

水泵水轮机进水阀上下游主密封设计探析

雷兴春

(中国南方电网有限责任公司调峰调频发电公司, 广州 510630)

摘要: 高水头水泵水轮机进水球阀上下游主密封是影响机组安全稳定运行的重要部件之一, 不同厂家对密封副硬度差的设计理念不同。探析了密封副设计理念的渊源, 并对国内电站典型的设计方案的运行情况进行了探讨, 重点研究了广蓄二期球阀密封副损伤情况与硬度差的关系。结果表明: 密封面的损伤与其硬度差密切相关, 固定密封环与活动密封环硬度接近时, 密封面基本没有损伤或损伤程度很小; 固定密封环硬度低于活动密封环硬度且差值比较大时, 其密封面损伤的程度也相对较大。因此, 合理控制球阀密封副硬度差有利于提高密封副的运行可靠性, 建议设计制造厂家将硬度差控制在 $\pm 35\text{HB}$ 内。

关键词: 水泵水轮机; 进水阀; 主密封; 密封副

中图分类号: TK730.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)03-0127-04

Analysis on Pump-turbine Inlet Valve's Main Sealing Design

LEI Xingchun

(CSG Power Generation Company, GuangZhou510630, China)

Abstract: Inlet valve's main sealing of High-head pump-turbine play important role on its stability during the operation process. Varies design rules was conducted to enhance the characteristics of the High-head pump-turbine by considering the influence of inlet valve's main sealing hardness difference on its stability. In this paper, the evolution of design theory for sealing has been studied, and then several typical design methods used in China were investigated, and finally this study play insight into the influence of inlet valve's main sealing hardness difference on its behavior of GZ-II pump-turbine with the field test data analyzing. Based on the study of the field test data, several conclusions can be drawn as follows: (i) differential hardness has significant effect on the damage of sealing surface and the damage degree increases with the increasing of the differential hardness between fixed and dynamic sealing rings; (ii) the damage degree reach its minimum value when the dynamic and fixed sealing rings have the same hardness. Therefore, the optimized design rule that controlling the differential hardness below $\pm 35\text{HB}$ was proposed to enhance its behavior of the High-head pump-turbine.

Key words: pump-turbine; main inlet valve; main sealing; sealing pair

抽水蓄能电站一般水头较高, 其进水阀也多采用双密封结构的球阀^[1], 即包括上游侧检修密封与下游侧工作密封, 均为可拆卸的不锈钢活动密封环和不锈钢固定密封环。固定密封环用不锈钢螺栓把合在活门上, 当活门关闭后活动密封环滑动并压紧固定密封环达到密封止漏功能。

作为不锈钢密封副的活动密封环和固定密封环, 两者之间有一定的硬度差是可以理解的, 但究竟孰高孰低及差值的选择, 不同厂家设计理念不同。表1所列为我国南方几个抽水蓄能电站的相关数据, 上下游密封副均采用相同的设计。

表1可以归纳为两个不同的设计理念: 其一是ALSTOM的固定环硬度比活动环硬度高约35 HB; 其二是以ANDRITZ为代表的活动环硬度比活动环硬度高约50 HB。本文拟对此作一粗浅的分析, 仅供商榷。

收稿日期: 2017-06-14

作者简介: 雷兴春(1983), 男, 四川大竹人, 工程师, 硕士, 主要从事抽水蓄能电站建设工作(e-mail)13926169103@139.com。

表1 国内部分抽水蓄能电站进水阀主密封材质及硬度

Tab. 1 The material and hardness of pump-turbine inlet valve's main sealing in china

电站名称	固定密封环		活动密封环		制造厂	备注
	材质	硬度/HB	材质	硬度/HB		
GZ-I	Z5CN13-4	≤187	Z10C13	≤183	ALSTOM	设计值
GZ-II	SA182-93B F316L	≤187	SA182-93B F6NM	207~243	VOITH	设计值
HZ	A473GR420	+35	A473GR420	192~223	ALSTOM	“+35”指固定密封环硬度高于活动密封环35 HB
QY	ZG10Cr13	186	ZG20Cr13	227~232	TOSHIBA	实测值
XY	ZG10Cr13	163~200	ZG06Cr13Ni4Mo	217~286	ANDRITZ	设计值
SZ	锻钢 2Cr13	201~215	锻钢 S41500	323~330	ANDRITZ	设计值
XJ	锻钢 1Cr13	≥159	ZG0Cr13Ni5Mo	221~286	HEC	设计值
THP	X12Cr13	≤220	X3CrNiMo13-4	≤320	ANDRITZ	设计值
YX	X12Cr13	≤220	X3CrNiMo13-4	≤320	ANDRITZ	设计值

1 密封副硬度差相关规定及研究

1.1 相关标准及规范

1)《石油、石化及相关工业用法兰端和对焊端钢制截止阀与和截止止回阀》文中“表2 内件材料、硬度和可接受的规范”对“13Cr”规定“阀体和闸板密封面的最小硬度为 HB250，二者之间的最小硬度差为 HB50。”

2)《实用阀门设计手册(第二版)》之“表4-219 BS1873-1990 规定的内件材料、硬度及应用范围”对“13Cr”规定：“阀体和阀瓣密封面最小硬度为 250 HB，这时二者的硬度差至少应为 50 HB。”

3)《混流式水泵水轮机基本技术条件》^[2] 倾向于以易更换件硬度低为原则，如：“4.2.1.9 转轮的转动迷宫环与固定迷宫环或止漏环硬度差应不小于 20 HB”，也就是固定迷宫环的硬度应低于转动迷宫环的硬度；“4.2.1.13 导叶端部与之相应的抗磨板之间宜有不小于 20 HB 硬度差异”，也就是抗磨板硬度低于导水叶的硬度。

以上相关标准或规范都是针对摩擦副或动密封副而言的，例如阀门的“阀体和阀瓣密封面”、转轮的转动迷宫环与固定迷宫环、导叶端部与之相应的抗磨板等。而球阀的主密封副为静密封副(或充其量是微动密封副)，其密封和摩擦损伤机理均不相同，需区别对待。

1.2 国内的相关研究成果

方本孝等人通过试验研究了阀门密封副硬度差对密封副抗摩擦损伤的影响^[3-5]，结果证实：硬度和硬度差对密封副抗摩擦损伤有一定影响，密封副

中软件的硬度不能太低，其真实接触应力不应超过材料的压缩屈服极限；不同摩擦副都有一定的耐摩擦性能较好的硬度差范围。

张厚君等人通过试验研究了活塞环和缸套摩擦副的硬度差对其耐磨性能的影响^[6]，结果同样证实：每一种摩擦副都有一个耐磨性能较好的硬度差范围，活塞环硬度稍大于缸套硬度(15~30 HB)时，其耐磨性最好。

也就是说，一般的摩擦副或动密封副其硬度差宜选 15~30 HB。

2 广蓄二期球阀上下游主密封研究

2.1 球阀主密封设计

广蓄二期球阀由德国 VOITH 设计制造，其密封(下游)结构如图 1 所示。活动密封环采用马氏体不锈钢(SA182-93B F6NM)、固定密封环采用奥氏体不锈钢(SA182-93B F316L)，设计要求活动环硬度高于固定环相应设计硬度参见表 1。

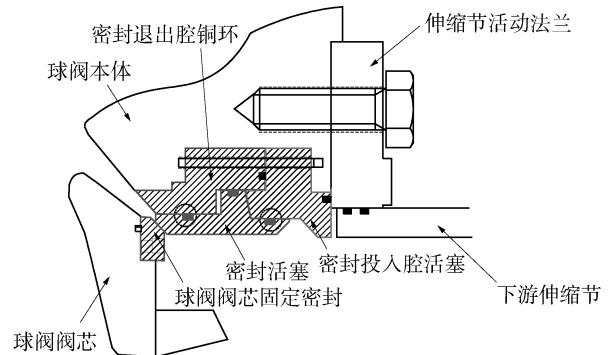


图1 广蓄二期球阀下游密封副

Fig. 1 Main inlet valve's downstream sealing pair of GuangZhou ii

2.2 运行及检修情况

电站投运以来，球阀下游固定密封环泄漏严重，影响到机组的正常运行，进行过多次检修。2015 年 10 月对四台机组球阀进行大修，发现固定密封环密封面有较多压痕、磨痕以及由此引发气蚀产生的凹坑。上下游密封副的损伤情况如下：

1) 上、下游固定密封环。

表 2 固定密封环损伤情况

Tab. 2 Damage of fixed sealing rings

球阀编号	固定环损伤情况(参见图 2)	
	上游检修密封	下游工作密封
#8	密封面有多处较深凹坑及较多磨损痕迹	密封面有多处较深凹坑及较多磨损痕迹
#7	有一处较深凹坑	密封面有多处较深凹坑及较多磨损痕迹
#6	密封面仅有较浅磨损痕迹	密封面有多处较深凹坑及较多磨损痕迹
#5	密封面较好，无明显坑点、汽蚀	密封面有多处较深凹坑及较多磨损痕迹



图 2 #8 上游密封固定环

Fig. 2 Upstream fixed sealing rings of unit 8

2) 上、下游活动密封环。

表 3 活动密封环损伤情况

Tab. 3 Damage of dynamic sealing rings

球阀编号	活动密封环损伤情况(参见图 3)	
	上游检修密封	下游工作密封
#8	中间盘根槽由于密封破坏导致汽蚀严重	密封面较好，无坑点、汽蚀
#7	密封面较好，无坑点、汽蚀	密封面较好，无坑点、汽蚀
#6	密封面一段约 100 mm 长的较深磨损痕迹	密封面较好，无坑点、汽蚀
#5	密封面较好，无坑点、汽蚀	密封面较好，无坑点、汽蚀

3) 全面检查揭示的损伤情况。

上、下游活动密封环基本完好无损，局部气蚀



图 3 #8 球阀上游密封活动环

Fig. 3 Upstream dynamic sealing rings of unit 8

严重也只是由于密封圈破损所致；动作比较频繁的下游工作密封的固定环均呈现“密封面有多处较深凹坑及较多磨损痕迹”；动作较少的上游检修密封固定环仅#8 球阀密封面有多处较深凹坑及较多磨损痕迹，其他状况稍好，而#5 球阀则密封面较好，无坑点、汽蚀。

2.3 密封副硬度测量结果

为了进一步探究密封环的密封面汽蚀及磨损与密封副硬度匹配的关系，采用硬度计分别对损坏较少的#5 球阀和损坏最严重的#8 球阀密封环硬度进行了检测。检测结果(见表 4)表明，由于材质、热处理等多方面原因，四台机密封环的硬度值与设计值的差异还是明显存在的。

表 4 密封环硬度测量结果

Tab. 4 Measurement results of sealing ring hardness

序号	部件名称	材质	平均值
1	#5 上游活动环 -1	SA182 -93B F6NM	309
	#5 上游活动环 -2		305
	#5 上游活动环 -3		308
	#5 上游活动环 -4		309
2	#5 上游固定环 N	SA182 -93B F316	299
	#5 上游固定环 M		334
	#5 上游固定环 L		306
	#5 上游固定环 R		309
3	#8 上游活动环 -1	SA182 -93B F6NM	296
	#8 上游活动环 -2		296
	#8 上游活动环 -3		296
	#8 上游活动环 -4		300
4	#8 上游固定环 N	SA182 -93B F316	243
	#8 上游固定环 M		237
	#8 上游固定环 L		242
	#8 上游固定环 R		247

2.4 密封环损伤与密封副硬度匹配探析

1) #5 球阀上游固定密封环的硬度测值达到 299~334 HB, 且大部分测点的硬度值均为 300 HB 左右; 而上游活动密封环硬度测值则为 305~309 HB, 两者的硬度值相近, 甚至相当一部分区域活动环密封面的硬度还低于固定环。因此, #5 球阀上游固定密封环的密封面基本完好, 极少坑点、汽蚀的现象。

2) #8 球阀的上游固定密封环硬度测值达到 237~247 HB, 而其上游活动密封环硬度测值为 296~300 HB, 活动密封环硬度比固定密封环高了将近 60 HB, 这就使得其固定环密封面呈现多处较深凹坑及较多的磨损痕迹。

3) 其他机组硬度较高的上、下游活动密封环均未出现“凹坑和磨损”, 也是明显的例证。

3 其它电站的实例

3.1 仙居电站球阀密封的事故分析

哈电设计制造的仙居电站球阀在进行密封泄漏试验后拆除检查时发现, 上游侧和下游侧固定密封环均在局部出现两条压痕, 随后试验发现压痕宽度有增加的现象, 如图 4 所示。

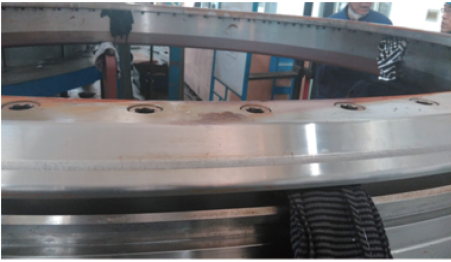


图 4 上游密封固定密封环

Fig. 4 Upstream fixed sealing rings

仙居电站球阀活动密封环采用的 ZG0Cr 13 Ni5Mo 硬度通常大于 300 HB, 而固定密封采用的锻钢 1Cr13 硬度通常小于 200 HB, 两者的硬度差大于 100 HB, 其固定密封环的压痕形成源于其硬度过低是极有可能的, 而这也可能是导致球阀检修密封泄漏量偏大的主要原因之一。

3.2 ALSTOM 设计制造的球阀密封

广蓄一期进水球阀由法国 ALSTOM 设计制造, 从表 1 可以看到, 其活动密封环和固定密封环硬度值是极为相近。自上个世纪九十年代投运至今, 球阀上下游密封一直正常, 未出现明显故

障或损坏。

同为 ALSTOM 设计制造的惠蓄进水阀, 其用不锈钢材料制造的活动密封环的硬度要求比固定密封环低 35 HB, 自 2008 年开始投运至今, 球阀上下游密封一直正常, 未出现明显故障或损坏。

4 结论

1) 球阀上下游密封这样的静密封副与阀门的“阀体和阀瓣密封面”、转轮的转动迷宫环与固定迷宫环或导叶端部与之相应的抗磨板等那样的摩擦副或动密封副显然是有区别的, 因此相关摩擦副或动密封副的规定套用于进水球阀上、下游密封这样的静密封副球阀显然是不尽合适的。

2) 广蓄二期球阀的运行经验表明: 密封面的损伤与其硬度差密切相关, 即固定密封环与活动密封环硬度接近时, 密封面基本没有损伤或损伤程度很小; 固定密封环硬度低于活动密封环硬度且差值比较大时, 其密封面损伤的程度也相对较大。

3) ALSTOM 设计制造的球阀如惠蓄电站, 明确要求固定密封环的硬度比活动密封环高 35 HB, 多年以来运行一直都很正常。而广蓄一期电站球阀上下游密封副又几乎没有硬度差, 也能长期稳定运行。这也是说明固定密封环硬度不宜低于活动密封环, 或者说两者硬度差不宜设置过大。

4) 对于球阀上下游密封这样的静密封副是否设置硬度差是值得商榷的。我们认为适当控制两者硬度差的幅值或建议控制在 ± 35 HB 范围内是可行的, 球阀厂商在设计制造时应审慎考虑。

参考文献:

- [1] 尹襄, 周小南, 夏晓坤, 等. 大型球阀制造技术研究及应用 [J]. 东方电机, 2009(2): 15-25.
- [2] 中国电器工业协会. 混流式水泵水轮机基本技术条件 GB/T 22581—2008: [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [3] 陈元芳, 方本孝, 张洪文, 等. 阀门密封面配对的试验研究 [J]. 化工与通用机械, 1980(3): 15-23.
- [4] 方本孝. 提高阀门密封副耐擦伤性能的研究 [J]. 流体工程, 1984(1): 10-15.
- [5] 方本孝, 杨信平. 阀门密封性能的研究 [J]. 阀门, 1999(2): 12-16.
- [6] 张厚君, 张伟. 活塞环与缸套摩擦副的硬度差对其耐磨性能的影响 [J]. 汽车技术, 1992(4): 34-36.

(责任编辑: 高春萌)