

泥沙对水轮机的 磨损及其防止译文集

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院 译

中国工业出版社

泥沙对水轮机过水部分的磨损是水电站运转中经常发生的问题，特别是修建在含沙量较大的河流上的水电站，这一问题更为突出。目前世界各国有关方面都在对此问题进行研究，我国也已开始重视此项研究工作。本书就是为了配合我国开展此项工作而选译的。

本书共搜集了苏联、日本、瑞士、印度等国有关水轮机磨损的研究报告和论文10篇。各篇中均通过具体例子和实际试验论证了水轮机的磨损及其防止办法，特别是关于各种抗磨材料的性能、磨损对水轮机效率的影响，如何防止水轮机的磨损等方面，提供了一些有参考价值的资料。

本书可供水电站水力机械设计、运转和水电科研人员使用，亦可供水轮机制造人员参考。

泥沙对水轮机的磨损及其防止译文集

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院 译

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $6\frac{3}{8}$ ·字数149,000

1963年3月北京第一版·1963年3月北京第一次印刷

印数001—860·定价(10-7)0.93元

*

统一书号：15165·1254(水电-222)

前 言

泥沙对水輪机过水部件的磨損是水电站运轉中常發生的問題，凡是修建在含有泥沙的河流上、特別象山区的河流上的水电站，都容易使水輪机遭受磨損。水輪机的磨損将使水輪机的效率下降，减少水电站的出力，更严重的是使水輪机不能繼續运行，必須更換或修补被磨損坏了的过水部件。从我們所搜集到的有关水輪机磨損的資料中可以看出，由于水輪机的磨損而給水电站带来的危害是严重的。

引起我們对这个問題重視的原因，是由于黄河上的水利樞紐工程的兴建。大家知道，黄河水力开发条件优越，对黄河流域工农业的发展，以至整个国家工业化、电气化事业都有重大的意义。但是，黄河的含沙量在世界上是罕見的，黄河的多年平均含沙量为32.2公斤/立方米，汛期最大时达580公斤/立方米。黄河每年带到下游海口的泥沙平均达到十三亿八千万吨，而黄河泥沙最大的特点是顆粒很細，其粒徑多小于0.02毫米，最大不过0.04毫米，其中泥沙所含有的石英矿物成分占40%左右。我們知道，石英的硬度是7（莫氏硬度表），而制造水輪机所用鋼材的硬度在4.5左右。从这一例子可以看出，黄河及在其它含泥沙較多的河流中的泥沙对水輪机过水部件的磨損問題，应当引起我們极大的重視。

目前我們搜集了几篇外国对此問題的研究資料，其中包括苏联、日本、瑞士、印度等国的研究報告及論文。为了吸取經驗以推动我們研究工作的进展，我們将其汇编成册，供大家参考。由于我們的水平及能力的限制，編选和譯文均可能有不当的地方，希望讀者指正。如有意見，請寄北京西郊景王坟水利水电科学研究院技术处。

水利水电科学研究院

1962年7月

目 录

前 言

泥沙对水轮机零件的磨损和耐磨材料的研究.....	(苏联) И. П. 克朗宁(1)
水轮机受泥沙磨损后的修理及提高其抗磨性能的方法.....	(苏联) Г. X. 特亨瓦列里(5)
防止泥沙对水轮机的磨损.....	(苏联) Н. И. 配拉也夫(13)
泥沙和气蚀对水力机组工作特性的影响.....	(苏联) В. Н. 普鲁日尼可夫(21)
应用特制泥沙磨损仪进行的磨损试验.....	(瑞士) W. 斯多费尔(27)
混流式水轮机与冲击式水轮机.....	(瑞士) Ch. 文格特尔(49)
平面受含砂射流水束磨损的研究.....	(瑞士) C. 伊尔盖斯(58)
防止水轮机磨损的方法.....	(日本) 宫田秀介、安田振之助(72)
水轮机材料的磨损与剥蚀.....	(日本) 深栖俊一(83)
泥沙对水轮机的磨损及其防止.....	(印度) Y. K. 毛尔齐, K. 馬德哈文(90)

泥沙对水轮机零件的磨损和耐磨材料的研究

(苏联) И. П. 克朗宁

(此文系作者代表1958年3月来我国进行考察“泥沙对水轮机磨损”的苏联专家组在上海勘测设计院向中国同志作的报告)

研究泥沙对水轮机的磨损问题，有很大的实际意义，它是水轮机重大研究对象之一。在含有大量悬移质泥沙的河流上，大部分水电站的水轮机都会受到泥沙的磨损。在苏联水轮机受到泥沙严重磨损的水电站有：巴克山、沙里汗、埃金里昂等水电站。

当这些电站投入运转后，随着上游泥沙的淤积，通过水轮机的泥沙也就日益增加，这就引起水轮机过水部分零件的严重磨损。

水轮机零件的磨损会引起机组效率的降低，会增加检修的工作量，并且会增加停机检修的时间。

上述电站运转一年之后，过水部分零件就不适宜于再继续运转，而需进行大修或更换零件。同时在一年运转之后，机组效率的降低值达到4~8%，这就造成了电能的大量损失。

因此，解决提高水轮机零件的抗磨性，并将大修间隔时间延长到2年（技术运转规程规定为2年）这一问题，对制造厂和研究院来讲是一项迫切的任务。

一、水电站的泥沙情况

上述几个电站都是在山区河流上，这些河流的特点是：一年内流量的分配很不均匀，春夏季洪水流量为冬季最小流量的40~50倍。洪水期间的含沙量达全部含沙量的80%。

上述河流的年平均含沙量的变化范围为0.5~1.3克/升。这里应当指出一点，对水轮机起磨损作用的泥沙颗粒，只是那些硬度比水轮机零件硬度高的硬矿物颗粒。如果水轮机零件主要是用硬度为4.5（莫氏）的钢制造，那么由于磷灰石、长石、石英等硬矿物颗粒的硬度在5~7之间，就会对水轮机零件引起严重的磨损。

为了说明通过水轮机的总泥沙量，我们用巴克山水电站来做例子。

1953年一年内通过一台水轮机的泥沙量为17万吨，其中7万吨是硬矿物颗粒。

上述这些电站的硬矿物颗粒的年平均含量为0.1~0.5克/升，同时其中主要是粒径大于0.05毫米的沙粒。

二、水轮机零件磨损的性质

受泥沙磨损的零件表面多为波纹状，发暗光。由于沙颗粒的冲击力量而对水轮机产生破坏作用。虽然单个砂颗粒的冲击力不大，但因沙颗粒具有尖锐的稜角，故产生的破坏力仍是很大的。这个力量要是超过金属的强度，就会引起金属表面的微细颗粒逐步脱落。

下面简单谈谈辐向轴流式水轮机主要零件磨损的特点：

1. 轉輪：轉輪是水輪機最易受磨損的部件，大修的日期主要是根據轉輪的狀態來決定的。

轉輪的全部表面都受磨損，磨損面呈鱗片狀和波紋狀，最厲害的地方在轉輪的工作面，下部輪環的內側，葉輪出口邊緣和下部輪環相連接的地方，以及迷宮環等處。至于葉片背面，則主要是受氣蝕的影響。

由于轉輪受泥沙和氣蝕的双重作用，有时竟使葉片出口邊緣處發生整塊的剝落。

采用碳素鋼、低合金鋼和高合金鋼製造轉輪，其運轉年限不過一年左右。

2. 導水機構：導水機構葉片表面全受磨損，而朝向轉輪的那一面更為嚴重。導水機構軸的軸頸也磨損得很厲害，導水機構等的上部蓋、底環連接處也發生磨損，這些磨損引起了導水機構在關閉狀態時漏水量的增加。

3. 壓力鋼管和渦殼：這兩個部件的磨損比上述元件要輕些，看起來也呈鱗片狀和波紋狀。渦殼下部磨損要比上部磨損嚴重些。

三、引起磨損的主要因素

引起水輪機零件產生某種程度磨損的因素有二：

1. 零件材料的物理特性（硬度、显微組織、化學成分等）；

2. 零件受外力作用的情況（泥沙濃度、水流速度、泥沙顆粒的直徑和形狀等）。

关于這二種因素對金屬抗磨性的影響問題，有不少的研究院和製造廠都在進行研究。

目前研究結果表明，在第一种因素中起主要作用的是硬度和显微組織。第二種因素中起主要作用的是泥沙流動的速度。根據一系列試驗室實驗結果和電站實際運轉經驗表明，磨損程度和流速立方成正比，硬礦物顆粒的濃度和磨損程度也大約成正比。磨損程度和顆粒直徑之間的關係也可以說是正比關係。粒徑愈小，磨損也愈少。

至于顆粒形狀對磨損的影響，這個問題正在進行研究，根據全蘇水工科學研究院（ВНИИГ）的初步材料，尖稜角的顆粒所引起的磨損要比圓形顆粒引起的磨損大幾倍。

四、試驗室進行的抗磨材料的選擇工作

关于水輪機零件抗磨材料的選擇工作是在列寧格勒金屬工廠和中央機械製造工藝研究院進行的。

列寧格勒金屬工廠試驗室的磨損試驗設備，是利用史陶費爾潤滑器的原理（仿·埃舍-威斯公司的設備）製造的。設備本身是一個鋼制的容器，里面有含沙的水和一個轉盤，轉盤上固定有4個試樣，轉盤是裝在一個轉軸上，由直流電動機帶動。電動機的轉數是可調整的。為了防止試驗容器的過熱，設有循環冷卻水裝置。

目前第一步試驗已經結束了，試驗是采用石英砂，顆粒直徑是0.05~0.25毫米、0.25~0.5毫米和0.5~1.0毫米，一共采用了20種不同材料的試樣。曾試過碳素鋼、鉻鋼、鎳鉻鋼等試樣，也曾用各種不同的化學、熱處理方法進行了試驗（滲碳法、氮化法、高周波電流淬火硬化），並且用各種不同焊條進行了熔焊（942，1X13，12АН/ЛИИВТЦН-4，ПД-9）。

各種試樣抗磨性的高低，是按它們在試驗過程中重量損失的多少來確定的。

經過試驗證明，抗磨性能最好的試樣是表面硬度最高的試樣，同時也表明，泥沙顆粒直徑減小，磨損程度也隨着減輕，大約成正比關係。

蘇聯中央機械製造與工藝科學研究院的試驗設備是象反射管式的水渦輪的結構形式。含泥沙的水流沖刷在固定於周圍的試樣表面上。

試樣的抗磨性也是按試樣損失的重量來確定的。

在這個設備上曾經用各種標號的鋼（碳素鋼、錳硅鋼、含銅鋼、高鉻鋼）進行過試驗，同時也用各種方法（正常化回火處理法、淬火後并回火、滲碳法、氮化法等）進行過熱處理。

試驗結果表明，具有兩相組織（奧氏體固體鋼）的鋼試樣磨損最小。

此外還進行了熔焊材料試樣的試驗，並用了30種不同標號的焊條進行熔焊。熔焊試樣的硬度是20~60個羅氏硬度單位（ R_c ），結果證明，效果比較好的焊條是ЦН-5、ЦН-3、ЦН-1М和ЦН-2。

除了現有的試驗室試驗設備外，目前還在製造其他型式的泥沙磨損試驗設備。

在蘇聯主要是沙子的磨損，而對黃土、粘土的磨損試驗尚未進行。

五、在實際運轉的水電站上所進行的實驗工作

由於試驗不能完全反映實際運轉的條件，所以有必要在實際運行的電站上進行實地的試驗。在起初這種試驗是在小的零件上進行的，因為這些零件在製作和安裝上不會有什麼困難。

試樣是做成保護環的形式，保護環裝在導水機構的下部青銅軸套上，保護環的試樣是用各種材料做成的，並用各種方法進行硬化處理。

這些保護環曾經在電站上實際運行了一年，並且保護環在安裝之前和試驗之後都經過了重量的測定。

各保護環的抗磨性能（以抗磨係數表示）是以其重量損失和標準環的重量比值來表示的。在一年以後得出了下列試驗結果。

編 號	保 護 環 材 料	表面硬高. (布氏) H_B	抗磨性能
1	Ст. 25-И鋼(滲碳)(淬火)	650	3.1
2	Ст. 45-К鋼(淬火)	600	2.8
3	Ст. 2Х13-К鋼(淬火)	320	2.3
4	Ст. 25-1Х13鋼(淬火)	400	2.0
5	Ст. 1Х18Н9Т鋼	170	1.0
6	Ст. 30Л鋼	165	1.0

從左表中可以看出，表面硬度高的保護環具有最高的抗磨性能（抗磨係數）。

除試驗小零件以外，還製造和安裝了試驗性的導水機構葉片，葉片是用各種方法硬化的，有的用滲碳法，有的用高周波電流淬火法，有的用12АН/ЛИИВТ和13КН/ЛИИВТ焊條熔焊，用1Х18Н9Т

號鋼做護面。全部用1Х13號鋼製造這些葉片的試驗結果，在1958年4月份得出。

為了試驗水輪機的抗磨性能，用20-ГС-Л 硅錳鋼製造了水渦輪（直徑1200毫米）。水輪機受氣蝕作用的地方用ЦН-9焊條熔焊，受泥沙磨損的地方用1Х13、12АН/ЛИИВТ和ЦН-4電焊條進行熔焊。

此外還製造了二個直徑2500毫米的試驗性水輪機，如沙里汗水電站試制的，水輪機主體是用碳素鋼製造的，而葉片則單獨製造，然後焊在轉輪上。葉片是用各種材料製成

的,其中有2个为1X20H3Г3Д2-Л,有二个为2Л-X20H9Г3Д2-Л,有二个为2Л-20ГC-Л。另外用ΠH₅、ΠH₃、ΠH₂、ΠH-1M进行对焊,其中还有4个叶片用碳素鋼制造、用ΠH₅堆焊,剩下四个就用普通碳素鋼。这个水輪机試驗的結果,在1958年~1959年就可得出。

对水輪机迷宫环的制造也正在进行。迷宫环是用碳素鋼制造,然后用渗碳法和淬火法硬化,用9XГC鋼制造,用淬火法硬化。

在实际水輪机零件上进行实验的目的,是为了检查大零件上硬化加工的工艺过程和在实际运转条件下检查硬化加工方法的效果。

六、如何考虑泥沙磨損的問題

首先考虑下列因素:

- 1.通过水輪机的泥沙特性,包括含沙量、顆粒直徑、顆粒形状、水流速度。
- 2.掌握水輪机过水部分結構的特点,掌握整个施工图纸的情况。
- 3.水輪机制造厂在制造上的可能性,同时需要进行經濟比較。

考虑到以上因素,我們认为解决防沙問題可采用以下几种措施:

1.对于小零件或者是简单的零件,在机械加工后可进行淬火、渗碳等热处理,以增加其硬度。

2.若用低合金鋼和碳素鋼,应在其表面进行堆焊。

3.如用新标号的鋼材来制造水輪机零件,应对其提出技术上的要求,即要求有較高的硬度和工艺性能(如鑄造性能、鍛造性能、焊接性能等)。

4.大的部件做成組合式的結構,用焊接的方法把单独的零件焊接在一起,例如叶片和下部輪环用高合金鋼鑄造,而上部輪环用低合金鋼鑄造,然后用专门型号的焊条焊接組合。

5.对零件采用保护面,并在一定時間后进行調換。

同时还應該考虑中国的实际条件,考虑中国的泥沙特点,我們认为中国研究这个問題是很迫切而且是很重要的。

李紹虞 譯

水輪机受泥沙磨損后的修理及 提高其抗磨性能的方法

(苏联) Г.Х. 特亨瓦列里

一、水輪机磨損

現代水电站水輪机設備运轉中的一个主要問題，就是如何防止水輪机的气蝕和泥沙磨損的問題。

沒有一个水电站，在它的水輪机上竟然找不到由于气蝕或泥沙磨損所引起的破坏。泥沙磨損現象主要是发生在山区河流上的水电站中。

这里我們暫且抛开气蝕現象不談，单研究一下泥沙对水輪机的磨損以及防止这一現象的措施。

由于磨損的結果，水輪机的效率降低，发电量也随之显著地被减少。例如里昂水电站的1号水輪机，在运轉16,000小时以后，当平均負荷为7,800瓦时，其效率較之初投入运行时降低8%。图1是水輪机磨損前后的效率曲綫。

水电站的运轉經驗表明，如果河流中挟杂有大量的坚硬的悬移质泥沙，那么即使是有泥沙池，也会发生河流泥沙对水輪机的磨損。例如，卡那克尔水电站、德佐拉水电站、巴克山水电站、艾兹明水电站以及其他一些水电站都設有泥沙池，而通过这些电站的水輪机下泄的大部分泥沙顆粒的直径，一般都不大于0.25毫米。然而，这些水电站的水輪机，仍然遭受到强烈的破坏。不应该认为象某些参考书和規範中所說的那样，即只有直径 $d \geq 0.25$ 毫米的泥沙顆粒，才有引起水輪机磨損的危險。实践証明，即使直径为0.05毫米的細小顆粒，对于水輪机甚至也有危險。当然，最危險的是泥沙中較坚硬的成分，例如石英、花崗石和电气石等。在其他相同的情况下，水电站的水头越大，水輪机磨損亦越强烈。

因此，几乎所有近代高水头的水电站，不論是否具有造价較高的泥沙池，其水輪机均会遭到泥沙的磨損。由于这个緣故，最近有些水利工作者建議取消泥沙池，而采取經常性的大修来防止磨損。同时，到目前为止，还没有規定磨損到何种程度应当停机进行檢修的必要指示。各个水电站都按照尽可能在枯水期不閑置設備的原則和本身的特点，来确定自己的檢修期。前述的巴克山水电站的水輪机，在經過一个大修周期(一年)后，效率降低了12%，但同时在另一些水电站上，也經過了一年的時間，其效率降低不过2%。因此，在分析水电站工作情况的基础上，必須确定需要停机进行大修的效率降低的极限值。根据某些高水头水电站的分析資料，在一个大修周期內，水輪机允許的效率降低值，可以采用5%。

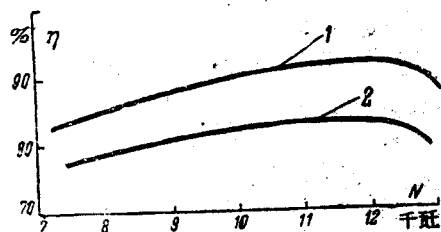


图1 水輪机效率曲綫

1—磨損前；2—磨損后。

但是，通常对于不同的水电站，此允許的极限值亦不一样。在一些个别的情况下，这一数值应当按相应的技术經濟計算来确定。

下面我們研究一下水电站水輪机遭受泥沙磨損后的修理措施。

二、水輪机的修理

1. 輻向軸流式水輪机

在这类水輪机中，容易磨損的零件主要有：轉輪、导水机构的叶片、导叶樞軸的青銅衬套、水輪机盖、导水机构下环、軸的止水、基础部分和空放閥。

輻向軸流式水輪机的轉輪：根据其水头和出力的大小，通常可制成以下几种型式：

- (1) 叶片用鍛造鋼制，鑄在鋼制或鑄鐵的輪环和衬套中；
- (2) 用碳素鋼或特种鋼整体鑄造；
- (3) 用鑄鐵整体鑄造。

对于带有鍛造鋼制叶片的鑄鐵轉輪，被損坏的部分主要是下輪环。当下輪环遭受磨損不太严重时，只需要修理止水处就可以了。修理的方法是：作一个專門的环，并用机床預先对輪环的損坏部分进行加工，然后将專門的环套入进去，同时使其很好地配合。必須指出，当下輪环磨損到不可能进行修理时，則应将下輪环除去，然后鑄上新的鑄鐵輪环，如果可能的話，最好是用鋼制的輪环。

为了不致破坏原有叶片的正确的相互位置，在取下被磨損了的輪环之前，必須将所有的叶片逐次地焊在一个特制的金属环上。用这种方法曾修复了已經作廢的容量为4500馬力的水輪机以及一些較小馬力的轉輪。

对于用碳素鋼整体鑄造的轉輪，其磨損部分可用电焊修复，通常采用标号D-42的电焊条，然后在机床上加工或用軟軸砂輪打磨。当修理轉輪叶片时，应当特別注意恢复叶片的原有型状，为此，可以按照水輪机圖紙作一个相应的样板。如果水电站沒有必需的圖紙，那么上述样板可按庫存的新轉輪的叶片制作。如果沒有新的轉輪，也可按磨損最輕的叶片形状制作样板。



图2 列菲尔公司制造的水輪机轉輪磨損后的照片

轉輪磨損和間隙（特別是下輪环与其相应的固定部分之間的間隙）增大，会引起水輪机效率的显著降低。如果水輪机容量大大超过发电机容量，那么轉輪止水磨損对效率的影响，有时不易发觉。水輪机磨損程度和效率的变化，应当按水輪机流量計的讀数和单位流量数值来估計。如果后者显著地增大，这就意味着有必要停机进行大修。

图2是列菲尔公司制造的水輪机轉輪磨損后的照片，該轉輪全部以鑄鐵鑄造，安装在奥尔忠尼启則水电站。在投入運轉后不久，轉輪就受到如此强烈的磨損，以致根本不能繼續工作，因此，只得換成鋼制的新轉輪，該輪为烏拉尔厂出品，型号是PO-123。

这个例子说明，对于建筑在含有坚硬悬移质的多沙河流上的水电站，采用鑄鉄制的轉輪是不适当的。

用不銹鋼整体鑄造的轉輪，磨損后的修复与用碳素鋼整体鑄造的相类似，所不同的是应采用特制的奧斯汀类电焊条焊补。为了避免裂縫現象，轉輪的修复工作，应当非常小心地进行，当焊接工作量很大时，轉輪应当預先加热到 $400 \sim 450^{\circ}\text{C}$ 。

图3是輻向軸流式水輪機轉輪叶片邊緣处的修复示意图，該处是由于受泥沙与气蝕作用而损坏的。图上所見到的是叶片的水出口面。轉輪的修复工作，按下述的程序进行。首先鏟去受到强烈破坏的出水邊緣，之后将鍛造的鋼接板，齐平地焊接于叶片上。再在叶片的非工作面上焊貼板，貼板用厚度为3毫米的不銹钢板制成，标号是1X18H9T。为了加强貼板工作的可靠性，将貼板制成条状，各条单独焊接，每条寬30~50毫米。焊接时采用特制的电焊条，标号为ИЛ-24。

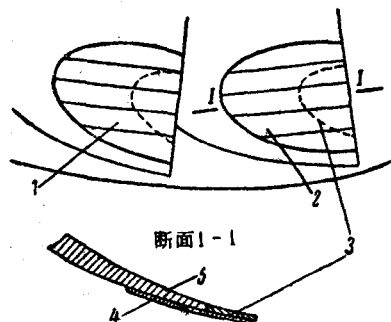


图3 修复輻向軸流式水輪機轉輪被损坏叶片的示意图

1—寬30~50毫米、厚3毫米的不銹鋼板条；2—焊縫；3—鋼制墊板；4—貼板；5—叶片。

大容量水輪機的导水机构的叶片：通常导叶是用碳素鋼鑄造或鍛造。如果水头特别大，則采用不銹鋼制造。导叶的軸連帶鑄出。碳素鋼导叶磨損后，采用电焊修复，焊条标号为Д-42，然后，在机床上进行加工。导叶翼緣应按施工詳图修复，为此，必須准备导叶断面样板，按此样板加工电焊过的导叶。

当水輪機在挟沙水流中工作时，为了延长导叶的使用期限，应当避免长期带小負荷运转。在机组作同期調相机运转时，也不应当以导叶来直接承受水头。

水輪機盖：通常都以鑄鉄鑄造，在安置导叶的部分加有鋼制的护面。

运转經驗表明，当豎軸式水輪機的机盖和导水机构的下环所用材料相同时，后者的磨損較安置导叶地方的机盖表面为大。这种現象說明，由于粗粒泥沙是在水流下层移动，因此位于下部的零件磨損較为严重。在长期运转之后，轉輪上面的水輪機盖，也显

出很大的磨損。图4所示为某水电站水輪機盖受磨損的部分。該水电站的工作水头为128米。从該图中可以看出，机盖表面已經磨損到不可能按正常方法（裝置鋼板护面）修复的程度，因此，只得采用补焊金属法修复。为此，在被磨損的表面上，裝置了大約300个直徑10毫米的螺塞，然后进行金属焊补。用于焊补的鋼条是 Ct.15号碳素鋼电焊条。經研究表明，焊补层与

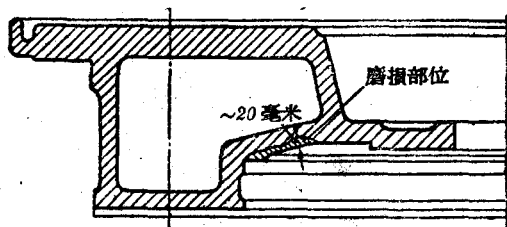


图4 鑄鉄制的水輪機盖受磨損后的示意图
(水头 $H=128$ 米)

被磨損的机盖表面連接得非常牢固。用上述方法修复的水輪機盖，已經有效地运转了半年之久。

水輪機盖遭受剧烈磨損，一部分是由于轉輪中水的旋轉所造成的。为了减少这种磨

損，最好在机盖上适当地安装一些稜肋，使其阻止轉輪上水流的旋轉。

低水头水电站水輪机的导水机构的下环：通常以鑄鉄鑄造并加装鋼护面，也有不加鋼护面的，視其水头大小和进入水輪机的水所挟泥沙的数量和质量而定。

中水头水电站的导水机构下环，通常用鑄鉄鑄造，加鋼护面。但有时由于当地条件的需要，也采用鋼鑄造。

高水头水电站的导水机构下环，都采用鋼鑄造。

在所有水輪机部件中，磨損得最厉害的，几乎总是导水机构下环。

导水机构下环采用电焊修复，并不发生很大的困难。但应该考虑，当焊接工作量甚大时，可能使下环发生歪曲变形。为了避免这种现象，在焊接之前，可在下环上装置螺栓，并将全部螺栓加固。根据下环的材料，采用相应的电焊条进行修复。在焊接完毕后，再放在机床上进行加工。

高水头水电站的导水机构下环，日久被剧烈磨損后，終需更換。为了装置新的下环，应在新的下环上搪孔，以备安装导叶樞軸的衬套，搪孔应与水輪机盖上的孔相对应。

在电站上完成鋼制下环的搪孔工作可能发生困难。这时，下环应在工厂中按照圖紙預先搪孔，之后在装配水輪机时安装青銅衬套，并按水輪机盖的衬套对这些青銅衬套进行搪孔。

导叶的軸承：通常用鑄鉄鑄造。如果它与水輪机盖配合得很好，則磨損仅在受水冲刷的端面上发生。磨損的軸承，可用下述方法修理：先将磨損了的端部表面在机床上切掉，然后再装上鋼制的垫环（如图5所示）。最后，在加工此垫环时，应以四个螺釘固定，同时軸承应按指示器精确地安放在机床上。螺釘头应当焊接，并且打磨到与垫环表面相平。

导叶樞軸的衬套：最好用标号为 OИC6-6-3 的青銅制造。在低水头水电站內，也有用胶合木衬套代替青銅衬套的。

当导叶樞軸衬套遭受泥沙磨損而使樞軸与衬套之間間隙增大，以致导水机构不能正常工作时，就必須更換衬套。根据被磨損的青銅衬套的修复經驗，近来都采用电焊的方法。当导叶下部樞軸衬套被强烈磨損时，根据 M.A. 巴尔可夫斯基工程师建議，可以装置一个橡皮垫圈，如图6所示。

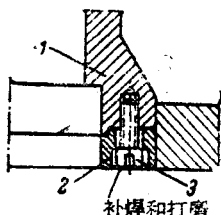


图5 鋼制垫环装置略图

1—导叶軸承；2—垫环；3—螺釘。

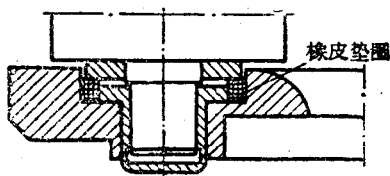


图6 导叶下部樞軸橡皮止水略图

运轉經驗証明，这种橡皮止水，能够延长导水机构下部樞軸和衬套的寿命。

水輪机迷宫环：通常以鑄鉄鑄造。大多数的迷宫止水环的构造是：使得經過它的清洁水流的落差不小于水輪机的工作水头。在这种情况下，迷宫止水环的寿命較长。如果

清洁的水不能进入迷宫止水环，则在洪水期间，止水环将受到剧烈的泥沙磨损。这将引起水流通过轴的迷宫止水环大量地流进水轮机盖，因此，自动抽水泵就必须频繁地动作，以便及时把水抽到下游。某些水电站由于迷宫止水环磨损，水流进入了水轮机导轴承，这就给运转人员增加了不少麻烦。因此，必须及时地换用新的迷宫止水环。

基础部分：在基础部分中，遭到磨损的是水轮机基础环，它通常都用铸铁铸造，并加不锈钢板制的护面，也有某些结构没有这种护面的。

磨损不太严重的不带护面的基础环，可利用专门焊接铸铁的电焊条进行补焊。补焊后的表面，按照样板用软轴手持砂轮磨平。样板根据基础环施工图制造。

当没有护面的基础环工作面被剧烈磨损时，可以适当地在它上面搪些孔，然后装上一个不锈钢制的厚度不小于8毫米的护面。护面必须以足够数量的缝合钉牢牢地固定在基础环上。固定后，缝合钉的头部，置于护面上特为铣出的槽中，或者焊在护面上，最后将缝合钉的头部打磨到与护面相平。当护面被磨损时，就要进行更换。

空放阀：在空放阀中最容易被磨损的主要是止水环，它是用青铜制成的。运转经验表明，青铜止水环很快就会磨损。因此，根据巴尔可夫斯基建议，在某水电站采用了钢制的加有橡皮护面的止水环。开始工作得极好，但很快就被毁破了。看来这可能是由于在空放阀工作时，在其关闭的那一瞬间，有意外的物体落入了止水环内所引起的。现在磨损了的止水环已为新的钢制止水环所代替。

2. 转叶式水轮机

转叶式水轮机过水部分的许多部件，与辐向轴流式水轮机非常类似，因此防止它们磨损的措施是与辐向轴流式水轮机一样的。所不同的是转轮室和转轮本身的结构。当这些结构被磨损时，应采取下述的措施：

转轮室：第一个巨型转叶式水轮机的转轮室是以铸铁铸造的，不带任何护面。运转经验表明，这种铸铁的转轮室的寿命较短，很快就会被气蚀所损坏。在某些水电站内，在水轮机室发生气蚀之前，先发生泥沙磨损。在一个工作水头为20米的水电站上，曾对转叶式水轮机进行了观察，结果表明，在运转的初期，转轮室受到了泥沙的磨损，随后，这种磨损就为气蚀的发展创造了便利的条件。

为了消除转轮室内遭受磨损不太严重的地方，可利用专门的电焊条进行焊补，然后细致地进行打磨，使之与未磨损部分构成平整的表面。打磨应按样板进行。

在修复铸铁转轮室磨损部分时，采用苏联技术改进局制造的电焊条进行补焊获得了良好的结果。该电焊条是由三股直径为1.5毫米的金属丝所组成，其中两股以低碳钢制的，另一股以镍钢制的，三股绞合在一起，外面再包一层白铁皮，其外再涂以一般的乳白色的涂料。当铸铁的转轮室磨损很严重时，换成钢制的转轮室是合理的（外高加索水电站）。

没有必要详细地研究主要由于气蚀所引起的转轮磨损的防止措施。这里仅指出受破坏的钢（不是不锈钢）制转轮室的修复方法：苏联中央机械制造和工艺科学研究院〔1〕建议，装置不锈钢板护面，不锈钢板的标号为1X18H9T，厚度为3毫米，制成宽度为50或100毫米的板条，在其中間沿所有板条开成槽口。槽口的长度为80毫米，宽度为10毫米，相邻两槽的间距为30毫米。板条的长度不加限制。在进行焊接时，不仅要焊板条的周

边, 而且还要焊上那些槽。电焊条应采用直径为 4 毫米的 ИЛ-24 号焊条, 在焊接过程中, 电流应保持不变。

轉輪零件: 易受泥沙磨損的轉輪零件是衬套、輪叶以及水輪冠^①。

消除轉輪鋼衬套磨損的办法是在磨損的表面上进行补焊, 然后用軟軸砂輪打磨平整。

鑄鐵制轉輪的水輪冠当受到严重磨損时, 应改換新的, 同样当轉輪叶片受到严重磨損时, 也应換以新的叶片代替。

3. 冲斗式水輪机

虽然冲斗式水輪机是装在水头非常高的水电站上, 然而在某些水电站上, 經過了长期運轉之后, 却没有发现水輪机部件受到磨損的迹象, 这可能是由于具有較大的水庫的缘故。例如, 在某一具有較大水庫的水电站上, 水輪机已經運轉了近 10 年, 然而它的部件并没有任何磨損的迹象。与此同时, 在另一个水庫不大的水电站上, 在洪水期中水輪机就被磨損到如此严重的程度, 以致需要停机进行大修。

針閥、噴嘴和轉輪水斗都会受到泥沙的磨損, 被磨損的針閥和噴嘴应以新的代替。由于水輪上的水流速度較噴嘴为小, 因此水斗的磨損也較輕。如水斗以碳素鋼制造, 則可用电焊进行修复, 然后再用軟軸砂輪打磨焊接表面。打磨工作应按样板进行, 样板可参照新水斗或其图紙制造。

三、水輪机抗磨性能的提高

在进行水輪机修理时, 通常对于提高水輪机的抗磨性能, 总是很少給予注意。例如, 任何水电站在修理水輪机时都没有采用加固表面的措施, 然而这种方法, 在许多机械(如挖土机、粉碎机等)的部件修理中已被广泛的应用[3]。

应当指出, 列宁格勒金属工厂早在数年前就曾倡議重視提高水輪机部件抗磨性能的問題。为了寻求提高水輪机部件抗磨性能的最有效的方法, 已經准备生产下述試驗性的抗磨部件:

1. 用标号为 20X13HJ 的不銹鋼制造的轉輪: 用于里昂和巴克山水电站的水輪机。

2. 轉輪止水环和水輪机盖: 第一套用 Ст.15 号鋼制造, 表面进行渗碳和淬火处理到 $R_c \geq 55$ 。第二套用标号为 0X2 的不銹鋼制造。第三套用 Ст.45 号鋼制造, 表面以高频感应电流淬火, 使 $R_c \geq 50$ 。

3. 导水机构下环: 一个用 Ст.15 号鋼制造, 表面进行渗碳和淬火处理, 使 $R_c \geq 55$, 另一个用 Ст.45 号鋼制造, 表面用高频感应电流淬火。

4. 导叶有下列几个方案:

(1) 用标号为 30Л 的碳素鋼制造, 再以补焊加固, 补焊用金属为苏尔瑪合金, 标号为 3X13 和 0P-9 的加特非里特鋼和合金鋼, 然后进行渗碳和淬火到 $R_c \geq 55$, 并在导叶翼緣表面加 0Я1T 号鎳鉻鋼制护面。

^① 此字原文为 конус-отсекатель, 义为圓錐截断器, 但根据下文文意, 应为 конус-обтекатель (水輪冠之誤)——譯者。

(2)用标号为40Л碳素鋼制,以高频电流淬火,深度不得小于1毫米,并要求 $R_c \geq 45$ 。

此外,对于导叶翼緣各种加强方案,其下部樞軸都要淬火到 $R_c \geq 35$ 。

5.空放閥环用9Х2和40Х鋼制造,然后进行淬火。

列宁格勒金属工厂在生产导叶时,曾以加特非里特鋼和3Х13号鋼进行补焊,但結果发现有裂縫,因此,改用9-42电焊条补焊,并加1Х18Н9Т不銹鋼板护面。

最近,上述部件的一部分已安装在高加索水电站,并且很快将考驗出它們究竟比旧的部件优越多少。

为了寻求最耐磨的材料,列宁格勒金属工厂曾在巴克山水电站进行了有趣的試驗:1954年,在該水电站1号水輪机遭到泥沙严重磨損的导叶下部衬套上,装置了如图7所示的試驗性圓环。这些环均以不同的材料制成的,并用不同的加固方法进行了表面处理。由于这些环的直徑較衬套大,因此在导水机构的下环上进行了搪孔。为了保証环的严密性,应当将环安

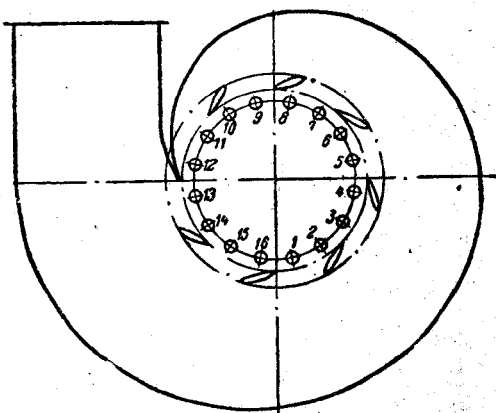


图7

紧。在装置之前,曾对环的工作表面的坚固程度进行了鉴定和測量。运转一年以后,該环从所有的套口中脱出,又重新呈悬置状态。試驗的結果如下表所示。

序 号	制 环 材 料	硬 度 (R_c)	环 重 量 (克)	运转一年后 环的重量 (克)	損 失 量 (克)
1	Cr.25鋼(表面渗碳的)	64	243.2	219.5	23.7
2	Cr.45鋼(淬火的)	58~60	209.7	183.2	26.5
3	Cr.45鋼(淬火的)	58~60	181.7	137.1	44.5
4	Cr.25鋼(以1Х13号鋼补焊)	40~45	208.3	171.6	36.7
5	Cr.1Х18Н9Т不銹鋼	—	199.6	135.8	63.8
6	Cr.2Х13合金鋼(淬火的)	35	254.2	221.8	32.4
7	Cr.30Л鋼	—	196.0	158.2	37.8
8	Cr.30Л鋼,以电弧法硬化	—	224.2	163.6	60.6
9	Cr.25鋼(表面渗碳的)	64	262.4	236.0	26.4
10	Cr.25鋼,以硬合金T-590补焊	60~64	235.0	191.2	43.8
11	保留旧有的结构	—	—	—	—
12	Cr.30Л鋼(滚压的)	—	215.7	148.4	67.3
13	Cr.1Х18Н9Т不銹鋼	—	213.0	143.1	69.9
14	Cr.25鋼,以Cr.1Х13鋼补焊	40~45	228.0	179.8	58.2
15	Cr.25鋼,以9-42电焊条补焊	—	215.0	161.7	53.3
16	层化塑料(ЛП)	—	38.2	—	—

由上表可見,用具有較大韌性的奧斯汀鋼(1Х18Н9Т)所制成的第5号环和第13号环表現了最好的抗磨性能。每一环的重量損失大約在1/3左右。在沃斯克列辛斯基教授的論文中,曾叙述过与此完全相反的哈得遜試驗[4]。哈得遜試驗表明,金属受含沙水流

磨損的程度與其硬度很少有關。他在完全相同的試驗條件下，用白氏硬度為 900 的氮化鋼進行試驗，其磨損較白氏硬度為 69 的炮鋼大五倍。在所有情況下，具有很好的抗腐蝕性能的合金鋼，都表明能抵抗含沙水流的磨損。試驗還表明，銅合金的抗磨性能較黑色合金為高。只有不銹鋼例外，如以上所述，完全與巴克山水電站試驗的結果相反。這樣，關於不銹鋼的高度抗磨性的結論就沒有被証實。具有最好的抗磨性能的環是第 1 號環和第 9 號環，該環是用 Ст.25 鋼製造的，並進行了表面滲碳處理 ($R_c=64$)。每一環的重量損失大約為 1/10。

用 T-590 硬合金 ($R=60\sim 64$) 補焊的第 10 號環尚完好，但在補焊有缺陷地方的內層金屬仍有磨損發生。

利用 Э-42 號電焊條補焊 並以電火花法加工硬化了的表面，沒有顯著地影響抗磨性 (第 8、12、15 號環)。

用層化塑料製造的環，在大修前被水沖毀。

這樣，巴克山水電站的試驗表明，單靠不銹鋼，不能抵抗泥沙磨損和氣蝕的破壞。雖然在某些時候，不銹鋼能夠抵抗氣蝕，但它抵抗泥沙磨損則不及表面硬化了的碳素鋼。應當運用巴克山水電站的經驗，並根據水輪機部件的結構，採用最有效的方法進行易磨損表面的硬化處理。

用淬火法使機械零件表面強化，已有一系列的成就〔5〕。這種表面強化法無論在製造廠或水電站都能夠非常有效地應用，因為它不需要複雜的設備。當修理巨型水輪機時，採用這種方法是合理的。

参 考 文 献

- [1] И.Р.Крянин и В.А.Липидус, Облицовка камеры рабочего колеса мощных гидротурбин, Машгиз, "Энергомашиностроение", 1956, №8.
- [2] И.В.Кудрявцев и др., Методы поверхностного упрочнения деталей машин, Гос. научно-техн. изд-во машиностр. литературы, Москва, 1949.
- [3] Восстановление и ремонт деталей строительных машин, Гос. изд. литературы по строительству и архитектуре, Москва, 1953. Сборник статей.
- [4] И.Н.Воскресенский, Коррозия и эрозия судовых гребных винтов, Судпромгиз, 1949.
- [5] Л.И.Готлиб, Основы технологии пламенной поверхностной закалки, Гос. научно-техн. изд-во машиностр. литературы, Москва, 1948.

郭養明譯自“Ремонт и повышение износоустойчивости гидротурбин от истирания наносами”,
Госэнергоиздат, 1957, 劉長庚、張福平校

防止泥沙对水輪机的磨損

(苏联) Н. И. 配拉也夫

一、泥沙对水輪机磨損的特点

当泥沙池的尺寸不足，泥沙池被淤滿，或者直接从携带泥沙的河流中引水經過水輪机設備时，便会引起泥沙对水輪机过水部分的磨損。

建筑在山溪河流上的水电站，大多数經受着强烈的磨損。例如，高加索的巴克山水电站、奥尔忠尼启則水电站、卡那克尔水电站、里昂水电站、德左拉水电站及中亚細亚的沙里汗水电站、瓦尔佐布水电站等。

这些水电站大多建于1930~1937年。当时的基本金属材料为鑄鉄，因此一些水輪机的过水部分——頂盖、轉輪及基础环都用鑄鉄制造。

鑄鉄在抗气蝕及泥沙磨損的作用方面，是一种质量較差的金属。此外，鑄鉄的焊接非常困难，因而在相当程度上会使磨損的鑄鉄部件的修复工作复杂化。

随着水庫的淤积，大部分泥沙都要通过水輪机，并使水輪机过水部分受到严重的磨損。对于这种磨損現象的研究是不够的，所以在水輪机結構上沒有考虑简单的更换磨損最严重的部件之可能性。因此，差不多从水电站运轉的头几年开始，迄今为止，一直存在着水輪机过水部分檢修上的困难。

磨損的結果导致水輪机机組效率的降低，例如巴克山水电站($N_{app}=8800$ 瓩)，运轉一年后，檢查其效率降低了10%。如果巴克山水电站每台机組每年的发电量为4,000万度，則由于水輪机磨損而使其发电量損失約150万度，其損失价值約等于五个由碳素鋼制造的新轉輪。

因此，安裝較昂貴的耐磨部件，以保証机組在1~2年內运轉不受严重磨損是合算的。

在水輪机容易經受磨損的水电站上，不应该机械地按目前的規定，即二年进行一次大檢修。在选择大修的日子里，应当根据檢修折旧价值計算，并且根据泥沙磨損而使机組效率降低的电能損失价值来定。

现将提及的上述水电站水輪机的主要部件的磨損特征介紹一下：

轉輪 是水輪机結構中最易遭受磨損的部件，其大修的期限主要按它的破坏情况来决定。磨損是沿着轉輪叶片整个表面发生的，并呈魚鱗状，受泥沙磨損較严重的地方是叶片凹面、底部輪緣內側及迷宫环。

靠近下部輪緣的叶片凸面的出口邊緣，經受着气蝕的作用。

泥沙磨損和气蝕对轉輪导叶的联合作用，会导致出口邊緣上整个叶片較快的损坏(如运轉一年的巴克山水电站)(图1)。

水輪机盖 水輪机盖的磨損发生在水流通过的侧面。一般說来，水輪机盖由鑄鉄制造，虽然每年都进行檢修，但頂盖的磨損几乎在所有的水电站上都是比較严重的。磨損較严重的地方是在导叶的上端，因此产生导叶上端与頂盖之間的空隙的增大，当关闭导