doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.06.033

导流式输水管网消能装置设计与影响因素研究

喻黎明[1]　张玉胜[1]　崔吉林[2]　李　娜[1]　杨汶翰[3]　郝志铭[1]

(1.昆明理工大学现代农业工程学院,昆明 650500;2.西南有色昆明勘测设计(院)股份有限公司,昆明 650217;
3.云南点润节水设备制造有限公司,昆明 650600)

摘要:为了保障山区输水管网运行安全,设计导流式输水管网消能装置。装置由上壳体、消能空腔和下壳体组成,设置入口端和出口端,消能空腔内设有均匀间隔的消能板和导流孔。采用 Fluent 数值模拟和验证试验对试验方法进行验证,设置 3 种入口流速、3 种导流孔径比例和有无导流片开展全因素试验,并对 2 种导流孔直径进行消能率对比试验。结果表明:在保证过流能力下,入口流速和导流孔径均对消能率起主导作用,入口流速越大,即流量越大,消能率越好。消能率与导流孔径负相关,导流孔径越小越有利于消能。当基础孔径相同时,为同时满足过流能力且确保消能达到较好效果,建议选择导流孔径比例保持不变布置方式。入口流速为 1.0 m/s 时,局部水头损失占总水头损失的 96.3%,所以当计算总水头损失时,可以忽略沿程水头损失。当入口流速小于 4.0 m/s 时,选择不安装导流片,达到 4.0 m/s 时,有无导流片消能率基本持平,大于 5.0 m/s 后,选用安装导流片消能效果更优。

关键词:山区;输水管网;消能板;导流孔;消能空腔;导流片

中图分类号:S275.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)06-0319-09　　**OSID**:

Energy Dissipation Device Design and Influencing Factors of Diversion Water Transmission Network

YU Liming[1]　ZHANG Yusheng[1]　CUI Jilin[2]　LI Na[1]　YANG Wenhan[3]　HAO Zhiming[1]

(1. *Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *Southwest Nonferrous Kunming Exploration Surveying and Designing* (*Institute*) *Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650217, *China*
3. *Yunnan Point Run Water Saving Equipment Manufacturing Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650600, *China*)

Abstract: In order to ensure the safety of mountain water transmission network, the diversion type energy dissipation device was designed. The device was composed of an upper shell, an energy dissipation cavity and a lower shell, which was provided with an inlet end and an outlet end. The energy dissipation cavity was provided with an evenly spaced energy dissipation plate and a diversion hole. Fluent numerical simulation and experiments were used to verify the test method. Three inlet velocity rates, three diversion aperture ratios and the presence or absence of diversion plates were set to carry out all-factor tests, and energy dissipation rate comparison tests were carried out on the diameters of two diversion holes. The results showed that under the guarantee of overflow capacity, the inlet velocity and diversion aperture both played a leading role in energy dissipation rate. The larger the inlet velocity was, the larger the flow rate was, the better the energy dissipation rate would be. The energy dissipation rate was negatively correlated with the diversion aperture, and the smaller the diversion aperture was, the better the energy dissipation was. When the base aperture was the same, in order to satisfy the overflow capacity at the same time and ensure the dissipation of energy to achieve a better effect, it was recommended to choose the diversion aperture ratio unchanged arrangement. When the inlet velocity was 1.0 m/s, the local head loss accounts was 96.3% of the total head loss, so when calculating the total head loss, frictional head loss can be ignored. When inlet velocity was less than 4.0 m/s, when choosing not to install the deflector, it can be up to 4.0 m/s, the presence of deflector dissipation was flat, when it was more than 5.0 m/s, the effect was better when choosing to install deflector energy dissipation.

Key words: mountain; water transmission network; energy dissipation plate; diversion hole; energy dissipation cavity; diversion plate

收稿日期:2022-10-27　修回日期:2023-03-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52269011)

作者简介:喻黎明(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与设备研究,E-mail:liming16900@163.com

通信作者:崔吉林(1979—),男,高级工程师,主要从事生态环境技术研究,E-mail:64908149@qq.com

0 引言

输水管网在农业生产中起着举足轻重的作用，高压水会对输水管网的运行安全和稳定造成威胁[1]。管网消能防止下游出现相关安全问题[2~3]，山区灌溉和雨水收集工程高差较大，低处管网极易出现爆管，影响使用寿命[4]。传统的解决方案都是安装阀门，调节输水压力，但会造成过流量不足或者成本过高等问题[5]。目前消能装置是山丘区输水管网的重要设施，但现有的消能装置对于小型用户或者雨水集流灌溉来说，投资成本过高。所以成本较低的消能装置对于保障我国干旱区或者季节性干旱区山丘雨水集流灌溉管网的安全以及山丘区输水管网的安全运行具有重要意义。

消能装置主要分为两类：旋流式内消能装置和突扩突缩式内消能装置[6]。其中突扩突缩式内消能装置中孔板式消能可分为单级孔板消能工和多级孔板消能工两类[7]。张婷等[8]研究了齿墩内表面不同的两种体型齿墩式内消能工，利用 Fluent 模拟方法探讨了两种导流孔在流速场、压力场、紊动能及水力参数等对比分析。张婷等[9]研究了齿墩状内消能工的消能及压力特性，通过物理模型试验对不同面积收缩比的齿墩状内消能工进行了研究。李晓娟[10]分析了不同齿墩长度对齿墩状内消能工的水头损失系数、消能率、壁面时均压强系数沿程分布规律、断面压力云图分布以及流速矢量分布的影响。延耀兴等[11]通过调整孔板的扭转角度和孔板间距对阶梯螺旋孔口式孔板消能降压装置进行了研究，控制不同结构组合方式，满足不同节水灌溉方式对水压的需求。延耀兴等[12]主要对螺旋式孔口管道消能装置水力特性进行了试验研究，发现消能率随扭转角的增大而增大。宋驰[13]控制节流片开口角度和叶片偏转角度对外圆筒消能装置进行优选设计。综上，诸多学者均对不同类型消能装置进行了广泛的研究，但是研究对象结构单一，主要通过控制过流面尺寸和过流面形状很难揭示消能机理，使得结构优化较少。

因此，本文以导流式消能装置为研究对象，利用导流孔的突缩和突扩消能方式，以及导流孔布置角度并结合导流片促使水流在装置内部对冲，从而对能量造成消耗。通过多种分析方法来阐述其内部流态与消能的关系，对比不同孔径和有无导流片影响因素，系统分析消能率的变化规律，从而准确地筛选出最佳结构因素水平，并提出结构优化建议。

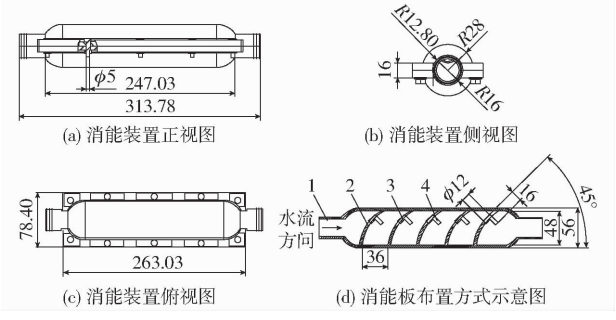
1 导流式输水管网消能装置设计

1.1 设计要求

导流式输水管网消能装置设计要求包括：①良好的消能效果，满足预期工作要求。②结构简单，安装便捷，满足环境要求。③消能装置前后端流速稳定。④制作材料价格低廉，有效降低成本。

1.2 总体结构设计

如图 1 所示，消能装置包括上壳体、下壳体、消能板、导流片，将上壳体盖合在下壳体上，在上壳体和下壳体之间形成消能空腔，消能空腔一端设有进水口，另一端设有出水口，消能空腔内布置有消能板，消能板上部设有导流孔，当长时间工作后，可定期拆卸方便清洗内腔。通过在消能空腔中设置多片消能板，选取的消能板片数既要确保消能能力，同时也要考虑过流能力[14]。选取超过 5 片时虽然消能效果会更好，但是提升空间不大，同时也会造成材料浪费、提升使用成本，经过多次对比仿真预试验，选取 5 片消能板比较合适。进出口两端采用螺纹连接保证密封性和连接强度。为减少试验误差，装置设计模型与试验模型都采用 1∶1 等比例尺寸，消能装置模型参数见表 1。



(a) 消能装置正视图 (b) 消能装置侧视图

(c) 消能装置俯视图 (d) 消能板布置方式示意图

图 1 消能装置结构示意图

Fig. 1 Schematics of energy dissipation device structure

1. 入口 2. 消能板 3. 导流孔 4. 导流片

表 1 结构参数

Tab. 1 Structural parameters

参数	进出水管外径/mm	消能装置内径/mm	消能装置长度/mm	消能板片数/片	内部导流孔直径/mm	导流孔径排布比例	导流片长度/mm	导流片厚度/mm
数值	32	48	313.78	5	12	1∶1∶1∶1∶1	16	2

1.3 消能板结构设计

消能板是消能装置核心工作部件，如图 1d 所示，消能板垂直对称线上侧设有导流孔，导流孔内安装有导流片。消能空腔内均匀间隔设有朝出水方向弯曲

的消能板，消能板水平投影为圆形，水流冲击后能快速扩散开，作为优选，消能板的倾斜角度为 45°，水流进入后冲击第 1 块消能板，然后从第 1 块消能板上导流孔流出，由于消能板整体弯曲设置，因此从第 1 块消能板上导流孔流出的水向斜下方流动，冲击第 2 块消能板下部，不断重复，直至从出水口流出。

2　数值模拟及试验测试平台

2.1　数值模型参数选择

结构优化试验需要在不同工况下选取关键因素进行数值模拟[15]，导流片在流域中改变了水流的方向与分布[16]，试验中研究对象导流孔和导流片对装置消能率起关键作用，本试验选取入口流速、导流孔径比例、有无安装导流片 3 种因素（表 2），入口流速设置水平分别为 1.0、2.0、3.0 m/s；导流孔径比例设置，以基础导流孔直径 12 mm 成比例保持递增（1∶1.1∶1.2∶1.3∶1.4）对应 12.0、13.2、14.4、15.6、16.8 mm，成比例保持递减（1.4∶1.3∶1.2∶1.1∶1）对应 16.8、15.6、14.4、13.2、12.0 mm，以及比例保持不变（1∶1∶1∶1∶1）均对应 12 mm，平均孔径分别为 14.4、14.4、12.0 mm。一方面可以探讨导流孔径对消能率的影响，另一方面为了说明导流孔径比例保持不变布置方式消能率较高，同时单一控制方便加工制作和组合安装。通过 Fluent 数值模拟计算，探讨不同因素对消能装置整体性能影响的规律，从而找到影响因素水平的最优组合。

表 2　试验因素水平

Tab.2　Test factors and levels

水平	因素		
	入口流速/(m·s^{-1})	导流孔径比例	有无导流片
1	1.0	1∶1∶1∶1∶1	有
2	2.0	1∶1.1∶1.2∶1.3∶1.4	无
3	3.0	1.4∶1.3∶1.2∶1.1∶1	

2.2　几何模型建立

采用 SolidWorks 2021 建模，共 6 个模型并网格化，网格为四面体网格，网格间距为 2，并对网格优化，提升网格质量，最低保持在 0.35 以上，网格数为 7×10^5 个左右（表 3），并对其做无关性检验[17]，在 Fluent 中设置相关参数进行模拟，选定数学模型、离散方法和求解算法[8]。

表 3　试验对象网格数

Tab.3　Grid number of test object

模型	J－W	J－Y	P－W	P－Y	Z－W	Z－Y
网格数	733 975	699 760	733 991	732 073	727 010	698 864

注：J－W 表示无导流片导流孔径比例递减；J－Y 表示有导流片导流孔径比例递减；P－W 表示无导流片导流孔径比例不变；P－Y 表示有导流片导流孔径比例不变；Z－W 表示无导流片导流孔径比例递增；Z－Y 表示有导流片导流孔径比例递增。

图 2 中，设置了 7 个监测面：In、A、B、C、D、E 和 Out，取 7 个监测面的数据，采用 Tecplot 后处理软件设置需要的压力、流速、涡量场等。

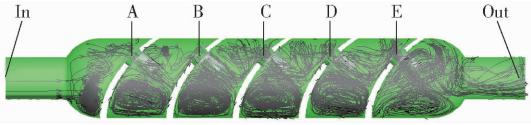


图 2　消能腔内流线图和监测面位置分布图

Fig.2　Flow diagram in energy dissipation cavity and location distribution diagram of monitoring surface

2.3　边界条件设定

由于消能装置空腔内部存在回流和射流现象，故采用标准 $k-\varepsilon$ 模型[18]。进口条件设置为速度入口，分别为 1.0、2.0、3.0 m/s，湍流强度对应入口流速，分别设置为 4.64%、4.26% 和 4.05%，水力直径 25.6 mm，出口条件设置为压力出口，压力设置为 0.1 MPa[19]，其余边界条件设置为无滑移固壁边界，壁面采用标准壁面函数。

2.4　试验测试平台

试验在昆明理工大学实验室进行，通过对比试验测试和数值模拟的结果，以验证数值模拟的准确性。消能装置 3D 打印，材料为灰黑玻璃增强尼龙，以保证强度和刚度。测试平台如图 3 所示。试验时，调节消能装置前端流速调节阀，控制电磁流量计的读数稳定在 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5 m/s 时进行测试，通过微调出口端压力调节阀，使出口压力表数值保持在 0.1 MPa。

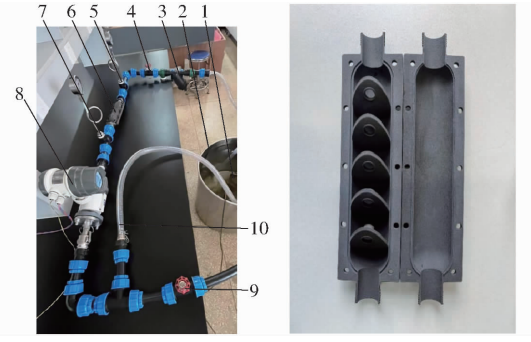


图 3　试验测试平台装配图

Fig.3　Test platform assembly drawing

1. 水泵　2. 蓄水桶　3. Y 型网式过滤器　4. 压力调节阀　5. 出口压力表　6. 消能装置　7. 入口压力表　8. 电磁流量计　9. 流速调节阀　10. 水管

3　结果与分析

3.1　压力分布

消能装置的压力分布可以直观地观测装置的消

能效果,图 4 为入口流速 3.0 m/s 且导流孔径比例保持不变时的总压降,压力呈现递减趋势,每个消能腔内水压都在逐级递减,并且从导流孔内出来的水流呈喷射状,喷射水流的压力慢慢消减,一个腔体接一个腔体的压力呈现阶梯状释放,压力逐渐变小,以此类推。对于每一个不同的入口流速,或者不同结构,均会出现类似的现象。

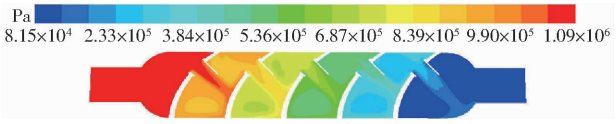


图 4 入口流速 3.0 m/s 且导流孔径比例保持不变时的总压降

Fig. 4 Total pressure drop diagram when inlet velocity was 3.0 m/s and diversion aperture ratio remained constant

图 5 为 6 组结构 3 种入口流速下 7 个监测面压力。其中监测面 A、B、C、D、E 可以反映 5 个导流孔位置的总压,从图 5 可以看出,从入口到导流孔 A 和从导流孔 E 到出口段压降幅度较小,说明从入口进入导流孔 A 和从导流孔 E 到出口段消能能力较低;当从导流孔 A 到 E 时,6 种不同结构 3 种不同入口流速工况下压力下降非常快,说明消能能力强,是主要的消能结构。但下降情况稍有不同,P－W 和 P－Y 两组压降基本保持成一条斜线,Z－W 和 Z－Y 两组压降幅度由刚开始相对较大再到后面相对较小,呈现凹陷形状,J－W 和 J－Y 两组压降幅度则相反,由刚开始相对较小再到后面相对较大,呈现凸出形状,这是因为导流孔径局限了过流面积,从而影响导流孔内平均流速,导流孔径越小,导流孔内平均流速越大,故加大了局部水头损失,加快了压力能转换为水动能的效率。

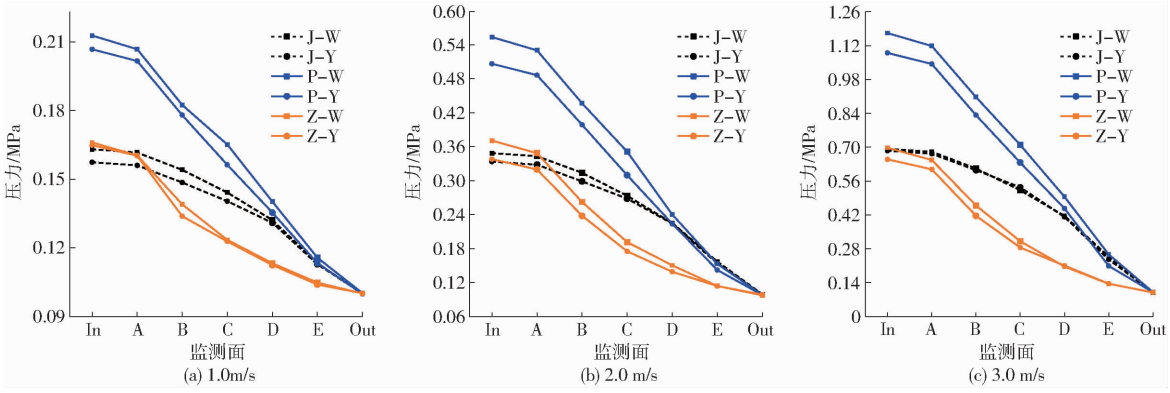


图 5 6 组结构 3 种入口流速下 7 个监测面压力变化曲线

Fig. 5 Pressure change curves of seven monitoring surfaces at three inlet velocity of six groups of structures

消能装置的消能率 η_k 取决于消能装置上下游相对压力差,即消能装置入口与出口的压力差与入口压力的比值[6],即

$$\eta_k = (p_1 - p_2)/p_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中 p_1——入口压力 p_2——出口压力

如图 6a 所示,结合式(1)可以得出不同入口流速、不同结构下的消能率。P－Y、P－W 在相同入口流速下相较于其它对照组的消能率最高,则表明导流孔径比例保持不变时,消能效果更好。如图 6b(图中 J－W12 表示导流孔直径 d_1 = 12 mm,J－W14 表示导流孔直径 d_2 = 14 mm,以此类推)所示,随着入口流速的增大,即流量的增大,消能率也会增高,同时导流孔直径在 d_1 = 12 mm 的消能率高于 d_2 = 14 mm 的消能率。也就是说局部水头损失主要集中在导流孔,导流孔径与入口流速决定了导流孔处平均流速,不同导流孔径与入口流速会产生不同的平均流速,使得消能率也会发生规律性变化。综上,在实际使用满足不同消能工况时,控制导流孔内平均流速,是能否达到消能需求的关键影响因素。

3.2 流速分布

图 7 为入口速度为 2.0 m/s 时 3 组结构的流速云图,可以直观地发现不同速度场的情况以及最高流速场产生的次数。

由图 7 可以看出,由于消能腔内部导流孔的存在使流域中出现过流面积的突缩与突扩,导致导流孔处出现高流速域,并且在每个腔体内部都出现不同大小的涡流区,在涡流区中心水体的流速趋于 0 m/s,表 4 为入口速度为 1.0、2.0、3.0 m/s 时 6 组结构流场的最高流速。与图 7 对比发现每个消能装置局部最高流速都出现在过流截面积最小的导流孔处,表 4 中无导流片局部最高流速均比有导流片局部最高流速高,是因为导流片安装在导流孔的出口侧,会增大水流穿过导流孔的阻力,但是这种阻力会持续存在,使得导流孔内最高流速会偏小于无导流片状态,但影响范围较小,最高流速也较为接近。结合伯努利公式可知流体的动能、势能和压力能是一个恒量,三者可以相互转换[20]可以阐述这一现象,忽略沿程水头损失,流速越大,压力能转换为动能越

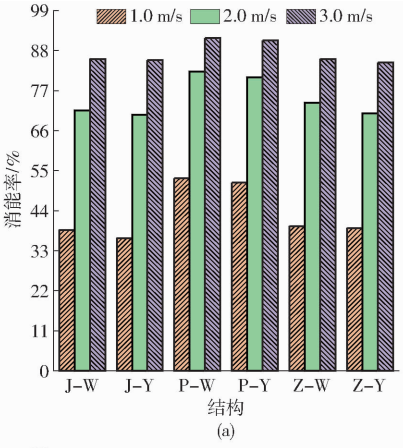


图 6　不同入口流速下消能率对比

Fig. 6　Comparison diagrams of energy dissipation rate at different inlet velocities

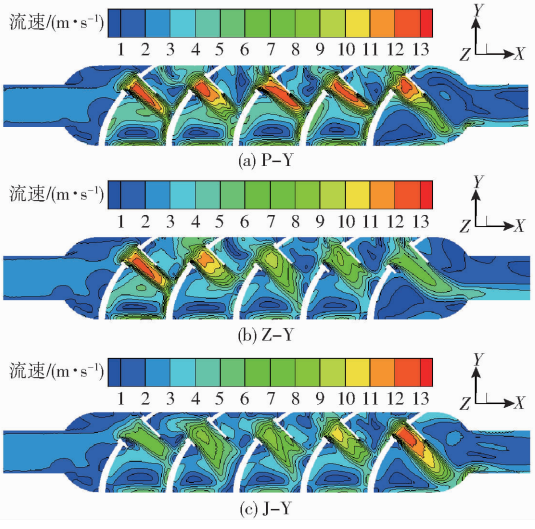


图 7　入口速度为 2.0 m/s 时 3 组结构的流速云图

Fig. 7　Velocity nephograms of three groups of structures when inlet velocity was 2.0 m/s

明显，局部水头损失越大，进一步说明导流孔径比例保持不变，更有利于消能。

水流遇到消能板阻挡，流动方向发生改变，经过导流孔因过流面直径变小，导致局部水头损失增大，从导流孔穿过直接撞击消能板，消能板弯曲设计配合导流片将有助于在消能空腔中形成水漩涡，使得流体水动能减小，水流自身在导流孔进水位置再次相互碰撞，发生强烈剪切作用并在消能空腔内产生强烈紊动，从而对水流进行有效消能。其中局部水头损失主要在于腔内过流面积的突扩突缩以及导流孔出水口倾斜角度的影响。采用水力学相关公式用近似法计算，入口突缩阻力系数为 0.75、出口突扩阻力系数为 0.4、导流孔倾斜阻力系数为 0.85。在入口速度为 1.0 m/s 时，导流孔内平均流速为 4.55 m/s，结合公式局部水头损失为

$$H_0 = \zeta \frac{v^2}{2g} \tag{2}$$

式中　H_0——局部水头损失，m

v——管道内平均流速，m/s

ζ——阻力系数

g——重力加速度，m/s^2

由式(2)计算可得局部水头损失 H_0 = 10.63 m，总水头损失 H = 11.585 m，因此，局部水头损失占总水头损失的 96.3%。由于通过 Fluent 运算的流量普遍偏大[21]，水头损失也会变大。所以当计算总水头损失时，可以忽略沿程水头损失[22]。

表 4　入口速度为 1.0、2.0、3.0 m/s 时 6 组结构中最高流速

Tab. 4　Obtained highest velocity in six structures when inlet velocity was 1.0 m/s, 2.0 m/s and 3.0 m/s

入口流速/(m·s^{-1})	导流孔径比例	局部最高流速/(m·s^{-1})		不同监测面处导流孔高流速场分布
		有导流片	无导流片	
1.0	1∶1∶1∶1∶1	6.44	6.77	A、B、C、D、E 同时存在
	1∶1.1∶1.2∶1.3∶1.4	6.39	6.69	A 存在高流速场，B、C、D、E 依次缩小
	1.4∶1.3∶1.2∶1.1∶1	6.50	6.47	E 存在高流速场，A、B、C、D 依次增大
2.0	1∶1∶1∶1∶1	13.03	13.60	A、B、C、D、E 同时存在
	1∶1.1∶1.2∶1.3∶1.4	12.80	13.45	A 存在高流速场，B、C、D、E 依次缩小
	1.4∶1.3∶1.2∶1.1∶1	12.87	13.04	E 存在高流速场，A、B、C、D 依次增大
3.0	1∶1∶1∶1∶1	19.58	21.29	A、B、C、D、E 同时存在
	1∶1.1∶1.2∶1.3∶1.4	19.22	20.06	A 存在高流速场，B、C、D、E 依次缩小
	1.4∶1.3∶1.2∶1.1∶1	18.97	20.08	E 存在高流速场，A、B、C、D 依次增大

3.3　涡量场分布

分别选取两种导流孔径比例和 3 种入口流速各

选型进行分析，图 8 为入口流速为 1.0、2.0、3.0 m/s 时 2 组结构涡量分布云图，涡量一般用来描述涡旋的强度和方向[23]，从图 8 可以发现，随着入口流量的增大，涡量强度和分布区域也在增大，涡量强度最大值平均递增率约 89%，且相同入口流速条件下，导流孔径递增相较于不变时的涡量分布区域反而会逐渐减小。产生这种现象说明涡量强度和分布区域越大，消能效果越好，由于涡旋的存在会加大水流的对冲效果，从而增加水流在消能装置内能量损耗，漩涡的形成有利于消能。

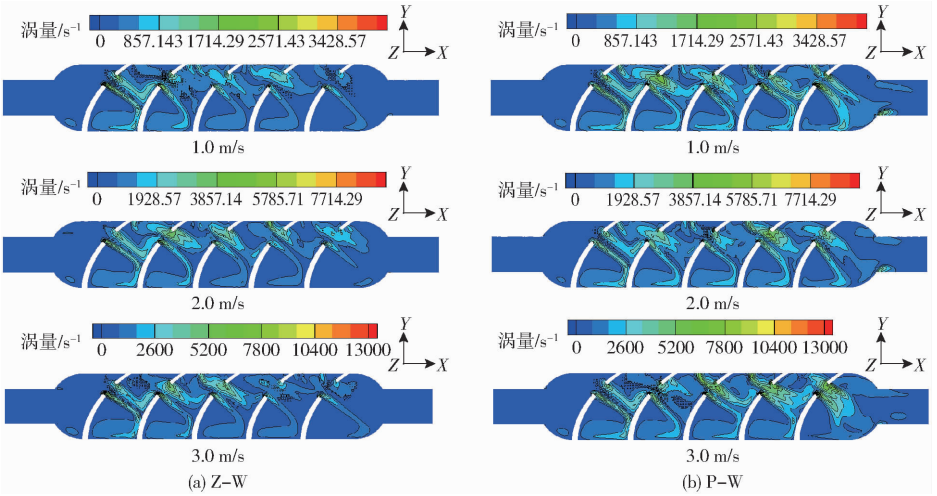


图 8 入口流速为 1.0、2.0、3.0 m/s 时 2 组结构涡量分布云图

Fig. 8 Vortex distribution nephograms of two groups at inlet velocities of 1.0 m/s, 2.0 m/s and 3.0 m/s

4 试验验证

一一对应试验和数值模拟的入口压力，拟合得到消能装置的流速-压力曲线（图 9）。不同流速状态下，试验测试和数值模拟中入口压力误差和拟合趋势基本保持一致，说明数值模拟结果可靠。数值模拟计算值与实际试验测量值的相对误差分别为 8.01%、7.30%、7.25%、7.50%、7.20%、7.20%，即多数误差在 8% 以内，造成误差主要原因是实际试验中压力表与消能装置监测位置达不到数值模拟中理想监测位置，以及读取电磁流量计和压力表数值需要进行估读，均导致出现系统误差。此误差可以满足定性和定量的预测要求，可以采用数值模拟的方法对消能装置性能分析和结构参数优化。

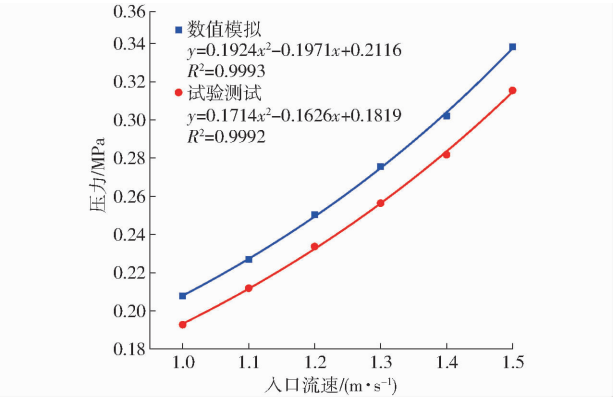


图 9 清水状态下的流速-入口压力曲线

Fig. 9 Velocity - inlet pressure curves in clear water

5 讨论

5.1 导流片作用

靳春蕾等[24]在对转叶式螺旋流消能装置试验探究中，认为水流流量越大，消能率越高。这与图 6b 中不同结构下消能率结论相同。段瑶[6]研究齿墩式消能结构的消能特性，认为齿墩面积收缩比会影响消能效果和过流量，面积收缩比越小，管内消能效果更好。类似对比图 6a 中不同结构下消能率发现，P-W 和 P-Y 消能效率更高。综上，消能率与入口流速和导流孔径均存在关系，而邢少博等[25]在对灌水器的研究中发现穿孔形流道产生的涡流会对内部产生不同流速、层流之间的摩擦，从而有效消能。图 8 也说明了漩涡会对消能效果带来有利影响。用 Fluent 使用相同的运算方法，对入口流速设置 4.0、5.0 m/s 工况进行对比，结果如图 10 所示。

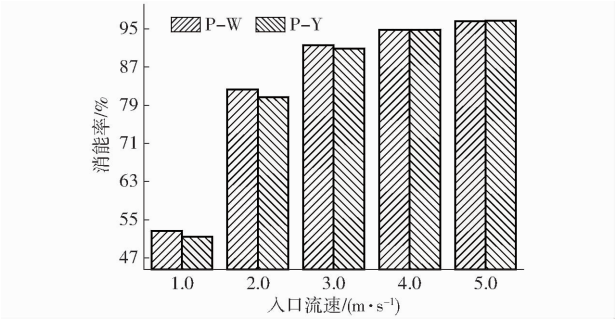


图 10 不同入口流速下的消能率

Fig. 10 Energy dissipation rate at different inlet velocities

如图 10 所示，入口流速小于 4.0 m/s 时，P－W 消能率一直大于 P－Y，但两组消能率差距在持续缩小，4.0 m/s 时基本持平，在 5.0 m/s 时出现反超，P－Y 消能率超过 P－W。导流孔处由漩涡带来的水流对冲，对消能效果的影响程度逐渐增大，说明导流片会有助于加大导流孔处水流对冲效果，使消能效果更好。

5.2　消能路径作用

图 11 表明，入口流速 2.0 m/s，在监测面 C 与 D 之间，J－W12 水流被强制约束至导流孔垂直方向，冲击至消能板上，一部分水流向消能空腔内部涡旋，很少部分水流冲向下一个导流孔方向，而 J－W14 与 J－W12 两者变化则截然不同。延耀兴等[11]研究阶梯螺旋孔口式孔板消能降压装置得知，维持旋转水流，需消耗水流自身能量，而其旋转强度越大，消耗能量越多。宋驰[13]在研究外圆筒式水力消能装置时提出，螺旋流强度越大，消能效果更优。这均说明消能装置内部消能板结构增大水流运动强度和消耗路径会有助于消能。直径 d_1 = 12 mm 时消能率都高于 d_2 = 14 mm，不仅由于导流孔径的区别，而且存在水流在装置内部无法造成有强度的漩涡，而在导流孔间直接穿过，能量消耗减弱。

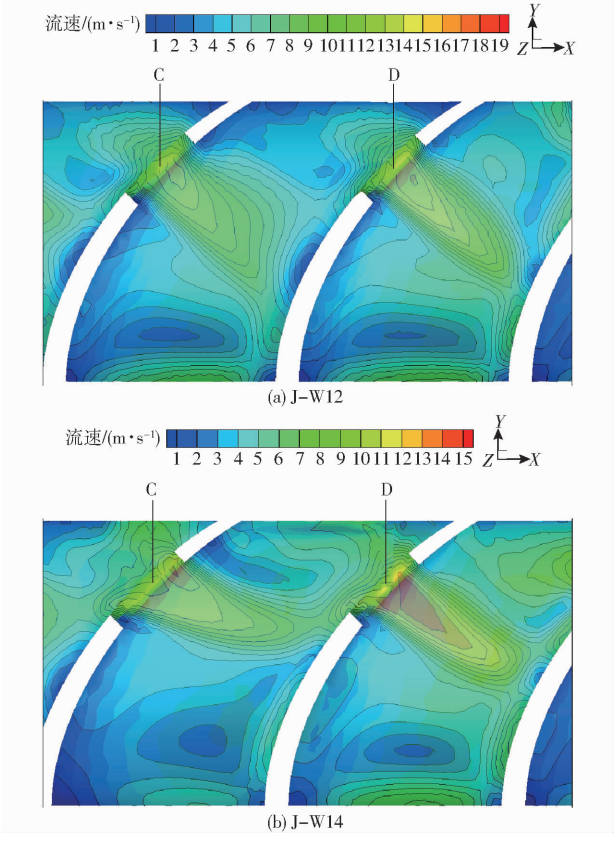


图 11　不同直径时流速分布云图

Fig. 11　Cloudcharts of contrast velocity distribution of different diameters

试验研究表明，随着入口流速的增大，消能率也越高，消能率与导流孔径之间存在负相关，消能率随着导流孔径的增大反而在减小，仵峰等[26]、刘焕[27]利用这种突缩突扩的消能手段，进一步设计了一种新型复合型渐缩-突扩流道灌水器，相比于传统灌水器流态指数有一定提升。忽略导流片的影响，选取不同导流孔径 d_1 = 12 mm、d_2 = 14 mm，通过对照试验前者消能率优于后者，据此说明结论与验证结果一致。为此可以在满足设计要求的前提下，合理选择不同导流孔直径来满足不同消能程度需求。本试验中在不同入口流速下消能率对比（图 6a）发现，导流孔径比例保持不变的情况下，消能率均超过成比例保持递增和保持递减两种情况，根据入口流速和导流孔径均会对消能效果产生影响，可引出导流孔处平均流速与水头损失关系的分析。消能墩[28－29]的应用原理类似，为了减小下游的冲击，增加下游区的安全性，通过利用消能墩改变水流过流面积使得流速发生变化，从而损耗水流能量。试验中观察流线（图 2），发现消能空腔内部产生不同程度的水漩涡，并进行涡量仿真试验，通过对涡量云图（图 8）的对比发现，涡量强度和分布面积越大，消能效果越好，说明漩涡会对消能产生积极的影响，漩涡的存在加大水流冲撞和摩擦。这与王新端等[30]提出的双流道消能，正、反流道形成的两股水流形成对冲，可以有效消能原理类似。并且，郭霖等[31－32]通过将水域分成突缩区和突扩区，水流方向分为正向水流和反向水流清楚地解释对冲、混掺消能的机理。以及张宗孝等[33]、张晋锋等[34]认为消能井在利用水流从竖井跌入消能井中上、下翻滚，相互冲撞消能，并且均对消能井内部工况以及适用范围都进行系统的探讨和研究，即水流冲撞和摩擦对消能有着显著的影响。漩涡带来的水流冲撞消能除入口流速影响之外，导流片的辅助作用更为重要，通过对导流片作用分析，入口流速小于 4.0 m/s 时，选择不安装导流片，达到 4.0 m/s 时，有无导流片消能率基本持平，大于 5.0 m/s 后，选用安装导流片消能效果更好。实际使用中建议：①根据实际入口流速，确定选择是否安装导流片。②由于从入口进入的第 1 个空腔内部压力最大，可以在外壳体安装泄压阀，防止由于压力过大对消能装置内部产生损坏，延长使用寿命。

综上，本文从探讨有无导流片以及不同导流孔径比例布置方式出发，通过压力分布、流速分布、涡量分布进行探讨选择出最优结构，分析消能装置消能率的变化规律。后续还会探讨内部涡流对消能板和装置内部表面磨损的优化[35]，控制不同消能板的间距以及消能板的数量，通过测试探讨不同导流孔

径与出入口直径的比例对消能率和出口压力的影响规律,来满足不同工况的环境要求并进行产品化归类,还将探讨消能装置放置角度的影响,以及不同泥沙粒径和浓度对消能效果的影响等。

6 结论

(1)从消能率来看,入口流速和导流孔径为主导因素。在保证过流能力前提下,随着入口流速的增大,即流量的增大,导流式消能装置消能率也会增大,消能率与导流孔径成负相关,消能率随着导流孔径的增大而减小。当基础孔径相同时,为同时满足过流能力确保消能达到较高效果,建议选择导流孔径比例保持不变布置方式。

(2)对水头损失而言,入口流速为 1.0 m/s 时,局部水头损失占总水头损失的 96.3%,所以当计算总水头损失时,可以忽略沿程水头损失。

(3)当入口流速小于 4.0 m/s 时,选择不安装导流片,达到 4.0 m/s 时,有无导流片消能率基本持平,大于 5.0 m/s 后,选用安装导流片消能效果更优。这表明随着入口流速的增大,安装导流片有助于加大漩涡水流冲撞和摩擦,减小消能路径的影响,使得消能效果更为明显。

参 考 文 献

[1] 李天才,郭建春,赵金洲. 压裂气井支撑剂回流及出砂控制研究及其应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2006,21(3):44 - 47.
LI Tiancai, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou. Research and application of proppant reflux and sand production control in fractured gas well[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition),2006,21(3):44 - 47. (in Chinese)

[2] 王峰,卢改林. 有压管道孔口消能效率分析[J]. 太原理工大学学报,2007,38(6):555 - 557,561.
WANG Feng, LU Gailin. Analysis on energy dissipation efficiency of pressurized pipe orificium[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2007,38(6):555 - 557,561. (in Chinese)

[3] 童亮. 大落差复杂地形供水管道消能方式选择及管线分段研究[J]. 西北水电,2019(3):30 - 33.
TONG Liang. Study on energy dissipation mode selection and pipeline segment of water supply pipeline in large drop complex terrain[J]. Northwest Hydropower,2019(3):30 - 33. (in Chinese)

[4] 郝桂珍,刘俊良,高永,等. 山区城市供水管网规划计算应注意的几个问题[J]. 给水排水,2002,28(6):21 - 24.
HAO Guizhen, LIU Junliang, GAO Yong, et al. Some problems concerning planning calculation of urban water supply network in mountainous area[J]. Water Supply and Drainage,2002,28(6):21 - 24. (in Chinese)

[5] 李永业,孙西欢,李飞,等. 管道消能研究概述[J]. 电力学报,2010,25(2):111 - 114.
LI Yongye, SUN Xihuan, LI Fei, et al. Research overview of pipeline energy dissipation[J]. Journal of Electric Power,2010,25(2):111 - 114. (in Chinese)

[6] 段瑶. 组合式水力消能装置结构研究[D]. 西安:西安石油大学,2019.
DUAN Yao. Research on structure of combined hydraulic energy dissipation device[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University,2019. (in Chinese)

[7] 张志刚. 孔板式消能工消能研究[J]. 黑龙江水利科技,2021,49(5):45 - 47.
ZHANG Zhigang. Research on energy dissipation of hole plate energy dissipation[J]. Heilongjiang Water Science and Technology,2021,49(5):45 - 47. (in Chinese)

[8] 张婷,郝瑞霞,郑秀清. 齿墩内表面不同的两种体型齿墩式内消能工的数值模拟[J]. 水电能源科学,2021,39(3):58 - 61.
ZHANG Ting, HAO Ruixia, ZHENG Xiuqing. Numerical simulation of internal energy dissipators of two types of piers with different internal surfaces[J]. Water Resource and Power,2021,39(3):58 - 61. (in Chinese)

[9] 张婷,田淳,李永业,等. 齿墩状内消能工的消能及压力特性[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(2):136 - 139,161.
ZHANG Ting, TIAN Chun, LI Yongye, et al. Energy dissipation and pressure characteristics of tooth pier internal energy dissipator[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2014,32(2):136 - 139,161. (in Chinese)

[10] 李晓娟. 齿墩长度对齿墩状内消能工水力特性影响的数值模拟[D]. 太原:太原理工大学,2015.
LI Xiaojuan. Numerical simulation of the influence of pier length on the internal energy dissipation characteristics of pier[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2015. (in Chinese)

[11] 延耀兴,孙西欢,阎庆绂. 阶梯螺旋孔口式孔板消能降压装置性能[J]. 农业机械学报,2009,40(2):71 - 75.
YAN Yaoxing, SUN Xihuan, YAN Qingfu. Performance of stepped spiral orify-plate energy dissipation and pressure reduction device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(2):71 - 75. (in Chinese)

[12] 延耀兴,公绪英,张杰. 螺旋式孔口管道消能装置水力特性试验研究[J]. 科技情报开发与经济,2006,16(22):168 - 170,178.
YAN Yaoxing, GONG Xuying, ZHANG Jie. Experimental study on hydraulic characteristics of energy dissipation device for spiral pipe[J]. Science and Technology Information Development & Economy,2006,16(22):168 - 170,178. (in Chinese)

[13] 宋驰. 外圆筒式水力消能装置结构研究[D]. 西安:西安石油大学,2019.
SONG Chi. Research on the structure of cylindrical hydraulic energy dissipation device[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019. (in Chinese)

[14] 王霞. 转叶螺旋流消能装置的试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.
WANG Xia. Experimental study on rotary vane spiral flow energy dissipation device[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2014. (in Chinese)

[15] 喻黎明,刘凯硕,韩栋,等. 不同工况下 Y 型网式过滤器流场数值模拟分析[J]. 农业机械学报,2022,53(2):346 - 354.

YU Liming, LIU Kaishuo, HAN Dong, et al. Numerical simulation analysis of flow field of Y-mesh filter under different working conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):346 - 354. (in Chinese)
[16] 周理强,韩栋,喻黎明,等. 导流片对 Y 型网式过滤器性能的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(12):40 - 46.
ZHOU Liqiang, HAN Dong, YU Liming, et al. Influence of guide plate on performance of Y-mesh filter[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(12):40 - 46. (in Chinese)
[17] CELIK I B, GHIA U, ROACHE P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(7): 078001.
[18] 喻黎明,徐洲,杨具瑞,等. CFD - DEM 耦合模拟网式过滤器局部堵塞[J]. 农业工程学报,2018,34(18):130 - 137.
YU Liming, XU Zhou, YANG Jurui, et al. CFD - DEM coupling simulation of local plugging of mesh filter[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):130 - 137. (in Chinese)
[19] 喻黎明,余兴娇,李娜,等. 不同冲洗措施下迷宫流道灌水器泥沙运行分布机理研究[J]. 农业机械学报,2021,52(7):304 - 312.
YU Liming, YU Xingjiao, LI Na, et al. Sediment distribution mechanism of labyrinth channel irrigator under different flushing measures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(7):304 - 312. (in Chinese)
[20] 高学平,张效先. 水力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
[21] 喻黎明,吴普特,牛文全,等. 迷宫流道转角对灌水器水力性能的影响[J]. 农业机械学报,2009,40(2):63 - 67.
YU Liming, WU Pute, NIU Wenquan, et al. Influence of labyrinth channel angle on hydraulic performance of irrigator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(2):63 - 67. (in Chinese)
[22] 李云开,刘世荣,杨培岭,等. 滴头锯齿型迷宫流道消能特性的流体动力学分析[J]. 农业机械学报,2007,38(12):49 - 52.
LI Yunkai, LIU Shirong, YANG Peiling, et al. Hydrodynamics analysis of energy dissipation characteristics of a zigzag drip labyrinth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(12):49 - 52. (in Chinese)
[23] 张中华,孙修东,谢锦平,等. 微喷灌稳流器流道水沙两相流数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(2):211 - 216.
ZHANG Zhonghua, SUN Xiudong, XIE Jinping, et al. Numerical simulation of water and sediment two-phase flow in flow channel of micro-sprinkler irrigation stabilizer[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2022,40(2):211 - 216. (in Chinese)
[24] 靳春蕾,延耀兴,温会. 转叶式螺旋流消能装置消能效果试验探究[J]. 水电能源科学,2015,33(6):163 - 165,135.
JIN Chunlei, YAN Yaoxing, WEN Hui. Experimental research on energy dissipation effect of rotary vane spiral flow energy dissipation device[J]. Water Resources and Power,2015,33(6):163 - 165,135. (in Chinese)
[25] 邢少博,张金珠,王振华,等. 不同工作压力下穿孔形灌水器内的旋涡作用分析[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(10):1075 - 1080.
XING Shaobo, ZHANG Jinzhu, WANG Zhenhua, et al. Analysis of vortex action in perforated irrigator under different working pressures[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2021,39(10):1075 - 1080. (in Chinese)
[26] 仵峰,刘焕,宰松梅,等. 复合型渐缩-突扩流道水力性能及其消能效果[J]. 黑龙江水利科技,2019,47(3):43 - 48.
WU Feng, LIU Huan, ZAI Songmei, et al. Hydraulic performance and energy dissipation effect of compound shrinking and sudden expansion runner[J]. Heilongjiang Water Science and Technology,2019,47(3):43 - 48. (in Chinese)
[27] 刘焕. 复合型渐缩-突扩流道水力性能及其消能效果[D]. 郑州:华北水利水电大学,2021.
LIU Huan. Hydraulic performance and energy dissipation effect of compound taper-expansion runner[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power,2021. (in Chinese)
[28] 黄肖. 扭面式消能墩在低水头泄水建筑物中的应用[J]. 东北水利水电,2021,39(1):59 - 61,64.
HUANG Xiao. Application of twisted surface energy dissipating pier in low head drainage buildings[J]. Northeast Water Resources and Hydropower,2021,39(1):59 - 61,64. (in Chinese)
[29] 王利科,杨敏杰. 消能墩对泥石流消能作用的模拟研究[J]. 四川水利,2020,41(2):16 - 17,23.
WANG Like, YANG Minjie. Simulation of energy dissipation effect of energy dissipation pier on debris flow[J]. Sichuan Water Resources,2020,41(2):16 - 17,23. (in Chinese)
[30] 王新端,白丹,宋立勋,等. 不同结构滴灌双向流道灌水器抗堵性能对比试验[J]. 农业工程学报,2018,34(14):78 - 85.
WANG Xinduan, BAI Dan, SONG Lixun, et al. Comparative test on plugging resistance of two way drip irrigation irrigators with different structures[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(14):78 - 85. (in Chinese)
[31] 郭霖,白丹,王新端,等. 双向对冲流滴灌灌水器水力性能与消能效果[J]. 农业工程学报,2016,32(17):77 - 82.
GUO Lin, BAI Dan, WANG Xinduan, et al. Hydraulic performance and energy dissipation effect of bidirectional offset flow drip irrigation irrigator[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(17):77 - 82. (in Chinese)
[32] 郭霖. 滴灌双向对冲流灌水器水力特性与流道结构优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
GUO Lin. Research on hydraulic characteristics and flow channel structure optimization of bidirectional offset flow emitter for drip irrigation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2018. (in Chinese)
[33] 张宗孝,郭雷,谭立新. 消能井内消能工直径优化试验[J]. 水利水电科技进展,2008,28(5):54 - 57.
ZHANG Zongxiao, GUO Lei, TAN Lixin. Experiment on diameter optimization of energy dissipating shaft[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources and Hydropower,2008,28(5):54 - 57. (in Chinese)
[34] 张晋锋,王海波,翟静静. 深筒式消能井的冲击压力和管口距研究[J]. 水电与新能源,2022,36(6):8 - 11.
ZHANG Jinfeng, WANG Haibo, ZHAI Jingjing. Research on impact pressure and nozzle distance of deep cylinder energy dissipation well[J]. Hydropower and New Energy,2022,36(6):8 - 11. (in Chinese)
[35] 申正精,楚武利,董玮. 颗粒参数对螺旋离心泵流场及过流部件磨损特性的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(6):58 - 66.
SHEN Zhengjing, CHU Wuli, DONG Wei. Effects of particle parameters on flow field and wear characteristics of flow parts in spiral centrifugal pumps[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(6):58 - 66. (in Chinese)