

使用量纲一参数进行喷射器性能分析

李海军^{*1}, 沈胜强²

(1.大连海事大学 机电与材料工程学院, 辽宁 大连 116026
2.大连理工大学 动力工程系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在以往大量数值模拟工作的基础上,总结出了一定喷射器结构时,喷射器的最大喷射系数、膨胀比及临界压缩比三者之间的关系,并给出了膨胀比与喷嘴出口马赫数之间的幂指数关系.研究表明,用膨胀比和压缩比两个量纲一参数代替具体的工作流体压力、引射流体压力和出口压力,来分析一定结构时工作参数对喷射器性能的影响,可以使模拟所得出的结论不局限于具体的参数值,具有更好的通用性,对指导喷射器设计、提高喷射器性能具有重大意义.

关键词: 喷射器; 喷射系数; 临界压缩比; 膨胀比
中图分类号: TB617 **文献标识码:** A

0 引言

喷射器是一种在工业领域中应用非常广泛的流体机械,其效率对工业领域能源利用效率的影响非常大.以水蒸气为工质的喷射器,如蒸汽喷射式制冷机、蒸汽热泵等,在废汽、余热利用上,有着广泛的应用价值^[1-2].因此,对其机理的研究得到许多学者的关注.对喷射器研究的工作主要体现在两个方面,一是研究工作参数和结构对喷射器性能的影响,主要方法是实验或建立在一维等熵假设基础上的数值分析,往往是针对具体的参数和结构来展开的,可以满足具体的应用需要,不具有通用性;另一方面是捕捉喷射器内部复杂的流动过程,从机理上分析影响喷射器性能的原因,这方面的工作很少,随着实验测试条件和CFD模拟方法的发展,对喷射器机理的分析将更加深入.

对于前者,研究给出的结论主要归结到工作流体压力与最大喷射系数及临界出口压力、引射流体压力与最大喷射系数及临界出口压力之间的关系,这方面的研究结果详见文献[3-4].本文则是在以往的模拟工作基础上,总结使用量纲一参数,即膨胀比、压缩比、临界压缩比,来分析喷射

器性能.

1 量纲一压力比的引入

本文在大量模拟工作的基础上,针对工作参数,即工作流体压力、引射流体压力和喷射器出口压力,对喷射器性能影响规律方面的研究结果进行了系统的归纳总结(喷射器结构见图1),发现对一定结构的喷射器,影响喷射器性能的不是各工作参数的具体值,而是工作参数间的比值,即膨胀比 U 、压缩比 T 及临界压缩比 T^* ,具体定义如下:

$$U = p_m / p_s \tag{1}$$

$$T = p_d / p_s \tag{2}$$

$$T^* = p_d^* / p_s \tag{3}$$

式中: p_m 为工作流体入口压力; p_s 为引射流体入口压力; p_d 为喷射器出口压力; p_d^* 为临界出口压力,即 p_m 、 p_s 一定时,喷射系数刚好达到最大值时的 p_d .

为说明当喷射器结构一定时,膨胀比及对应临界压缩比的使用,会使模拟所得出的结论具有更好的通用性,这里对图1给出的喷射器进行了模拟,模拟工况的膨胀比分别为 27.0、40.4

58.8,在各自膨胀比不变的情况下,使用不同的工作流体压力及引射流体压力,表 1 给出了具体参数值及计算结果.从计算结果可以看到,对一定结构的喷射器,当膨胀比一定时,尽管工作及引射流体压力的具体值不同,得到的最大喷射系数 k^* 及临界压缩比的值仍是相同的.这说明使用膨胀比及对应的临界压缩比来分析喷射器的性能,所得出的结论不会局限于某些具体的参数值,从而使分析所得的结论具有更好的通用性.

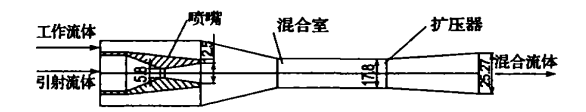


图 1 喷射器的结构尺寸简图
Fig. 1 Configuration and dimension of the ejector

表 1 相同膨胀比时最大喷射系数及临界压缩比
Tab. 1 Maximum entrainment ratio and critical compression ratio under the same expansion ratio

U	$p_m, p_d / \text{Pa}$	k^*	p_d^* / Pa	Γ
27.0	$p_m = 27\,000$ $p_d = 1\,000$	0.489 246	3 750	3.75
	$p_m = 36\,733$ $p_d = 1\,360$	0.489 193	5 100	3.748 6
	$p_m = 40\,500$ $p_d = 1\,500$	0.489 276	5 610	3.74
	$p_m = 100\,000$ $p_d = 3\,700$	0.489 245	13 840	3.741
	$p_m = 40\,400$ $p_d = 1\,000$	0.431 869	4 440	4.44
	$p_m = 55\,000$ $p_d = 1\,360.5$	0.431 873	6 040	4.439 5
40.4	$p_m = 60\,600$ $p_d = 1\,500$	0.431 880	6 660	4.44
	$p_m = 149\,480$ $p_d = 3\,700$	0.431 884	16 420	4.437 8
	$p_m = 58\,800$ $p_d = 1\,000$	0.312 094	5 250	5.25
	$p_m = 80\,000$ $p_d = 1\,360.5$	0.312 169	7 150	5.255 4
58.8	$p_m = 88\,200$ $p_d = 1\,500$	0.312 177	7 880	5.253 3
	$p_m = 217\,560$ $p_d = 3\,700$	0.312 167	19 440	5.254 1

注:喷射系数为引射流体与工作流体质量之比,记为 k

2 模拟结果分析与讨论

模拟时采用已经证明适用于蒸汽喷射器的 Chen-Kim k - X 两方程湍流模型来求解质量、动量及能量的二维时均控制方程,蒸汽按真实气体的物性公式给出,结构尺寸示意图见图 1.

2.1 膨胀比与喷嘴出口马赫数的关系

对喷嘴设计出口马赫数 Ma_o 分别为 1.5 2.7 3.5 4.0 的 4 个喷射器进行了大量的模拟计算,喷嘴的具体尺寸见表 2,喷射器的其他部位尺寸见图 1.

表 2 喷嘴结构
Tab. 2 Nozzle structure

喷嘴号	Ma_o	d_t / mm	d_1 / mm	d_2 / mm
1	1.5	11.4	22.4	12.5
2	2.7	5.8	22.4	12.5
3	3.5	4.2	22.4	12.5
4	4.0	3.2	22.4	12.5

注: d_t , d_1 , d_2 分别为喷嘴喉口、入口、出口直径

当喷嘴出口截面处工作流体压力高于引射流体入口压力时,流体会沿引射流体的来路方向流动,形成逆流,使喷射器无法正常运行,因此,一定结构的喷射器可正常运行的膨胀比存在上限,即保证喷射器正常运行的最大膨胀比.本研究通过大量的模拟计算,得到了喷射器的最大膨胀比随喷嘴出口马赫数的变化关系,如图 2 所示.对这条曲线进行回归,得到喷嘴出口马赫数与喷射器可达到的最大膨胀比的关系式:

$$U = Ma_o^{4.091}, 1.5 < Ma_o < 4.35 \quad (4)$$

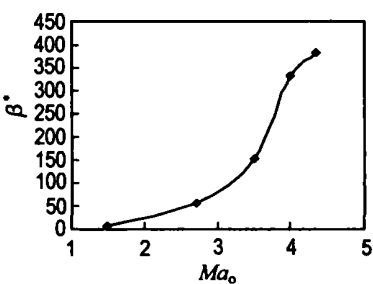


图 2 采用不同出口马赫数喷嘴的喷射器的最大膨胀比
Fig. 2 Maximum expansion ratio of the ejector with different nozzle outlet Mach number

从图中曲线的变化趋势可以看到,喷嘴出口马赫数越大,喷射器可正常运行的最大膨胀比就

越大. 由空气动力学可知, 流体流经高马赫数喷嘴时压降大, 这就可以保证在大膨胀比的条件下, 喷嘴出口压力值较低, 使喷嘴出口截面后引射流体与工作流体的压力差较大, 即引射流体进入吸收室的压力驱动力较大.

图 3 4 分别给出了相同膨胀比条件下, 采用不同出口马赫数喷嘴的喷射器的最大喷射系数及临界压缩比的值. 可以看到, 当膨胀比一定时, 喷嘴的出口马赫数越高, 喷射器的最大喷射系数越大, 而临界压缩比越低. 因此, 当膨胀比不可改变, 而喷射器工作时的出口压力足够低时, 应尽可能地选择大出口马赫数的喷嘴, 这样可以使喷射器的喷射系数有很大提高.

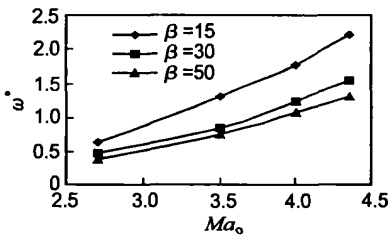


图 3 膨胀比一定时最大喷射系数与喷嘴出口马赫数的关系

Fig. 3 Maximum entrainment ratio with nozzle outlet Mach number under the same expansion ratio

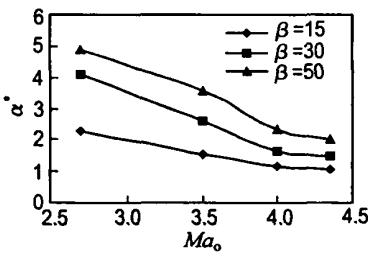


图 4 膨胀比一定时临界压缩比与喷嘴出口马赫数的关系

Fig. 4 Critical compression ratio with nozzle outlet Mach number under the same expansion ratio

由于采用不同喷嘴出口马赫数的喷射器所适用的工作参数范围不同, 并不能简单地通过采用高出口马赫数的喷嘴来提高喷射器的喷射系

数.

2.2 膨胀比与最大喷射系数和临界压缩比关系

图 5 6 分别给出了各喷射器在正常工作的膨胀比范围内, 膨胀比与最大喷射系数、膨胀比与临界压缩比的关系. 从图中可以看到, 尽管所采用的喷嘴的出口马赫数不同, 喷射器的工作范围不同, 但各喷射器的临界压缩比、最大喷射系数随膨胀比的变化趋势是一致的, 即临界压缩比随膨胀比的增大而增大, 对应的最大喷射系数随膨胀比的增大而降低. 因此, 对各喷射器均使用了三次线性回归, 回归公式的通用形式见式 (5), 各系数值见表 3. 当最大喷射系数大于 1 时, 最大喷射系数随膨胀比的变化趋势突然变陡, 与最大喷射系数小于 1 时不一致, 并且最大喷射系数大于 1 时, 临界压缩比非常低, 不是蒸汽喷射器的主要工作范围, 因此, 回归只对最大喷射系数小于 1 的范围进行, 回归公式的适用范围是最大喷射系数小于 1.

$$y = aU^3 + bU^2 + cU + d \quad (5)$$

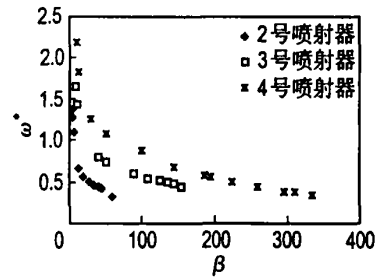


图 5 膨胀比与最大喷射系数的关系

Fig. 5 Relationship of expansion ratio and maximum entrainment ratio

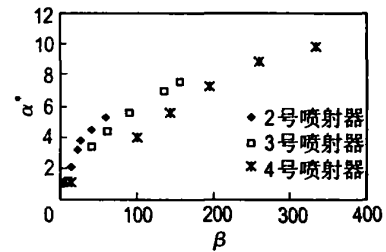


图 6 膨胀比与临界压缩比的关系

Fig. 6 Relationship of expansion ratio and critical compression ratio

表 3 系数值
Tab. 3 Coefficient values

喷射器	$y = T$				$y = k^*$			
	a	b	c	d	a	b	c	d
2号	9.615×10^{-6}	-2.070×10^{-3}	1.735×10^{-1}	2.439×10^{-1}	-6.862×10^{-6}	8.062×10^{-4}	-3.524×10^{-2}	9.912×10^{-1}
3号	1.089×10^{-6}	-4.477×10^{-4}	8.935×10^{-2}	3.477×10^{-1}	-1.080×10^{-8}	1.380×10^{-5}	-5.381×10^{-3}	9.839×10^{-1}
4号	-1.801×10^{-7}	5.251×10^{-5}	2.998×10^{-2}	6.785×10^{-1}	-3.208×10^{-8}	2.806×10^{-5}	-9.447×10^{-3}	1.56

3 结 论

(1) 在对喷射器性能研究的过程中,使用膨胀比和临界压缩比两个参数,可以使模拟所得出的结论不局限于具体的参数值,使其具有很好的通用性。

(2) 喷射器可正常运行的膨胀比是有上限的,喷嘴出口马赫数越大,喷射器可正常运行的最大膨胀比就越大,即喷射器的适用工作范围越广,喷射器最大膨胀比与喷嘴出口马赫数之间存在幂指数的关系。

(3) 当膨胀比一定时,采用的喷嘴的出口马赫数越高,喷射器的最大喷射系数越大,而临界压缩比越低。

(4) 对一定结构的喷射器,膨胀比与最大喷射系数及膨胀比与临界压缩比之间可按三次曲线的关系进行回归,得到该喷射器的性能曲线。

参考文献:

[1] CHEN Yau-ming, SUN Chung-yung. Experimental study of the performance characteristics of a steam-ejector refrigeration system [J]. **Experim Therm Fluid Sci**, 1997, **15**(4): 384-394

[2] OUZZANE M, AIDOUN Z. Model development and numerical procedure for detailed ejector analysis and design [J]. **Appl Therm Eng**, 2003, **23**(18): 2337-2351

[3] LI Hai-jun, SHEN Sheng-qiang. Analysis of flow field in an ejector with steam as working fluid, PV P-V ol. 491-2 [C]// **Computational Technologies for Fluid / Thermal / Structural / Chemical Systems with Industrial Applications**. New York American Society of Mechanical Engineers, 2004 227-234

[4] 李海军,沈胜强. 蒸汽喷射器流动参数与性能的数值分析 [J]. **热科学与技术**, 2005, **1**(4): 52-57

Analysis of ejector performance using dimensionless parameters

LI Hai jun^{* 1}, SHEN Sheng-qiang²

(1.Electr. and Mater. Eng. College, Dalian Maritime Univ., Dalian 116026, China;
2.Dept. of Power Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract From the ample computational results, the relationships among maximum entrainment ratio, expansion ratio and critical compression ratio were concluded. A power correlation between expansion ratio and Mach number at the nozzle outlet was found. Using two dimensionless parameters, namely expansion ratio and critical compression ratio to replace actual motive fluid pressure— suction pressure and critical discharging pressure to analyze the effect of the operation parameters on the ejector performance, can make the results more universal and useful in ejector designing and ejector efficiency.

Key words ejector; entrainment ratio; critical compression ratio; expansion ratio