

V形喷嘴的超声速引射器的数值模拟

孔凡实^{1,2}, 崔宝玲¹, 金英子¹, 金羲东²

(1. 浙江理工大学浙江省流体传输技术研究重点实验室, 杭州 310018; 2. 安东国立大学机械工程学院, 韩国安东 760-749)

摘 要: 为了提高超音速引射器的性能, 基于原有收敛形喷嘴的实验结果, 重新设计了新型的 V 形喷嘴。通过改变 V 形喷嘴的波瓣数, 使其引入更多涡流来提高引射流量, 得到性能较好的 V 形喷嘴几何模型。采用 FLUENT 软件模拟超声速引射器中的复杂流动, 对比分析了数值计算的各种喷嘴的性能。数值模拟结果显示: V 形喷嘴对超音速喷嘴处的流场分布以及激波分布有一定的影响, 可以有效提高引射器的性能, 使引射器达到更大的压缩比和压力恢复。

关键词: 引射器; V 形喷嘴; 超声速; 数值模拟

中图分类号: TH48

文献标志码: A

0 引 言

引射器是一种利用一股高压、高能量的主动流的剪切力和引射作用来吸入另一股低压、低能量的从动流, 从而实现流体的运输或压缩的装置。它的应用一直十分广泛, 这主要得益于它有很多其他流体设备不可比拟的优点, 例如构造简单、设备制造费用低廉、较低的能源耗费等。但由于其内部有多相流、混流、湍流、压缩流等复杂流动, 而且其工作状态不稳定, 所以引射器内部流场的分析和最佳的工作条件非常难以确定。

对于引射器的初期的理论研究, 大多是把引射器系统管内流动看作是一维流动, 通过在流线方向上建立动量守恒等方程来计算压力等流动参数^[1]。近年来, 众多研究者对引射器的主要功能、工作环境、优化方法等进行了不同层次的研究, 并取得了一定的成果^[2-3]。尤其是进入 21 世纪以来, 不同行业的引射器研究变得更加丰富, 例如基于蒸汽引射器的海水淡化行业^[4]、基于蒸汽-水引射器的制冷行业^[5-6]以及核能工业等。但由于超声速引射器的性能受到很多因素的影响, 且引射器内部可压流动复

杂, 涡旋、离散激波、膨胀波等汇聚其中, 导致实验研究和普通的测量技术很难对其进行分析。这时就要依靠对引射器内部流场的数值模拟和优化设计。Hong W J 等曾尝试在引射器内部设置倾斜的自旋转叶片, 虽然减少了主动流体的流速, 但同样减少了两流体在混合时的能量损失, 从而可以有效地提高引射器的效率^[7]。基于 Hong W J 等的理论及引射器模型, Chang Y J 等^[8]和 Chen Y M 等^[9]重新设计了喷嘴出口形状, 使得诱导比和临界背压都有显著提高。Sobolev A V 等尝试使用不同的喷嘴形状对蒸汽引射器进行优化设计, 优化后的引射器性能有了一定程度的提高^[10]。Blaisdell G A 等也就 V 形喷嘴在医用注射器的应用进行了数值模拟研究, 而且使用了 Fluent、CFX 等不同数值模拟软件对其进行了模拟及对比分析, 结果显示引射器从动流的流量有所提高, 但提高幅度有限^[11]。由此可见, V 形喷嘴具备提高引射器性能的潜力, 但为了使引射器具有更好的工作特性, 对 V 形喷嘴的优化设计工作也显得尤为重要。

本文在原有收敛形喷嘴的基础上重新设计一种新型的 V 形喷嘴, 以考察其对引射器压缩比及压力

收稿日期: 2012-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21276241); 浙江省自然科学基金项目(R1100530)

作者简介: 孔凡实(1989-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事流体机械方面的研究。

通信作者: 崔宝玲, 电子邮箱: blcui@zstu.edu.cn

恢复等性能的影响。采用一种基于 Fluent 流体模拟软件的数值模拟技术来研究引射器内部的复杂流场尤其是喷嘴处的流动情况。建立与实验设备相同的模型来进行数值模拟,通过对比实验数据验证 CFD 的模拟结果。重点比较收敛形喷嘴和 V 形喷嘴对引射器性能的影响,并通过改变 V 形喷嘴的波瓣数来得到优化的 V 形喷嘴几何模型。

1 计算模型的建立

本文中所使用的模型是一种等面积混合引射器,其设计者为 Texas A&M University 的 Holtzapple M T^[12],被广泛地使用在海水蒸馏淡化系统中。相关学者曾基于一种混流导叶对其进行过实验研究、数值模拟和优化设计^[13-15]。一般来说,典型的引射器主要包含以下几个部件:混合室、扩散器、喷嘴。本文所使用的引射器三维几何模型如图 1 所示,其中引射器的混合室长度、扩散室长度、混合室直径、引射器各出入口直径等均依据实验设备^[15]确定为定值,且保持不变。其中,主动流入口直径为 6.08 mm,从动流入口直径为 211.56 mm,混合室直径为 84.56 mm。本文使用的相关实验数据及其他几何模型尺寸可参考文献[12~15]。

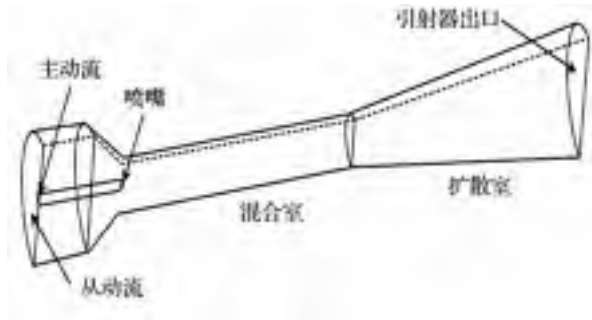


图 1 引射器的几何形状三维展示图

本文使用 3 种喷嘴对引射器性能进行对比研究:普通收敛形喷嘴,带 6 个波瓣的 V 形喷嘴和带 10 个波瓣的 V 形喷嘴,它们位于如图 1 所示的引射器的喷嘴出口处。3 种喷嘴的 3D 模型及 V 形喷嘴的波瓣位置如图 2 所示。3 种喷嘴具有相同的入口直径 6.08 mm,而且从图 2 中可以看到 V 形喷嘴的



图 2 喷嘴的几何形状三维展示图

波瓣是建立在喷嘴之外的,属于收敛形喷嘴的延伸部分。两种 V 形喷嘴收敛处的最小直径相同,且波瓣分布均匀。3 种喷嘴的主要几何参数可见表 1,其中收敛形喷嘴的参数取自实验设备^[15],其余两种带波瓣的 V 形喷嘴均为重新设计后的优化喷嘴。

表 1 引射器喷嘴的主要几何参数表

几何参数	收敛形 喷嘴	V 形 喷嘴	V 形 喷嘴
喷嘴外波瓣数	0	6	10
喷嘴入口直径/mm	6.08	6.08	6.08
喷嘴出口直径/mm	1.52	1	1
波瓣轴向长度/mm	—	0.74	0.74
一个波瓣的周向弧长/mm	—	2.16	1.27
波瓣厚度/mm(前端/后端)	—/0.5	0.25/0.5	0.25/0.5
波瓣叶顶夹角/(°)	—	97	64.5
一个波瓣的截面积/mm ²	—	1.17	0.69

2 计算方法和边界条件

本文使用 Fluent 14.0 软件分析 3 种喷嘴对引射器性能的影响。湍流模型采用 SST $k-\omega$ 湍流模型。与标准 $k-\omega$ 模型相比,SST $k-\omega$ 湍流模型拥有更高的准确度和湍流模拟特性。使用 Gambit 软件建立计算网格,整体上使用了结构式网格,在几何模型较为复杂的 V 形喷嘴部分使用了 3 角形网格。在此基础上考虑了边界层的影响,并在近壁处使用了较为密集的网格。基于无量纲距离(y^+)和已有实验值对以下 3 种不同质量的网格进行初步计算。其中,较差的网格的无量纲距离 y^+ 为 4.7,网格数为 256,547,与实验值相比,引射器的压缩比差别较大(5.7%);中等质量的网格无量纲距离 y^+ 为 2.1,网格数为 442,562,与实验值相比,引射器的压缩比差别较小(2.1%);较好的网格无量纲距离 y^+ 与中等网格相同,网格数为 442,562,与实验值相比引射器的压缩比差别较小(2.3%)。通过对 3 种网格的数值模拟结果进行比较和独立性分析认为,中等质量的网格和较好的网格的结果差别不大,而较差质量的网格数值模拟结果与前两者差别明显,于是在本文的数值计算中使用了第二个普通网格,因为它有较准确的模拟结果和较少的运算时间。

此外,在进行数值模拟时,空间上主要采用了二阶迎风模式对动量方程、连续性方程以及能量方程进行耦合求解,时间上主要采用了隐式方程对数值模型进行迭代计算。

主动流入口使用压力入口边界条件,计算时压力数值与实验值保持一致,分别为大气压的 9 倍、10

倍、11倍、12倍和13倍。边界条件之后在研究引射器压力恢复特性时有所改变,以获得主动流入口处相同的质量流率。从动流的入口和引射器的出口均采用压力出口边界条件,压力设定为大气压力。引射器主动流入口初始化遵循等熵状态方程,主动流入口截面处总压、静压及总温、静温等与马赫数的关系可用等熵状态方程进行计算。

$$\frac{P_s}{P_t} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (1)$$

$$\frac{T_s}{T_t} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-1} \quad (2)$$

$$\frac{\rho_s}{\rho_t} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

$$\frac{P_s}{P_t} = \left(\frac{\rho_s}{\rho_t}\right)^\gamma = \left(\frac{T_s}{T_t}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4)$$

其中, P —压力 Pa ; γ —绝热指数; M —入口马赫数; T —温度 (K) ; ρ —密度 (kg/m^3) ; 下标 s 表示静态参数,下标 t 表示总体参数。

3 结果分析与讨论

引射器的性能受很多方面的影响,可以用很多指标来衡量,其中主要有压缩比、质量流率和压力恢复等参数。

3.1 压缩比分析

压缩比是指主动流与从动流的质量流率比,用以衡量相同主动流质量流率下引射器的引射效果,计算方程如下,

$$m = \rho VA \quad (5)$$

$$Rm = \frac{m_2}{m_1} \quad (6)$$

其中, ρ —密度 (kg/m^3) ; V —速度 (m/s) ; A —入口面积 (m^2) ; m —质量流率 (kg/s) ; Rm —引射器压缩比。下标 1 表示主动流入口参数,下标 2 表示从动流入口参数。

使用收敛形喷嘴和 V 形喷嘴的引射器压缩比较如图 3 所示。从图 3 可以看出,实验值与模拟值之间有一定的差别,这主要是由于主动流和从动流使用了理想气体并忽略了引射器内壁面的摩擦,导致模拟结果比实验值偏大。此外,由图 3 中可以看出,两种 V 形喷嘴的引射器与原有的收敛形喷嘴引射器相比均具有较高的压缩比,且带有 10 个波瓣的 V 形喷嘴具有更好的引射性能。即使考虑到数值模拟结果与试验值之间的差异,也可以认为 V 形喷嘴对引射器的性能提高是有帮助的,但波瓣数对引射器的性能影响还需要进一步分析。结合参考文

献^[11]的结论和本例数值模拟结果的分析可以认为,造成引射器性能提高的原因主要是由于 V 形喷嘴改变了引射器内尤其是喷嘴处的流场分布,尤其是波瓣的形状可以产生更多的涡旋(详见 3.4 节图 6、图 7),改变了喷嘴处流场分布和激波系统(详见 3.4 节图 8、图 9),并带动了更多的从动流进入引射器,从而有效地提高了压缩比。

不同喷嘴形状对主动流质量流率的影响如图 4 所示。V 形喷嘴引射器的主动流质量流率普遍较低,均小于收敛形喷嘴的质量流率,且带有 6 个波瓣的 V 形喷嘴主动流质量流率最低。这主要是由于 V 形喷嘴的波瓣位于喷嘴之外,属于收敛形喷嘴的延伸部分。这一延伸部分有更大的阻力和总压损耗,且其对流场结构的影响也导致喷嘴处流量降低。通过比较图 3 和图 4 不难发现,在任意一个入口压力条件下,装有 V 形喷嘴的引射器虽具有较低的主动流质量流率,但却可以获得较大的压缩比性能。由此可以认为,使用 V 形喷嘴的引射器可以节约更多的动力能源,并在较少主动流流入的情况下,满足引射器较高压缩比的需要。

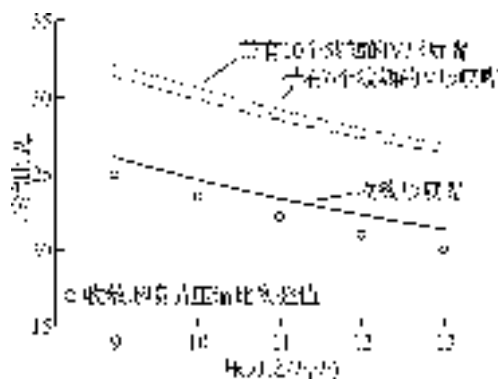


图3 不同喷嘴形状下引射器压缩比性能的比较

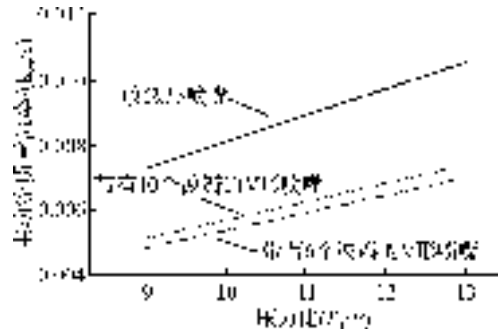


图4 不同喷嘴形状下主动流质量流率的比较

3.2 压力恢复分析

压力恢复代表了引射器出入口的压力差别,用以衡量引射器对混合流体的压力提高能力,和对从动流的引射能力。通常用无量纲的压力恢复系数来

表示压力恢复性能,即压力恢复与入口动压的比值。相关计算方程如方程下,

$$\Delta P = P_{se} - P_{s2} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta P}{P_d} = \frac{(P_{se} - P_{s2})}{0.5\rho V^2} \quad (8)$$

其中, P_{se} —引射器出口处标压(Pa); P_{s2} —从动流入口处标压(Pa); P_d —从动流入口处动压(Pa)。

不同喷嘴形状对引射器压力恢复性能的影响如图5所示。由于图3和图4中均为同样入口压力下的数据,且没有获得同样质量流率下的引射器性能的比较,因此图5中不同形状的喷嘴使用了不同的压力进口边界条件,可以在相同的质量流率条件下进行对比研究。由图5中可见,带有10个波瓣的V形喷嘴比收敛形喷嘴获得更大的压力恢复。这说明在同样质量流率的条件下V形喷嘴可以获得更高的出口压力和更低的从动流压力。而与此同时,带有6个波瓣的V形喷嘴的压力恢复与收敛形喷嘴相差不大,尤其是在质量流率较低的时候压力恢复性能也相对较低。这说明并不是任何形状和波瓣数量的V形喷嘴都能有效提高引射器的压力恢复。

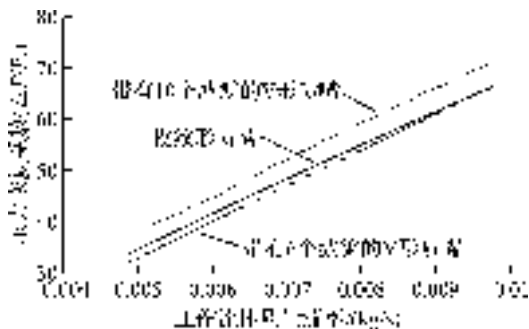


图5 不同喷嘴形状下引射器压力恢复性能的比较

3.3 V形喷嘴对引射器流场的影响

通过比较喷嘴对引射器工作性能的影响,可知V形喷嘴对引射器各项性能的提高是明显的。究其原因可能是由于V形喷嘴使喷嘴处流场结构和流动参数发生改变。

图6和图7分别为收敛形喷嘴和带有10个波瓣的V形喷嘴出口附近流场的流线图。它们均采用了对称面上的流线分布图,并加入了三维的喷嘴轮廓,可以示意性地展示出喷嘴的位置。由图6可以看出,收敛形喷嘴出口附近流场分布均匀,流线平滑,无较大的涡旋和反向流产生;与之相比的图7则有所不同,V形喷嘴出口附近流场复杂,流线方向有较大的不确定性,而且最明显的是在波瓣附近出现了涡旋。引射器中喷嘴附近的涡旋可以很好地引入更多的从动流,并能有效地提高引射器压缩比及压

力恢复等性能。由此可见,V形喷嘴的安装使喷嘴处流场结构发生了改变,波瓣间产生的涡旋可以对引射器性能产生积极的影响。

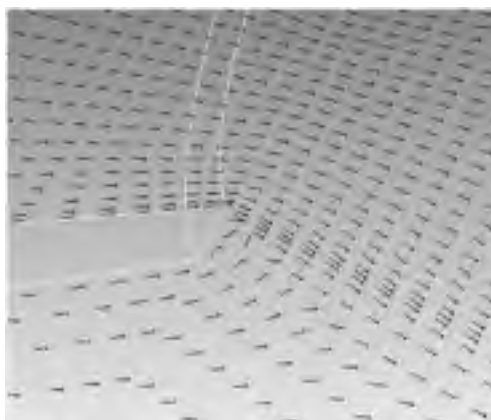


图6 收敛形喷嘴出口附近流场流线图

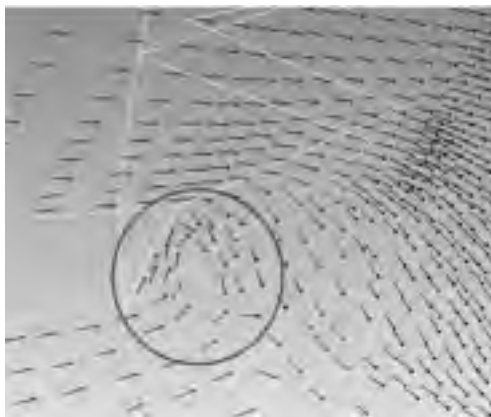


图7 带有10个波瓣的V形喷嘴出口附近流场流线图

图8和图9为同样的入口压力条件下,不同喷嘴形状的马赫数和温度在喷嘴附近轴线上的分布。 $X=0$ 处即是喷嘴的出口处。由图8可以看出,3种不同形状的喷嘴第一个激波的强度是类似的,且位置也几乎相同,只是在第一个强激波之后的马赫分布产生了不同。其中收敛形喷嘴之后的马赫分布为一系列交替的弱压缩波和膨胀波,强度较第一个激波有所降低,且随着轴向距离增大强度慢慢降低。与之相比,V形喷嘴则完全不同,在第一个强激波之后,其余波系变得十分微弱,以至于马赫数分布已趋于均匀。第一个较强的激波是由收敛形喷嘴出口的超声速流产生的,而之后的马赫数分布的变化则是由于V形喷嘴改变了出口形式,故两者有类似的分布情况,同时又不完全一致。图9展示的是不同喷嘴形状下温度在喷嘴附近轴线上的分布,总体上看其形状与马赫分布正好相反,在第一个强激波后,收敛形喷嘴的温度分布为一系列弱波,而V形喷嘴的温度变化较为平稳。如前方程(1~4)所示,温度和

压力有着密切的关系,因此喷嘴外的压力轴向分布也可以从图9中得到,并有类似的变化。相比于收敛形喷嘴复杂的波系导致的能量损耗,V形喷嘴则可以节约更多的能量来引入从动流。与此同时,带有10个波瓣的V形喷嘴比带有6个波瓣的V形喷嘴获得更高的马赫数可以引射更多的流体并提高引射器的压力恢复性能。这也解释了为什么带有V形喷嘴的引射器可以获得更高的压缩比,且带有10个波瓣的V形喷嘴获得最佳的工作性能。

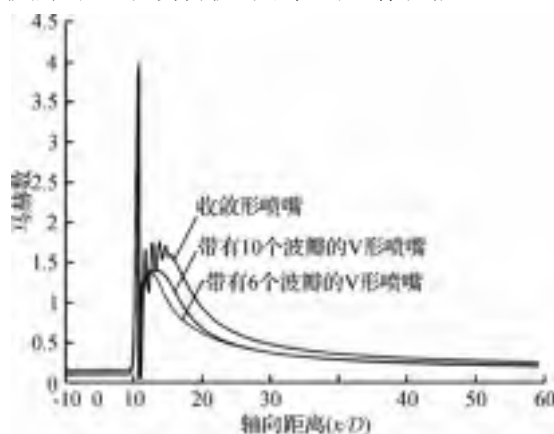


图8 不同喷嘴形状下马赫数在轴线上的分布

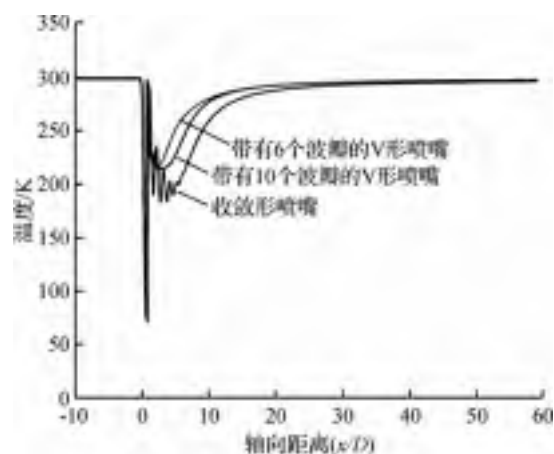


图9 不同喷嘴形状下温度在轴线上的分布

4 结 论

在收敛形喷嘴的基础上重新设计了新型的V形喷嘴,并使用了FLUENT软件模拟引射器中的复杂流动,比较各种喷嘴对引射器性能的影响。数值模拟结果显示:V形喷嘴波瓣间的涡旋提高了从动流的引入能力,使引射器获得了更大的压缩比;V形喷嘴有效地改变了喷嘴处的流场分布和激波系统,减少了流体在复杂波系中的能量损耗,提高了引射器的引射性能;而且喷嘴外波瓣的设置可以使引射器节约更多的动力能源,保证其在较少主动流流

入的情况下,满足引射器较高压缩比的需要。对其波瓣数的优化设计表明,带有10个波瓣的V形喷嘴可以获得比其他喷嘴更高的性能,并且提高了引射器的压力恢复。今后可以将基于更准确的数值模拟结果对V形喷嘴波瓣对引射器性能的影响进行分析,并采用不同形状的波瓣来对V形喷嘴进行优化设计。

参考文献:

- [1] Dessouky H E, Ettouney H, Alatiqi I, et al. Evaluation of steam jet ejectors[J]. Chemical Engineering and Processing, 2002, 41(2): 551-561.
- [2] Gulawani S S, Deshpande S S, Joshi J B, et al. Submerged gas jet into a liquid bath: a review[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007, 46: 3188-3218.
- [3] Riffat S B, Jiangang L, Gan G. Recent development in ejector technology-a review[J]. International Journal of Ambient Energy, 2005, 26(1): 13-26.
- [4] Kumar R S, Kumaraswamy S, Mani A. Experimental investigations on a two-phase jet pump used in desalination systems[J]. Desalination, 2007, 204: 437-447.
- [5] Sriveerakul T, Aphornratana S, Chunnanond K. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: part 1 Validation of the CFD results[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(8): 812-822.
- [6] Sriveerakul T, Aphornratana S, Chunnanond K. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: part 2 flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures and geometries[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46: 823-833.
- [7] Hong W J, Alhussan K, Zhang H, et al. A novel thermally driven rotor-vane/pressure-exchange ejector refrigeration system with environmental benefits and energy efficiency[J]. Energy, 2004, 29: 2331-2345.
- [8] Chang Y J, Chen Y M. Enhancement of a steam-jet refrigerator using a novel application of the petal nozzle [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 22: 203-211.
- [9] Chang Y J, Chen Y M. Enhancement of a steam-jet refrigerator using a novel application of the petal nozzle [J]. J Chin Inst Eng. 2000, 23: 677-686.
- [10] Sobolev A V, Zapryagaev V I, Mal'Kov V M. Improvement of gas-jet ejector discharge characteristics with heads, chevrons, and tubs[J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2007, 14(2): 193-200.

- [11] Blaisdell G A, Lyrntzi A S, Sullivan J P. Preliminary design and computational analysis of an ejector nozzle with chevrons [C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida, 2011: 1-17.
- [12] Holtzapple M T. High-efficiency jet ejector: USA, 7780099[P]. 2010-08-24.
- [13] Manohar D V. Desalination of seawater using a high-efficiency jet ejector[D]. College Station: Texas A&M University, 2005.
- [14] Somsak W. Optimization of a high-efficiency jet ejector by computational fluid dynamics software[D]. College Station: Texas A&M University, 2005.
- [15] Somsak W. CFD optimization study of high-efficiency jet ejector[D]. College Station: Texas A&M University, 2008.

Computational Study of the Supersonic Ejector Flows with a V-shape Nozzle

KONG Fan-shi^{1,2}, CUI Bao-ling¹, JIN Ying-zi¹, KIM Heuy-dong²

(1. Provincial Key Laboratory of Fluid Transmission Technology Research, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

Abstract: To improve the performance of supersonic ejector, this paper redesigns a new V-shape nozzle based on the experimental result of the original convergent nozzle; makes it introduce more vortexes, thus improving the drainage flow by changing the number of lobes of V-shape nozzle, and obtains a geometric model of V-shape nozzle with a good performance; simulates the complex flow in supersonic ejector with FLUENT software and conducts contrastive analysis on the performance of various nozzles in numerical calculation. The result of numerical calculation shows that V-shape nozzle has certain influence on the distribution of flow field and impact wave at the supersonic nozzle and can effectively improve the performance of ejector and make the ejector reach a higher compression ratio and pressure recovery.

Key words: ejector; V-shape nozzle; supersonic velocity; numerical simulation

(责任编辑: 张祖尧)