

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.016

角式调节阀两相流模拟与结构改进

彭健,何世权,尚宣

(南京工业大学机械与动力工程学院,江苏南京 211816)

摘要:为了研究角式调节阀使用时,气体对阀门流通能力的影响,课题组提出使用 FLUENT 软件进行数值模拟。采用欧拉多相流模型模拟角式调节阀在气液两相流下的速度和流量大小,分析得到进口气体体积分数、阀体结构对流量系数的影响。结果表明:进口气体体积分数对流量系数有较大影响,通过改变密封面角度和流道角度可以提高阀门的流量系数。改进后的阀门拥有更好的流通能力,为同类阀门的改进提供了参考。

关键词:直角调节阀;气液两相流;欧拉多相流模型;FLUENT

中图分类号:O351.9;TH138.52 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)05-0082-06

Numerical Simulation of Two-Phase Flow in Angle Regulating Valve and Structural Improvement

PENG Jian, HE Shiquan, SHANG Xuan

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: In view of the influence of gas on the valve flow capacity in the use of angle regulating valve, the FLUENT software was used for numerical simulation. The velocity and flow rate of the angle regulator in the gas-liquid two-phase flow were analyzed by using the Euler multiphase flow model to obtain the influence of the inlet gas volume fraction and the valve body structure on the flow coefficient. The results show the great influence of volume fraction of the inlet gas on the flow coefficient which can be improved by changing the sealing angle and flow angle. The improved valve has better circulation capacity and provides a reference for the improvement of similar valves.

Keywords: angle regulating valve; gas-liquid two phase flow; Euler multiphase flow model; FLUENT

管道系统中的阀门在控制流量时进口处往往会夹杂着一定量的气体。当调节阀进口处的流体不全为液体时,由于压力势能同时转化为液体和气体的动能,因此调节阀的流量控制会受到影响^[1]。

目前两相流的理论研究和角式调节阀在单相流状态下的流场分析已较为完善。何世权以角式调节阀为研究对象,应用 CFD 软件对其内部流场进行了三维数值模拟,得到了流量特性曲线、流道内的速度场及压力场分布^{[2]293}。刘建瑞对内混式自吸泵自吸过程的气液两相流进行了数值模拟,通过分析不同含气率条件下流场的压力分布、速度分布和气相分布,探讨了气液两相介质在泵内的运动情况^[3]。张剑可研究了气液两相流下流量系数的计算^[4]。Yamasaki 研究了微通道

中气液两相流的特点^[5]。阎昌琪等介绍了气液两相流的基本原理和基本处理方法,着重介绍了管内气液两相流的机理和基本规律^[6]。但现在针对角式调节阀的两相流研究相对较少。课题组保持调节阀流通面积不变,通过单因素实验和 FLUENT 软件模拟,研究不同进口气体体积分数下角式调节阀结构的改变对阀门内部流动状态和流量大小的影响,选出最佳的结构优化方案。

1 角式调节阀气液两相流量系数计算

1.1 模型

图 1 所示为角式阀,除阀体为角型外,其他结构均和单座阀相似。角式阀结构决定了它的流路简单,阻力小^{[2]291}。图 1 中 θ 为密封面角度, α 为流道角度。

收稿日期:2018-05-14;修回日期:2018-06-15

第一作者简介:彭健(1994),男,安徽安庆人,硕士,主要研究方向为特种阀门。通信作者:何世权(1966),男,安徽肥东人,博士,教授,主要研究方向为化工过程机械、阀门与流体密封。E-mail:hesq@njtech.edu.cn

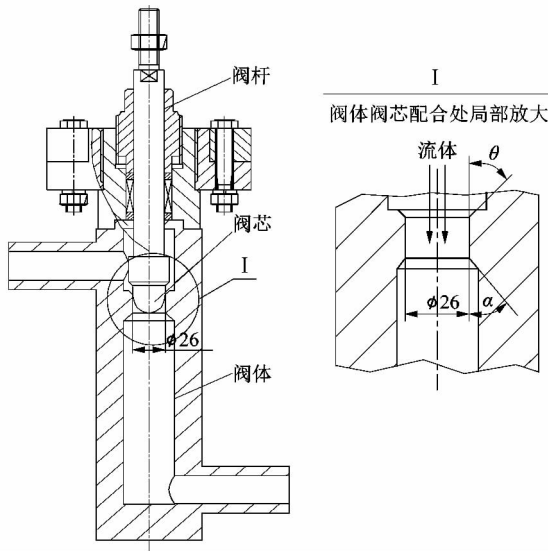


图 1 角式阀

Figure 1 Angle valve

1.2 两相流下的计算公式

当阀门内既有液体又有气体时,其流量系数应按照两相流的公式来计算^[7]。目前气液两相流下的流量系数都是按照膨胀系数理论计算得出的,即利用等效密度法计算。

膨胀系数是用来校正阀门内部因流体流动而发生改变的气体体积分数,其与很多参数都有关系。已知阀门内为完全的紊流流动,因此可以忽略雷诺数的影响:

$$y = 1 - \frac{X}{3F_K X_T} \quad (1)$$

式中: y 为临界压差比; X 为压差比, $X = \Delta p/p_1$,其中 Δp 为流体两端的压差, p_1 为进口压力; F_K 为比热容比系数,查表空气为 1; X_T 为临界压差比,查表为 0.65。

气液两相流下等效密度

$$\rho_e = \frac{q_{mg} + q_{ml}}{\frac{T_1 q_{mg}}{2.64 p_1 \rho_g y^2 Z} + \frac{q_{ml}}{10^3 \rho_l}} \quad (2)$$

式中: ρ_e 为等效密度, kg/m^3 ; Z 是压缩比系数,是比压力和比温度的函数,查表得为 1; T_1 热力学温度, K ; ρ_g 为气体密度, 20°C 时取 1.205 kg/m^3 ; ρ_l 为液体密度,取 998.3 kg/m^3 ; q_{mg} 为气体进口质量流量, kg/s ; q_{ml} 为液体进口质量流量, kg/s 。

气液两相流下其流量系数

$$K_v = \frac{q_{mg} + q_{ml}}{3.16 \sqrt{\Delta p \rho_e}} \quad (3)$$

公式(3)的成立条件是阀门出口压力恒定,逐步

加大入口压力,当阀门入口处的压力加大到一定程度时,即到达一个临界点时继续加大压力,流量已经达到最大,此时可以将这种状况称为阻塞流。阻塞流的判断公式为:

$$\Delta p' = F_L^2 (p_1 - F_F p_v) \quad (4)$$

式中: $\Delta p'$ 为阻塞流压降; F_L 为阀门的压力恢复系数,流闭型为 $F_L = 0.8$; p_1 为进口处的压力; F_F 为临界压力比系数。

$$\text{一般 } F_F = 0.96 - 0.28 \sqrt{p_v/p_c} \quad (5)$$

式中: p_c 为水的绝对热力学临界压力, $p_c = 22\ 120 \text{ kPa}$; p_v 为水在 20°C 下的饱和蒸气压, $p_v = 2.334\ 6 \text{ kPa}$ 。

将其代入公式(5)可得

$$F_F = 0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{2.334\ 6}{22\ 120}} = 0.957$$

因此对于公式(3)在该工况下的使用需要满足以下条件:

$$\left. \begin{aligned} \Delta p < \Delta p' = F_L^2 (p_1 - F_F p_v) \\ X < F_K X_T \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

给定角式调节阀工作参考压力为 0.1 MPa (1 个标准大气压),阀门进口压力为 $p_1 = 0.25 \text{ MPa}$,出口压力为 $p_{out} = 0.15 \text{ MPa}$,液体温度 20°C ,模拟计算不同开度下角式阀流量系数。

将进出口压力代入公式(6)中得到:

$$\left\{ \begin{aligned} 0.1 < 0.8^2 (0.25 - 0.957 \times 0.002\ 334\ 6) = 0.158\ 5; \\ 0.1/0.25 = 0.4 < 0.65 \times 1 = 0.65 \end{aligned} \right.$$

由此可以判定,在进口压力为 $p_1 = 0.25 \text{ MPa}$,出口压力为 $p_{out} = 0.15 \text{ MPa}$ 条件下,公式(3)可以使用。

2 气液两相流模拟

在 FLUENT 软件中采用欧拉模型进行仿真,得到进口气体体积分数为 10% 时几种典型开度下角式调节阀的进口质量流量和平均流速,数据如表 1 所示。

表 1 不同开度下数据对比

Table 1 Comparison of data under different opening degrees

开度/%	气体质量流量/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	液体质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	单相流体质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	两相平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	单相平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
40	74.1	0.54	0.68	0.870	0.861
50	107.0	0.78	0.93	1.370	1.320
60	150.0	1.10	1.20	1.780	1.720
70	190.0	1.39	1.48	2.190	2.100

将表 1 中的数据代入公式(2)~(3)计算可得流量系数与进口等效密度。从图 2 中可以看出,同种开

度下气液两相流的流量系数要比单相流的流量系数平均低 15%。

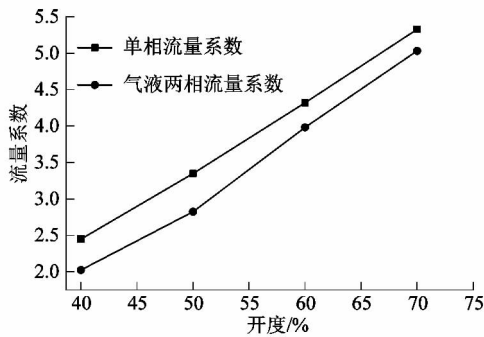


图 2 不同进口工况的流量系数

Figure 2 Flow coefficient and equivalent density map of different inlet conditions

2.1 气体体积分数对流量系数的影响

令进口气体体积分数为 0, 4%, 6%, 8% 和 10%, 开度 40%, 其他边界条件如上, 得到表 2 所示的气体

表 2 不同气体体积分数下的质量流量

Table 2 Different gas volume fraction under mass flow

气体体积分数/%	气体质量流量/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	液体质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
0	0	0.680
4	28.9	0.563
6	43.6	0.556
8	57.7	0.550
10	74.1	0.543

将表 1 中数据代入公式(2) ~ (3) 计算, 得到两相流状态下的流量系数和进口等效密度, 如图 3 ~ 4 所示。

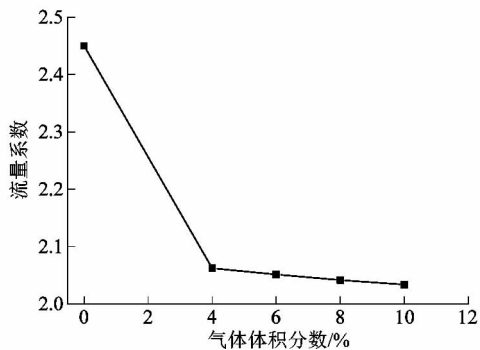


图 3 不同气体体积分数下的流量系数曲线

Figure 3 Flow coefficient curve of different gas volume fraction

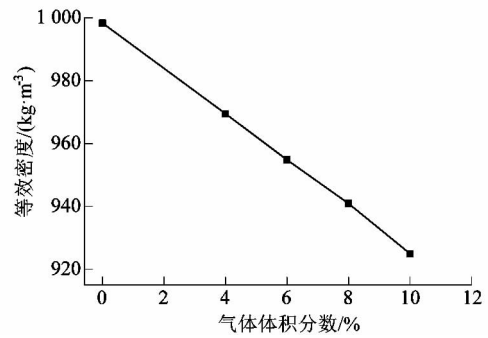


图 4 等效密度

Figure 4 Equivalent density

由于气体密度较小, 随着气体体积分数的增大, 入口处流体的等效密度会不断下降, 流量系数总体趋势不断的降低。因为阀门中气泡流动十分的复杂, 气泡之间相互碰撞容易导致能量损失, 从而使流体中的流阻系数增大, 进而降低调节阀的流量系数^[8]。

如图 5 所示, 随着进口气体体积分数的增大, 阀芯处的气体体积也随之增大。流体在流过节流孔时, 水中的气体会聚集在阀芯的表面, 形成气囊^[9]。由图可知进口气体体积分数越大阀芯表面形成的气囊就越多, 气囊的形成会阻碍内部流体的流动, 从而降低直角阀的流量调节能力。

3 阀体结构对角式调节阀流量系数的影响

3.1 阀杆强度校核

课题组以锥面密封为研究对象, 其密封形式如图 6 所示。

根据图 6 得:

$$F = 2N \sin \theta + 2T \cos \theta. \tag{6}$$

式中: N 为密封锥面反作用力; θ 为密封面锥角; F 为阀杆轴线力; T 为密封面摩擦力, $T = f_M N$; f_M 为密封面的摩擦因数, 取为 0.3。

$$2N = \pi D_{MP} b_M q; \tag{7}$$

$$b_M = \frac{D_{MW} - D_{MN}}{2 \sin \theta}; \tag{8}$$

$$D_{MP} = \frac{D_{MW} + D_{MN}}{2}. \tag{9}$$

由公式(6) ~ (9) 可得

$$q = \frac{F}{\frac{\pi}{4} (D_{MW}^2 - D_{MN}^2) \left(1 + \frac{f_M}{\tan \theta} \right)}. \tag{10}$$

为了保证调节阀的密封性能, 必需要调节阀的实际工作比压 q , 使之大于调节阀的密封所需比压 q_{MF} , 即

$$q > q_{MF}. \tag{11}$$

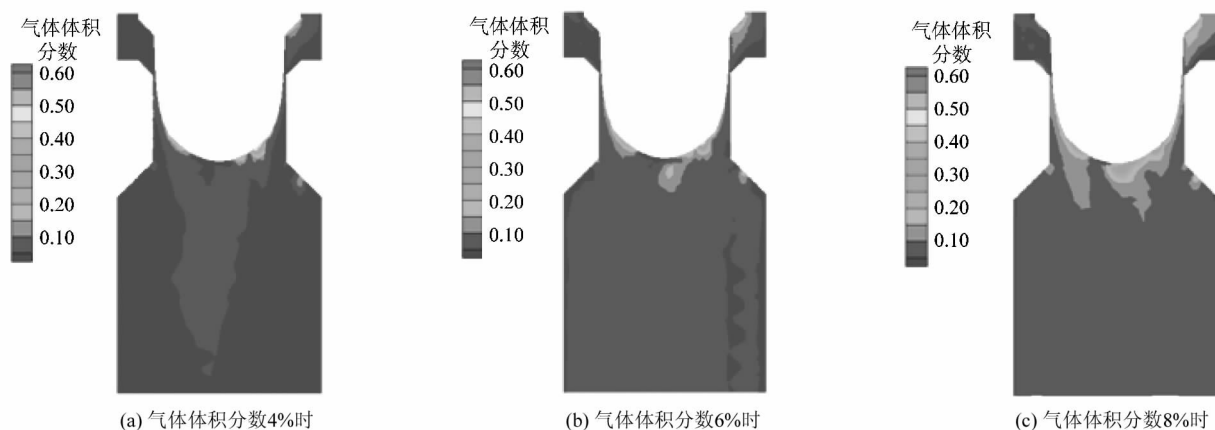


图 5 阀内气体体积分布

Figure 5 Distribution of gas volume in valve

其中,
$$q_{MF} = \frac{C + Kp}{\sqrt{b_M/10}} \quad (12)$$

式中: C 为密封面相关参数,硬质合金3.5; K 为影响系数,硬质合金取1; p 为公称压力,取10 MPa; b_M 为密封面宽度,mm; q_{MF} 为密封所需比压,MPa。

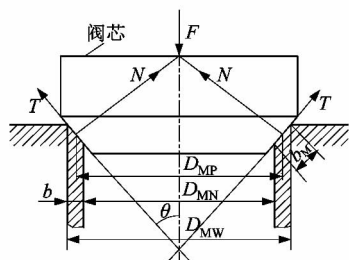


图 6 锥面密封

Figure 6 Cone seal

为防止变形导致阀杆卡死,因此密封面的角度 θ 不得小于 30° ^[10]。为确保阀杆不会因为受力变形而遭到破坏,需要对其进行强度校核。分别对密封面角度 θ 为 $30^\circ, 38^\circ, 45^\circ, 52^\circ$ 和 60° 的角式阀的阀杆进行强度校核,由公式(10)~(12)可得密封所需比压、阀杆轴线力和阀杆所需强度,如表3所示。

表 3 强度校核表

Table 3 Strength checklist

密封面角度 $\theta/(^\circ)$	密封所需比压/MPa	阀杆轴线力 F/N	阀杆所需强度/MPa
30	17.430	6 181.84	162.71
38	19.334	4 507.87	118.65
45	20.730	3 491.58	91.90
52	21.880	2 701.86	71.11
60	22.940	1 966.97	51.77

由阀杆的材料可知屈服强度 $\sigma_s = 245$ MPa,所以

表3中的阀杆强度满足要求。

3.2 密封面角度对流量系数的影响

进出口压力条件不变,进口气体体积分数为10%,分别对密封面角度 θ 为 $30^\circ, 38^\circ, 45^\circ, 52^\circ$ 和 60° 的角式阀进行两相流模拟,结果如表4所示。

表 4 不同密封面角度下质量流量

Table 4 Mass flow under different sealing surface angles

密封面角度 $\theta/(^\circ)$	气体质量流量/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	液体质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
30	85.2	0.62
38	75.9	0.56
45	74.0	0.54
52	68.1	0.49
60	64.0	0.47

将表4中的数据代入公式(3)计算,结果如图7所示。

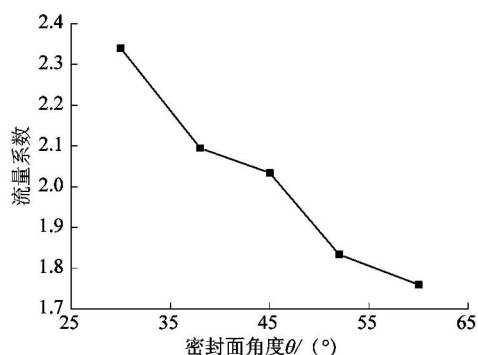


图 7 不同密封面角度下流量系数

Figure 7 Flow coefficient under different sealing angles

从图7中可知,随着密封面角度 θ 的增加,其流量系数总体趋势是在不断的降低,所以应尽量选择密封面角度较小的设计。

3.3 流道角度对流量系数的影响

调节阀的流道角度作为调节阀节流孔的后端,对调节阀的流量也会产生影响。选择密封面角度为 30°,进口气体体积分数为 10%,改变流道角度进行模拟,结果如表 5 所示。

表 5 不同流道角度下的质量流量
Table 5 Mass flow at different flow angles

流道角度 $\alpha/(\circ)$	气体质量流量/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	液体质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
0.0	88.0	0.638 6
22.5	86.0	0.630 1
45.0	85.2	0.623 8
67.5	85.4	0.623 9
90.0	85.1	0.623 5

将表 5 中的数据代入公式(3)计算,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,为了增加角式调节阀的流量调节能力,设计中应尽量选择较小的流道角度。

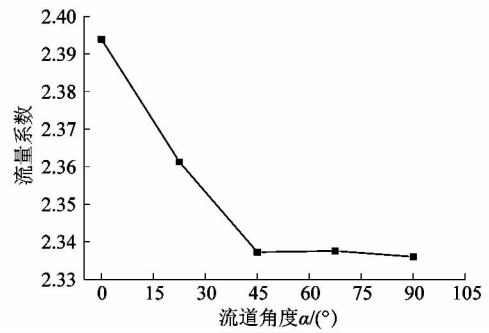


图 8 不同流道角度下流量系数

Figure 8 Flow coefficient at different flow angles

图 9 所示是流道角度 α 为 45.0°,22.5°和 0.0°时气体流线图。对比发现流道角度为 0.0°时,角式阀内部流场没有涡流产生。由于涡流会导致阀门能量的损失^[11],减弱阀门的流量调节能力,并产生噪音危害,因此可以选择密封面角度 θ 为 30°,流道角度 α 为 0°的阀体结构。

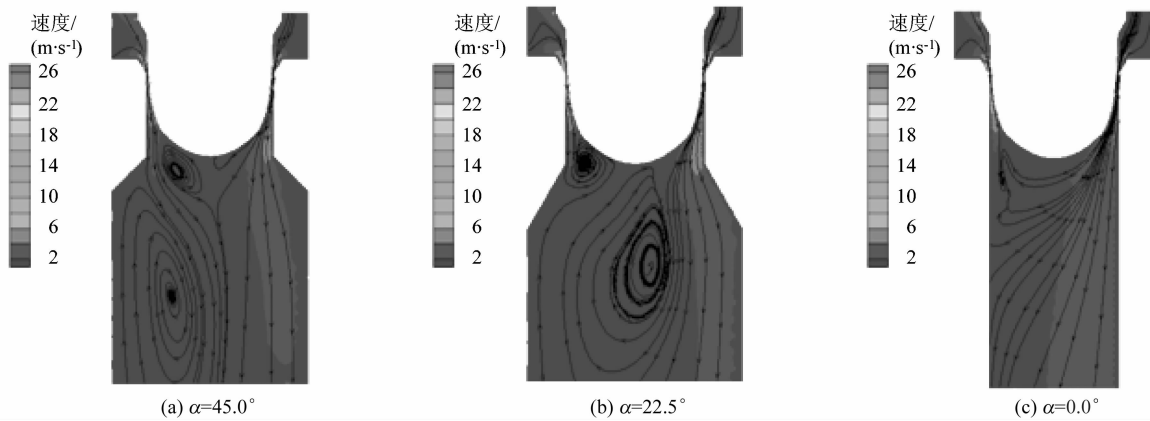


图 9 气体流线图

Figure 9 Gas flow chart

由表 6 可知,密封面角度 θ 为 30°,流道角度 α 为 0°的阀体结构时,100%开度下角式调节阀的流量系数得到提升,说明改进后的角式阀比改进前拥有更好的流通能力。

表 6 改进前后 100%开度阀门流量系数
Table 6 Before and after improvement of 100% open valve flow coefficient

状态	气体体积 分数/%	气体质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	液体质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	流量 系数
改进前	0	0	2.93	11.660
改进后	0	0	3.38	12.568

4 结语

通过 FLUENT 软件对角式调节阀在气液两相流下的流场特性进行分析,对比结构优化前后的流量系数得到以下结论:

1) 通过气液两相流模拟,发现进口气体体积分数越大则阀芯表面形成的气囊区域就越大,得到气体体积分数与阀门流量系数的关系,对管道工程有一定的参考意义。

2) 由计算可知,阀门全开时改进后的调节阀流量系数提高了 7%,所以减小密封面角度和流道角度可以提高阀门的流通能力。为今后同类阀门的改进提供了参考。

(下转第 91 页)