

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.03.017

基于 CFD 评估蒸汽喷射泵的抗背压能力

王晓冬, 孙浩, 宁久鑫, 孙浩林
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 通过蒸汽喷射泵喉部出口截面单位体积流体的动能 e 评估蒸汽喷射泵的抗背压能力. 利用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法研究喷射泵几何参数——喉部直径 d 、混合室角度 θ 和喷嘴出口位置 s 对蒸汽喷射泵抗背压能力的影响, 以及 e 与蒸汽喷射泵抗背压能力之间的关系. 结果表明: 随着 d 或 θ 的减小, 或 s 的增大, 都会导致 e 增大, 此时蒸汽喷射泵抗背压能力增强; 当 d, θ 及 s 变化时, e 可作为评估蒸汽喷射泵抗背压能力的指标.

关 键 词: 蒸汽喷射泵; 抗背压能力; 引射系数; 几何参数; CFD

中图分类号: TB 752.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)03-0399-04

CFD-Based Evaluation of Back Pressure Resistance of Steam Ejectors

WANG Xiao-dong, SUN Hao, NING Jiu-xin, SUN Hao-lin
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: WANG Xiao-dong, E-mail: xdwang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The back pressure resistance of the steam ejector was evaluated by the kinetic energy e of the unit volume of the steam ejector's throat outlet section. The influence of geometric parameters of the ejector including throat diameter d , mixing chamber angle θ and nozzle exit position s on the steam ejector's back pressure resistance and the relationship between e and the steam ejector's back pressure resistance were studied by using the computational fluid dynamics (CFD) method. The results showed that as d or θ decreases, or s increases, e and the back pressure resistance of steam ejector increase. When d, θ and s change, e can be used as a standard for evaluating the capability to resist the back pressure of steam ejectors.

Key words: steam ejector; back pressure resistance; entrainment ratio; geometric parameter; CFD (computational fluid dynamics)

蒸汽喷射泵结构简单,性能稳定,在化学工业、制冷供暖和电力生产等领域具有广泛应用^[1-2]. Huang 等^[3]研究了喷射泵在不同背压(出口压力)下的典型性能曲线,反映出了决定喷射泵性能的两个关键指标:引射系数 r_e ,是次流体与主流体的质量流率之比;临界背压 p_c ,是引射系数保持不变的最大的背压,其大小决定了喷射泵抗背压能力的强弱. 目前为止,人们在研究喷射泵性能优化时大多注重于引射系数的提高,而忽视了抗背压能力在喷射泵性能中的重要性. 临界背压 p_c 的大小决定了喷射泵临界模式的工作范围. p_c

越大,喷射泵在临界模式的工作范围越宽,其抵抗背压影响的能力越强.

判断喷射泵抗背压能力的强弱,传统方式是通过数值分析计算或实验测定得到引射系数随着背压的变化规律,考察临界背压的大小. 这种方式不够直观,也太繁琐. 张光利^[4]研究发现,在喷射泵扩散段,混合流体的动能将转换为压力能,来抵抗背压对喷射泵内流动和抽气性能的影响. 混合流体在扩散段入口(即喉部出口)处的动能与喷射泵抗背压能力密切相关. 由于实验测定条件所限,难以全面、准确地研究喷射泵的性能,因此,

计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 已成为广泛认可的研究喷射泵工作机理、结构优化和性能评价的重要方法^[1,5].

本文在定义喷射泵喉部出口截面上单位体积流体动能为 e 的基础上,采用 CFD 方法,通过数值分析计算 e 的大小来评估喷射泵的抗背压能力.

1 数值建模

综合考虑计算成本和计算精度,本文采用二维轴对称模型^[6],喷射泵几何参数如表 1 所示.

表 1 蒸汽喷射泵的几何参数 Table 1 Geometric parameters of the steam ejector	
几何参数	数值
喷嘴喉部直径/mm	2.5
喷嘴出口直径/mm	11
喷嘴喉部至喷嘴出口的长度/mm	48
喉部直径 d /mm	28
喉部长度/mm	100
混合室长度/mm	200
扩散段长度/mm	402
混合室角度 $\theta/(^{\circ})$	6
扩散段角度/ $(^{\circ})$	6
喷嘴出口至混合室入口的距离 s /mm	0

网格划分在 ICEM (integrated computer engineering and manufacturing) 中进行,采用结构化四边形网格,蒸汽喷射泵的网格结构及主要几何参数如图 1 所示. 网格独立性的验证结果: 网格数量为 27 666 时 r_e 为 0.656 1; 网格数量为 52 785 时 r_e 为 0.665 2; 网格数量为 106 082 时 r_e 为 0.668 2. 结果显示,当网格数量在 50 000 ~ 60 000 范围时,引射系数 r_e 随网格数量的增加变化不大.

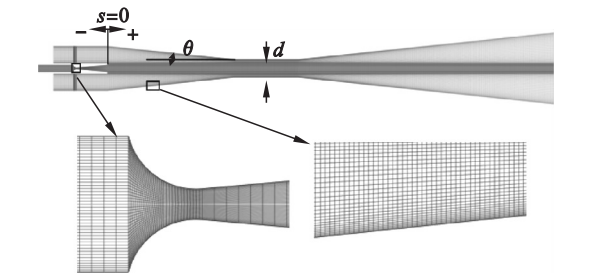


图 1 蒸汽喷射泵的网格结构及主要几何参数
Fig. 1 Grid structure and main geometric parameters of the steam ejector

工作流体为水蒸汽,且被认为是理想气体^[7],其物理性质为: 比热容 $2\,014.00\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 导热系数 $0.026\,1\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 黏度 $1.34\times 10^{-5}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,

分子质量 18.02 kg/kmol . 边界条件的设定: 主流体和次流体的入口设为压力入口,喷射泵出口设为压力出口,见表 2. 本文中所有数值模拟均在相同的入口边界条件下进行. 墙壁被设置为光滑、无滑移、绝热等熵边界条件.

表 2 边界条件 Table 2 Boundary conditions		
变量	压力/Pa	温度/K
主流体入口	360 000	413
次流体入口	1 721	288
喷射泵出口	3 000	297

在近几年关于喷射泵湍流模型的研究中, $k-\omega$ SST 模型的模拟计算精度得到更多实验的广泛验证,被越来越多的学者认可^[8-10], 本文采用 $k-\omega$ SST 模型. 采用有限体积法离散控制方程,并通过耦合隐式求解器求解. 对流项通过二阶迎风格式离散,扩散项通过中心差分离散. 整个离散化系统由 Gauss Seidel 方法求解. 当所有残差项低于 10^{-6} 或 r_e 稳定不变时,计算收敛.

采用的 CFD 模型,与东北大学张光利^[4]建立的 CFD 模型的差别仅在于选取的湍流模型及被抽气体温度的不同. 张光利选用的湍流模型为 Realizable $k-\omega$ 模型, 本文选用的湍流模型为 $k-\omega$ SST. Han 等的研究表明^[11], 以上 2 个湍流模型的计算误差仅为 2.4%. 张光利已对所建立的 CFD 模型进行了实验验证,实验结果与模拟结果符合度较高^[4],故本文中 CFD 计算模型的适用性得以确认.

以下所有数值模拟均在 ANSYS 18.2 中进行.

2 结果与讨论

2.1 喉部直径 d 对 e 及抗背压能力的影响

保持混合室角度 $\theta=6^{\circ}$,喉部长度 100 mm,扩散段角度 6° ,喷嘴出口位置 $s=0$ 不变,考察喉部直径 d (24, 26, 28, 30, 32 mm) 对喷射泵性能的影响. 图 2 为不同喉部直径下引射系数与背压的关系. 由图 2 可见,随着喉部直径的增大,临界背压减小,泵抗背压能力减弱,一旦背压超过临界背压,喷射泵的性能会急剧下降,引射系数大大降低. 临界背压的大小是评判喷射泵抗背压能力强弱的一个指标,对喷射泵性能起着关键性作用的一个重要因素. 目前,获得喷射泵临界背压的实验和数值方法都过于繁琐,不利于对喷射泵抗背压能力的评估.

定义喷射泵喉部出口截面单位体积流体动能

$e(\text{J}/\text{m}^3)$ 为

$$e = \frac{1}{2} \rho v^2. \tag{1}$$

式中： ρ 为流体密度 (kg/m^3)； v 为流体速度 (m/s)。

背压分别为 3、4 和 5 kPa 时， e 与临界背压 p_c 及喉部直径 d 的关系如图 3 所示。由图 3 可见，在各个背压下， d 越小， e 越大，临界背压越大，喷射泵抗背压能力越强。

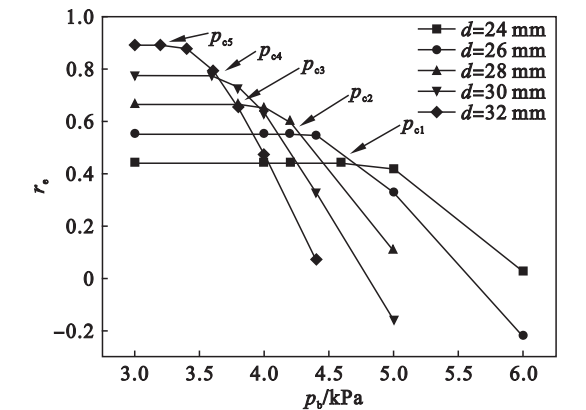


图 2 不同喉部直径 d 下引射系数与背压的关系
Fig. 2 Relationship between r_e and p_b under different d

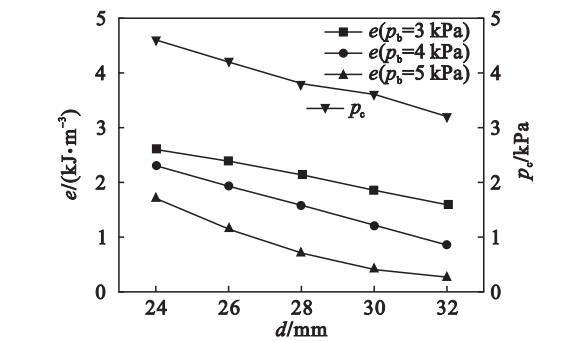


图 3 不同背压下 e 、 p_c 与喉部直径 d 的关系
Fig. 3 Relationship among e 、 p_c and d under different p_b

2.2 混合室角度 θ 对 e 及抗背压能力的影响

保持喉部直径 $d = 28 \text{ mm}$ ，喉部长度 100 mm ，扩散段角度 6° ，喷嘴出口位置 $s = 0$ 不变，考察混合室角度 θ 变化时 ($1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ$) 对喷射泵性能的影响。图 4 为不同混合室角度下引射系数与背压的关系。 θ 从 1° 变化到 5° 时，虽然临界背压相同，但在亚临界模式引射系数的下降速率不同， 1° 时下降速率最小，表明此时尽管喷射泵的抽气能力已经下降，但仍能保持一定的抽气能力。可见，评价喷射泵抗背压能力时，除了看临界背压之外，还应考察喷射泵处于亚临界模式下的引射系数下降速率。下降速率越大，表明喷射泵受背压的影响越大，抗背压能力越弱。由图 4 可见， θ 从 1° 变化到 9° 时，抗背压能力逐渐变弱。

当背压分别为 3、4 和 5 kPa 时 e 、 p_c 与混合室

角度 θ 的关系如图 5 所示。由图 5 可见，在不同背压下，当 θ 从 1° 变化到 9° 时， e 越来越小，喷射泵抗背压能力逐次减弱。

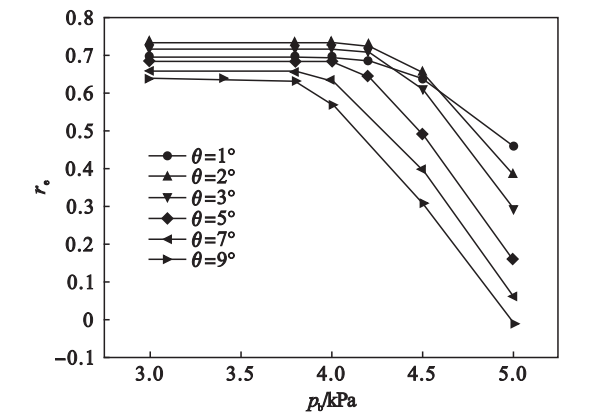


图 4 不同混合室角度 θ 下引射系数与背压的关系
Fig. 4 Relationship between r_e and p_b under different θ

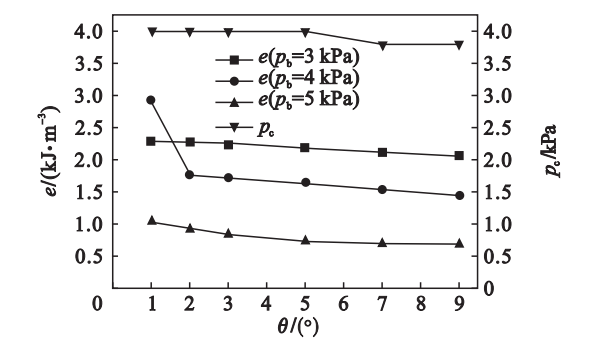


图 5 不同背压下 e 、 p_c 与混合室角度 θ 的关系
Fig. 5 Relationship among e 、 p_c and θ under different p_b

2.3 喷嘴出口位置 s 对 e 及抗背压能力的影响

保持喉部直径 $d = 28 \text{ mm}$ ，喉部长度 100 mm ，混合室角度 $\theta = 6^\circ$ ，扩散段角度 6° 不变，考察喷嘴出口位置 s 变化时 ($-60, 40, -20, 0, 20 \text{ mm}$ ，并且定义从 -60 mm 到 20 mm ， s 是增大的) 对喷射泵性能的影响。图 6 和图 7 分别为不同 s 下引射系数与背压的关系以及背压分别为 3、4

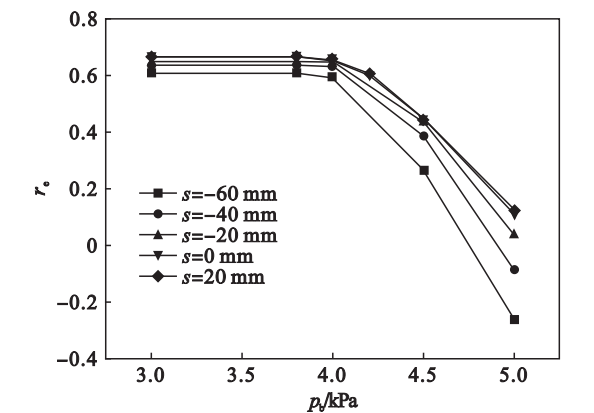


图 6 不同喷嘴出口位置 s 下引射系数与背压的关系
Fig. 6 Relationship between r_e and p_b under different s