结果分别见表5和6。D工况下鞍座的薄膜、薄膜加弯曲应力如图6和图7。以上结果表明，各个工况下鞍座应力不满足RCC-M规范的相关要求。

表5 鞍座薄膜应力结果

工况	最大薄膜应力 /MPa	许用应力 /MPa	比值
O/A/B	202.8	85	2.39
D	284.2	170	1.67

表 6 鞍座薄膜加弯曲应力结果

工况	最大薄膜应力/MPa	许用应力/MPa	比值
O/A/B	309.4	127.5	2.43
D	555.4	272	2.04

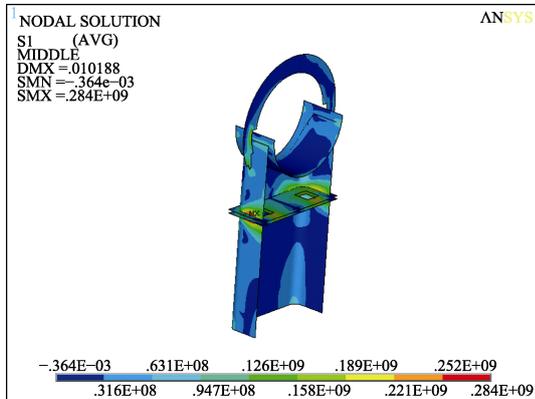


图 6 D 工况下鞍座的最大薄膜应力

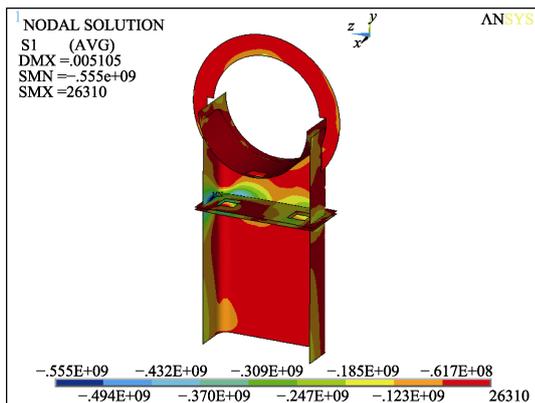


图 7 D 工况下鞍座的最大薄膜加弯曲应力

4.3 设备结构修改及评定

由初始评定结果可知，设备鞍座不能满足相关规范的强度要求，故需对设备结构作出调整。根据初步计算结果以及评定准则，初步确定修改方案为：增加鞍座垫板、槽钢、中间连接板厚度；在鞍座中间部分增加支板。调整之后的鞍座有限元模型如图 8 所示。

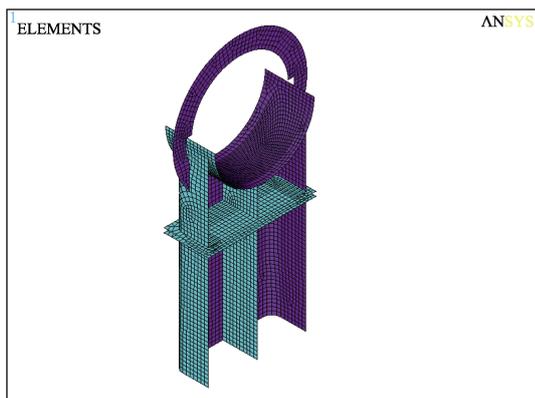


图 8 调整后的鞍座有限元模型

对鞍座作出上述调整后，按照上述流程进行抗震分析，鞍座最终评定结果见表 7 和 8，相应的应力如图 9、10 所示。可以看出，对鞍座进行结构调整后，其最大薄膜应力、薄膜加弯曲应力均有很大程度的降低，并且满足 RCC-M 规范的要求。

表 7 鞍座薄膜应力结果

工况	最大薄膜应力/MPa	许用应力/MPa	比值
O/A/B	75.4	85	0.89
D	136.8	170	0.80

表 8 鞍座薄膜加弯曲应力结果

工况	最大薄膜应力/MPa	许用应力/MPa	比值
O/A/B	119.1	127.5	0.93
D	197.1	272	0.72

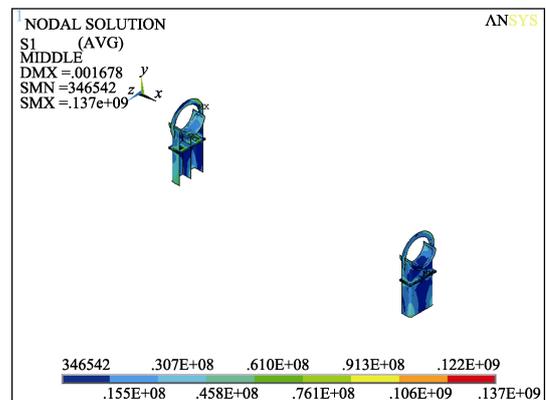


图 9 D 工况下鞍座的最大薄膜应力

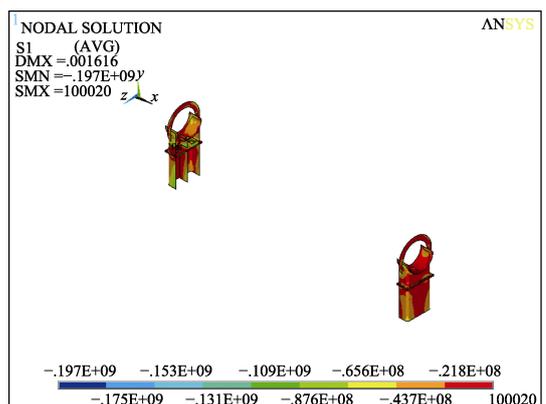


图 10 D 工况下鞍座的最大薄膜应力

5 结论

依据 ACP1000 除气塔液体冷却器为背景，建立有限元模型，按照设备抗震分析流程对其进行评定。通过计算发现，鞍座应力不能满足 RCC-M 规范要求，故修改鞍座的结构形式，包括新增筋板、增加壁厚等措施，使其最终满足规范要求，确保其必要的安全功能得以实现，满足实际工程的需要。

参考文献:

[1] GB 50267—97, 核电厂抗震设计规范[S].

[2] 周文霞, 张继革, 王德忠. 核电站主泵机组地震响应谱分析及应力评定[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(1):54-59

[3] RCC-M, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands[S].

[4] J 101.4—2013, 抗震分析规格书 Q/CNPE[S].

[5] ANSYS Inc, ANSYS User's Manual for Revision 8.0[S].

[6] 王伟. 振动力学与工程应用[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2008.

[7] 大崎顺彦. 地震动的谱分析入门[M]. 第二版. 田琪译. 北京: 地震出版社, 2008.

[8] 克拉夫 R, 彭津 J. 结构动力学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[9] 王光远, 程耿东. 抗震结构的最优设防烈度与可靠度[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[10] 王艳苹, 张双旺, 弓振邦, 等. 反应谱分析方法的刚性模态修正计算和程序开发[J]. 核动力工程, 2011, 32(S1): 65-68.