

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.04.019

浅谈核电站常规岛厂房设计

刘中

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 常规岛作为核电站的三大组成部分之一, 其建筑结构设计水平直接关系到整个核电站的优劣, 结合近二十年的核电站常规岛厂房设计经验, 阐述了常规岛屋盖结构、屋面和外墙面、地下结构防水和厂房结构型式比较等方面的设计经验及需注意的问题, 可供广大核电站设计和建设人员在工作中参考和借鉴。

关键词: 核电站; 常规岛; 建筑结构设计

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0107-04

Discussion on Conventional Island Building Design for Nuclear Power Plant

LIU Zhong

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

Abstract: The conventional island is one of three parts of nuclear power plant, the architectural and structural design level of conventional island will concern the whole nuclear power plant level. The author has nearly twenty year experience on convention island building design of nuclear power plant, and studies design experience and problems we should pay attention to in several field of convention island building design of nuclear power plant, including roof structure, roof covering and external wall, underground structures waterproof and building structure styles comparison of convention island building, etc. These experiences can be used as reference for designer and other concerned people of nuclear power station.

Key words: nuclear power plant; convention Island; architectural and structural design

核电作为一种清洁高效的能源, 在我国沿海地区已得到大范围的采用。目前, 为配合国民经济发展和低碳减排等环保政策的需要, 我国核电站的建设呈稳步快速发展趋势。作为核电站的三大组成部分之一常规岛(还有核岛和 BOP), 其厂房设计的优劣直接关系到核电站可否安全可靠的运行。本文结合笔者近二十年的核电站常规岛厂房设计经验, 从常规岛屋盖结构、屋面和外墙面、地下结构防水和厂房结构型式等方面, 简要介绍了相关设计经验及需注意的问题。

1 常规岛屋盖结构设计

核电站常规岛厂房屋盖由于跨度大, 通常可采

用钢屋架或钢桁架或网架结构。从节约用钢量的角度考虑, 采用网架结构是合适的选择。如果选择网架结构, 需考虑以下几个方面的问题。

1.1 设计软件的选用

目前国内网架设计可用软件包括 3D3S、MST-CAD 等软件, 一般采用浙江大学空间结构研究中心研发、在本行业内使用较广泛的软件 MSTCAD。该软件具有友好的中文用户界面, 建模十分方便, 能很便捷地完成设计、分析和计算, 并配有符合网络结构特色的菜单功能命令, 涵盖前处理、设计分析计算及施工图绘制等模块。在设计过程中能与用户实现图形交互, 输入结构尺寸、杆件优化设计及结构施工图绘制等操作都很直观、方便, 已经在许多工业厂房中被采用。

该软件可考虑室内外温差引起的温度应力、风荷载, 可以节点活荷载形式(单独分 1 组)考虑核电站常规岛汽机房大型桥式吊车荷载。针对海边核电

收稿日期: 2015-05-17

作者简介: 刘中(1966), 男, 湖北松滋人, 高级工程师, 学士, 主要从事电厂咨询、设计及项目管理等工作(e-mail)liuzhong@gedi.com.cn。

厂空气中氯离子浓度高、腐蚀性强的恶劣大气环境,采用该软件设计常规岛汽机房屋盖网架结构时,杆件及节点球设计应力系数一般采用 0.80 ~ 0.85。

1.2 计算模型的选取

目前大型工业厂房屋盖采用网架结构时,一般都采用屋盖与柱整体建模甚至下部楼层整体建模,进行整体计算。柱顶支座的选取必须与网架和柱端实际连接方式相吻合。

1.3 结构设计

屋顶风荷载、雪荷载、活荷载与吊车荷载均可单独考虑并进行组合。汽机房设置多台吊车时,要考虑多台吊车荷载的组合。温度应力通常按实际室内外温差考虑。设计必须尽可能考虑选择合适的季节安装。地震作用可直接输入抗震设防烈度所对应的地震加速度求得杆件应力和支座反力,也可采用反应谱分析法进行精确计算。防火、防腐设计同钢屋架结构,但必须考虑防腐面漆和防火涂料的相容性。针对海边核电站空气中氯离子浓度高、腐蚀性强的恶劣大气环境,通常采用加厚防腐涂料厚度和降低杆件及节点球设计应力系数的方法来处理。

地震作用的设计原则^[1]:对抗震设防烈度为7度及以下地区,可不进行网架结构的水平和竖向抗震验算;对抗震设防烈度为8度或9度的地区,除8度地区周边支承的60m以下跨度网架可不进行水平抗震验算外,其他情况都必须进行网架结构的水平和竖向抗震验算。

对于不需要精确计算地震作用的周边支承常规岛网架屋盖结构,竖向地震作用标准值^[2]计算如下:

$$F_{Evki} = \pm \psi_v G_i \quad (1)$$

式中: F_{Evki} 为作用在网架第*i*节点上竖向地震作用标准值; ψ_v 为竖向地震作用系数,按表1取值; G_i 为网架第*i*节点的重力荷载代表值,其中永久荷载取100%,雪荷载及屋面积灰荷载取50%,屋面活荷载不计入。

1.4 加工制作和施工安装

构件制作、运输、安装,应完全按业主要求的工期来完成。

施工安装工作通常采用常规岛汽机厂房的桥式吊车作为可移动安装平台的骨架,桥式吊车又必须承担汽机房内汽机构件(转子、定子等)及各种辅机

的起吊、就位、安装任务,故必须考虑桥式吊车的综合利用,统筹安排常规岛汽机厂房土建施工和设备安装进度计划。

表1 竖向地震作用系数 ψ_v

Table 1 Vertical Seismic Factor

设防烈度	场地类别		
	I	II	III、IV
8	—	0.08	0.10
9	0.15	0.15	0.20

考虑到核电厂常规岛汽机厂房的重要性,屋盖网架结构应选择实力强、信誉好、经验丰富的大型钢结构公司来承担网架的加工制作和施工安装工作。对于综合实力强的大型网架公司,可由其承担从节点设计、加工制作到施工安装的全部工作(包括屋面保温隔热压型钢板),但网架设计计算书和图纸须经设计院审核。

对于全钢结构常规岛厂房,为减少协调工作,缩短施工工期,可考虑由一家综合实力强的大型网架公司承担全部钢结构的加工制作和施工安装工作。

1.5 其他问题

1) 屋面变坡会导致杆件种类较多

首先,对于大跨度的网架,为了常规岛汽轮发电机房屋面排水需要,建筑专业一般不允许结构专业屋面采用单坡布置。

其次,屋面双坡布置情况下,如何减少杆件种类,可以通过对不同网架方案作经济比较得出结论。因为杆件种类多,加工费、安装费高,但用钢量省。

最后要指出,杆件种类较多(但不宜过多),施工安装除工期可能稍长一些外,但假如总体上更经济,也是完全可行的。

2) 选择防水效果较理想的屋面材料

从各类工程屋面材料中选择防水效果较好的屋面材料,通常采用夹芯复合压型钢板(下节将详细介绍),分为两种:一种是工厂制作,现场拼接;一种是现场复合,沿压型钢板纵向无搭接接头。屋面无需另加防水保护层,但必须在安装风机处把接缝的防水处好。

1.6 应用实例

某核电站常规岛汽轮发电机房屋盖采用网架

结构(跨度 39 m、长度 100 m, 柱距 10 m, 山墙柱距约 10 m, 采用正交正放、周边支承, 内设起重量为 850 kN 的桥式吊车)。已建成投用多年, 使用情况良好, 设计、施工和业主单位都一致认为网架较屋架经济、美观。

2 常规岛屋面和外墙面的设计

常规岛屋面和外墙面通常采用压型钢板, 既美观大方, 又施工方便快捷。一般考虑以下几个方面:

2.1 屋面和外墙面压型钢板的耐久性

压型钢板的使用寿命取决于以下因素: 基板(一般采用 0.6 ~ 1.2 mm 厚的冷轧薄钢板)的厚度, 涂层的厚度和质量, 安装连接的方式。

普通连接的压型钢板的使用寿命一般为 15 ~ 20 年。采用无紧固件或咬合接缝连接、基板和涂层较厚且质量好的压型钢板的使用寿命可达 30 年以上。

由于我国核电站一般选址沿海地区, 海边盐雾和大气中有害成分对厂房围护材料的腐蚀性很强。因此, 在实际核电站设计中, 首先要选用厚度较厚(0.8 mm 或 1.0 mm)的基板, 并选用铝锌复合涂层彩色压型钢板; 其次, 涂层较普通涂层压型钢板应提高; 最后, 构造连接方面, 应采用咬边构造、扣合构造以及紧固件隐藏式等连接方式。

2.2 屋面和外墙面压型钢板的抗风性能

用作屋面和外墙面的压型钢板, 抗风性能主要取决于压型钢板的波高和檩条的间距, 需要按《压型金属板设计施工规程》(YBJ 216—1998)、《压型金属板应用技术规范》(GB 50896—2013)及国际标准图集 08J925《压型钢板、夹芯板屋面及墙面建筑构造》的要求进行设计。

压型钢板的挠度与跨度(檩条间距)之比, 必须满足《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018—2002 的限值, 即屋面板 1/200(屋面坡度大于 1/20 时)或 1/250(屋面坡度小于等于 1/20 时), 外墙板 1/150。计算所用参数按表 2 和表 3 取值。

表 2 钢材强度设计值^[3]

Table 2 Design Value of Steel Strength

钢材 型号	抗拉、抗压和抗弯强 度 f / (N · mm ⁻²)	抗剪强度 f_v / (N · mm ⁻²)	端面承压(刨平顶 紧) f_{tc} / (N · mm ⁻²)
Q235	205	120	310
Q345	300	175	400

表 3 钢材物理性能指标^[3]

Table 3 Physical Performance Index of Steel

弹性模量 E / MPa	剪切模量 G / MPa	质量密度 ρ / (kg · m ⁻³)	线膨胀系 数 α / °C
2.06×10^5	7.9×10^4	7 850	1.2×10^{-5}

在台风地区, 必须采取防风措施, 减少搭接点, 增加固定点, 在屋脊、檐口、山墙转角、门窗、勒脚处围护系统侧增设通长固定压条。在浙江、福建、广东等强台风地区, 可用 $\phi 10$ 钢筋双向间距 ≤ 18 m 加压筋的方法来增强抗风效果。

2.3 屋面和外墙面压型钢板的保温隔热性能

对于炎热的南方地区, 主要应考虑压型钢板的隔热性能; 相反, 对于严寒的北方地区, 则应主要考虑压型钢板的保温性能。通常保温通过在双层压型钢板之间填充聚氨酯泡沫或玻璃丝棉或岩棉等轻质高效保温材料即可达到较好的效果, 但隔热除利用上述轻质高效保温材料填充在双层压型钢板之间起到一定隔热作用外, 还必须设置架空通风层并采用浅色压型钢板才能达到较好的隔热效果。

2.4 屋面压型钢板的防水性能

屋面压型钢板的防水性能主要取决于屋面排水坡度和压型钢板连接和紧固的方式。通常屋面排水坡度大、压型钢板波高和波距大以及排水天沟纵向排水坡度大则排水顺畅, 压型钢板连接处和紧固处密实则不透水, 这些有利因素可保证屋面压型钢板的防水性能好。

核电站常规岛屋面跨度大, 一般采用双破屋面, 屋面坡度采用 1:12 左右, 排水天沟纵向排水坡度采用 0.5% 左右。北方地区因不均匀积雪和昼夜冻融差别的影响, 以及南方地区因极大暴雨的影响, 要特别注意避免女儿墙和天沟处的排水不畅甚至因堵水而引起的渗漏。

3 常规岛地下结构防水设计

3.1 设置排水盲沟和排水井

沿地下室底板四周设排水盲沟和排水井, 并在排水井内设置按预定水位自动启动的电动排水泵进行抽排地下水。排水盲沟断面通常取 (30 ~ 50 cm) \times (30 ~ 50 cm), 纵向排水坡度 5%, 盲沟内填充碎石或鹅卵石。在厂房四角设置排水井, 以便让排水盲沟的水排入, 再通过电动排水泵或直接排入厂

区地下排水管网,以保证常规岛厂房处地下水位通常位于地下室底板以下。

3.2 在地下室底板下设置“双防”防水层

为了增强防水效果,常规岛厂房地下室底板下设置建筑防水层通常采用刚性防水层和柔性防水层相结合的“双防”方案。其中,刚性防水层一般采用普通细石混凝土防水层或补偿收缩混凝土防水层或钢纤维混凝土防水层,柔性防水层多采用高分子防水卷材或多元高聚物改性沥青防水卷材(如SBS、APP、APAO等改性沥青卷材)。

3.3 在地下室侧壁外侧设置防水水泥砂浆层

防水水泥砂浆层^[4]必须满足以下要求:

1) 采用强度等级不低于32.5 MPa的普通硅酸盐水泥、硅酸盐水泥、特种水泥。

2) 采用中砂,水泥含量不大于1%,硫化物和硫酸盐含量不大于1%。

3) 拌制水泥砂浆所用的水,应符合现行《混凝土拌和用水标准》(JGJ 63—2006)。

4) 外加剂的技术性能应符合国家或行业产品标准一等品以上的质量要求。

3.4 地下室底板及侧壁采用防水混凝土

地下室底板及侧壁采用防水混凝土,在变形缝处设置橡胶止水带或金属止水带等密封材料。防水混凝土的抗渗等级根据地下水位高度来确定。当地下水位高度在地下10~15 m时,可采用抗渗等级P8。

4 常规岛厂房结构型式比较

4.1 结构体系的比较

混凝土结构整体性好。由于其材料自重大,强度相对低造成梁柱截面相对较大。梁柱截面大能在不设垂直支撑的情况下很好满足规范侧移刚度的要求,减少与工艺管道设备的碰撞。

若采用钢结构体系,梁柱截面小,节省空间。同时,为了满足刚度的要求往往横向和纵向都要设置垂直支撑,加上常规岛设备众多,有时造成局部结构构件布置困难。

另外,混凝土结构需预埋大量工艺专业的预埋件,钢结构能减少预埋件的数量。在漏埋、修改的情况下,钢结构更加方便。

4.2 抗震性能

在抗震性能方面,由于钢结构自重轻,强度

高、延性好,对地震有很强的适应性。地震水平力和设备水平力一般通过楼面水平支撑和垂直支撑传到地基。混凝土结构按规范和经验设计并采取构造措施,也能满足抗震要求。

4.3 施工工期和施工质量

钢结构的连接均采用“工厂焊接,现场螺栓连接”的方式,构件的制造、焊接工作基本在工厂完成,能保证加工质量不受气候条件影响。钢构件还可以根据施工计划边加工、边运输、边安装,减少现场堆料,从而减少堆放场地和二次倒运。钢构件之间采用高强螺栓连接和少量焊接带来安装的方便和快捷。钢构件还可作为楼面模板的支撑从而提供多个施工作业面,减少支模板和脚手架工作量,加快施工进度。另外钢结构厂房基础一般比混凝土厂房小,也可减少了地基处理和基础施工的工作量。因此,采用钢结构工期短。

混凝土结构受到现场施工和天气的影响,在进度方面不如钢结构快捷,质量不如钢结构容易控制,但高水平的施工管理和现代混凝土施工技术的采用,混凝土结构作为传统结构型式在质量方面能得到保证。

4.4 防腐与防火

由于核电站建在沿海地区,防腐、防火问题是必需解决的重要问题。

钢结构防腐方面,虽然耐久性需要提高,但随着科技的发展,防腐涂料质量已在不断改进,目前防腐涂料的使用年限,室内可保证15年,室外可保证10年。钢结构的防火方面,汽机房油箱附近钢柱、梁和油箱正上方、屋架须做防火涂料,防火涂料可采用超薄型防火涂料。钢结构的防腐、防火相对于混凝土来说增加了施工工作量和工期及电站运行期间的维修保养工作。

4.5 工程经济

通常核电站常规岛厂房采用钢筋混凝土结构的造价要比钢结构要低,但是采石,挖沙造成环境破坏。钢材是环保材料,可以循环再利用。

综上所述,核电站常规岛厂房采用钢结构这一结构型式,虽然防腐和防火方面不如混凝土结构优越,但其施工方便、工期短、质量可靠、环保和经济性好等优点,已得到广泛的认可,所以,应优先采用。

(下转第115页 Continued on Page 115)

本文采用的基于结构变形的抗震设计方法更能够保证常规岛主厂房内的工作人员和贵重设备在大震作用下的安全。

2)通过有限元软件 SAP 2000 对常规岛主厂房进行静力弹塑性分析和动力时程分析,能够获得常规岛主厂房结构在不同地震水准作用下整体层间位移角。

3)常规岛主厂房结构整体在小震作用下,不论是横向地震作用,还是纵向地震作用下的层间位移角平均值远小于设定的整体层间位移角限值(1/100)。

4)常规岛主厂房结构整体在中震作用下,不论是横向地震作用还是纵向地震作用下的层间位移角平均值远小于设定的整体层间位移角限值(1/580)。

5)常规岛主厂房结构整体在大震作用下,不论是横向地震作用还是纵向地震作用下的层间位移角平均值远小于设定的整体层间位移角限值(1/300)。

参考文献:

- [1] 郁静红. 核电站常规岛主厂房结构抗震性能设计 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 96-101.
YU Jinghong. Performance Based Seismic Design of the Main Power Building in Conventional Island of Nuclear Power Plant [J]. Energy Construction, 2015, 2(2): 96-101.
- [2] 林生逸, 彭雪平, 韩小雷. 核电站常规岛主厂房基于性能的抗震分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2011, 5(31): 50-59.
LIN Shengyi, PENG Xueping, HAN Xiaolei, et al. PBSO Study on Seismic Behavior of Main Machine Hall in Conventional

al Island [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 5(31): 50-59.

- [3] 万海涛. 钢筋混凝土梁、柱构件抗震性能试验及其基于变形性能的参数研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
WAN Haitao. Seismic Performance Test of RC Beams and Columns and Research on Parameter of Deformation Performance [D]. GuangZhou: South China University of Technology, 2010.
- [4] DL 5022-2012, 火力发电厂土建结构设计技术规定 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2012.
DL 5022-2012, Technical Stipulation for the Design of Civil Structure of Thermal Power Plant [S]. Beijing: China Building Industry Press. 2012.
- [5] GB50267-97. 核电厂抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1997.
GB50267-97. Code for Seismic Design of Nuclear Plants [S]. Beijing: China Building Industry Press. 1997.
- [6] 戚永乐, 万海涛. 核岛侧常规岛主厂房山墙抗倒塌能力分析 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 70-74.
QI Yongle, WAN Haitao. The Capacity of Resisting Collapse of the Main Power Building Gable nearby Nuclear Island [J]. Energy Construction, 2014, 1(1): 70-74.
- [7] 林生逸. 基于性能的核电站常规岛主厂房结构抗震性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
LIN Shengyi. Study on Anti-seismic Behavior of Main Machine Hall in Conventional Island Based on PBSO [D]. GuangZhou: South China University of Technology, 2012.
- [8] GB 50011 - 2010, 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011 - 2010, Code of Seismic Design of Buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

(责任编辑 林希平)

(上接第 110 页 Continued from Page 110)

5 结论

核电站常规岛厂房屋盖宜采用较经济的网架结构,设计时需采用合适的软件,选择适当的计算模型和参数,同时还要考虑加工和安装方便等问题;常规岛厂房屋面及墙面采用双层压型钢板围护要考虑其耐久性、抗风性能、隔热性能及防水性能;地下防水需要同时采取设排水沟、设建筑防水层及结构采用防水混凝土等多种措施,才能达到较好的防水效果;由于钢结构具有施工方便、工期短、质量可靠、环保和经济性好等优点,厂房结构型式应优先采用钢结构。这些结构设计方面的经验来源于大量的实际工程,可供核电站设计、建设人员在常规

岛厂房设计中参考。核电站常规岛厂房结构设计较普通火电厂要求更高,尚需广大设计人员不断积累经验,进一步提高设计水平。

参考文献:

- [1] 李广军. 建筑结构选型 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 王静峰, 王波. 钢结构设计与应用范例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 乐嘉龙, 李勇, 江世哲, 等. 轻钢结构墙面屋面设计手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [4] 沈春林. 地下防水工程实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

(责任编辑 林希平)