

鸭嘴阀射流研究现状

高 柱 唐洪武 顾正华

(河海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 介绍鸭嘴阀(duckbill valve ,DBV)的产生背景及其在环境工程中的应用 ,综述目前有关鸭嘴阀的研究成果 ,包括鸭嘴阀本身的水力特性研究成果和射流特性研究成果 ,以及目前鸭嘴阀射流的分析理论和研究手段 ,同时指出了 DBV 射流研究与圆射流研究的不同之处 .

关键词 鸭嘴阀 ;扩散器 ;射流 ;DBV ;综述

中图分类号 :TP601 ;TH138.52

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2004)07-0120-04

海岸城市的工业及生活污水通过安置于深海中的多孔扩散器而排入大海 .常规的扩散器喷口一般采用定开口形式 ,其上可加装机械式止回阀来阻止海水入侵 ,但这样的喷口在低流量条件下仍然存在海水入侵问题 ,并且其运行维护费用较高 .20 世纪 70 年代出现了一种全橡胶鸭嘴形状的止回阀(鸭嘴阀 ,duckbill valve ,DBV) ,很好地解决了这个问题 .鸭嘴阀由人造织物强化过的氯丁橡胶制成 ,一端为圆孔 ,相反的一端由圆孔逐渐变平而形成“鸭嘴” .通常用夹子或者法兰将其圆孔端套接于喷口上 ,在零排放条件下 ,阀本身的弹性以及海水的压力使其关闭 ;当有排放流体从喷口流出时 ,向前的水压力将迫使阀门的上下橡胶瓣打开 ,形成射流 .一旦流动结束 ,自然的背压将立刻使阀门封闭 ,这样就限制了海水的回灌 .鸭嘴阀形状见图 1 .其工程运用的实例已有许多报道^[1~3] .



图 1 鸭嘴阀外形

1 鸭嘴阀射流研究的理论基础和研究方法

鸭嘴阀射流属于传统的射流研究范畴 ,其系统研究的基本理论和手段都可以借鉴圆射流的成果 .因此在这里有必要先对圆射流研究作一个简要的概

述 .圆射流是一个很古老的流体力学问题 ,由于其流动的复杂性 ,解决包括射流的稀释度的各种实际问题往往不是一件简单的事情 ,虽然已有不少的实验和论著讨论了它的影响因素 ,包括动量、浮力、密度分层、流动边界、浮力损失、横流、底部摩擦、内部摩擦、内部水跃和周围紊动 ,但要寻求包括所有因素的一般模型仍很困难 .然而 ,研究人员通过把影响因素归类 ,如划分成射流参数、环境参数和边界作用 ,首先找出各种简单流动的极限平衡态的渐近解 ,然后将这些解组合起来用到更复杂流动的一般描述中 .实践证明 ,这种基本方法是能够处理复杂流动的 ,如研究横流中的浮射流 ,能推导出浮力、动量和横流对射流轨迹、射流稀释度的定性影响 ,在此基础上可进一步结合实验结果提出更灵活、更详细的计算方法^[4] .

射流的研究方法主要有 :因次分析法 ,渐近分析法、积分方程法、微分方程法、数值计算和实验方法 .它们之间不是孤立的 ,而是有着密切的联系 ,如渐近分析法就是以因次分析法为基础的 ,积分方程法实质上是通过积分将偏微分方程转化为常微分方程 ,而数值计算可以建立在积分或者微分方程的基础上 .由于每种方法都有其局限性 ,因此实际研究中大多通过多种手段的综合运用而使问题得到解决 .

通过因次分析法和渐近分析方法 ,可以得到射流参数、环境参数的某些特征长度 ,将这些特征长度再仔细地梳理比较 ,找出待求问题与特征长度的关系 ,就能够粗略地估算任何问题的射流稀释度 .此类方法也是目前在实验研究和工程运用中必定要涉及的方法 .为更进一步详细描述流动 ,可采用积分方程

法,这也是工程上最常用的方法,它较微分方程求解法简单.其思想是建立在流动自相似假定的基础上,使流动微分方程简化成常微分方程,并以边界条件使方程封闭,从而结合定解条件来预报流场特性.目前有关射流和羽流而普遍使用的3个基本假定为:

a. 卷吸假定.各断面射流中心最大纵向流速 u_c 与射流边界处指向射流中心的横向速度 u_e 有比例关系,即 $u_e = \alpha u_c$, α 称为卷吸系数,其含义:周围流体被卷入射流的强度与射流自身的强度成正比.

b. 相似假定.射流主体段各断面的时均流速分布是自相似的,质量分数分布也是自相似的.数学表达式分别为 $\frac{u}{u_c} = f_1\left(\frac{r}{b_u}\right)$ 和 $\frac{c}{c_c} = f_2\left(\frac{r}{b_c}\right)$,式中 b_u 表示速度半宽, b_c 表示质量分数半宽.

c. 高斯分布假定.速度和质量分数的无因次化分布曲线可以用高斯分布曲线很好地近似.

微分方程求解法近年来获得了很大的发展,其求解的关键问题是紊动射流微分方程的封闭问题.以前常采用的是零方程模型,即 Prandtl 混合长度理论^[5],该理论曾解决了不少的实际问题.但对于较复杂的射流流场如有密度差的流动时,其计算结果并不理想,且混合长度 l 也不易确定^[6]. κ - ϵ 双方程紊流模型,是在时均流的基本微分方程之外,增加单位质量流体的紊动动能 κ 及黏性耗损率 ϵ 两个传输偏微分方程来封闭紊流的基本方程组进行数值计算,目前已有不少的应用^[7,8].但是浮力射流流动具有强烈的各向异性,而 κ - ϵ 紊流模型中存在各向同性等假定,因此其计算结果与一些实际复杂浮射流有较大差别.雷诺应力模型(RSM)是目前比较有潜力的模型之一,它放弃了涡黏性各向同性假说,通过求解雷诺应力的输运方程及耗散率方程来封闭雷诺时均方程.较紊流模型中的一方程和二方程模型(如标准 κ - ϵ 紊流模型),RSM 严格考虑了流线弯曲、漩涡、转动以及应变率的迅速变化所产生的效应,使其更具有模拟复杂流动的潜力.但是 RSM 的预测精度仍然受限于模化精确水流方程中的不同雷诺应力项所采用的封闭假定.其中压力与应变和耗散率项的模化尤具挑战性,往往是影响预测精度的主要原因.有的时候付出更多的计算代价,并不能使 RSM 得到比使用简单紊流模型更好的计算成果,但是当所要研究的流场特性直接由雷诺应力的各向异性导致时,RSM 的使用就是必需的.

诸如鸭嘴阀射流、椭圆射流这类非圆形喷口射流,由于其具有强三维性,存在强剪切,因而可以更多地尝试运用 RSM 模型求解鸭嘴阀射流场.随着计算方法和计算机运算能力的进一步提高,复杂精细

模型在射流研究上的使用会越来越广.

2 鸭嘴阀的研究进展

很自然地,研究者可以将圆射流的研究方法运用到鸭嘴阀射流中,寻找它们之间的异同点,通过改进相对成熟的圆射流系统数学模型,就能很便捷地将其运用到鸭嘴阀射流中,进而运用到安装了鸭嘴阀的排放系统中.这样鸭嘴阀射流中的问题就分成两类:一类就是圆射流中仍然存在的问题;另一类就是两者之间的差别和等价问题.前者可以随着圆射流研究的深入而得到解决,后者则需要更多的对比研究.以往的研究告诉我们,射流出口流量、出口动量通量和出口浮力通量是控制圆射流的主要因素.射流截面的几何特征和供给流体的紊动程度,都是次要因素^[4].以此为基础,目前许多学者针对鸭嘴阀射流这类非圆形喷口的研究,仍然从这3个主要因素入手.而上述3个参数的计算都需要知道喷嘴开口面积的准确值.不同于普通圆孔喷嘴,鸭嘴阀开口面积是随着流量而变化的,因此确定排放流量与开口面积的准确关系是我们了解鸭嘴阀射流特性的第一步.而实际的研究工作也正是这样开展的.

有关鸭嘴阀的最早实验研究主要是针对商用原形产品的,美国犹他州立大学的水研究实验室和澳大利亚新南威尔士大学的水研究实验室分别对 100 mm(4 in)、150 mm(6 in)、200 mm(8 in)、300 mm(12 in)的鸭嘴阀商用原形产品作了广泛深入的实验研究^[2].研究表明,因为鸭嘴阀开口面积随着流量而改变,所以鸭嘴阀射流速度随流量呈非线性变化,同圆射流相比,其在小流量下仍然能获得较高的出射速度,但需要较高的水头提供动力,而在大流量下具有较低的出射速度和较低的水头损失.实验者还绘制了流量-水头、流量-水头损失等关系曲线,方便使用者在设计放流系统时选择合理的产品,但是有因次的表述使得上述成果不能外推到在其他水力条件下工作的鸭嘴阀.为此,从20世纪90年代中期开始,研究者们开始了以寻找无因次量描述的鸭嘴阀在不同水力条件下的水力排放特性的系统研究. Lee 和 Karandikar 首先完成了对鸭嘴阀射流的广泛研究,他们在所能获得的以往实验数据的基础上,兼顾鸭嘴阀材料的不同,建立了材料特性和流动条件与阀的变形和驱动水头之间的关系,用来预测鸭嘴阀开口处的水力特性.他们假设鸭嘴阀是一种变截面的光滑收缩喷口,并模化成弹性二维橡胶膜,得到了具有变化流量排放系数的线性水头流量关系,并且并入了已有的扩散器水力特性程序计算包中,能针对不同尺寸和不同材料的鸭嘴阀,确定出喷口排放

流量的变化和扩散器的沿程流速分布^[1,2]。上述成果是为满足一维流动分析而建立的一阶近似理论公式,严格地讲,当给出本构关系式后,鸭嘴阀橡胶膜表面变形的精确预测应该采用全三维有限元弹性分析。因此,为进一步提高预测精度和减少理论上的假设,非线性三维弹性有限元分析方法将是下一步更精确预测材料特性和流动条件与阀的变形和驱动水头之间关系所要采取的步骤。从工程运用的角度看,由3个控制性参数(射流出口流量、出口动量通量、出口浮力通量)所确定出来的鸭嘴阀射流计算的精度已经能够满足工程运用的实际需要。

确定了控制性参数之后的工作,将更多涉及鸭嘴阀射流在各种环境参数和边界作用下的水力特性,研究内容主要涉及特征长度的选取和确定、涡结构、稀释度、射流轨迹和宽度等。唐洪武等人采用激光诱导荧光(LIF)技术和ADV流速仪对同向流动环境中的鸭嘴阀射流掺混特性做了实验研究,发现在12倍直径区域内,射流紊动强度要明显高于圆射流,主次轴扩展率显著不同,并出现了“轴变换”现象,这个区域以外,射流扩展特性与圆射流类似,其近区的掺混流量可能较圆射流高,这个直观结论正在进一步验证,同时该研究对两类射流进行了初步的比较^[9]。

在安装了鸭嘴阀的排放系统水力特性研究工作中, Lee等人通过系统的实验研究,理解了安装有鸭嘴阀的海洋放流系统入侵问题的水力特性^[10]。对于传统的未安装鸭嘴阀的扩散器,由于射流水体开始是从最靠近海岸的喷口喷出的,在密度差的作用下,海水从余下喷口入侵,并与射流水体在扩散器中混合,然后从近岸喷口射出,产生循环流动。当动量通量随着射流体流量增加并与由密度差引起的压强梯度力平衡的时候,海水循环停止,在扩散器中形成“契形体”。只有射流体流量进一步增加,才能将“契形体”推向远离海岸的方向,射流体从远岸的下一个喷口流出。这样的过程要持续到最后一个孔口直到所有的海水都被挤压出扩散器。这种情况,在放流系统启用前、检修、因事故而暂停运转或者日排放量低于入侵临界流量的时候都会发生,有时海水入侵模式并非如此,甚至更加无序和难以控制,使得不论是设计还是运行都难以达到满意的程度,这样就需要较高的流量才能将入侵海水清除。而安装了鸭嘴阀的放流系统,由于零排放时其喷口是闭合的,理论上放流系统不会发生海水入侵,发生的入侵主要是由于安装鸭嘴阀(系统启用)前的海水倒灌。安装了鸭嘴阀的放流系统清除海水的原理如下:当射流体排放流量增加时,密度重的海水在扩散器底层,密度轻

的射流体在扩散器上层,并且这种分层广布于扩散器中,海水的清除是一个两层水体不断掺混并挤压出放流系统的过程,同未安装鸭嘴阀的放流系统相比,其启用后,几乎不发生入侵,就是发生了入侵,也能在低流量下完成入侵海水的快速清除。

Duer还指出了鸭嘴阀的实用意义和设计建议^[3]。刘成等结合上海市奉浦排海工程,对排海工程中应用鸭嘴阀的利弊进行了分析,着重指出了鸭嘴阀水头损失的问题,提出了鸭嘴阀在排海工程中的适用条件^[11]。可以说,经过许多研究者的实践,使得我们不论是对于单个鸭嘴阀的水力特性,还是安装了鸭嘴阀的排放系统的水力特性问题,都已经有了较好的理解,满足工程运用精度的相关理论已显现出其雏形,促使鸭嘴阀的使用更加科学和合理。

在数值模拟方面, Kuang等人将鸭嘴阀模化成矩形口射流,并在喷口内边界条件上施加了指向内侧的速度,来模拟由鸭嘴阀射流产生的二次流,采用 $k-\epsilon$ 模型封闭方程,使用有限体积法(FLUENT4.5)求解控制方程^[12,13]。并将实验结果与唐洪武等人的实验结果做了对比,效果良好。同时他们将稀释度的数值计算结果与相同流量条件下的圆射流作了比较,结果显示,在相同的排放条件下,鸭嘴阀射流稀释效果要明显优于圆射流^[9]。由于在其数值模拟研究中仍然存在人为假设,因此相关的数值模拟研究仍然需要进一步改进和加强,使其更符合实际的物理规律。

3 结 语

近年来,不少研究者对鸭嘴阀作了系统的实验研究,解决了材料特性和流动条件与阀的变形和驱动水头之间的关系问题,并导入了数值模拟的方法,使得我们对鸭嘴阀的水头-排放关系、质量分数和速度的分布、紊动掺混等水力特性有了较好的了解,但是研究主要集中在排放环境为同向流动的鸭嘴阀射流上,相比于圆射流所达到的研究深度,鸭嘴阀射流的研究工作还需进一步完善。这些工作是必需的,也是长期的,因为这项工作不仅解决了工程设计的需要,同时也为理论研究提供了必要的素材,比如圆射流与非圆射流的控制性参数是否一样?在圆射流中处于次要地位的射流形状等影响参数对射流的发展究竟影响到什么程度,这种影响是否会使得非圆射流的控制性参数个数增加?三维效应“轴变换”的机理、横流、反向流以及分层环境中鸭嘴阀射流的特性、圆射流与非圆射流稀释效果的优劣比较、三维流动与二维流动的主要区别、如何选用最合适的精细紊流模型来模拟这样复杂的流动,以及是否可以在

某些特征尺度范围内,用成熟的圆射流解代替非圆形喷口射流的解等等.可以说,鸭嘴阀射流研究不仅有其广阔的工程运用背景, also 具有很高的理论研究价值,值得研究者为之继续努力.

参考文献：

[1] Lee J H W ,Wilkinson ,D L , Wood I R. On the head-discharge relation of a duckbill elastomer check valve[J]. Journal of Hydraulic Research 2001 ,39(6) :619 ~ 627 .
[2] Lee J H W ,Karandikar J ,Horton P R. Hydraulics of "duckbill " elastomer check valves[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 1998 ,124(4) :394 ~ 405 .
[3] Duer M J. Use of variable orifice "duckbill " valves for hydraulic and dilution optimization of multiport diffusers. Water Science and Technology , 38(10) :277 ~ 284 .
[4] Fischer H B ,et al. Mixing in inland and coastal waters[M]. New York :Academic Press ,1979. 315 ~ 389 .
[5] 李炜. 环境水力学进展[M]. 武汉 :武汉水利电力大学出版社 ,1999. 1 ~ 30 .
[6] 李炜 槐文信. 浮力射流理论及其应用[M]. 北京 :科学出版社 ,1997. 1 ~ 78 .

[7] Leschziner M A , Rodi W. Calculation of annular and twin parallel jets using various discretization schemes and turbulence – model variation[J]. Journal of Fluids Engineering ,1981 ,103 (3) :352 ~ 360 .
[8] 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 .
[9] 唐洪武 李行伟. 鸭嘴阀扩散器紊动射流特性试验研究[J]. 水科学进展 ,2001 ,12(2) :153 ~ 159 .
[10] Tong Kei-wan. Hydraulics of a duckbill valve jet[D]. Hongkong :The University of Hongkong ,2002 .
[11] 刘成 韦鹤平 何耘. 鸭嘴阀在排海工程中的应用分析[J]. 给水排水 ,1999 ,25(7) :19 ~ 21 .
[12] Kuang C P ,Joseph H ,Lee W. Numerical experiments on the mixing of a duckbill valve jet[A]. In :Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmental Hydraulic[C]. rizona ,USA ,2001 . 124 ~ 129 .
[13] Joseph H ,Lee W ,Kuang C P ,Chan H C. The velocity field of a duckbill valve(DBV) jet in coflow[A]. In :Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Conference[C],New York ,USA ,2002 . 241 ~ 251 .

(收稿日期 2004-05-17 编辑 :马敏峰)

(上接第 107 页) 研究很少,而且没有与宏观试验研究相结合. 微观试验与宏观试验相结合,在研究土体流变过程的外部表现的同时,又研究外部力学现象的物理实质,应是试验研究土流变特性的重要发展方向.

b. 室内的宏观试验是目前研究土体流变特性的主要手段,试验中的许多问题在试验前必须认真考虑和处理. 试验仪器的精度、试验的历时、试验的加荷方式、三轴试样的渗漏、试验环境温度的变化等对试验结果的可靠性均有较大的影响.

参考文献：

[1] 施建勇 赵维炳 陈云. 土体变形规律研究进展[J]. 水利水电科技进展 ,1998 ,18(1) :24 ~ 26 .
[2] 钱家欢 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京 :中国水利水电出版社 ,1996. 237 .
[3] 维亚洛夫 C C. 土力学的流变原理[M]. 杜余培译. 北京 :科学技术出版社 ,1987 .
[4] 王常明. 土流变学的研究现状与趋势[J]. 世界地质 , 1998 ,17(4) :33 ~ 37 .
[5] 谢宁 姚海明. 土流变研究综述[J]. 云南工业大学学报 , 1999 ,15(1) :52 ~ 56 .
[6] Graham J ,Crooks J H A ,Bell A L. Time effect on the stress-strain behavior of natural soft clay[J]. Geotechnique ,1983 ,33 (3) :327 ~ 340 .
[7] Zhu J G ,Yin J H ,Luk S T. Time-dependent stress-strain behavior of soft Hong Kong marine deposits[J]. Geotechnical Testing

J ,ASTM ,GTJODJ ,1999 ,22(2) :112 ~ 120 .
[8] 谢宁. 土流变试验设计及有关问题研究[J]. 云南工业大学学报 ,1994 ,10(4) :76 ~ 82 .
[9] Tavenas F ,Leroueil S ,Rochelle P La ,et al. Creep behavior of an undisturbed lightly overconsolidated clay[J]. Canadian Geotechnical J ,1978 ,15 :402 ~ 423 .
[10] Bishop A W ,Lovenbury H T. Creep characteristics of two undisturbed clays[A]. Proc of the 7 th Int Conf of Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Mexico ,1969. 29 ~ 37 .
[11] Campanella R G ,Mitchell J K. Influence of temperature variations on soil behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ,ASCE ,1968 ,94(SM3) :709 ~ 734 .
[12] Eriksson L G. Temperature effects on consolidation properties of Sulphide clay[A]. Proc of 12 th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Rio de Janeiro ,1989. 2087 ~ 2090 .
[13] Akagi H ,Komiya K. Constant rate of strain consolidation properties of clayey soil at high temperature[A]. Proc of the 1995 Int Symp on Compression and Consolidation of Clayey Soils [C]. Hiroshima Jpn. ,1995. 3 ~ 8 .
[14] Mitchell J K ,Campanella R G ,Singh A. Soil creep as a rate process[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division , ASCE ,1968 ,94(SM1) :231 ~ 253 .
[15] Silva A J ,Brandes H G. Drained creep behavior of marine clay[A]. Proc of the 1996 ASCE National Convention[C]. Washington ,DC USA ,New York ,1996. 228 ~ 242 .

(收稿日期 2003-12-22 编辑 :熊水斌)