

圆孔和条形孔泄压减阻特性的探讨

杜广生 刘立宁 刘正刚 王宁

(山东大学能源与动力工程学院, 山东济南 250061 du@sdu.edu.cn)

摘要 通过一个简单模型对圆孔和条形孔的泄压减阻特性进行探讨, 分别采用标准 $k-\varepsilon$ 及 $k-\omega$ 模型对不同流量下的流动状态进行模拟计算, 通过计算找到合适的开孔尺寸和形状, 并应用于实际生产中, 以减少旋翼式机械的压损。

关键词 数值模拟, 压差, 流量比, 泄压减阻

1 引言

仪表标准对水表、热量表等旋翼式机械有着严格的压损要求, 但目前很多国产旋翼式机械的压损普遍较大, 很难满足要求, 为达到国标规定的压损要求, 本研究拟在旋翼式机械内部加设圆孔或条形孔以泄压减阻。作为简化模型, 在一根圆管中间设一块 5mm 厚的隔板, 然后在隔板上开设不同尺寸的圆孔或条形孔进行不同流量的模拟计算, 通过计算找到泄压减阻的最佳开孔尺寸和形状, 以便在实际生产中应用。

简化模型如图 1 所示: 入口和出口的管径为 20mm, 隔板高度为 12mm。

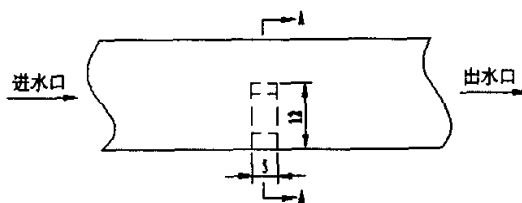


图 1 简化模型尺寸图 (单位: mm)

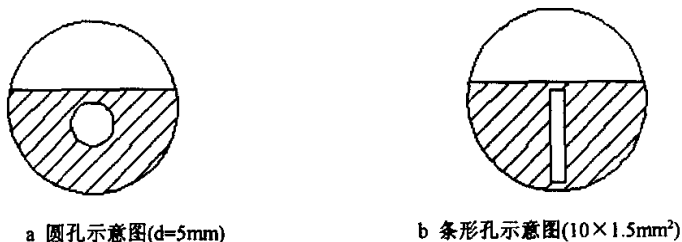


图 2 A-A 剖面示意图

水流从圆管入口流入, 绕流隔板, 其中一部分经隔板上的圆孔或条形孔分流, 绕过隔板后重新汇合在一起, 然后通过管口流出。在模拟计算中, 在隔板上分别加设不同尺寸的圆孔或条形孔, 然后改变流过管道的水的流量, 通过计算得到流过圆孔或条形孔的流量与管道内总流量之比以及进出口的压力损失等。

2 数学模型及网格划分

2.1 数学模型

水表、热量表等旋翼式机械工作时内部水流在大部分工况下都是处在紊流区, 本模型在通常情况下亦工作在紊流区, 因此采用适合计算紊流的 $k-\varepsilon$ 及 $k-\omega$ 标准模型分别进行计算。根据前人的经验, 标准 $k-\varepsilon$ 模型对无旋、无密度变化及无化学反应的三维流动的处理结果是令人满意的, 但对于三维壁面射流以及带有强烈的漩涡和回流的流动, 计算结果与实验结果还相差较远, 且该模型只适合于计算远离壁面或靠近壁面的高雷诺数的旺盛紊流区域, 对于固体壁面及覆盖在壁面上的边界层处的低雷诺数的紊流流动已不再适用。 $k-\omega$ 模型则考虑了低雷诺数的影响, 且对可压缩性流体以及剪切流的传播均适用。 $k-\omega$ 模型预测了与尾流、混合流、平板绕流、圆柱绕流和射流密切相关的自由剪切流的传播速率, 因而可以应用于固体壁面流动和自由剪切流动。本研究拟采用两种计算模型分别对所给管道进行模拟计算。

在计算中采用定常守恒形式的 Reynolds Averaged Navier-Stokes 方程:

连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

利用 Boussinesq 假设采用的 Reynolds 应力和平均速度梯度之间的关系式, 对 Reynolds 应力项进行近似处理, 有

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l}) \delta_{ij} \quad (3)$$

标准 $k-\varepsilon$ 模型方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mu u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

湍流黏度由下式计算:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

其中, G_k 是由平均速度梯度产生的湍流动能, σ_k 、 σ_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 C_μ 为湍流模型系数, 其值分别为

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09.$$

(2) 标准 $k - \omega$ 模型方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega \quad (8)$$

在方程中, G_k 代表平均速度梯度产生的湍流动能, G_ω 代表特殊耗散率 ω 生成项,

Y_k 和 Y_ω 分别代表湍流引起的 k 与 ω 的耗散。

式中 σ_k 和 σ_ω 是 k 、 ω 方程的湍流能量普朗特数, $\sigma_k = 2.0$, $\sigma_\omega = 2.0$ 。

湍流黏度 μ_t 由下式确定:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (9)$$

系数 α^* 使得湍流黏度产生低雷诺数修正。在高雷诺数 $k - \omega$ 模型中, $\alpha^* = 1$ 。

计算时将连续方程、动量方程分别与标准 $k - \varepsilon$ 、 $k - \omega$ 方程构成一个封闭的非线性控制方程组, 离散后就可以求解。方程的离散采用有限体积法, 动量方程、 k 方程和 ε 方程、 ω 方程均采用二阶迎风格式, 压力和速度的耦合采用 simple 算法。

2.2 网格划分

计算流场时, 首先需要在流动区域划分网格。计算网格的好坏对数值计算的可行性、收敛性和精度有着重大的影响, 是计算流体力学里面的重要内容。目前使用的网格主要有

单块结构化网格、多块结构化网格和非结构网格三种。单块结构化网格易于计算，使用计算机的内存较少，计算速度快。但对于形状复杂的计算区域，难以划分单块结构化网格，即使划分成功，在外形变化剧烈的位置网格会产生严重的变形，因此，目前只在一些结构简单的模型上使用。多块结构化网格是把计算区域分成多个部分，对每一部分都划分成单块结构化网格。它较为简单，但又能处理复杂的形状，是目前应用较多的一种网格划分方法。非结构网格采用四面体来划分计算区域，是适应性最强的一种网格形式，可以适应任意形状的计算区域。但是非结构网格的网格数量大，对计算机的内存和计算时间消耗较多，同时计算时容易产生数值误差，计算精度较结构网格差。由于该模型不具备对称性，进行数值计算时只能采用三维模型。经综合考虑，决定采用多块结构化网格。划分网格时把整个计算区域划分为5块，对每一块分别划分结构网格，并对壁面进行网格细化处理。划分后的网格示意图如图3所示。

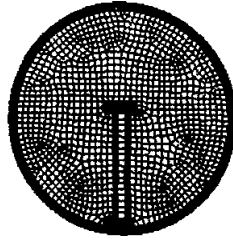


图3 划分好网格后的圆管截面放大示意图

2.3 模拟工况及边界条件

工作压力为 101325Pa，流量测量范围 0.05~2.5 m³/h。测量温度为常温，水的密度 $\rho = 998.2\text{kg/m}^3$ ，运动黏度为 $\nu = 1.006 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。

在设定边界条件时对进水口处采用质量入口边界条件，给出进水口处的质量流量，分别设定流量为 50、500、800、1500、2500L/h。在出水口处采用压力出口条件，根据旋翼式仪表的工作条件，出口压力设为 $4.75 \times 10^5 \text{Pa}$ 。固壁边界设定无滑移条件： $u = v = w = 0$ 。

3 计算结果分析

在模型中间的隔板上分别开设以下尺寸的圆孔和条形孔进行模拟计算。

表 1 开孔尺寸及代码

(单位: mm)

圆 孔		条 形 孔						
D1	D2	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3
$d_1=4.5$	$d_2=5$	2×8	8×2	4×4	10×1.5	2.5×7.86	7.86×2.5	4.5×4.5

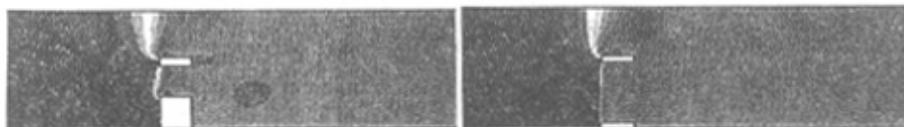
其中, D1 与 A1~A4 孔的截面面积相当, 约为 16mm^2 , 而 D2 与 B1~B3 孔的截面面积相当, 约为 20mm^2 。

当截面面积约为 16mm^2 时, 分别取设有圆孔 (D1 孔) 与条形孔 (A4 孔) 的管道模拟计算结果进行分析, 图 4 至图 6 是在大流量 (2500L/h) 下的模拟结果。



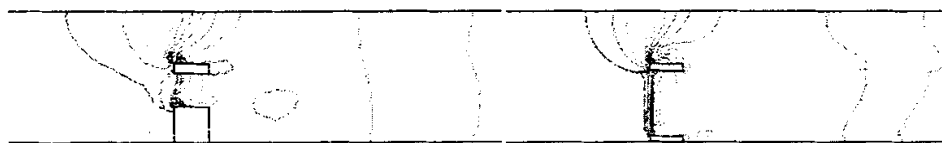
(D1 孔) (A4 孔)

图 4 管道内纵向截面速度矢量图 ($Z=0$)



(D1 孔) (A4 孔)

图 5 管道内纵向截面压力变化云图 ($Z=0$)



(D1 孔) (A4 孔)

图 6 管道内纵向截面等压线图 ($Z=0$)

图 4 是管道内纵向截面速度矢量图，从图中可以看出，流体流过泄压孔后，会产生明显的漩涡，这主要是由于小孔射流影响所产生的。当流体流过圆孔时，在孔内的速度变化较快，这使得圆孔内的流动状态较为复杂，而流过条形孔时，速度变化较为平缓，这使得条形孔内可以保持稳定的流动状态。从图 5 和图 6 的压力变化图上也可以看出，圆形泄压孔内的压力变化较大，而条形孔只在孔前有较大的压力变化，孔内变化不大，这也印证了条形孔内的流动较为稳定的结论。且根据射流理论，条形孔射流的射出能力大，射出距离远，可以影响较远处的流体流动，而圆孔射流的射出能力小，射出距离短，易被其它流体所卷吸，增加流体的掺混，从速度矢量图及压力变化图中均可以看出，圆孔射流后产生的漩涡比条形孔明显，且在圆孔射流后的压力有明显的局部变化，但对管道内压力的影响范围不如条形孔大。所以从这方面来讲，条形孔的泄压作用优于圆孔。

表 2 隔板上开设不同尺寸的泄压孔时圆管两端的压损比较 ($k - \varepsilon$ 模型)

压差 (KPa) 流量 (L/h)	开孔 代码	D1	D2	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3
500		0.71	0.65	0.69	0.72	0.70	0.69	0.64	0.67	0.63
800		1.87	1.65	1.81	1.90	1.84	1.87	1.68	1.75	1.64
1500		6.63	6.34	6.81	6.79	6.96	6.34	6.20	6.33	6.02
2500		19.41	17.64	18.91	19.26	19.41	18.23	17.42	17.58	17.37

由表 2 可以看出，当开孔截面面积相同时，条形孔的减压作用优于圆孔，且开孔面积越大，压损越小。当开孔截面面积约为 16mm^2 时，孔 A4 的泄压效果最佳；当开孔截面面积约为 20mm^2 时，孔 B3 的效果最佳。将 A4、B3 与隔板上未开孔时的压力损失做比较，如图 7 所示。

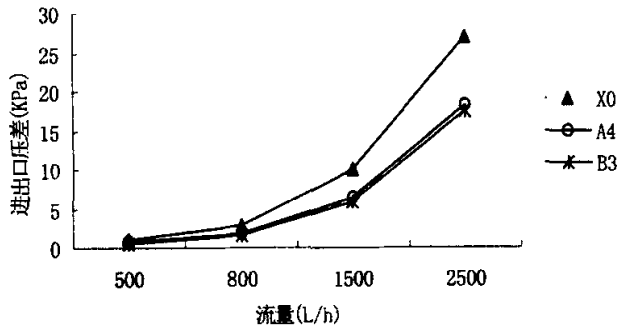


图 7 进出口压差比较 (X0 表示未开孔时的压差)

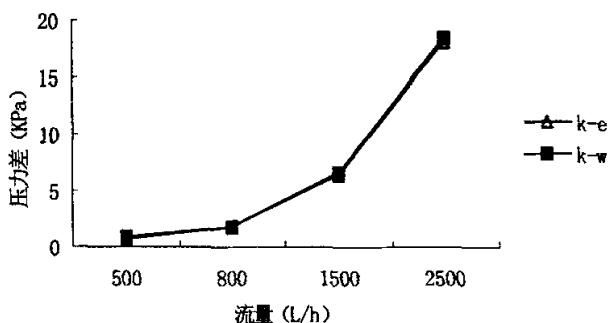


图 8 开孔为 A4 时在大流量下两种不同模型对压力差的计算结果

由图 7 可以看出，所开孔的尺寸均能使圆管进出口的压损明显降低，大孔的效果虽然优于小孔，但减压的优势不是很明显。

通过模拟计算发现，当采用适合计算充分发展的紊流的 $k-\varepsilon$ 标准模型进行计算时，在大流量下，计算结果与 $k-\omega$ 模型的计算结果基本一致（如图 8 所示），但在小流量（50L/h）下很难收敛，这就说明圆管内的流动在小流量下已不是充分发展的紊流状态，而变成层流状态或层流向紊流过渡状态， $k-\varepsilon$ 模型已不适用。换用适合这种情况的 $k-\omega$ 模型重新进行计算，得到的流过小孔的流量与总流量的百分比示意图如下所示。

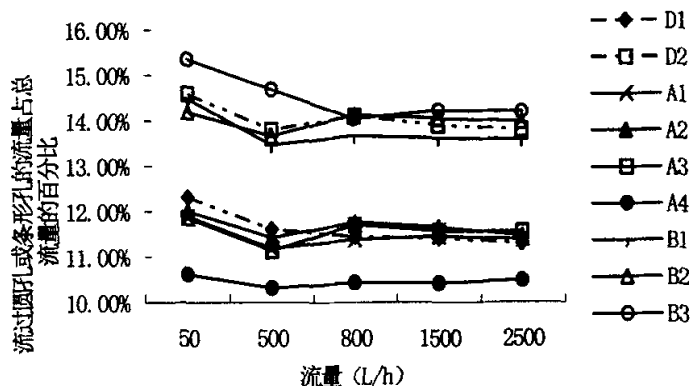


图 9 $k-\omega$ 模型下流过小孔的流量与总流量的百分比

由图 9 可以看出，开孔尺寸越大，流过孔的流量越大，这将使得孔内的流动越复杂，而在小尺寸时，流过孔道的水流易保持简单的层流状态，可以减少小孔射流后对工作流量的影响。在实际应用时，希望流过泄压孔的流量尽可能小，而使工作流量尽可能的大。故综合压损及流量两方面看，条形孔 A4 的泄压减阻效果最佳。

4 试验比较

将模拟结果应用于热量表中,在新设计的一款旋翼式多流束热量表的叶轮室底座上开设一个 $10 \times 1.5 \text{mm}^2$ 的条形孔,然后进行压损实验。在流量为 2500L/h 时,未开孔前,该热量表的压损为 28kPa ,而国家热量表标准中规定的压损要求为 25kPa ,开孔后,所测压损为 23.2kPa ,满足国标对压损的要求,且不影响热量表其他方面的测量精度。

5 结论

本文通过一个简单模型,对圆孔和条形孔的泄压减阻作用进行模拟,计算结果表明,圆孔和条形孔均有很好的泄压减阻的作用,且条形孔的效果优于圆孔。经过试验证明,该方案可以应用于热量表和水表等旋翼式机械中,以帮助此类机械达到国家标准要求的压损要求。

参考文献

- 1 孔珑.工程流体力学.第二版.北京:中国电力出版社,1998.
- 2 陈汉平.计算流体力学.北京:水利电力出版社,1995.
- 3 丁珏,翁培奋. 90° 弯管内流动的理论模型及流动特性的数值研究. 计算力学学报,2004,21(3):314-321.
- 4 张楠,沈泓萃,姚惠之,高秋新,顾民.带流水孔潜体流场数值模拟.船舶力学,2004,8(1):1-11.
- 5 徐自力,屠珊,杜秀杰.弯曲圆管中矿浆湍流场的三维数值模拟及分析.西安交通大学学报,2000,34(5):46-49.

The discuss about decompression and antidrag characteristic of circular hole and square hole

Du Guang-sheng Liu Li-ning Liu Zheng-gang Wang Ning

(Shandong University, Jinan 250061 Email du@sdu.edu.cn)

Abstract: In this article we discuss the decompression and antidrag characteristic of circular hole and square hole using a simple model. The standard $k-\varepsilon$ and $k-\omega$ models are respectively used to simulate the flow condition under different flow rate. Through numeric computation we obtain the proper size and shape of the hole, which will be used to reduce the differential pressure of the rotary wing machines in the practical production.

Key words: numeric simulation, differential pressure, flow ratio, decompression and antidrag