

孔板倒角对平衡型低温流量计工作性能影响的数值分析*

陈虹¹, 高旭¹, 王洁², 刘元亮², 金滔²

(1. 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 北京 100028;
2. 浙江大学 制冷与低温研究所/浙江省制冷与低温技术重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 平衡型低温流量计可用于低温推进剂的加注、分配、输送等环节, 其孔板结构特征是影响流量计性能的关键因素。为了研究孔板倒角对平衡型低温流量计流出系数、压力损失系数和稳定性的影响, 建立了基于Mixture多相流模型、Schnerr-Sauer空化模型和Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型的CFD数值模型, 并结合文献中的水翼空化实验和多孔板流动实验的结果验证了模型的可靠性。模拟计算结果显示, 开设前倒角会增大多孔板的流出系数, 减小压力损失系数, 但会增大流量计测量时的不稳定性; 在一定的计算工况下, 45°的前倒角使流出系数由0.674增大到0.907, 适当开设前倒角可以有效提高流量计的工作性能。而开设后倒角对流量计性能的影响较小。用于流体流量的双向测量时, 可对多孔板的前后端均开设45°的倒角。

关键词: 平衡型流量计; 多孔板; 倒角; 流出系数; 压力损失系数

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 02-0423-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190064

Numerical Analysis of Orifice Chamfer Effects on Performance of Balanced Flowmeter for Cryogenic Fluids

CHEN Hong¹, GAO Xu¹, WANG Jie², LIU Yuan-liang², JIN Tao²

(1. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing 100028, China;
2. Institute of Refrigeration and Cryogenics / Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Balanced flowmeter can be used for measurement during the filling, distribution and transportation of cryogenic propellants, and its structural features of the perforated plate are essential for the performance of flowmeter. To investigate the effects of orifice chamfer on the performance of balanced flowmeter for cryogenic fluids, including the discharge coefficient, the pressure loss coefficient and the stability characteristics, a CFD model based on mixture multiphase model, Schnerr-Sauer cavitation model and Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model was built and then validated by the results from the hydrofoil cavitation experiment and the perforated plate flow experiment in the literatures. The simulation results show that the orifice with front chamfer can increase the discharge coefficient and decrease the pressure loss coefficient, but also induce the measurement instability of the flowmeter. Under the operating conditions in the present work, a front chamfer can improve the flowmeter perfor-

* 收稿日期: 2019-01-21; 修订日期: 2019-05-27。

基金项目: 航天低温推进剂技术国家重点实验室开放课题 (SKLTSCP1408)。

作者简介: 陈虹, 硕士, 研究员, 研究领域为低温工程。E-mail: chh1364@163.com

通讯作者: 金滔, 博士, 教授, 研究领域为低温工程。E-mail: jintao@zju.edu.cn

引用格式: 陈虹, 高旭, 王洁, 等. 孔板倒角对平衡型低温流量计工作性能影响的数值分析[J]. 推进技术, 2020, 41(2): 423-430. (CHEN Hong, GAO Xu, WANG Jie, et al. Numerical Analysis of Orifice Chamfer Effects on Performance of Balanced Flowmeter for Cryogenic Fluids[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(2):423-430.)

mance significantly, e.g., the front chamfer of 45° improves the discharge coefficient from 0.674 to 0.907, while a chamfer at the back end of the plate brings little influence. When applied for two-way flow measurement, the chamfers of 45° at both ends of the perforated plate are suggested.

Key words: Balanced flowmeter; Perforated plate; Chamfer; Discharge coefficient; Pressure loss coefficient

1 引言

孔板流量计因其结构简单、可靠性高和流体适用性广等优点,目前已广泛地应用于石油和化工等领域。然而,当流体流经孔板时会发生节流压降,容易发生空化现象,此外也会造成较大的局部压力损失,这会对流量计的性能和设备安全带来影响。另一方面,空间技术的快速发展对低温流体流量测量精度的要求也越来越高^[1]。低温推进剂的加注、分配、输送等环节都离不开流量的高精度测量。多孔板可以平衡调整流场^[2],流体流经多孔板后受到的扰动和压力损失比标准孔板小,因而在低温流体测量领域的应用潜力大。

在过去的几十年间,多孔板的研究受到大量关注,主要集中于结构参数和运行工况对其流出系数和压力损失系数的影响。Kolodzie等^[3]以空气为介质,实验研究了结构参数对多孔板流出系数的影响,发现流出系数与孔板直径、孔间距和孔板厚度密切相关。Gan等^[4]研究了空气流经矩形多孔板时压力损失系数的变化情况。研究发现,当孔板厚度增大到一定值时,压力损失系数基本保持不变。Zhao等^[5]实验研究了压力损失系数随多孔板结构参数的变化规律,试验中以水为介质。在各结构参数中,等效直径比对流量计性能的影响最大。Malavasi等^[2]研究了压力损失系数与结构参数和流动参数间的关系,同样发现等效直径比具有重要影响。Huang等^[6]以水为介质,实验研究了孔板厚度、孔隙比、孔的直径和分布等结构参数,发现与标准孔板相比,多孔板具有更低的临界雷诺数和更强的抗干扰能力。Guo等^[7]数值研究了空气流经多孔板时,雷诺数、孔隙比、孔板直径、板厚度、表面粗糙度和板的倾斜角对流体流动模式和压力损失系数的影响。王虎山等^[8]研究了带多孔板的双压气机构进气系统气动性能,发现总压恢复系数随开孔率增大而增大。Liu等^[9]数值研究了不同流体类型下多孔板流量计工作性能,发现低温流体的稳定雷诺数范围比水更广。Jin等^[10]研究了液氢流经多孔板流量计,多孔板的开孔形式、厚度、等效直径比、开孔直径等对流量计的影响,发现

中心孔直径较大的开孔方式下,流量计性能更好,而等效直径比是影响液氢空化的最重要因素。

关于倒角对孔板流量计工作性能的影响,Yeh等^[11]采用VOF模型,研究了入口几何形状对平板喷嘴雾化器流出系数的影响,发现在孔板倒角为 50° 时,流出系数达到最佳值。Mariani等^[12]采用欧拉-拉格朗日方法研究了带倒角孔板的流体流动规律,结果表明流场对孔板倒角非常敏感, 5° 的倒角就会对流场产生显著影响。于洪仕等^[13]对水流经带倒角的多孔板时的尾流流场进行数值计算,发现前倒角是降低永久压力损失的关键因素,而后倒角对尾流流场具有调整作用。当流体流经孔板时,容易发生空化现象。Sato等^[14]试验研究水流经孔板的空化流动规律,观察了孔板中的不稳定空化现象,试验中采用不同喉部长度的长圆柱形孔板。段欣悦等^[15]采用完全空化模型,对液氧流经孔板时因节流导致的空化进行数值模拟,研究了空化形成与发展规律,界定了临界空化状态。Maynes等^[16]通过水流实验研究了多孔板压力损失系数、空化数与等效直径比、相对厚度之间的关系。Li等^[17]对孔板中空化流动的研究中,发现开孔直径和管路直径会对空化区域产生显著影响,而孔板长度的影响较小。

可以发现,以前对多孔板流量计的研究多集中于常温流体,如空气和水等,对应用于航天推进技术领域的低温流体等的研究相对较少。此外,低温流体流经多孔板后易发生空化现象,在研究多孔板流量计适用于低温流体的性能研究时,需要建立并验证考虑低温流体空化流动的数值模型。同时,对孔板结构参数的研究多集中于孔板直径比、孔板厚度、开孔直径、孔分布方式等,很少涉及到孔板倒角。

本文拟以低温流体液氮为介质,采用数值方法研究孔板倒角对平衡型流量计低温流体流量测量性能的影响,计算模型将考虑低温流体的空化效应。

2 方法

2.1 数学模型及验证

液氮流经多孔板后,因节流压降,在一定工况下流场压力会小于相应温度下流体的饱和压力,诱发

空化,此时流体流动为气液两相流。本文将气液两相看成混合物单相,采用混合物多相流模型求解连续性方程、动量方程和能量方程。基本控制方程如下^[18]

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \quad (2)$$

$$\rho_m \mathbf{g} + \nabla \cdot \left(\sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_{dr,i} \mathbf{v}_{dr,i} \right) \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=1}^2 (\alpha_i \rho_i h_i) + \nabla \cdot \left(\sum_{i=1}^2 \alpha_i \mathbf{v}_i (\rho_i h_i + p) \right) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

式中下标 m, l 和 g 分别表示混合相、液相和气相; α 为体积分数; $\rho, \mathbf{v}, \mu, t, p, T$ 和 h 分别为密度、速度、动力粘度、时间、压力、温度和焓; k_{eff} 为有效导热系数; S_E 为体积热源; $\mathbf{v}_{dr,i}$ 为漂移速度。

Schnerr-Sauer 空化模型已被用于低温流体空化的数值计算^[19-20]。其具体表达式为^[21]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha \rho_g \mathbf{v}) = R_c - R_e \quad (4)$$

式中 R_e 和 R_c 为质量源项。当 $p \leq p_v$ 时, $R_c = 0$,

$$R_c = \frac{\rho_g \rho_l}{\rho_m} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2 p_g - p}{3 \rho_l}}; \text{ 当 } p > p_v \text{ 时, } R_c = 0,$$

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_g}{\rho_m} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2 p - p_g}{3 \rho_l}}。 \text{ 式中下标 } e, c \text{ 和 } v$$

分别表示气泡生成、气泡破裂和饱和蒸汽。

此外,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型^[22]进行湍流闭合,它满足雷诺应力的数学约束,与实际湍流过程一致。与标准 $k-\varepsilon$ 模型相比,改进了湍流粘性的计算,并基于均方涡波动的输送方程建立了新的 ε 方程。对涉及旋转、强逆压梯度下的边界层,分离和回流等流动,Realizable $k-\varepsilon$ 模型可得到较好的预测结果。湍动能 k 和湍流扩散率 ε 的输送方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \quad (5)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (6)$$

$$\rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}$$

式中 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_2=1.9$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.2$ 。 G_k 是因平均速度梯度生成的湍动能。

采用 Hord 等^[23]的液氮水翼空化实验 283C 来验证上述数学模型在模拟低温流体空化流动时的可靠性。水翼结构和计算域如图 1 所示,且实验中液氮的进口温度为 77.71K,自由来流速度为 14.5m/s,空化数为 1.8。模拟中采用速度进口和压力出口, $y=0$ 处设为对称边界条件,壁面设为无滑移壁面。计算结果和实验结果的对比如图 2 所示。水翼壁面压力和温度的数值及随位置的变化规律基本吻合,考虑到实验误差及模拟对实际问题的简化,可以认为数值计算模型可以有效地用于模拟低温流体的空化流动。

此外,选取 Huang 等^[6]的多孔板流动实验结果,来验证本文数值模型用于流体多孔板流动的准确性。孔板结构如图 3 所示,采用了实验中编号为 No.1 的多孔板,管路内径 D 、开孔直径 d_0 、内圈开孔圆心所在圆的直径 d_1 和外圈开孔圆心所在圆的直径 d_2 分别为 29mm, 4mm, 11mm 和 22.6mm,厚度为 3mm;内圈开有 5 个孔,外圈开有 9 个孔。实验工质为水,且实验在标准大气压和室温条件下开展。模拟结果和实验结果的对比如图 4 所示,两者之间的相对误差在 4% 内,从而验证了数值模型用于多孔板流动模拟的准确性。

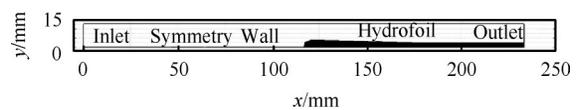


Fig. 1 Computational domain of the hydrofoil 283C

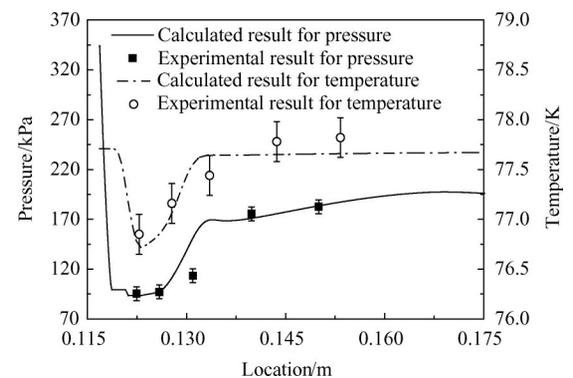


Fig. 2 Model validation against Hord experiments^[23]

2.2 物理模型和网格划分

多孔板结构如图 5 所示。管路内径 D 为 50mm,孔板厚度 $t=6.35$ mm。多孔板中心有一个孔;周围孔分布于直径 $D_r=30$ mm 的圆上,开孔数目为 7 个,其与中心开孔直径相同,均为 $d=10$ mm。控制倒角圆与孔

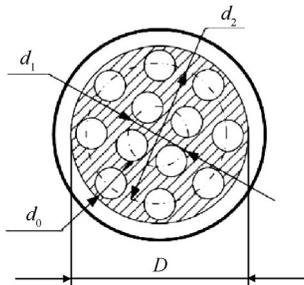


Fig. 3 Plate structure in the experiments of reference[6]

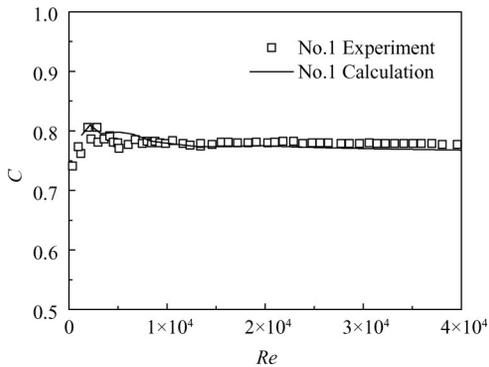


Fig. 4 Model validation against the experiments of reference[6]

间的距离差为 $e=1\text{mm}$ 。为便于区分不同倒角的多孔板,以 $\alpha_1-\alpha_2$ 表示前倒角和后倒角度数分别为 α_1 和 α_2 的多孔板。多孔板上下游直管段的长度分别取 $10D$ 和 $15D$,以保证多孔板上游流动充分发展,且下游静压力得到充分恢复。对计算域进行六面体网格划分,并对孔板附近区域的网格进行局部加密,网格膨胀因子均 <1.2 。划分的网格如图6所示。经过网格独立性考核,计算中采用的网格总数约为119万。以不倒角时的多孔板为例,采用数量分别为687310, 1187590和1668615的三种网格对液氮流经多孔板时的流出系数进行数值计算,结果如图7所示。与1668615的网格相比,采用1187590的网格计算所得流出系数的偏差 $<0.3\%$ 。在保证计算精度的同时,为减小运算量,拟选用1187590的网格划分方案。计算域左端为速度入口,右端为压力出口,壁面为无滑移边界条件。

基于CFD软件ANSYS FLUENT 14.5进行了三维稳态数值模拟。压力速度耦合采用Coupled算法,并采用二阶迎风格式进行数值求解。空化发生时连续性方程和气相组分的收敛标准设为 10^{-3} ,其余设为 10^{-6} 。

3 结果与讨论

本文计算中选用液氮为流体介质(进口温度为

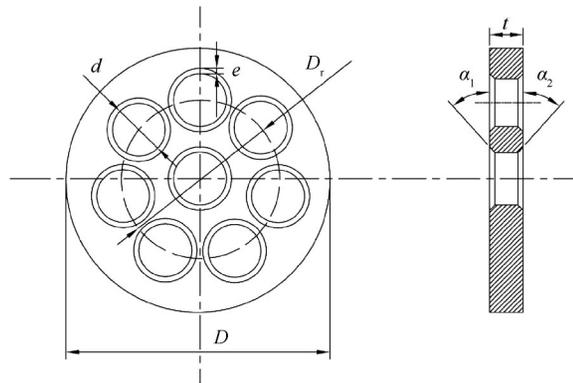


Fig. 5 Structure of the perforated plate

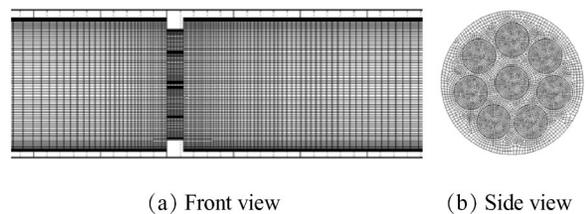


Fig. 6 Illustration of the mesh

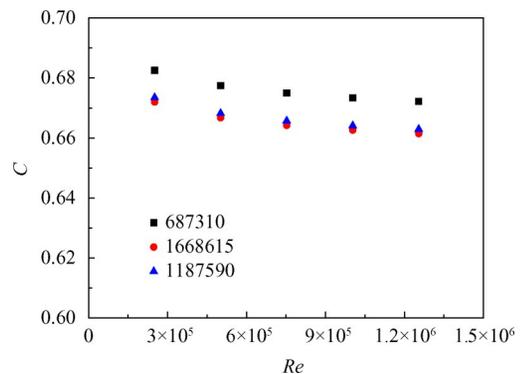


Fig. 7 Mesh size independency test

77.36K,出口压力为0.2MPa),壁面绝热且无滑移。通过改变流体进口速度,可以得到不同雷诺数下的流量计工作性能。雷诺数 $Re=uD/\nu$,速度 u 取流体进口速度,特征长度取管路内径 D ,液氮的运动粘度为 $19.93\text{mm}^2/\text{s}$ 。采用流出系数和压力损失系数两个无量纲量来表征多孔板流量计的工作性能。流出系数为实际流量与理想流量的比值^[24],其表达式为

$$C = \frac{q_v}{\sqrt{1-\beta^4}} \beta^2 A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (7)$$

式中 q_v 为流体体积流量, A 为管路横截面积, Δp 为节流压降;等效直径比 $\beta=(A_n/A)^{1/2}$, A_n 为孔板总开孔面积。

压力损失系数定义为

$$\zeta = \Delta\varpi / \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) \quad (8)$$

式中 Δp 是流体流经孔板的永久压力损失,模拟中取孔板上游 $1D$ 和下游 $6D$ 位置处的压力差。

在多孔板前端(与上游区域相连的部分)开孔处分别开设 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 的倒角,后端不倒角,多孔板流出系数 C 和压力损失系数 ξ 随雷诺数 Re 的变化分别如图8和图9所示。从图中可以发现,随着 Re 的增大,孔板流出系数和压力损失系数的变化呈现出三个阶段,即不稳定区、稳定区和空化区^[10]。以无倒角时的工况为例,三个阶段分别用 I, II 和 III 表示,如图8所示。当 $Re < 1.2544 \times 10^5$, 即进口速度 $u < 0.5\text{m/s}$ 时,流量计处于不稳定区,流出系数随 Re 的增大而减小,此时影响流出系数的流束收缩系数和孔板总阻力系数会随 Re 发生变化。当 $Re > 1.2544 \times 10^6$, 即进口速度 $u > 5\text{m/s}$ 时,流量计处于空化区,流体流经多孔板后因节流压降而发生空化,气液两相流动的存在使流量计压降增大,造成流出系数的下降,影响流量计的工作性能。此外,还会带来侵蚀、振动和噪声等危害。当 $1.2544 \times 10^5 < Re < 1.2544 \times 10^6$ 时,流束收缩系数和孔板总阻力系数不再随 Re 变化,因而流出系数基本不随 Re 发生变化,此时流量计处于稳定区。

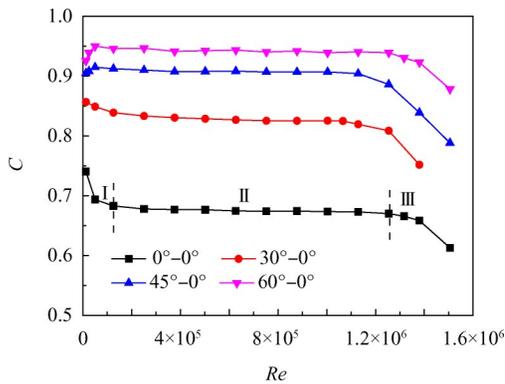


Fig. 8 Discharge coefficient of the perforated plate with different chamfer angles on the front end

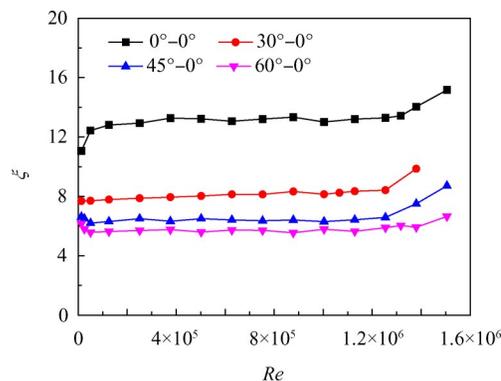


Fig. 9 Pressure loss coefficient of the perforated plate with different chamfer angles on the front end

流量计在正常工作时,须处于中间的稳定区域,此时多孔板的流出系数和压力损失系数基本不随 Re 发生变化。流出系数越大,压力损失系数越小,且稳定工作区域流出系数的波动越小,意味着流量计的性能更优、更稳定。与无倒角($0^\circ-0^\circ$)的工况相比,多孔板开设前倒角后,流出系数明显增大,且随前倒角度数的增大而升高。当倒角分别为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 时,稳定区域的平均流出系数分别为 $0.674, 0.828, 0.907$ 和 0.942 。类似地,多孔板压力损失系数随前倒角度数的增大而下降。

Table 1 Stability of the balanced flowmeter with different chamber angles on the front end

Chamfer	λ_1	λ_2
$0^\circ-0^\circ$	3.8×10^{-3}	1.39×10^{-2}
$30^\circ-0^\circ$	4.8×10^{-3}	1.67×10^{-2}
$45^\circ-0^\circ$	4.2×10^{-3}	1.75×10^{-2}
$60^\circ-0^\circ$	4.9×10^{-3}	1.78×10^{-2}

采用标准差 λ_1 和线性度 λ_2 来评估多孔板流量计工作区间(即稳定区)的稳定性

$$\lambda_1 = \sqrt{\left(\sum(C_i - \bar{C})^2\right) / (n - 1)} \quad (9)$$

$$\lambda_2 = C_{\max} - C_{\min} \quad (10)$$

指标数值越小,表示流出系数波动越小,流量计的稳定性越高。表1列出了不同前倒角时流量计工作区间的稳定性指标。由表中数据可以看到,前倒角的引入会在一定程度上降低流量计的稳定性。

多孔板前端不进行倒角,后端则分别有 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 的倒角时,流出系数和压力损失系数随 Re 的变化分别如图10和图11所示。开设后倒角对多孔板流出系数和压力损失系数的影响较小,后倒角为 60° 时,稳定区间的平均流出系数和压力损失系数分别为 0.676 和 13.159 ,这与没有倒角时的数值 0.674 和 13.173 非常接近。计算结果表明,开设后倒角会增大流出系数,降低压力损失系数,且随着倒角度数的增大影响将变小。当后倒角为 30° 时,工作区间的平均流出系数从 0.674 变为 0.686 ,提高了 1.78% ;平均压力损失系数由 13.173 变为 12.623 ,降低了 3.90% 。流量计工作区间流出系数的稳定性指标如表2所列。与前倒角相比,后倒角对流出系数稳定性的影响较小。

倒角对多孔板工作性能的影响是通过改变节流孔附近的流场引起的。流体流经多孔板后的永久压力损失包括进口处的流动阻力(即多孔板本身造成

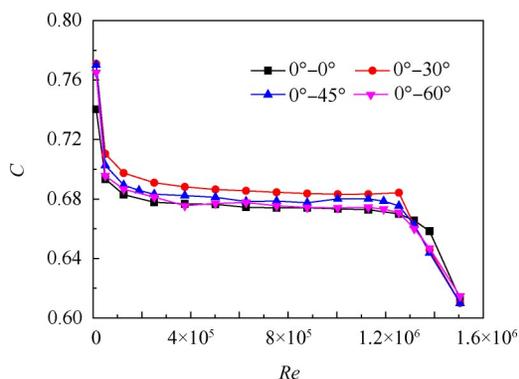


Fig. 10 Discharge coefficient of the perforated plate with different chamfer angles on the back end

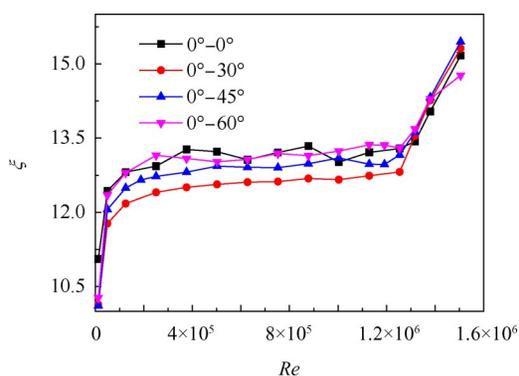


Fig. 11 Pressure loss coefficient of the perforated plate with different chamfer angles on the back end

Table 2 Stability of the balanced flowmeter with different chamber angles on the back end

Chamfer	λ_1	λ_2
0°-0°	3.8×10^{-3}	1.39×10^{-2}
0°-30°	3.9×10^{-3}	1.39×10^{-2}
0°-45°	3.9×10^{-3}	1.38×10^{-2}
0°-60°	4.0×10^{-3}	1.45×10^{-2}

的局部压力损失)、多孔板下游区域流场中旋涡运动消耗的能量和管道内壁面处的沿程损失^[13]。沿程损失不受倒角的影响,下面的分析中将不作考虑。0°-0°、45°-0°和0°-45°三种倒角方式下多孔板附近的速度云图和流线图如图12和图13所示。液氮进口流速为2m/s。

没有倒角时,流体从上游管路进入截面突然收缩的节流孔,进口处流动阻力大;流束在节流孔处收缩,流线距壁面较远,流体流经节流孔后形成的射流速度较高,下游壁面存在较长的回流区域,流体旋涡运动消耗的能量较多。开设前倒角后,流体沿着倒角进入节流孔,缓解了流体在进入节流孔时截面突然收缩的过程,使流体沿进口边缘转向时的流动比较平稳,流线更加贴近壁面,孔板截面与流线的变化

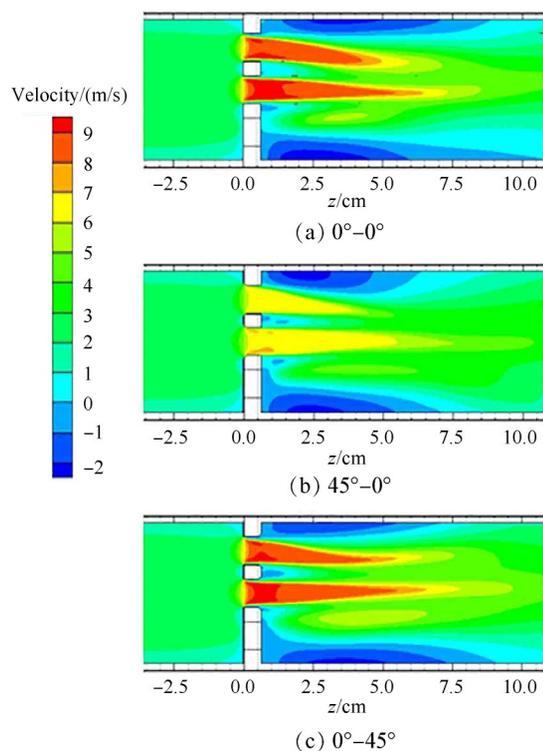


Fig. 12 Velocity near the perforated plate with different chamfers

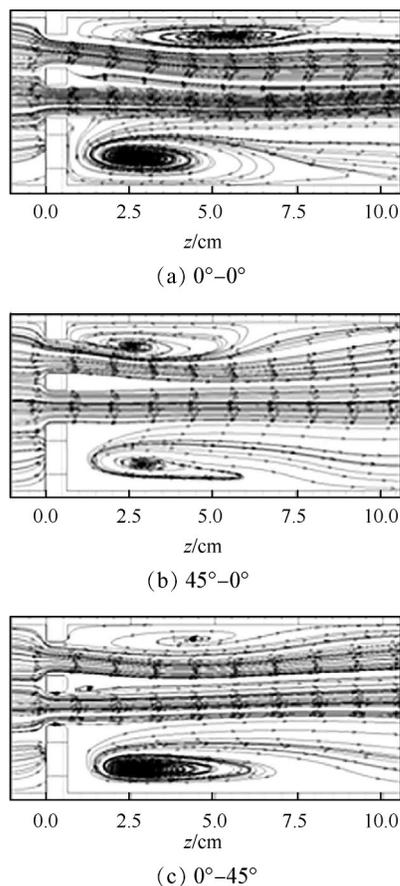


Fig. 13 Streamlines near the perforated plate with different chamfers

较为一致,从而减小了进口处的流动阻力;此外,与无倒角时相比,开设前倒角后射流的速度以及孔板下游回流区的长度也明显缩短,流体的流动损失减小。而开设后倒角对流束收缩和流速大小的影响相对较小,下游壁面附近回流区的长度略有缩短,流体流经孔板后的压力损失略有下降。

为便于流体流量的双向测量,对多孔板前后倒角均为 45° 的工况也进行了研究,流出系数和压力损失系数的变化如图14和图15所示。相比于只开设前倒角的工况,前后均进行倒角时多孔板的流出系数略有增大,压力损失系数略有下降。具体地,流量计工作区间的平均流出系数由0.907增大到0.927,平均压力损失系数由6.403减小到6.135。

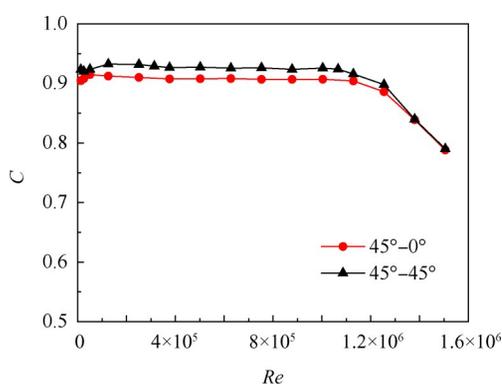


Fig. 14 Discharge coefficient of the perforated plate with chamfers on both ends

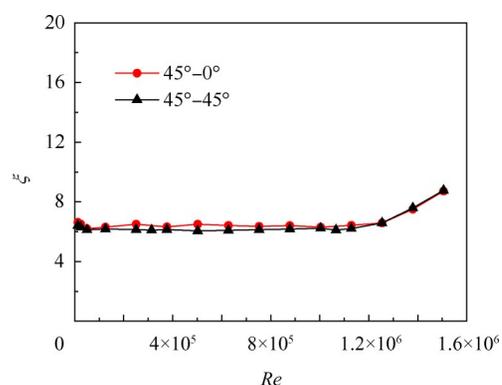


Fig. 15 Pressure loss coefficient of the perforated plate with chamfers on both ends

4 结论

本文采用数值方法,研究了多孔板倒角对平衡型流量计工作性能的影响,主要结论有:

(1)孔板开设前倒角后,流出系数增大,压力损失系数减小,但前倒角的引入会在一定程度上增加流量计流量测量时的不稳定性。前倒角分别为 0° ,

30° , 45° 和 60° 时,稳定区域的平均流出系数分别为0.674, 0.828, 0.907和0.942。与开设前倒角相比,开设后倒角对流量计工作性能的影响较小。相比于只开设前倒角的计算工况,前后均倒角时流量计平均流出系数略有增大,压力损失系数略有下降。

(2)倒角对多孔板工作性能的影响是通过改变节流孔附近的速度分布和流线引起的。

上述结论可用于指导平衡型低温流量计的结构设计和优化。在单向流体流量测量中,开设合适的前倒角可以有效提高流量计的工作性能。在用于双向流量测量时,可对多孔板前后均倒角 45° 。不过,开设倒角在一定程度上会增加孔板结构的复杂程度,进而提高对加工精度的要求。

致谢:感谢航天低温推进剂技术国家重点实验室开放课题资助。

参考文献

- [1] 李亦健, 高旭, 陈虹, 等. 低温推进剂加注系统置换介质的相似性分析[J]. 推进技术, 2018, 39(3): 703-708. (LI Yi-jian, GAO Xu, CHEN Hong, et al. Similarity Analysis of Different Replacement Gases for Cryogenic Propellant Loading System[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(3): 703-708.)
- [2] Malavasi S, Messa G, Fratino U, et al. On the Pressure Losses Through Perforated Plates[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, 28(12): 57-66.
- [3] Kolodzie P A, Matthew V W. Discharge Coefficients Through Perforated Plates[J]. *AIChE Journal*, 1957, 3(3): 305-312.
- [4] Gan G H, Riffat S B. Pressure Loss Characteristics of Orifice and Perforated Plates [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1997, 14(2): 160-165.
- [5] Zhao T Y, Zhang J L, Ma L D. A General Structural Design Methodology for Multi-Hole Orifices and Its Experimental Application [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(9): 2237-2246.
- [6] Huang S, Ma T, Wang D, et al. Study on Discharge Coefficient of Perforated Orifices as a New Kind of Flowmeter[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 46: 74-83.
- [7] Guo B Y, Hou Q F, Yu A B, et al. Numerical Modelling of the Gas Flow through Perforated Plates[J]. *Chemical Engineering Research and Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part A*, 2013, 91(3): 403-408.
- [8] 王虎山, 汪明生. 带多孔板的APU进气系统气动性能研究[J]. 推进技术, 2013, 34(7): 865-872. (WANG Hu-shan, WANG Ming-sheng. A Study on Aerodynam-

- ic Performance of APU Air Inlet System with Perforated Plates[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(7): 865-872.)
- [9] Liu H F, Tian H, Chen H, et al. Numerical Study on Performance of Perforated Plate Applied to Cryogenic Fluid Flowmeter[J]. *Journal of Zhejiang University, Science A: Applied Physics & Engineering*, 2016, 17(3): 230-239.
- [10] Jin T, Tian H, Gao X, et al. Simulation and Performance Analysis of the Perforated Plate Flowmeter for Liquid Hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(6): 3890-3898.
- [11] Yeh C L. Numerical Study of Inlet and Geometry Effects on Discharge Coefficients for Liquid Jet Emanating from a Plain-Orifice Atomizer[J]. *Journal of Mechanics*, 2002, 18(3): 153-161.
- [12] Mariani V C, Prata A T, Deschamps C J. Numerical Analysis of Fluid Flow Through Radial Diffusers in the Presence of a Chamfer in the Feeding Orifice with a Mixed Eulerian-Lagrangian Method[J]. *Computers and Fluids*, 2010, 39(9): 1672-1684.
- [13] 于洪仕, 张涛, 许文达. 节流孔倒角对多孔孔板流量计流场特性的影响[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(9): 1356-1364.
- [14] Sato K, Saito Y. Unstable Cavitation Behavior in a Circular-Cylindrical Orifice Flow [J]. *JSME International Journal, Series B, Fluids and Thermal Engineering*, 2002, 45(3): 638-645.
- [15] 段欣悦, 厉彦忠. 低温流体节流过程空化现象的形成与发展规律[J]. *航天器环境工程*, 2009, (6): 554-560.
- [16] Maynes D, Holt G J, Blotter J. Cavitation Inception and Head Loss due to Liquid Flow Through Perforated Plates of Varying Thickness[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2013, 135(3).
- [17] Li X, Huang B, Chen T, et al. Combined Experimental and Computational Investigation of the Cavitating Flow in an Orifice Plate with Special Emphasis on Surrogate-Based Optimization Method [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(1): 269-279.
- [18] ANSYS. ANSYS FLUENT 14.0 User's Guide Manual[M]. USA: ANSYS Inc., 2011.
- [19] Zhu J K, Chen Y, Zhao D F, et al. Extension of the Schnerr-Sauer Model for Cryogenic Cavitation[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2015, 52: 1-10.
- [20] 姜映福, 刘中祥, 褚宝鑫. 低温流体汽蚀的数值计算及可视化实验研究[J]. *推进技术*, 2017, 38(12): 2771-2777. (JIANG Ying-fu, LIU Zhong-xiang, CHU Bao-xin. Numerical Simulation and Visualized Experimental Study on Cavitating of Cryogenic Fluids[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(12): 2771-2777.)
- [21] Schnerr G H, Sauer J. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics [C]. *New Orleans: Fourth International Conference on Multiphase Flow*, 2001.
- [22] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A New $k-\varepsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation [J]. *Computers and Fluids*, 1995, 24(3): 227-238.
- [23] Hord J, Anderson L M, Hall W J. Cavitation in Liquid Cryogenics. Vol.II: Hydrofoil[R]. NASA-CR-2156, 1973.
- [24] ISO 5167-1, 2003, Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full, Part 1: General Principles and Requirement[S].

(编辑:朱立影)