

高水头输水管道卧式消能井结构试验研究

宋 阳^{1*}, 陈永明¹, 刘冬梅¹, 吉庆丰², 陈珠亮², 窦 硕², 高铭含¹, 赵尉邦¹, 张晓辉¹

¹吉林省水利科学研究院, 吉林 长春

²扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2025年6月12日; 录用日期: 2025年7月3日; 发布日期: 2025年8月26日

摘 要

为了满足高水头、小流量、垂向开挖施工困难的管道输水工程消能需要, 提出在纵向上布置消能工的槛式、柱式和孔板式三种卧式消能井, 通过模型试验, 对卧式消能井结构型式进行比选, 并对选定消能井的消能影响因素开展研究。结果表明: 卧式孔板消能井结构简单, 井身高度小, 消能效果好。孔径是影响孔板消能井消能效果的主要因素, 流量一定时, 孔径越小, 孔速越大, 消能率越高, 孔速为6.00 m/s~7.00 m/s时, 消能率达到67.71%~74.17%。开孔总面积一定时, 孔数对孔板消能井的消能效果基本没有影响, 可将孔板灵活设计成单孔或多孔形式。

关键词

卧式消能井, 孔板, 孔径, 孔数, 消能率

Experimental Study on Structure of Horizontal Stilling Well for High Head Water Conveyance Pipeline

Yang Song^{1*}, Yongming Chen¹, Dongmei Liu¹, Qingfeng Ji², Zhuliang Chen², Shuo Dou², Minghan Gao¹, Weibang Zhao¹, Xiaohui Zhang¹

¹Jilin Provincial Institute of Water Resources Science, Changchun Jilin

²College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: Jun. 12th, 2025; accepted: Jul. 3rd, 2025; published: Aug. 26th, 2025

Abstract

In order to meet the needs of energy dissipation in water conveyance pipeline projects with high head,

作者简介: 宋阳(1984-), 男, 吉林长春人, 高级工程师, 学士, 水利工程, Email: 623425624@qq.com

*第一作者。

文章引用: 宋阳, 陈永明, 刘冬梅, 吉庆丰, 陈珠亮, 窦硕, 高铭含, 赵尉邦, 张晓辉. 高水头输水管道卧式消能井结构试验研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(4): 441-450. DOI: 10.12677/jwrr.2025.144048

small flow and difficult vertical excavation construction, three horizontal stilling wells with sill, column and orifice plate are proposed. Through model tests, the structural types of horizontal stilling wells are compared and selected, and the influencing factors of energy dissipation are studied. The results show that the orifice plate stilling well has simple structure, small well height and good energy dissipation effect. The aperture is the main factor affecting the energy dissipation effect of the orifice plate stilling well. When the flow rate is constant, the smaller the aperture, the larger the orifice flow velocity and the higher the energy dissipation ratio. When the orifice flow velocity is 6.00 m/s~7.00 m/s, the energy dissipation ratio reaches 67.71%~74.17%. When the total area of opening holes is constant, the number of orifices has no affect on the energy dissipation effect of the orifice plate stilling well, and the orifice plate can be flexibly designed into single hole or multiple holes form.

Keywords

Horizontal Stilling Well, Orifice Plate, Aperture, Number of Orifices, Energy Dissipation Ratio

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长距离输水管道工程,因地形地貌或其他条件限制,取水点与用水点高差很大,采用重力流方式输水,管道内往往会有大量余能,极易对管道本身和出口建筑物造成严重危害,需采取工程措施消除这部分余能。消能井作为一种经济、有效的消能方式,不仅被广泛应用于水电工程[1][2],在有压输水管道工程中也常常被采用。赵经华等[3]对阿拉山口输水管道进行试验研究,确定了消能井结构尺寸。衡海龙等[4]对消能井消能效率和井底压强分布进行了试验研究,发现消能井大部分能量还是消耗在闸板阀处,消能井的消能效率不高。Rajaratnam[5]通过物理模型试验证明,消能井在管道输水工程具有较好的消能效率。Lipin[6]提出了消能井解析方法,并表明消能井在管道工程中消能效果较好。邵国瀛等[7]对文献[4]的消能井结构形式进行改进,提出了多孔喷头式改进型消能井,消能效率显著提高。金瑾等[8]通过试验研究,对改进型深筒式消能井消能效果和影响因素进行了分析。芦绮玲等[9]通过试验研究得出交错梅花状排布的喷孔形式能够优化消能井的消能效果。通过研究发现目前用于有压输水管道工程的消能井还存在如下一些问题:一是基本为深筒式,井高通常在6~10 m,对因地质条件或冬季冻土施工限制等挖深非常困难的工程,深筒式消能井不太适合;二是对于高水头、小流量(0.05~0.5 m³/s)来流,因水流的势能大、动能小,消能井的消能效率普遍较低;三是消能井消能率和水头损失等研究结论,多只是针对具体工程的成果,缺少一般性,其他工程设计参考不方便。为弥补上述不足,本文提出一种在纵向上布置消能工的卧式消能井,通过模型试验,对卧式消能井的结构型式进行比选,并对选定的消能井消能影响因素开展研究,探究卧式消能井消能的一般性规律,为有压管道输水工程消能井的设计提供参考。

2. 试验模型及内容

本文在已完成的长白山池西区引水工程消能井模型试验的基础上,进一步开展消能井结构型式和一般性消能规律试验研究。设计的消能井为卧式,长7.50 m、宽1.54 m、高3.80 m,进出管道管径 D 均为400 mm,管轴线位置与原模型试验相同,偏向消能井左侧。消能井由封闭段和开敞段组成,为半封闭形式。

选用模型比尺 $\lambda_L = 10$,试验装置如图1所示。升降水箱能够上下移动,最大升高幅度达1 m。以模型消能井底为高程零点,进水管轴线高程为0.165 m,出水管轴线高程为0.115 m,水箱溢流板顶高程为1.485~2.485 m。

消能井进出水管道测压管水头用测压管测得，通过管道的流量用电磁流量计测得。对试验装置的总体测量精度进行了试验。消能井内不安装任何消能工，消能井成为上部开敞的长方体水箱，在流量为 $1000\sim 30,000\text{ m}^3/\text{d}$ 范围内，测得消能井的水头损失，见图 2。与理论值比较，误差在 $\pm 0.04\text{ m}$ 以内，试验装置有较高的总体测量精度。

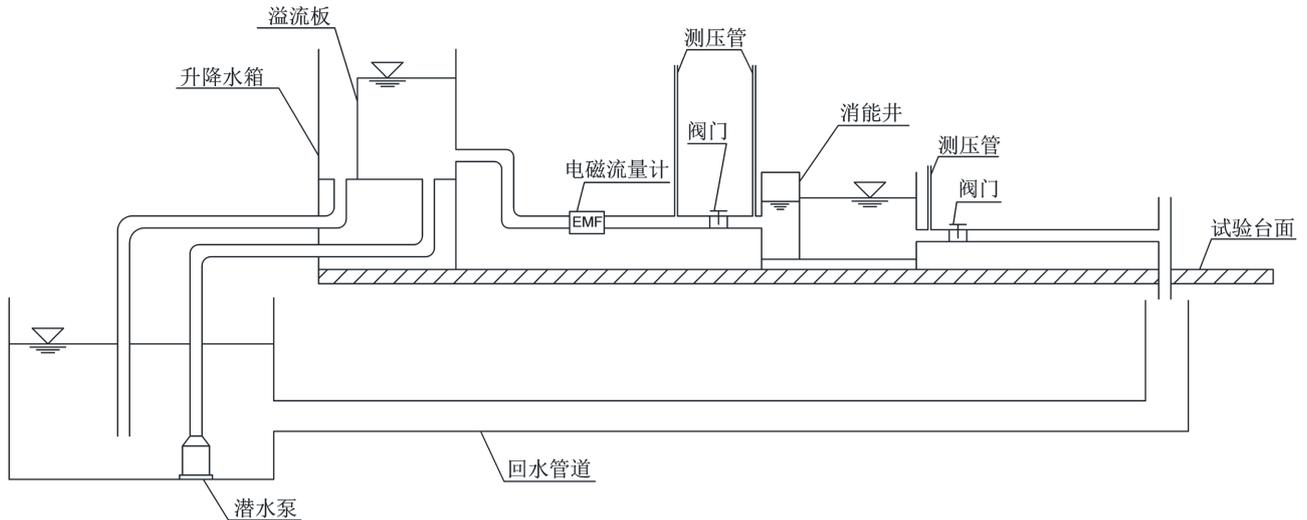


图 1. 试验装置示意图

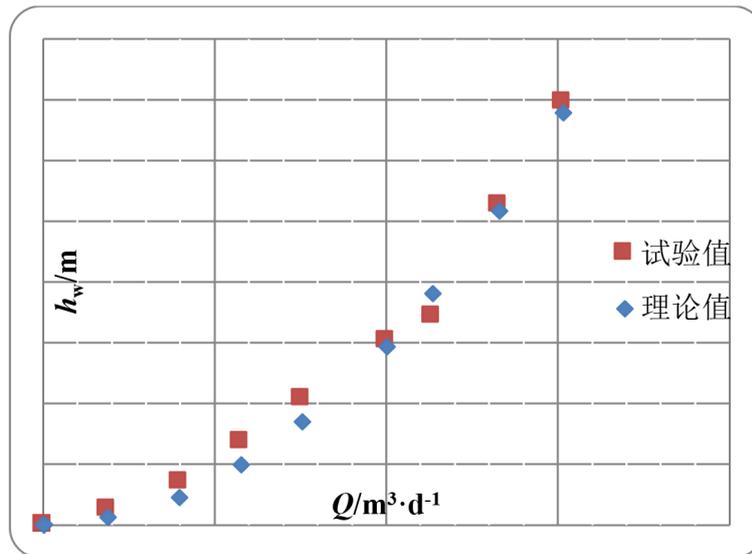


图 2. 装置验证试验时不同流量下消能井的消耗水头试验值和理论值

3. 消能井结构型式比选

设计槛式、柱式和孔板式三种结构型式消能井，分别开展试验研究。槛式消能井结构示意图见图 3，封闭段水平长度 200 cm ，封闭段与开敞段之间隔墙的底部留有高 40 cm 的缝隙，在封闭段内设置一个顶宽 32 cm 、底宽 158 cm 、高 130 cm 的等腰梯形槛，梯形槛与消能井同宽。柱式消能井结构示意图见图 4，在封闭段内设置 5 排共 18 根交错排列的边长 25 cm 的方柱，柱高与井高一一致，消能井的其他尺寸与槛式消能井相同。一级孔板消能井结构示意图见图 5，封闭段长度 100 cm ，孔板即为封闭段与开敞段间的隔墙，孔板上开设一个圆孔，孔径

200 mm, 孔心位于孔板中轴线上, 距离井底 70 cm, 根据消能需要, 沿消能井长度方向, 可设置多块串联孔板, 形成多级孔板消能井, 以进一步提高消能率。消能井结构示意图中标注长度的单位均为 cm。

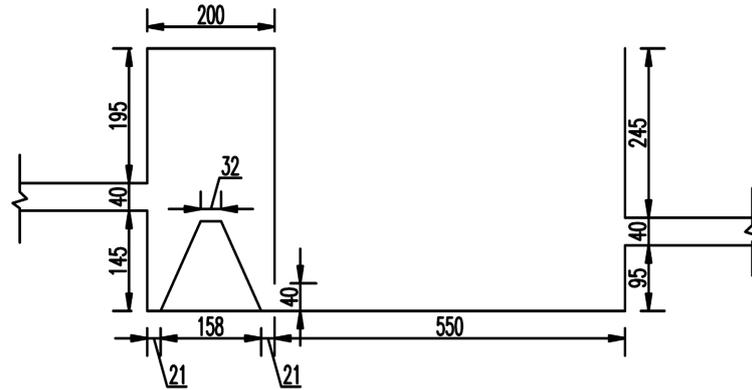


图 3. 槛式消能井结构示意图

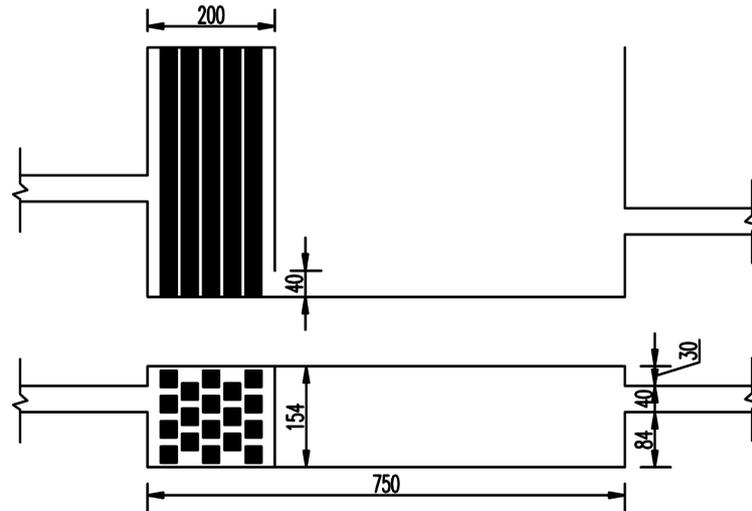


图 4. 柱式消能井结构示意图

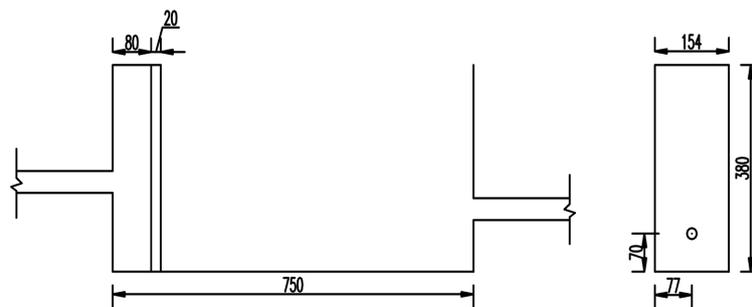


图 5. 一级孔板消能井结构示意图

在消能井开敞段水深保持在 2.80 m 的条件下, 对上述三种结构型式消能井, 进行不同流量的试验, 流量范围为 5000~30,000 m³/d, 测得消能井进出口管道测压管水头, 计算得到消能井的水头损失和消能率。水头损失用公式(1)计算, 消能率用公式(2)计算[10]。

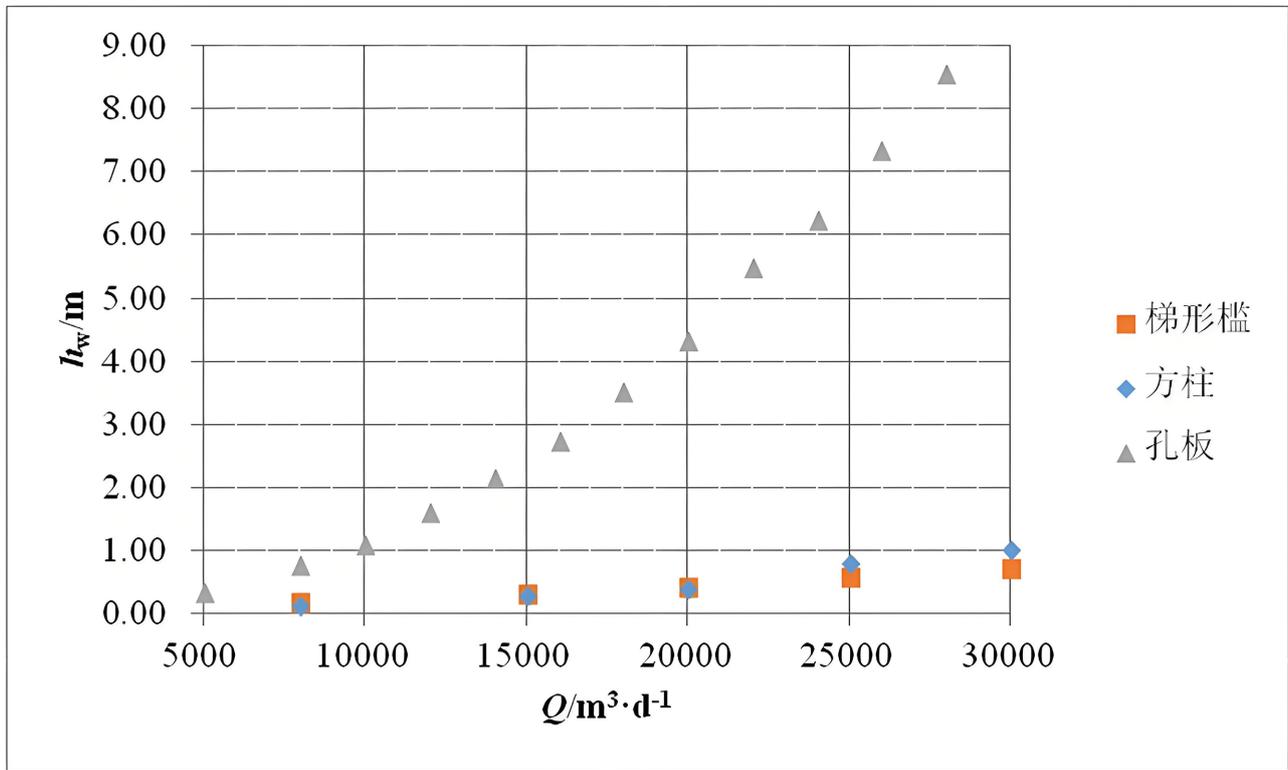


图 6. 三种结构型式消能井的水头损失与流量关系

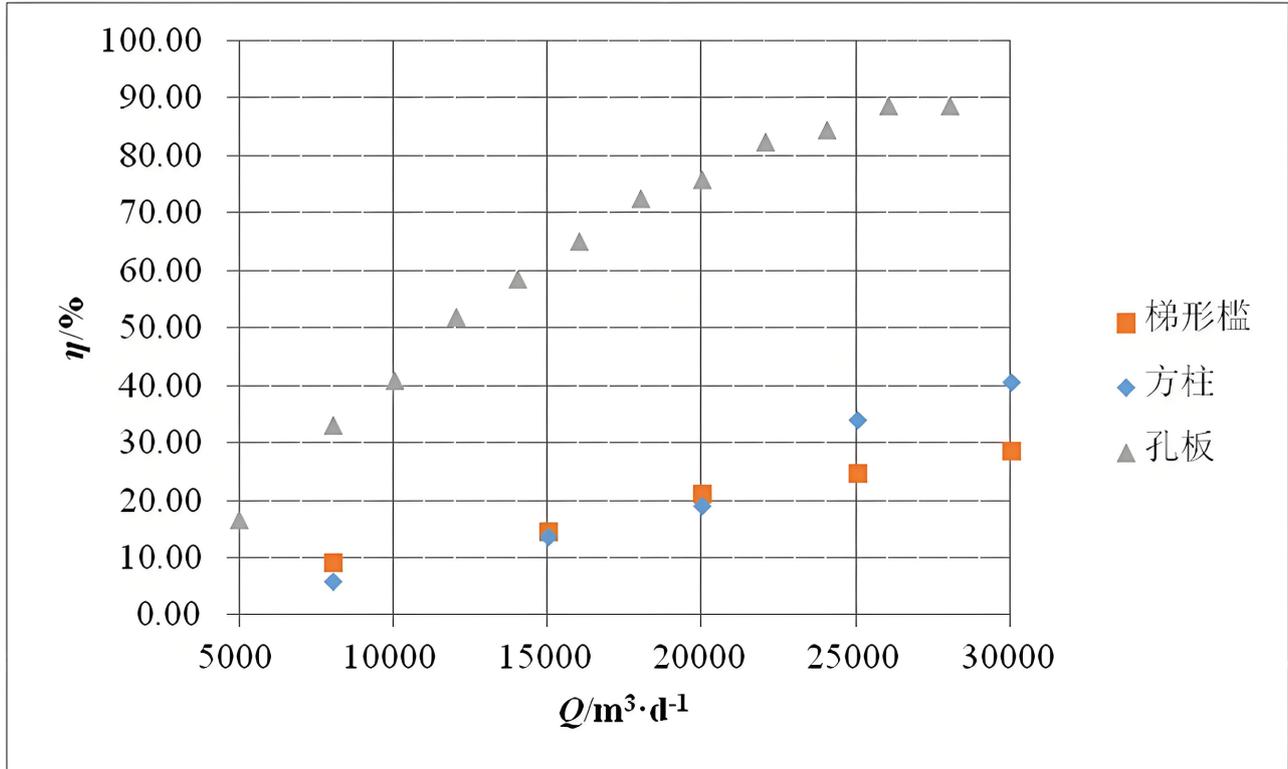


图 7. 三种结构型式消能井的消能率与流量关系

$$h_w = E_1 - E_2 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (1)$$

式中, E_1 、 z_1 、 p_1 、 v_1 分别为消能井进口附近进水管断面总水头、管道中心点位置高程和压强、断面平均流速, E_2 、 z_2 、 p_2 、 v_2 分别为消能井出口附近出水管断面总水头、管道中心点位置高程和压强、断面平均流速。

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (2)$$

根据试验得到的结果, 分别绘制三种结构型式消能井的水头损失与流量变化关系和消能率与流量变化关系, 如图 6、图 7 所示。从图中看出, 三种结构型式消能井的水头损失和消能率均随流量增大而增大, 孔板消能井的水头损失和消能率显著高于其他两种。流量为 8000 m³/d 时, 孔板消能井的水头损失和消能率分别为 0.75 m、33.38%, 槛式消能井的水头损失和消能率分别为 0.17 m、9.47%, 柱式消能井的水头损失和消能率分别为 0.11 m、6.18%; 流量为 20,000 m³/d 时, 孔板消能井的水头损失和消能率分别为 4.32 m、75.94%, 槛式消能井的水头损失和消能率分别为 0.42 m、21.48%, 柱式消能井的水头损失和消能率分别为 0.38 m、19.25%。

从高水头、小流量来流的消能效果看, 三种结构型式消能井中, 孔板消能井最好。

4. 孔径对孔板消能井消能效果的影响分析

重点研究了孔板消能井, 在不同流量、不同开敞段水深条件下, 孔径、孔数、平板和弧形板板形、由多块孔板串联组成多级孔板的级数等对消能井消能效果的影响。通过试验研究, 在多孔情况下弧形板的消能效果要略好于平板; 同一流量下, 孔板级数越多, 消能井的消耗水头越大, 消能率越高, 级数对消能井的消能效果影响显著。但由于弧形板制作安装较复杂, 实际工程中采用平板更方便。本文仅针对平板研究孔径和孔数的影响。

本文在不同流量条件下, 进行孔径对消能井消能效果的影响研究。针对平板单孔一级孔板消能井, 设计孔径 d 为 100 mm、135 mm、150 mm、200 mm、250 mm、300 mm、345 mm, 共 7 种工况, 开展孔径消能效果影响的系列试验。试验流量范围为 1000~30,000 m³/d, 消能井开敞段水深保持在 2.80 m 不变。

根据试验结果, 分别绘制不同孔径孔板消能井的水头损失与流量变化关系图(图 8)、不同孔径孔板消能井的消能率与流量变化关系图(图 9)和不同孔径孔板消能井的消能率与孔速变化关系图(图 10)。

从图 8 和图 9 看出, 孔径一定时, 流量越大, 水头损失越大, 消能率越高; 流量一定时, 孔径越小, 水头损失越大, 消能率越高。流量为 8000 m³/d 时, 孔径分别为 100 mm、135 mm、150 mm、200 mm、250 mm、345 mm 时, 水头损失分别为 11.46 m、3.89 m、2.44 m、0.75 m、0.42 m、0.19 m, 消能率分别为 90.38%、73.31%、58.70%、33.38%、20.72%、10.59%; 流量为 20,000 m³/d 时, 孔径分别为 150 mm、200 mm、250 mm、300 mm、345 mm 时, 水头损失分别为 12.01 m、4.32 m、2.22 m、1.24 m、0.83 m, 消能率分别为 95.20%、75.94%、58.16%、43.27%、32.97%。

从图 10 看到, 孔板消能井的孔速 v_0 与消能率存在很好的相关关系, 相关系数达到 0.9505。孔速越大, 消能率越高。孔速为 6.00~7.00 m/s 时, 消能率为 67.71%~74.17%。实际应用中, 孔速也不宜过大, 孔速过大会产生较严重的气蚀和震动问题, 建议将孔速控制在 6.50 m/s 左右。

在流量一定时, 孔速由孔径决定, 孔径是设计孔板消能井的关键。为了方便试验成果应用, 将一级平板单孔孔板消能井在不同流量、不同孔径条件下的试验结果, 用消能率与孔径关系图的形式表示, 供孔板消能井设计参考。关系图见图 11, 图中横坐标是消能井孔板开孔孔径 d 与进水管管径 D 的比值, 曲线为相应流量试验结果的数据拟合线。孔板消能井设计时, 先根据工程消能需要选定一个消能率, 再根据已知的设计流量查图 11, 得到 d/D 值, 最后由进水管管径确定单孔孔径。

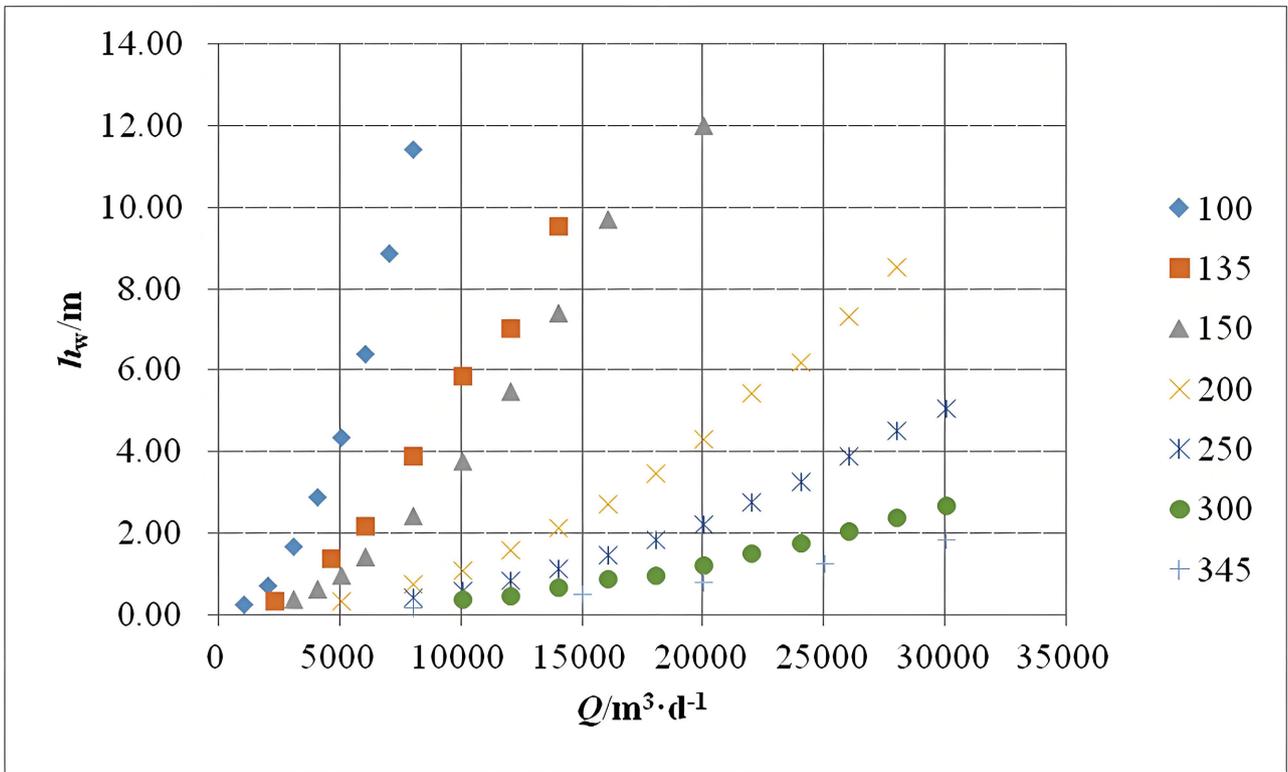


图 8. 不同孔径孔板消能井的水头损失与流量关系

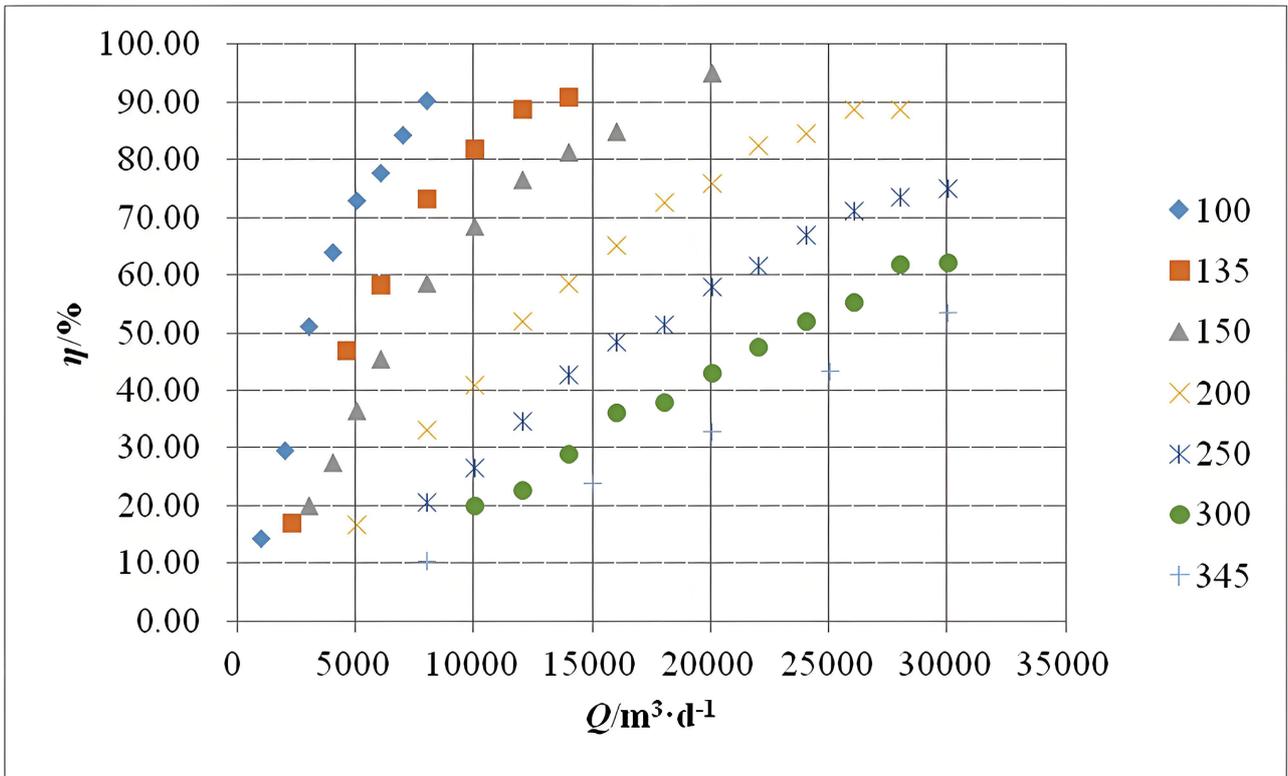


图 9. 不同孔径孔板消能井的消能率与流量关系

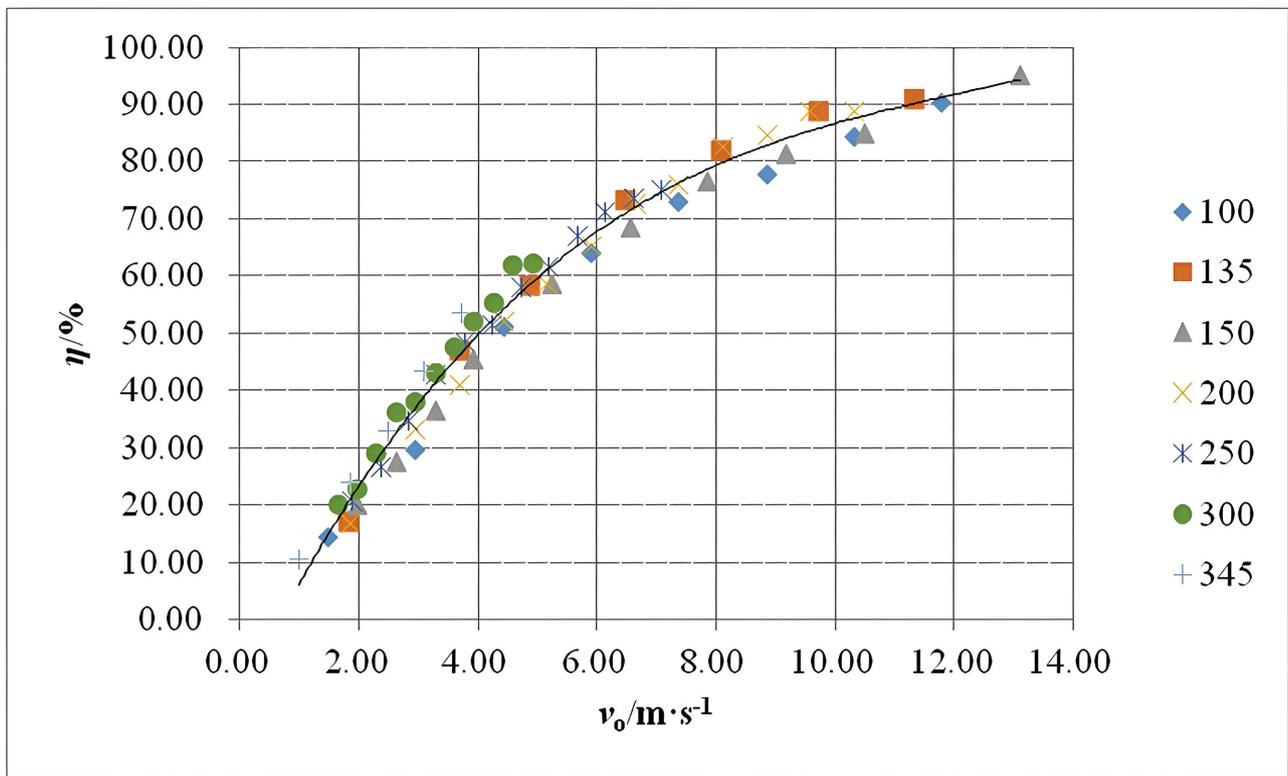


图 10. 不同孔径孔板消能井的消能率与孔速关系

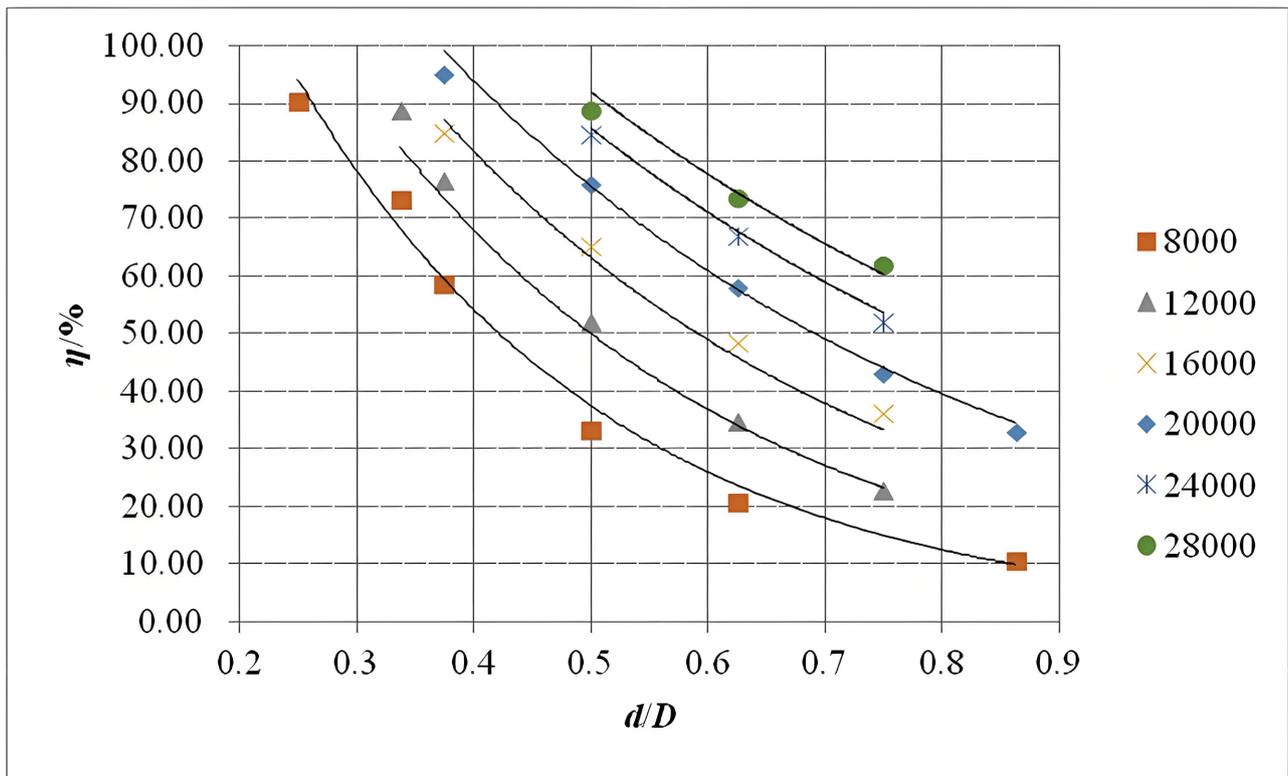


图 11. 不同流量孔板消能井的消能率与孔径关系

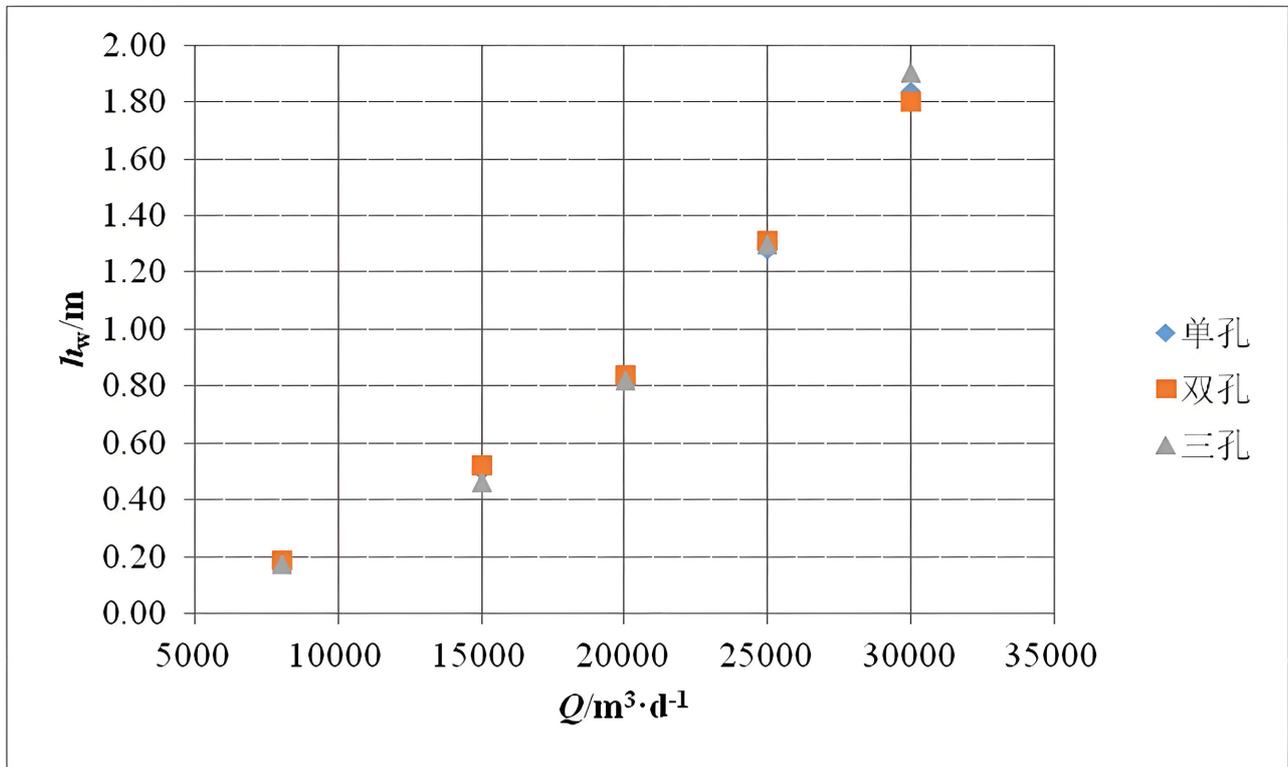


图 12. 不同孔数孔板消能井的水头损失与流量关系

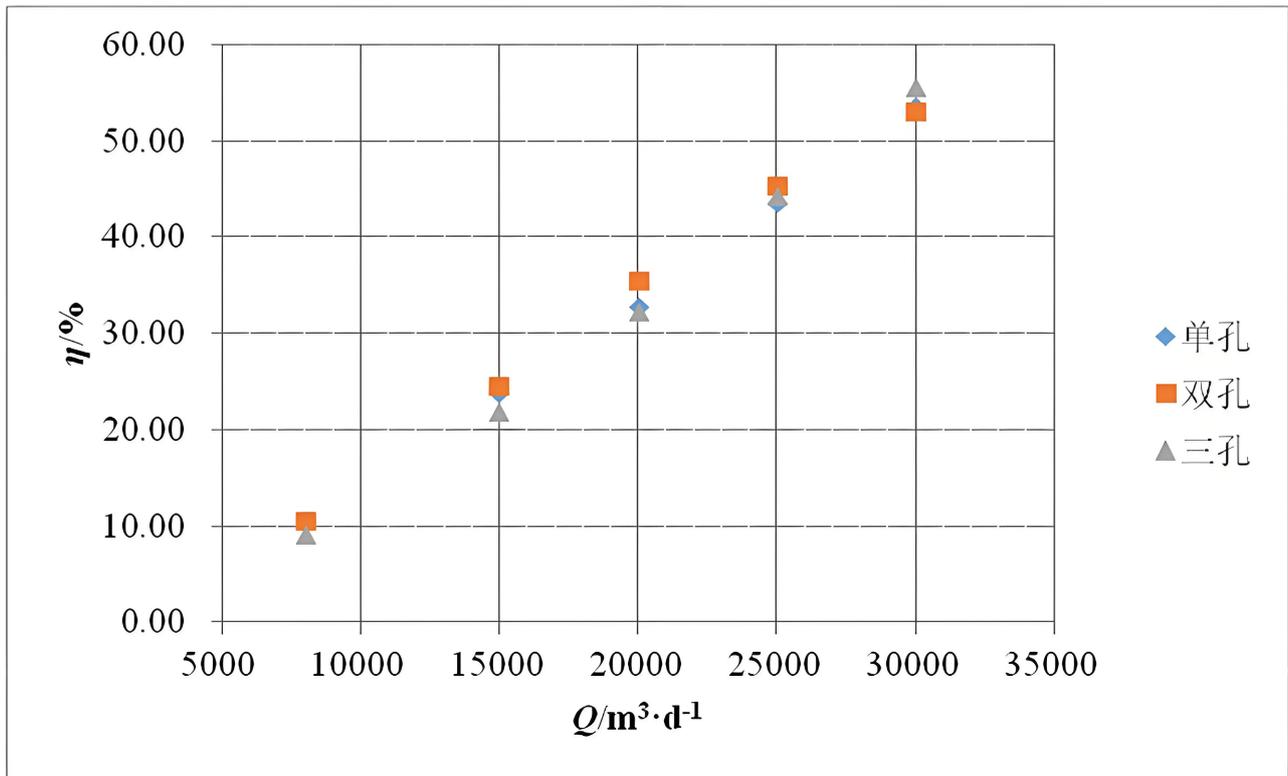


图 13. 不同孔数孔板消能井的消能率与流量关系

5. 孔径对孔板消能井消能效果的影响分析

为了分析孔数对孔板消能井消能效果的影响,针对平板一级孔板消能井,在孔速保持不变的条件下,设计了单孔孔径为 345 mm、双孔孔径为 245 mm、三孔孔径为 200 mm,共 3 种工况,开展系列试验。单孔孔心位于孔板中轴线上;双孔孔心均距孔板中轴线 26 cm;三孔孔心,一个位于孔板中轴线上,另两个均距孔板中轴线 38.5 cm;孔心均距井底 70 cm。试验流量范围为 8000~30,000 m³/d,消能井开敞段水深保持在 2.80 m 不变。

根据试验结果,分别绘制不同孔数孔板消能井的水头损失与流量变化关系图(图 12)和不同孔数孔板消能井的消能率与流量变化关系图(图 13)。

从图中看到,同一流量下,单孔、双孔和三孔的数据点基本集中在一起,说明开孔总面积不变时,即孔速不变时,孔数对孔板消能井的水头损失和消能率基本没有影响。

6. 结语

1) 槛式、柱式和孔板式三种结构型式消能井中,孔板消能井的消能效果最好,流量为 20,000 m³/d 时,孔板消能井的消能率为 75.94%,槛式消能井的消能率为 21.48%,柱式消能井的消能率为 19.25%。

2) 孔径是影响孔板消能井消能效果的主要因素,流量一定时,孔径越小,孔速越大,水头损失越大,消能率越高。孔速与消能率存在很好的相关关系,孔速为 6.00~7.00 m/s 时,消能率为 67.71%~74.17%。

3) 开孔总面积一定时,孔数对孔板消能井的消能效果基本没有影响。实际应用中,可根据需要,将孔板设计成单孔或多孔形式。

4) 半封闭卧式孔板消能井,由孔板将其分成封闭段和开敞段,结构简单,高度较小,主要通过射流消能,对于压强水头较大、流速水头较小的来流,消能效果很好,非常适合高水头、小流量、深度方向开挖受限的管道输水工程。

基金项目

长距离高落差输水管道消能井结构研究,项目编号:JLSKY-JBKYJF-2023-5。

参考文献

- [1] 张宗孝,白欣,刘冲.基于消能井井深变化下水力特性的研究[J].应用力学学报,2018,35(2):316-321.
- [2] 和云秋,邱勇,邱正魁,等.射流角度变化对矩形消力井水力特性的影响[J].水电能源科学,2024,42(8):97-101.
- [3] 赵经华,侍克斌,马亮,等.阿拉山口输水管道消能井结构试验研究[J].人民黄河,2010,32(3):92-93.
- [4] 衡海龙,刘焕芳,金瑾.消力井消能效率及井底压强分布研究[J].人民长江,2016,47(7):82-85.
- [5] RAJARATNAM, N., MAINALI, A. and HSUNG, C. Y. Observations on flow in vertical dropshafts in urban drainage systems. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(5): 486-491. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1997\)123:5\(486\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1997)123:5(486))
- [6] LIPIN, A. A. Telescopic water intake with stilling well. *Magazine of Civil Engineering*, 2022, 112(4): 11209.
- [7] 邵国瀛,刘焕芳,金瑾.多孔喷头式改进型消力井试验研究[J].人民黄河,2018,40(9):104-107.
- [8] 金瑾,刘焕芳,冯博,等.改进型深筒式消力井消能效果及影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(16):87-94.
- [9] 芦绮玲,黄君瑶,李国栋,等.多喷孔射流的三维紊流数值模拟及消能分析[J].水力发电学报,2007,102(1):61-66.
- [10] 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室.水力学[M].北京:高等教育出版社,2016.