

⑥ 涡流式内消能工及其在高水头泄水建筑物中的应用

29-34

曹民雄 龙杰[✓] 孔祥柏

TV653

(南京水利科学研究院 南京 210024)

摘要 分析涡流式内消能工的结构和消能机理,对单向涡流式、同轴反向涡流式、竖井涡流式内消能工的水力特性和消能情况进行综述。试验表明,内消能工试验不存在比尺效应。内消能工内水流脉动能量的产生、输移、损耗等问题有待进一步研究。综合各类消能工的优点,将其布置成混和形式,也是涡流式内消能工的研究方向。

关键词 泄水建筑物 高速水流 内消能工 消能率 涡流式

泄水建筑物的消能有外消能(底流、挑流、面流)和内消能方式。低水头建筑物泄水时,采用外消能方式较多。但高水头建筑物泄水时,将出现高速水流,有压缩、激波等一些水流特性的变化^[1],也将出现雾化、空蚀等一系列问题,如继续采用外消能方式,将存在许多目前尚无法克服的技术难题。因此,把大面积遭受高速水流作用改变为局部承受的内消能方式,将是高水头建筑物泄水消能的一条有效途径。

高水头建筑物泄水的内消能方式灵活多样,可大致分为突扩式、竖(斜)井式和涡流式。突扩式内消能方式已应用于实际工程,并收到良好的消能效果,其消能效果与水流空化数成正比^[1]。竖(斜)井式消能不充分,流态易失稳并产生空蚀破坏而渐渐为工程界所摒弃^[1,2]。涡流式内消能尚处于研究探索阶段,有必要总结经验,以便进一步深入而系统地研究。

1 涡流式内消能的消能工结构与消能机理

涡流内消能工通常由引水道(包括进水

管、旋转水流室)和泄水道(包括消能室、出水道)等组成,结构布置视工程实际情况优化确定。涡流的形成一般可通过阀门等节流造涡装置或切向进流方式形成。

水流速度达到 50 m/s 以上时,固体过流表面将存在空化与空蚀的危险,并使掺气减蚀出现困难,同时掺气还将对过流表面产生一些其它有害影响^[3]。涡流式内消能可以利用泄水道内水流高速涡旋运动产生的离心力,在洞壁形成法向正压力,边壁压力的升高可防止或延缓洞壁空化。涡旋水流沿洞壁法向存在很大的流速梯度,使水流各层面间出现强烈的紊动和剪切,特别是反向涡旋,两股水流间的剪切、冲击、掺混、紊动和扩散,使大部分水流动能转化为热能而随水流散逸。

泄水道内水流高速旋转,在离心力作用下,水流向周壁聚集,使周壁水流成为密实水体,而轴向形成低压空腔,空腔一旦与大气相通,即形成强烈的掺气现象,水气掺混,加剧了水流动能的耗散。洞壁压力的升高及水流动能的沿程消散,减小了高速水流对泄水建筑物的激振力。下面介绍三种有代表性的涡流内消能工。

第一作者简介:曹民雄,男,工程师,从事河流泥沙及航道整治研究,曾发表《无粘性非均匀沙的起动》等论文。

2 单向涡流式内消能工

单向涡流式内消能工的结构布置特点是:引水道的来流方向与泄水道出流方向呈一角度并构成切向连接,使水流在惯性力作用下不对称地碰撞泄水道边壁,呈螺旋线旋转下泄,沿程均匀消能,适合于布置在长泄水道工程。布置示意图1。

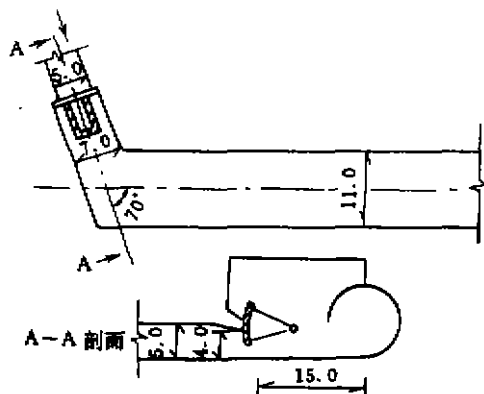


图1 单向涡流式内消能工结构示意图(单位:m)

2.1 单向涡流的流态

当库水位较低时,水流从引水道切向进入泄水道,冲撞泄水道的水流没有足够能量沿周壁到达泄水道顶部,水流沿底部运动,如同明渠水流。当库水位升高,到达某一临界水位时,引水道出流动量的增加,使冲撞泄水道边壁的水流有足够能量沿周壁到达泄水道顶部,并在惯性力作用下继续沿周壁向下,渐渐形成旋转水流,但仍有部分水体翻滚回落底部,在泄水道底部呈水滚状态。随着库水位的进一步升高,沿泄水道边壁旋转的环流水层厚度增加,底部水滚水体逐渐减少,直至全部水体沿边壁旋转,形成具有空腔中心的螺旋流。水流的沿程旋转及水滚有效地消煞了水流的动能,经过一定的距离,水流将不能沿边壁旋转,而成为明流与下游衔接。

单向涡流流态与库水位、泄水道直径及不同工况等有关。如果闸门后通气良好,沿轴向将形成两相流,水气充分掺混,对消能十分有利;如果封闭端墙通气孔,压力增加,自由空腔消失,大小气泡聚集在轴线附近,泄水

道将出现满管流。

2.2 时均压力与脉动压力

消能工内时均压力与脉动压力关系到泄水结构的动静荷载计算及安全,是一项重要参数。由于旋转水流的离心力作用,泄水道边壁压力升高,可避免边壁处负压的出现。随着水流能量沿程消煞,泄水道顶部压力沿程下降,接近螺旋流动末端时,水流旋转的离心力已不能克服重力,水流呈脱壁或准脱壁现象,此时泄水道顶部将出现瞬时负压,因水流流速已减小,即将过渡为明流,负压值一般为 1.96×10^4 Pa 左右^[4],不会对泄水道造成危害。

泄水道内流态随工况不同而变化,因而不同工况时泄水道内时均压力也不同。水流的位置势能、压力势能和动能间遵循着能量转化和守恒定律,从而相同开度的时均压力随库水位的上升而增加;相同水位的时均压力随闸门开度的加大而增大;相同开度、水位情况下,下游淹没出流时的时均压力最大。

涡流的压力脉动来源于流速脉动,脉动压力的变化情况与时均压力基本一致,泄水道首部水流冲击点底部的动压力较大,优势频率较为突出,设计时结构上应考虑加强。泄水道内水流的脉动频率谱属低频性质,脉动荷载沿程衰减^[3,4]。

2.3 水流速度变化及消能率

水流进入泄水道后,经过充分消能,纵环向流速沿程减小,涡流旋转角度(水流流线与泄水道轴线之间的夹角)也将沿程减小。在 $12D$ (泄水道直径 $D = 22$ m) 范围内,流速由 32.7 m/s 降为 12.3 m/s,消能率达 80% 以上^[4]。泄水道内水流动能的消煞程度与流态有关,随工况不同而有变化,一般在 80% 左右^[5](见图2)。

2.4 空腔及掺气

水流高速旋转产生的离心力使泄水道轴向出现负压空腔,空腔一旦与大气相通,即形成强烈的掺气现象。掺气量的大小与空腔负压有关,空腔的形成和大小与泄水道内流态

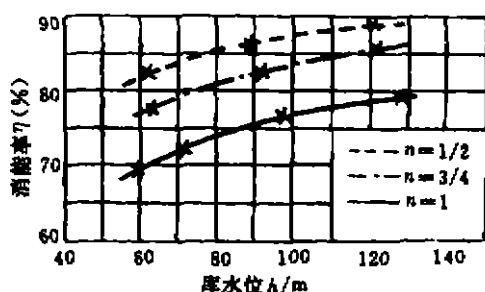


图2 单向涡流式内消能工的消能率曲线
(n 为闸门开度)^[4]

有关,随不同工况而变化,试验中测出充分掺气情况下最大空腔范围达面积的85%,掺气量在轴线附近最大,水气掺混,有利于水流动能的消散^[4]。

2.5 来流方向及流道尺寸对涡流消能的影响

引水道来流方向与泄水道出流方向的夹角 θ (锐角)对涡流消能的许多参数有影响。 θ 越大,进入泄水道的水流环向流速越大,离心力相应增大,消能更充分。但夹角过大,对泄量有一定影响。引水道和泄水道的尺寸也直接影响到消能工内的流态和水力特性,在一定工作水头范围内,来流方向及引、泄水道尺寸间的合理优化设计,能提高消能率。

3 同轴反向涡流式内消能工

同轴反向涡流式内消能工的结构布置特点是:引水道的水流经工作门后分为两股,分别从转向装置进入泄水道,形成里、外相反扭转方向的旋转水流。水流在惯性力作用下沿泄水道周壁旋转,相反旋转的水流沿半径存在很大的流速梯度(比单向涡流时梯度要大),引起水流交界面间强烈剪切,形成漩涡,进而产生下一级次生漩涡,在附加掺气情况下,水流又被人为扰动,加剧了水流动能的消耗,使大量的水流动能转化为热能散逸。同轴反向消能的结构示意图见图3,它适合于布置在短距离内消能的工程。消能工内水流的水力特性与单向涡流消能类似。

3.1 同轴反向涡流的流态

当库水位较低时,水流基本沿泄水道底部运动,如同明渠水流。当库水位升高,进入

泄水道的水流能量增加,内旋转室转向形成半径较小的内螺旋流,外旋转室转向形成沿泄水道周壁螺旋流动的涡流,将内螺旋流包围在内。水体各层面间存在强烈的紊动、剪切和掺混,充分掺气情况下,水流呈现出牛奶状的乳白色不透明水体。随着水流动能沿程消耗,翻滚跌落泄水道底部的水体沿程增多,在底部出现轴向水流,其水深沿程增加,直到螺旋流基本消失,完全成为明流与下游衔接。但当库水位超过某一值时,螺旋流将溢出泄水道进入下游。消能工内流态与库水位、内外旋转室直径和不同工况等有关。

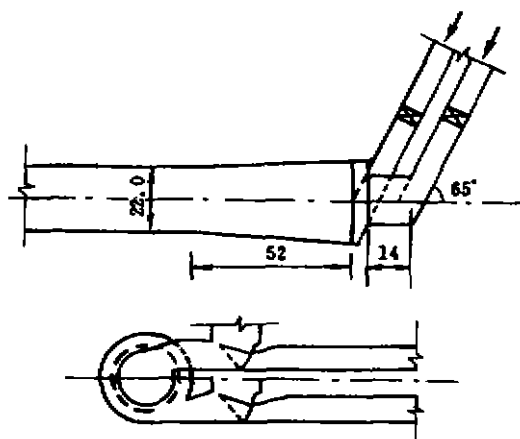


图3 同轴反向涡流式内消能工结构示意图(单位:m)

3.2 时均压力及脉动压力

在水流离心力的作用下,泄水道边壁压力升高,使泄水道各部位时均压力数值不大,脉动压力均方差的数量级也较小。但各部位时均压力分布不均匀,在来流对面的边壁上,因水流连续转向,时均压力较大,结构上应予以加固。

3.3 流速变化及消能率

泄水道内水流各层面间强烈的紊动、剪切,使水流能量短距离内得以消耗,水流流速沿程减小。在泄水道100m范围内,水流流速由40 m/s左右降至12.5 m/s,消能率达80%^[6]。消能率的大小与泄水道内流态有关,随工况不同略有变化,一般在80%以上^[6]。

3.4 水流含气量

同轴反向涡流间的剪切、紊动,使泄水道

内水流的环向流速迅速减小,这部分水体受重力作用很容易翻落到泄水道底部,因而泄水道内水流含气量的分布与单向涡流略有不同,气体一般聚集在泄水道轴线以上部位,水流平均含气量与闸后通气情况有关,库水位的变化对其无明显影响。

3.5 来流的动量矩比对消能的影响

泄水道的进口断面上,内外两股水流对泄水道轴心的动量矩比值称之为来流动量矩比,其大小直接影响消能的效果。试验得出:动量矩比为0.8左右时,内消能工的消能率最大^①。因而对内、外旋转室的尺寸和水流进入泄水道的角度,要恰当选择、合理设计。

4 竖井涡流式内消能工

有些工程在分析地形地质条件的基础上,结合泄流条件,可能认为建造竖井式泄流较为有利。而高水头大流量的运行条件又使无旋竖井消能存在许多技术难题,如果在进流方式上加以改进,使竖井成为涡流式泄水,将能解决上述问题。竖井内消能工一般由明流(或压力流)引水段、涡流室(旋转室和渐变锥形段)、竖井段和出水道组成,结构布置示意图见图4。

4.1 消能机理及竖井内流态

水流由引水段进入涡流室内开始旋转,在竖井段以螺旋流下泄。旋转水流产生的离心力,在竖井井壁上形成法向压力及很大的流速梯度。同时沿竖井中心线形成稳定的气核空腔,避免了气囊聚集而使水流流态失稳,也将产生强烈的掺气现象,加速水流动能的消耗。

水流在竖井内旋转下泄,合成流速与竖井轴心的夹角沿程减小,水流的旋转运动沿程减弱,当竖井足够深时将转变为自由跌落,井壁压力将趋于零甚至负值,因而竖井高度有一定的限制。当竖井深度不够时,水流在进入出水道后将继续旋转,如结构布置上许可,可作为单向涡流进一步消能,否则在反弧段设置折流

器压缩过水断面以改善流态,或在反弧段设水垫池以进一步消煞剩余的水流动能。消能工内流态始终是稳定的,与流量大小无关,水位流量关系曲线基本呈线性变化^[7~9]。

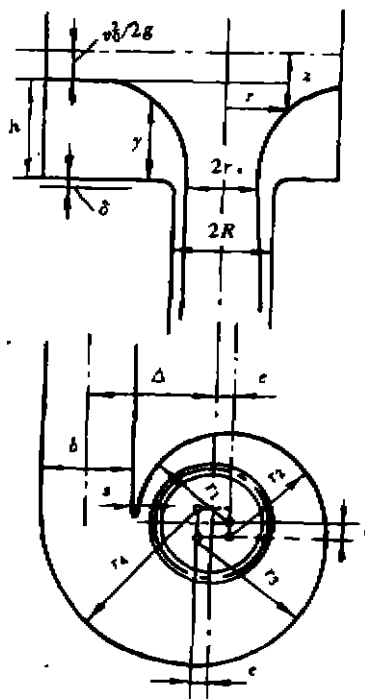


图4 竖井涡流式内消能工结构示意图

4.2 极限流速及时均压力

竖井中的水流在重力作用下呈加速运动,在一定深度以后水流的动能将成为常数,即竖井中形成均匀流,流速达到它的极限值(极限流速),多余的动能均耗损于摩擦损失^[2]。

$$V_n = \sqrt[3]{\frac{8gQ}{\lambda\pi D}} \quad (1)$$

式中 Q 为流量; λ 为水力摩阻系数; D 为竖井直径; g 为重力加速度。

竖井内水流高速旋转,在离心力作用下井壁出现法向正压力和流速梯度,使水流的环向流速沿程减小,井壁压力沿程降低。随着泄量的增大,在离心力作用下将有更多的水体向井壁聚集,井壁压力将随之增大。

①钱莺莺等,同轴反向涡旋内消能工的试验研究(三),南京:南京水利科学研究院,1994

4.3 涡流室尺寸、竖井的泄流能力及消能率

涡流室是竖井涡流消能工的重要组成部分,涡流室的形状和尺寸关系到竖井的泄流能力与消能率,国内外对此研究较多^[1,9,10]。最常用的一种形式是箱式涡流室,其形状和尺寸(图4)为^[1-3]

$$e = (b + s)/7 \quad (2)$$

$$r_1 = \Delta + e - 0.5b - s \quad (3)$$

$$r_2 = r_1 + e \quad (4)$$

$$r_3 = r_2 + 2e \quad (5)$$

$$r_4 = r_3 + 2e \quad (6)$$

式中 b 为引水槽的宽度; $2R$ 为竖井直径; Δ 为竖井轴线与引水槽中心线之间的距离; s 为分流墩的厚度。涡流室的底部为水平,竖井和涡流室连结处的棱角以半径 δ 予以修圆。

竖井的泄流能力可由下式计算:

$$Q = \mu_0 \pi R^2 \sqrt{2g(h + \delta)} \quad (7)$$

其中流量系数 $\mu_0 = 0 \sim 0.6$ ^[2] 或 $\mu_0 = 0.20 \sim 0.54$ ^[5]。前苏联坝高 335 m 的罗贡坝采用涡流消能,泄流量达 1630 m³/s。

水流动能在竖井内沿程消散,消能率一般达到 65% ~ 70%,若设计水垫井加以更充分消能,总消能率可达 85% ~ 90%^[1]。文献[5]进一步研究发现竖井内水垫高度与消能率成反比,消能率与具体的结构形式有关。

5 内消能工的比尺效应及实际应用

对某一水流现象的探索或工程方案的优化确定,一般通过按一定比尺缩小的模型进行试验研究,试验成果是否存在比尺效应,关系到能否将试验成果应用于实际工程。钱莺莺等^①对小湾水电站进行了比尺为 75 与 37.5 两个模型的试验比较,发现两模型中旋转水流的流态相似,临界水头和消能率接近,整个消能过程一致,表明内消能工试验不存在比尺效应。

文献[4,6]结合云南澜沧江 300 m 级高坝的小湾水电站和坝高 132 m 的沙牌水库的泄洪要求,研究了内消能的方式及泄洪消能的可行性,对现有设计体型和尺寸进行模型试验,结果表明,泄量可达 2000 m³/s,高速水流问题可望获得解决。我国今后 10 年拟建和在建 200 m 以上的高坝不下 10 座^[1],妥善解决高速水流带来的诸多问题是这些工程设计和运行中的重要课题。

6 结 语

内消能工使高水头泄水所携带的巨大动能在通过泄水建筑物的行程中予以转换,仅部分动能传至下游,对改善大坝下游水流流态,保护下游环境,保障下游河道稳定等方面均有积极作用。内消能工遭受高速水流作用的区域不大,可采用可靠的结构措施和精细的防护来解决高速水流带来的问题。

对内消能的消能过程和相应机理还须进一步深入研究,对内消能工内水流脉动能量的产生、输移、耗损,以及超高速水流对泄水建筑物局部范围的影响和作何处理等,必须作进一步试验研究和理论上的探讨。高速水流研究中测试仪器和手段也有待改进。

在各单一消能工研究的基础上,可进一步探索综合各类内消能工的优点,布置成混和形式。文献[7]对此作了有益的尝试,利用竖井涡流流态稳定、可表层取水等优点,将水流能量先由竖井涡流消散一部分,在水平段再设置孔板消能。柴恭纯等^②的研究使旋转水流进入突扩式消能工内,利用旋转水流产生的水垫层避免了边壁空蚀发生。

深孔泄水时,水流或多或少带有泥沙,文献[11]对孔板消能情况下含沙量的影响进行了讨论:水流含沙量愈大,消能效果愈好;同时浑水使动水压力增强,与清水相比,水流挟沙对防止水流的空化是有利的。但水流的含

① 钱莺莺等,同轴反向涡旋内消能工的试验研究(三),南京:南京水利科学研究院,1994

② 柴恭纯等,涡旋及涡旋组合式新型内消能工试验研究总报告,南京:南京水利科学研究院,1995

沙量对涡流消能及洞壁的影响等有待进一步研究,在达到消能的情况下,如何尽可能增大泄量,也有不少工作要做。

参考文献

- 1 柴恭纯,高坝施工导流洞改建为永久泄洪洞的探讨.泄水工程与高速水流,1994(3):1~41
- 2 斯里斯基 C M.高水头水工建筑物的水力计算.毛世民,杨立信译.北京:水利电力出版社,1984.225~248
- 3 夏维洪.苏联的转旋水流消能.河海科技进展,1991,11(3):29~40
- 4 马泽章等.单向涡旋内消能工的试验研究.见:泄水工程与高速水流论文集.成都:成都科技大学出版社,1994.77~83
- 5 崔陇天,吕端平.涡流式消能工水力特性初探.见:水动力学研究与进展编辑部.93全国水动力

学研讨会文集.秦皇岛,1993

- 6 钱莺莺等.同轴反向涡旋内消能工的试验研究.见:泄水工程与高速水流论文集.成都:成都科技大学出版社,1994.71~76
- 7 倪汉根,郭琰.旋流式竖井溢洪道的流量系数.见:泄水工程与高速水流论文集.成都:成都科技大学出版社,1994.342~345
- 8 Willi H H. Head-discharge relation for vortex shaft. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111(6)
- 9 Willi H H. Vortex drop inlet for supercritical approaching flow. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(5)
- 10 Michael C Q. Analysis of spiral vortex and slot vortex drop shafts. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(3)
- 11 哈煥文等.泄洪洞两级孔板宣泄含沙水流消能及空化特性的原型试验研究.水利学报,1989(7)

(收稿日期:1996-07-03 编辑:马敏峰)

(上接第19页)

4.3 渡汛

上游460m口门,下游540m口门形象为招标文件确定的1997年渡汛形象,通过对此形象的计算机仿真分析及数学模型计算,考虑工程施工情况,下游左岸戗堤继续进占60~80m,与原工况水流条件差别很小。最终上游口门宽460m,下游口门宽480m。按照设计 $72300\text{m}^3/\text{s}$ 渡汛计算,则能冲走60cm以下的石渣或砂卵石,而垫底的石渣料一般小于60cm,砂卵石最大粒径小于15cm,护底块石为30~50cm,可见如果来大流量,垫底砂砾石将被冲刷。考虑砂砾石料粒径较小易冲刷,用大块石保护又影响以后防渗墙的施工,砂砾石汛前最好少抛。由于导流明渠5月分流,导流明渠提前通航,汛后10月1日主河床施工可以不考虑通航的要求,汛后抛填砂粒石是满足通航和施工要求的。

4.4 大江截流水力学指标

我们根据1996年水下地形图和水上航测图,建立了三峡工程大江截流的数学模型,

只要输入流量,上下游口门宽度即刻计算出流场的信息,现场指导截流施工。长江水利委员会所作的招标之前截流模型试验建立在1979年的地形基础上,模型上反映的截流水力参数偏小。

5 结 语

我们以数学模型为核心,建立了长江三峡大江截流决策支持系统,在已知流量和上下游口门宽度的情况下,可迅速模拟出流场信息,提供决策,同时也为截流和围堰设计及施工提供了一种新的决策方法。为进一步开展工作,特提出如下建议:①在已建立的大江截流和二期围堰三维地理模型上进一步开展工作,一方面不断根据工地实际情况,进行修改跟踪,另一方面不断完善系统本身,充实资料(如增加地质构造),继续进行围堰防渗墙、高喷墙的三维模拟;②在此基础上,全面完成三峡工程施工技术决策支持系统,对各个子项目进行可以度量的三维施工仿真。

(收稿日期:1997-06-18 编辑:熊水斌)