

多孔淹没紊动射流三维流场模拟及消能分析*

芦绮玲^{1,2}, 陈刚¹, 黄君瑶¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西西安 710048; 2 山西省水利水电科学研究院, 山西太原 030002)

[摘要] 采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型, 结合万家寨引黄入晋工程第 1 区段压力管道出口多喷孔淹没射流消能, 进行了三维数值模拟研究, 对不同喷孔个数时流场的时均特性和紊动特性进行了比较, 分析讨论了多孔淹没射流进入消力池后的水流运动规律与消能机理。结果表明, 射流动量的分散程度是决定消能效果的关键, 在保持孔口总面积不变的条件下, 随着喷孔数的增加, 消能效果显著提高, 但当喷孔数增加到 60 个时, 其变化显著减缓。多喷孔射流进入消能水体后, 射流水股与周围水体接触面积积极大增加, 在距离喷孔出口 0.41 m 左右时射流能量迅速衰减, 加之各水股间的相互卷吸、掺混, 形成了多个强剪切消能区, 消能率较高。同时, 由于各漩滚的相互作用, 可有效地减小其对消力池固壁的冲刷。

[关键词] 多孔淹没射流; 三维流场; 紊流数值模拟; 消能机理

[中图分类号] TV134.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)05-0217-06

Numerical simulation and analysis on energy dissipation of 3-D flow field of multiple submerged jets into plunge pool

LU Qi-ling^{1,2}, CHEN Gang¹, HUANG Jun-yao¹

(1 College of Hydraulic and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 Shanxi Institute of Water Resources and Hydropower Research, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

Abstract: The RNG $k-\epsilon$ model is applied to simulate the 3-D flow field on energy dissipation of multiple jets for pipe outlet of Wanjiashai Yellow River Diversion Project (YRDP) in this paper. A contrastive study of the time-averaged and turbulent features of flow field among different numbers of nozzles has been summarized, and the flow structure and mechanism of energy dissipation of this kind have been also revealed by this numerical model. It is found that the effect of energy dissipation is strongly related to the dispersivity of the jet momentum and it remarkably improves with the increase of the number of nozzles, but the variation slows down obviously as the number of nozzle increases to 60. The results show that the entrainment and mixing of the multiple jets increase among multiple jets, with the range of 0.41 m far from the nozzles the jet energy declines rapidly, forms several strong shear flows, and enhances the effect of energy dissipation. At the same time, the effect of erosion on plunge pool wall is reduced due to the interaction among eddies.

Key words: multiple submerged jets; 3-D flow field; numerical simulation of turbulent flow; mechanism of energy dissipation

目前,用于分析和认识多孔紊动射流问题的方法主要有理论分析、试验研究和数值模拟。试验研

究方法能综合考虑影响流动的各种因素,虽然试验测量有投资大、试验结果的精度和可靠性易受测量

* [收稿日期] 2006-09-18

[基金项目] 山西省科学技术厅科技攻关项目(041086)

[作者简介] 芦绮玲(1965-),女,山西万荣人,教授级高级工程师,博士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。
E-mail: lu_qiling@163.com

仪器和环境的影响等问题,但对于复杂的多孔紊动射流问题,它仍然是分析问题的重要途径。数值模拟分析即计算流体力学(CFD)的方法具有投资小和精度易于提高等特点,且随着计算机技术的迅速发展、紊流数学模型理论的广泛应用和计算方法的不断完善,数值模拟也已成为研究流体力学问题的一条重要途径。

多孔紊动射流是流体运动的一种重要类型,对多孔紊动射流流场结构、流动机理进行研究即具有重要的学术意义,同时也对解决工程应用中存在的许多问题具有一定的指导作用。已有许多学者对多孔紊动射流进行了研究,Knystautas^[1]对一系列均匀排列圆孔射流混合后的流动进行了研究,但对混合区未作细致的探讨;Krothapalli 等^[2]对一系列均匀排列的矩形射流进行了研究,假定混合后按二维处理,给出了一些较为理想的结果,但对各孔射流之间的相互影响未作探讨;Roy 等^[3]也利用 $k-\epsilon$ 模型并结合 3 种差分格式对三维定常横向紊动射流流场进行了计算,数值计算结果显示出了二次流结构,得到了多股射流情况下的不可压流场,并给出了理想射流孔的位置以及入射角度越小冷却效率越高的结论;戴光清^[4]用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型对水垫塘内多股冲击射流的流场进行了数值模拟研究,并考虑了射流入射间距、冲击角及水股厚度的影响等;槐文信等^[5]采用三维数学模型对半无限空间的多孔射流进行了数值预报,对横流与射流、射流与射流的相互作用及射流中出现的分叉现象等规律性进行了分析,给出了其宏观量的规律;杨忠超等^[6]采用 VOF (Volume of Fluid)法和 RNG $k-\epsilon$ 模型,结合向家坝水电工程对多股多层水平淹没射流进行了三维数值模拟,将计算结果与试验值进行了对比,发现二者吻合较好;同时还分析讨论了多股多层射流进入消力池后的水流结构与消能机理,表明数值模拟方法是研究消力池运动规律及消能机理的有效途径;程勇等^[7]采用三维标准 $k-\epsilon$ 湍流模型详细模拟了燃烧室火焰筒内外的等温流场,研究了火焰筒内多孔径向射流的流场特性,并比较了不同环向、径向射流流量对火焰筒内流场的影响。

由于多孔淹没射流消能流场紊动剧烈,流态相当复杂,现有的测试手段很难详细了解内部的漩涡结构和强度,而数值模拟技术则能弥补物理模型测试手段的不足,能够得到详细的流场水力特性,如特征流速及其分布、涡量强度和分布、紊动能分布以及紊动能耗散率分布,从而为衬砌抗冲防护及结构稳

定性分析提供了有力的科学依据。同时,采用数值模拟手段研究多孔射流消力池中的流场和消能特性,具有优化体形方便、节约财力、节省时间、不存在比尺效应等优点,因此是必要和可行的。本文结合山西省万家寨引黄入晋工程第 1 区段流量调节阀室压力管道出口多喷孔射流消能进行了三维数值模拟研究,比较了不同喷孔个数以及喷孔不同布置方式对消能的影响,探求了优化该消能工的计算方法,以期压力管道出口的消能设计提供参考。

1 数学模型

如图 1 所示,直径为 1.372 m 的输水管道伸进消力池内,后接 90° 的进口肘管,肘管后接一段竖管,竖管锚固在消力池底板上。从管底往上取 1.372 m 在管壁上钻孔。水流就通过竖管周围所开的圆孔喷出。由于多孔射流的相互作用,消力池内水流紊动剧烈并伴有若干漩涡与回流,射流扩散规律及紊动特征远非用经典的淹没自由射流理论所能正确解释,其精确的数学描述方程是 Navier-Stokes 方程^[8]。为了更好地适应高速射流强涡漩场应变率高、流线弯曲度大的特性,本文采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型^[9],其系统控制方程包括连续方程、动量方程和 $k-\epsilon$ 方程。对控制方程采用非结构网格和有限体积法进行离散,用 SIMPLE 算法进行压力校正,离散所得的代数方程组采用多重网格法和点隐式高斯-塞德尔迭代方法相结合求解^[10]。

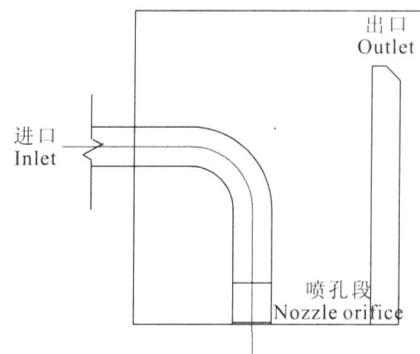


图 1 数值计算模型图

Fig. 1 Computational model

本计算进口的边界条件按流量大小换算成流速给定;出口位于溢流堰顶后 1 m 处,可给定在出流边界上的法向梯度为零,即 $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$ (其中 u, v, w 分别为 x, y, z 3 个方向的流速, k 是紊动能, ϵ 是耗散率);在固壁上给定法向的速度为零和无滑移条件,近壁区采用标准壁函数法来处理。

在网格(采用非结构化网格)划分时对喷孔表面单独划分网格,以保证喷孔内有足够的网格节点个数。

2 自由面处理

现在常用的处理自由面的方法有刚盖假定法、弹性盖法、高度函数法(HOF)、标记网格法(MAC)和体积率函数法(VOF)等。本文主要对弹性盖法和 VOF 法的计算结果进行比较。

弹性盖法首先是按“刚盖”近似计算^[11],后将计算网格扩展至“刚盖”以上,对“刚盖”以上部分按冻结区处理,即通过采用大数值源项使控制体中各流场特征值在运算过程中始终保持为零;随后将“刚盖”换作“弹性盖”,由“刚盖”近似初值计算出的“弹性盖”变形作为近似水面;按此近似水面重新调整冻结区域,计算新的流场。按此步骤计算,直至表面压力消失,此时的水面位置和流场才符合真实情况。

体积率函数法(VOF)是由 Hirt 等^[12]1981 年提出的,是目前处理自由面时使用最多的也是较理想的一种方法,其基本思想是假定在同一单元中,水或气体的混合体具有相同的速度,即服从同一组动量方程,但它们的体积分数在整个流场中都作为单独变量。由于 VOF 法追踪的是网格中的流体体积,而不是流体质点的运动,因而具有容易实现、计算量小和精度高等优点,并且可以处理自由面折叠、自由面入水等强非线性问题,既具有以前常用于处理自由面问题的 MAC 法的优点,又克服了 MAC 法要求计算机内存高和计算时间较长的缺点,同时也克服了高度函数法无法处理自由表面是坐标多值函数的

不足,成为目前自由表面处理的主流方法,近年来有快速发展的趋势。

图 2 是用弹性盖法和 VOF 法模拟 60 个孔的自由水面时得到的水面线分布图(图中 z 表示 z 轴方向)。从图 2 可以看出,中线上的水面线吻合较好;左右两侧的水面线在消力池的中部,即 x 轴方向 $-2 \sim 2$ m 区间基本一致,该区间以外的水面线有一些差异。这可能是由于水面的翻滚造成的,但最大误差也在 2% 以内,因此总体来讲两种方法的水面线吻合较好。

从水面流速分布图(图 3)可见,两种方法模拟计算得出的流动趋势和流场结构均比较吻合,只是 VOF 法模拟的自由水面能看到水面的起伏,而弹性盖法固定了水面的形状,两者稍有不同,所以本文的自由表面处理采用较为简单的弹性盖法是合理的。

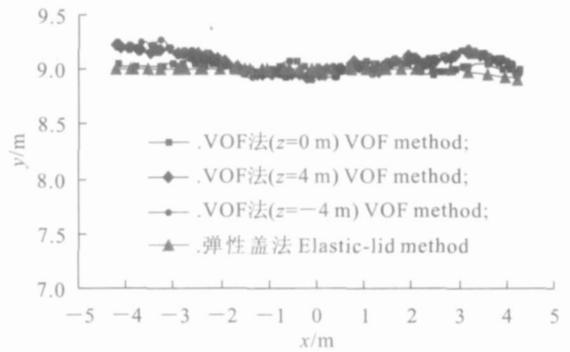


图 2 60 个孔时 VOF 法和弹性盖法的水面线比较
Fig. 2 Comparison of surface obtained by volume of fluid method(VOF) and elastic-lid method in 60 nozzles

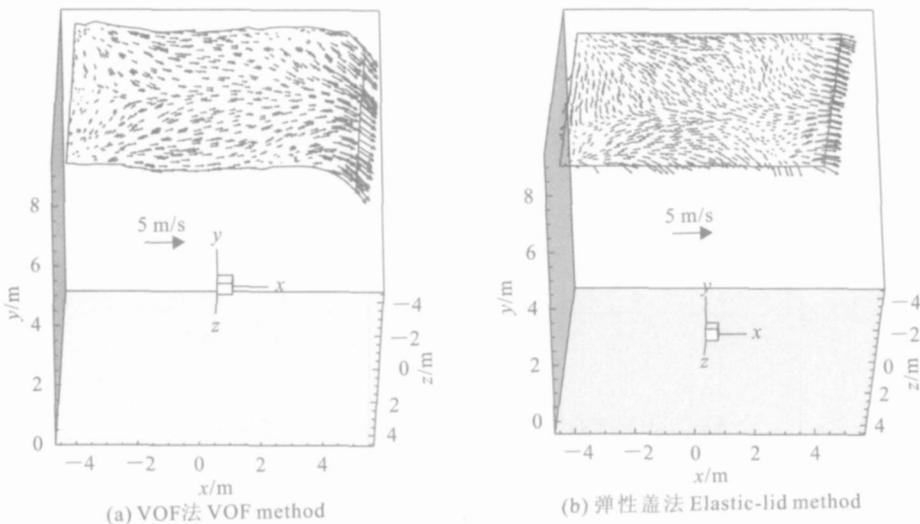


图 3 60 个孔时水面流速的 VOF 法和弹性盖法计算
Fig. 3 Velocity of water surface of 60 nozzles by elastic-lid method or VOF method

3 算例验证

由于多喷孔射流消能的试验数据比较缺乏,为了检测数值模拟所选择的紊流模型及其算法对不可压等密度有限空间射流流场模拟的精确性,本文采用文献[13]的试验数据验证了计算结果的可靠性。在出口流量 Q 为 7.415 、 9.951 和 $10.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 的条件

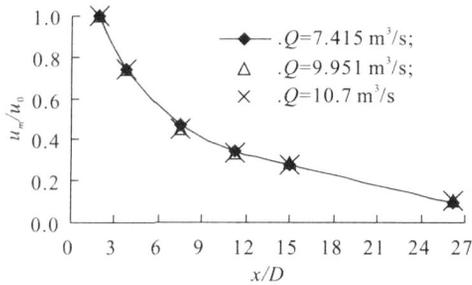


图 4 数值模拟四孔射流轴心流速的无量纲分布
Fig. 4 No-dimensional axes velocity distribution of four jets in numerical simulation

4 数值计算结果与讨论

为了保证进口处的总能量不发生变化,以便进行不同工况的消能比较,保持喷孔总的出流面积不变,变化喷孔的个数、直径和布置方式,在流量一定的条件下进行了几种工况的数值模拟。通过模拟比较了不同喷孔个数下的流场分布和消力池内的消能效果等水力特性。

下,对 4 孔的各个工况进行模拟计算,以无量纲 u_m/u_0 和 x/D 作为纵坐标和横坐标 (u_m 为射流轴心流速, u_0 为喷孔出口处流速, x 为横坐标, D 为喷孔的直径) 作图,其数值计算结果见图 4,试验值与数值模拟值的比较见图 5。从图 5 可以看出,试验值与计算值基本吻合,说明数值计算结果可靠,所采用的计算方法合理可行。

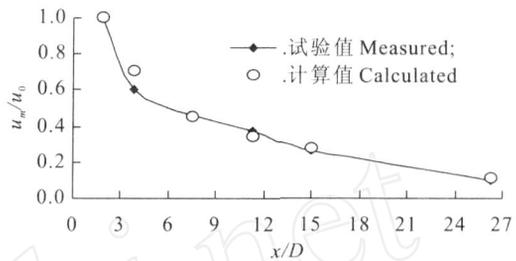


图 5 轴心流速无量纲分布计算值与试验值的比较
Fig. 5 Comparison of the no-dimensional axes velocity between calculated and measured values

4.1 时均流速沿轴线的变化规律

由于喷孔沿管壁均匀分布,对任一列喷孔的掺混卷吸以及速度变化的研究对整个流场来讲均具有代表性。为此,以纵剖面 $x=0$ 断面上的流速分布为例,数值计算所得射流中心轴线上时均流速的沿程变化曲线如图 6 所示(图中 u 表示时均流速, z 表示轴线距离)。

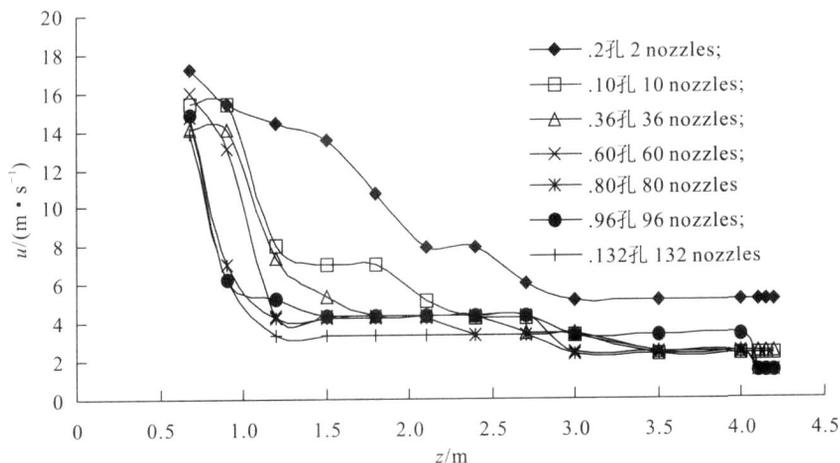


图 6 不同喷孔个数下射流中心轴线时均流速的变化

Fig. 6 Axes velocity in different number of nozzle orifice

从图 6 可以看出,射流从喷孔喷出后,速度迅速衰减,当减小到一定程度后,速度变化缓慢,曲线趋于平坦,这与双孔射流的流动特性相似。孔数分布

越密,速度衰减越快,这是由于在孔口面积和分布范围一定的条件下,孔数越多,射流之间以及射流与周围水体之间的掺混卷吸程度就越强。但当孔数增加

到 60 个时,孔口出流的速度衰减形式与更多孔的速度变化已经基本一致,这也进一步表明并不需要孔数的无限加密即所谓的密排,就可以实现能量的最大衰减。

从图 6 还可以看出,随着孔数的增加,射流发生碰撞时的掺混点发生变化。孔数越多,掺混发生的位置越靠前,36 个孔时掺混点的位置大致在 $z = 1.5$ m (其相对应离喷孔出口的距离为 0.81 m) 处,60 个孔时掺混点位于 $z = 1.1$ m (其相对应离喷孔出口的距离为 0.41 m) 处,以后虽然孔数不断增加,但掺混位置基本上均在 $z = 1.0$ m 左右,这说明在布置喷孔时,当各射流之间的掺混强度达到一定时,就不必再缩小孔径而增加孔数。

4.2 不同喷孔射流流场下底板中线的压强分布

喷孔在圆柱上的布置呈对称分布,底部流动具有对称性,底板中线的压强以圆柱为中轴线基本呈对称分布,图 7 是孔口出流面积不变,改变孔口直径及个数时消力池底板中线一侧的压强变化。在相同的入流条件下,射流对底板的压强随喷孔个数的增加而降低。且当喷孔增加到一定值时,底板上的压强变化很小。这是因为喷孔个数增加到一定时,射流之间以及射流与周围水体之间的卷吸掺混程度已经发展得十分充分,若再进一步增加喷孔个数,掺混

程度的变化不明显,所以其对底板冲击的变化也开始随孔数的增加而趋于平缓。

从图 7 还可以看出,在近喷孔的位置出现一个压强的高值点,这是由于射流到达底板时给底板造成冲击,这个压强最大的点就是射流在底板上的冲击点。随着喷孔的密集,射流相互碰撞,掺混程度提高,水流散裂得越充分,因此到达底板的冲击速度变小,对底板的压力也就趋小。在 2 个喷孔时,由于两个孔是对称布置,射流不能相互碰撞,因此,水流从喷口射出后速度很大,到达底板时的冲击速度也很大,所以该点的压强值很大。由于射流继续流动,到达边壁时水流仍然保持较大的流速,所以与壁面发生碰撞,流动滞止被迫改向,因此在壁面附近压强又出现回升。而在多孔射流情况下,喷孔是多层布置的,上下层间形成了稳定的内漩涡,这些内漩涡对射流造成挤压,迫使射流主流往下流动,增加了射流水股间提前碰撞的机会,并提前了射流主流落入消力池的位置,也就是说由于射流的相互碰撞及其与周围流体的卷吸掺混作用,使射流流速在到达底板时已经衰减到很小值,在其后的流动中速度变化缓慢,因而其压强也在冲击点后分布平缓。所以,从图 7 可以看出,在喷孔附近压强最大的点随着孔数的增加而逐渐前移,当增加到 60 个孔时,变化不再明显。

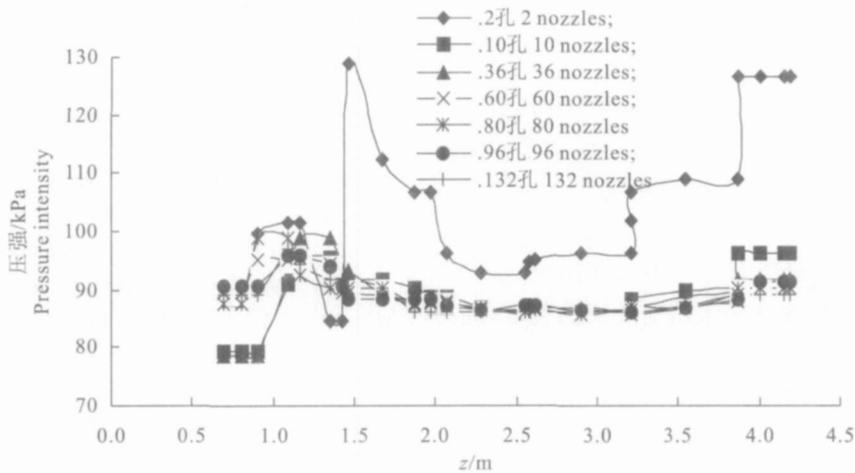


图 7 不同喷孔个数时底板中线的压强分布

Fig. 7 Pressure intensity distribution of median line on slab of plunge pool in different number of nozzle orifice

4.3 紊动能分布

图 8 所示为 60 个喷孔时 ($y = 5$ m) 射流流场的水平紊动能分布。从图 8 可以看出,消力池中从管道至边界的中间部分,形成了一个不封口的以管道为中心的高紊动能区域,然后紊动能分别向管道和边界逐渐减小,在 4 个角上的紊动能最小;

喷孔出口处紊动能很大,随后紊动能的大小与两侧的旋涡一致,在旋涡区紊动能大,在近壁区紊动能很小。这是因为旋涡区虽然流速不大,但是流速梯度很大,所以其紊动能也很大,这正是大量消能的强剪切层区。多喷孔淹没射流的能量消耗主要集中在强剪切层,圆管上梅花型布置的喷孔使水流分割为上

下左右相互错开的多股多层射流,从而大大增加了消力池内的剪切层面,各股射流在消力池内相互卷吸、掺混,使射流断面不断扩大,射流流速沿程减小,从而使消能效果显著提高。这对于进一步研究消力池的尺寸和形状,增强流动稳定性及减小消力池壁面的脉动压力,从而降低造价并增强工程安全性有一定的指导意义。

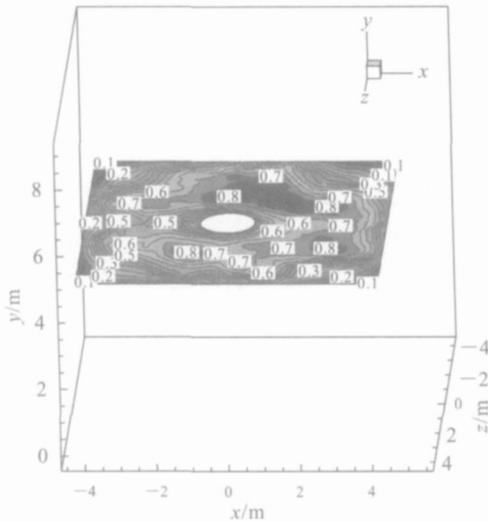


图 8 60 个喷孔时的紊动能横剖面图

Fig. 8 Horizontal section of the turbulent kinetic energy in 60 nozzles

5 结 论

本文通过采用 RNG $k-\epsilon$ 模型,对多喷孔射流流场进行了三维紊流数值模拟计算,得到如下的结论:(1)比较 VOF 法与弹性盖法水面线和流态结构的计算发现,结果两种方法的计算结果吻合较好,因此在本研究中用弹性盖法模拟自由水面是可行的。(2)射流动量的分散程度是决定消能效果的关键,在保持孔口总面积不变的条件下,随着喷孔数的增加,消能效果显著提高,但当喷孔数增加到 60 个时,其变化显著减缓。(3)多喷孔射流进入消能水体后,动量被分散,射流水股与周围水体接触面积增加,加之相互间的卷吸、掺混而形成多个强剪切消能区,使射流能量在距离喷孔出口 0.41 m 处迅速衰减,内漩滚区消耗了其余的能量。(4)鉴于多喷孔紊动射流问题的复杂性,建议在下一步的试验研究工作中,使用现代化先进的量测仪器测量射流流场的水力要素,对消力池内复杂的流动结构、特征等进行进一步深入的研究。

[参考文献]

- [1] Knystautas R. The turbulent jet from a series of holes in line [J]. The Aeronautical Quarterly, 1964, 15(2): 1-28.
- [2] Krothpapalli A, Baganoff D, Karamcheti K. Development and structure of a rectangular jet in a multiple jet configuration [J]. Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1980, 18(8): 945-950.
- [3] Roy S, Tamamidis P. Numerical investigation of the blade cooling effect generated by multiple incompressible jets [C]// Proceedings of ASME. American: FEDSM, 1998: 48-68.
- [4] 戴光清. 多股冲击射流水垫塘流动结构水力特性及消能机理研究 [D]. 四川成都: 成都科技大学, 1994.
- [5] 槐文信, 杨晓亭. 横流中多孔射流浓度场的特性 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(5): 16-20.
- [6] 杨忠超, 邓 军, 张建民, 等. 多股水平淹没射流水垫塘流场数值模拟 [J]. 水力发电学报, 2004, 23(5): 69-73.
- [7] 程 勇, 江 军. 火焰筒内环向多孔径向射流的流场研究 [J]. 热力透平, 2005, 35(2): 78-81.
- [8] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 333-337.
- [9] Charles S G, Thomas G B, Neassan F. An analysis of RNG bas turbulent models for homogeneous shear flow [J]. Phys Fluids, 1991, 3(9): 2278-2281.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 63-110.
- [11] 许唯临, 王 韦, 廖华胜, 等. 急流条件下模拟自由面紊流的“弹性盖”法 [J]. 四川联合大学学报, 1997, 2(6): 68-71.
- [12] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamic of free boundaries [J]. Compute Phys, 1981, 39: 201-225.
- [13] 吴 勇. 横泉水库孔筒射流机理研究 [D]. 山西太原: 太原理工大学, 2005: 48-73.