

研究论文

不同制冷剂喷射制冷性能计算分析

王 菲, 沈胜强

(大连理工大学海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 引入制冷剂的实际物性, 建立了喷射器热力学模型; 比较了沸点相近工质在喷射器内的压力和速度变化趋势及喷射系数, 探讨了引起喷射器性能差异的主要物性因素; 比较了几组具有相近沸点制冷剂的喷射制冷性能。结果表明: 对沸点相近的工质来说, 一般工作蒸气的比焓值越高, 喷射系数越高; 沸点相近的工质对中, R717 的性能优于 R290, R152a 优于 R134a, R141b 优于 R123, R142b 优于 R600a; 在研究的所有制冷剂中, R717 的制冷性能最好, R152a 次之, 两者的 COP (性能系数) 值差随发生温度的升高而增大。

关键词: 喷射式制冷; 喷射系数; COP; 制冷剂

中图分类号: TK 511⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2010) 02-0275-06

Calculation and analysis for an ejector refrigeration system with various refrigerants

WANG Fei, SHEN Shengqiang

(Key Laboratory of Sea Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: A thermodynamic model of ejector was established by introducing refrigerant property. The change in pressure and temperature in the ejector and the entrainment ratio of ejector for several refrigerants with similar normal boiling point were compared, and the difference in injector performance was analyzed according to refrigerant properties. The refrigeration performances of several pairs of refrigerants with similar normal boiling points were also compared. The results indicate that higher specific enthalpy of driving vapor results in higher entrainment ratio of ejector. Among the refrigerants studied, R717 gives the best performance and R152a takes the second place, and their COP difference increases with generation temperature.

Key words: ejector refrigeration; entrainment ratio; COP; refrigerant

引 言

喷射式制冷系统利用低品位能源, 如太阳能、地热能、工业废热等作为驱动源, 提高了能源有效利用程度, 且系统简单、运动部件少、维护方便, 是一种值得发展的制冷方式。但这种系统的效率相

比其他系统来说偏低。喷射制冷系统的性能除受自身的运行工作参数及喷射器的几何结构影响外, 还受到制冷剂的较大影响。因此, 恰当选择制冷工质是改善喷射制冷系统效率的有效措施。该研究方向也成为近年来的研究热点。Sun^[1] 比较了包含氟里昂工质在内的 11 种工质的性能, 结果发现喷射制

2009-07-09 收到初稿, 2009-11-24 收到修改稿。

联系人及第一作者: 王菲 (1979-), 女, 博士。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50576007)。

Received date: 2009-07-09.

Corresponding author: WANG Fei, angelwangjj@yahoo.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50576007).

冷机以水为工质时的 COP 值非常低,以 R152a 为工质时可获得较好的性能;Dorantes 等^[2]在实验的基础上提出了预测纯工质和非共沸混合物喷射器性能的经验公式;Selvaraju 等^[3-4]比较了喷射制冷系统以 R134a、R152a、R290、R600a 和 R717 这几种制冷剂为工质时的临界性能。Holton^[5]的实验结果表明,当采用分子量较大的工质时,喷射器的性能较好;Invernizzi 等^[6]首次尝试根据制冷剂的临界温度和分子复杂度来对喷射制冷循环的工质进行热力学优化;郑爱平^[7]通过对喷射式制冷机的几种制冷工质的理论分析和热力计算,找到了各种工质的最佳应用温度范围,并筛选出了 R600a 是比较理想的制冷工质;王倩等^[8]对比了 R141b、R123 和 R11 的热力性质,并对 R141b 和 R123 进行了喷射制冷循环实验,理论分析和实验数据表明, R141b 是比较理想的喷射制冷工质。

根据制冷剂的物性表,具有相近标准沸点的制冷剂在相同工况下的发生器压力、冷凝压力和蒸发压力也较接近。例如 R11、R123 和 R141b 这 3 种工质有相近的沸点和物性,研究者们已开始选择后两者作为氟喷射制冷循环的替代物。本文引入制冷剂的实际物性,建立了喷射器的热力学性能模型,在环保型制冷剂中,探讨了沸点相近工质喷射系数存在差异的原因,比较了几组具有相近沸点工质的喷射制冷性能,最后比较了具有最优制冷性能的两组工质在不同工况下的性能。

1 喷射器及喷射制冷系统的理论模型

1.1 喷射制冷系统的性能系数

图 1 为喷射制冷系统的示意图,该系统的性能系数定义为系统制冷量与耗能量的比值

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{Q_g + W_p} = \omega \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

式中 Q 、 W 、 h 、 ω 分别代表热流量、功率、比焓和喷射器的喷射系数;下角标 e、g、p、2、4、5、6 分别代表蒸发器、发生器、泵和图 1 中所示的位置。

1.2 喷射器的热力学模型

图 2 为喷射器的结构示意图和其内部热力过程的 T - s 图。喷射器由喷嘴、引射室、混合室和扩压室 4 部分组成。为了深入研究制冷剂物性对喷射器性能的影响,本文引入制冷剂的实际物性,采用质量守恒、能量守恒和动量守恒对喷射器的各部分建

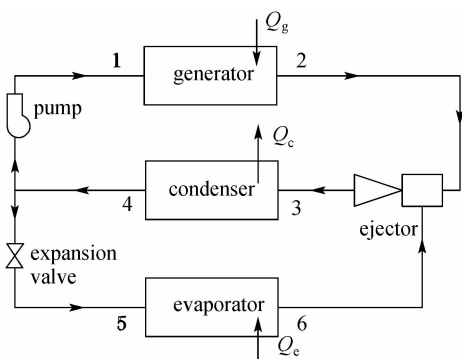


图 1 喷射制冷系统的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ejector refrigeration system

立了守恒性的控制方程组。为简化计算,作出如下假设:

- (1) 喷射器内为一维稳态流动;
- (2) 工作蒸气、引射蒸气均为饱和气体,且它们及出口混合流体的动能忽略不计;
- (3) 蒸气通过喷射器的时间很短,与外界的热交换可忽略不计,因此可认为喷射器绝热;
- (4) 将工作喷嘴、引射喷嘴及扩压室内的流体流动过程近似为等熵过程,不可逆因素由系数进行修正;
- (5) 工作蒸气和引射蒸气在混合室内等压混合;
- (6) 截面 2-2 为“假想喉部”的位置。

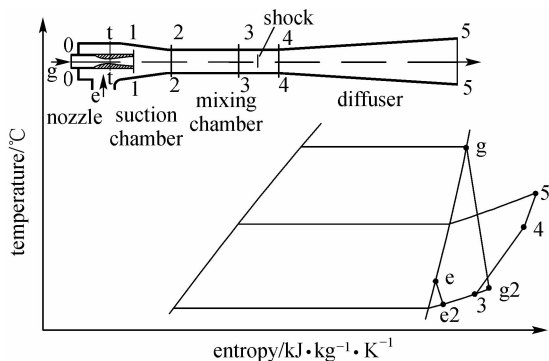


图 2 喷射器结构示意图及 T - s 图

Fig. 2 Ejector configuration and T - s diagram

1.2.1 工作蒸气及引射蒸气在喷嘴中的流动过程
根据假设,引射流体将于截面 2—2 处达到临界状态,引射流体在该处的压力和流速分别为

$$p_{e2} = p_e [2/(k+1)]^{k/(k-1)} \quad (2)$$

$$w_{e2} = \sqrt{2\eta_e(h_e - h_{e2s})} \quad (3)$$

根据物性表可知,已知某一状态点的压力、温度、焓值、熵值及密度中的任两个,即可确定其他的量,所以有

$$h_{e2s} = f(s_e, p_{e2}) \tag{4}$$

$$\omega_{g2} = \sqrt{2\eta_g(h_g - h_{g2s})} \tag{5}$$

$$h_{g2s} = f(s_g, p_{g2}) \tag{6}$$

$$p_{g2} = p_{e2} \tag{7}$$

式中 p 、 k 、 ω 、 η 、 s 分别为压力、绝热指数、速度、效率和比熵；下角标 e、2、s、g 分别为引射流体或在引射室内的流动过程、喷射器的“假象喉部位置”、等熵变化和工作流体或在喷嘴内的流动过程。

1.2.2 两股流体的混合过程 混合过程的动量守恒方程和能量守恒方程分别为

$$\phi_m(\omega_{g2}m_g + \omega_{e2}m_e) = (m_g + m_e)\omega_3 \tag{8}$$

$$(m_g + m_e)(h_3 + \omega_3^2/2) = m_g h_g + m_e h_e \tag{9}$$

式中 ϕ 、 m 分别代表动量修正系数和质量流量；下角标 m、3 分别代表混合过程和两股流体完全混合后的状态。

1.2.3 混合流体激波压缩过程 受背压的影响，混合后的流体如果速度超过音速，将在进入扩压室前产生激波，使压力突升。激波压缩是产生较大损失的过程。由于激波发生在一个薄层内，因此可认为激波前后的横截面积相等，并可忽略摩擦。激波前后的质量、动量和能量守恒控制方程分别为

$$\rho_3\omega_3 = \rho_4\omega_4 \tag{10}$$

$$\rho_3\omega_3^2 + p_3 = \rho_4\omega_4^2 + p_4 \tag{11}$$

$$h_3 + \omega_3^2/2 = h_4 + \omega_4^2/2 \tag{12}$$

式中 ρ 为密度；下角标 4 为混合流体发生激波后的状态。

1.2.4 混合流体在扩压室内的流动过程 混合流体通过在扩压室内的流动进一步将动能转化为压力能。描述这一过程的能量守恒控制方程为

$$(h_{5s} - h_4)/\eta_d = \omega_d^2/2 \tag{13}$$

式中 下角标 5、d 分别为混合流体流出扩压室后的状态和扩压室内的流动过程。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

为了验证理论模型，采用 R141b 为工质将理论计算得到的结果与实验数据^[9]进行了对比。对比结果如表 1 所示。从表中可看出，计算值与实验值的误差基本在±15%以内，因此该理论模型对工质 R141b 来说是有效的，可作为进一步对制冷剂计算和比较的依据。对不同的工质来说，喷射器内的损失占总量的比例较小，当对不同工质的喷射器性能

进行计算并比较时，对喷射器取相同的效率系数或修正系数对计算结果的影响不大。因此本文对不同的工质采用了与 R141b 相同的喷射器效率系数或修正系数。

表 1 喷射系数计算值与实验值的对比
Table 1 Comparison between theoretical and experimental entrainment ratios

T_e /℃	T_g /℃	T_c /℃	ω		ϵ_1 /%
			Theory	Experiment	
8	95	31.3	0.4531	0.4377	3.518
		33.6	0.3362	0.3457	−2.748
		84	0.5476	0.5387	1.652
		30.5	0.3981	0.4241	−6.131
12	95	33.1	0.5601	0.4989	12.267
		34.5	0.4759	0.4541	4.801
		84	0.7409	0.6350	16.677
		32.4	0.4893	0.4790	2.150

2.2 沸点相近工质的喷射器性能比较

喷射器的性能受工质的比焓、比熵、压力和比容等物性的共同影响。本文研究了沸点相近工质的喷射器性能并探讨了引起差异的主要物性参数。R290、R717、R134a、R152a 的基本性质如表 2 所示，其他物性参数的计算主要依据 REFPROP 软件。从表 2 可发现，工质 R290 和 R717 的沸点相近，工质 R134a 和 R152a 的沸点相近。

图 3、图 4 分别给出了 4 种工质在喷射器内的压力和速度变化趋势。对比两图发现，除了在混合室内两股流体的等压混合过程外，喷射器内的压力变化趋势与速度变化趋势正好相反，这在一定程度上反映了流体的压力能和动能互相转化的过程。从图 3 可看出，具有相近沸点的工质即 R290 和 R717、R134a 和 R152a 在混合室和扩压室内的压力相差不大，且这 4 种工质在扩压室入口前，均由于混合流体的速度大于音速而产生了激波压缩过程，使压力上升的速度下降。从图 4 可发现，R717 在喷射器内的速度比 R290 的大得多，R152a 的比 R134a 的大得多，例如在截面 2—2 处，R717 工作蒸气的速度为 R290 的 1.8 倍，R152a 工作蒸气的速度为 R134a 的 1.3 倍。这是由于工质的速度与其动能呈正比关系，而工质在喷射器内的动能主要是由工作蒸气通过喷嘴用焓值转化而来的，根据物性表可知，在温度为 95℃ 的条件下，R717 工作蒸气的比焓值比 R290 的高得多，R152a 的比焓值比 R134a 的高，因此，R717 和 R152a 在喷射器内的

表 2 制冷工质的基本性质
Table 2 Properties of refrigerants

Refrigerant	Normal boiling point/℃	Molecular weight	Critical temperature/℃	Critical pressure×10 ² /Pa	ODP	GWP
R290	−42.0	44.10	96.7	42.5	0	3
R717	−33.3	17.03	132.3	113.4	0	0
R134a	−26.5	102.03	101.1	40.6	0	420
R152a	−24.7	66.05	113.5	44.9	0	47
R600a	−11.8	58.20	135.0	36.5	0	0
R142b	−9.15	100.5	137.11	40.7	0	550
R123	27.8	152.92	185	36.1	0.02	85
R141b	32.1	116.95	208	43.4	0.11	440

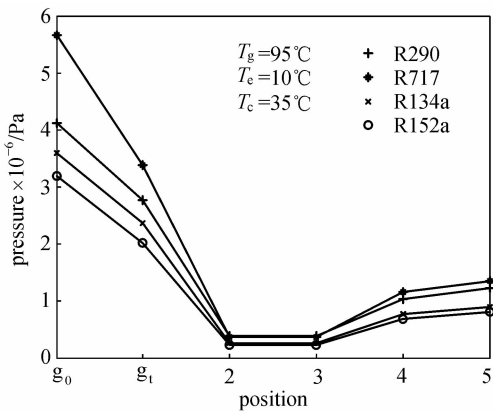


图 3 具有相近沸点工质的喷射器压力变化趋势
Fig. 3 Pressure change trend in ejector with similar normal boiling point refrigerants

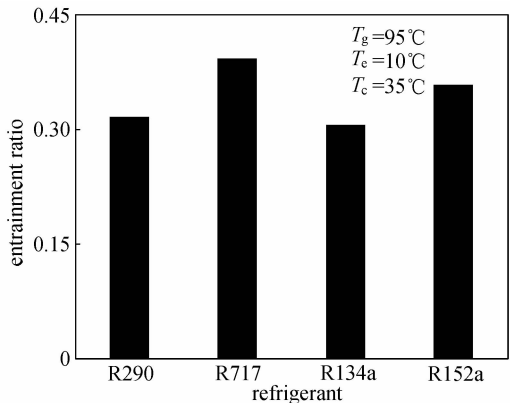


图 5 具有相近沸点工质的喷射系数比较
Fig. 5 Comparison of entrainment ratio of ejector with similar normal boiling point refrigerants

2.3 制冷剂的制冷性能比较

由于最终决定制冷剂优劣的标准是制冷系统的性能系数，图 6、图 7 分别给出了多种环保型工质的喷射系数和 COP 值的比较情况。工质性质见表 2，由表 2 可看出，R600a 和 R142b 的沸点、R123 和 R141b 的沸点较相近。从图 6、图 7 可看出，工质 R717 可获得最高的喷射系数和 COP 值，COP 值次之为 R152a、R290 和 R142b。对沸点相近的工质来说，R717 的喷射系数和 COP 值均大大优于 R290，前者 COP 值大于后者 33%；R152a 的喷射系数和 COP 值均优于 R134a，前者 COP 值大于后者 17%；R141b 和 R123、R142b 和 R600a 的喷射系数和 COP 值均相差不大，但 R141b 的 COP 值要优于 R123，R142b 的 COP 值要优于 R600a。

2.4 制冷工质在不同工况下的性能比较

图 8~图 10 以具有最优性能的 R717 和 R152a 作为研究工质，研究并比较了两者在不同工况下的性能。由图 8 可看出，随着发生温度的升高，两种工质的性能均升高，这是由于当发生温度升高后，工作蒸气通过喷嘴由焓值转化而来的动能增大了，

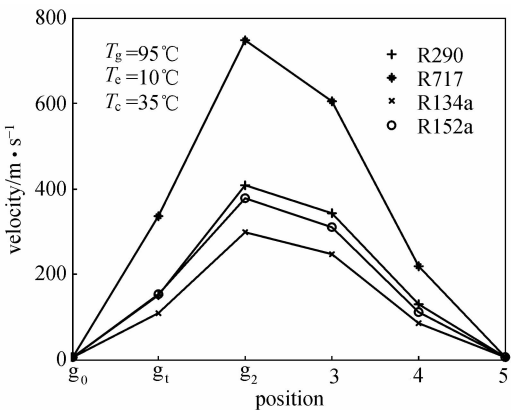


图 4 具有相近沸点工质的喷射器速度变化趋势
Fig. 4 Velocity change trend in ejector with similar normal boiling point refrigerants

动能和速度分别比 R290 的和 R134a 的高。由于工作蒸气转化来的动能正是对引射流体实现压缩的动力来源，其动能越大，所能引射的流体越多，因此反映在喷射系数上，如图 5 所示，R717 高于 R290 约 25%，R152a 高于 R134a 约 17%。

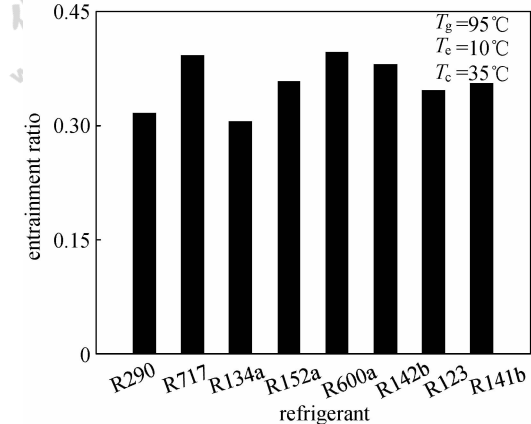


图 6 多种制冷剂的喷射系数比较

Fig. 6 Comparison of entrainment ratio of ejector with various refrigerants

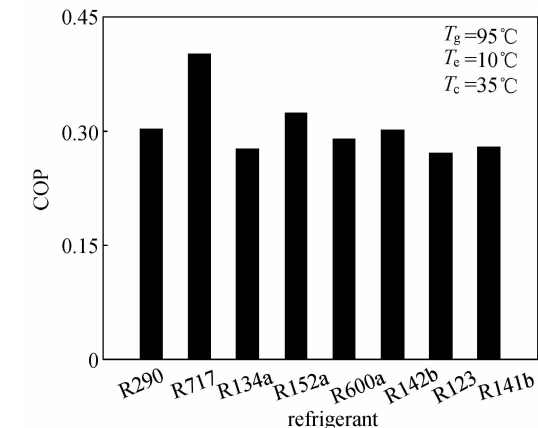


图 7 多种制冷剂的 COP 比较

Fig. 7 Comparison of COP of ejector refrigeration system with various refrigerants

可用于压缩更多的引射流体，因此喷射器的喷射系数提高了，随之系统的 COP 值也升高了。另外从图 8 还可发现，发生温度越高，R717 和 R152a 的 COP 差值越大，这是由两种工质特有的物性特点决定的。由图 9 可看出，随着冷凝温度的升高，两种工质性能系数的差异几乎没有变化，但性能均降低了。这是由于当冷凝温度升高后，喷射器的背压提高，工作蒸气压缩单位质量引射流体所需要的动能增加，因此喷射器的喷射系数下降，随之系统的 COP 降低。由图 10 可以看出，随着蒸发温度的升高，两种工质性能系数的差异几乎没有变化，但性能均升高。这是由于随着蒸发温度的升高，引射流体的压力升高，工作蒸气需将引射流体压缩至给定背压的压力差降低，因此单位工作蒸气能引射更多的蒸发蒸气，从而使制冷系统的性能系数升高。

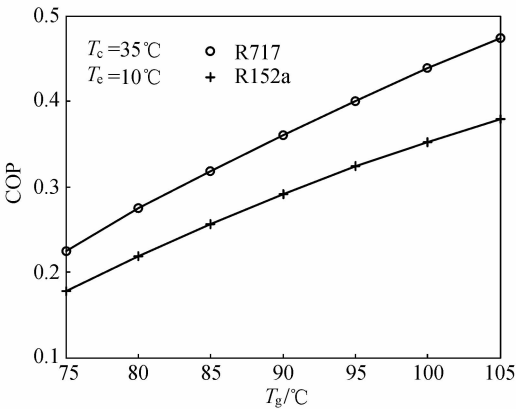


图 8 R717 和 R152a 在不同发生温度下的性能比较

Fig. 8 Refrigeration performance comparison of R717 and R152a under different generation temperature

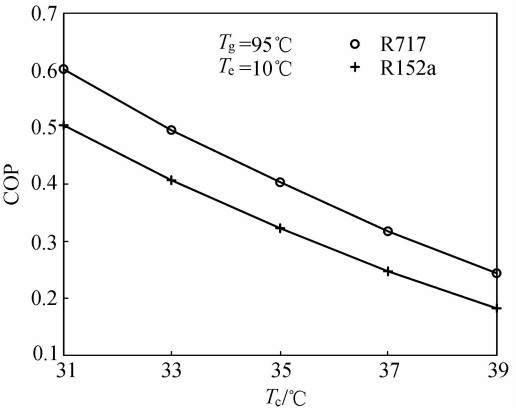


图 9 R717 和 R152a 在不同冷凝温度下的性能比较

Fig. 9 Refrigeration performance comparison of R717 and R152a under different condensation temperature

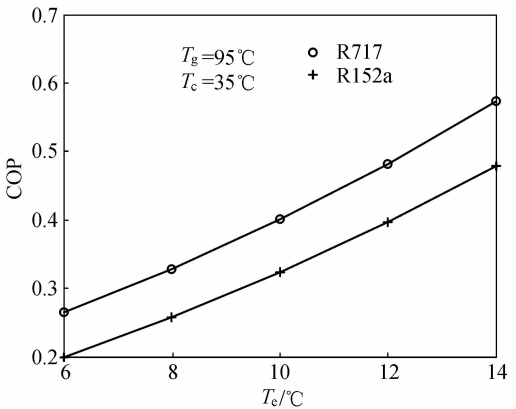


图 10 R717 和 R152a 在不同蒸发温度下的性能比较

Fig. 10 Refrigeration performance comparison of R717 and R152a under different evaporation temperature

3 结 论

本文主要研究并比较了沸点相近工质的喷射器

和喷射制冷性能, 比较了具有最优制冷性能的两工质在不同工况下的性能。主要得到如下结论。

(1) 对具有相近标准沸点的工质来说, 工作蒸气的比焓值越高的工质, 由于通过喷嘴转化的用于压缩引射流体的动能越大, 喷射系数越高。

(2) 在沸点相近的工质对中, R717 的制冷性能大大优于 R290, R152a 优于 R134a, R141b 优于 R123, R142b 优于 R600a。

(3) 本文研究的所有环保型制冷剂中, R717 的制冷性能最好, R152a 次之, 两者的 COP 差值随发生温度的升高而增大。

References

- [1] Sun D W. Comparative study of the performance of an ejector refrigeration cycle operating with various refrigerants. *Energy Conversion & Management*, 1998, **40**: 873-874
- [2] Dorantes R, Lallemand A. Prediction of performance of a jet cooling system operating with pure refrigerants or non-azeotropic mixtures. *International Journal of Refrigeration*, 1995, **18** (1): 21-30
- [3] Selvaraju A, Mani A. Analysis of an ejector with environment friendly refrigerants. *Applied Thermal Engineering*, 2004, **24**: 827-838
- [4] Selvaraju A, Mani A. Analysis of a vapour ejector refrigeration system with environment friendly refrigerants. *International Journal of Thermal Sciences*, 2004, **43**: 915-921
- [5] Holton W C. Effect of molecular weight of entrained fluid on the performance of steam-jet ejector. *ASME Transaction*, 1951, **10**: 905-910
- [6] Angelino Gianfranco, Invernizzi Costante. Thermodynamic optimization of ejector actuated refrigerating cycles. *International Journal of Refrigeration*, 2008, **3** (1): 453-463
- [7] Zheng Aiping (郑爱平). Potential energy driving jet refrigerant. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, **59** (S2): 246-250
- [8] Wang Qian (王倩), Zhao Wei (赵薇), Tian Qi (田琦), Zhang Yufeng (张于峰). Research on refrigerants in jet refrigeration system driven by Low grade thermal energy. *Refrigeration* (制冷), 2006, **25** (1): 35-39
- [9] Huang B J, Chang J M, Wang C P. A 1-D analysis of ejector performance. *International Journal of Refrigeration*, 1999, **22**: 354-364