

# 预紧力水轮机顶盖与座环全三维联合受力强度分析

谭 啸<sup>1</sup>, 朱 毅<sup>2</sup>

(1. 国家能源集团大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041;

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:** 顶盖是水轮机中既有支撑又有过流作用的重要部件, 顶盖及其联接螺栓既承受周围各部件的作用力, 又承受随运行工况而改变的水压载荷, 其刚强度对水轮发电机组的安全、稳定运行至关重要。本文建立了某水电站混流式水轮机顶盖、座环及其联接螺栓的全三维有限元计算模型, 考虑螺栓预紧力, 采用 ANSYS 有限元分析软件对顶盖整体结构有限元模型在升压工况下进行刚强度计算分析。结果表明: 顶盖及其联接螺栓刚强度满足规范要求, 能够充分保证该水轮机组的运行可靠性。

**关键词:** 顶盖刚强度; 有限元计算; 螺栓预紧力; 升压工况

**中图分类号:** TK733+.1; U449.36; TG113.25+1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-2184(2022)05-0097-04

## Analysis on the Combined Strength of the Head Cover and Stay Ring for Pre-Tensioned Hydraulic Turbine Using Three Dimension Method

TAN Xiao<sup>1</sup>, ZHU Yi<sup>2</sup>

(1. China Energy Dadu River Hydropower Development Co. Ltd., Chengdu Sichuan 610041;

2. PowerChina Chengdu Engineering Co. Ltd., Chengdu Sichuan 610072)

**Abstract:** The head cover is an important part with the function of supporting and flowing for hydro turbine units. Head cover and its connecting bolt not only bear the forces from the adjacent parts but also bear the hydro pressure changed with the operation condition, and the strength of head cover and connecting bolts play an important part for the stability and safety of operation. In this paper, the whole 3-D model for the head cover, stay ring and connecting bolts are established, and by considering the force of pre-tensioned bolts and using ANSYS finite element analysis software, the stiffness and strength calculations of the whole finite element model are carried out under the extreme operation condition. The results show that the stiffness and strength of head cover and its connecting bolts satisfy the requirements of standards, and can guarantee the reliability of the hydroelectric units.

**Key words:** Stiffness and strength of head cover; Finite element calculation; Pre-tensioned bolt; Extreme operation condition

## 0 引言

顶盖是水轮机中既有支撑又有过流作用的重要部件, 其刚强度及其联接螺栓的可靠性很大程度上决定着水轮发电机组能否安全、稳定地运行<sup>[1-3]</sup>。水轮机顶盖与座环、导水机构、水导轴承等部件均有直接联接, 各部件之间存在力的相互作用, 整体受力情况复杂<sup>[4]</sup>。近年来, 随着水电开发技术的进步, 国内水轮发电机组最大单机容量已大幅提升, 结构尺寸越来越大, 同时水电机组深度参与电网调频、调峰, 过渡过程特性十分复杂,

顶盖与座环联接螺栓和分瓣顶盖联接螺栓受力状态更为多变, 在机组甩负荷等特殊状态下, 有可能使联接螺栓发生松动、失效甚至断裂而造成严重后果。王明等对大型水轮机顶盖和蜗壳座环的应力与变形进行了联合受力下的有限元分析计算, 并与传统单个分析结果进行了比较, 计算分析表明, 采用顶盖和座环的联合受力分析可更准确地确定顶盖与座环的应力和变形。肖良瑜<sup>[5]</sup>建立了考虑预紧力的顶盖与座环联合受力计算周期模型, 探讨了座环对顶盖应力和变形的影响。贾伟<sup>[6]</sup>对大型轴流式水轮机顶盖进行了强度及动态

收稿日期: 2022-06-01

特性分析并对顶盖结构进行了优化设计。陈柳<sup>[7]</sup>等对仙居抽水蓄能电站顶盖座环联接螺栓的受力特性进行了初步分析研究,对顶盖、座环和联接螺栓的整体结构进行了强度计算,根据国内外相关标准和行业设计水平,对仙居顶盖座环联接螺栓的强度选用进行评估,并提出建议。针对顶盖与座环联接体的刚度分析,现有计算模型更多采用单个部件或周期结构,少有考虑螺栓预紧力的顶盖、座环整体计算模型。

本文以某电站单机容量为 45 MW 混流式水轮机顶盖、座环及其联接螺栓为研究对象,采用 ANSYS 有限元分析软件,建立顶盖、座环及其联接螺栓全三维几何模型,并加载与实际工况下联

合受力边界条件一致的载荷,进行顶盖及其联接螺栓变形与应力分析计算,计算结果表明该电站水轮机顶盖及其联接螺栓刚度满足相关标注和行业设计要求。

### 1 水轮机顶盖、座环联接体受力特点

水轮发电机组运行时,顶盖主要承受活动导叶、水导轴承、主轴密封、控制环、接力器等部件的重力<sup>[8]</sup>;顶盖下腹板的过流面承受转轮上止漏环与上冠顶部之间的随机组运行工况改变而变化的水压载荷;顶盖的上环板和下腹板的活动导叶轴承座上还承受活动导叶的支撑力。同时顶盖与座环通过螺栓联接,顶盖还承受座环形变及螺栓预紧载荷。机组甩负荷状态下顶盖受力情况见图 1。

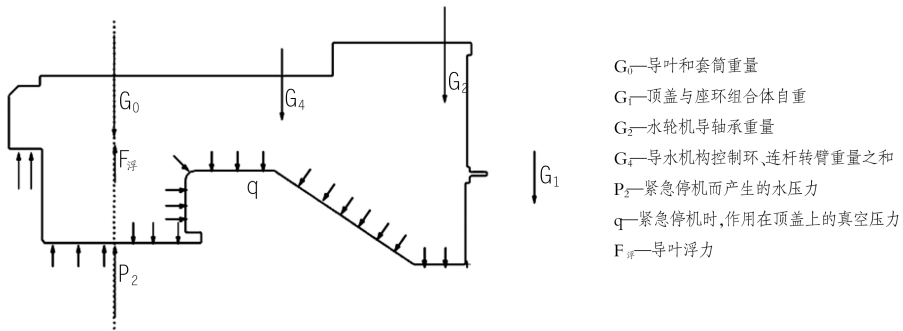


图 1 机组甩负荷状态下顶盖受力情况

## 2 顶盖与座环全三维有限元计算模型

### 2.1 顶盖与座环及其联接螺栓几何模型及网格

该水电站装有单机容量为 45 MW 的水力发电机组 3 台,在上游调压室内分岔后采用单元供水方式,水轮机设计水头 54 m,顶盖为焊接结构,由两瓣构成,分瓣件通过 48 个 M48×180 的螺栓将其合在一起。顶盖与座环通过 56 个 M42×90

的螺栓与座环联接。分别建立顶盖、座环及其联接螺栓的三维几何模型,并进行装配,采用适应性更好的四面体网格对装配体进行网格划分。

装配体共划分网格单元约 80 万个,节点数约 361 万个,经网格无关性检查,该套网格满足网格无关性要求,可用于顶盖、座环组合体的三维有限元静力学计算,各部件材料的力学性能见表 1。

表 1 各部件材料的力学性能

部件	材料	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	杨氏模量 /MPa	泊松比	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
顶盖	Q345C	7850	2.06E5	0.3	300	560
座环	S550Q-Z35	7850	2.06E5	0.3	550	710
螺栓	合金钢	7850	2.06E5	0.3	640	800

### 2.2 计算载荷

为校核顶盖及其联接螺栓刚度是否满足机组运行要求,需考虑甩负荷紧急停机情况下的最大水压上升,此部分关键载荷根据该水电站调节保证计算进行确定。调节保证计算结果见表 2,确定机组在 GK<sub>1</sub> 对应工况(最大水头),单机发电额定出力,突然甩负荷情况下蜗壳压力达到最高,最

大蜗压为 0.84 MPa,此时顶盖承受最大蜗壳压力。顶盖、座环及连接螺栓全三维有限元计算以 GK<sub>1</sub> 的调保计算结果进行加载。

顶盖各部分载荷计算结果见表 3。

联接螺栓预紧力见表 4。

### 2.3 载荷施加和边界条件

座环下端由混凝土支撑,接触部位相对位

移很小,故施加固定约束。顶盖、座环及其联接螺栓受到的载荷按表 2 的计算结果进行施加。

表 2 调节保证计算结果

工况编号	工况说明	初始水头 /m	蜗壳最大水压 /mH <sub>2</sub> O
GK <sub>1</sub>	单机发额定出力事故甩负荷	63.02	84.80
GK <sub>2</sub>	单机发额定出力事故甩负荷	55.14	75.64
GK <sub>3</sub>	三台机同发极限出力事故甩负荷	51.61	72.87
GK <sub>4</sub>	单机发额定出力事故甩负荷,导叶拒动	63.02	63.70
GK <sub>5</sub>	单机发额定出力事故甩负荷,导叶拒动	55.14	58.63
GK <sub>6</sub>	单机额定开度运行,其余二台机事故甩负荷	51.61	62.62

表 3 顶盖各部分载荷计算结果

G <sub>0</sub> /kN	G <sub>1</sub> /kN	G <sub>2</sub> /kN	F <sub>浮</sub> /kN	G <sub>4</sub> /kN	P <sub>2</sub> /MPa	q /MPa
206.98	238.40	41.94	14.88	128.29	0.84	0.10

表 4 联接螺栓预紧力

螺栓	预紧力 /kN
顶盖与座环联接螺栓	502.2
分瓣件联接螺栓	659.9

### 3 顶盖、座环联合体计算结果及分析

#### 3.1 顶盖变形和应力分布

在机组蜗壳压力达到最大时的条件下,顶盖的名义等效应力  $\sigma_{\text{equ}}$  和名义剪切应力  $\tau$  以及最大变形,其最不利条件顶盖计算结果见表 5。

表 5 最不利条件顶盖计算结果

部件	计算值		
	$\sigma_{\text{equ}}$ /MPa	$\tau$ /MPa	最大变形 /mm
顶盖	150.0	30.0	0.31
座环	110.0	20.0	0.30

#### 3.2 顶盖、座环联接螺栓应力分布

顶盖与座环通过 56 个 M42×90 的螺栓进行联接,考虑到螺栓与座环均为分瓣结构,仅需对一半数量的联接螺栓进行分析,依次对不同位置的顶盖、座环联接螺栓进行编号,并对螺栓截面进行编号区分(图 2)。

各螺栓按图 2 所示截面提取应力数据,0 点所在位置为+0 mm 截面,不同截面处的最大等效应力和平均等效应力变化情况如图 3、4 所示。

从图 3 中可以看出,顶盖与座环联接螺栓等

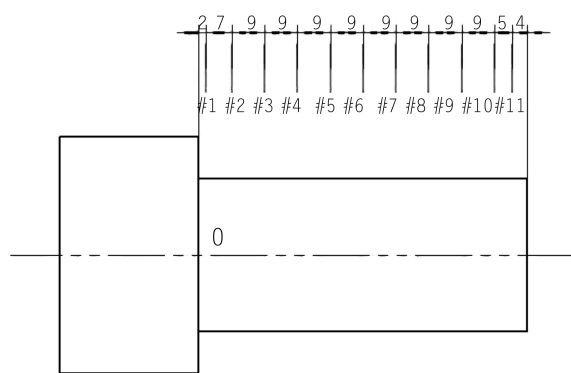


图 2 对螺栓截面进行编号区分

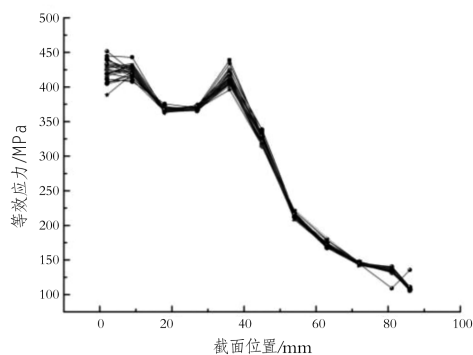


图 3 不同截面处的最大等效应力

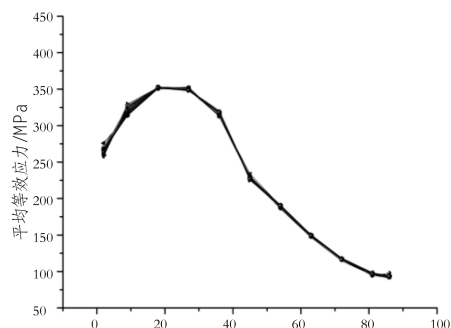


图 4 平均等效应力变化情况

等效应力高应力区主要集中在螺栓 0~40 mm 的区域内,40~90 mm 的等效应力随距离增加而逐渐减小。在高应力区靠近螺栓头部及 5 号截面(+36 mm)附近应力值较高,在 1 号截面(+2 mm)附近达到 451.67 MPa,5 号截面达到 438.63 MPa,而对应的截面平均应力并不高,图 4 显示各螺栓高平均应力出现在 3 号截面(+18 mm)和 4 号截面(+27 mm),最大值分别为 353.12 MPa,352.65 MPa,不同位置上的螺栓各截面的平均应力偏差较小。

#### 3.3 顶盖、座环分瓣件联接螺栓应力分布

顶盖、座环分瓣件是通过 48 个 M48×180 的螺栓把合在一起的,并对每个螺栓不同截面处的应力进行提取,得到顶盖、座环各分瓣件螺栓不同截面位置的最大等效应力和平均应力分布情况见图 5、6。

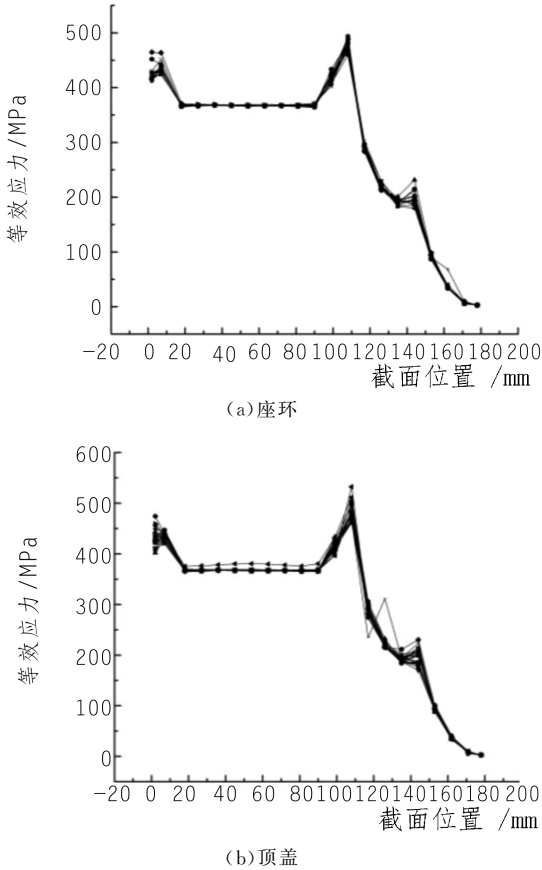
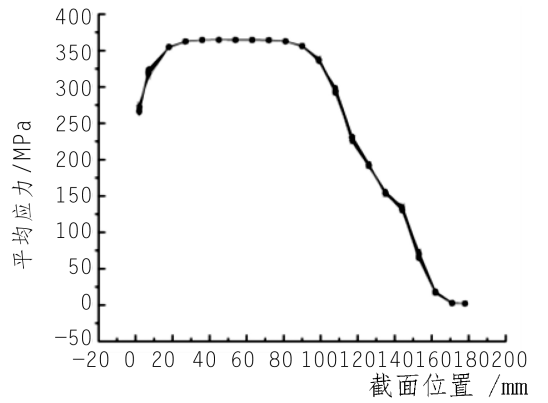


图5 座环、顶盖各分瓣件螺栓不同截面位置的最大等效应力

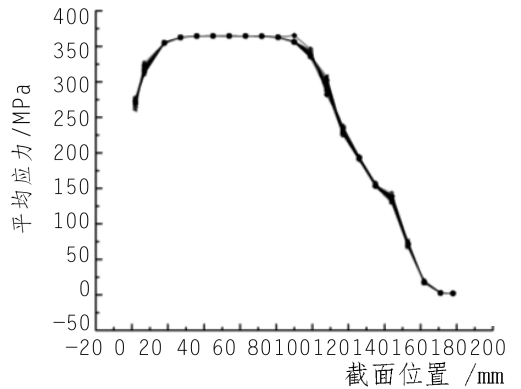
从图 5 可以看出,无论对于顶盖还是座环,各分瓣件联接螺栓的截面最大等效应力和截面平均应力分布情况保持一致,说明分瓣件联接螺栓受力较为均匀。同时注意到顶盖、座环分瓣件联接螺栓截面最大等效应力出现在 1 号(+2 mm)、2 号(+7 mm)和 13 号(+108 mm)截面附近,截面局部应力偏大,而在这三个截面上的平均应力并不高,可见在截面附近存在应力集中。

### 3.4 顶盖、座环及其联接螺栓的强度校核

据《ASME 标准第 VIII 卷第二册另一规则》《GB150—2011 钢制压力容器》以及该电站《水轮机产品说明书》对在升压工况下许用应力的取值要求,确定了顶盖及其联接螺栓的许用应力,其中顶盖的许用等效应力和剪切应力分别为 183 MPa



(a)座环



(b)顶盖

图6 座环、顶盖平均应力分布情况

和 110 MPa,螺栓许用应力、许用截面平均等效应力、剪切应力分别为 640 MPa、384 MPa、110 MPa。从以上计算结果来看,各部件应力均在允许的安全范围内,该机组各部件刚强度在调节保证计算可能出现的升压情况下能够满足要求。

## 4 结 语

顶盖是水轮机中既有支撑又有过流作用的重要部件,顶盖及其联接螺栓既承受周围各部件的作用力,又承受随运行工况而改变的水压载荷,其刚度对水轮发电机组的安全、稳定运行至关重要。通过建模分析,得出以下结论:

(1)顶盖、座环及其联接螺栓整体有限元计算模型充分考虑了各部件之间的相互作用,与单个部件的有限元计算相比更能反映实际受力状态,计算结果更为准确。

(2)分瓣结构的顶盖、座环在升压工况下,除法兰螺栓联接处,其应力和变形值均较小,对主体结构不会造成破坏。不同位置联接螺栓的应力分布基本保持一致,其应力水平未超限,且有一定的安全余量。

(下转第 112 页)

同时,不断加强运营管理和对职工的教育培训,设备设施的安全可靠性不断提高。近几年电站实现了按上游来水持续不间断发电,最大限度提高了机组利用小时数,保障了当地居民冬季生产、生活用电,缓解了当地电网供电的紧张局面,为促进高原藏区经济发展和社会稳定发挥了重要的作用。

#### 参考文献:

- [1] 陈容. 浅谈小型水电站大坝安全运行管理存在问题及解决对策[J]. 大坝与安全, 2018, (1): 16-19.
- [2] 梁慧芬. 临夏县农村小水电站运行管理中存在的问题及对策[J]. 农业科技与信息, 2018, (18): 90-92.

(上接第 100 页)

(3)相比传统的联接螺栓刚强度校核计算,采用整体结构有限元计算能对螺栓在各种工况下的受力情况有更为细致地掌握,不仅可为为此类结构关键联接部件的刚度计算分析提供解决方案,同时还可为进一步优化设计提供支持。

#### 参考文献:

- [1] 王明,肖良瑜. 1000 MW 级水轮机顶盖与蜗壳座环的联合受力分析[J]. 大电机技术, 2011, (1): 58-60.
- [2] 刘晶石,钟苏,庞立军. 某电站水轮机顶盖结构改进方案有限元分析[J]. 大电机技术, 2013, (3): 40-42.
- [3] 孙立宾,曾明富,常喜兵. 水泵水轮机顶盖/座环联接件应力幅分析[J]. 东方电气评论, 2011, 25(2): 27-30.
- [4] 潘月辉,刘计娟. 水泵水轮机蜗壳座环和顶盖有限元分析研究[J]. 西北水电, 2012, (1): 102-105.

(上接第 108 页)

## 6 结 语

BIM 技术的推广和发展,为实现建立模拟水利工程的有限元模型提供了无限可能,同时也强化了数值模拟分析在工程建设以及安全评估时的重要影响。通过三维稳定性有限元计算分析得知,坝基是此次项目工程渗漏最主要集中位置,左右岸岸坡是次要位置。为了防止断层中填料的渗透损失,有必要在三条断层的暴露下游铺设过滤材料。研究发现,假如断层及河床溶蚀带的帷幕受损,也会影响到总渗流,对促进断层和溶蚀带的稳定性和安全性有不利影响。所以,应该在帷幕施工时,对幕墙的施工质量进行严格管控。

#### 参考文献:

- [3] 罗永全. 对中小型水电站运行管理提高经济效益方法的探讨[J]. 工程设计与设计, 2018, (13): 132-134.
- [4] 吴建良. 严寒严寒高海拔地区水电站引水渠道设计[J]. 西北水电, 2016, (1): 33-36.
- [5] 陈造奎. 水力机组安装与检修[M]. 郑州:华北水利水电学院出版社, 1986: 169-189.

#### 作者简介:

刘均明(1970-),男,四川成都人,高级工程师,一级建造师,主要从事水电投资、建设、运营管理工作;

李永强(1979-),男,四川成都人,高级工程师,一级建造师,主要从事水电站建设、运维管理工作。

(责任编辑:卓政昌)

- [5] 肖良瑜,李永恒. 考虑预紧力的顶盖与座环联合受力研究[J]. 东方电气评论, 2011, 25(98): 31-33.
- [6] 贾伟,李建伟,刘晶石,等. 某轴流式水轮机顶盖有限元分析及结构优化设计[J]. 电力学报, 2014, 29(4): 349-352.
- [7] 陈柳,于纪幸,罗永要,等. 先居抽水蓄能电站顶盖座环联接螺栓的受力特性初步分析研究[J]. 水力机械技术, 2018, (2): 2-6.
- [8] 郑发平. 甲米一级混流式水轮机顶盖强度及刚度计算研究[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2011, 25(3): 36-38.

#### 作者简介:

谭 啸(1986-),男,湖北宜昌人,工程师,硕士,主要从事电力生产、工程管理方面工作;

朱 毅(1986-),男,湖北宜昌人,高级工程师,硕士,主要从事水电水利工程机电设计、工程数字化、BIM 技术的研发和应用方面的工作。

(责任编辑:卓政昌)

- [1] 邓韶辉,王晓玲,敖雪菲,等. 大坝基岩帷幕灌浆液灌浆的三维数值模拟[J]. 水利学报, 2016, (2): 165-172+179.
- [2] 钱朝阳. 某水库土石坝防渗墙及帷幕灌浆质量评价探讨[J]. 工程与建设, 2015, (4): 555-558.
- [3] 占文婷. 土石坝的渗流特性分析及数值模拟[J]. 工程设计与设计, 2018, (21): 121-123.
- [4] 娄一青,王林素,苏怀智. 碾压混凝土坝层面渗流变异特性研究[J]. 水利规划与设计, 2011, (6): 56-58+62.
- [5] 王晓玲,刘长欣,李瑞金,等. 大坝基岩单裂隙灌浆流固耦合模拟研究[J]. 天津大学学报, 2017, (10): 1037-1046.
- [6] 罗平平,朱岳明,赵咏梅,等. 岩体灌浆的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, (8): 918-921.

#### 作者简介:

徐建忠(1979-),男,浙江杭州人,本科,高级工程师,主要从事土木工程施工。

(责任编辑:卓政昌)