

过冷度对喷嘴效率影响的测试研究

贺滔^{1,2}, 夏春礼¹, 丁利群¹, 李连生¹, 束鹏程¹

(1. 西安交通大学流体机械及压缩机国家工程研究中心, 710049, 西安; 2. 河南科技大学
车辆与动力工程学院, 471003, 河南洛阳)

摘要: 为研究流体过冷度对喷嘴工作性能的影响, 研制了两相流体混合速度的测试装置. 基于动量定理, 测定两相流体的质量流量和冲击力, 从而得到质量平均的流体混合速度. 利用 R410A 制冷系统实验台, 实验研究了制冷剂过冷度对喷嘴出口流体混合速度及喷嘴能量转化效率的影响. 实验表明: 随着入口制冷剂过冷度的提高, 喷嘴的通过质量流量逐渐增加; 同时, 制冷剂过冷度的提高使喷嘴出口流体混合速度及喷嘴转化效率明显下降; 在实验工况下, 喷嘴进口为饱和制冷剂时, 2[#] 喷嘴出口制冷剂混合速度达到了 94.1 m/s, 喷嘴转化效率为 64.1%; 当制冷剂过冷度由饱和状态增至 11 °C 时, 2[#] 喷嘴出口流体的混合速度降低 35.7%, 喷嘴转化效率降低 33.9%.

关键词: 制冷; 喷嘴; 速度; 效率

中图分类号: TK243.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)11-0018-04

Influence of Subcooling on Nozzle Efficiency

HE Tao^{1,2}, XIA Chunli¹, DING Liqun¹, LI Liansheng¹, SHU Pengcheng¹

(1. National Engineering Research Center of Fluid Machinery & Compressor, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Vehicle & Motive Power Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: A velocity-measurement equipment was developed to study the influence of fluid subcooling degree on the nozzle operation performance. The mass flow rate and the impact force were measured and the average mixing velocity of the two-phase fluid was obtained based on the momentum theorem. The influence of fluid subcooling degree on the average mixing velocity of the two-phase fluid at the outlet of LAVAL nozzles and the efficiencies of the nozzles was investigated on a refrigeration system with R410A. The experimental results show that the mass flow rate increased with the increase of the refrigerant subcooling degree at the inlet of the nozzles. However, the increase of upstream subcooling degree resulted in the significant decrease of the refrigerant mixing velocity and the nozzle efficiency. Under test conditions, the refrigerant mixing velocity at the outlet of the nozzle and the nozzle efficiency decreased by 35.7% and 33.9%, respectively, when the upstream subcooling degree increased from 0 °C to 11 °C for No. 2 nozzle.

Keywords: refrigeration; nozzle; velocity; efficiency

回收制冷系统的膨胀功, 降低循环中的节流损失, 可以有效地提高系统的性能系数(COP), 减少能源消耗. 采用两相喷射器或冲击式膨胀机来取代节流阀是可行的方法^[1-3]. 在上述两种膨胀功回收装置中, 喷嘴是核心部件, 起着能量转化的作用, 即在高

压制制冷剂流经喷嘴转化为低压制冷剂的过程中, 喷嘴将变化的这部分压力能转化为制冷剂的动能. 随后, 扩压器或叶轮再将这部分流体动能回收, 并作用于制冷循环中, 达到提高系统性能的目的. 因此, 压力能在喷嘴中的转化效率对膨胀功回收装置的性能

有重要的影响.

制冷系统的喷嘴内部涉及到制冷剂的相变蒸发,其流动是一个复杂的过程,包括制冷剂的降压蒸发,单相液体变化到气、液两相,流体内的热力不平衡及相间滑移等. 现有的喷嘴两相流理论及实验研究多集中于水和蒸汽的临界流动,其适用范围是有限的^[4-7]. 对于单组分两相流动,不同的入口条件对结果影响很大,流动表现出不同的热力过程. 同时,喷嘴流道的几何形状也对流动过程产生影响. 本文根据动量定理,研制了两相流体混合速度测试装置. 通过实验测试,研究了喷嘴入口制冷剂的过冷度变化及喷嘴的扩张角对出口混合速度及喷嘴能量转化效率的影响,以确定两相流动喷嘴的设计参数,验证理论分析中的计算结果.

1 实验系统

1.1 实验原理

喷嘴出口混合流速的测试原理如图 1 所示. 当两相流体冲击至具有圆锥面结构形式的测力探头时,在探头曲面的引导下,速度方向发生 90°改变,并对探头产生如图 1 所示的推力 F .

设两相流体中液相组分和气相组分的速度分别为 $V_{1,l}$ 、 $V_{1,g}$. 由连续性方程和动量守恒方程可得流体的质量平均混合速度 V_1

连续性方程

$$m = m_l + m_g \tag{1}$$

动量守恒方程

$$mV_1 = (m_lV_{1,l} + m_gV_{1,g}) \tag{2}$$

式中: m 为混合流体的质量,kg; m_l 为液相组分的质量,kg; m_g 为气相组分的质量,kg.

由动量定理可知,测力探头所受的冲击力

$$F\Delta t = -m(V_2 - V_1) \tag{3}$$

则有

$$F_x = -\dot{m}(V_{2x} - V_{1x}) = \dot{m}V_{1x} \tag{4}$$

$$F_y = -\dot{m}(V_{2y} - V_{1y}) = 0 \tag{5}$$

式中: Δt 为力的作用时间,s; $\dot{m}$ 为流体的质量流量,kg · s⁻¹.

测定流体质量流量 $\dot{m}$ 和冲击力 F ,即可由式(4)及式(5)得到流体的质量平均混合速度 V_1 .

1.2 实验装置

1.2.1 喷嘴 测试的喷嘴采用缩放形结构,分为渐缩段、喉部过渡段和扩张段三个部分,如图 2 所示.

实验中采用了具有相同渐缩角 α 和不同扩张角

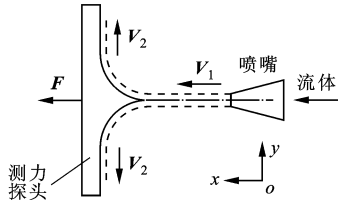


图 1 测试原理图

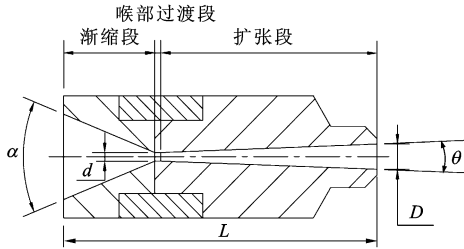


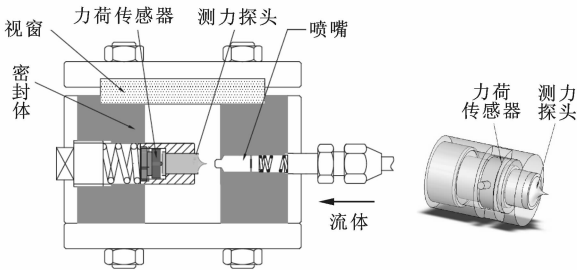
图 2 喷嘴结构示意图

θ 的两只喷嘴进行测试,其喷嘴结构参数见表 1.

表 1 喷嘴结构参数

编号	$\alpha/(^{\circ})$	$\theta/(^{\circ})$	L/mm	d/mm	D/mm
1#	30	2.5	38.5	0.8	2.1
2#	30	5.0	23.5	0.8	2.1

1.2.2 测速装置 测速装置由喷嘴、探头组件、密封体和观察视窗等组成(见图 3a). 探头组件与制冷剂喷嘴同轴布置,并同处于由密封体构成的密闭腔内. 密闭腔单侧装有石英视窗,可对制冷剂流动过程进行观察. 由测力装置入口进入的液相制冷剂流体在喷嘴中降压闪发,其压力能转化为流体速度能. 离开喷嘴的流体冲击至喷嘴测力探头上,在探头圆锥曲面的作用下其速度方向发生改变,并对测力探头产生冲击力. 随后,制冷剂流体经由导流管流出密闭腔. 探头组件的结构见图 3b. 测力探头采用圆锥曲面结构形式,表面抛光处理. 探头安装于组件滑槽内,滑槽间隙及润滑可使测力探头沿滑槽轴向滑动. 探头组件中部装有力荷传感器,并通过调整机构固定于探头背部,可将探头受力转变为电压信号输出,



(a)测力装置示意图 (b)探头组件图

图 3 测速装置图

并由相应的指示器收集处理。

1.2.3 力荷传感器 实验中采用日本 TEAC 公司制造的 STC-USR50806 型 HCFCs/HFCs 专用压力式力荷传感器。此类型传感器结构紧凑,适于测定微小受力。传感器性能参数如表 2 所示。

表 2 力荷传感器性能参数

额定量程/N	10
允许最大负荷/N	15
额定输出/mV · V ⁻¹	1.0
非线性误差/%	0.5
温度补偿范围/℃	-10~60
环境压力/MPa	3.0
材质	不锈钢

2 实验研究

2.1 实验流程

图 4 为实验系统流程图。系统包括冷凝器、蒸发器、压缩机、节流阀、测速装置等主要部件。为测试不同工况下喷嘴的工作性能,在冷凝器出口设置了制冷剂过冷水箱。冷凝器采用自来水直接冷却,热负荷大小通过冷却水量进行调整。

对喷嘴出口的流速进行测定时,节流阀关闭。冷凝器排出的液相制冷剂经过冷水箱,并在过滤器中滤掉携带的杂质颗粒后进入测速装置。随之,制冷剂流体通过喷嘴将其压力能转化为流体速度能。流体冲击至测力探头上并对探头产生冲击力。之后,制冷剂流体由导流管流入蒸发器、压缩机等,完成制冷循环。在此过程中,喷嘴充当了系统的节流阀,起着保持压差、控制制冷剂循环流量的作用。

在冷凝器、蒸发器、节流阀进出口分别装有温度、压力等测试仪表。制冷剂循环流量由容积式流量计测定。液相流量计(FT08)装在过滤器后、测速装置前。通过测定该点的温度、压力及容积流量,可获得该工况下的液体质量流量。测速装置的输出信号由 TD-250T 指示器分析处理。全部仪表信号由数据采集卡(GB68-LP)收集,并送至计算机处理和存储。

2.2 实验方法

本实验主要研究其不同结构的喷嘴在进口流体过冷度变化的情况下,出口流速的变化规律。实验以 R410A 为工质,在保持蒸发压力(0.8 MPa)和喷嘴进口压力(2.8 MPa)不变的情况下,逐渐改变喷嘴进口流体过冷度,并测定流体流量、冲击力等数值。工况调整过程中的各项参数在系统稳定后由数据采集系统分时录入,制冷剂物性参数由 REFPROP 6.0 计算得到。

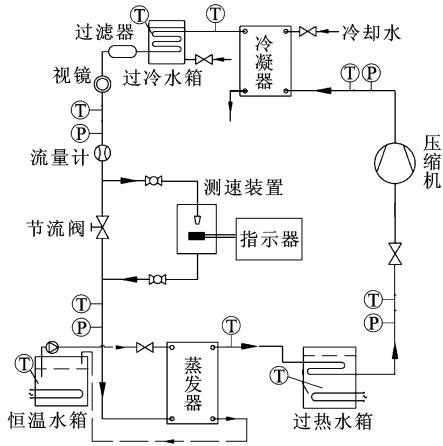


图 4 测试流程图

3 实验结果及分析

图 5 所示为制冷剂质量流量 m 随过冷度 ΔT (进口流体压力对应的饱和温度与流体实际温度的差)的变化情况。随着喷嘴进口流体过冷度的增加,在喷嘴进出口压力保持不变的情况下,通过喷嘴的流体质量流量逐渐增加。对于固定结构的喷嘴,进口流体过冷度的增加导致流体在喷嘴内部的闪发压差增加,闪发蒸气减少,进口流量增加。对 1[#] 喷嘴来说,当喷嘴进口为饱和液态制冷剂时,其通过的质量流量为 0.012 5 kg/s。随着进口流体过冷度的提高,其通过的质量流量逐渐增加,当过冷度达到 10.3 ℃ 时,通过的质量流量达到 0.017 8 kg/s,增加了 42.7%。2[#] 喷嘴也呈现类似的增长趋势,当过冷度达到 11.0 ℃ 时,流过喷嘴的制冷剂质量流量相对于饱和液态时增加了 23.6%。

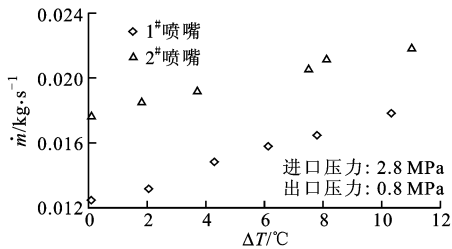


图 5 质量流量 m 随过冷度的变化

如图 6 所示,在相同的进出口压力下,随着喷嘴进口流体过冷度的增加,喷嘴出口处流体混合速度 V_1 显著下降。当 1[#]、2[#] 喷嘴进口为饱和液态制冷剂时,其出口流体混合速度分别达到了 82.8 m/s 和 94.1 m/s,1[#] 喷嘴流体出口速度为 2[#] 喷嘴速度的 88.0%。随着进口流体过冷度的提高,流体在喷嘴出口的混合速度迅速下降。当过冷度达到 10.3 ℃ 时,

1[#]喷嘴出口流速降为 56.1 m/s,降低 32.2%。当 2[#]喷嘴进口流体的过冷度达到 11.0 °C 时,其出口混合速度降为 60.5 m/s,降低 35.7%。流体过冷度的变化影响制冷剂的闪发蒸气量及相间不平衡度,因而对喷嘴出口流体的混合速度有较强烈的影响。另一方面,对实验中的两只喷嘴而言,较长的流通距离使 1[#]喷嘴中流体的相间不平衡度减小,在相同进口过冷度的条件下,其速度下降的程度比 2[#]喷嘴小。

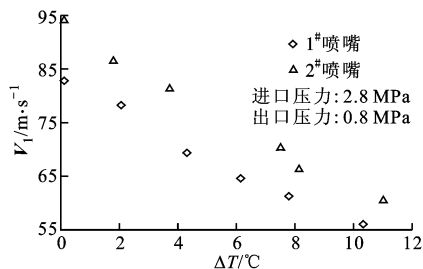


图 6 喷嘴出口流体混合速度随过冷度的变化

图 7 所示为喷嘴等熵转化效率 η_n (喷嘴流体出口动能与等熵焓降之比) 随过冷度变化趋势图。实验中所测试的 1[#]、2[#] 喷嘴,在进口为饱和液态制冷剂,进、出口压力为 2.8 MPa 和 0.8 MPa 的情况下,其喷嘴效率分别为 46.9% 和 64.1%,具有 5° 扩张角的 2[#] 喷嘴有相对较高的转化效率。由图 7 可见,过冷度的增加导致了喷嘴出口处流体速度的下降,喷嘴效率也呈下降趋势。当过冷度达到 10.3 °C 时,1[#] 喷嘴等熵效率降为 33.4%,而 2[#] 喷嘴在过冷度为 11.0 °C 时其效率仅为 42.4%。流体过冷度的增加使闪蒸的蒸气量减少,气、液相间不平衡度加大,喷嘴的转化效率相应降低,但由于 1[#] 喷嘴的扩张角较小,流通距离较长,喷嘴出口处不平衡度有所改善,相对于 2[#] 喷嘴其效率下降的趋势较为缓和。

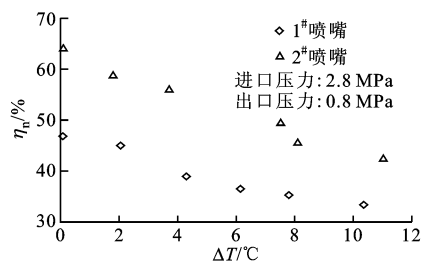


图 7 喷嘴等熵效率随过冷度的变化

4 结 论

本文研制了两相流体混合速度的测试装置。利用 R410A 制冷系统实验台,测定了喷嘴出口制冷剂的混合速度,研究了制冷剂过冷度对流体混合速度及喷嘴转化效率的影响。

对于实验中的两只缩放喷嘴,随着进口制冷剂过冷度的提高,喷嘴流通质量流量逐渐增加,具有长流通距离的 1[#] 喷嘴质量流量增加比例较高。过冷度对喷嘴出口制冷剂混合速度及喷嘴转化效率则呈负相关。制冷剂过冷度的提高使两只喷嘴出口流体混合速度明显下降,但 1[#] 喷嘴出口流速的下降较为缓和。喷嘴等熵转化效率也呈现近似的变化趋势。相比较而言,具有 5° 扩张角的 2[#] 喷嘴在实验中有较高的能量转化效率,在进口为饱和液态制冷剂,进、出口压力为 2.8 MPa 和 0.8 MPa 的情况下,其喷嘴转化效率达到了 64.1%。

参考文献:

- [1] WONGWISES S, DISAWAS S. Experimental study on R-134a refrigeration system using a two-phase ejector as an expansion device [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5/6): 467-477.
- [2] HAYS L G, BRASZ J J. Two-phase flow turbines as stand-alone throttle replacement units in large 2000-5000 ton centrifugal chiller installations [C/CD] // Proceedings of the 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue: II. West Lafayette, IN, USA: Purdue University. School of Mechanical Engineering, 1998: 797-802.
- [3] HE Tao, LI Liansheng, XIA Chunli, et al. Application of Pelton-type expander to replace throttling valve in refrigeration system [C/CD] // Proceedings of the 22nd International Congress of Refrigeration. Beijing, China: International Institute of Refrigeration, 2007: ICR07-E2-958.
- [4] JURSKI K, GEHIN E, DEGERATU M, et al. Experimental study of a two-component critical flow in a converging-diverging nozzle [J]. Journal of Aerosol Science, 1996, 27(1): 419-420.
- [5] LEAR W E, SHERIF S A, LANGFORD J R. Efficiency and gasdynamic analysis of two phase mixtures in supersonic nozzles with inter-phase heat transfer and slip [J]. Acta Astronautica, 1997, 40 (10): 701-706.
- [6] FRASER D W H, ABDELMESSIH A H. A study of the effects of the location of flashing inception on maximum and minimum critical two-phase flow rates. Part II: Analysis and modelling [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 213(1): 11-30.
- [7] 陈听宽. 两相流与传热研究[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2004.

(编辑 王焕雪)