

# 构皮滩发电厂水轮机导叶漏水影响因素分析及改进建议

杨 昆

构皮滩发电厂 贵州 遵义 564408

DOI: 10.18686/dljsyj.v1i3.1124

**【摘要】**构皮滩发电厂#1—#5机组于2009年全部投运,投运至今,发现活动导叶漏水量逐渐增大,出现了停机蠕动,停机失败,甚至停机时需要重新加闸后才能停止。本文从设计、问题发现并提出了改进建议。

**【关键词】**构皮滩发电厂、活动导叶、漏水量、改进建议

## 1 概述

构皮滩发电厂位于贵州省余庆县境内,是乌江流域开发的第七个梯级水电站,地下电站装机容量 $5 \times 600\text{MW}$ ,保证出力 $751.8\text{MW}$ ,年发电量 $96.82$ 亿千瓦时。机组单机额定容量 $600\text{MW}$ 。是集团公司单机容量最大的水轮发电机组,也是我国首次自主研发的 $600\text{MW}$ 混流式水轮机组。水轮机由哈尔滨电机厂设计、研发、制造。型号:HL280-LJ-175。活动导叶共设计24块,为不锈钢ZG0Cr13Ni5Mo,

立面密封为刚性接触密封,导叶端部密封为橡胶垫黄铜板H62R密封,分别固定在顶盖与底环上。开关导叶时操作力矩通过控制环带动活动导叶的连板、偏心销、分半锥销和导叶拐臂传递。

## 2 问题发现

构皮滩发电厂从投产至今,#1—#5水轮机导水机构活动导叶漏水量均在 $2.6\text{m}^3/\text{s}$ 及以上,超过国家标准 $1.14\text{m}^3/\text{s}$ 。如下表:

表1 监测项目的分析 使用仪器一览表

| 机组漏水量单位: $\text{m}^3/\text{s}$ | 上游水位(单位:m) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                | 591.3      | 596  | 601  | 606  | 611  | 615  | 620  | 623  | 625  |
| #1                             | 2.11       | 2.12 | 2.21 | 2.41 | 2.55 | 2.61 | 2.97 | 3.17 | 4.24 |
| #2                             | 2.00       | 2.06 | 2.03 | 2.28 | 2.41 | 2.33 | 2.61 | 2.67 | 2.67 |
| #3                             | 1.99       | 2.26 | 2.28 | 2.70 | 2.58 | 2.59 | 2.81 | 3.28 | 3.32 |
| #4                             | 1.92       | 1.96 | 1.97 | 1.88 | 1.99 | 2.01 | 1.93 | 2.07 | 2.34 |
| #5                             | 1.37       | 1.46 | 1.45 | 2.19 | 2.30 | 1.60 | 1.88 | 2.22 | 1.99 |

从表可以分析出导叶漏水随上游水位升高而增大,容易造成机组停机时,监控系统上报“机组停机失败”“机组转速未降至20%,流程退出”信号问题。严重影响机组的可靠性及安全性。

## 3 活动导叶漏水影响因数分析

活动导叶漏水在导叶全关状态时,由于导叶端面和立面存在间隙引起,因此导叶端面和立面间隙增大、间隙分配不均匀,都会引起导叶漏水量增加。

①活动导叶端面上、下端总间隙超标原因:构皮滩发电厂从投产至今,在每次机组检修时,对活动导叶上、下端间隙进行测量,按照设计标准,活动导叶上端面间隙为 $0.6\text{mm} \sim 1.1\text{mm}$ ,下端间隙为 $0.3\text{mm} \sim 0.7\text{mm}$ ;其中上部占总间隙值的60%,下部占40%。端面总间隙在 $0.9\text{mm} \sim 1.8\text{mm}$ 。从数据得知发现活动导叶端面总间隙均在 $2.5\text{mm}$ 以上。发现端面总间隙存在超标现象。如下表:

**构皮滩发电厂 2018 年度 #2 机组端面间隙测量数据**

| 端面测量值(单位 0.01mm) |     |     |     |     |
|------------------|-----|-----|-----|-----|
| 导叶编号             | 上进  | 上出  | 下进  | 下出  |
| #1               | 120 | 150 | 75  | 85  |
| #2               | 120 | 140 | 85  | 90  |
| #3               | 140 | 155 | 80  | 90  |
| #4               | 120 | 125 | 55  | 100 |
| #5               | 125 | 125 | 85  | 115 |
| #6               | 140 | 135 | 75  | 100 |
| #7               | 140 | 120 | 80  | 100 |
| #8               | 115 | 100 | 90  | 125 |
| #9               | 120 | 120 | 85  | 135 |
| #10              | 120 | 115 | 75  | 100 |
| #11              | 100 | 90  | 95  | 135 |
| #12              | 140 | 130 | 65  | 100 |
| #13              | 160 | 135 | 100 | 135 |
| #14              | 140 | 150 | 115 | 135 |
| #15              | 135 | 130 | 95  | 115 |
| #16              | 135 | 115 | 85  | 120 |
| #17              | 115 | 95  | 75  | 125 |
| #18              | 135 | 120 | 55  | 95  |
| #19              | 130 | 115 | 95  | 130 |
| #20              | 120 | 125 | 90  | 120 |
| #21              | 115 | 110 | 70  | 100 |
| #22              | 90  | 80  | 80  | 120 |
| #23              | 105 | 110 | 65  | 95  |
| #24              | 105 | 130 | 55  | 80  |

通过分析,构皮滩水轮机座环是分四瓣到现场组焊后安装浇筑的,为了消除组焊和浇筑变形,现场打磨顶盖和底环的安装平面以及密封面。由于机组较大,现场手工修磨的不确定因数都会影响导叶端

|     | #2 机组    | 端面间隙   | 铜条凸出量  | 铜条加厚   | 密封压缩量 |
|-----|----------|--------|--------|--------|-------|
| 上端面 | 设计间隙     | 0.6mm  | 1.5mm  | 0.42mm | 0.9mm |
|     | 实测均值/计算值 | 1.02mm | 1.92mm |        |       |
| 下端面 | 设计间隙     | 0.3mm  | 1.5mm  | 0.86mm | 1.2mm |
|     | 实测均值/计算值 | 1.16mm | 2.39mm |        |       |

#### ②导叶端面间隙密封铜条分段

面间隙,修磨后座环尺寸 1563(+0.37/0)如果增大将直接引起导叶端面间隙增大,配合面修磨后的不平度也将引起顶盖、底环呈波浪形变化,引起导叶端面间隙的不均匀。底环采用旋套调整水平和高程,底环的基础不是大平面接触,在把合螺栓拧紧及长期运行后可能产生底环过流面的沉降,也会引起端面间隙增大并且不均匀。

②活动导叶上、下单边间隙变大原因:主要是机组运行时,导叶铜块密封刮削磨损,长期运行导致铜条密封条出现气蚀,严重时出现沟槽现象。

③活动导叶立面间隙变大的原因:a. 导叶开和关时阻力比较大,影响导叶全关到位,导叶轴套变形或轴套间不同心使导叶转动憋劲等都会引起阻力增大;b. 导水机构各传动部件间的间隙增大,导叶动作不同步引起个别导叶关不到位;c. 导水机构接力器压紧行程偏小;d. 导叶间有异物卡住;e. 活动导叶刚性密封处有气蚀缺陷。

在上述原因中,水轮机活动导叶漏水量大的直接原因主要是活动导叶端面总间隙超标所致,发现每次通过调整端、立面间隙后,或者检修后充水测量导叶漏水量都在标准范围内,但在机组开、停后通过测量导叶就有明显增大现象,从而导致机组停机后出现蠕动、停机失败等问题。

## 4 改进建议

### ①增加活动导叶密封铜条厚度

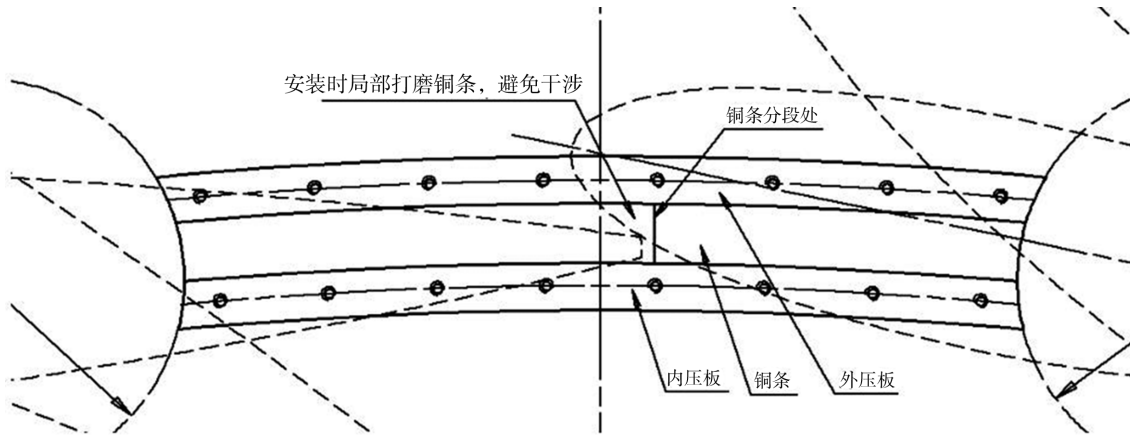
由于导叶端面间隙的增大,导致导叶在全关位置时与密封铜条的压紧力减小。为了保证铜条的压紧力与原始设计值相当,根据端面间隙增大值将铜条适当加厚。为了降低测量误差的影响和降低制造、安装难度,根据构皮滩发电厂 2018 年度 #2 机组端面间隙测量数据的实测平均值和下端面间隙的实测平均值分别计算上、下密封铜条的厚度。

导叶端面间隙数据显示,导叶端面间隙非常不

均匀。在导水机构全关时,前一个导叶的出水边与后一个导叶的进水边在全关位置共用一个铜条,在相邻导叶端面间隙差别较大时,将引起小间隙导叶把铜条压下去而大间隙导叶端面出现通缝现象。虽然铜条和橡胶的刚度较小可能会弥补一部分变形,

但这种现象在理论分析上是很有可能出现的。

建议将铜条在导叶搭接点附近分为两段,前一个导叶的出水边与后一个导叶的进水边在全关位置不再共用一个铜条,而是分别与各自的密封铜条接触压紧,这样可以保证各自压紧密封不再相互影响。



端面密封铜条分段方案示意图

### ③更换铜条材质

构皮滩电站水头较高,为保证导叶端面的密封性能,建议采用硬度较高的密封铜条,提高铜条的抗磨损和抗气蚀能力。

原设计铜条的材质为黄铜板 H62,建议更换为铸铝青铜 ZCuAl9Fe4Ni4Mn2,材料机械性能对比见下表:

| 材质                   | 抗拉强度 MPa | 屈服强度 MPa | 硬度        | 标准                         |
|----------------------|----------|----------|-----------|----------------------------|
| 黄铜板 H62R             | 294      |          |           | GB 2041-89<br>GB 2040-2008 |
| 黄铜板 H62Y             | 412      |          | 125~165HV | GB 2041-89<br>GB 2040-2008 |
| 铸铝青铜 ZCuAl9Fe4Ni4Mn2 | 630      | 250      | 1570HB(N) | GB 1176-87                 |

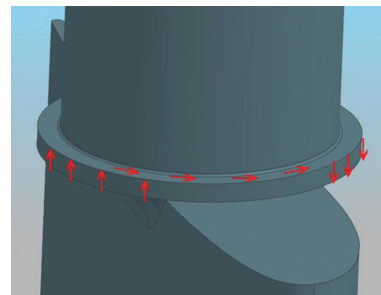
### ④剪断销加强

由于导叶端面密封铜条按照端面间隙平均值计算进行加厚,个别铜条的压紧力将大于原设计值,引起导叶操作阻力增大,继而作用在剪断销上的操作力增大。建议更换新的剪断销,并增加剪断销强度,由原设计剪断力 627.332KN(接力器操作力的 0.97 倍)提高到 707.300KN(接力器操作力的 1.1 倍)。

### ⑤导叶轴颈防绕流建议

构皮滩导叶轴颈通过顶盖的位置,在圆周方向单边存在 1mm 间隙、与套筒端面存在 3mm 间隙。经理论分析和现场情况判断,该处存在轴颈绕流现象,较大的漏水从导叶轴肩部位通过,导叶关闭后,

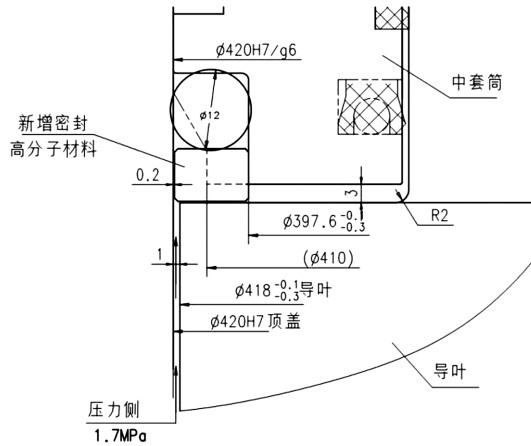
水流从导叶高压侧进入轴肩,沿轴肩端面与套筒的间隙通过,再从导叶低压侧流出(见下图示意),该通路上没有设置密封。



导叶轴颈绕流漏水示意图

经分析,可以在轴颈漏水的通道上设置密封,减小轴颈漏水。需对中轴套进行改造,加工中轴套下

部形成密封槽。在此处安装高分子环形耐磨密封环,密封环背部采用O型圈进行支撑,阻断高压侧的水流进入导叶轴肩与中套筒之间的端面间隙,减少漏水。见下图:



中套筒与导叶轴肩增加密封方案图

机状态下发生蠕动现象,危急设备安全,而且会造成水能损失,直接影响机组运行的经济性。通过发现活动导叶漏水量偏大以来,我们对此问题进行深入分析,逐步研究可能会造成活动导叶漏水量增大因数,结合我厂2019年2月对#2机组“A”级检修机会,通过改进活动导叶的端面上、下密封铜条厚度措施,总结并改进调整方式,检修质量全过程管理,使得#2机组检修后漏水量为 $0.8m^3/s$ ,符合国家标准。

通过计算,构皮滩发电厂耗水率每千瓦时 $2.11m^3$ ,每台机组每年平均利用1780小时,通过活动导叶改进措施,全年可减少 $0.68096880$ 亿立方米,可增加发电量 $3227.34$ 万kW.h,每千瓦时电量按 $0.24$ 元计算,可创造 $774.56$ 万元利润。

## 5 结束语

导叶漏水量偏大不但会引起机组停机失败或停

## 【参考文献】

- [1]水轮机检修、故障处理、运行调试与维护综合技术手册.北京科大电子出版社
  - [2]水轮机安装:电力工程.水电厂机电安装专业.人民出版社
  - [3]陈国庆,陈万吉.接触问题的非线性互补——接触柔度法.计算结构力学及其应用,1996:13(4)
- 作者简介:杨昆(1987~);男;汉;贵州贵阳;本科;助理工程师;水轮机结构改造