原型水轮机磨损与汽蚀的初步调查分析

西北农学院水利系　　杨松甫

水轮机汽蚀破坏是水电站运行中普遍存在的问题之一，而在多泥砂河流上修建的水电站，由于泥砂的存在，水轮机要受到汽蚀和泥砂磨损的联合作用，使汽蚀和泥砂磨损相互影响，形成恶性循环，更促进水轮机过流部件被侵蚀破坏的发展。故对水轮机汽蚀和泥砂磨损以及汽蚀与泥砂磨损的相互影响关系等问题的研究，就愈来愈被人们所注意。过去国内外学者曾进行过不少这方面的研究工作，也取得了不少成果，但至今仍是未能充分认识及未完全解决的问题。

黄河含砂量居世界多泥砂河流的首位。在开发利用黄河水力资源时，含砂水流对水轮机的磨损、汽蚀破坏和提高水力机械抗蚀、抗磨能力的试验研究工作，对我们来说也就愈显得迫切了。

我国黄河上第一个水电站——盐锅峡水电厂于1962年建成投产以后，原水利电力部即于1965年组织有关单位，以该电厂为基地组成了黄河上游水电站泥砂磨损观测研究组织，结合该电厂机组运行情况及检修中所遇到的问题，进行了大量的观测分析工作，积累了不少的宝贵经验和资料。我们于1977年12月4日至12月22日应邀参加盐锅峡水电厂6号机组的大修工作*；同时又到刘家峡、八盘峡等电厂进行调查和搜集有关水轮机泥砂磨损及汽蚀问题的资料。现将调查情况结合我们自己的认识，对水轮机的汽蚀和泥砂磨损问题分析于后。

一、黄河上游干流段三个水电站典型蚀、损情况

从黄河上游干流段三个水电站典型蚀、损情况看多泥砂河流上水电站的水轮机汽蚀和泥砂磨损特点。

（一）盐锅峡水电厂

盐锅峡水电厂为黄河上游干流段上最早开发修建的电站之一。从1962年第一台机组（四号机）开始投入运行至今，已有十七年的历史。

本文承蒙盐锅峡、刘家峡、八盘峡水电厂等技术部门的大力协助与提供宝贵资料，以及我系赵乃熊、金钟元、崔维志等同志热情支持与提出宝贵意见，在此特表衷心感谢。

* 参加调查研究工作的有：杨松甫、赵乃熊、候必聪。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

盐锅峡水电厂位于甘肃省永靖县，上游距刘家峡水电厂30.6公里，下游距八盘峡水电厂17公里，是以发电为主兼以少量灌溉的水利发电枢纽工程。枢纽为混凝土重力坝，坝后式厂房，左岸为电站，右岸为溢流坝段，共有六孔溢洪道。电站总装机为 $8\times4.4=35.2$ 万千瓦，保证出力15万千瓦，至1975年底全部机组均已发电。

水轮机为国产机组，其基本参数为：[3]

型号：HL_{123}-LH-410（新型谱 HL_{240}-LH-410）；

水头（米）：最大 39.5，设计 38，最小 37，实际运行时为37—39（年平均为37.5—38.5）；

出力（万千瓦）：4.4（实际运行均在4.0以上）；

转速（转/分）：额定 107，飞逸 235；

转轮直径（米）：4.1；

叶片数（个）：14；

吸出高度（米）：允许1.3，实际运行1.0—2.0；

各机组投产、运行日期，运行小时数，大修次数以及转轮材质等情况见表1。

表1 各机组投产日期、检查日期、周期及转轮材料统计表

机号	投产日期 年.月.日	截止1976年底运行小时数	截止1976年底大修次数	检修周期	转轮材质	制造厂
1	1966.6.9	80,958	3	2.5	30#铸钢，叶片背面下部堆焊不锈钢。	哈尔滨电机厂
2	1965.9.18	64,735	4	2.5	39#铸钢，叶片背面下部堆焊不锈钢。	哈尔滨电机厂
3	1964.4.17	76,694	6	2	39#铸钢，叶片背面下部堆焊不锈钢。	哈尔滨电机厂
4	1962.1.13	101,579	7	2	1.11.13号叶片为20SiMn 6号叶片为络五钢，其余30#铸钢。	哈尔滨电机厂
5	1969.5.27	48,854	2	3	同1号机	东方电机厂
6	1970.6.5	46,236	2	3	同1号机	东方电机厂
7	1975.10.23	6,343			同1号机	东方电机厂
8	1975.11.15	7,429			同1号机	东方电机厂

该水利发电枢纽工程由于工程布置上没有排砂设施，而且机组进口底槛高程（1600.0）比溢流坝坝顶高程（1609.0）低9米。这就使该枢纽形成一种“顶面溢流，

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

底洞过砂”的不利局面。如果一旦水库有弃水，从溢流坝上下泄的水都是比较清的水，而经常通过水轮机的水，则都是泥砂颗粒较粗的浑水，造成过机含砂量远比从溢流出库的大，粒径也比溢流出库的粗。显然，这对水轮机运行是很不利的，势必给水轮机带来严重的泥砂磨损问题。

盐锅峡水电厂水轮机汽蚀、泥砂磨损的主要部位与特征。

1. 从电厂历次大修记录，其水轮机蚀、损的主要部位基本上是在：① 转轮叶片正面出水边靠下环处，几乎布满了深度达3—7毫米的鱼鳞坑磨痕，平均范围约为500×700毫米（见图1）；② 转轮叶片背面沿进口从上冠到下环，均有鱼鳞坑痕迹，且连成一片，深度一般在2毫米左右。而愈靠近下环愈重，尤其是在叶片的根部更甚，磨成深沟槽。但在距出水边约300毫米宽的一条带状则磨损痕迹较轻（此处为脱离了两个叶片的搭接带）（见图2）；③下环内侧两叶片间几乎全部磨成鱼鳞坑或沟槽，平深均度5～6毫米，最深达10毫米，下半部较上半部严重（见图3）；④ 叶片出水边磨成锯齿形，上、下根部亦磨成沟槽（见图4）；⑤导叶正面全部磨成鱼鳞坑痕迹，深度3～5毫米，而背面则较轻，一般都在进水边附近，深度约2～3毫米（见图5、6）；⑥底环两导叶间掏出深度约为30毫米的沟槽，圆弧处形成鱼鳞坑或沟槽，深度约3毫米。以上情况，泥砂严重时，在一个大修周期内就能形成。

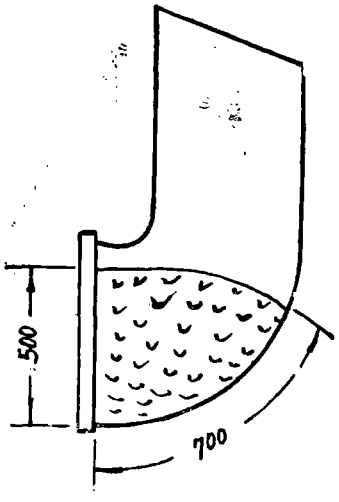

图1

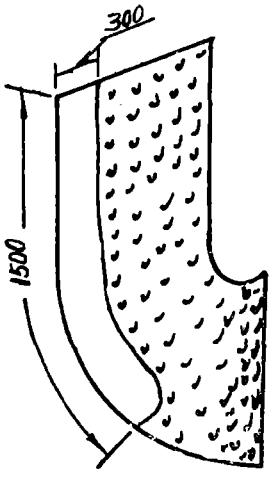

图2

2. 水轮机蚀、损的主要特征是：① 在水轮机转轮的叶片正面，都是顺水流方向的鱼鳞坑或沟槽，在叶片出水边是锯齿形，很明显是磨损的特征。② 在叶片背面，其破坏的痕迹，则是海绵状的（或蜂窝状的），与单纯的磨损有不同，表面不发亮，没有光泽，而是呈暗淡色。很明显这是汽蚀的特征。不过凡是有汽蚀的地方，磨损也都比较厉害。③导叶的蚀、损特征和转轮叶片相似，也都是以磨损为主，在正面严重。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

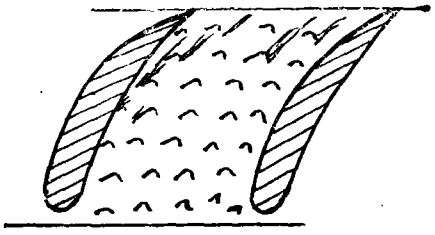

图3

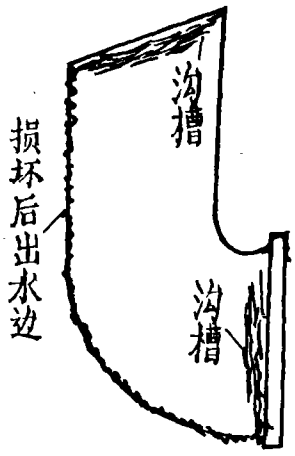

图4

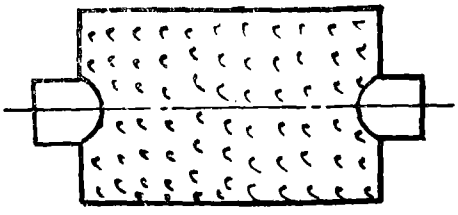

图5

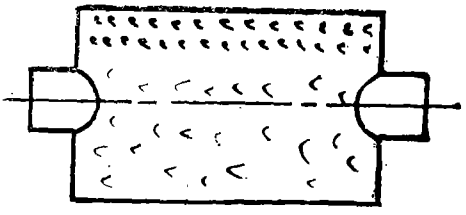

图6

3。根据历次检修，其使用抗蚀、损材料的效果是：① 就目前国内外水轮机使用材料看，不锈钢对防汽蚀有一定效果，是一种较好的抗汽蚀材料。盐锅峡水电厂在每次大修时，也都曾对转轮上的蚀、损部位分别用碳钢和不锈钢焊条进行堆焊处理。在运行一段时间后，发现凡是用碳钢堆焊的部位，仍产生与前相同的破坏痕迹，而堆焊的不锈钢部分，其破坏程度较轻，说明不锈钢有一定的作用。但是因焊补工艺不同，其效果也有差异。据青铜峡、西津、双牌等水电厂的实践[6,7]，凡是用不锈钢板条铺焊的转轮叶片，在运行一段时间后，发现铺焊上的不锈钢铺焊层剥落和鼓起，而且底材遇到破坏。双牌水电厂在同一个水轮机转轮上用不锈钢焊条堆焊的部分，则基本完好。说明用不锈钢板条铺焊转轮叶片，作为保护层不耐久、效果差，不宜采用，应以堆焊为好。②对于使用非金属材料，盐锅峡电厂实践认为：在水轮机转轮叶片的正面或在非关键部位上使用，能起到一定的作用，而在严重蚀、损区（如叶片背面和下环处），由于叶片背面常是负压，对复盖层涂料吸引力较强，涂料往往有大面积的脱落现象。可见这些材料抵御磨损虽有一定作用，而抗汽蚀性能尚差。因此，迫切需要研究使用抗汽蚀性能好的材料。像铬合金喷镀、等离子喷镀以及在防蚀金属中增加添加剂……，都可以在水轮机上试

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

用。电气防蚀（阴极保护）也可以试验。对非金属材料要进一步研究其与金属表面的粘结强度问题。

（二）刘家峡水电厂

刘家峡水电厂亦位于甘肃省永靖县境内，在盐锅峡水电厂的上游。水库为多年调节。坝高147米。电站共装机5台，厂房由坝后厂房和地下厂房两段组成。总装机为 122.5 万千瓦。

水轮机为国产机组，其基本参数为：[7]

型号：HL_{001}—LJ—550，　HL_{A68}—LJ—550；

水头（米）：最大114，设计100，最小70；

出力（万千瓦）：　22.5，　30.0；

转速（转/分）：额定 125；

转轮直径（米）：　5.5；

叶片数（个）：　14；

吸出高度（米）：允许　－4.7　　实际　－5.8～－8.4。

該枢纽在工程布置上设有排砂洞和泄洪洞，均在电站进水口高程之下，从水库蓄水至1号机组第二次检修时，淤积尚未高出电站进水口。过机泥砂粒径很小，泥砂粒径在0.025毫米以下，含砂量也很少。这些条件显然都比盐锅峡电厂有利。

投产运行最早（1969年3月）的一号机转轮蚀、损的主要部位与特征：該机组曾分别于1970年10月和1973年2月进行过两次大修。至第一次大修时，机组运行了5,500小时。其蚀、损破坏的主要部位是在叶片上的三个区域：① 叶片背面进水边的立面自上而下高约1000毫米，宽约250毫米的一条带状上（见图7）。其蚀、损平均深度为2～3毫

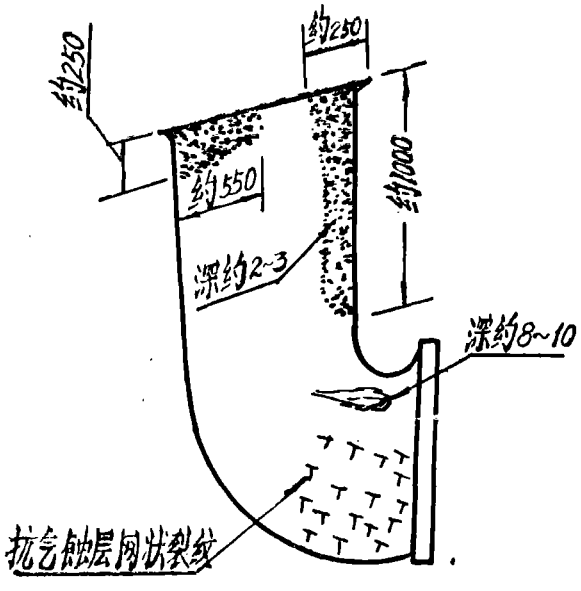

图7

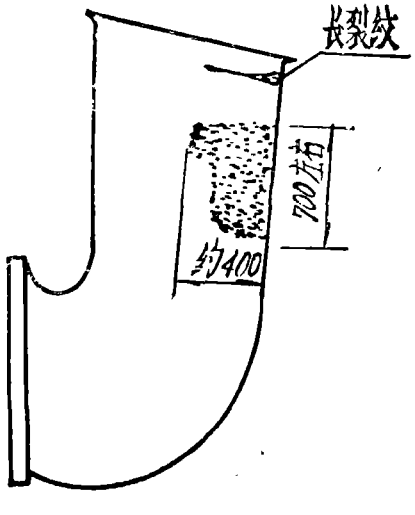

图8

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

米；②叶片背面进水边靠下环的转角处（见图7），虽蚀、损面积较小，但深度却达8～10毫米；③ 叶片正面出水边靠上冠处，有深度约为2 ～ 3毫米的蚀、损区，并夹杂有深浅不一的成群裂纹。在上端靠根部的边缘，个别叶片裂纹厉害，有穿透裂纹（见图8）。每个叶片的蚀、损部位和特征基本相似。到第二次大修时，机组共运行了15,700小时，其蚀、损情况主要是：① 在叶片背面进水边靠下环转角处新增加了面积不大，但是深度较深的蚀、损区；② 叶片正面上端靠出水边，蚀、损面积扩大，深度变深并扩展到相邻两个叶片之间的泄水锥上；③ 叶片正面上根部靠泄水边处，又有六个叶片产生了新的裂纹；④ 还增加了一些新的蚀、损部位。总之，随着运行时间增加，蚀、损部位增多，深度变深并扩展。

通过两次检修，我们发现该电厂1号水轮机转轮发生的蚀、损破坏与一般水电厂所见到的水轮机转轮产生的蚀、损破坏情况有以下不同之处：① 发生汽蚀最严重的部位是在叶片的正面或背面的进水边，而不是在叶片背面的出水边；② 该电厂在运行期间尾水位高程虽经常高于允许安装高程。但是，仍有汽蚀；③ 蚀、损区的典型部位表面全是针孔、蜂窝状组织，只有局部区域有金属表面剥落或穿孔，没有鱼鳞坑或沟槽。

据此分析，刘家峡水电厂水轮机产生蚀、损的原因是：① 转轮叶片型线的汽蚀性能较差，转轮成型不好，是产生汽蚀的主要原因。例如叶片进水边立面端部，加工不圆滑，导致整个叶片的立面背部脱流，产生汽蚀。其次进水边靠下环转角处，由于被加工成方形，不作光滑过渡，也促使了汽蚀的产生；② 铸造质量差和材质的影响。该电厂3号机转轮于1972年2月安装前，曾用磁粉探伤检查转轮叶片质量，发现该机转轮的14个叶片中有裂纹等隐患共33处之多[1]。这在运行过程中，一旦某处有汽蚀产生，不仅会使裂纹扩大，还会沿着裂纹侵入母材。关于材质，刘家峡电厂水轮机转轮材料为20SiMn铸钢，其抗汽蚀性能不如普通钢材。该厂曾对转轮的6、7两个叶片割补普通钢材与其它叶片作对比试验，其试验结果是：虽然割补的钢板位于汽蚀强度中心区，但是，汽蚀破坏确较四周的20SiMn轻微；③ 由于该电厂机组受某些原因限制运行，从机组投入运转以后，截止1975年元月，有38%时间，在低于40%出力的低负荷区运行，这对水轮机的间隙汽蚀和空腔汽蚀也是很不利的。

（三）八盘峡水电厂

八盘峡水电厂位于盐锅峡水电厂下游，为径流式电站，坝后式厂房，计划装机六台，总装机22.2万千瓦。现在装机3台。

1～3号水轮发电机组为瑞典进口机组，水轮机为竖轴轴流转桨式。其基本参数为：[13]

型号： KV_5—55

水头（米）：可运行水头范围为10～22米，设计水头18；

出力（万千瓦）： 3.7；

转速（转/分）：额定 115.4，飞逸：协联时 225，非协联时 340；

转轮直径（米）： 5.5；

转轮叶片数（个）及装置角度（度）： 4， -20^0～$+10^0$；

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

吸出高度（米）： 在▽1000米时，要求－4，实际运行在－8～－10。

該机组转轮叶片是由含铬13%的不锈钢铸造而成，仿型车床加工。机组结构简单，制造质量和工艺水平高，，安装方便，自动化元件精密小巧，运行中安全可靠。

該电厂1～3号机组至调查时已运行两年余，由于转轮叶片的制造质量高及形状加工较好。該电站虽位于盐锅峡电厂下游，但无明显汽蚀和磨损，只有轻微斑点。可见制造质量的优劣对汽蚀及泥砂磨损的影响甚大。

二，对在多泥砂河流上运转的水轮机蚀、损问题的初步分析

我国黄河上的三门峡、天桥、三盛公、青铜峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡以及其它多泥砂河流上修建的水电厂，普遍存在着不同程度的泥砂磨损和汽蚀破坏问题。从实际观测，可以明显看出两者有互相促进使其发展的趋势。但是，两者相互之间是什么样的关系？有没有主次、先后之分？对此问题认识如何？国内外学者虽曾有一些研究成果和试验资料，但是，由于国外研究成果不一定适合我国实情，而国内进行这方面的研究其历史又比较短，特别是系统的连续的试验研究工作做的还不够，因此，对水轮机的泥砂磨损和汽蚀破坏的相互影响关系问题，截止目前，搞的还不够清楚，存在着不同的看法，只有在今后通过长期的、大量的原型观测和室内试验研究，才能逐步得到解决。

就目前的认识水平，我们认为：在多泥砂河流上修建水电站，泥砂是客观存在。既然有泥砂存在，只要泥砂的硬度大于部件材料硬度时，必然要对水轮机的过流部件产生磨损破坏。即就是软颗粒泥砂（即泥砂硬度小于部件材料硬度），但由于它能对部件材料产生反复疲劳，当持续时间较长而超过部件材料的疲劳极限值时，也能使部件遭到破坏。其次像水流泥砂的浓度、粒径级配和颗粒形状，又均能对部件磨损产生影响。还有泥砂在水流中的运动速度和水流中泥砂对部件的冲击角度、作用时间等，也都极大的影响着过流部件的磨损。而汽蚀能否产生，则主要取决于水轮机中的水流速度和压力的变化。而转轮叶型制造上的真机型线误差，是引起水轮机叶型汽蚀的一个关键性问题[1,11]。转轮叶片的材质、制造和加工工艺质量以及运行情况等，都会影响到水轮机汽蚀性能。因为这些因素都能引起在水轮机中的水流变化。例如转轮部件铸造中的麻面、砂眼和叶片表面的粗糙度，叶型非流面等，都会引起水流的紊乱，增加汽泡的产生和破裂的频率，加剧汽蚀的产生与发展。因此，一旦以上任何条件如不能满足，都能使水轮机中的水流流态紊乱而恶化，使其在转轮内产生边层脱流，压力降低，这些都是引起产生汽蚀的条件。对于在多泥砂河流上修建的水电站，凡是有上述问题存在，就会有蚀、损问题产生，而且又必然会形成互相影响、互相促进的关系。至于谁主谁次、谁先谁后，要具体问题具体分析。

就以上三个水电站而言，盐锅峡水电厂，因为在水工上没有排砂设施，随着水库的不断淤积，过机泥砂数量增多，粒径变粗，特别是自1964年大水大砂以后，水轮机过流部件的磨损也愈来愈严重，水轮机的检修周期也随着运行时间的增长逐渐缩短。这说明該电站水轮机的蚀、损破坏的原因主要是由泥砂磨损引起的。因此首先以解决水工上的排砂

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

设施为主来治理。刘家峡水电厂，有排砂及泄洪设施，且均在水轮机进水口高程之下，虽然也有泥砂问题，尤其是随着水库泥砂淤积向坝前推移，近几年磨损破坏也愈来愈严重[14]。但是就泥砂磨损与汽蚀问题相比较，则泥砂磨损处于次要地位。正如前述主要是叶型不良，材质不好、以及铸造和加工工艺水平不高，使水轮机的汽蚀性能变坏，进而引起泥砂磨损，因此是由汽蚀引起磨损，故汽蚀则是主要的。必须从制造、加工等方面，提高制造质量，改善叶型，改进材质以及在检修中修改叶型等措施着手解决问题。八盘峡水电厂，虽说投产时间较短，距调查时仅运行两年余时间，而刚是上述两电厂机组检修的一个周期。但是由于该电厂水轮机材质好，铸造工艺质量高，又是仿型加工，虽然它位于盐锅峡水电厂的下游，其泥砂的含量、粒径以及其它都不亚于盐锅峡、刘家峡水电厂。然而，从第一次检修看，蚀、损并不严重。盐锅峡电厂1号机，在1974年大修时，堆焊后的叶片因为精心整形打磨了（是通过在同一个转轮上，对各个叶片蚀、损程度的优、劣比较之后，以蚀、损程度最轻的叶片为样板仿照整修其它叶片，并整形打磨）。在检修后运行时，在设计水头下，出力由原来4.1万千瓦提高到4.4万千瓦，达到了历来没有达到过的额定出力；又据日本电气学会在对230台混流式和46台轴流式水轮机进行调查结果表明，随着转轮材料和叶片形状的改进，汽蚀损伤的程度不尽相同[12]。可见水轮机的制造质量和选择水轮机叶片形状、材料和加工工艺等，对水轮机的蚀、损影响是很大的。这也启示我们对已成电站的水轮机叶型作必要的修改，是改善水轮机汽蚀性能，减少水轮机蚀、损的一个有效措施。

总之，目前在我国的具体条件下，即在叶型、材料、加工、运行管理和泥砂（多泥砂河流是主要因素）均未全面过关的时候。检修叶型、涂复保护层只能作为治标的办法以延缓蚀、损的产生，能对延长检修周期起到一定的作用，但是，要想从根本上彻底解决问题，必须采取综合处理措施，既要从提高水轮机本身的抗磨损、抗汽蚀能力研究解决问题与采取措施，同时，也不能忽视关于处理泥砂的措施，必须两者同时兼顾。

三、结束语

综上所述，我们认为：① 在多泥砂河流上的水电厂，由于泥砂磨损而引起的水轮机过流部件的蚀、损破坏是主要的。磨损是造成水轮机汽蚀的诱发因素。因此一旦汽蚀发生后，就能大大促进磨损沟槽的发展。所以说，凡是大范围内的严重蚀、损，都往往是由于大量粗粒径泥砂（一般是指泥砂粒径$D>0.05$毫米[10]）过机而引起的蚀、损。至于偶然的有卵石过机时，撞击过流部件，轻则砸击印痕，重则使原有裂纹发展，也能使金属表面剥落；② 防止水轮机磨损，应以防止泥砂的有害粒径进入水轮机，以及在水轮机的设计、制造、加工等方面，改进水轮机型线设计，提高叶片表面的工艺水平，使叶片能符合原设计的翼型。对于已成电厂，如果水轮机叶型不合要求时，可采用割掉叶片表面的鼓包、填补较长的凹陷面、加长或缩短出水边等办法修改叶型，改善水轮机汽蚀性能条件。同时，对叶片加工要求还必须有足够的光洁度。据对国外进口机组调查报告材料介绍，叶片表面的光洁度应在∇_6以上；③ 就目前的现实条件要完全满足上

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

述要求，还难于办到。因此，还必须从材料、非金属抗磨、抗蚀材料，母材保护层以及合理地选择机型参数，安排运行方式以改善产生汽蚀的条件，防止泥砂磨损；④ 改善水轮机的通流部件表面的水流流态，减轻泥砂磨损能力，也就是说要从水力理论上来分析产生磨损的原因和提高转轮耐磨性能的水力措施。

参 考 文 献

1. 关于原型水轮机气蚀情况的调查报告 《水利水电技术》1965年5期。
2. 水轮机气蚀磨损破坏及其处理 盐锅峡水电厂(油印本)，1977年8月。
3. 盐锅峡水电站水轮机泥砂磨损情况 甘肃省水电局电力中心试验所、盐锅峡水电厂，《大电机技术》1977年1期。
4. 刘家峡水电厂水轮机气蚀情况初步总结 刘家峡水电厂。
5. 介绍国外关于水轮机泥砂磨损的情况及其推测方法 刘家耀编译，《水利水电技术》1964年2期。
6. 双牌水电站2号水轮机气蚀破坏调查 甘肃省水电局电力中心试验所，《大电机技术》1978年2期。
7. 我国水轮机的气蚀与磨损 水电部科学技术情报室，1973年11月。
8. 关于“泥砂磨损能力对黄河三门峡水电站水轮机过水部分的影响”一文的初步结论 苏联列宁格勒水电设计院，黄河三门峡水电站初步设计第八卷。
9. 国外泥砂对水轮机的磨损及其防护研究介绍 吴佩毫编写，《水利水电技术情况》1977年13期，水电部四川勘测设计处。
10. 水工建筑物布置与水库运用对减少过机泥砂的作用的调查分析 水电部第十一工程局，1975年。
11. 水电站的水轮机设备 A.A莫洛佐夫，《中国工业出版社》出版。
12. 水轮机气蚀预防措施 日本第11次腐蚀防蚀讨论会《腐蚀防蚀的基础与实践》苏联《水工建设》1974年4月。
13. 瑞典3.7万千瓦水轮发电机组运行简况 八盘峡水电厂编制。
14. 水库、水工建筑物的布置和运用对减少水轮机、机电灌站的磨损作用 水利部天津勘测设计院许国光、王志高，1979年8月。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne