

核聚变发电厂常规岛主厂房土建设计研究

熊雄[✉]

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的]核聚变发电是未来核能利用的一种方式。为了研究其常规岛土建设计最优方案, 需要结合过往常规火电, 以及其他核电常规岛的设计技术进行探讨。[方法]通过从主厂房结构体系、汽机房屋盖结构、汽轮发电机基座选型以及主厂房防火设计四个方面开展方案对比分析。[结果]提出了核聚变发电厂常规岛相应的土建设计方案和设计建议。[结论]成果可以为类似工程项目提供参考。

关键词: 核聚变发电厂; 常规岛; 主厂房; 土建结构设计

中图分类号: TL4; TU352

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0090-05

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Civil Structure Design of Main Building for Fusion Power Plant Conventional Island

XIONG Xiong[✉]

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Using nuclear fusion to generate electricity is a promising way for nuclear energy in the future. In order to research the best civil structure design, it is necessary to discuss techniques from fossil fuel power plant and conventional island of other NPPs. [Method] Through comparison analysis, structure system of main building, roof structure, TG foundation and fire protection design were discussed. [Result] Conceptual design for civil structure and engineering advice are also given. [Conclusion] The research in this paper can provide reference for similar project.

Key words: fusion power station; conventional island; main building; civil structure design

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

利用核聚变发电是未来核能利用的一种方式。核聚变发电厂常规岛主厂房由汽轮机厂房和除氧间以及辅助跨组成。主厂房横向布置见图1, 简化起见图1中省略了辅助跨。汽机房跨度31.5 m, 中间层标高6.9 m, 运转层标高14.5 m。除氧间为一单跨框架结构, 跨度9 m。作为一种新型核电主厂房, 其技术来源于常规电厂长期积累的技术与经验, 又以其他核电常规岛技术为基础。本文结合主厂房的结构布置, 从主厂房结构体系、汽机房屋盖结构、汽轮发电

机基座选型以及主厂房防火设计四个方面进行探讨。

1 主厂房结构体系

方案一: 汽机房平台采用钢结构, 中间层楼面采用钢格栅形式, 运转层楼面采用压型钢板组合楼板; A列柱采用钢筋混凝土柱。除氧间采用钢筋混凝土框架结构, 楼面采用混凝土板。这种形式为核电常规岛采用较多的结构型式。除氧间采用钢筋混凝土框架, 为整体常规岛提供了主要的抗侧力刚度, A列柱与除氧间一起组成横向框排架结构。汽机房

收稿日期: 2022-05-11 修回日期: 2022-06-08

基金项目: 中国能建广东院科技项目“核聚变发电厂常规岛概念设计技术研究”(EV05571W)

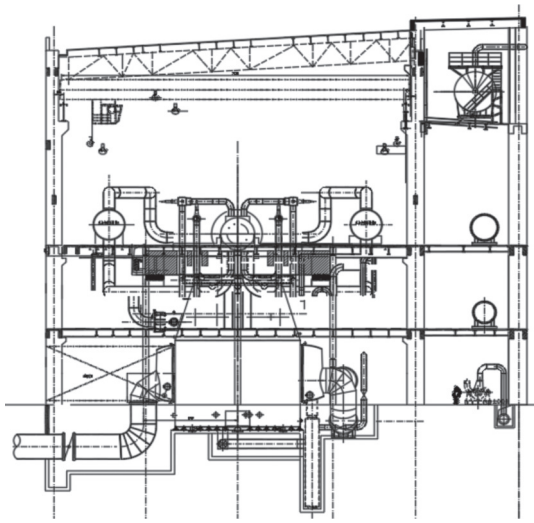


图1 核聚变常规岛主厂房剖面图

Fig. 1 Sections of main building of FPP conventional island

钢梁与A列和B列柱铰接。这种型式为钢筋混凝土结构与钢结构组合体系。

方案二:如同方案一,A列柱与除氧间一起组成横向框排架结构。汽机房平台也采用钢筋混凝土框架结构,汽机房平台梁与A列和B列柱刚接。并与纵向框架共同构成一个空间结构体系。这种布置造价最节省。

方案三:主厂房采用全钢结构。其中除氧间采用钢框架支撑结构,汽机房平台采用钢结构,A列柱采用钢柱。随着建筑防火要求的日趋严格,这种布置造价最高。

作为核聚变主厂房,主厂房结构体系可优先采用方案一。主要考虑如下因素:

1) 汽机房平台采用钢结构,可发挥钢结构承载力高,适应柱距大的汽机房工艺系统布置。可有效降低主梁高度,增加梁底可利用空间,从而降低运转层标高,使得整个汽机房布置更加紧凑,节约主要管道和线缆材料,从而节省造价。

2) 汽机房平台总体高度不大,采用钢结构时,除了自身部分设置钢支撑外,主要以A列柱和除氧间框架作为侧向支撑。侧向刚度不是主要控制因素,对钢结构用量影响不大。

3) 汽机房平台采用钢结构可利于工艺管道和设备生根。

总体来说,方案一在汽机房平台和除氧间框架上,各自充分发挥了钢结构和钢筋混凝土结构的优势,回避了各自的劣势,取得了较好的平衡,因此

推荐。

2 汽机房屋盖结构

汽机房屋盖为一大跨度结构。根据屋面材料不同,可以分为轻型屋面和重型屋面。某二代加核电汽机房跨度为44 m,厂房屋面以汽机房中心线为顶点向两边起坡,采用双坡梯形钢屋架体系。汽机房屋面檩条直接支承在屋架的节点上,辅助间的屋面檩条直接支承在其屋面钢筋混凝土屋面梁上。屋面板采用双层(中间夹层保温隔热层)镀锌彩色压型钢板。屋架两端与主框架按铰接连接。屋架的稳定性由屋面支撑系统(上、下弦支撑以及水平、垂直系杆)保证。汽机房屋面檩条直接支承在屋架的节点上,辅助间的屋面檩条直接支承在其屋面钢筋混凝土屋面梁上。

对于汽机房大跨度屋架,周玉^[1]分析了屋架支座节点次应力的影响,提出了改进支座节点的措施。实际上,对于大跨度屋架,不可忽视的是屋架系统与下部厂房结构的协同作用。由于两端支座铰接的屋架,在承受竖向荷载时,下弦受拉伸长,上弦受压缩短,支座竖杆产生朝向跨中的微小转动,以及支座向外侧的平动。支座处构造越接近理想铰接,则这一转动对整体计算的影响就越小。而平动的影响则与下部厂房在柱顶提供的侧向刚度有关。厂房柱对屋架支座的水平约束越强,则次应力越大,反之越小。大量的计算实例表明,对于常规的两排立柱的排架体系(如EPR采用的单跨形式^[2]),排架的侧向刚度较小,不足以约束屋架支座处的水平位移,此时次应力很小,屋架系统和下部结构可独立分析。

应注意到,在山墙和边屋架同时设置时的特殊情况。如图2所示,排架柱由于山墙梁柱的约束而在山墙平面具有很强的侧向刚度,此时屋架的支座水平力,极限接近与两端完全铰接的屋架支座反力。此时竖向力200 kN,而水平力可达260 kN。这部分次应力,对屋架支座竖杆以及排架柱的受力都极为不利,应在施工组织中要求屋架系统安装完毕后再固定屋架支座,来释放次应力。施工时,可先安装并固定好中间榀屋架,最后吊装山墙屋架,但支座不固定,待屋面系统和屋面板完全安装后,再固定支座,最终屋架支座竖杆和排架柱承受的水平力为最大滑动摩擦力,约为20 kN,可极大减小次应力的影响。

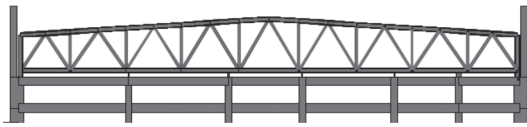


图2 山墙与边屋架同时设置

Fig. 2 Gable wall frame and roof truss

目前,沿海地区的核电项目,考虑到屋面板维护使用寿命^[3]、抗风揭以及屋面漏水^[4]等问题,采用了压型钢板为永久底模的现浇混凝土屋面板,荷载更大,此问题更为突出,应注意计算模型与施工工序的匹配。

3 汽轮发电机基座结构选型

核电汽轮发电机组有全速机和半速机两种方案,全速机转速为 3 000 r/min,半速机转速为 1 500 r/min。根据《核电厂常规岛设计规范》(GB/T 50958—2013)^[5],1 000 MWe 级机组,宜采用半速机组,1 000 MWe 以下等级机组,宜采用全速机组。主要原因是随着压水堆机组功率等级的不断提高,全速机的排汽面积由于受到末级叶片长度和低压缸数量的限制,已经不能满足大型压水堆机组的工程需要,因此半速机在近年来大型二代加和三代核电中得到了广泛采用。核聚变发电厂,暂定为 350 MW 等级,因此汽轮机可采用全速机组。

常规火电中大量的 350 MW 机组全速机采用了刚性基座,即采用大质量来抑制振动^[6]。基于这一理念,基座的本身构件尺寸大,采用大量的异形构件以贴合设备的外形,布置紧凑。随着机组等级的提高,半速机的广泛应用,伴随而来的是弹簧隔振技术在汽轮发电机组基础中的应用。采用弹簧隔振,可使得机器与基座台板的固有频率由 20~25 Hz 减小到 3~3.5 Hz,远离了机器的工作频率,避免了共振的发生,起到了很好的隔振效果。对于刚性基座和弹簧隔振基座上部结构进行经济性对比见表 1。可见 350 MW 机组基座尺寸比较小,采用弹簧隔振基座造价高于刚性基座。从节省造价的角度可采用刚性基座。

应该注意到,采用弹簧隔振后,汽机基座柱可兼做汽机房平台柱,汽机房钢平台与汽机基座之间采用滑动支座连接,甚至可以采用基座与厂房框架联合布置的形式^[7]。从而简化了汽机房平台的布置。另外,对于高烈度地震区采用弹簧隔振基座更有优

势。台板在地震作用下的响应,不论是哪类场地,其对地震加速度的放大系数最小,为使得机组具有广泛的厂址适应性,则推荐采用弹簧隔振基座。

表 1 基座经济性对比

Tab. 1 Economic comparison of TG foundation

项目	工程量和造价	
	刚性基座	弹簧隔振基座
台板/m ³	480	410
框架柱/m ³	280	200
中间层/m ³	240	150
隔振弹簧组/万元	—	180
造价合计/万元	410	490

4 主厂房防火设计

根据《核电厂常规岛设计防火规范》(GB 50745—2012)^[8],汽轮发电机厂房地地上部分,火灾危险性分类为丁类,耐火等级为二级;油处理室,火灾危险性分类为丙类,耐火等级为二级;汽轮发电机厂房地下部分,火灾危险性分类为丁类,耐火等级为一级。

为方便对比,根据《火力发电厂与变电站设计防火标准》(GB 50229—2019)^[9],一般燃煤或燃机电厂的汽机房和除氧间,火灾危险性分类为丁类,耐火等级为二级;油处理室,火灾危险性分类为丙类,耐火等级为二级;油浸变压器室,火灾危险性分类为丙类,耐火等级为一级。可见,核电厂常规岛的防火规定,等同于一般火力发电厂。

参考《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)(2018 年版)^[10]表 3.2.1 条,耐火等级一级时,柱、梁和楼板的耐火极限应分别达到 3 h、2 h 和 1.5 h;屋顶承重构件耐火极限 1.5 h。

耐火等级为二级时,柱、梁和楼板的耐火极限应分别达到 2.5 h、1.5 h 和 1 h;屋顶承重构件耐火极限 1 h。

而实际上,考虑到核电的特殊性,GB 50745—2012 规范颁布之前,一直以来,核电常规岛主厂房都采取了高于一般建筑或常规火力发电厂的防火标准。举例如下:

1) 耐火极限 3 h 防火区域,包括汽机房润滑油室、0.0 m 层电动给水泵区域、和汽轮发电机基座。

2) 其他区域构件耐火极限按如下设计:

a) 主框架混凝土柱:耐火极限 2.5 h;

- b) 主框架混凝土梁:耐火极限 2.0 h;
- c) 汽机房钢平台:
钢柱及柱间支撑耐火极限按 2.5 h;
钢梁及其他楼面支撑耐火极限按 1.5 h;
混凝土楼板耐火极限按 1.0 h。
- d) 行车梁:耐火极限 1.5 h;
- e) 屋架、屋面支撑系统:耐火极限 1.5 h;
- f) 檩条:耐火极限 1.0 h。

可见,润滑油室以及润滑油管道阀门密集区域,总体按耐火等级一级考虑,梁板柱均按柱子的耐火极限,其他区域柱子按耐火等级二级,梁按耐火等级一级。

对于核聚变厂房,不设置地下室,鉴于汽机房平台采用钢结构,建议按 GB 50745—2012,除了油处理室外,其他均按丁类,耐火等级定为二级。钢结构构件防火采用在钢构件表面涂防火涂料来满足不同的耐火极限要求。

值得注意的是,《混凝土结构通用规范》(GB 55008—2021),作为全文强制性执行规范,自 2022 年 4 月 1 日起正式实施。第 2.0.10 条明确要求混凝土保护层厚度要满足混凝土构件的耐久性能及防火性能要求。

对不同防火极限的混凝土构件保护层最小厚度要求,可参照《建筑设计防火规范》:耐火极限为 3 h 的混凝土梁为 40 mm,2 h 为 25 mm;耐火极限为 1.0 h 的混凝土楼板保护层采用 15 mm;3 h 防火极限的润滑油室现浇混凝土内壁、底板内表面采用 40 mm,外表面保护层可按耐火极限 2 h 采用 20 mm;对混凝土柱防火,柱截面大小应满足相应的防火要求。

5 结论

1) 核聚变主厂房可采用钢筋混凝土框排架结构,汽机房平台采用钢结构。

2) 汽机房大跨度屋架,应考虑屋架支座处水平位移约束的影响,在屋架安装过程中释放次应力,以减小对主厂房结构的影响。

3) 汽轮发电机采用全速机,基座并采用弹簧隔振系统。汽机房平台钢梁支承在基座上。

4) 主厂房防火可按一般核电常规岛汽轮机厂房地上部分设计。

参考文献:

- [1] 周玉,林立孚,彭雪平. 常规岛钢屋架支座铰接节点次应力分析 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(增刊1): 68-72.
ZHOU Y, LIN L F, PENG X P. Analysis of secondary stress of hinge support for steel truss of nuclear island [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(supp. 1): 68-72.
- [2] 宋扬,张略秋. EPR常规岛主厂房钢结构设计 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(增刊1): 140-143.
SONG Y, ZHANG L Q. Design of steel structure of main power-house for Europe pressure reactor conventional island [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(supp. 1): 140-143.
- [3] 文双玲,任玉苓,柴昶. 建筑用彩色压型钢板的使用寿命探讨 [J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 145-148. DOI: 10.13204/j.gyjz201912025.
WEN S L, REN Y L, CHAI C. Discussions on the service life of prepainted profiled steel sheet for building [J]. Industrial Construction, 2019, 49(12): 145-148. DOI: 10.13204/j.gyjz201912025.
- [4] 黄唯,吴耀华. 金属屋面在我国工程应用中存在的主要问题及分析 [J]. 工业建筑, 2013, 43(6): 150-156. DOI: 10.7617/j.issn.1000-8993.2013.06.031.
HUANG W, WU Y H. The main existing problems and analysis of engineering applications for metal roofing in China [J]. Industrial Construction, 2013, 43(6): 150-156. DOI: 10.7617/j.issn.1000-8993.2013.06.031.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 核电厂常规岛设计规范: GB/T 50958—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of conventional island for nuclear power plant: GB/T 50958—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [6] 尹春明,钱萍. 新型核电站常规岛结构设计发展分析 [J]. 电力勘测设计, 2010(2): 67-72. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9913.2010.02.018.
YIN C M, QIAN P. Development analysis of routine island structure design in new type of nuclear power station [J]. Electric Power Survey & Design, 2010(2): 67-72. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9913.2010.02.018.
- [7] 陈昆鹏,林凡伟,祝红山. 某电厂主厂房与汽机平台联合结构抗震性能数值分析 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2017(增刊1): 332-336.
CHEN K P, LIN F W, ZHU H S. Seismic performance of a power plant building with jointly configured turbine foundation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017(supp. 1): 332-336.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质

量监督检验检疫总局. 核电厂常规岛设计防火规范: GB 50745—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of fire protection for conventional island in nuclear power plant: GB 50745—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.

- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 火力发电厂与变电站设计防火标准: GB 50229—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for design of fire protection for fossil fuel power plants and substations: GB 50229—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质

量监督检验检疫总局. GB 50016—2014(2018版): 建筑设计防火规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design on building fire protection and prevention: GB 50016 —2014(2018 edition) [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.

作者简介:



熊雄

熊雄 (通信作者)

1982-, 男, 土家族, 湖南张家界人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力土建结构设计(email)10049537@qq.com。

