

## 激波结构对喷射器工作特性的影响

韩宇<sup>1,2</sup>, 王晓冬<sup>1</sup>, 李鹏飞<sup>1</sup>, 张光利<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 滁州学院 机械与电气工程学院, 安徽 滁州 239000)

**摘要:** 喷射制冷循环系统因其采用水作为工质不仅节能环保而且可以实现循环利用. 本文采用数值仿真方法, 对喷射制冷系统核心部件——喷射器内部的激波结构进行了讨论和详细划分. 首次给出了伪激波区域、混合区域、激波串区域以及正激波位置的判定依据. 讨论了激波结构对喷射器工作特性的影响. 研究表明, 正激波的位置受喷射器出口背压的影响; 伪激波区域是决定喷射器引射效率的直接因素; 激波串对降低喷射器内部流动速度和压力恢复起到重要作用. 激波混合层的存在将工作蒸汽与引射蒸汽的流道分开. 工作蒸汽通过激波混合层来携带和加速引射蒸汽的流动. 激波混合层的面积大小受喷射器的几何结构和工作蒸汽的工作条件所影响. 因此, 了解和掌握激波结构对于理解喷射器内部流体流动规律, 提高喷射器工作效率, 进一步改进和优化喷射器的几何结构, 具有参考价值.

**关键词:** 喷射器; 激波; 伪激波; 激波串; 激波混合层

中图分类号: TP 181 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)09-1309-08

## Influence of Shock Wave Structure on the Ejector's Operating Characteristics

HAN Yu<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-dong<sup>1</sup>, LI Peng-fei<sup>1</sup>, ZHANG Guang-li<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China. Corresponding author: WANG Xiao-dong, E-mail: xdwang@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** An ejector refrigeration recycle system can not only save energy and protect the environment but also realize recycling because it uses water as the working medium. The structure of the shock wave inside the ejector, i. e., the core component of the system, is discussed and divided in detail by numerical simulation. The determination basis of the pseudo-shock region, constant velocity region, oblique shock region and positive shock region is given for the first time. The influence of shock wave structure on the ejector's operating characteristics is discussed. The results indicate that the position of positive shock wave is affected by the outlet back pressure. The pseudo-shock region is the direct factor that determines the ejector's entrainment ratio. Shock train is important in reducing the flow velocity and restoring pressure in the ejector. The presence of a shock-mixing layer separates the working steam from the flow path of the ejecting steam. The working steam passes through the shock-mixing layer to carry and accelerate the flow of the ejecting steam. The area of the shock-mixing layer is affected by the ejector's geometry and the working conditions of the working steam. Therefore, understanding and mastering the structure of shock waves is of reference value to understand the internal fluid flow law of the ejector, to improve the working efficiency of the ejector, and to further improve and optimize the ejector's geometry.

**Key words:** ejector; shock wave; pseudo-shock; shock train; shock-mixing layer

蒸汽喷射制冷系统被认为是降低能耗和环境污染最有效的设备之一<sup>[1]</sup>. 尽管 Sumeru 等<sup>[2]</sup>在

收稿日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775098).

作者简介: 韩宇(1985-), 女, 辽宁抚顺人, 东北大学博士后研究人员, 滁州学院讲师; 王晓冬(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

1910年制造了第一套蒸汽喷射制冷系统,但是由于其冷却效率低,关注度逐渐下降.然而,在环保意识不断增强、环境压力越来越大的今天,传统的压缩式制冷系统已不能满足要求.喷射式制冷系统使用的动力是低品位能源或完全免费的太阳能,工作介质是水,是最环保的制冷剂.近年来,人们对该系统的兴趣重新燃起,其再次回到人们的视野中.喷射器作为整个制冷系统的核心,具有结构简单、无旋转部件、运行稳定、使用寿命长、维护成本低等优点<sup>[3-4]</sup>.喷射器主要由喷嘴、混合段、等面积段和扩散器组成<sup>[5]</sup>.操作参数和几何参数对喷射器的抽气性能有重要影响.但是,喷射器抽气性能的进一步提高需要更深入地了解其内部流动结构和流体特性<sup>[6]</sup>.

与其他装置的收敛-发散结构不同,典型的喷射器有2个收敛-发散结构,1个在喷嘴中,另1个在扩散器中.工作蒸汽在喷嘴的收敛-发散结构中被加速成超声速流体.在扩散器中,工作蒸汽与吸入蒸汽混合,通过压差排到冷凝器中.由于喷射器的特殊结构,喷射器内流体的流动结构非常复杂,如跨音速流动、壅塞、激波、边界层分离、激波混合层和伪激波<sup>[7-12]</sup>等.

在喷射器处于正常工作状态时,内部存在两种激波结构:一种是由在喷射器扩压器入口处产生的一系列斜激波所组成的激波串结构;另一种是在等面积混合段出口位置处出现的正激波结构<sup>[12]</sup>.喷射器内部流体的混合过程也是在一系列激波作用下动量与能量不断交换的过程.

激波是一种高速空气流动的现象,当空气流动速度超过音速时,就会形成激波.在喷射器中,当压缩空气通过喷嘴时,会在喷嘴出口形成激波,然后随着激波的传播和衰减,对喷射器产生影响.激波对喷射器的能量消耗和稳定性也有很大的影响.当激波传递到喷射器内部时,会增加气体动能,进而增加能量消耗.如果激波的速度和频率不断变化,也可能会影响喷射器的稳定性,甚至导致喷射器失灵.激波结构对喷射制冷系统中的喷射器具有明显的影响,因此在设计和应用喷嘴时应该根据具体需求,对喷射器的气体流动速度、方向、噪声、能耗、稳定性等方面进行综合考虑,从而充分发挥喷射器的制冷性能和效益.

流场的分布和激波结构决定了喷射器内复杂的流动现象和性能特征.采用CFD (computational fluid dynamics)模拟方法不仅可

以对喷射器内的激波结构进行可视化研究分析,还可以准确地预测喷射器的抽气性能,识别激波/膨胀波、混合流体有效工作区域和轴向压力分布. Wu等<sup>[13]</sup>通过以蒸汽作为工作流体的CFD模拟详细地阐述了激波对喷射器内流体流动的影响.模拟结果表明,激波序列穿透扩压器后,混合过程得到改善,不可逆性和能量损失减少.随着混合室长度的增加,引射系数几乎呈线性增长;但随着混合室长度继续增加,引射系数也开始急剧下降.此外,对于较大的混合室长度,双阻塞流动情况将不再发生,从而导致引射系数急剧下降. Zhu等<sup>[14]</sup>利用CFD模拟方法和纹影流动显示技术研究了三维喷射器的夹带性能和激波结构.结果表明,较短的激波长度可以提高喷射器的性能. Lee等<sup>[15]</sup>通过CFD模拟优化了喷射器几何参数.随着喉径长度的增加,背压逐渐增大,达到一定数值后开始减小.然而,最大引射系数却没有受到影响. Han等<sup>[16]</sup>建立了真实制冷剂中激波边界层相互作用的局部CFD模型,得到的数值结果有助于理解流动的局部特征结构.

尽管随着喷射器研究的逐渐深入,人们对于激波及喷射器内主要的流动结构已获得了一定的认知.但对于激波串、伪激波和流体混合的区域判定与流动特性等方面尚未给出具体的判断依据与说明.本文通过CFD数值模拟与实验相结合的综合分析方法,对激波串、伪激波和混合层的两个流动区域均进行了详细的分析与讨论,对喷射器内激波的结构进行了分类并给予了具体的判定依据.同时讨论了不同工作蒸汽压力下激波的流动区域及相应的激波结构对蒸汽喷射器工作特性的影响,并提出了相应的改进策略,为提高喷射器的抽气性能、改善工作效率提供理论依据.对激波结构的深入了解将有助于进一步提高喷射器的效率和优化其几何结构,为喷射器的全面优化设计提供了具体参考.

## 1 CFD模拟方法

### 1.1 控制方程

通常认为水蒸气喷射器的内部流体的流动为可压缩定常流动.考虑流体黏性耗散和温度的影响,控制方程写成如下形式<sup>[17-18]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \vec{\nabla} \cdot \left( \alpha_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \vec{\nabla} \cdot (u_j(\tau_{ij})) \quad (3)$$

式中: $\tau_{ij}$ 为应力,

$$\tau_{ij} = \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}; \quad (4)$$

$\rho$ 为流体密度,

$$\rho = \frac{p}{RT}; \quad (5)$$

$u$ 为流体速度; $\vec{\nabla}$ 为净流通量; $E$ 为总能量; $\alpha_{\text{eff}}$ 为有效导热系数; $\mu_{\text{eff}}$ 为有效分子动力黏度; $p$ 为压强; $T$ 为温度.

## 1.2 几何结构和网格划分

以文献[9]的实验系统中所使用的喷射器结构的几何尺寸为研究对象,根据Pianthong等[19]得出的结论,在3D模型与2D模型进行计算时,两者的模拟结果十分相似.因此,为了减少计算成本,本文使用了二维轴对称模型.通过分析对比喷射器壁面压力的实验测量结果和CFD数值模拟结果,得到其二者的误差值为12%,小于工程领域所要求的20%的误差值,由此验证了本文所采用的数值模型.

对喷射器的内部流场进行结构化网格划分并在局部速度较大的区域进行加密,如图1所示.本文将采用二维模型对喷射器进行模拟分析.采用结构化四边形网格对喷射器的计算域进行网格划分,并通过网格自适应技术对流体的混合区和近壁面区进行局部细化.本文中网格质量判断标准为:①单元网格质量大于0.95;②最大倾斜程度小于0.45,最大纵横比为5:1;③正交质量高于0.7;④单元网格角度均大于 $50^\circ$ .同时,网格密度主要集中在速度梯度变化较大的激波区域.本文采用4种网格类型用于测试和进行网格的无关性分析,分别为:1个粗网格(28 265个单元),1个中等网格(47 562个单元)和2个细网格(62 350个单元,78 635个单元).图2为4种不同网格模拟下的中心轴线上的马赫数分布.从图中可以看出,中等网格和细网格的变化趋势几乎相同,而粗网格则明显不同于其他3种网格结构.即当网格数大于28 265时,中心轴的马赫数分布近似,并且输出参数的波动相同.

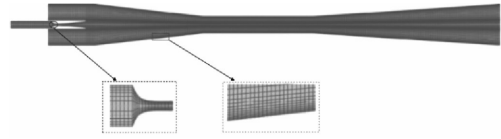


图1 喷射器的结构化网格

Fig. 1 Structured grid of steam ejectors

从图2所示的马赫数分布曲线上可以看出,中等网格点与细网格点之间的变动趋势是一致的,因此在以后的仿真中都可以使用中等网格点,以减少运算成本,达到提高运算速度的目的;实验结果表明,该模型具有良好的收敛性和自适应性.

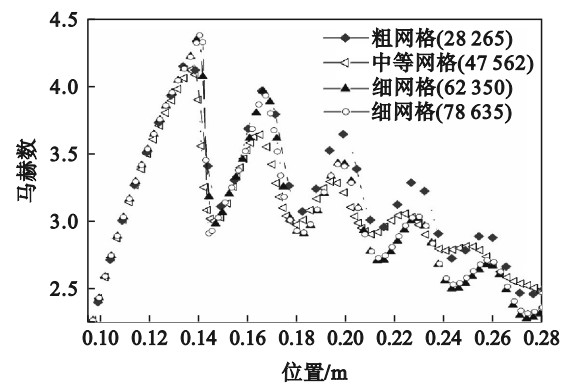


图2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

## 1.3 数值模拟方法

本文使用商业软件ANSYS-FLUENT 19.5对所提出的问题进行研究.蒸汽喷射器内的流体处于高速可压缩流动状态,本文采用基于密度的求解方法.控制方程通过有限体积法离散为可以进行数值求解的代数方程组.通过耦合隐式求解器进行求解,采用中心差分格式对扩散项进行离散,通过高斯-塞德尔迭代法计算其余离散项,通过二阶迎风格式对对流项进行离散求解.因realizable  $k-\varepsilon$ 湍流模型可以预测喷射器内复杂流动如涡流动和壁面回流等复杂的流动情况[16],故选择其为湍流模型,入口处的湍流强度设置为5%.壁面采用无滑移且绝热等熵的流动,近壁面处理方法采用加强壁面函数且 $y^+ \approx 0.9 < 1$ .设置压力入口和压力出口分别为进出口. Besagni等[20-21]和Carrillo等[22]已经证实了蒸汽的密度与理想气体模型中真实气体所获得的密度接近,为简化设置,故采用理想气体模型为计算依据,其具体参数如表1所示.具体工作条件为:入口工作压力为0.34 MPa,引射压力为1.71 kPa,出口背压为3.60 kPa.

表 1 蒸汽的物理属性  
Table 1 Physical properties of the steam

属性	数值
密度( $\rho$ )	理想气体
动力黏度( $\mu$ )/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$1.34 \times 10^{-5}$
热导率( $\lambda$ )/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0.026 1
比定压热容( $c_p$ )/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	2 014.00

## 2 结果和讨论

尽管随着喷射器研究的逐渐深入,人们对于激波已有了一定的认识,但对于激波的类型与具体发生位置的判定尚未给出具体的判断依据.在喷射器正常工作时,内部存在两种激波结构:一种是由在喷射器扩压器入口处产生的一系列斜激波所组成的激波串;另一种是在喉部出口位置处出现的正激波.喷射器内部流体的混合过程是在一系列激波运动的作用下使两股流体不断地交换动量与能量,从而实现了混合,而后混合流体在扩散段中进一步减速增压后排出喷射器外.

流体在跨音速流动过程中会产生激波.当流体穿过激波时,会产生速度中断,即速度突然降低,压力突然增加,熵增是阻力的来源,导致引射效率的降低.当激波与边界层接触时,流体会形成激波混合层结构.此外,激波会对边界层产生很强的压力梯度,使边界层增厚引起分离,增加了流体的黏性耗散,即流体流动的稳定结构将被破坏.激波的存在使喷射器的流动结构更加复杂.然而,很少有工作专注于全面详细地分析喷射器内部的整个激波结构.更好地了解喷射器内流体的复杂流动特性,特别是激波结构,将有助于提高喷射器的效率和实现几何结构优化.

### 2.1 喷射器内激波结构的划分

通过图 3 的速度等值线图和中心轴线的静压分布图,可以清晰地看到喷射器内部的整个激波结构.工作蒸汽从喷嘴高速喷出后进入到扩压器的混合室中,此过程在图 3 轴线静压图中的体现,则为在射流核中出现了超音速速度核心,每个速度核心又称为钻石波<sup>[23]</sup>.而在中心轴线的静压曲线上,混合室中的工作蒸汽流动则体现为压力振荡.从图中 A 点开始一直到 B 点振荡的变化过程中,覆盖了扩压器中的混合室和等面积混合段两个部分.静压曲线中的轴线压力振荡频率与速度

等值线图上的超音速射流核心的位置呈现出一一对应的关系.流体在压力和速度上的突变表明了激波的出现.由于是多个振荡频率,可知出现的激波不止一个,而是出现了一系列激波,这一系列激波就构成了激波串<sup>[24]</sup>.激波串也是射流核能量的主要体现.从 A 点到 B 点的区域也成为激波串区域.

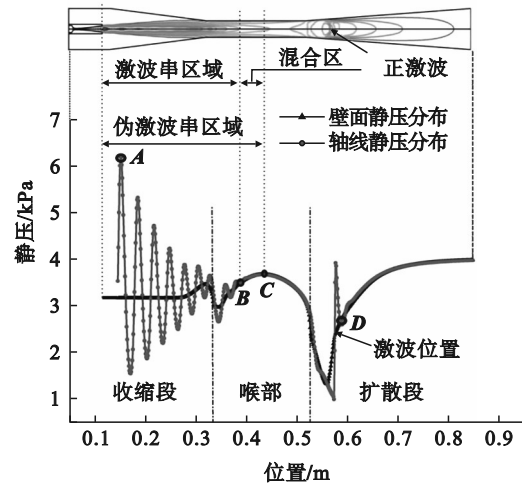


图 3 喷射器内激波的结构

Fig. 3 Structure of shock wave in steam ejector

随着工作蒸汽继续向下游流动,工作蒸汽的速度减小,射流核的能量减弱,壁面静压的振荡频率降低,即混合室内工作蒸汽与引射蒸汽在各自的流道内流动,并伴随着流体之间的能量和动量的交换.在喉部内流体从 B 点到 C 点的变化过程中,静压曲线中轴线静压值与壁面静压值相等,二者在静压曲线上重合,此时喷射器内的静压为等值分布.但在速度等值线图中则表现为速度相同,即两股流体达到了共速流动.此时工作蒸汽与引射蒸汽已充分混合,此区域即为共速区.激波串区域与共速区域合称为伪激波串区域.

在 C 点到 D 点的变化过程中,中心轴线上的静压仅出现了一次明显的压力振荡和压力突降.速度分布图中与其相对应的则是出现了明显的速度核心,混合流体的速度骤升.此时单一的速度突变处即产生了激波.因其速度突变面形态接近正切面,且激波纵向速度变化较小,即为正激波<sup>[25-28]</sup>.在正激波后混合流体的速度降低,压力升高,表明正激波在流体的流动过程中起到了压力恢复的作用.随着混合流体继续向下游流动,由于正激波的激波面与壁面之间存在剪切力,使混合流体与壁面之间产生了速度差,体现为激波在

其根部出现了分叉结构即分叉激波<sup>[29-31]</sup>.靠近壁面处激波的附着能力减弱,流体边界层逐渐产生脱离.此时正激波与分叉激波共同构成了斜激波区域<sup>[32]</sup>.而在D点后,混合蒸汽再次出现了共压共速的流动情况,即两股流体持续充分混合直至从喷射器出口处排出.

从喷射器的壁面静压与中心轴线静压曲线的变化过程中可见,壁面静压在混合室与等面积混合段处的变化较为平缓,而在等面积混合段出口处到扩散段入口处的区域内,则出现了较大的压力梯度变化.而中心轴线的静压曲线则与壁面静压曲线不同,中心轴线的静压在整个扩压器内除了两股流体的共压共速区域外,皆呈现出不同振幅的振荡情况,而振荡幅度的大小则体现了激波的强弱程度,也显示出了中心射流核能量和动量的变化情况.由上述分析可知,激波结构贯穿于整个喷射器流动区域内,并可划分为伪激波和斜激波两个激波串区域.

激波的形成会使压缩空气的速度和压力发生复杂变化,从而影响喷射器中制冷剂的喷射和循环效果,降低制冷效率.激波所带来的扩散和压缩效应体现为更高的气体动能和压力,从而增加了能源消耗.此外,受到激波的干扰,喷射器的工作稳定性也会显著降低.而伪激波的产生则会导致压缩空气中制冷剂流动的变化,从而影响制冷效果.特别是在液态制冷剂供给的过程中,伪激波的波动会导致液态制冷剂的不稳定,影响制冷系统的稳定性和可靠性.

在伪激波的影响下,喷射制冷系统需要消耗更多的能量来维持系统的稳定运行状态.喷射器的性能表现与制冷剂和压缩空气混合的均匀度及混合速度有关.混合不均匀或混合速度不理想会导致制冷剂的流动速度和方向不稳定,进而影响喷射器的抽气性能.因此,需要对喷嘴进行合理设计,确保其能够使制冷剂与压缩空气混合均匀.在喷射制冷系统中,需要选择合适的喷嘴,控制流量,优化系统设计和工作条件,以提高混合效果,提高喷射器性能和效率,并减少喷射器因混合不理想而产生工作效率降低的问题.

2.2 激波作用下的流速和温度的变化

在工作蒸汽压力为0.34 MPa,引射蒸汽压力为2.33 kPa,出口背压为3.50 kPa的操作条件下,通过速度分布云图(图4a)对激波的产生和激波结构的划分进行进一步的分析与讨论.由前面分析可知,整个喷射器流动区域共出现了3种局

部激波结构,分别为混合室和等面积混合段内激波串,等面积混合段出口处的正激波以及在正激波后扩散段入口处的分叉激波.正激波的产生对喷射器内压力的恢复起到至关重要的作用,因此有必要对正激波区域进行重点研究.

图4b为正激波附近沿X轴方向不同位置处流动截面上的马赫数分布曲线.在X轴方向上的0.48 m到0.49 m的变化区间内,中心轴线上的马赫数曲线较为光滑并呈现逐渐下降的趋势.当X轴距离大于等于0.50 m时,近壁面处的速度梯度变化较大,正激波开始向分叉激波转变.在0.50 m处开始产生分叉激波,而激波强度在0.51 m处达到最大,而后在0.52 m到0.54 m之间激波强度保持不变,与图4a中的速度云图的变化相对应.结果表明,随着速度的减小,正激波根部由于纵向速度的变化会产生分叉结构,逐渐形成分叉激波.在分叉激波处,射流核中心的能量逐步减弱,靠近壁面处由于存在较大的速度差,混合流体与壁面的分离程度也增加,工作蒸汽与引射蒸汽的混合受到了一定程度的影响.

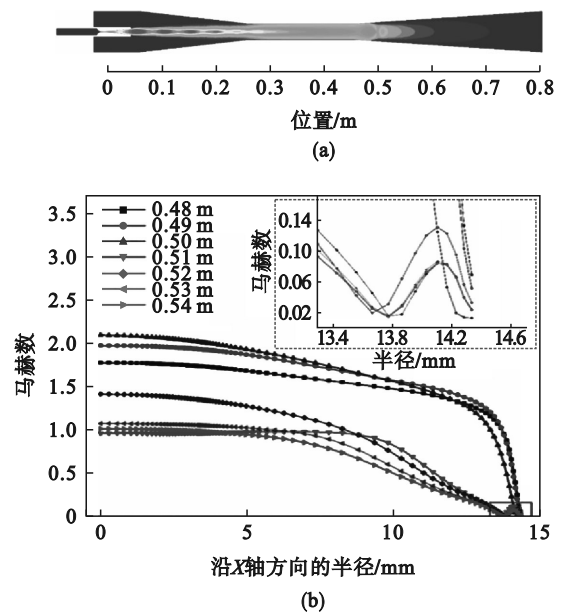


图4 工作蒸汽压力下的速度分布图

Fig. 4 Flow diagram under working steam pressure (a)—速度云图;(b)—X轴位置上不同的径向距离.

不同背压条件下的温度曲线也有相同的变化趋势,如图5所示.在壅塞、正激波和激波串的位置温度变化较小.由于模拟中的工作流体为理想气体,因此流体流速较高的区域处于较低的温度区域.随着背压的升高,高温区域增大并逐渐向喷射器上游扩展;同时,低温区域分布缩小.直

到喷射器喉部和扩散器部分充满高温区域.但是,当背压过高时,可观察到喉部内的壅塞流动消失,正激波位置在喉部内,工作蒸汽与引射蒸汽的混合区域几乎消失不见,这意味着喷射器气体夹带性能急剧减小直至消失,即喷射器不再发挥其工作能力,处于失效状态.

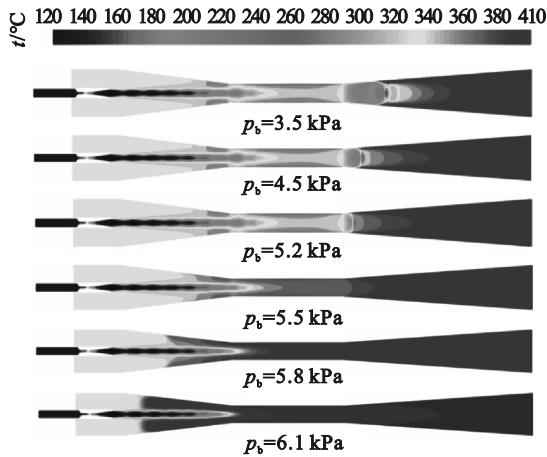


图5 背压下的温度云图

Fig. 5 Temperature cloud diagram under back pressure

### 2.3 激波作用下流动中心轴线上的速度变化

图6为中心轴线处的马赫数分布曲线,从喷射器混合室入口到等面积混合段处的区域内,马赫数呈现上下振荡变化.其中出现了5个峰值变化,这与图4a中速度云图的钻石波的个数相对应.根据激波的定义,激波串是由多个能引起流体振荡的分叉激波所组成的,具体为沿中心轴线方向上的速度先上升后下降,而压力变化却恰好相反,为先下降而后再上升的变化趋势(如图3和图6所示).这表明在一定能量损失的情况下,激波串对降低喷射器内的流动速度和恢复压力起着重要作用.因此,可以根据压力或速度波动范围以及振荡幅度来判断和定义激波串的位置.

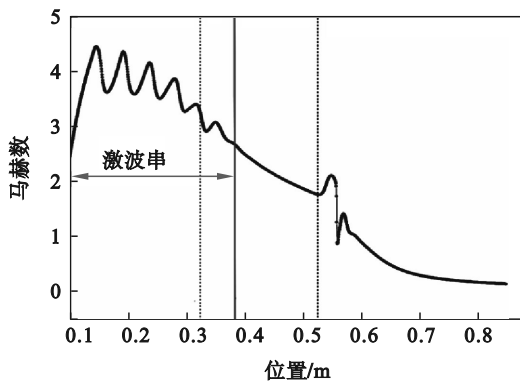


图6 中心轴线上的马赫数分布曲线

Fig. 6 Distribution curve of Mach number at centerline

### 2.4 激波混合层

激波混合层是喷射器内流体的局部流动特性之一.该混合层是工作蒸汽与引射蒸汽的流动混合界面,将工作蒸汽与引射蒸汽的流道分开.工作蒸汽通过激波混合层携带和加速引射蒸汽的流动.而激波混合层的产生主要受喷射器的几何结构和工作蒸汽的流动状态影响.

喷射器内流体的流动结构按照混合状态可划分为未混合区、混合区和完全混合区.在流体未混合时,工作蒸汽和引射蒸汽有各自的流动通道.从喷嘴出来的高速工作蒸汽,在扩压器入口处形成低压,引射蒸汽通过压差作用被抽吸进扩压器中,两股流体之间存在较大的速度梯度层,即为激波混合层.激波混合层将工作蒸汽和引射蒸汽的流动通道隔开.激波混合层的一边是超音速流体,另一边是音速流体,从而导致大量的瞬时旋涡产生,这些旋涡之间的相互作用与发展使引射蒸汽与工作蒸汽逐渐混合.在此过程中引射蒸汽通过激波混合层的剪切力被加速,工作蒸汽速度不断降速,最后与引射流体达到共速流动.

为了深入地了解喷射器内流体流动的结构和局部流动特性,有必要对影响两股流体混合过程的关键因素——激波混合层进行研究.图7为喷射器内的局部速度分布图,从图中可以看到,工作蒸汽从喷嘴中加速减压排出并携带引射蒸汽进入到扩压器的初期,工作蒸汽与引射蒸汽并未立即混合,而是在速度差形成的夹层两侧各自流动.虽然不是固定的流体边界,但存在一个不断变化的且具有较大速度梯度的边界层,将两股流体分开.在流动过程中工作蒸汽与引射蒸汽不断地通过此速度梯度层进行动量和能量的交换,此边界层即为激波混合层.激波混合层的外廓形状如图7b所示,其范围是从喷管出口位置到两股流体达到共同速度的正激波前的位置.

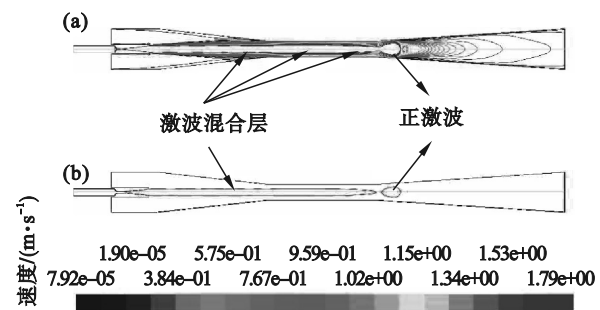


图7 激波混合层的结构与区域

Fig. 7 Location and range of the shock-mixing layer (a)—混合层马赫数分布曲线;(b)—主轮廓线.

工作蒸汽通过激波混合层的黏性作用,将动量和能量不断传递给引射蒸汽.在此过程中引射蒸汽的动量和能量不断增加,速度得到了显著提高,而工作蒸汽自身的动量和能量则逐渐降低,速度不断下降,最后两股流体突破激波混合层而达到共速,进而开始实现完全混合.

激波混合层的存在使引射蒸汽具有与工作蒸汽流道相近的、由混合部分和扩散部分组成的发散-收缩结构流动通道,如图7所示.引射蒸汽通过这个激波混合层获得来自工作蒸汽的能量和动量,依靠从激波混合层吸收的动能从停滞状态加速到超音速状态.

### 3 结 论

1) 首次对喷射器内激波结构进行了详细划分,对激波串区域、伪激波区域、混合区域和正激波进行了具体的划分,并给出了具体的判定依据,对全面了解喷射器内复杂的流动情况提供了理论依据.

2) 正激波的产生伴随着跨音速流动,正激波降低了混合流体的速度而提高了混合流体的压力,是混合流体能顺利排出喷射器的必要条件.

3) 正激波的产生阻止了喷射器背压产生的扰动向上游的传播,而且正激波位置越靠近等面积混合段出口,阻止扰动向上游传播的能力越强,喷射器背压对喷射器内流动的干扰越小,喷射器的性能越稳定.

4) 速度和压力振荡而产生的振幅较小的分叉激波降低了主流体与被抽流体的混合程度,减少了流体混合过程的能量交换,此过程是判断正激波和分叉激波组成的斜激波区域,区别激波串和共速区组成的伪激波区域的重要判据.

5) 激波混合层的存在使引射蒸汽具有与工作蒸汽流道相近的、由混合部分和扩散部分组成发散-收缩结构的流动通道,引射蒸汽通过这个激波混合层获得来自工作蒸汽的能量和动量,依靠从激波混合层吸收的动能从停滞状态加速到超音速状态.

#### 参考文献:

[1] Khayyam H, Kouzani A Z, Hu E J. Reducing energy consumption of vehicle air conditioning system by an energy management system [C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Xi'an, 2009: 752-757.  
[2] Sumeru K, Martin L, Ani F N, et al. Energy savings in air

conditioning system using ejector: an overview [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 493: 93-98.  
[3] Wei K C, Dage G A. An intelligent automotive climate control system [C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Vancouver, BC, 2002: 2977-2982.  
[4] Wang L, Cai W J, Zhao H X, et al. Experimentation and cycle performance prediction of hybrid A/C system using automobile exhaust waste heat [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 94: 314-323.  
[5] Suzuki M. Application of adsorption cooling systems to automobiles [J]. *Heat Recovery Systems and CHP*, 1993, 13(4): 335-340.  
[6] Edmunds J A, Wuebles D L S M. Energy and radiative precursor emissions [M]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 1987: 14-16.  
[7] Wang L W, Wang R Z, Oliveira R G. A review on adsorption working pairs for refrigeration [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(3): 518-534.  
[8] Sarbu I. A review on substitution strategy of non-ecological refrigerants from vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump systems [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 46: 123-141.  
[9] Han Y, Wang X D, Sun H, et al. CFD simulation on the boundary layer separation in the steam ejector and its influence on the pumping performance [J]. *Energy*, 2019, 167: 469-483.  
[10] Li A, Yeoh G H, Yuen A C Y, et al. Numerical simulation of condensation effect on a steam ejector by wet steam model [C]//Thirteenth International Conference on Flow Dynamics. Sendai, 2016: 10-12.  
[11] Li A, Yuen A C Y, Chen T B Y, et al. Computational study of wet steam flow to optimize steam ejector efficiency for potential fire suppression application [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(7): 1486.  
[12] Bartosiewicz Y, Aidoun Z, Mercadier Y. Numerical assessment of ejector operation for refrigeration applications based on CFD [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(5/6): 604-612.  
[13] Wu H Q, Liu Z L, Han B, et al. Numerical investigation of the influences of mixing chamber geometries on steam ejector performance [J]. *Desalination*, 2014, 353: 15-20.  
[14] Zhu Y H, Jiang P X. Experimental and numerical investigation of the effect of shock wave characteristics on the ejector performance [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 40: 31-42.  
[15] Lee M S, Lee H, Hwang Y, et al. Optimization of two-phase R600a ejector geometries using a non-equilibrium CFD model [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 109: 272-282.  
[16] Han Y, Wang X D, Li A, et al. Optimum efficiency of a steam ejector for fire suppression based on the variable mixing section diameter [J]. *Entropy*, 2022, 24: 1625.  
[17] Haghparast P, Sorin M V, Nesreddine H. The impact of internal ejector working characteristics and geometry on the performance of a refrigeration cycle [J]. *Energy*, 2018, 162: 728-743.  
[18] 张家豪. 小型蒸汽喷射实验系统的结构改进和性能提高 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.  
(Zhang Jia-hao. Structure improvement and performance improvement of small steam injection experimental system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.)  
[19] Pianthong K, Seehanam W, Behnia M, et al. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using

