

# 试论渔子溪一级水轮机 泄水锥脱落及防止措施

陈 慷

(映秀湾发电厂)

## 一、问题的提出

渔子溪一级水电站水轮机型号为HL100—LJ—210，实际引用水头为280~315米。其转轮泄水锥先后五次在运行中脱落，各次脱落的情况见表1。

从表1看出，几次泄水锥脱落造成的发电产值直接损失多达近400万元，而且撞坏转轮留有后患，损失不小。国内已有14个水电站发生过泄水锥脱落的事件\*，这就使问题具有一定的普遍性。为了探讨问题的解决办法，本文除汇集情况供研究参考外，还针对渔一级泄水锥的损坏、流态与受力等方面进行简略分析，提出改进的一些初步设想。

## 二、泄水锥结构和损坏情况

### 1. 泄水锥结构

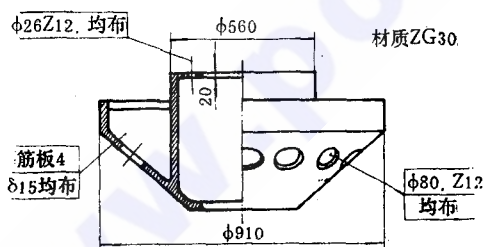


图1 原设计的泄水锥示意图

原设计的泄水锥(图1)由 $\phi 560$ 圆筒把泄水锥分隔成两个互不相通的腔(轴心补气腔和泄水腔)，泄水腔又被四块 $\delta 15$ 的筋板分割成互不相通的四个隔腔，锥面上均布12个 $\phi 80$ 泄水孔。与转轮上冠联接的法兰厚20毫米。

83年实测脱落的两个泄水锥的实际尺寸后发现：

- 1) 3号机泄水锥的结构和各部尺寸与原设计基本符合\*\*。
- 2) 1号机泄水锥存在如下缺陷(图2) ①锥面厚度不均，在12~20毫米之间；②为改善质量不平衡和增加外圆刚度，而在薄弱的一侧加焊了三块厚30毫米的配重筋板，这就使泄水隔腔由对称的四个增为不对称的七个；③联接法兰厚15毫米，比原设计值少5毫米。

\*据水利水电科学研究院机电所姚启鹏工程师提供。

\*\*但不了解出厂时是否作过动平衡。

表1 渔子溪一级水电站水轮机泄水锥历次脱落概况

机组编号	3	3	3	1	2
泄水锥与转轮联接方式 发现脱落时间及运行小时数	M24(A3)螺栓加弹簧垫圈。 1974年10月17日 4690小时	同左。 1977年5月22日 5368小时	螺栓六角头点焊固定, 外圆止口分段焊接。1983年8月31日 9403小时	同左。 1983年10月20日 3400小时	双头螺栓附加加锁定点焊, 止口焊接。 1984年1月22日
脱落前及脱落时的异常情况	①原装在导叶与转轮之间的筒形圈, 在运行中不等高升起, 最高105毫米, 最低9毫米(b <sub>0</sub> 为210毫米) ②机组有异常噪声, 振动增大。	①摆动摆度增大。 ②水导和推力轴承磨瓦。 ③水导油中有巴氏合金片。 ④有11个联接螺栓脱落, 1个断裂。	①机组有异常噪声。剧烈振动、摆度增大。 ②各导轴承瓦温升高。 ③联接螺栓在脱落或断裂。	同左。	①有异常噪声。 ②大部分螺栓脱落, 有两个螺栓断裂。
对转轮和十字补气架的影响	①17片转轮叶片被打坏7片, 其中4片出水边局部断裂脱落。	①叶片被打坏16片, 其中3片出水边局部断裂脱落。	①全部叶片出水边被打变形。 ②十字补气架被打变形。	①17片叶片出水边全部被打变形, 其中有4片形成局部穿透性裂纹。 ②大部分转轮轴帽帽点的焊缝被撞裂, 部分螺栓旋转了一个小角度。 ③十字补气架被打变形。	无明显损坏。
有关的处理方式	①进行扩大性大修。 ②泄水锥就地修复装回。 ③转轮叶片补焊打磨。	同左。	①更换新泄水锥。 ②在尾水管内用气焊把加用扁钢进行叶片整形(叶片平均开口只恢复到70%)	①更换新的泄水锥。 ②在尾水管内用气焊把和扁钢进行叶片整形。裂纹补焊打磨。 ③就地修复十字补气架。	①泄水锥就地修复装回。
占用工时	1806小时	1345小时	260小时	190小时	约240小时
直接损失	损失发电产值等100万元以上。	同左。	损失发电产值等100万元以上。	损失发电产值等约40万元。	
附注	大修中尚处理了其它项目	同左。	修复后由于叶片未能恢复原状, 开口不均, 被迫限负荷运行至11月3日大修	新的不锈钢转轮叶片未能完全复制; 留有后患。	装配时附加的锁定点是用一个螺帽靠近点焊。

### 2. 泄水锥与转轮的装配

原设计为M24(A3)螺栓12个加弹簧垫圈联接。1974年和1977年泄水锥两次脱落后,我厂有关人员认为,该联接方式不能满足运行需要。此后大修时,将螺栓六角头点焊固定,并在锥体外圆止口间断焊接于转轮上冠上。这个办法一直沿用至今(图3)。

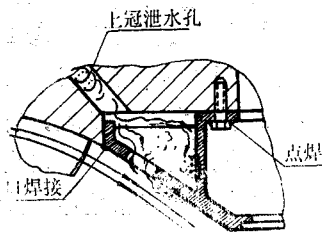


图3 泄水锥流态及装配

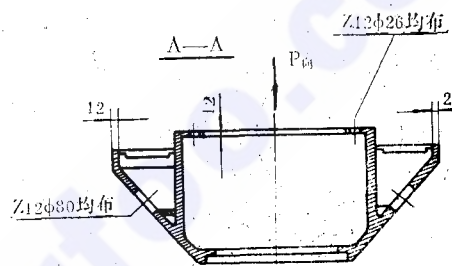
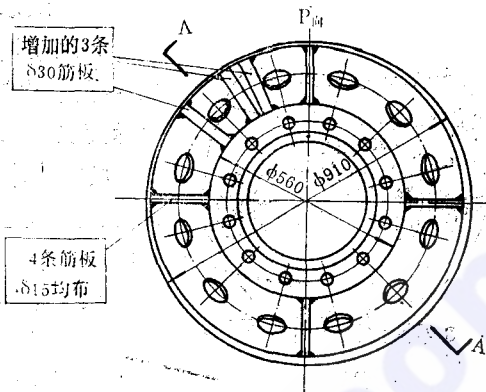
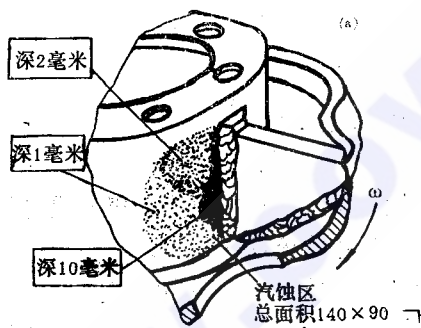
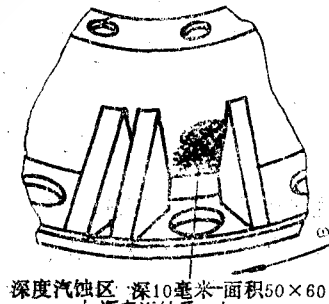


图2 1号泄水锥



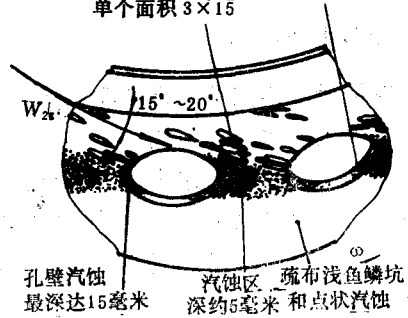
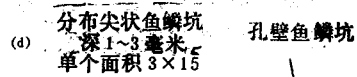
(a) 筋板焊缝附近的汽蚀破坏



(b) 增加筋板后,在圆柱面上的形成汽蚀破坏



(c) 正常对称筋板隔腔中,圆筒表面上的汽蚀损坏,对应 80连通



(d) 锥面过流损坏

图4

### 3. 泄水锥过流表面的损坏

泄水锥过流表面的损坏痕迹(图4和图5), 比较明显地存留在锥体表面和泄水隔腔的壁面上。单纯汽蚀(包括蜂窝状和麻面状)与坑状损坏交错分布, 并具有一定规律。增加的小隔腔内, 汽蚀最严重。这些残留的损坏痕迹, 反映了锥体上下内外流态紊乱, 以及锥体结构对于流态的干扰。

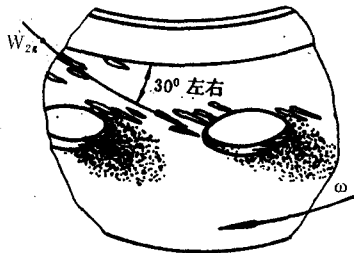


图5 3号泄水锥锥面过流损坏

### 4. 泄水锥在脱落过程中的损坏

除去脱落时形成的碰撞损坏外, 泄水锥在脱落过程中的损坏, 归纳有三种情况: ①焊缝受振开裂; ②1号水锥联接法兰 $\phi 26$ 通孔内侧, 产生对称分布的四条穿透裂纹(图6)。这个现象, 虽然只在1号泄水锥上发现, 有偶然性(法兰厚度比原设计值少5毫米), 但也似乎反映出泄水隔腔中的水流作用力, 同泄水锥装配的可靠性存在问题; ③M24联接螺栓大部分脱落, 有些螺杆疲劳断裂, 个别的螺杆残留在转轮上冠螺孔中。

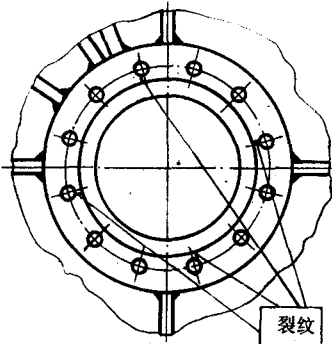


图6 联接法兰上, 有四个孔内侧出现穿透裂纹, 对称均布, 如图示

## 三、泄水锥流场与受力分析

在复杂受力情况下保证机组运行稳定性和可靠性, 是水力机械研究的极其重要的课题。泄水锥虽小, 但受力复杂, 主要包括质量力和流场中水流的作用力。

要对一台特定泄水锥的实际流场进行精确分析, 在目前条件下还不大可能。原因是边界条件复杂, 流场参数难以测定; 而且局部结构不合理, 会使该处的水流紊动度增加, 造成附加的过流损坏, 同时也增加受力的复杂性。图4a和图4b所示的局部损坏, 就是例证。现试略去若干偶然出现的因素, 对流态进行宏观的简要分析。

### 1. 泄漏水的影响

就水轮机泄水锥流场的水流而言, 有两个来源。一是来自转轮上腔的泄漏水流, 经上冠泄水孔进入泄水锥筋板隔腔, 再通过锥面泄水孔进入尾水管; 另一个是转轮上冠即叶片上根部的出流。这两路水流各有自己的流动规律和制约因素; 它们的汇合与干扰, 对泄水锥的受力和过流损坏产生重要的影响(图3)。

泄漏水流场是一个尚未完全弄清的问题。其泄水量与上冠泄水孔的布置圆直径、孔径、倾角、转轮上腔压力等条件有关。从实际观察上冠泄水孔损坏痕迹推断, 孔中泄漏水流是具有一定角转速 $\omega$ 的下向旋转水流(图3)。在隔腔壁上, 由于来流的压力脉动和速度变化, 形成交变的水压力。当隔腔不对称时, 会增加这种交变力的幅值和改变

其相位、频率。而且使流态变得更加紊乱，空腔空化发育，在相应部位造成汽蚀损坏。

## 2、转轮出流与涡带的影响

在实际运行的水轮机中，通流部件来流的不等势导致转轮出流的不等势。不等势的出流将在泄水锥上形成交变力。

本电站水轮机为高水头机组，转轮叶道中的流速较大；当水头为275米，出力为4万千瓦时，计算叶片上根部的相对流速 $W_{2g}$ 约为25米/秒。实践证明，这样大流速的含沙水流，当有流态干扰时，对普通碳结钢（例如ZG30）和低合金结构钢（例如20SiMn）的过流表面会产生较为严重的磨蚀损坏。这和我们在几个泄水锥锥面上观察到的损坏情况一致（图4d和图5）

泄水锥位于转轮下部，转轮出口涡带也会给泄水锥的受力带来影响。图7为HL100模型水轮机涡带与导叶相对开度的关系。当 $a_0/a_{0满}$ 约0.8~0.9时无涡带。多年来，机组虽多在最优工况点附近运行（实际导叶开度约为80%~90%），但仍有相当的运行时数带3万千瓦（75%）以下负荷，导叶开度在70%以下，涡带会使泄水锥承受交变的作用力。这也是一个不能忽略的因素。

## 3、质量力的影响

泄水锥联接螺栓承受的质量力主要是离心力和重力。

离心力 $F$ 和泄水锥的静不平衡、安装偏心、运行摆度所形成的动态质量不平衡等因素有关。

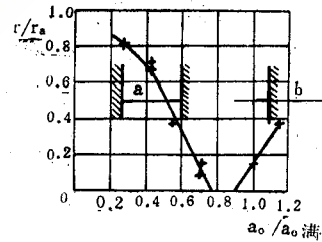
$$F = m\omega^2 e$$

式中  $m = G/g$ ， $G$ 为泄水锥重量，

$\omega$ 为旋转角速度，

$e$ 为泄水锥动态重心与水轮机实际运转中心的偏心距离。

由于本电站水轮机具有很高的旋转角速度（额速时， $\omega = 52.3/\text{秒}$ ）， $F$ 随 $e$ 增大而增加，这就对制造和安装质量提出了高要求。



$n_e = 100$ 转/分

a为正振动带区

b为反涡带振动区

图7

## 四、泄水锥脱落过程的分析

综合以上的分析，作用在泄水锥上主要有以下几种力：

1. 质量不对称所造成的离心力；
2. 流场水压脉动所造成的水流作用力；
3. 局部区域在空化和汽蚀损坏过程中的作用力。

这些力中，“汽蚀力”在很大程度上具有随机性。由于制约因素的影响，其余各力应是具有一定相位、频率的交变力。所有这些力的合力在某个运行工况点时，也应当具有相对稳定的相位、频率和幅值。

在运行期中，交变的合力作用于泄水锥上，首先使应力集中的薄弱部位发生金属疲劳出现裂纹，例如焊缝裂纹（焊条选择、焊工技术、被焊件贴合程度、焊位表面清洁程

度等都影响着焊熔物的疲劳极限)。焊缝裂纹扩展(或弹簧垫圈力特性下降后),加剧了泄水锥的受迫振动,进而发生法兰面裂纹、螺帽或螺栓脱落,最后使把合牢固的那些螺栓疲劳断裂,导致泄水锥脱落。这是一个连锁反应过程。当泄水锥和转轮发生相对位移时,就会伴生机组的振动和异常噪声。

## 五、改进设想

以上介绍了渔子溪一级电站泄水锥脱落的情况,并进行了简略的分析。我们认为,在不利的工作环境下,制造和安装时带来的偶然性因素,可能是泄水锥脱落的诱因。为什么同型号的机组,有的要掉,有的不掉;同一台机组,这次要掉,那次又不掉。看来改进制造和安装质量,是目前防止泄水锥脱落的必要手段之一。为了维持机组的正常运行,建议进行如下的改进(图8):

1. 改进泄水锥结构,在筋板和内圆筒上适当增加连通孔,以减小泄水隔腔交变力的幅值。

2. 静平衡超差的泄水锥不能使用。经计算,建议泄水锥的静平衡允差规定在0.15公斤·米以内。同时,静平衡配重不得对水流产生干扰。

3. 为了抵抗径向交变力,建议在四条筋板对应的外圆上开槽,设置四块抗振楔板,安装时与泄水锥焊牢。取消间断焊接外圆止口的加固方式。

4. 在M24把合螺栓与泄水锥下法兰面之间设置3/3或4/4垫环,并将螺栓六角头与垫环焊接固定,以保证把合法兰面的永久平整性。现有的钻孔后镗平面的办法废止;改为将法兰的上、下平面都车削平整。

5. 减小外圆止口间隙;配车外圆使双面间隙控制在0.10毫米以内,以减少安装不同心度。

以上建议,可能有不够全面之处。建议今后还要根据泄水锥的作用,研究从导流、泄水、补气和抗振这四方面取得综合平衡,选用最优方案,彻底解决泄水锥脱落问题,促进高水头混流式水轮机的发展。

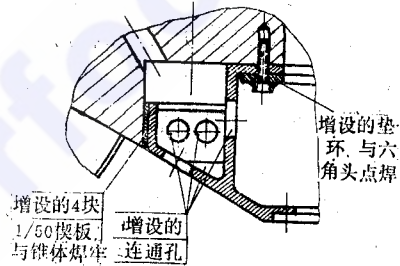


图8 改进示意图