

超临界旁路排放小孔稳态流场数值模拟研究

刘宇阳,张东洋,潘思言,张昊

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所,黑龙江哈尔滨 150078)

摘要:为了实现旁路排放箱级间小孔在超临界状态下的结构设计并获得其节流特性,通过建立小孔超临界压比排放的计算模型,采用三维数值模拟的方法,对不同排放参数、不同小孔结构下的节流特性进行了数值模拟研究,获得了小孔最大马赫数和流量随膨胀比的变化规律及孔径对小孔节流特性的影响,分析了小孔节流减压的作用机理。研究表明:计算结果与理论计算值误差为1.04%;通过对排放压力5.0和0.1 MPa两个极端工况进行模拟,计算得到直径 $d_0 = 10$ mm小孔的极限流量分别为0.330 4和0.007 225 kg/s。

关键词:动力装置;超临界排放;小孔节流;数值模拟

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2025.01.009

[引用本文格式]刘宇阳,张东洋,潘思言,等.超临界旁路排放小孔稳态流场数值模拟研究[J].热能动力工程,2025,40(1):69-75. LIU Yuyang, ZHANG Dongyang, PAN Siyan, et al. Numerical simulation study on steady state flow field of supercritical bypass discharge orifice[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(1): 69-75.

Numerical Simulation Study on Steady State Flow Field of Supercritical Bypass Discharge Orifice

LIU Yuyang, ZHANG Dongyang, PAN Siyan, ZHANG Hao

(No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: In order to realize the structural design of orifice between stages of bypass discharge box and obtain the throttling characteristics of the supercritical discharge orifice model in supercritical state, through establishing a calculation model for the supercritical pressure ratio discharge of the orifice, by means of 3D numerical simulation, numerical simulation research on the throttling characteristics of the supercritical discharge orifice model under different emission parameters and different orifice structures was conducted. The variation of the maximum Mach number and flow rate of the orifice with the expansion ratio, as well as the influence of the aperture on the orifice throttling characteristics were obtained. The mechanism of the orifice throttling pressure reduction was analyzed. The research results show that the deviation between calculated result and theoretical result is 1.04%. Under two extreme operating conditions, namely the discharge pressure of 5.0 and 0.1 MPa, the limit flow rates of the orifice with a diameter of 10 mm are calculated to be 0.330 4 and 0.007 225 kg/s, respectively.

Key words: power plant, supercritical emission, orifice throttling, numerical simulation

引言

排放系统会影响蒸汽动力装置整体运行时的经济性和安全性^[1-3]。旁路排放箱的工作原理是利用多级孔板减压及喷水减温。高速蒸汽流经带孔板结构时,通流截面先急速缩小再快速扩张。减压性能与孔板结构相关,将孔板视为单孔集合,通过对流体状态的分析,为孔板在工程优化设计方面提供支撑^[4]。

目前,对于孔板节流特性的研究方法主要有试验研究和数值模拟。由于计算流体力学(CFD)技术已经十分成熟,因此成为小孔节流特性研究的主要途径。国内外众多学者针对孔板本身的各种性能开展了研究^[5-8]。Barros 等人^[9]利用 CFD 技术精确计算具有倒角薄孔的多孔板中水流的减压,通过优化倒角几何形状来降低压降的增加。杨国来等人^[10]和于洪仕等人^[11]对孔板流量计内部流场进行了数值模拟计算,分析了孔板流量计内部的流动情况。以上研究多针对水介质的减压特性,对超临界状态的小孔节流特性研究较少。

本文利用 CFD 软件对中压蒸汽条件下的小孔节流特性进行了三维数值模拟研究,通过对差分格式、湍流模型及 y^+ 值选取的对比分析建立了超临界排放小孔的计算模型,进而对两种典型工况在不同膨胀比条件下的节流特性进行模拟;通过对速度场及压力场进行对比,分析了小孔节流减压的作用机理,获得最大马赫数和流量随膨胀比的变化规律,为旁路排放箱各级的开孔设计提供必要的理论依据。

1 数值计算方法

1.1 几何模型及网格划分

小孔三维模型如图 1 所示。采用二分之一小孔直径对称模型开展计算,模型以直径 $d_0 = 100$ mm、长度 40 mm 的圆柱空间为速度进口,孔后以直径 $d_0 = 100$ mm、长度 400 mm 的圆柱空间为自由出流出口,可以防止产生回流影响计算结果^[12]。

采用结构化网格划分小孔节流模型,并对孔周围的边界层局部加密。小孔模型整体及局部网格如

图 2 所示。通过网格无关性验证,确定小孔内部网格量为 15 万,从而确保模拟计算的准确性。

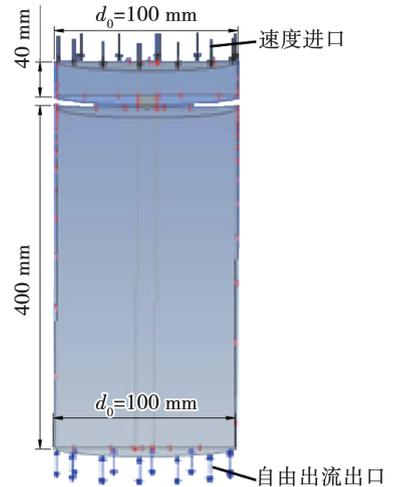


图 1 小孔几何模型

Fig. 1 Geometric model of orifice

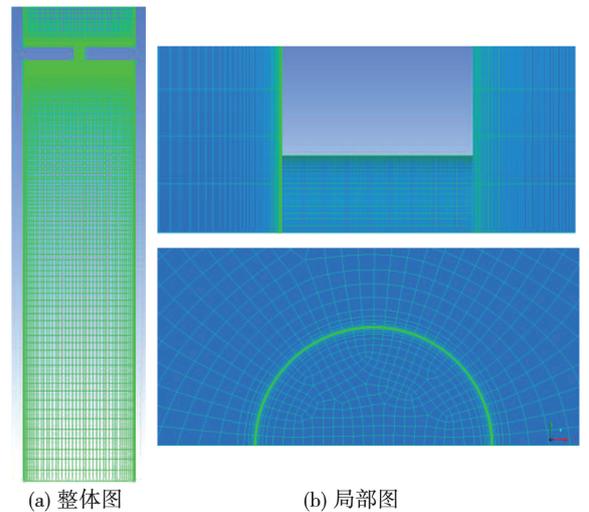


图 2 小孔模型整体及局部网格图

Fig. 2 Global and local mesh images of orifice model

1.2 计算模型

1.2.1 湍流模型

选用 $k-\varepsilon$ 模型, $k-\omega$ 模型, SST 模型 3 种常用的湍流模型,经过模拟对比发现,随着壁面第 1 层网格的 y^+ 值由大变小,在原本均适用的 3 个模型中, $k-\omega$ 模型在计算过程中收敛困难,残差曲线出现波动,而 SST 模型收敛性最好,因此本文选用 SST 模型来进行数值模拟。

1.2.2 y^+ 值选取

壁面第 1 层网格的 y^+ 值对于小孔模拟结果的可靠性非常重要^[9],其表达式为:

$$y^+ = \Delta y u_\tau / \nu \quad (1)$$

式中: u_τ —壁面摩擦速度, m/s; ν —介质的运动粘度, m^2/s ; Δy —第 1 层网格高度, m。

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (2)$$

式中: τ_w —壁面剪切应力, Pa; ρ —介质的密度, kg/m^3 。

图 3 给出了小孔临界流量随 y^+ 值的变化规律。由图 3 可知,流量随 y^+ 值的增大呈先减小后增大的趋势,在 $y^+ = 1$ 附近最小。结合文献[13 - 14]中的应用案例发现,采用 SST 湍流模型,在模拟计算这类超音速气体流动时 y^+ 值应当是 1 的量级,因此根据实际计算结果确定平均 y^+ 值在 1.01 ~ 2.05 之间。

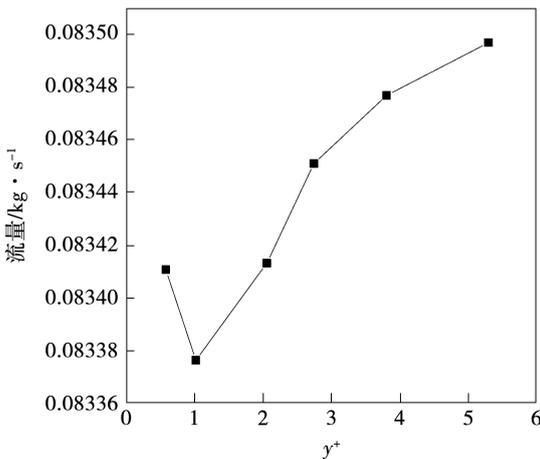


图 3 小孔临界流量随 y^+ 值的变化规律

Fig.3 Variation law of critical flow rate of orifice with y^+ value

1.2.3 差分格式

CFD 软件主要提供两种差分格式:高阶差分格式和迎风差分格式。图 4 为采用两种差分格式计算得到的马赫数云图。根据空气动力学激波理论分析^[9],结合高马赫数区分布规律和高阶差分模式的计算结果发现,高阶差分模式可以充分地反映流动细节,激波现象显现更加清晰,更适用于理论计算。

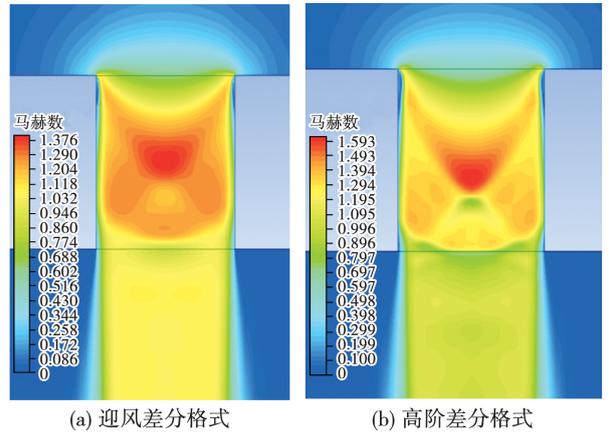


图 4 两种差分格式对马赫数分布的影响

Fig.4 Influence of two differential formats on the distribution of Mach numbers

1.2.4 计算模型验证

由流体力学理论^[4,15]可知蒸汽流量 Q_w 为:

$$Q_w = \xi_0 \times \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_0}{1000} \right)^2 \times 209 \sqrt{\frac{p_0 \times 10.2}{v_w}} \quad (3)$$

式中: ξ_0 —节流孔流量系数,取 0.8; d_0 —节流孔直径, mm; p_0 —进口静压, MPa; v_w —流体的比容, m^3/kg 。

当进口静压为 5.0 MPa 时,节流小孔临界流量的理论计算和仿真模拟结果分别为 0.327 0 和 0.330 4 kg/s ,偏差为 1.04%,吻合度较高,证明该计算模型的准确性。

2 小孔节流特性分析

本文模拟的旁路排放箱共设置五级减压孔板,工作介质为水蒸气,各级压力参数比均小于临界膨胀比。以旁路排放箱第一级和末级高长径比小孔的典型工况作为研究对象开展计算,第一级蒸汽排放压力为 5.0 MPa,排放温度为 290 $^{\circ}C$,研究孔径为 10 和 12 mm、孔长为 12 mm 两种常规规格孔径对节流特性的影响;末级蒸汽排放压力为 0.1 MPa,受结构强度约束,小孔直径为 $d_0 = 10$ mm、孔长为 60 mm,长径比达到 6。

2.1 第一级小孔节流特性分析

当蒸汽排放压力为 5.0 MPa、小孔直径 $d_0 = 10$ mm、孔长为 12 mm 时,设置 17 个不同出口静压值,即对应 17 个膨胀比的数值,获得不同膨胀比条件下小孔中间截面上的最大马赫数和流量的变化曲线,如图 5 所示。由图 5 可知,当出口静压从 3.7 MPa

(膨胀比 0.69) 降至 3.2 MPa (临界膨胀比 0.59) 时, 流量达到极限, 图中小孔流量为 0.330 4 kg/s。当出口静压降至 2 MPa (膨胀比 0.4) 时, 最大马赫数趋于稳定, 为超临界排放状态; 出口静压继续降至 1.0 MPa (膨胀比 0.2) 时, 最大马赫数继续增加, 为非典型工况。本研究结果与其他研究者结果相近^[4,12-13]。

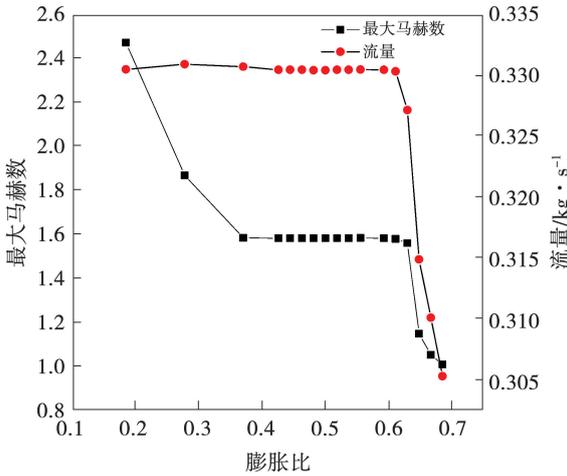


图 5 不同膨胀比下小孔最大 Ma 和流量变化曲线 ($p_0 = 5.0 \text{ MPa}, d_0 = 10 \text{ mm}$)

Fig. 5 Variation curve of maximum Mach number and flow rate of orifice at different expansion ratios ($p_0 = 5.0 \text{ MPa}, d_0 = 10 \text{ mm}$)

图 6 为第一级模型中, 不同出口静压下小孔中间截面上的 Ma 分布云图。从图中可以看出, 当出口静压较高时, 超音区靠近小孔进口, 随着出口静压降低, 超音区逐渐向小孔出口方向移动。当出口静压升至 2.0 MPa 时, 碗型高 Ma 区域扩张, 等 Ma 线层次减弱, 趋势减缓。另外, 蒸汽突然从大腔进入小孔造成了进口圆弧形 Ma 区, 其弯度也随着出口背压升高而变小。当出口静压在 2.3 ~ 3.0 MPa 之间时, 碗型最大 Ma 区尺寸相近。出口静压继续升高, 最大 Ma 区尺寸开始逐渐减小, 直至出口静压达到 3.7 MPa 时消失。出口静压较高时, 最大马赫数区域位于小孔进口边沿, 激波强度较低。当出口静压降至 2.0 ~ 3.4 MPa 之间时, 激波强度和激波束长度都增加, 并且激波在小孔中部交叉, 导致最大马赫数区域逐渐移至小孔中部。此时最大马赫数区域下方出现低马赫数区域, 这是蒸汽通过交叉激波后速度和压力大幅下降的原因。

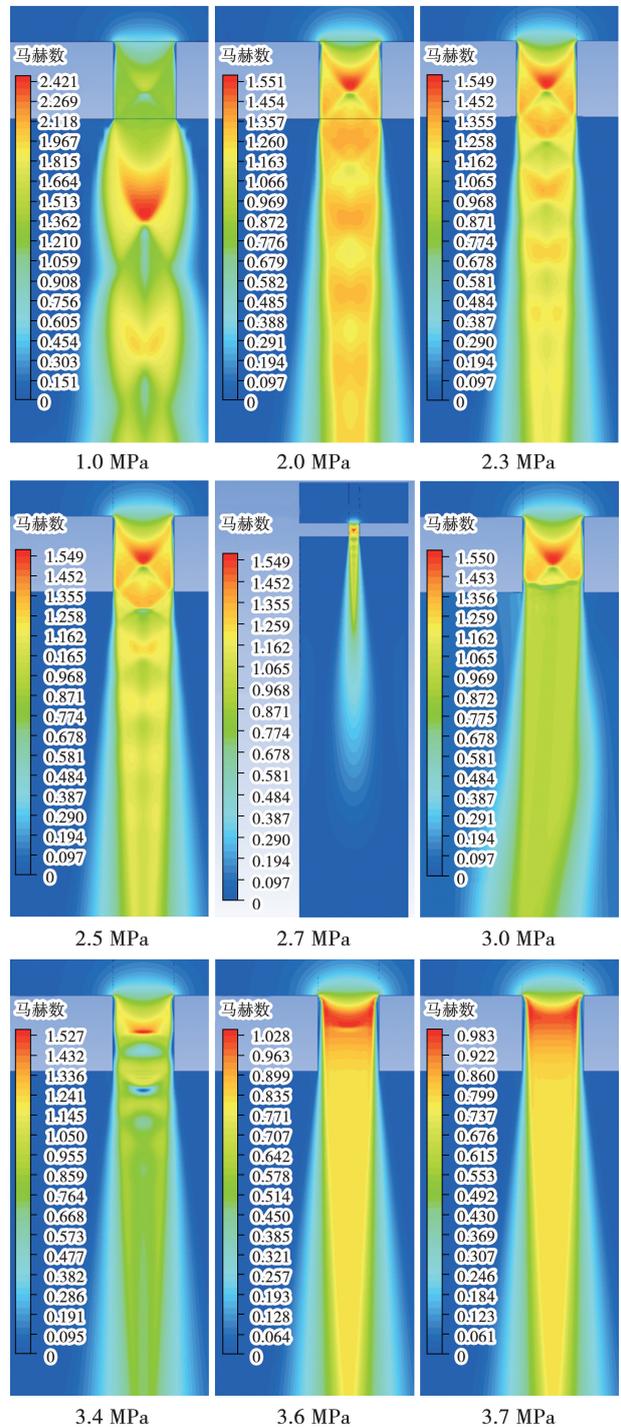


图 6 不同出口静压下小孔中间截面上 Ma 分布云图
Fig. 6 Distribution nephograms of Mach number on mid section of orifice under different outlet static pressures

图 7 为不同出口静压下小孔中间截面速度流线和速度场分布云图。可以看到, 由于进口处流动突变, 使分离区压缩蒸汽起到类似喷管喉部的作用, 使小孔的流体速度增加, 产生能量消耗, 从而起到减压作用。

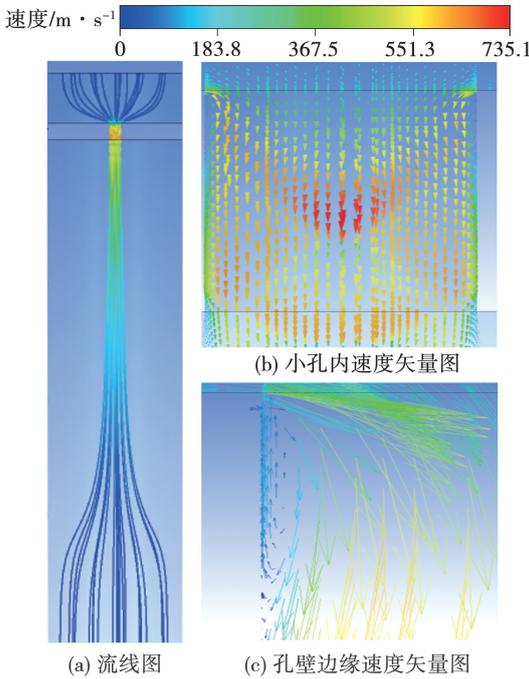


图 7 不同出口静压下小孔中间截面速度流线及速度场分布云图

Fig. 7 Distribution nephograms of velocity streamline and velocity field on mid section of orifice under different outlet static pressures

2.2 孔径变化对节流特性的影响

当蒸汽排放压力为 5.0 MPa、小孔直径 $d_0 = 12$ mm、孔长为 12 mm 时,设置 11 个不同出口静压值,获得不同膨胀比条件下小孔中间截面上的最大马赫数和流量的变化曲线,如图 8 所示。

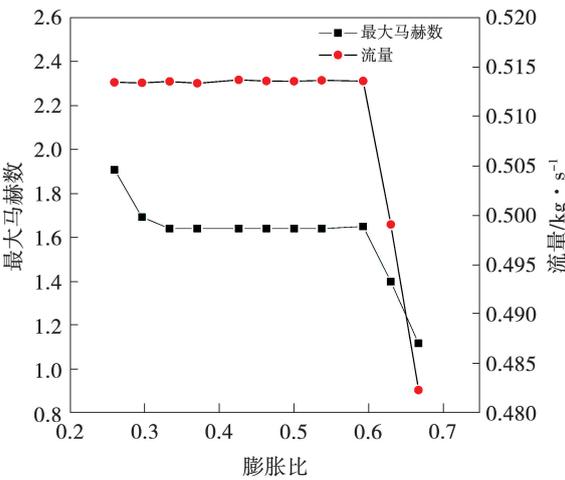


图 8 不同膨胀比下小孔最大 Ma 和流量变化 ($p_0 = 5.0$ MPa, $d_0 = 12$ mm)

Fig. 8 Variation of maximum Mach number and flow rate of orifice at different expansion ratios ($p_0 = 5.0$ MPa, $d_0 = 12$ mm)

由图 8 可知, $d_0 = 12$ mm 孔的最大马赫数和流量的变化趋势与 $d_0 = 10$ mm 孔一致。在 3.2 MPa 的出口静压条件下,对应膨胀比为 0.59,膨胀比降低,发现流量稳定,此时临界膨胀比下的极限流量为 0.513 6 kg/s。

对于第一级排放,假定孔径变化时其最大流量达到 16.39 kg/s,则可依据总进气流量与单孔极限流量的值确定单级节流孔板的开孔数量。不同孔径时的设计参数如表 1 所示。

表 1 不同孔径时设计参数

Tab. 1 Design parameters with different apertures

参 数	孔径/mm	
	10	12
极限流量/kg·s ⁻¹	0.330 4	0.513 6
最大马赫数	1.58	1.64
单级节流孔板孔数	50	32
总流通面积/mm ²	3 925	3 617

图 9 给出了背压为 2.7 MPa 时不同孔径马赫数分布云图。可以看到,对于第一级排放,流动形式类似、形状相似的高马赫数区域均出现在孔内。10 mm 小孔径的最大马赫数出现的径向位置距离孔进口明显较近,而 12 mm 大孔径的最大马赫数对应的径向位置则比较靠近孔出口。

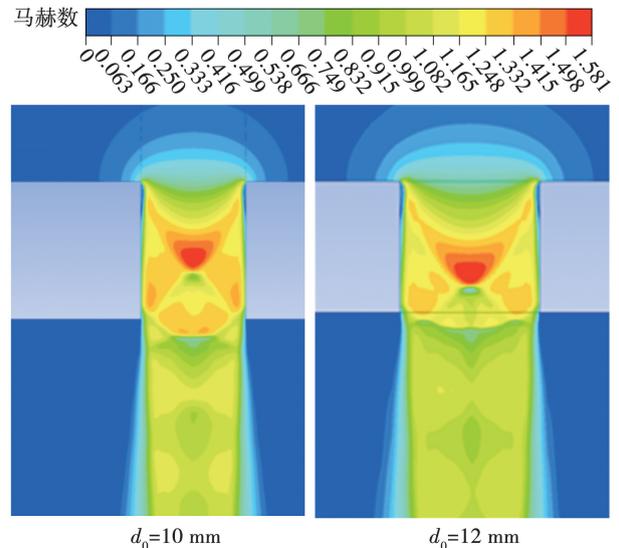


图 9 不同孔径马赫数分布云图 (背压 2.7 MPa)

Fig. 9 Distribution nephogram of Mach numbers with different apertures (back pressure is 2.7 MPa)

2.3 末级高长径比小孔节流特性

末级小孔排放压力为 0.1 MPa, 由于旁路排放箱末级小孔开在冷凝器喉部或汽轮机排汽缸上, 受壁厚强度约束, 其孔长较长, 孔直径 $d_0 = 10$ mm, 孔长为 60 mm, 长径比达到 6。设置 13 个不同出口静压值, 获得不同膨胀比条件下小孔中间截面上的最大 Ma 和流量的变化曲线, 如图 10 所示。

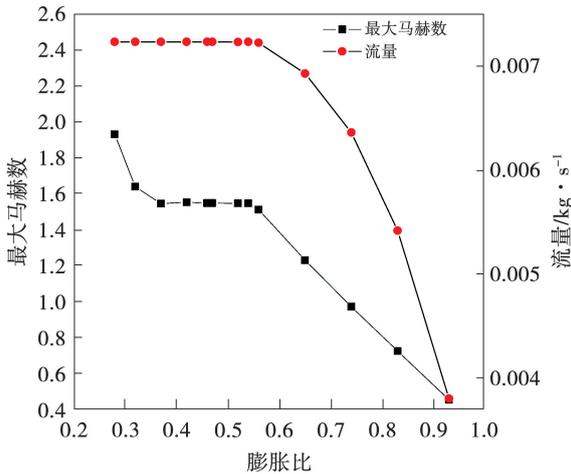


图 10 不同膨胀比下小孔最大 Ma 和流量变化 (排放压力 0.1 MPa, 小孔孔径 10 mm)

Fig. 10 Variation of maximum Mach number and flow rate of orifice at different expansion ratios ($p_0 = 0.1$ MPa, $d_0 = 10$ mm)

根据图 10 计算结果可以确保 60 mm 的孔长不会造成流体堵塞而无法通流, 其变化规律与 12 mm 孔长的小孔规律相似。在 0.06 MPa 的出口静压条件下, 即膨胀比为 0.6 时, 膨胀比降低, 流量稳定。此时为临界膨胀比 0.56 下的极限流量 0.007 225 kg/s, 最大 Ma 为 1.511 6。假定达到 16.39 kg/s 的最大流量, 除以单孔极限流量, 则末级开孔需 2 268 个。

3 结论

(1) 通过采用差异化的差分格式、首层网格 y^+ 参数及理论模型进行模拟计算, 结合理论分析, 建立了小孔节流排放问题的计算模型, 计算值与理论值对比误差为 1.04%, 证明了计算方法的准确性;

(2) 获得超临界排放小孔节流参数随膨胀比的变化规律, 随着膨胀比的减小 (出口静压降低), 流

量先增大后达到稳定, 而最大 Ma 则先增大、中间出现一段稳定值后继续增大。其减压机理是在小孔边缘形成分离区, 使流体受压形成一个类似缩放喷管的喉部来实现节流减压。

(3) 获得第一级直径 $d_0 = 10$ 和 12 mm、孔长为 12 mm 小孔及末级直径 $d_0 = 10$ mm、孔长为 60 mm 小孔超临界压比条件下极限流量和最大马赫数, 确定各级开孔数量和开孔面积, 为旁路排放箱的设计提供设计依据。

(4) 大孔径 ($d_0 = 12$ mm) 和小孔径 ($d_0 = 10$ mm) 极限流量虽不同, 但对一定流量所需孔数亦不同, 得出流通面积分别为 3 617 mm² 和 3 925 mm², 说明二者基本上需要大致相等的总流通面积, 即可以通过增大孔径来达到减少孔数的目的从而简化计算, 为实现旁路排放箱全尺寸模型的多孔计算提供了简化依据。

参考文献:

- [1] 张卓澄. 大型电站凝汽器[M]. 北京:机械工业出版社, 1993.
ZHANG Zhuocheng. Large scale power plant condensers[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1993.
- [2] 彭领新. 汽轮机旁路系统设计[J]. 电力建设, 2000, 21(7): 21-25.
PENG Lingxin. Design of turbine bypass system[J]. Electric Power Construction, 2000, 21(7): 21-25.
- [3] 彭敏俊. 船舶核动力装置[M]. 北京:原子能出版社, 2009.
PENG Minjun. Ship nuclear power plant[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2009.
- [4] 高万博, 陈玉翔, 詹腾腾, 等. 减温减压器的减压特性分析研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 129-137.
GAO Wanbo, CHEN Yuxiang, ZHAN Tengting, et al. Simulation study on thermodynamic performance of the desuperheater and decompressor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 129-137.
- [5] 张宝峰. 多级减压孔板的设计计算[J]. 西北电力技术, 2005, 33(5): 27-30.
ZHANG Baofeng. Design & calculation of multi-stage throttle plate[J]. Northwest China Electric Power, 2005, 33(5): 27-30.
- [6] 张锡文, 何枫, 王学芳. 串联减压孔板临界压比的理论与实验研究[C]//第四届全国流体传动及控制学术会议, 大连, 2006.
ZHANG Xiwen, HE Feng, WANG Xuefang. Theoretical and exper-

- imental study of critical pressure ratio of series throttling orifice plates [C] // The Fourth National Academic Conference on Fluid Transmission and Control, Dalian, 2006.
- [7] 赵天怡, 张吉礼. 多级孔板水减压特性实验及数学模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 29(10): 1066 - 1069.
ZHAO Tianyi, ZHANG Jili. Experiment study on water throttling model of multi-hole orifice [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 29(10): 1066 - 1069.
- [8] 刘梓光, 卢晓江, 李靖, 等. 开孔率对多孔板水力空化装置影响的实验研究 [J]. 轻工机械, 2008, 26(6): 9 - 13.
LIU Ziguang, LU Xiaojiang, LI Jing, et al. Experimental study on the influence of orifice ratio on device of hydrodynamic cavitation based on multiple hole plate [J]. Light Industry Machinery, 2008, 26(6): 9 - 13.
- [9] BARROS FILHO J A, SANTOS A A C, NAVARRO M A, et al. Effect of chamfer geometry on the pressure drop of perforated plates with thin orifices [J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 284: 74 - 79.
- [10] 杨国来, 李明学. 孔板流量计内部流场的仿真研究 [J]. 甘肃科学学报, 2015, 27(6): 79 - 81, 106.
YANG Guolai, LI Mingxue. Simulation study on inner flow field of orifice meter [J]. Journal of Gansu Sciences, 2015, 27(6): 79 - 81, 106.
- [11] 于洪仕, 张涛, 赵珊珊, 等. 多孔孔板流量计流场仿真 [J]. 天津大学学报, 2014, 47(1): 61 - 66.
YU Hongshi, ZHANG Tao, ZHAO Shanshan, et al. Simulation of the flow field in porous orifice flowmeter [J]. Journal of Tianjin University, 2014, 47(1): 61 - 66.
- [12] 程建平, 李思宁, 孙玲. 冷凝器旁路排放箱小孔单元流动机理数值分析 [J]. 船海工程, 2020, 49(6): 111 - 114.
CHENG Jianping, LI Sining, SUN Ling. Numerical analysis of the flow mechanism of cell with small hole in bypass discharge module of condenser [J]. Ship & Ocean Engineering, 2020, 49(6): 111 - 114.
- [13] 李佳冀. 蒸汽排放过程减温减压性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
LI Jiaji. A research on performance of desuperheater and decompressor when steam discharge [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [14] 张雷, 乔志强, 李香梅. 蒸汽排放系统三维流场的数值模拟研究 [C] // 中国工程热物理学会多相流学术会议论文集 (下册), 哈尔滨, 2006: 854 - 858.
ZHANG Lei, QIAO Zhiqiang, LI Xiangmei. Numerical simulation study of three-dimensional flow field in steam emission systems [C]. Proceedings of the Multiphase Flow Academic Conference of the Chinese Society of Engineering Thermophysics (Volume 2), Harbin, 2006: 854 - 858.
- [15] 王慧锋, 凌长玺. 几何特征对多孔板特性的影响 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2015, 41(5): 677 - 685.
WANG Hui Feng, LING Changxi. Effect of general geometric characteristics for multi-hole orifices' features [J]. Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 41(5): 677 - 685.

(刘颖编辑)