

关于高水头、大容量水电站机组 蜗壳结构型式的探讨

李光顺

(中国水电顾问集团公司, 北京 100120)

摘 要: 水电站蜗壳结构为一异形空间结构, 受力状态复杂, 是水电站多技术专业共同关注的重要问题, 其型式的选择关系到工程安全和机组稳定运行。在分析各类蜗壳结构型式优缺点的基础上, 结合已建部分水电站蜗壳结构分析、监测成果, 对高水头、大容量水电站机组蜗壳结构型式的选择进行分析探讨。

关键词: 结构型式选择; 蜗壳; 高水头大容量水电站

Study on Spiral Case Structure Type of High-Head and Large-Capacity Hydropower Unit

Li Guangshun

(HydroChina Corporation, Beijing 100120)

Abstract: The spiral case of hydropower unit is a special spatial structure with complex stress status and the structure type is related to project security and the stable operation of unit. After analyzing the advantages and disadvantages of various spiral case structure types, and combining the structure and monitoring data analysis of some hydropower units which has been put into operation, the suggestions on spiral case structure type selection of high-head and large-capacity hydropower unit are given herein.

Key words: structure type selection; spiral case; high-head and large-capacity hydropower station

中图分类号: TK730.312; TK733.1; TV741

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2010)11-0000-00

水电站蜗壳为一异形空间结构, 受力状态复杂, 其结构型式的合理选择不仅是设计中的一个难点, 也关系到机组能否长期稳定安全运行。

本文在对近年来一批高水头、大型水电工程蜗壳结构型式进行大量分析研究的基础上, 对部分工程研究、应用成果进行了分析整理, 对高水头、大容量机组蜗壳结构型式选择进行了初步探讨。

1 各类蜗壳结构型式的工程应用情况

常用的蜗壳结构型式有垫层蜗壳、充水保压浇筑混凝土蜗壳(以下简称“保压蜗壳”)与外围混凝土完全联合承载蜗壳, 这三种典型蜗壳结构型式在国内外水电工程中都有成功应用的实例, 各个国家也有自己的经验和习惯做法。

前苏联水电站基本采用垫层蜗壳和完全联合承载蜗壳方案。20 世纪 60 年代以前, 高水头水电站较少, 多采用垫层蜗壳方案; 20 世纪 60、70 年代

建造萨扬舒申斯克、努列克、英古里等高水头电站时, 由于当时高强度钢材比较稀缺, 为减薄蜗壳钢板厚度, 都采用了完全联合承载蜗壳结构型式。20 世纪 80 年代末期, 前苏联有关组织及专家认为当蜗壳 HD 值(H 为蜗壳设计水头, D 为蜗壳进口内径)超过 $1\ 200\ \text{m}^2$ 时, 应首选完全联合承载蜗壳结构型式。

美国机械工程师协会(ASME)压力容器标准规定, 所有压力容器都必须进行水压试验, 故保压蜗壳一直被采用。加拿大、巴西及西欧的大中型机组, 多采用保压蜗壳, 尤其是西方国家单机容量 500 MW 以上的水电站, 都无一例外地采用了保压蜗壳。北欧和日本的水电站采用完全联合承载蜗壳较多,

收稿日期: 2010-06-17

作者简介: 李光顺(1971—), 男, 湖南澧县人, 高级工程师, 从事水电工程技术工作。

但钢蜗壳按单独承受内水压力设计制造，与前苏联采用完全联合承载蜗壳时考虑外围钢筋混凝土的作用减薄蜗壳钢板厚度的做法不同。

我国以往的大中型水电站多采用垫层蜗壳，如刘家峡水电站（第 1 台机组 1969 年 4 月投产），李家峡水电站（第 1 台机组 1997 年 2 月投产）。采用垫层蜗壳的还有龙滩水电站（9×700 MW）、三峡右岸电站 4 台机组（4×700 MW）、拉西瓦水电站（6×700 MW）等巨型水电站。近年来，国内水电站开始采用保压蜗壳，其中应用最早的是天生桥二级水电站，随后是广州、潘家口和十三陵等一大批抽水蓄能电站，三峡、小湾和二滩等常规电站机组也都采用保压蜗壳。保压蜗壳结构型式在我国的应用有逐步增加的趋势。

2 各类蜗壳结构型式的特点

2.1 垫层蜗壳

2.1.1 垫层蜗壳的优、缺点

垫层蜗壳的优点包括：①施工方便，工期短；②造价相对较低，能充分发挥钢蜗壳的承载能力；③可根据具体情况确定外围混凝土承担的荷载，便于混凝土裂缝控制。

其缺点是：①蜗壳受力均匀性较差。蜗壳与座环连接处，特别是采用蝶形边连接时，蜗壳弯曲应力较大，且正好位于焊缝处，对蜗壳受力不利。由于垫层只在蜗壳局部范围敷设，设垫层处与不设垫层处蜗壳和混凝土的接触状态有差异，运行时蜗壳环向应力及抗扭转应力分布不均匀，使垫层末梢处存在明显的应力集中。②设垫层处蜗壳与混凝土不能紧密接触，机组基础刚性小，不利于机组抗振和稳定运行，对蜗壳抗疲劳不利。③由于垫层材料为非线性材料，加上受垫层的老化、受流态混凝土的压缩、垫层吸水后膨胀、耐低温或高温性能等的影响，蜗壳与外围混凝土分担荷载比例不易明确确定。

2.1.2 垫层材料的选取

垫层材料的选取是垫层蜗壳结构设计时的重点之一。垫层材料一般需满足以下要求：①变形模量低，一般为 1~10 MPa；②在施工、运行湿度环境下，对钢衬、混凝土无腐蚀，吸水性差，水浸泡后不膨胀；③抗老化性能、稳定性好；④造价低，取

材方便，易于加工。

选取垫层材料时需对其物理力学性能有充分的认识，如：应力应变关系、耐久性、吸水膨胀率、耐高（低）温性能和防腐涂层是否发生反应及耐腐蚀性等。表 1 为部分垫层材料的试验成果。

垫层材料的变性模量、敷设范围和厚度都对蜗壳与外围混凝土的分载比例有影响。一般，变形模量越小，敷设范围越大、厚度越厚，外围混凝土分担的荷载越小。有关研究表明，当垫层厚度与变形模量之比 $<12.5\text{ mm}^3/\text{N}$ 时，垫层厚度、变形模量对蜗壳、外围混凝土的分担比例影响较大。另外，垫层末梢处蜗壳、混凝土均存在应力集中现象。龙滩水电站坝内垫层管的结构分析表明，垫层末梢应力集中程度对垫层末梢削坡比较为敏感。

2.2 充水保压蜗壳

2.2.1 充水保压蜗壳的优、缺点

保压蜗壳优点：①运行时蜗壳与混凝土紧密接触，蜗壳与混凝土应力分布均匀，受力状态较好；②蜗壳与外围混凝土分担荷载概念上较为明确，内水压力小于保压值时由蜗壳单独承受荷载，大于保压值时由蜗壳和外围混凝土联合承载；③充分发挥钢蜗壳的承载能力，可根据具体情况确定外围混凝土承担的荷载，便于混凝土裂缝控制；④通过充水保压可消除钢蜗壳焊接残余应力和局部应力，一定程度上起到水压试验的作用，甚至可代替水压试验；⑤运行时蜗壳与混凝土紧密接触，使蜗壳、座环与大体积混凝土结合为整体，增加了机组基础的刚度，有利于机组稳定运行。

其缺点是：①造价较高。这主要是增加了充水保压设备（蜗壳进口处的闷头和座环内封环）。二滩电站 6 台机组共用 2 个闷头和 1 套内封环，总质量 112 t，均摊到每台机组为 19 t，占每台机组总质量（1 150 t）的 1.65%。美国的经验表明，水压试验及充水保压所需的每套设备（含闷头、内封环、泵及其他辅助设备）的造价约为 1 台机组造价的 3%（如几台机组共用则可均摊）。②机组安装工期较长。根据国内常规机组蜗壳及抽水蓄能机组进行水压试验、充水保压浇筑混凝土的工程实践经验，进行水压试验及充水保压浇筑混凝土需占用机组安装工期 2~3 周。

表 1 部分垫层材料的试验成果

测试项目	热老化后物理性能变化率/%	冻融后物理性能变化率/%	吸水率/%	耐腐蚀性			
				5%烧碱	90 号汽油	柴油	清漆
聚苯乙烯泡沫塑料	16	5	31	无变化	全溶化	溶化	溶化
高压聚苯乙烯闭孔低发泡塑料	11%	4	7	无变化	膨胀 8%	膨胀 8%	膨胀 6%
高压聚苯乙烯闭孔高发泡塑料	23	10	15	膨胀 3%	膨胀 13%	膨胀 13%	膨胀 8%

2.2.2 充水保压压力值的确定

合理的保压值应能保证在最低运行水头时, 钢蜗壳能紧贴外围混凝土; 同时, 最高运行水头时也不能使外围混凝土分担过大的荷载。当上游水库水位变幅不大时, 确定保压值相对要容易。一般保压值取蜗壳最大静水压力的 80% 左右。

充水保压蜗壳设计中水温的控制很重要, 尤其是在气温变化较大的地方。如假定温差 ΔT 与内水压力 P 使蜗壳产生的径向位移相等, 可得到温差 ΔT 与内水压力 P 的关系式 $P/\Delta T = \alpha \delta E/R$ 。式中, α 为钢材线膨胀系数, δ 为蜗壳钢板厚度, E 为钢材弹性模量, R 为蜗壳内径。

仍以三峡水电站为例, 如在冬季进行蜗壳充水保压浇筑混凝土施工, 保压水温取为月平均气温 9°C , 夏季蜗壳运行水温达到 26°C , 此时运行水温比保压水温高 17°C , 相当于蜗壳外围混凝土多承担约 37 m 水头。龙滩水电站蜗壳结构分析成果显示, 其温差的影响比三峡水电站还要大。可见, 充水保压水温的影响不可忽视。

保压水温控制的原则是与电站多年运行进水口取水高程处的水温相当, 或与河道多年平均水温相当。另外, 由上式可知温差和水压可相互替代, 在不同季节采用不同的保压值来考虑水温的影响也是可行的方案。

三峡水电站及二滩水电站 2 号机组蜗壳试运行的原型观测成果表明, 内水压力小于蜗壳埋设时的保压值时, 蜗壳已与外围混凝土联合承载。产生这种现象的主要原因有: 充水保压浇筑混凝土时, 蜗壳承受的是静水压力, 而运行时蜗壳承受的是动水压力; 蜗壳运行时已拆除闷头和内封环, 边界条件发生了变化。三维有限元计算成果表明, 与充水保压时相比, 蜗壳变形的最大值及其发生部位都有一定变化, 相同内水压力下运行期蜗壳的变形要比充水保压浇筑混凝土大; 蜗壳外围混凝土水化热、不同季节水温变化等导致蜗壳内的水温与计算采用值不同等。可见, 充水保压蜗壳结构中蜗壳与外围混凝土分担荷载虽在概念上比较明确, 但实际情况与设计预想还是有一些差别的, 在确定保压值、外围混凝土结构设计时要考虑到这些因素。

2.3 完全联合承载蜗壳

2.3.1 完全联合承载蜗壳的优点

完全联合承载蜗壳优点: ①应力分布均匀, 受力状态较好; ②施工较充水保压蜗壳方便, 工期也较短; ③造价相对较低; ④蜗壳、座环与大体积混凝土为整体结构, 刚度大, 机组运行稳定性好, 蜗壳抗疲劳能力强; ⑤强度安全性高, 超载能力强。

2.3.2 完全联合承载蜗壳的缺点

其缺点是: ①外围混凝土变形较大。三峡水电站 15 号机组完全联合承载蜗壳的三维非线性有限元分析成果表明, 由于外围混凝土承担了很大比例的内水压力, 外围混凝土变形较大, 各部位绝对上抬变形及相对上抬变形不均匀, 最后设计按相对上抬变形小于 1.2 mm 控制。1:12 的模型试验表明, 定子基础部位绝对上抬变形为 2.8 mm, 相对变形为 1.3 mm。机墩不均匀上抬变形对机组运行稳定性的影响较大。②外围混凝土裂缝控制难度大。裂缝开展对混凝土的耐久性产生不利影响, 尤其是地下厂房通风条件较差、湿度较大时; 而且裂缝开展降低了混凝土的刚度, 会进一步加大混凝土的变形, 影响机组运行的稳定性。③不能充分利用蜗壳的承载能力。由于蜗壳壳体与外围大体积混凝土刚度的差别, 蜗壳分担的内水压力很少, 大部分为外围混凝土所承担, 蜗壳的承载能力常没有得到充分利用。数值计算、模型试验及原型监测成果都反映了这样的规律。

3 蜗壳结构型式的选择

3 种蜗壳结构型式都有成功应用的例子, 较典型的是三峡水电站左、右岸 26 台机组中 3 种蜗壳结构型式都有应用, 其中 21 台机组采用保压蜗壳, 4 台采用垫层蜗壳, 1 台采用联合承载蜗壳。蜗壳结构型式的选择需综合考虑结构布置、结构强度、施工、机组运行稳定性、投资、工程实践经验等因素, 习惯做法和经验也常左右我们的选择。

国内水电站采用垫层蜗壳的机组虽多, 但采用垫层蜗壳的高水头、大容量机组运行经验还不是很成熟。三峡水电站进行机组蜗壳结构型式论证时, 张光斗院士提出机组引起的动力效应和振动需要外围混凝土帮助稳定; 对于充水保压蜗壳结构型式, VGS、ALSTOM 两家机组制造商均希望低水头运行时仍能做到蜗壳与外围混凝土结构贴紧, 这从另外一个侧面说明垫层蜗壳用于高水头、大容量机组似乎还不是最佳选择。抽水蓄能电站机组运行水头高, 工况转换快, 机组运行稳定性要求高, 国内抽水蓄能电站多采用保压蜗壳, 说明保压蜗壳的总体技术性能获得了广大专业技术人员的认可; 联合承载蜗壳抗振性能较好, 但高水头、大容量机组采用的工程实践经验相对较少, 或许还需更多的工程实践检验和验证。笔者认为, 对高水头、大容量水电站机组蜗壳, 目前保压蜗壳结构型式工程实践经验更为成熟, 机组运行稳定性较可靠, 材料强度也得到充分利用, 总体上技术性能比较均衡, 是较为稳妥的技术方案, 可优先考虑采用。

参考文献:

- [1] 练继建, 王海军, 秦亮. 水电站厂房结构研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [2] SL 266—2001 水电站厂房设计规范[S].
- [3] 伍鹤皋, 欧文兵, 等. 官地水电站蜗壳结构型式研究.
- [4] 戴会超, 秦继章. 三峡特大型水轮发电机组充水保压蜗壳关键技术研究与应用[J]. 水电能源科学, 2005(4): .
- [5] 钮新强, 谢红兵, 刘志明. 三峡右岸电站蜗壳直埋方案研究[J]. 人民长江, 2008(1): .
- [6] 李丹, 陈坪. 三峡电站厂房蜗壳外围混凝土结构设计综述[J]. 人民长江, 2003(1): .
- [7] 高峰, 倪军, 张彬. 蜗壳保压技术在三峡工程中的发展与应用[J]. 水电建设, 2006(2): .
- [8] 姚红兵, 於三大. 三峡左岸机组蜗壳保温加压监测[J]. 大坝与安全, 2004(4): .
- [9] 王秀然, 赵七美. 小湾水电站大型金属蜗壳水压试验[J]. 云南水力发电, 2008(4): .
- [10] 李文慧. 二滩电站水轮机蜗壳层联合受力监测研究[J]. 水电站设计, 2003(3): .
- [11] 熊卫, 樊小发, 刘增强. 南阳回龙抽水蓄能电站蜗壳结构型式选择[J]. 黄河规划设计, 2005(4): .
- [12] 蒋定国, 田斌, 戴会超. 大型水轮机金属蜗壳结构型式的研究与应用[J]. 红水河, 2005(2): .
- [13] 付红霞, 马震岳, 董毓新. 水电站蜗壳垫层结构研究[J]. 水利学报, 2003(6): .

(责任编辑 刘书秋)