

微压供热堆压力容器结构设计与力学分析

郑罡, 孙培栋, 彭翊, 谢凯, 李玉全, 陈耀东

(国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: **目的** 对微压供热堆 HAPPY200 的压力容器进行结构设计及分析。**方法** 针对 HAPPY200 的特点, 满足堆工、热工等专业要求, 完成此微压供热堆本体的结构设计, 并根据 ASME 锅炉和压力容器规范(ASME B&PVC 规范)进行压力容器的力学计算校核。微压供热堆 HAPPY200 采用池壳结合的方式, 反应堆 200 MW 热功率两回路设计, 设计压力 1.6 MPa, 出口温度 120 °C。压力容器采用不锈钢材质、35 mm 壁厚的设计, 采用 ASME B&PVC 规范对其进行力学计算校核。**结果** 此结构中所得到的力学结果均小于 ASME B&PVC 标准所要求的限值。**结论** 微压供热堆 HAPPY200 的压力容器设计满足堆工、热工等专业要求, 其力学评定通过 ASME B&PVC 规范要求。

关键词: 核供热; 微压供热堆; ASME 锅炉和压力容器规范; 力学分析; 压力容器

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.001

中图分类号: TL353 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0001-06

Pressure Vessel Design and Analysis of Heating-reactor of Advanced Low-pressurized and Passive Safety System

ZHENG Gang, SUN Pei-dong, PENG Yi, XIE Kai, LI Yu-quan, CHEN Yao-dong
(State Power Investment Corporation Research Institute, Beijing 102209)

ABSTRACT: Objective To conduct pressure vessel design and analysis based on the heating-reactor, named Heating-reactor of Advanced low-Pressurized and Passive Safety system (HAPPY). **Methods** The design followed the design philosophy of integrating developed technologies, passive safety and high economic efficiency. According to the characteristics of HAPPY200, the pressure vessel design was conducted based on the requirements on reactor physics, thermal hydraulics and etc. The pressure vessel design was evaluated by the ASME Boiler and Pressure Vessel Code (ASME B&PVC). It was a 200MWth two-loop low-pressurized water reactor with low thermal parameters. The whole reactor vessel was deployed inside a shielding and cooling pool with thermal insulation measure. The design temperature and pressure were 120 °C and 1.6 MPa. Stainless steel was adopted for the pressure vessel and the thickness was 35 mm. **Results** The result obtained from the structure was smaller than the limit required in ASME B&PVC criteria. **Conclusion** The pressure vessel design of HAPPY200 fills the requirements from reactor physics, thermal hydraulics and etc. The stress analysis of the pressure vessel also meets the ASME B&PVC criteria.

KEY WORDS: heating-reactor; heating-reactor of advanced low-pressurized and passive safety system (HAPPY); ASME B&PVC; stress analysis; pressure vessel

近年来,由燃煤引发的雾霾等环境问题成为公众和政府面临的首要难题。随着未来城市化规模的持续

发展,我国的集中供热面积还将继续增加,使得由燃煤供热带来的环境问题变得愈发严峻^[1-2]。国际上对

燃煤排放的关注也持续升温,在2014年的《中美气候变化联合声明》中,中国首次从官方层面上承诺将在2030年左右实现碳排放总量的降低。因此,积极探索稳定可靠的清洁能源以替代燃煤供热是解决环境问题的最佳途径。核能作为一种清洁能源,在减少化石能源消耗以及污染物排放等方面的优势十分显著。因此,“以核代煤”实现城市供热,是减少碳排放、降低环境污染的有效措施之一^[3-4]。国家电投中央研究院于2015年启动了微压供热堆HAPPY200(Heating-reactor of Advanced low-Pressurized and Passive Safety System)的概念设计工作,遵循集成成熟技术、完全非能动安全和高经济性的设计理念,以满足未来市场的竞争需求。文中介绍了供热堆本体的设计,并按照ASME锅炉和压力容器规范(ASME B&PVC)的要求,对压力容器进行力学分析及评价。

1 微压供热堆HAPPY200的介绍

国家电投中央研究院于2015年启动了微压供热堆HAPPY200(Heating-reactor of Advanced low-Pressurized and Passive Safety System)的概念设计工作,遵循集成成熟技术、非能动安全和高经济性的设计理念,以满足未来市场的竞争需求。

微压供热堆HAPPY200采用了微加压闭式回路、低热工参数的总体技术方案。HAPPY200的供热原理如图1所示,系统采用微压核反应堆作为热源,采用200 MW热功率的反应堆设计,供热系统通过三个换热回路将反应堆产生的热量输送到城市附近的供热站,以实现城市供热。三个回路包括:反应堆主冷却剂系统(一回路)、中间换热回路(二回路)以及三回路市政供热管网。与常规供热管网不同,核供热管网在一回路(反应堆回路)与市政供热管网间增设了

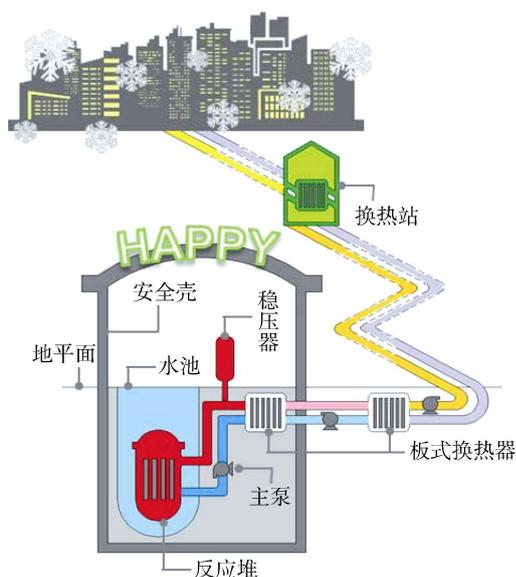


图1 微压供热堆HAPPY200供热原理

一个压力稍高的中间回路,作为阻断放射性物质泄露的防御屏障,以确保居民的用热安全。

如图2所示,HAPPY200堆本体置于一个大容积水池底部(地下),池水水深在15 m左右,安全系统基于大容积水池技术,具备非能动安全特性。反应堆水池是应对事故工况的重要热阱,一回路热量首先进入到反应堆水池并依赖于反应堆水池的冷却,反应堆水池逐渐升温。非能动池水空冷系统通过运行于池水中的冷却器和外置的空冷器,依靠自然循环将反应堆水池热量载出安全壳,将反应堆水池维持在一定温度下。该系统以安全壳外大气为最终热阱,不依赖于喷淋水等临时水源,实现了堆芯余热的无时限的热量载出。



图2 HAPPY200系统

HAPPY200的总体技术参数是在考虑了匹配大型城市热网需求以及满足远距离输热等系统设计条件的基础上进行方案分析确定的。一回路供回水温度为120℃和80℃(运行压力为0.6 MPa),中间回路的供回水温度为115℃和67℃(运行压力为0.8 MPa),三回路市政供热管网供回水温度为110℃和50℃(运行压力为0.6 MPa)。微压供热堆HAPPY200的主要参数见表1。单堆可提供 3×10^6 GJ的年供热量,满足 $5 \times 10^6 \sim 7 \times 10^6$ m²的供热需求。

表1 HAPPY200主要技术参数

主要技术参数	数值
单堆供热能力/GJ	3×10^6
单堆供热面积/m ²	$5 \times 10^6 \sim 7 \times 10^6$
反应堆运行/设计压力/MPa	0.6/1.6
堆芯进出口温度/℃	80/120

HAPPY200为两环路设计,反应堆压力容器布置至于水池底部。为减小主回路系统热损失,同时为控制棒驱动机构隔离水环境,在压力容器外布置有防水套筒。一体化堆顶固定于RPV底部支座。HAPPY200

堆本体的效果如图 3 所示,反应堆堆本体包括压力容器及堆内构件。其中压力容器包括上封头、下封头、下接管段、筒体、上接管段等。上封头上有用于支承一体化堆顶的支撑座及用于压力容器吊装的吊耳。

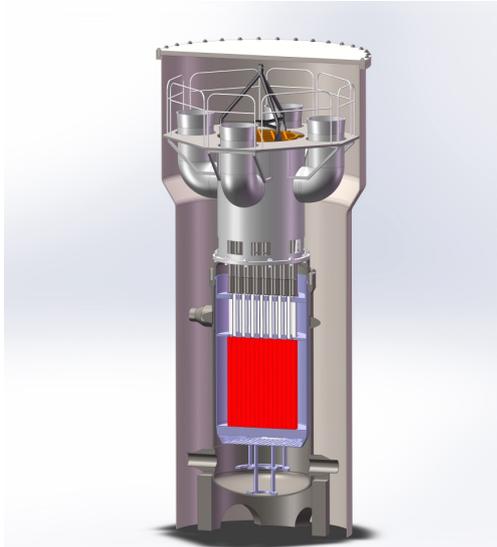


图 3 HAPPY200 堆本体效果

对于上封头的设计,其设计压力为 1.6 MPa。如采用球形封头,则仅需很薄的壁厚即可满足此承压要求。同时,考虑到上封头贯穿件的安装要求,必须要有足够的壁厚来对贯穿件进行支撑,同时由于平封头的加工制造成本更低,所以此压力容器封头采用平封头设计。压力容器基本尺寸如图 4 所示,其中平封头壁厚 135 mm,筒体壁厚 35 mm。压力容器属于核安全 1 级、抗震 I 类,文中按照 ASME 锅炉和压力容器规范(ASME B&PVC)第 III 卷的要求,对 HAPPY200 容器的主要部件(包括筒体、上下封头、进水接管)进行应力分析和评价^[5-7]。

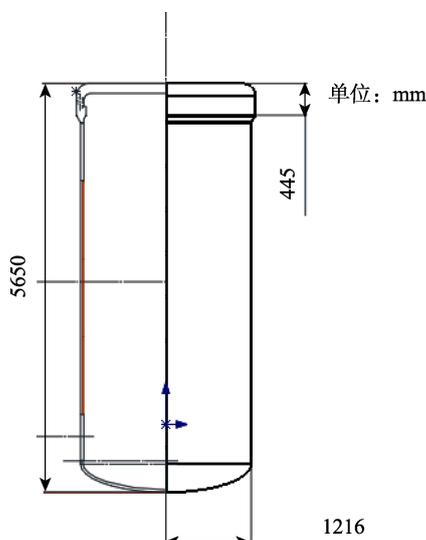


图 4 压力容器基本尺寸

2 应力分析与评价

2.1 选材

HAPPY200 压力容器设计压力低(1.6 MPa),因此其壁厚较之压水堆的压力容器明显减薄。压水堆压力容器采用低合金钢内壁堆焊不锈钢作为防蚀层,HAPPY200 容器的设计壁厚为 35 mm。此壁厚较薄,不适用内壁堆焊不锈钢的工艺。HAPPY200 压力容器设计采用 SA-182 F316LN,其材料属性见表 2。

表 2 设计工况(160 °C)下压力容器的材料属性

材料	杨氏模量/GPa	泊松比	S_m /MPa	S_y /MPa
SA-182 F316LN	185	0.3	138	156

2.2 载荷组合

ASME B&PVC 压力容器设计工况中需考虑的载荷组合为:内部设计压力+自重+外部机械载荷,现初步设计中仅考虑了设计内压和自重。

2.3 有限元模型

根据压力容器模型的特点,将其分成二维整体模型和局部三维模型。二维整体模型主要作用是评价压力容器壳体的力学性质,局部三维模型用于评价接管处的力学性质。

压力容器整体构造较为规整,因此可以将其简化为轴对称二维模型进行计算。对于接管处将会在局部建模中进行验证。二维整体模型如图 5 所示。网格包括有 15 241 个节点和 4578 个单元。对该模型进行轴对称约束,在底部支撑位置进行轴向的约束。

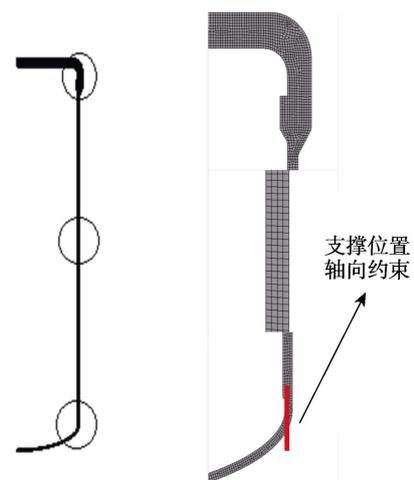


图 5 压力容器的整体二维模型

针对进水接管的评价,建立了如图 6 所示的局部三维模型,对模型边界进行全自由度的约束。因模型所关注的位置为接管处,所以此远端边界的全自由度约束是适用的。网格包括 266 824 节点和 156 356 个单元。

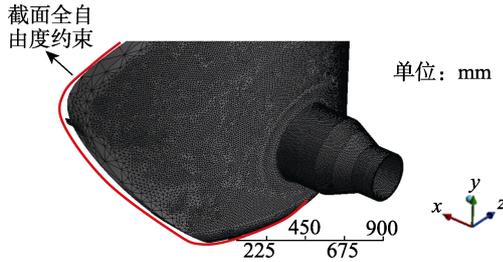


图6 进水接管局部三维模型网格划分

2.4 应力分析结果

壳体在设计工况下的应力如图7所示, 应力最大值发生在下封头过渡段。进水接管在设计工况下的应力如图8所示, 最大应力点发生在管嘴根部。发生最大应力的位置主要位于路径9—12, 参考路径10结构不连续处的评价方法, 符合强度设计要求。

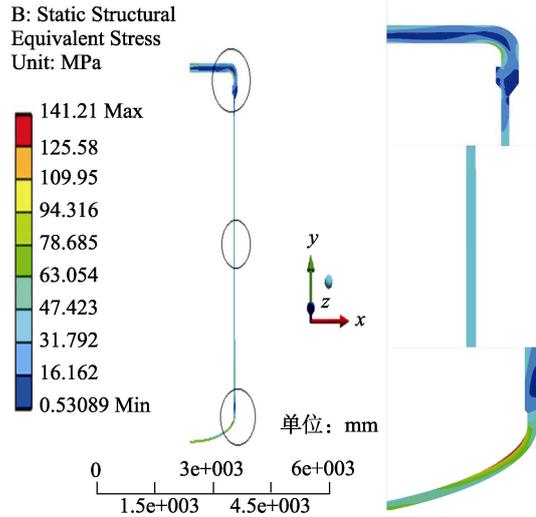


图7 上封头、下封头和壳体中的应力分布

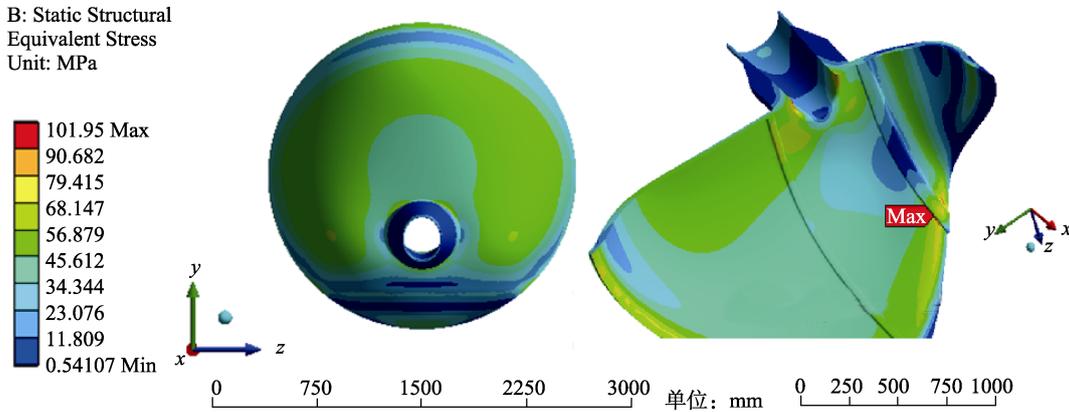


图8 进水接管应力

2.5 应力评价限值

压力容器主体部位的应力限值(表3)参见《ASME 锅炉及压力容器规范》第III卷第一册NB分卷一级部件NB-3226^[7]。

表3 应力限值

工况	应力强度类别	
	一次薄膜 P_m, P_1	一次薄膜 + 弯曲 $P_m (P_1) + P_b$
设计工况	$P_m \leq S_m$ $P_1 \leq 1.5S_m$	$P_m + P_b \leq 1.5S_m$ $P_1 + P_b \leq 3S_m$

注: S_m 为许用应力强度; P_m 为总体一次薄膜应力强度; P_1 为局部一次薄膜应力强度; P_b 为弯曲应力强度

总体一次薄膜应力强度是由设计内压和其他规定的设计机械载荷引起的总体一次应力沿其截面厚度的平均值推导而得, 但不包括所有二次应力和峰值应力。在确定应力强度值之前, 先对应力分量取平均值。此应力强度的许用值为在设计温度下的 S_m 。

局部一次薄膜应力强度是由设计压力和规定的

设计机械载荷引起的局部一次应力沿其截面厚度的平均值推导而得, 但不包括所有的热应力和峰值应力。在确定应力强度值之前先对应力分量取平均值。此应力强度的许用值为 $1.5S_m$ 。

一次薄膜(总体或局部的)加一次弯曲应力强度是由设计压力和其他规定的设计机械载荷引起的总体或局部一次薄膜应力加一次弯曲应力沿其截面厚度上的最大值推导而得, 但不包括所有的二次应力和峰值应力。

2.6 应力评价

为评价压力容器的力学性质, 需要对结构选取的路径进行应力线性化。对壳体选取路径如图9所示, 另外选取路径7沿壳体中部厚度方向。壳体路径1、2、6、7、8、13、14可认为处于结构连续处, 其应力线性化所得的薄膜应力都应归为总体薄膜应力, 所得弯曲应力都归为一次弯曲应力。其余路径都处于结构不连续处, 所得的薄膜应力都应归为局部薄膜应力, 得到的弯曲应力都归为二次应力。对壳体的14条路径进行应力线性化分析, 可得到在设计工况下各

路径的应力线性化结果，见表 4。最大总体一次薄膜应力强度为 80.95 MPa，位于沿着下封头中部的路径 14，其值低于 S_m (138 MPa) 标准。最大总体一次薄膜应力强度加上弯曲应力强度为 102.77 MPa，也位于路径 14，该值低于 $1.5S_m$ (207 MPa) 的标准。最大局

部一次薄膜应力强度为 91.05 MPa，位于下封头过渡段的路径 10，其值也低于 $1.5S_m$ (207 MPa) 标准。最大局部一次薄膜应力强度加上弯曲应力强度为 147.81 MPa，也位于路径 10，该值低于 $3S_m$ (414MPa) 的标准。所有应力分布符合 ASME B & PVC 第三卷的要求。

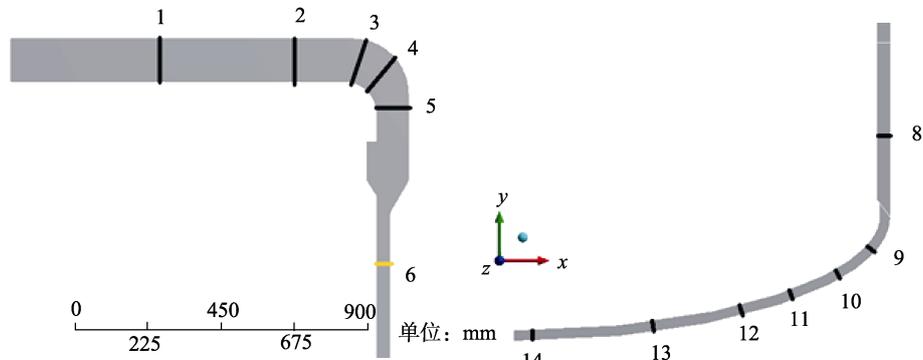


图 9 压力容器壳体应力线性化路径（路径 7 位于筒体的中间点）

表 4 壳体应力强度评价

路径（结构连续处）	总体一次薄膜应力强度/MPa		（总体一次薄膜应力强度+弯曲应力）/MPa	
	P_m	限值 (S_m)	P_m+P_b	限值($1.5S_m$)
1	9.26	138	60.94	207
2	12.60	138	36.45	207
6	37.60	138	40.09	207
7	52.22	138	53.82	207
8	18.08	138	34.79	207
13	65.83	138	44.20	207
14	80.95	138	102.77	207

路径（结构不连续处）	局部一次薄膜应力强度/MPa		（局部一次薄膜应力强度+弯曲应力）/MPa	
	P_l	限值 ($1.5S_m$)	P_l+P_b	限值($3S_m$)
3	12.13	207	52.01	414
4	8.22	207	53.43	414
5	23.19	207	73.09	414
9	80.60	207	129.05	414
10	91.05	207	147.81	414
11	78.85	207	111.09	414
12	65.83	207	83.26	414

对进水接管选取应力线性化路径，如图 10 所示，

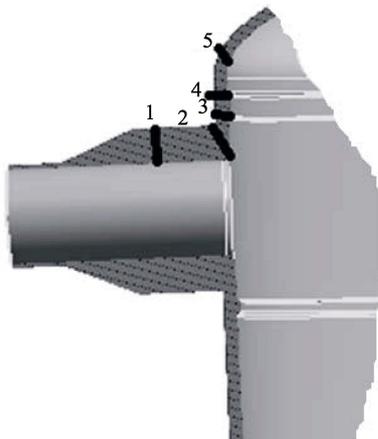


图 10 进水接管应力线性化路径

所选路径都处于结构不连续处，所得的薄膜应力都归为局部薄膜应力，所得弯曲应力都归为二次应力。对接管的五条路径进行应力线性化分析，可得到设计工况下各路径的应力线性化结果，见表 5。最大局部一次薄膜应力强度为 45.56 MPa，位于接管根部的路径 2，其值低于 $1.5S_m$ 标准。最大局部一次薄膜应力强度加上弯曲应力强度为 71.62 MPa，也位于路径 2，该值低于 $3S_m$ 的标准。所有应力分布符合 ASME B & PVC 第三卷的要求。

3 结论

文中介绍了国家电投集团科学技术研究院自主研发的微压供热堆 HAPPY200 的概念设计工作，满

表5 进水接管应力强度评价

路径	局部一次薄膜应力强度/MPa		(局部一次薄膜应力强度+弯曲应力)/MPa	
	P_1	限值 ($1.5S_m$)	P_m+P_b	限值($3S_m$)
1	17.00	207	38.75	414
2	45.56	207	71.62	414
3	14.19	207	58.91	414
4	33.54	207	56.52	414
5	26.59	207	29.05	414

足堆工、热工等专业要求,完成了此微压供热堆堆本体的结构设计,并根据 ASME 锅炉和压力容器规范 (ASME B&PVC 规范) 进行压力容器的力学计算校核。结果表明,压力容器应力分析结果完全符合 ASME B&PVC 规范要求。

参考文献:

- [1] YANG S, MA Y L, DUAN F K, et al. Characteristics and Formation of Typical Winter Haze in Handan, one of the Most Polluted Cities in China[J]. In Science of The Total Environment, 2018, 613-614: 1367-1375.
- [2] ZHANG Jian, LIU Lei, WANG Yuan-yuan, et al. Chemical Composition, Source, and Process of Urban Aerosols during Winter Haze Formation in Northeast China[J]. In Environmental Pollution, 2017, 231(1): 357-366.
- [3] SHI Yong-chang, CHANG Hua-jian, DONG Duo. Some Features of the Nuclear Heating Reactor (NHR) Design in China[J]. In Nuclear Engineering and Design, 1995, 155(3): 597-602.
- [4] ZHANG Yi-xuan, CHENG Hui-ping, LIU Xing-min, et al. Swimming Pool-type Low-temperature Heating Reactor: Recent Progress in Research and Application[J]. In Energy Procedia, 2017, 127: 425-431.
- [5] 易亮, 向中凡. 基于 ANSYS 的典型压力容器应力分析 [J]. 企业技术开发, 2012, 31(2): 84-85.
- [6] 韩敏. 利用 ANSYS 软件对压力容器进行应力分析[J]. 煤矿机械, 2008, 29(1): 73-74.
- [7] 谢业东, 农琪. 基于 ANSYS 的典型压力容器应力分析设计[J]. 广西轻工业, 2010(3): 24-26.