

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2008.05.014

消能井内消能工直径优化试验

张宗孝¹,郭雷²,谭立新¹

(1. 西安理工大学水利水电学院,陕西 西安 710048 ;2. 上海勘测设计研究院,上海 200434)

摘要 :从消能井体型优化出发,对竖井溢洪道消能井直径发生系列变化时的井内水流特性进行系统的试验研究,分析消能井直径变化对消能井内各水力参数的影响。结果表明 : $D/D_0 = 1.4$ 时消能井内水垫深度接近最大,水垫消能效果较好 ;随着消能井直径的增加,底板上时均压强有所减小,轴线分布更趋均匀 ; $D/D_0 > 1.4$ 后,随着消能井直径的增加,压强不均匀系数基本不再变化,底板上的时均压强分布稳定 ; $D/D_0 > 1.4$ 以后,随着消能井直径的增加,脉动强度减小的程度减缓,消能率增加的趋势亦变缓。据此提出该竖井消能井内消能工的合理直径应为 $D = 1.40D_0$ 。

关键词 内消能工 消能井 水力参数 消能井直径 优化设计

中图分类号 :TV653 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)05-0054-04

Experimental study on optimal well diameter of a stilling well//ZHANG Zong-xiao¹, GUO Lei², TAN Li-xin¹ (1. College of Water Resources and Hydraulic Power, Xi 'an University of Technology, Xi 'an 710048, China ;2. Shanghai Investigation, Design and Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract :Systemic experiments have been performed to study the characteristics of flow in a stilling well of a shaft spillway. The effects of the diameter of the stilling well on the hydraulic parameters of flow are analyzed. The following conclusions have been made :when D/D_0 equals 1.4, the depth of the water cushion nears its maximum and the effect of energy dissipation is strong ; when D/D_0 grows, the time-averaged pressure on the bottom decreases and becomes more evenly distributed along the axis ; and when D/D_0 exceeds 1.4, the uniformity coefficient of pressure remains unchanged and the decrease of the pulse intensity and increase of the energy dissipation rate slow as the diameter grows. It is suggested that the optimal diameter of the stilling well lead to a D/D_0 of 1.4.

Key words :inner energy dissipater ;stilling well ;hydraulic parameters ;diameter of the stilling well ;optimization design

随着我国西部大开发战略的实施,西部建设高坝、开发能源的步伐大幅度加快,大型水电站建设方兴未艾,坝高、流量大、河谷狭窄是开发我国西部水能资源所面临的普遍问题。而传统的挑流消能方案又常常会带来雾化、空蚀破坏、岸坡冲刷等较难克服的问题,高坝工程往往需要修建若干条大尺寸的导流隧洞,然而导流洞投资巨大,却属于临时性建筑,于是导流洞的永久利用问题成为越来越多的专家学者关注、研究的热点,泄洪洞内消能工的研究有着重要的学术理论意义和实际应用价值,并能产生一定的经济价值。

近 20 多年来,内消能工在各国均进行了大量的试验及理论研究。归纳起来主要有三大类型^[1] :孔板(洞塞式)、消能井和旋流式内消能工。这几种形式的内消能工均已在实际工程中得到了应用,且各

有利弊。由于消能井内消能工在大中型工程中的应用还不够广泛,前人对消能井的设计和研究并不是很深入。在消能井内,水流的紊动程度很高^[2],底板受到下泄高速水流的冲击作用,其结构安全性需要加以考虑。如果消能井尺寸足够大,水流的冲击压强则不会影响其结构安全,消能效果也较优,但从优化工程量的角度考虑,消能井的尺寸不宜过大。因此,关于消能井的合理尺寸问题尚待进一步探讨。

本文结合水工模型试验,通过改变消能井的直径,研究消能井直径发生系列变化时消能井内各水力参数的变化情况,以探讨合理的消能井直径设计方案。

1 模型设计与量测

笔者所研究的竖井溢洪道进水口为环形堰进水

作者简介 张宗孝(1964—),男,陕西宝鸡人,高级工程师,硕士,从事水力学与河流动力学研究。E-mail :zhangzx1126@xaut.edu.cn

口,为了确保试验成果的推广应用,模型各部分尺寸变化均以竖井直径 D_0 为参数设计。进水口半径 $R = 1.15D_0$,竖井深度约为 $18.35D_0$,下接深度 $H_0 = 1.69D_0$ 的消能井,消能井上部通过 1:6 的压坡段与导流洞衔接,压坡段出口高度 $h_0 = 0.62D_0$ 。

试验模型按重力相似准则设计,几何比尺 $\lambda_L = 45$,模型用透明有机玻璃制作。为了研究消能井直径变化时井内的水流变化特性,本次选取了 3 种直径方案,即 $D/D_0 = 1.00, 1.40, 1.70$ 进行对比试验研究。

消能井布置及尺寸设计如图 1 所示。

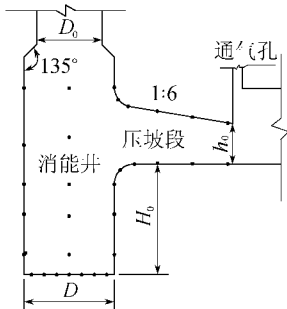


图 1 消能井尺寸设计示意图

试验中脉动压强采用北京中国水利水电科学研究院水力学所研制的 DJ800 多功能监测系统进行量测,时均压强采用常规测压管量测,水面采用直尺量测。试验分别在消能井底板上沿导流洞轴线方向 (x 向)及垂直于轴线方向 (y 向)布置压强测点,由于水流关于洞轴线方向近似对称,而沿洞轴线方向上水流特性变化较大,故在底板上沿 x 向布置了一定数量的脉动压强测点以研究其压强脉动特性。

2 消能井直径对井内水流流态的影响

2.1 基本流态^[3]

进入竖井的水气混合物在下跌过程中做加速运动,跌进消能井后从井底反射,再沿井壁回升,在消能井中壅水形成深水垫。沿竖井下泄的高速水流以环状水跃的方式过渡到水垫区,井中水流掺气充分。由竖井进水口下泄的水流流速高,发生自掺气,使得竖井下部水流的掺气量较高,水流呈乳白色泡沫状流态,而在消能井水垫底部,掺气量有所降低。井底白色泡沫的运动轨迹清晰显示出消能井内存在大尺度的旋涡运动。

2.2 消能井直径变化对井内流态的影响

由于消能井内形成水垫,沿竖井下泄的高速水流在流至竖井底部时以环状水跃的方式过渡到消能井内。定义消能井内水垫深度 h_c 为环状水跃跃首到消能井底板的距离。

图 2 反映了消能井 D/D_0 的变化对消能井内水

垫深度的影响情况。在堰上水头与进水口半径之比 H/R 较低时,消能井直径的变化对水垫深度的影响并不显著 随 H/R 的升高, D/D_0 对消能井内水垫深度影响的程度有所增加。在试验的 3 种消能井直径的工况下,控制同一堰上水头 H (即同一 H/R),消能井内水垫深度随消能井直径的增大呈先增大、后减小的变化趋势。

可以看出,在图 2 中变化关系曲线上有明显的极值点存在,不同水头水垫深度最大值均出现在 $D/D_0 = 1.4$ 附近。从水垫消能的角度来考虑,水垫深度越深则消能效果越好,因此可认为 $D/D_0 = 1.4$ 较为理想。

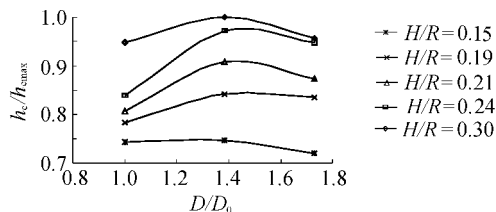


图 2 消能井内水垫深度随直径的变化

图 3 给出了不同消能井直径时消能井中的水面波动值随作用水头的变化情况。

可以看出,同一 D/D_0 时,随着堰上水头的升高,消能井内的水面波动呈增大的趋势,并且在 $H/R > 0.23$ 以后水面波动随水头增加的程度有所减小。

在同一 H/R 下,比较不同 D/D_0 下的水面波动。由于直径增加时消能井的容积增加,井内水垫表面积增大,因此下泄水流的冲击作用及水流紊动程度相对有所降低,井内水面波动值随之减小。

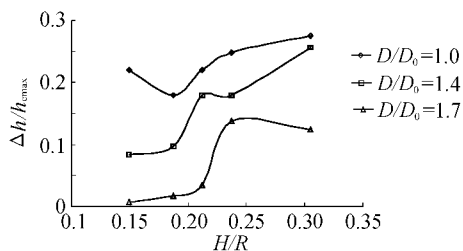


图 3 消能井直径的变化对井内水面波动的影响

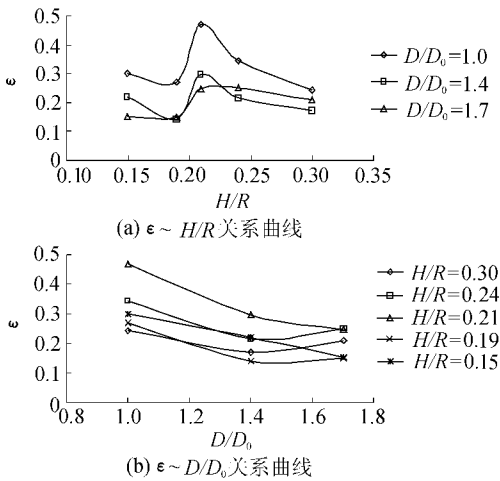
3 消能井直径对底板压强的影响

3.1 对底板时均压强的影响

随着消能井直径的增加,底板上的时均压强有所减小,轴线分布更加趋于均匀。这是由于随着消能井直径的增大,消能井的容积增大,对底板的冲击作用减小,因而使得消能井底板上的压强减小;同时,由于井内水流紊动程度减小,水面波动减小,水流更加平稳,底板压强分布更趋均匀。

3.2 底板上时均压强分布的不均匀程度

定义压强分布不均匀系数 $\epsilon = \Delta p / \bar{p}$, 其中 $\bar{p}$ 为底板上各测点时均压强的平均值, Δp 为底板上的最大压强波动值, 图 4 给出了实测不同消能井 D/D_0 时 ϵ 的变化规律。



由图 4(a)可以看出: 在 $H/R = 0.21$ 附近, 底板上 ϵ 达到最大值, 之后随着 H/R 升高, ϵ 有所减小; $D/D_0 = 1.4$ 与 $D/D_0 = 1.7$ 时 2 条曲线非常接近, 可见当 $D/D_0 > 1.4$ 以后, 消能井直径的变化对底板上时均压强不均匀程度影响甚微。

由图 4(b)可知, 随着消能井直径的增大, 底板上 ϵ 值呈逐渐递减的趋势, 并且在 $D/D_0 > 1.4$ 以后, 这种递减的程度明显减缓, 可以看出关系曲线稍有回升的趋势, 随着消能井直径的进一步增大, 底板上压强不均匀系数的变化并不明显, 底板上的时均压强分布将趋于稳定。

由以上对底板上压强不均匀系数分析结果可认为, 消能井 $D/D_0 = 1.4$ 较为理想。

3.3 消能井直径对底板上压强脉动强度的影响

脉动压强均方差 σ 是脉动压强分析过程中的一个重要参数, 是表征脉动压强振幅的基本参数。定义脉动强度为压强脉动均方根与最大时均压强之比 $\sigma/p_{\max}$ 。

由实测脉动强度结果可知, 在同一消能井直径时, 消能井底板压强的脉动强度随 H/R 的升高呈增大的趋势。不同消能井直径下, 随着直径增加, 底板上压强的脉动强度减小并趋于平稳。脉动强度随 H/R 变化的幅度有所降低, 即消能井直径较大时不同堰上水头下底板的脉动强度值比较接近。

随着消能井直径的增大, 底板上的脉动强度减小, 其原因主要是由于消能井直径增大时水流对底板的冲击作用减小, 井内水面的紊动程度降低, 水面波动减小, 底板上的冲击压强较小所致。

消能井底板中心是竖井轴线与洞轴线的交点, 其上压强脉动可以反映消能井底板上的压强脉动特性, 该点压强脉动自功率谱表明, 随着消能井直径的增加, 主频逐渐突出, 说明当直径较大时靠近消能井底板的旋涡尺度有所增大, 井内水流特性趋于均匀。

图 5 给出了消能井直径变化时底板中心脉动强度的变化规律。图 5(a) 表明, 在消能井直径较小的情况下, 底板中心脉动强度随 H/R 变化的幅度相对较大, 随着消能井直径的增加, 脉动强度变化的幅度有所降低。图 5(b) 反映出在同一 H/R 时脉动强度随消能井直径的增加呈减小的趋势, 在 $D/D_0 > 1.4$ 以后, 曲线斜率明显变小并趋向于零, 脉动强度随直径减小的程度减缓。可以预见, 随着消能井直径的进一步增大, 底板中心的脉动强度值不再变化。因此, 从底板上压强脉动情况来讲, 消能井直径宜 $D/D_0 \geq 1.4$ 。

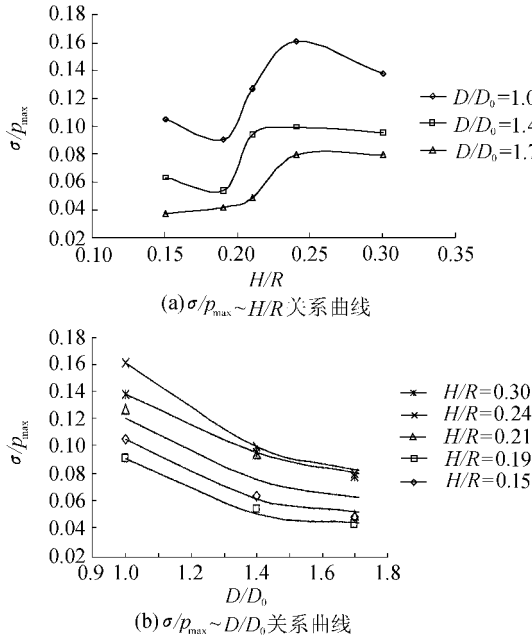


图 5 消能井直径变化对底板中心脉动强度的影响

4 消能井直径对系统消能率的影响

消能井消能率往往是工程上比较关心的问题^[4]。根据研究系统消能率可用下式进行估算:

$$\eta = 1 - \frac{(h' + \frac{q^2}{2gh^2})}{H' + h'} \quad (1)$$

式中: η 为系统消能率; h' 为参考断面处平均水深; H' 为上游水位与参考断面处的水位差; q 为隧洞中单宽流量。

根据试验实测资料, 按照式(1)对系统消能率进行估算, 在各种消能井直径的情况下, 计算结果见图 6。由图 6 可见这种内消能结构系统消能率在 83% ~ 92% 之间, 消能率很高, 完全可以满足工程中

的消能要求。

由图 6 可以看出,系统消能率随 H/R 的升高有减小的趋势;在 H/R 较小时系统消能率随消能井直径的增加基本不变; H/R 较大时消能率随消能井直径的增加而增大,但在 $D/D_0 = 1.40$ 前后关系曲线的斜率是不同的,当 $D/D_0 > 1.40$ 以后,随着消能井直径的增加,消能率变化的趋势并不明显。

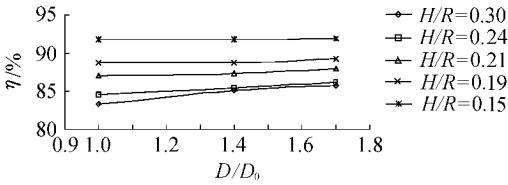


图 6 消能井直径变化对系统消能率的影响

5 结 语

对竖井溢洪道消能井直径发生系列变化时各水力参数的变化情况进行研究,通过分析消能井内水流流态、消能井底板时均压强分布、底板上压强脉动强度、压强分布的不均匀程度以及系统消能率等水力参数的变化情况,得出如下主要结论: $D/D_0 = 1.4$

时消能井内水垫深度接近最大,水垫消能效果较好;随着消能井直径的增加,底板上的时均压强有所减小,轴线分布更趋于均匀;在 $D/D_0 > 1.4$ 以后,随着消能井直径的增加,压强不均匀系数基本不再变化,底板上的时均压强分布稳定; $D/D_0 > 1.4$ 以后,随着消能井直径的增加,脉动强度减小的程度减缓,消能率增加的趋势亦变缓。笔者认为该竖井消能井内消能工合理直径应为 $D = 1.40 D_0$ 。

参考文献：

[1] 董兴林,郭军,杨开林,等.高水头大流量泄洪洞内消能工研究进展[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(3):185-189.
[2] 赵灿华,孙双科,刘之平.漩流式竖井消力井井深优化研究[J].水力发电,2001(5):30-33.
[3] 郭雷,张宗孝,马斌,等.竖井溢洪道水力特性试验研究[J].人民长江,2007(6):110-112.
[4] 廖常德,周力.具有消能井的竖井溢洪道及其消能率计算[J].西北水电,1996(3):45-51.

(收稿日期:2007-11-02 编辑:高建群)

(上接第 38 页)

的概率为 0.027。以上结果说明烤烟叶片细胞液质量分数的变化受蒸腾速率和光合速率的影响较大。此外,烤烟叶片细胞液质量分数与光合速率的相关系数略大于与蒸腾速率的相关系数,说明在水氮耦合条件下烤烟叶片的细胞液质量分数反映了烟株体内的水分状况,对烤烟光合作用的影响大于对蒸腾速率的影响。

3 小 结

烤烟叶片细胞液质量分数在不同水氮耦合条件下与烟株体内的水分状况有着显著的关系。施氮量的增加对烤烟叶片蒸腾作用和光合作用的促进作用远大于对烤烟吸收水分的促进作用,在一定程度上提高了烤烟叶片细胞液质量分数。旺长期烤烟叶片细胞液质量分数随施氮量增加而增加,总施氮量超过 67.5 kg/hm^2 时烤烟叶片细胞液质量分数减小。旺长期烤烟叶片细胞液质量分数与 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 及 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层土壤含水率呈现负相关关系,与蒸腾速率、光合速率的负相关性达到显著水平。旺长期烤烟叶片细胞液质量分数日变化最大值在 $10:00 \sim 14:00$ 之间出现,且随施氮量的增加最大值出现时间延后。

参考文献：

[1] 蒋春月.农作物节水增效种植制度研究[J].水利经济,2007,25(3):42-43.
[2] 阿吉·艾克拜尔,邵孝侯,钟华,等.调亏灌溉及其对烟草生长发育的影响研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):171-174.
[3] 高华军,汪耀富,邵孝侯.烤烟节水灌溉的研究进展[J].节水灌溉,2005(5):33-35.
[4] 钟华,邵孝侯,阿吉·艾克拜尔,等.我国烟草节水优化灌溉和水肥耦合技术综述[J].水利水电科技进展,2005,25(3):68-70.
[5] 王海艺,韩烈保,黄明勇.干旱条件下水肥耦合作用机理和效应[J].中国农学通报,2006,22(6):124-128.
[6] 汪耀富,张福锁.干旱和氮用量对烤烟干物质和矿质养分积累的影响[J].中国烟草学报,2003,9(1):19-23.
[7] 王军,王益奎,李鸿莉,等.水分胁迫对烟草生长发育的影响研究进展[J].广西农业科学,2004,35(6):440-442.
[8] MAW B W, STANSELL J R, MULLINIX B G. The most detrimental time for flue-cured tobacco to experience soil-water stress [J]. Tobacco Science, 1998,42(4):89-96.
[9] 汪耀富,高华军,邵孝侯.蒸渗仪控制下烤烟土壤水分的时空动态研究[J].水土保持学报,2005,19(3):152-155.

(收稿日期:2008-04-24 编辑:高建群)