

龚咀水电站底孔泄水道闸门 设计与运行实践

王麟璠 黄秉良

(水电部成都勘测设计院)

龚咀水电站位于大渡河中下游河段, 河流水量充沛, 泥沙含量较多, 且有大量漂木过坝。水电站混凝土重力坝分高坝(150米)和低坝(85.5米)两期建设。近期低坝装机容量70万千瓦, 于1971年建成发电; 远景高坝装机容量210万千瓦。

坝内设有三个底孔泄水道, 分别布置在6坝段(下简称6孔), 10坝段(下简称10孔)和15坝段(下简称15孔)上。6孔和10孔泄水道的工作闸门的孔口尺寸为 5×8 米(宽 $\times$ 高), 15孔的孔口尺寸为 5×6 米。

底孔泄水道主要用于宣泄洪水流量, 清除厂房进水口的淤砂和沉木; 在施工期间作为二期导流; 并在必要时作为放空水库之用。当建设高坝时, 底孔还须调节流量, 控制上游水位, 以满足发电和大坝的安全。底孔闸门在低坝运行时水头为56米, 远景过渡到高坝时水头为78米。因此工作闸门按78米水头设计, 而事故检修闸门则按低坝56米水头设计, 并需要考虑13米的泥砂淤积高度。

底孔泄水道闸门于1971年全部建成。投入运行以来, 三个底孔闸门已开启五百多次, 泄水道运用时间达三万多小时, 其中以15孔泄水道运行时间最长(达一万一千七百多小时)。总的说来, 运行工况较好, 但也存在一些问题, 如三个底孔闸门水封普遍漏水, 15孔的门槽冲蚀有待处理, 6孔和10孔的门槽尚待抽水检查, 以及泄水道出口处无拦阻漂木进入泄水道的措施。

一、底孔泄水道闸门的设计要求

龚咀水电站底孔泄水道闸门承受的水头超过50米, 已属于高水头闸门, 水流一经过泄水道闸孔, 过水断面突变, 使门后水流势能转化为动能, 形成28.5—33.5米/秒的高速水流。在泄水道闸孔的边界突变处, 因高速水流导致的水柱分离和剧烈脉动, 产生强烈的低压区而形成空蚀。兼以河水挟沙量大, 使水道磨损所造成的表面不平等原因, 在闸槽后的底槛和边墙处是最容易发生气蚀的部位。因此, 在设计底孔泄水道闸门时, 首要的是水力条件, 必须预估初生空穴现象, 并对所设计的泄水道形式和外形可能发生的空蚀破坏做出全面估计, 同时提出防止泄水道各部位空蚀破坏的措施。

底孔为短管泄水道, 闸门设在进口, 闸后水流为自由出流。紧靠闸门下游断面的孔高

高突然放大,以保持水流的自由界面和通气,并要保证上、下游各种不同水位下都应呈明流状态,这样对闸门运行工况较好,可减免气蚀的产生。

二、底孔泄水道闸门选型与运行实践

龚咀水电站泄水道深孔闸门的布置和选择是根据水力枢纽的运用要求和泄水道水力条件等因素来确定的。在泄水道的进口布置了两道闸门(事故检修闸门和工作闸门,图1),两闸门间距为9.7米。由于下游尾水较高,在泄水道尾部预留门槽,以备检修泄水道之用。

事故检修闸门布置在距进口4米处,为了防止泥砂和污物淤堵门槽,要求闸门面板和止水装置均设在上游面。支承行走的型式曾就滑动支承(胶木滑道),定轮支承和链轮支承进行过比较。胶木滑道支承的闸门所需的门槽尺寸较小,对于高速水流来说,能减轻空蚀和振动。但胶木滑道的摩擦系数较大,闸门要靠加重才能关闭,因此需增加门机容量,是不经济的。定轮支承闸门的轮子承受荷载很大,同时要将其集中荷载传递到埋设件上,轮子和轨道需要采用合金铸钢。当时厂家对合金铸钢的铸造和热处理质量也难保证,而定轮又使门槽尺寸宽度增加,会恶化水力条件,往往也会产生空蚀和振动。链轮支承闸门能使支承轨道受力较为均匀,可以采用常规的轨道,它的滚动摩擦系数很小,关闭闸门时,可减少加重,从而减少了门机容量,且它的支承行走部分尺寸较小,门槽宽度可以减少,以改善水力条件和空蚀特性。从以上三种支承型式分析,闸门和启闭机的总造价方面,以链轮支承的综合指标较为优越,虽然链轮闸门在制造安装精度上要求较高,若对闸门采用铆焊混合结构和精制螺栓拼装等措施,也能达到设计要求,因此选用了链轮闸门。

链轮闸门是静水启门,动水下门,用450吨门机操作,动水下门时,用门机主钩将带压重箱自动挂钩梁和闸门吊耳连结一起下门;启门时,门机主钩先将带压重箱的自动挂钩梁吊出门槽;再用一套自动挂钩梁与闸门吊耳连结,将闸门吊起。三个孔口共用一扇链轮闸门,在门叶上设置了两条顶止水,以适应两种不同孔口高度的需要。

工作闸门以最广泛采用的平面闸门和弧形闸门两种门型进行比较,对国内运行的底孔平面闸门如三门峡和刘家峡水电站,其孔口尺寸分别为 $3 \times 8 - 60$ 米(净宽 $\times$ 净高—水头,下同)和 $3 \times 8 - 70$ 米,都发生过不同程度的气蚀和振动,存在着不少问题。而底孔弧形闸门如丹江口和云峰水电站,其孔口尺寸分别为 $5 \times 6 - 70$ 米和 $4.25 \times 4.25 - 70$ 米;运行中则没有发生明显的振动和气蚀。对孔口尺寸较大的高水头工作闸门,从水力模型和实际运行情况看,弧形闸门显然比平面闸门优越,它不需要门槽,流态好,启门力也小,更适应有泥砂和漂木的河道,故选用了弧形闸门。

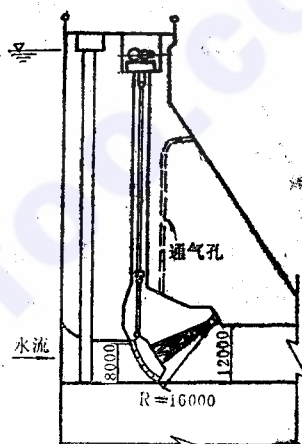


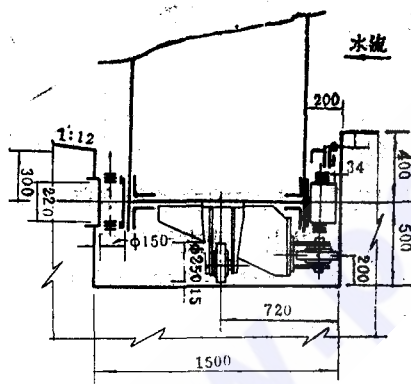
图1 泄水道水工机械
设备布置图(6孔, 10孔)

弧形闸门启闭是通过劲性压杆、加重箱、拉桿与设在坝顶的 2×150 吨的固定式启闭机连接进行操作。启闭机室顶部有盖板, 不影响坝上交通。

十多年来运行经验表明, 底孔泄水道闸门的布置和选型, 基本符合运用要求, 水力条件尚好, 操作灵活, 检修方便, 在 1971 年二期施工导流期间, 三孔弧形闸门在水头 $12 \sim 45$ 米任意开度时曾长时间的频繁运用, 闸门已开启了上百次, 运行时间有一万三千多小时, 闸门没有明显的振动。1972 年以来, 运行水头达 50 多米, 三孔弧门运行了一万六千多小时, 运行情况较好, 只是止水橡皮漏水。15 孔弧门曾于 1980 年启门时在离底坎 0.75 米处, 突然发生弧门提不起放不下去的卡阻事故, 嗣后放下链轮闸门封闭孔口, 查明弧门支臂被下游回水的漂木进入泄水道卡住所致。因此底孔泄水道设一道动水下门的事故检修闸门, 对工作闸门的安全运行是必要的。若泄水道出口只留门槽, 暂不设门, 也会给运行带来不便, 如下游尾水位较高, 以设一道检修闸门为宜。

三、链轮闸门的设计和运行

龚咀水电站的链轮闸门按 $5 \times 10.5 \sim 56$ 米进行设计, 水压力及泥砂压力总共为 3420 吨, 闸门钢材采用 16 锰钢, 梁格为多主梁型式。闸门分为两节, 每节闸门各布置两根链轮行走装置, 滚柱直径为 150 毫米, 长为 220 毫米, 材料为 40 铬钢 (图 2)。



链轮闸门要求机械制造设备精度高, 对质量要求也很严格。由于制造厂家机械加工和热处理设备的限制, 不能满足设计要求, 因而改用了铆焊混合结构, 将闸门的主梁和边梁分成单独的部件进行焊接和机械加工, 再由铆接拼成运输单元, 在工地用精制螺栓拼装成整体, 这样就基本保证了闸门的质量要求。

链轮闸门的支承行走装置属静不定结构, 由于制造和安装都有公差, 每只滚柱不可能均匀地压在闸槽轨道上, 甚至有一部分滚柱未与轨道接触, 因此要特别注意工作轨道的平直度和闸门的刚度, 这对减少滚柱行走的不均匀性有很大意义。在设计滚柱荷载时,

图2 5×10.5 米链轮闸门门叶门槽系关图 一般采用 1.5—1.7 的超载系数。龚咀水电站链轮闸门行走支承滚柱, 采用 1.5 的超载系数, 否则滚柱和链带在实际运行中将会产生过载, 导致滚柱和链带的损坏。滚柱行走的摩阻系数, 在理论上约为 0.01, 但实际使用大大超过理论的数据 (某些文献资料上推荐采用 0.03—0.05, 也有推荐为 0.1)。国内某工程的链轮闸门采用了 0.1 的摩阻系数, 它比理论值大十倍, 这可能是链轮闸门的摩阻系数不大稳定, 随加工精度, 使用年限, 所用材料等因素有较大的变化。龚咀水电站链轮闸门的摩阻系数采用 0.05, 看来是合适的。

龚咀水电站链轮闸门在 1972 年库水位约 40 米的静水中试运行; 1980 年在 50 多米水头作用下动水下门, 运行都较正常。链轮闸门投入使用不久, 发现滚柱普遍锈蚀, 有部分滚柱因锈蚀使滚动不太灵活, 其原因系滚柱选材不当 (材料为 40 铬钢), 不具有

防锈的性能,又没有经过必要的防锈处理的原故。因此对链轮闸门的滚柱,除非采用不锈钢材料,否则必须经过防锈处理,如在滚柱表面堆焊不锈钢层再精加工,或喷镀硬铬层等防锈。

四、底孔弧形闸门的设计与运行

龚咀水电站底孔泄水道弧门有两种孔口尺寸,有关参数列于下表:

龚咀水电站底孔弧门技术特性

孔口 位置	孔口尺寸 (宽×高)(米)	设计水头 (米)	总水压力 (吨)	孔口 数量	弧面半径 (米)	底槛到支铰 中心高度 (米)	每扇闸门 (吨)	
							门叶	门槽
6.10孔	5×8	78	3600	2	16	12	120	50
15孔	5×6	78	2780	1	12	9.5	95	45

弧门材质是16锰钢,其主梁布置为主纵梁式结构,小横梁布置在面板与主纵梁之间,小横梁与主纵梁用螺栓连接,主纵梁与支臂间和支臂与铰链间均通过加工的连接板都由螺栓连接。这种梁系布置需要小横梁的数量较多,而主纵梁只有两根,对孔口跨度小于高度者,有着明显的经济效益。主纵梁和支臂为箱形结构,对加强闸门的整体刚度和侧向抗弯刚度都是必要的。这种结构布置,扩大了螺栓拼接的使用范围,便于分段运输,安装和维护。对孔口尺寸较大的弧门尤为适宜。

由于制造厂受机械加工设备的限制,门叶部分无法整体加工和退火,焊接后的闸门结构,其内应力和残余变形无法消除,影响闸门制造质量,弧门面板的不平度和圆弧度,未能达到设计要求;小横梁与主纵梁间,主纵梁与支臂间的连结板,虽经加工,但因运输和现场拼焊等原因,产生翘曲变形,在安装时不得不在连接板之间的缝隙灌环氧树脂。由于门体结构误差偏大,面板弧度也未达到质量要求,因此止水橡皮封水效果差。弧门在实际运行中,有足够的结构强度和整体刚度,在任何开度下运行,弧门没有明显的振动和变形。

弧门支臂为直腿型,采用圆柱形铰,其轴套材料为青铜,轴为45号锻钢,直径700米,长1200米,原设计时要求在轴的表面堆焊厚2-3毫米的不锈钢以防锈蚀,后因制造工艺问题,改涂二硫化钼。在运行中发现轴表面仍然锈蚀,轴的止动板螺钉被剪断,轴向外移动1~2厘米,以及打油困难等弊病。

四、底孔弧形闸门的止水型式和运行实践

底孔弧门的止水是设计弧门的关键之一,它是直接影响弧门的运行,因此必须高度重视。

底孔弧门的止水设计在上游面,它沿着弧线运动的滑动式止水,其顶止水型式(图3)由两道P形橡皮止水组成。装在门叶上面一道P形止水,当弧门关闭时,紧压在顶楣不锈钢止水座板上,藉以封水,弧门开启后立即脱开;下面一道P型橡皮止水固定在

顶楣埋件上,弧门启闭过程中始终紧贴在圆弧面上以防止门顶射水,弧门全关后也达到封水和减少浮托力的目的。底止水为板状刃形橡皮,两侧止水则为方头P型橡皮。底、侧止水橡皮固定在门叶上并与顶止水形成一个连续的止水框架。

在实际运动中,止水橡皮均出现不同程度的漏水,且漏水多在弧门四个角的部位。因顶止水橡皮出现了卷翻、麻花形扭曲和撕裂等现象,个别的压紧螺栓被扭断,故顶止水漏水较为严重。

分析其产生的原因,首先是由于弧门面板的弧面没有经过机械加工,表面不平整;其次是弧门的制造和安装误差偏大,止水装置偏离设计位置;其三是止水橡皮头部柔性大,止水橡皮外形尺寸不标准以及止水压板边缘形状设计不当

其四是门槽部分混凝土表面高出埋件,施工外露的钢筋头未经处理等原因。因此针对以上情况,对今后设计要求弧门面板光滑平整,需经过机械加工,严格限制制造安装误差,确保止水橡皮预压缩量等措施,以达到防止水封射水和紧密封水的目的。

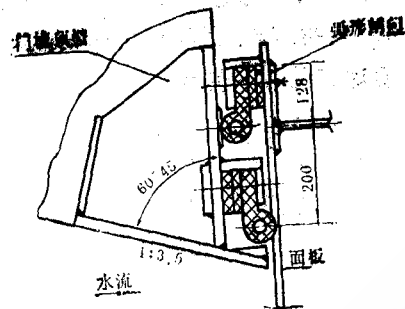


图3 5×8米弧形闸门顶止水装置图

五、门槽和衬砌设计及其运行实践

泄水道进口为喇叭形曲线,距进口4米处,为链轮闸门门槽,门槽深0.9米,宽5米,门槽下游错距为0.1米,以1:12斜坡与下游侧墙平缓连接。距进口13.7米处为弧形闸门门槽,弧门前为满流,闸后为明流,在弧门闸室布置有通向下流的通气孔。

泄水道的抗磨抗蚀设计,在喇叭口部分的混凝土表面涂抹环氧砂浆保护,对有压段采用钢板镶护,对明流段则采用高标号混凝土。

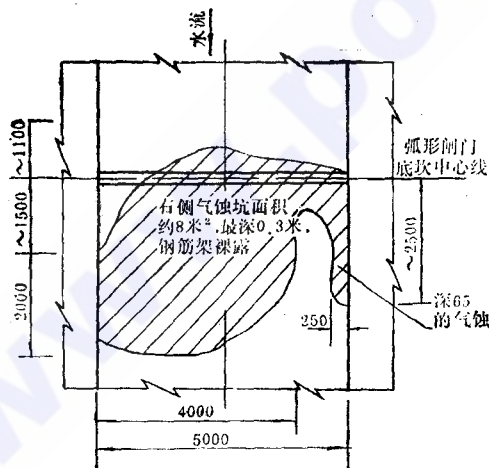


图4 15孔泄水道底板汽蚀

泄水道的钢板衬砌在施工过程中,除6孔是按设计图纸施工外,10孔和15孔取消了大部分钢板镶护,给运行留下了隐患。

泄水道投入运行一年后,曾对6孔和10孔进行检查,发现链轮闸门门槽下游1:12斜坡段与侧墙交接处,由于施工粗糙有部分剥蚀,在弧门的顶楣埋件因漏水也有轻微的剥蚀现象。最近发现10孔弧门的底坎底部有部分射水,情况尚待查明。

15孔泄水道从1971年投入运行以来已达一万多小时,由1979年2月抽水检查,发现弧门底坎右侧有气蚀坑(图4),面积约有5平米,已露钢筋,泄水道混凝土边墙

多处剥蚀,混凝土底板冲刷严重。同年3月对弧门底坎右侧的气蚀坑,以钢砂混凝土填补;1980年3月潜水检查,发现弧门底板已露出钢筋头,填补的钢砂混凝土已被冲走,暂对15孔限制使用。于1981年2月再次抽水检查,发现弧门底坎下游右侧的气蚀坑范围扩大到8平米,最深达30厘米,部分鹅卵石和钢筋架裸露。在左侧沿边墙的底坎处约有长2.5米,宽0.25米,深6.5厘米的气蚀槽,且与右侧气蚀坑相连;在底坎前一米处,混凝土也遭冲蚀,其深度为4~5厘米。

结 语

1. 底孔泄水道工作闸门的型式,当孔口面积大于20米²,水头超过50米时,优先选用弧形闸门,它没有门槽,水力条件优越,允许局部开启以调节流量。

2 底孔泄水道设置不少于两道动水下门的闸门,以保证闸门安全运行,对运行条件复杂的应在进口另设一道检修闸门。

3. 在底孔泄水道的混凝土表面涂抹环氧,是一种较为理想的抗磨抗蚀材料,应在实践中不断充实和提高;钢板衬砌仍是现阶段抗磨抗蚀的主要手段。

4. 底孔闸门的合理设计,除必要的水力学试验外,还应借鉴已运行闸门的经验教训,进行新型式、新材料的研究,是提高设计水平的有效途径。

5. 底孔弧门的制造和安装水平要提高,制造厂应具备大型的机械加工设备和大型退火炉。并应扩大材料来源,逐步做到闸门部件不锈钢化,螺栓拼接化。

《四川水力发电》征订启事

1. 《四川水力发电》经批准从1986年起改为季刊,限国内发行。

2. 本刊主要刊载水电勘测、规划、设计、施工、运行、管理、教学、科研、能源政策以及地方电力建设等方面的论著,技术经验总结、科研成果,国内外技术动态,技术引进及新兴科学知识等科普性文章。

3. 本刊每逢3、6、9、12月分出版,每期定价0.80元,全年3.20元。平寄免收邮资费,但如有遗失,本部不负责查询。挂号则每期每本加收邮费0.12元。

4. 凡1985年度按季刊订阅的订户,如继续订阅,1985年度多收的0.80元转入1986年;1986年每期订费只汇2.40元即可。若不继续订阅,可以将1985年余款退回订户。

1985年度拟出版的“深厚复盖层专辑”专刊,改为1986年出版。

5. 本刊各期略有库存,每期每本0.80元,可直接汇款本编辑部零购。

征订单函索即寄。

本部地址:四川 成都 青羊宫 水电部成勘院转《四川水力发电》编辑部。开户银行:成都市工商银行 青羊宫分理处;帐号:892051。

《四川水力发电》编辑部

1985.10.20