

HTR-PM 蒸汽发生器绝热层支撑结构的设计与分析

张丽, 何树延, 吴莘馨, 刘俊杰

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:为提高 HTR-PM 高温气冷堆蒸汽发生器的热交换效率并分隔冷热氦气的通路, 必须在蒸汽发生器中设置绝热装置。在围绕换热管放置的钢制围筒上铺设一定厚度的绝热纤维, 用多块覆盖板将绝热纤维压紧, 在每块覆盖板中心与四角, 用中间填充绝热纤维的螺栓将覆盖板定位并紧固, 组成绝热层支撑结构。使用有限元方法对绝热层支撑结构在绝热材料压力、蒸汽发生器失压、地震等多种载荷的综合作用下的应力分布情况进行计算, 计算结果表明: 支撑结构在多种载荷的作用下仍能保持绝热层功能的可靠性与结构的完整性。

关键词: HTR-PM; 绝热层; 支撑结构; 有限元方法

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S1-0512-04

Design and Analysis on Supporting Structure of Thermal Insulation Layer in HTR-PM Steam Generator

ZHANG Li, HE Shu-yan, WU Xin-xin, LIU Jun-jie

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Thermal insulation device should be set in the steam generator to improve the efficiency of the heat exchange and compact the cold and hot helium. The thermal insulation fiber was laid on the steel cylinder around the heat exchange tubes, and packed firmly by steel plates. The plate was fixed in the middle and four corners by the bolts filled with thermal insulation fiber. The plates and bolts compose the supporting structure of thermal insulation layer. The stress distribution was calculated via finite element method (FEM) under the load of thermal insulation fiber pressure, loss of steam generator pressure and seism. The results show that the supporting structure of thermal insulation layer can keep its reliability and integrality under the definite loads.

Key words: HTR-PM; thermal insulation layer; supporting structure; finite element method

500 MW 高温气冷堆示范电站 (HTR-PM) 是我国在 10 MW 高温气冷实验堆成功运

行的基础上设计并计划建造的第 1 座气冷堆示范电站。HTP-PM 属球床模块式高温气冷堆,

具有固有安全性、发电效率高和市场适应性强的特点,被认为是最先投入工业应用的第4代先进的核能发电系统^[1]。

HTR-PM 的载热介质为氦气,反应堆堆芯底端通过热气导管与蒸汽发生器顶端相连。冷氦气从堆芯顶端自上而下流过带出热量,高温氦气经热气导管到达蒸汽发生器顶端,自上而下流过将热量传给换热管,冷氦气从蒸汽发生器底端向上沿蒸汽发生器内壁再经热气导管流回反应堆堆芯。

在额定工况下运行时,堆芯入口处冷氦气的平均温度为 250 °C,堆芯出口处高温氦气的平均温度为 750 °C,氦气的工作压力高达 7.0 MPa。为降低承受压力的容器壁的温度,分隔冷热氦气的通路及提高高温氦气与蒸汽发生器换热管间的热交换效率,有必要在换热管与蒸汽发生器容器壁间设置绝热装置。高硅氧砂与 Al 纤维是气冷堆中较为常用的绝热材料,在反应堆正常运行的环境下,两种陶瓷纤维的绝热性能与化学稳定性均能够满足要求^[2]。根据蒸汽发生器热力学计算的结果,将所需厚度的绝热纤维铺设在蒸汽发生器内的围筒上,使用支撑构件将绝热纤维固定压紧,组成蒸汽发生器的绝热层。

用于固定绝热纤维的覆盖板和支撑构件要承受纤维的压力和氦气发生泄漏后纤维内、外两侧气体的压力差,此外,绝热层冷热两侧的温度差高达 500 °C,由热膨胀引起的应力也可能导致结构的失效,因此,对绝热层支撑结构进行合理的设计并对结构承受运行或事故载荷下的应力位移分布进行准确的计算是非常必要的。

1 绝热层支撑结构

蒸汽发生器中所需绝热层的面积很大,绝热层内、外两侧及顶端与低端的温差也较大,材料会产生较大的热膨胀,因此,固定并压紧绝热纤维的覆盖板不宜采用整体结构。本文将覆盖板划分为 500 mm×500 mm 的单元,再使用螺栓等支撑构件将多块覆盖板连接并紧固。绝热层工作在高温、高压环境中,为保证其功能可靠性及结构完整性,采用双重支撑对覆盖板进行固定,覆盖板中部的支撑构件为一次支撑,4 个边角处的支撑构件为二次支撑(图 1)。

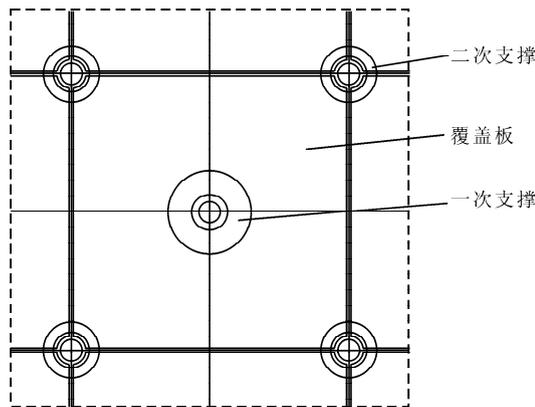


图 1 绝热层支撑结构示意图

Fig. 1 Supporting structure of thermal insulation layer

一次支撑用于固定覆盖板并压紧绝热纤维层,二次支撑用于将各块覆盖板连接并辅助一次支撑压紧绝热纤维层。支撑构件选用螺栓,为减小冷热面间的传热,螺栓采用中空结构并填充绝热纤维;下端与围筒钢衬拧紧后焊接,上端加垫片压紧覆盖板(图 2)。在蒸汽发生器中温度不同的位置,绝热层支撑构件需采用不同的材料,在高温氦气流动的位置需使用高温合金钢 60Ni-22Cr-9Mo-3.5Cb,低温氦气流动的位置使用 2^{1/4}Cr-1Mo 即可满足要求。

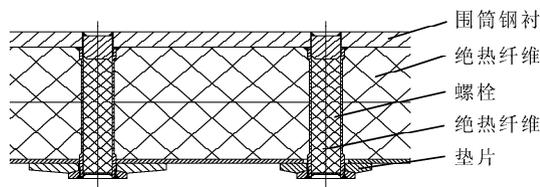


图 2 支撑构件

Fig. 2 Supporting component

2 绝热层支撑结构分析与计算

2.1 绝热层支撑结构载荷

绝热层支撑结构中覆盖板承受的载荷主要有:1) 绝热纤维对固定覆盖板的压力;2) 蒸汽发生器发生失压事故后,绝热层内、外两侧的压差;3) 自重与地震载荷。固定覆盖板的螺栓承受的载荷主要是压紧覆盖板的力与覆盖板边缘热膨胀后摩擦引起的侧向弯矩。正常运行工况下,覆盖板主要承受绝热纤维的压力,一次支撑螺栓主要承受覆盖板的压紧力,二次支撑螺栓主要承受覆盖板压紧力与覆盖板边缘热膨胀后

引起的侧向弯矩及结构的自重。事故工况下, 覆盖板除承受绝热纤维的压力外, 还承受失压引起的压差及地震载荷, 一、二次支撑螺栓承受的载荷与正常工况下基本相同。

为使绝热纤维达到预期的绝热效果, 要用覆盖板将其压紧, 因此, 绝热纤维对覆盖板有一定的压力, 大小为 0.015~0.025 MPa, 为校验支撑结构的强度, 压力可保守地取 0.025 MPa。蒸汽发生器内作为载热质的氦气运行压力为 7 MPa, 稳定运行时蒸汽发生器内部及绝热纤维内部的氦气压力均为 7 MPa, 当发生失压事故时, 蒸汽发生器内的压力迅速下降, 而绝热纤维中的氦气会有一部分滞留在纤维内部, 使覆盖板内外产生一定的压力差, 根据事故的泄压速率和结构的开孔面积等参数可计算出失压事故时作用于覆盖板上的压力约为 0.02 MPa。经初步计算, 绝热层支撑结构的刚度较大, 自重与地震载荷对结构的影响较小, 因此, 计算应力强度时, OBE 与 SSE 地震载荷均近似取 3 个正交方向上 1.0g 加速度的等效地震惯性力来进行计算^[3]。具体的载荷条件与各级使用限制列于表 1。

绝热层支撑结构使用在蒸汽发生器的位置不同, 所处环境温度也不同, 一部分绝热层支撑结构位于冷氦气流动的一侧, 一部分工作在高温氦气流动的一侧, 因此, 要根据不同的使用温度选择不同的绝热层支撑结构材料。低温侧覆盖板与一、二次支撑的材料为 $2^{1/4}\text{Cr-1Mo}$, 结构的设计温度为 250 °C; 高温侧覆盖板与一、二次支撑材料为 60Ni-22Cr-9Mo-3.5Cb, 设计温度为 750 °C, 两种材料在常温与设计温度下的材料机械性能^[4]列于表 2。

表 1 载荷条件

Table 1 Load conditions

条件	参数	数值
正常工况(A级使用限制)	绝热层压力/MPa	0.025
	自重/g	1.0
扰动工况(B级使用限制)	绝热层压力/MPa	0.025
	自重/g	1.0
	地震载荷	OBE
紧急工况(C级使用限制)	绝热层压力/MPa	0.025
	失压压力/MPa	0.02
	自重/g	1.0
事故工况(D级使用限制)	绝热层压力/MPa	0.025
	失压压力/MPa	0.02
	自重/g	1.0
	地震载荷	SSE

2.2 绝热层支撑结构有限元计算

对不同工况下的绝热层支撑结构, 使用有限元方法计算其应力分布情况。对绝热层支撑, 采用 8 节点四面体单元进行划分, 模型共有 74 349 个节点、84 295 个单元。计算由 TSV-solutions 程序完成, 根据 ASME-III N-3220 中的规定, 对应力计算结果进行分析(表 3、4)。在事故工况下, 低温侧与高温侧支撑结构的应力分布示于图 3。

从图 3 可看出, 在多种载荷作用下, 绝热层支撑结构最大应力强度出现在一次支撑垫片周围, 且下降较快, 结构其余部分的应力较低。从表 3、4 的分析结果来看, 低温侧的支撑结构在各种工况下的最大应力强度与应力限值的最大应力比均小于 1, 完全满足 ASME 规范的相关要求。高温侧的支撑结构在紧急工况(C级

表 2 $2^{1/4}\text{Cr-1Mo}$ 与 60Ni-22Cr-9Mo-3.5Cb 机械性能Table 2 Mechanical properties of $2^{1/4}\text{Cr-1Mo}$ and 60Ni-22Cr-9Mo-3.5Cb

参数	$2^{1/4}\text{Cr-1Mo}$		参数	60Ni-22Cr-9Mo-3.5Cb	
	20 °C	250 °C		20 °C	750 °C
抗拉强度 S_u , MPa	414.0	401.6	最低抗拉强度 S_t , MPa	759	241.9
屈服强度 S_y , MPa	207.0	185.6	屈服强度 S_y , MPa	379.5	120.9
许用应力 S_m , MPa	138.0	123.6	许用应力 S_m , MPa	184.2	60.0
弹性模量 E , GPa	211	195	许用应力 $S_t^{(1)}$, MPa	184.2	60.0
			弹性模量 E , GPa	207	159

注: 1) 热态条件下 3×10^5 h 的值

表 3 低温侧支撑结构应力分析结果

Table 3 Results of stress analysis at low temperature

条件	最大应力强度/MPa	应力限值	应力比
正常工况(A级使用限制)	38.6	1.0 S_m	0.31
扰动工况(B级使用限制)	38.7	1.1 S_m	0.34
紧急工况(C级使用限制)	70.4	1.2 S_m	0.43
事故工况(D级使用限制)	70.6	1.5 S_m	0.34

表 4 高温侧支撑结构应力分析结果

Table 4 Results of stress analysis at high temperature

条件	最大应力强度/MPa	应力限值	应力比
正常工况(A级使用限制)	41.1	$\min(S_t, S_m)$	0.68
扰动工况(B级使用限制)	41.3	$\min(S_t, S_m)$	0.69
紧急工况(C级使用限制)	72.8	$\min(S_t, 1.2S_m)$	1.21
事故工况(D级使用限制)	73.1	$\min(0.67S_t, 0.8S_t, R)$	0.30

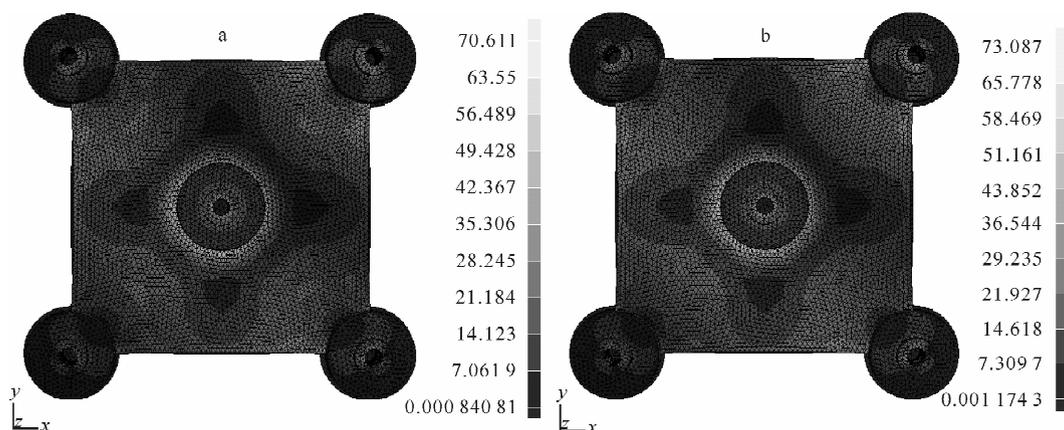


图 3 事故工况下低温侧(a)与高温侧(b)支撑结构的应力分布

Fig. 3 Stress distributions of supporting structure at low (a) and high (b) temperatures under accident condition

使用限制)下的最大应力比为 1.21,虽超出了应力限值,但在紧急工况下,蒸汽发生器的失压引起的载荷是瞬态载荷,从最高值 0.025 MPa 下降到 0 所需的时间为 20 h 以下,且随着压力的泄放,温度也随之降低,所以,失压载荷在短时间内超过许用应力的限值不会引起结构的永久性变形或破坏,高温侧的绝热层支撑结构也能满足规范要求。

3 结论

通过对绝热层支撑结构的分析,有限元计算结果表明,支撑结构在各种工况下均能保持结构的完整性与功能的可靠性。

参考文献:

[1] 陈伯清. 高温气冷堆的发展前景应予以关注[J].

能源与环境, 2006(2): 4-5.

CHEN Boqing. Developmental prospects for high-temperature gas-cooled reactor[J]. Energy and Environment, 2006(2): 4-5(in Chinese).

[2] 李广战. 氧化铝质陶瓷纤维的制备方法与应用[J]. 现代技术陶瓷, 2007(2): 32-35.

LI Guangzhan. Preparation and application of alumina ceramic fiber functional material [J]. Advance Ceramics, 2007(2): 32-35(in Chinese).

[3] 傅激扬. 蒸汽发生器蒸汽管箱的应力分析[J]. 核动力工程, 2001,22(5): 144-147.

FU Jiyang. Stress analysis of tube box of steam generator[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(5): 144-147(in Chinese).

[4] 美国机械工程师学会. ASME 核电规范与标准 III NH 分卷[S]. 上海: 科学技术文献出版社, 2004:17-25.