

部分轴流机组汽蚀和泥砂磨损

徐 功 玉

(东方电机厂)

近几年来,笔者结合“40米水头段轴流转轮研究”课题,进行了部分轴流机组电站调查。本文想就调查结果谈谈自己的肤浅看法。

从调查中发现,同一机型在不同水质中汽蚀和磨损特征不一样;同一电站同一机型叶片材质不同时,其汽蚀和磨损情况也不一样。

一、清水电站转轮汽蚀

从调查到的清水电站几台代表性机组来看,叶片材质不论是普通钢还是不锈钢,其汽蚀特征和部位基本是相同的,呈蜂窝状破坏,只不过破坏程度不同而已。

清水电站转轮汽蚀情况统计如表1。

1. 典型汽蚀部位(图1)

A区——位于叶片背面进水头部后面稍偏外缘部分。

B区——位于叶片背面靠外缘枢轴部分。

C区——位于叶片背面出水边靠外缘的三角区域。

还有个别机型在工作面进水头部附近也发生汽蚀破坏。

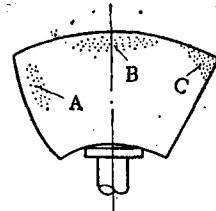


图1 清水电站转轮汽蚀部位

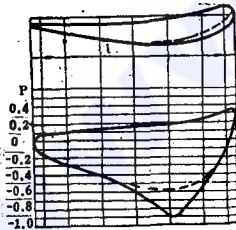


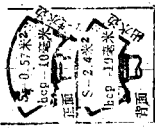
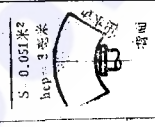
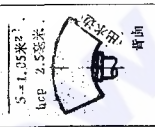
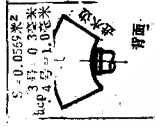
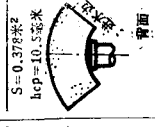
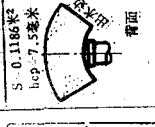
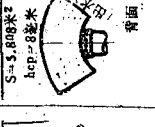
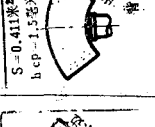

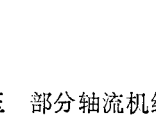
图2 不同头部翼型表面压力分布

2. 产生汽蚀破坏的原因

A区 产生这类汽蚀破坏(图2)的原因有二:一是当水流绕叶栅流动时,由于头部型线变化急剧,其水流速度变化很大,导致其背面压力低于大气压力;如果头部出现鼓包或过于肥大,则在其稍后部位就出现更低压力,有时达到水的汽化压力以下,因此产生汽穴。汽穴的产生、成长、溃灭过程是一个非常短暂的过

程。据资料介绍(1),在流速为36米/秒时,空泡破灭的时间为0.001至0.003秒,作用在固体表面的压力可达到1100至1400公斤力/厘米²。这样大的压力在极短时间内作用于叶片,足以使金属表面产生疲劳损伤。二是叶片和流道配合不合理。以前我国采用的水轮机流道基本上是套用苏联的,底环平面至浆叶中心平面距离一般是0.2085D₁,对一些叶栅较长的转轮,当浆叶运行角度较大时,水流从导叶出口后来不及转弯就已到达叶片头部,使该处流态紊乱,引起头部脱流,产生汽蚀。

表1 清水电站转轮汽蚀情况统计

转轮名称	II 548		5M77		ZZ560		5K		II 547	
	富春江	富春江	富春江	富春江	富春江	富春江	富春江	富春江	富春江	富春江
机组号	1号	2号	3号	4号	1号	1号	1号	1号	1号	2号
材料	基材20SiMn 敷焊不锈钢板	基材20SiMn 敷焊不锈钢板	1号、2号 3号、4号 ZG15Mn 0 Gr13 MoVCu Ni6 Mo	1号、2号 3号、4号 ZG15Mn 0 Gr13 MoVCu Ni6 Mo	20SiMn	20SiMn	20SiMn	基材20SiMn 敷焊不锈钢 钢板条	ZG30 敷焊不锈钢 板条	ZGSiMn MoVCr
厂家	(苏) 哈尔科夫水轮机厂	上海汽轮机厂	东方电机厂	东方电机厂	杭州发电设备厂	杭州发电设备厂	杭州发电设备厂	哈尔滨电机厂	天津发电设备厂	东方电机厂
典型汽蚀部位										
	投产年月	1968.12.25	1976.17	1977.5.20	1977.5.20	1969.12.26	1966.9	1973.12	1973.3	1973.3
	检修时间	1971.2.27	1978.9.16	1981.3.1	1981.3.1	1971.8	1971.8	1978.3	1974.2	1974.2
	运行小时数	16475	9571	6539	6539	11498	12116	17000	5900	5900
	汽蚀体积V (米 ² 毫米)	29.7	0.1527	2.651	2.651	0.03929	0.8895	0.6165	46.464	46.464
	失重G (公斤)	231.66	1.2	20.4	20.4	31.01	6.94	4.81	363.42	363.42
	汽蚀指数K (毫米/小时)	0.2329×10^{-4}	0.005649×10^{-4}	1.377×10^{-4}	1.377×10^{-4}	0.495×10^{-4}	0.0908×10^{-4}	0.0448×10^{-4}	5.42×10^{-4}	5.42×10^{-4}
	汽蚀等级	Ⅲ	I	V	V	Ⅲ	Ⅱ	I	V	V
	安装高程(米)	4.1	4.1	26.845	26.845	36.845	18.6	95.6	18.5	18.5
	装置汽蚀系数 σ_t	0.91	0.93	0.5412	0.5412	0.5801	0.458	0.496	0.504	0.504

B区 这类汽蚀主要是由于叶片和转轮室的间隙影响。由于间隙的存在,使其内压力降低,汽泡随着高速射流反射到叶片背面,并与背面水流交汇引起脱流,造成汽蚀破坏,其破坏机理如图3。

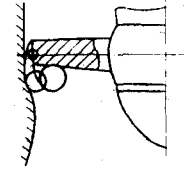


图3

C区 上述两种因素都有。有的是因为转轮室下半部加工不良或变形,当叶片转角较大时,叶片尾部与转轮室间隙随着不规则的转轮室时大时小,因而间隙内水流压力也是时小时大脉动变化。当脉动压力低于当时温度下水的汽化压力时,即发生汽化,产生汽穴,汽穴溃灭时作用到叶片尾部,就使尾部产生汽蚀破坏;还有的是因为尾部型线不合理或叶栅过长,形成局部汽蚀破坏。

有的机组在工作面头部区域产生汽蚀破坏,主要是由于偏离设计工况运行。当机组运行在高转速小流量区域时,水流对叶栅成负冲角,必然就在工作面头部附近产生脱流,形成翼形汽蚀。

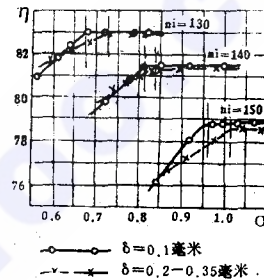


图4 汽蚀比较试验

3. 防止汽蚀破坏的措施

① 提高机组制造质量,使过流部件(尤其叶片)各部分尺寸、型线及光洁度应符合图纸要求。

② A区汽蚀比较严重的机组,可用铲平头部背面鼓包或减小头部R的措施。

从调查中发现不少机组有这样一个共同点,即虽然转轮破坏严重,但总有一两片汽蚀破坏相对较轻,因而证明该翼型比较适应该电站的运行工况,修改其它叶片时,可以以较好的一片为准,作5个样板(其中3个头部样板,两个径向样板),一面靠样板检查,一面测真实厚度,直至符合要求为止。

对新建电站,在进行机组设计时,底环平面至转轮中心平面的距离建议选择 0.23 至 $0.28D_1$,这样不仅能改善头部汽蚀,而且使机组稳定性和能量指标均有所提高。

③ 间隙汽蚀是轴流式水轮机汽蚀破坏的主要形式。因此,控制或减轻间隙汽蚀,就会大大减轻转轮的汽蚀破坏。

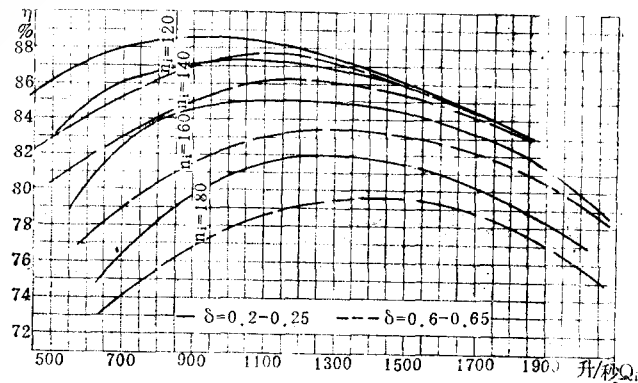


图5 D33不同外缘间隙能量比较曲线

目前,最有效的办法就是减小叶片外缘与转轮室间隙。我厂曾作过D31转轮根部间隙对汽蚀的影响(图4)和D33转轮外缘间隙对能量影响(图5)的比较试验。证明减小间隙不仅能减小临界点的汽蚀系数,而且能有效地提高转轮的能量指标。

国内外部分轴流机组转轮叶片外缘间隙值统计如表2。

表2 国内外部分轴流机组叶片外缘间隙统计

电站名称	转轮型号	外缘间隙 δ 毫米(单边)	δ / D_1	制造厂家
三门峡	A79-LH-600	7	0.0012	哈尔滨电机厂
青铜峡	ZZ500-LH-550	5-6	0.001	哈尔滨电机厂
葛州坝3号	ZZ500-LH-1020	9-11	0.001	哈尔滨电机厂
陆水4号	ZZ560-LH-300	3	0.001	东方电机厂
大化1号	ZZ440-LH-850	5.5-8.5	0.0007	东方电机厂
葛州坝2号	ZZ560-LH-1130	6-9	0.0007	东方电机厂
八盘峡4号	KV4-LH-550	2.5	0.00045	瑞典KMN公司
马迹塘1号	K89/4IIa-630	2.6-3.1	0.00045	奥地利依林公司
富春江4号	5M77-LH-800	5.6	0.0007	法ZEYRPI公司
铁门	ПЛ587a-LH-950	5-6	0.005	苏ИМ3公司

另外,沿叶片外缘端部加防汽蚀边也能有效地减轻叶片外缘的间隙汽蚀。这个办法在西欧和美国已普遍用于轴流机组。外缘端部加防汽蚀边一方面可以延长间隙流道,增加水流阻力,使流速降低,压力得以相对提高;另一方面可使间隙漏水不直接冲击叶片背面,从而减轻B区汽蚀破坏。

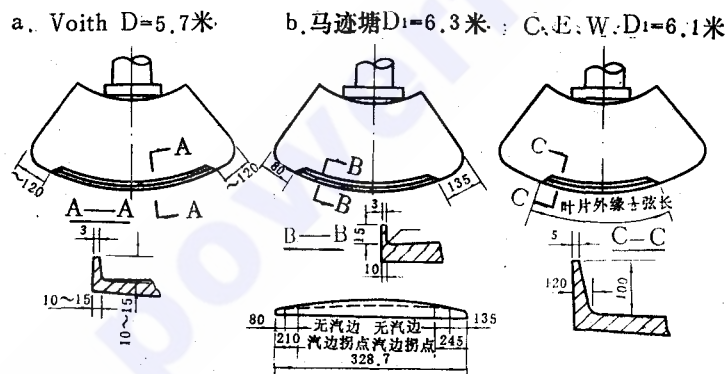


图6 三机组防汽蚀边结构示意图

三机组防汽蚀边结构如图6。

值得注意的是,防汽蚀边应加工成和外缘叶型类似的形状,与转轮室的间隙应力求均匀。否则不但不会改善汽蚀,反而使流态恶化,加剧转轮的汽蚀破坏。

二、多泥砂电站转轮的汽蚀和泥砂磨损

我国的河流多数属于多泥砂河流,尤其以西北、华北一带的河流含泥砂量大,其中黄河水含砂量为全国之冠。

据粗略统计,我国多泥砂河流电站装机容量近四百万千瓦。这些机组有一个共同特点就是过流部件损坏很快而且严重,使机组寿命大大缩短,检修频繁,电能损失严重。

通过对黄河、长江上几台轴流机组调查,发现叶片材质不论是普通钢还是不锈钢,也不论是进口机组还是国产机组,叶片正面和背面都是大面积的顺水流方向呈波纹状损坏,而且相对断面半径越大,波纹状越明显,勾槽越深(其损坏情形如图7)。

多泥砂电站转轮汽蚀磨损统计如表3。

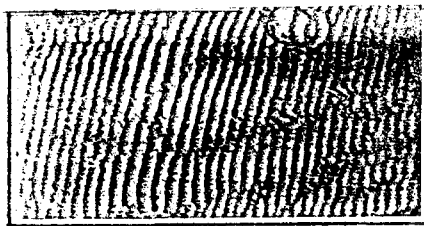


图7 八盘峡3号机损坏情形

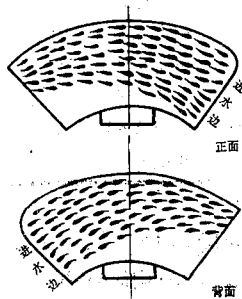


图8 转轮汽蚀和磨损部位

1. 叶片汽蚀和磨损典型部位(图8)。

多泥砂电站转轮叶片汽蚀和磨损部位与清水电站完全不同。清水电站叶片工作面基本上不发生汽蚀破坏,背面破坏也有明显的区域性;而多泥砂电站叶片工作面和背面都大面积的发生顺水流方向波纹状破坏,一般是大于中值断面的区域破坏明显,中间部分稍轻,靠近轮谷基本完好。初期表现为大量分散的象米粒样椭圆形光滑坑点,底部呈深褐色,出水方向冲开一个缺口,象是

拖着尾巴,故有人称之为“慧星状”;中期坑点成倍增加,坑痕加深扩大,邻近坑点互相勾通;后期已看不到单独的坑点,而是连成勾槽,象搓衣板样,成典型的波纹状破坏。

2. 产生汽蚀和磨损破坏的原因

关于多泥砂电站转轮破坏的原因,目前国内水力同行认识还很不一致:有的学者认为叶片工作面不存在负压,不会遭到汽蚀破坏,大面积的鱼鳞坑只能是泥砂磨损的结果;有的认为,单纯从磨损的观点去分析,有些现象得不到令人信服的解释,这些学者倾向于汽蚀和磨损联合作用;杜同教授〔3〕曾提出了自己独特的见解,认为在多泥砂电站中转轮鱼鳞坑破坏也属于汽蚀破坏。

汽蚀机理本来就是一个复杂的问题,加上泥砂和各种杂质就使问题更加复杂化。我国的河流多数是多泥砂的,而且也是水力资源最集中的河流,所以它象磁铁一样,吸引着众多的水电科技人员和广大职工去探索泥砂的奥妙。随着党和政府对科学技术的重视和测试手段的完备,多泥砂电站转轮大面积破坏问题一定会得到解决。

3. 防止汽蚀和磨损破坏的措施

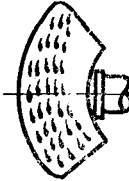

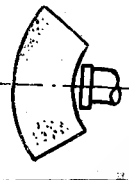
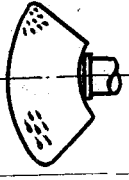
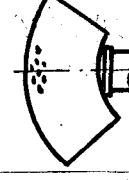
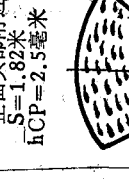
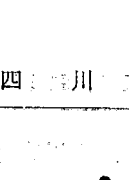
①开展两相流或多相流水力研究,为多泥砂电站提供性能优良的转轮及通流结构。现有转轮都是在清水条件下试验研究出来的,将这些转轮直接用于多泥砂电站,必然会使各项指标降低。要想比较彻底地解决多泥砂电站转轮的汽蚀磨损问题,必须建立含砂水水力试验台和多泥砂中间电站试验基地。

②合理选择水轮机设计参数。对于多泥砂电站机组不宜采用高参数,同时还要有足够的汽蚀安全裕量。

③选用抗汽蚀和磨损性能优良的不锈钢作为叶片用材。

④合理运行与检修。实测泥砂含量证明,汛期泥砂含量往往比非汛期成倍增加,为了延长检修周期多发电,减轻汛期泥砂破坏是关键。根据伊尔盖斯泥砂磨损经验公式,泥

表3 多泥砂电站转轮汽蚀磨损统计

转轮号	ZZ560	ZZ500	ZZ560	A79
电站名称	青铜峡水电厂		葛州坝二江电厂	三门峡水电厂
机组号	5号	6号	3号	4号
叶片材料	基材20SiMn 敷焊不锈钢板	2号3号4号 材质同5号机组	0Cr13NiCuMo	ZG20SiM0正面敷焊铸各 五铜钢板条
制造厂家	哈尔滨电机厂		东方电机厂	哈尔滨电机厂
典型汽蚀磨损部位	 叶片正背并侧 1-2.5毫米	 $S=0.664$ 米 $\bar{h}=3.5$ 毫米	 $S=0.075$ $\bar{h}=0.3$ 毫米	 正背面共 $S=10.85$ 米 ² $\bar{h}=0.3$ 毫米
	 正面 $S=1.82$ 米 $\bar{h}=15$ 毫米	 背面 $S=36.4$ 米 $\bar{h}=15$ 毫米	 正面头部附近 $S=1.82$ 米 $\bar{h}=2.5$ 毫米	
投产年月	1975.8	1975.1.15	1978.12.26	1973.12
检修时间	1983.2.26	1977.11.14	1980.4.10	1981.12.15
运行小时数t	53900	20215	2795	12944
汽蚀磨损体积V (米 ² 毫米)	40.262	78.0	0.0225	2.365
失重G(公斤)	314.0	608.4	0.176	18.686
汽蚀磨损系数K (毫米/小时)	0.1856×10^{-4}	0.974×10^{-4}	0.01018×10^{-4}	0.01082×10^{-4}
汽蚀磨损等级*	III	IV	I	I
安装高程▽米	1552	1132	1132	36.6
装置汽蚀系数 σ_t	0.9042	0.75	0.75	1.331

*这里的等级，沿用1963年水电部推荐的汽蚀等级标准

砂磨损破坏程度与水流速度的2.7—3次方成比例,所以在汛期降低水头发电,能大大减轻叶片破坏,其在汛期所损失的电能完全可以在清水期高水头运行发电和延长大修间隔得以补偿。

⑤非金属涂层保护。现在很多制造厂家和科研部门都在开展非金属涂层的试验研究工作,并已取得了一些可喜的成果,在泥砂问题没有找到根本解决办法的情况下,采用涂层保护确是一个行之有效的办法。有关涂料的配方及施工工艺等已有介绍。

⑥工程设计时应考虑防砂排砂措施,尽可能防止和减少泥砂过机。

结 论

1. 清水电站转轮叶片汽蚀破坏方式有翼型汽蚀、间隙汽蚀和局部汽蚀,以间隙汽蚀为主要破坏形式。通过减小外缘间隙和加防汽蚀边可以大大减轻间隙汽蚀破坏。

2. 多泥砂电站转轮叶片,普遍存在大面积波纹状破坏,在现阶段可以通过提高转轮制造质量和合理运行,使转轮破坏得以控制和减轻。

参 考 文 献

- [1] 裴拉也夫,水轮机汽蚀,华中工学院译。
- [2] 曾念,奥地利,瑞士低水头灯泡机组。考察报告,水力机械1979-9, NO.1
- [3] 杜同,含砂水中汽蚀和磨损规律的研究
- [4] 刘燕生,三门峡水电站水轮机的汽蚀和磨损,水力机械1979-9
- [5] 富春江水力发电厂,富春江水电站机电设备运行总结,水力机械1983, NO.1