



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.032

秦武, 李志鹏, 喻哲钦, 等. 消能锥形阀过流状态研究与优化[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 193-198.
QIN Wu, LI Zhi peng, YU Zhe qin, et al. Flow condition study and optimization of energy dissipating fixed cone valve[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 193-198. (in Chinese)

消能锥形阀过流状态研究与优化

秦武^{1,2}, 李志鹏^{1,3}, 喻哲钦¹, 童成彪³, 巨伟¹

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410114; 2. 长沙佳能通用泵业有限公司 长沙 410323; 3. 湖南省特大口径阀门工程技术研究中心, 长沙 410007)

摘要: 消能锥形阀是一种用于中、高水头下的消能控流阀门, 其内部结构设计的好坏直接影响着控流效果。为探究消能锥形阀在不同开度下, 过流流量及内部流场的变化情况。进行了模型试验与CFD数值模拟计算, 试验中发现开度从100%关至85%时出现了流量反而上升、进口压力下降的情况。利用CFD数值模拟的方法对内部流场进行了可视化研究。研究结果表明, 在全开状态下锥形阀内部存在以下问题: 过强的局部高速高压区域、低速流动死区范围过大、涡流区过度影响高速过流部分。并对锥形阀进行了一定的结构改进, 优化了其内部流场情况。

关键词: 锥形阀; 试验; CFD; 开度; 过流能力; 内部结构; 优化设计

中图分类号: TV 131.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0193-06

Flow condition study and optimization of energy dissipating fixed cone valve

QIN Wu^{1,2}, LI Zhi peng^{1,3}, YU Zhe qin¹, TONG Cheng biao³, JU Wei¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Changsha Canon general pumps industry co., LTD, Changsha 410323, China;
3. Hunan Engineering Research Center of Ultra-large Diameter Valves, Changsha 410007, China)

Abstract: Energy dissipating fixed cone valve is used under medium or high water head, and the design of its internal structure directly affects its flow control efficiency. To study the changes of the valve's internal flow field and flow rate when the closed switch is opened to varied degrees, the writer conducted model tests and CFD numerical simulation computation, and found that when the switch was turned down from 100% open to 85% open, the flow rate increased and pressure around the inlet dropped. The writer also conducted visualization research on the valve's internal flow field through CFD numerical simulation, and the results showed the following problems inside the valve when the switch was fully open: excessively high speed and high pressure in partial areas, extensive low flow stagnation areas, excess impact of eddy area on the high speed flow area. Finally, the writer optimized the valve's structure and its internal flow field.

Key words: fixed cone valve; test; CFD; opening degree; flow capacity; internal structure; optimal design

泄水消能建筑是水利水电工程建设中的重要组成部分。在水利水电工程中, 泄水消能建筑的建设成本达到了总建设成本的三成以上^[1], 所以优化泄水消能设备使其在相同的条件下达到更好的使用效果具有重要的工程应用价值。消能锥形阀一般应用

于较高水头、大流量下的消能控流工作, 其内部流场较为复杂, 通过内部消能结构催生高速流撞击、漩涡、摩擦、扩散等现象, 以此将过大的出流能量转化消除^[2,3]。魏文礼等人研究并提出了利用嵌套式结构提高锥形阀的消能效果^[4,5]。Dallin Stephens,

收稿日期: 2016-03-17 修回日期: 2016-05-30 网络出版时间: 2017-01-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.1017.022.html>

作者简介: 秦武(1981-), 男, 湖南南县人, 工程师, 主要从事流体机械及流体动力工程方面研究。E-mail: chn_loong@sina.com

通讯作者: 李志鹏(1962-), 男, 云南邱北人, 教授, 主要从事流体机械及流体动力工程方面研究。E-mail: 1379448@163.com

Michael C. Johnson 等人为提高锥形阀的性能效果, 创新地在锥形阀内部增加了金属罩部件。^[67] 李颖, 杨东升在对内流式锥形阀的流场情况进行了仿真计算, 并对结构进行了优化^[8-9]。郑淑娟等人对锥形阀内部流场进行了预测得到了更精确的液动力计算公式^[10-12]。Ji Kang Bo 在应用研究中验证了流固耦合的多学科联合优化设计在锥形阀领域的可行性^[13]。国外科研团队则通过大量的试验研究认为消能锥形阀可以对高水头出流达到 70% 以上的消能效果^[14-15]。兰州理工大学闵为等人利用流固耦合的模拟方法得出合理选取半锥角度可以改善锥形阀的稳定性、优化出流条件^[16-17]。Jalal M. Jalil 等对锥形阀数值研究和试验进行了联合研究, 对阀芯位置、涡流半径及强度等对锥形阀整体性能影响进行了探讨^[18]。Kelly Roes 则通过研究认为消能锥形阀内部结构尺寸与部件的选择设计对消能锥形阀的整体消能效果起到关键作用^[19]。

消能锥形阀除了消减上游过大水头能量外还担负着一定的流量调节作用。文本目的在于探究不同开度下消能锥形阀过流流量、进出口压力及内部流场的变化情况; 并尝试对其进行优化改进。研究中, 先进行不同开度下的锥形阀模型试验。再利用 CFD 数值模拟的手段进一步对内部流场进行分析, 并根据分析结果对锥形阀进行一定的优化改进。

1 锥形阀模型试验

1.1 试验模型与装置

本次试验模型以某大型阀门企业提供的消能锥形阀为原型制作。根据试验条件对原型进行一定比例的缩小处理。原型锥形阀进口直径为 2.5 m, 缩小模型的几何比例尺为 30。本次搭建了完整的水力工程试验台进行试验工作, 使模型与原型满足弗劳德数相似, 其模型流速比例尺为 5.48, 流量比例尺为 4 929.50。

图 1 为消能锥形阀模型内部结构情况, 为了更清楚地表示锥形阀开度定位情况, 锥形阀内部只绘制出锥形阀芯与启闭套筒。该消能锥形阀通过启闭套筒在水平方向的前后移动来改变开度的大小。图 1L 中是启闭套筒最大开启行程, L1 是当前位置的开启行程。当套筒关闭至与锥形阀芯相贴合时, 达到对过流的完全截止, 即 $L1=0$; 同时, 启闭套筒也可开启至最大行程开度, 即 $L1=L$ 。并将消能锥形阀的行程开度定义为 $K=L1/L \times 100\%$ 。

试验模型采用高强度的有机玻璃材料制作, 以更好的观察锥形阀内部的流动情况。在试验装置

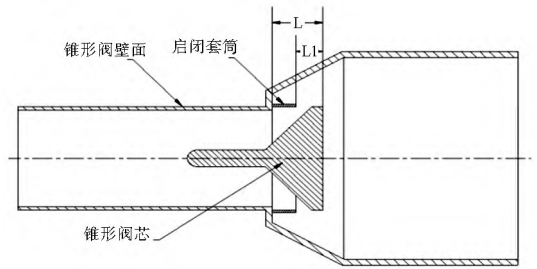


图 1 消能锥形阀内部结构

Fig. 1 Structure of energy dissipating fixed cone valve

本上, 次试验采用高位供水水箱提供稳定的恒压进流。在锥形阀前后连接了测压管测量其进出口压力值的大小。并在试验装置出流水槽处设置了量水三角堰。模型试验装置见图 2。

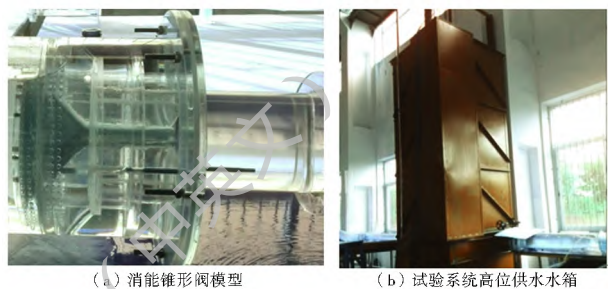


图 2 锥形阀模型与高位供水水箱

Fig. 2 Model of energy dissipating fixed cone valve and head water tank

1.2 试验过程

本次试验根据该原型锥形阀运行条件设置了 182 cm、133 cm 两组水箱试验水位, 100%、85%、70%、55%、40% 五组不同的锥形阀开度。试验中先调整高位水箱内部隔板的高度以设置水箱水位, 再缓慢打开出流阀门。试验从 100% 开度开始进行, 等待流态稳定后记录锥形阀前后测压管的压力大小, 及量水三角堰的水位高度。每组试验均进行 5 次采集取其平均值。完成后单组开度试验后, 关小阀门开度, 采用相同方法依次进行 85%、70%、55%、40% 开度的水力试验。

1.3 试验结果与分析

完成全部十组试验后分析锥形阀变开度下各参数的变化趋势。将开度与流量、压力联系进行数据分析, 绘制成相应的变化曲线。具体试验结果见表 1, 图 3 为在不同开度下, 消能锥形阀流量的变化折线图。

从试验结果总体趋势来看, 在两种不同水头试验下随着开度的减小锥形阀的过流流量也随之减小, 锥形阀前后压力则均有所上升。但在 100% 至 85% 开度时, 两组试验均出现了流量反而变大, 进口

表1 锥形阀开度试验结果

Tab. 1 Test results at different opening degrees

水箱水头 / cm	开度 (%)	进口压力 / Pa	出口压力 / Pa	流量 / (m ³ · s ⁻¹)
182	100	6 273	2 152	0.016 9
182	85	5 568	2 358	0.017 9
182	70	7 053	2 305	0.016 4
182	55	14 578	2 558	0.015 3
182	40	16 718	3 003	0.012 0
133	100	5 803	2 478	0.014 0
133	85	5 268	2 674	0.014 8
133	70	6 468	2 558	0.013 6
133	55	8 988	2 906	0.011 2
133	40	11 383	3 151	0.008 7

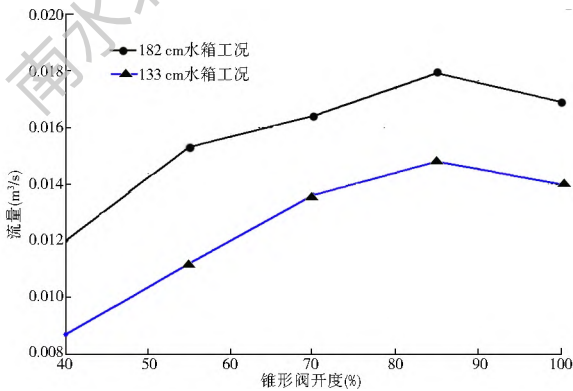


图3 变开度下流量变化曲线

Fig. 3 Curve chart of flow at different opening degrees

压力降低的反常现象。故认为该锥形阀存在有全开状态下过流能力不佳的问题,且该变化趋势在实际应用中将对压力流量的调节产生不利影响。为了探究该现象发生的原因并优化消能锥形阀的过流条件。在后续研究中采用 CFD 数值模拟的方法对不同开度下锥形阀内部流场进行了相同工况条件下的数值模拟分析。

2 数值模拟分析

2.1 三维建模

本次采用 Pro/E 软件进行锥形阀三维模型的建立。三维建模是为 CFD 流体计算提供几何计算域,为了保证模拟与试验的一致性,三维建模尺寸采用与试验模型相同比例尺进行缩小。本次研究的消能锥形阀,内部部件包括:锥形阀芯、环形孔套、启闭套筒。建模过程中先建立锥形阀整体流道的几何模型。再分别建立启闭套筒、阀芯、孔套等内部结构,通过模型切除的操作从整体流道中切除为非流通壁面区域的内部部件,即得到所需要的三维计算域。

2.2 网格划分与参数设置

网格划分是 CFD 模拟计算中质量要求最严格

的一步,所建网格质量的好坏将直接关系到是否能够得到准确的收敛结果。本次研究采用 ANSYS 软件组中的 ICEM 软件进行网格划分。由于锥形阀内部结构复杂,故采用几何适应性更好的非结构化网格进行划分。同时,为了更好的体现锥形阀内部几何结构,计算网格尺寸设定为 0.19。全开状态下模型网格数量为 1150 万,小开度下模型网格数量略微减少,40% 开度下网格数量为 1 000 万。经网格检查其质量均在 0.35 以上,符合本次研究的计算精度要求。消能锥形阀三维内部结构及网格划分情况见图 4。

完成网格划分后,在 CFX 软件中进行模拟计算及计算结果的后处理分析。CFX 同属于 ANSYS 软件组,具有计算精度高、收敛效果好及计算速度快等优点。模拟参数设置的关键在于确定合适的边界条件进行数值计算。本次模拟采用收敛效果较好的进口速度与出口压力来进行设置,内部套筒、阀芯及孔套等结构则设置为非流通的 wall 边界。完成设置后进行迭代计算,均在 500 步以内得到收敛结果。

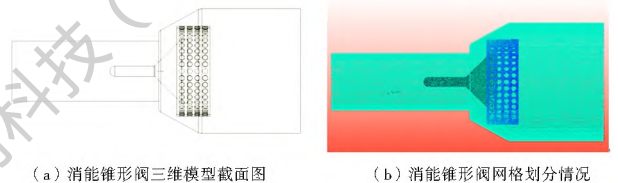


图4 锥形阀内部结构及网格划分情况

Fig. 4 3 D model and grids of fixed cone valve

2.3 模拟结果及误差分析

本次模拟采用速度进口和压力出口边界设置,进口压力是模拟关键的结果值,故可以通过对比分析数值模拟与模型试验中进口压力值,进行模拟计算精度的验证。表 2 为模拟精度验证结果,试验与模型进口压力对比见图 5。

表2 模拟精度验证结果

Tab. 2 The verification results of simulation accuracy

水箱水头 / cm	开度 (%)	模拟进口压 / Pa	试验进口压 / Pa	误差 (%)
182	100	6 367	6 273	1.50
182	85	5 606	5 568	0.68
182	70	7 405	7 053	3.57
182	55	13 610	14 378	5.34
182	40	15 806	16 718	5.46
133	100	5 692	5 803	1.91
133	85	5 056	5 268	3.91
133	70	6 314	6 468	2.38
133	55	8 482	8 988	5.63
133	40	10 737	11 383	5.68

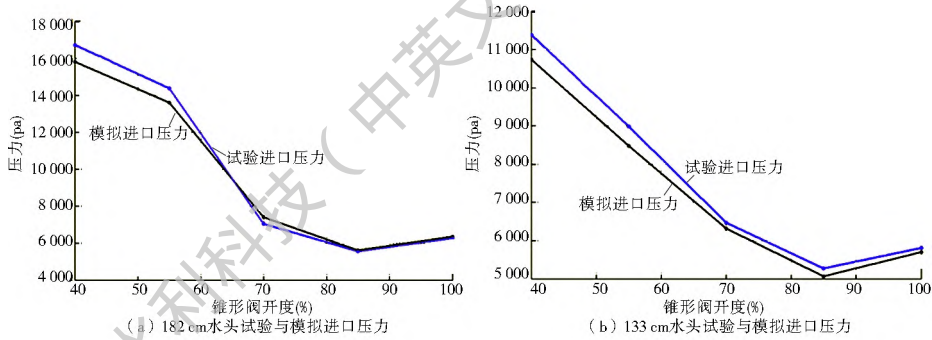


图 5 试验与模拟进口压力对比

Fig. 5 Comparison between tested and simulated inlet pressures

从验证结果可以看出, 在较大开度下数值模拟具有很高的精度, 70% 以上开度误差小于 5%, 在 55% 和 40% 的小开度下误差上升到 5% 左右。从折线图看, 模拟随开度改变压力变化的趋势与试验一致。通过对 CFD 模拟与模型试验方法、过程进行分析, 得出可能造成误差的原因有以下几点:

首先, 在小开度下由于流道对过流更强的阻碍作用, 造成内部流场的进一步复杂化, 对数值模拟的准确计算造成了困难。其次, 试验模型在加工制造上难免会与理想模型存在误差。其三, 试验与模拟本身均存在难以避免的误差。例如在试验中实验仪器与试验人员观察计量上存在不可避免的误差; 同时 CFD 数值模拟作为一种计算机仿真手段也难以对真实情况实现百分百准确的模拟。

综上所述, 由于本次研究的目的在于探究 100% 至 85% 开度时流量压力的反常变化原因, 且试验与模拟在 100%、85%、75% 三个开度下均只有较小的误差。同时, 从整体来看模拟所得结果变化趋势也与试验一致, 故认为该次模拟结果具有良好的研究可靠性。

3 分析与优化建议

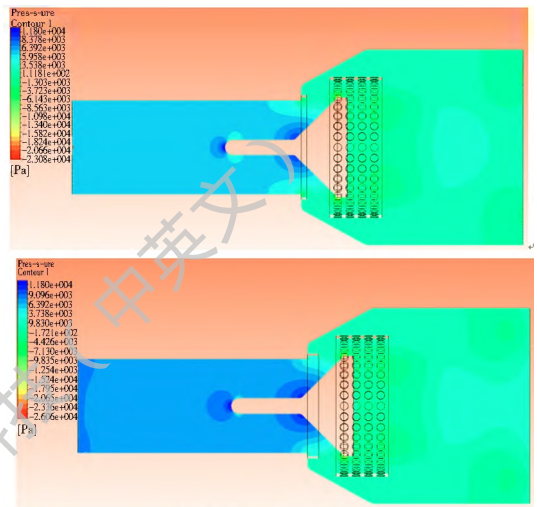
3.1 模拟结果分析

研究为探究流量压力曲线出现反常变化的原因, 对 100%、85%、70% 三个开度下内部流场的 CFD 模拟结果进行对比分析。重点分析锥形阀内部压力和速度分布及流线变化情况, CFD 模拟计算结果见图 6, 其中 182 cm 水头与 133 cm 水头工况下的压力、流线分布变化相似, 故文中只给出 182 cm 水头工况组模拟图。

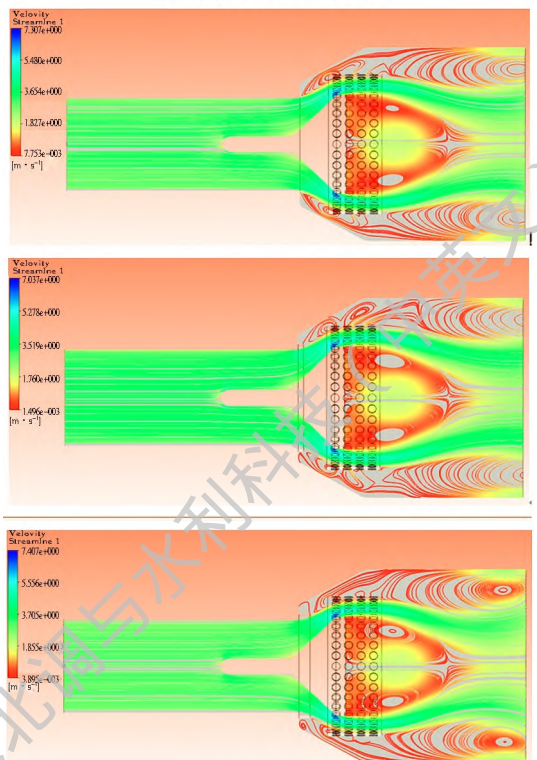
分析得出以下几点结论。

(1) 消能锥形阀各开度下内部压力分布趋势基本一致。由于过流流道的突然改变使得在阀芯头部及锥形变形处出现高压区域。但是 85% 开度时锥形阀内部最高压力均小于 100% 及 70% 开度, 认为

锥形阀内部结构在 85% 时对过流流态的影响更小。



(a) 锥形阀内部压力分布情况



(b) 锥形阀内部流线情况

图 6 锥形阀内部流场模拟结果

Fig. 6 Simulated diagram of internal flow field

(2) 消能锥形阀各开度下速度分布趋势基本一致。流场在流道收缩处出现了局部的高速现象, 流速的突变以及高速流的撞击将影响整体流动状态。可以看出在 85% 开度时锥形阀内部最大速度均小于 100% 及 70% 开度, 认为 85% 开度时实际的流通状态更好。

(3) 消能锥形阀大致流线变化情况相似。可以发现在阀芯后侧和周侧出现了几处涡旋区域, 且伴随有流速极低的流动死区, 这都将对流体的通过性能产生影响。并可看出 100% 与 70% 开度时, 旋流与低速流动死区范围更大, 其对流道中部高速流动区域的通过性将产生更大阻碍作用。

3.2 锥形阀优化建议

在锥形阀试验与模拟研究中, 均出现 100% 至 85% 开度下出现了反常的流量上升和阀前压力下降现象。这在实际工程应用中将对流量的控制调节产生不利影响。故研究团队根据锥形阀设计经验及模拟分析结果对该类型消能锥形阀进行了一定的内部结构优化, 在环形孔套后部增加了锥形孔套部件以改善其内部流场情况。

为验证优化后模型是否改善了在全开状态下的内部流场情况, 对改进后模型进行了相同工况下的 CFD 数值模拟计算, 并以之与优化前模型模拟结果进行对比分析。模拟边界条件采用与优化前模型相同的进口速度与出口压力进行设置。从模拟结果可以看出, 优化后模型有效的降低了局部最大压力; 同时减小了阀芯后侧涡旋区域与流动死区的范围, 使影响较大的大面积涡旋区域转化为面积和影响较小的多个小涡旋区域, 降低了其对高速过流的阻碍作用。模拟对比分析结果见表 3 与图 7, 模拟结果同样以 182cm 水头工况为例。

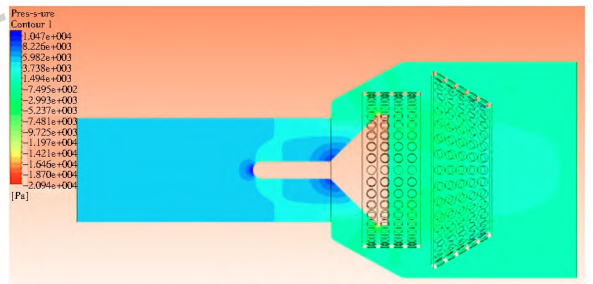
表 3 锥形阀优化前后模拟结果

Tab. 3 Simulation results before and after optimization

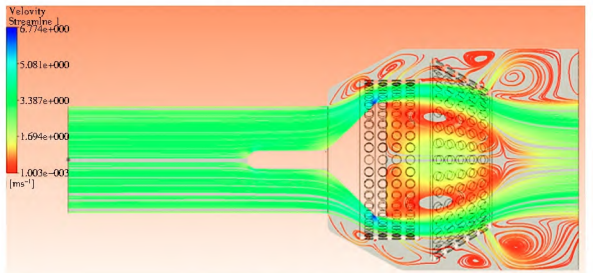
优化情况	133 cm 组 最大流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	182 cm 组 最大流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	133 cm 组 最大压力 /Pa	182 cm 组 最大压力 /Pa
优化前	5.5	6.6	8 723	12 260
优化后	5.0	5.8	7 644	9 058

4 结论

本次为探究消能锥形阀在不同开度下过流流量及内部流场的变化情况。进行了水力模型试验和 CFD 数值模拟计算。试验中发现开度从 100% 关至 85% 时出现过流流量上升和进口压力下降的变化情况, 这在实际工程应用中将对过流调节产生不利影响。故利用 CFD 数值模拟的方法对不同开度下内



(a) 内部压力分布云图



(b) 流场流线情况

图 7 优化前后锥形阀模拟结果

Fig. 7 Simulation results before and after optimization

部流场进行了数值模拟分析, 分析结果认为在全开开度下锥形阀内部流场存在以下问题: 过强的局部高压高速区域、低速流动死区过大、涡流区过度影响高速过流部分。并对锥形阀进行了一定的结构改进, 降低了最高压力、最大流速, 减小了流动死区及涡流区对过流能力的影响, 优化了其内部流场情况。

参考文献:

参考文献 (References):

- [1] 高季章, 董兴林, 刘继广. 生态环境友好的消能技术-内消能的研究与应用[J]. 水利学报, 2008(10): 1176-1182, 1188. (GAO Ji zhang, DONG Xing lin, LIU Ji guang. Research and application of eco friendly energy dissipation technology internal energy dissipation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008 (10): 1176-1182, 1188. (in Chinese)) DOI: 0559-9350(2008) 10-1176-07
- [2] 陈千文, 易忠有. 阿萨汉一级水电站消能阀选型设计[J]. 水力发电, 2012(3): 18-20, 57. (CHEN Qian wen, YI Zhong you. Selection of fixed cone valve for Asahan NO. 1 Hydropower Station [J]. Water Power 2012(3): 18-20, 57 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2012.03.006.
- [3] 周琦, 杨校礼, 傅宗甫等. 山区弯道水流特性及消能选型[J]. 水电能源科学, 2013(1): 76-78, 91. (ZHOU Qi, YANG Xiao li, FU Zong fu, et al. Study on Characteristics and Energy Dissipation of Mountainous Bend Flow [J]. Water Resources and Power, 2013 (1): 76-78, 91. (in Chinese)) DOI: 1000-7709 (2013) 01-007-04
- [4] 魏文礼, 李超. 锥形阀附近水力特性的三维数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2011(1): 108-112. (WEI Wen li, LI Chao. 3D numerical simulation of hydraulic characteristics around fixed cone valve [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,

- 2011(1): 108-112. (in Chinese) DOI: 1007-4708(2011)01-0108-05
- [5] 魏文礼, 吕彬, 刘玉玲. 消能锥形阀结构改进的三维数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2013(1): 109-114, 151. (WEI Wen li, LV Bin, LIU Yu ling. Research on the improvement of structure for energy dissipation fixed cone valve by 3D numerical simulation[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013(1): 109-114, 151. (in Chinese) DOI: 1000-4939(2013)01-0109-06
- [6] Dallin Stephens, Michael C Johnson, Zachary B Sharp. Design Considerations for Fixed Cone Valve with Baffled Hood[J]. Journal of hydraulic engineering, 2012(2): 204-209. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000496
- [7] Michael C. Johnson, M. ASCE, Rajesh Dham, M. ASCE. Innovative Energy-Dissipating Hood[J]. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 2006(8): 759-764. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:8(759)
- [8] 李颖, 杨东生. 锥阀流场的数值模拟与结构优化[J]. 科技技术与工程, 2011(21): 5180-5183. (LI Ying, YANG Dong sheng. Numerical simulation and structure optimizing for the flow of poppet valve[J]. Science Technology and Engineering, 2011(21): 5180-5183. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2011.21.050
- [9] 杨东升. 内流式锥阀流场的数值模拟与结构优化[J]. 管道技术与设备, 2012(3): 35-37. (YANG Dong sheng. Numerical simulation and structure optimizing for the inward flow filed of poppet valve[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2012(3): 35-37. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9614.2012.03.013.
- [10] 郑淑娟, 权龙, 陈青. 阀芯运动过程液压锥形阀流场的 CFD 计算与分析[J]. 农业机械学报, 2007(1): 168-172. (ZHENG Shu juan, QUAN Long, CHEN Qing. Analysis and CFD simulation of the flow filed in a moving poppet valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007(1): 168-172. (in Chinese)
- [11] 郑淑娟, 权龙. 锥台型液压锥形阀过流面积的 CFD 可视化计算[J]. 农业机械学报, 2014(4): 327-333. (ZHENG Shu juan, QUAN Long. CFD visual analysis on cross section of truncated poppet valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014(4): 327-333. (in Chinese) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.052
- [12] 郑淑娟, 权龙, 王文全. 平底锥形阀内流工况稳态液动力的研究[J]. 液压与气动, 2014(8): 55-59, 108. (ZHENG Shu juan, QUAN Long, WANG Wen quan. Steady flow force of truncated poppet valve with convergent flow[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014(8): 55-59, 108. (in Chinese)
- [13] Ji Kang Bo. Multidisciplinary Design Optimization of a Hydraulic Poppet Valve Considering Fluid Solid Coupling[J]. Advanced Materials Research, 2011, Vol. 1377 (308), pp. 559-562.
- [14] Power-Bulk Solids Group. Cone valve discharger[J]. Powder Bulk Solids. 2003, 21(1) 167-172.
- [15] Bulk Solids Today Group. Cone Valve Silo Dischargers[J]. Bulk Solids Today. 2004, 10(45): 112-117.
- [16] 闵为, 王峥嵘. 不同阀座半锥角条件下的锥阀阀口流场仿真[J]. 兰州理工大学学报, 2012(6): 49-52. (MIN Wei, WANG Zheng rong. Flow field simulation of valve port with different half conical angles of valve seat[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012(6): 49-52. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1673-5196.2012.06.011.
- [17] 闵为, 翼宏, 王峥嵘, 等. 单级压力调节阀的阻尼孔射流响应特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2014(6): 80-85. (MIN Wei, YI Hong, WANG Zheng rong. Orifice jet response characters in pressure regulating valve[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014(6): 80-85. (in Chinese) DOI: 10.6752/xjtuxb201406014
- [18] Jalal M Jalil, Sabah T Ahmed, YI Qinxue, et al. Experimental and numerical investigation of fluid flow of truncated conical poppet valve[J]. International Journal of Fluid Power, 2015, 16(1): 25-34
- [19] Kelly Rose. Cone improvements: Advances in cone valve technology gives new levels of IBC containment[J]. Solids & Bulk Handling. 2009, 35(7): 156-160