

温度对飞机燃油射流泵工作特性影响

邵 垒¹, 刘卫华¹, 潘 俊², 刘文怡², 冯诗愚¹

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 金城南京机电液压工程研究中心
航空机电系统综合航空科技重点实验室, 南京 211106)

摘 要: 建立了射流泵数学模型,采用数值计算方法对其工作特性进行了模拟,搭建了实验台,采用RP-3燃油,通过实验数据验证了模型的正确性.在此基础上,分别选择了RP-3和JET-A两种燃油,计算了从 -40°C ~ 40°C 温度下,不同操作压力对射流泵流量比的影响.结果表明:燃油温度高于 0°C 时,温度对射流泵工作特性影响并不明显,随着温度的降低,射流泵性能与标准温度下(20°C)偏差越来越大,且压比越高此偏差越明显.当温度高于 0°C 时,采用RP-3和JET-A燃油性能相差不大,RP-3燃油性能略优于JET-A燃油,但是在低温下,RP-3燃油性能远高于JET-A燃油.因此当燃油温度较低且压比较高时,必须充分考虑温度对射流泵特性的影响.

关 键 词: 射流泵; RP-3 燃油; 流场计算; JET-A 燃油; 工作特性

中图分类号: V228

文献标志码: A

Effect on working characteristic of fuel injection pump in aircrafts of temperature

SHAO Lei¹, LIU Wei-hua¹, PAN Jun², LIU Wen-yi², FENG Shi-yu¹

(1. College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Jincheng, Aviation Industry Corporation of China, Nanjing 211106, China)

Abstract: A mathematical model of the injection pump was set up and its working characteristic was simulated using numerical computation method, the experiment apparatus was constructed and RP-3 fuel was adopted as the working fluid to verify the validity of this model. The flow ratio under various operating pressures was calculated from -40°C to 40°C degree by employing RP-3 fuel and JET-A fuel as working fluids, respectively. Result shows that if the fuel's temperature is above 0°C degree, the effect of the fuel temperature on the working characteristic of injection pumps can be ignored. However, with the decrease of the temperature, the deviation of the performance with that at standard temperature (20°C) increases definitely, especially the pressure ratio is high. When the temperature is above 0°C degree, the performance of injection pump using RP-3 fuel is slightly better than that using JET-A fuel, but if the temperature is extremely low, the performance using RP-3 fuel is much better than that using JET-A fuel. It can be concluded that when the temperature is

收稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(50906066); 航空科学基金(20122852038, 20132852040); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 邵垒(1989—),男,重庆奉节人,博士生,主要研究方向为飞行器燃油系统和人机环境工程.

通讯作者: 冯诗愚(1974—),男,浙江绍兴人,副教授,博士,主要研究方向为飞行器燃油系统和人机环境工程.

E-mail: shiyuf@nuaa.edu.cn

low and the pressure ratio is high, the effect caused by the temperature on the performance of injection pump should be considered carefully.

Key words: injection pump; RP-3 fuel; flow field computation; JET-A fuel; working characteristic

燃油射流泵具有结构简单、可靠性高、没有运动部件等特点,在飞机燃油系统中获得了广泛应用.但是射流泵工作时,多股流体相互混合,且流体与壁面之间也存在剧烈摩擦扰动,因此精确地预测其工作性能十分困难.

国内外学者已开展了大量的实验与理论研究工作,并取得了丰硕的研究成果.

近年实验研究中,Nanda等^[1]对放置角度和深度进行了研究,认为在垂直放置和深度越小时效率越大;Yamazaki等^[2]进行了表面粗糙度对泵性能影响的研究,得出:在喉管入口处的摩擦因数对效率影响最显著;Kandulal等^[3]探讨了多喷嘴射流泵性能,其认为:面积比为0.43,孔数为2时效率最高;Shah等^[4-5]对两相流射流泵开展了实验研究;ZHU Yinhai等^[6]通过纹影技术测量了喷嘴出口处激波长度,建立了预测激波长度的理论模型,其认为:给定压力下,流量比随着激波长度的减小而增加.在理论研究中,Filin等^[7]建立了射流泵在不同温度下的数学模型;Beithou等^[8]建立了蒸汽射流泵的数学模型,并通过实验验证了模型的准确性.此外大量学者在基于实验与理论的基础上,采用数值模拟的方法进行了研究,Gazzar等^[9]应用CFX-TASC模拟了环形射流泵内部流动和性能;Winoto等^[10]对面积比、喷嘴形状与大小对射流泵效率的影响进行了讨论,其结论是:喷嘴形状为圆形,面积比在0.3左右效率最高;Mallela等^[11]研究获得,当喉管长度比为7~9、面积比为0.28、喷嘴距比为1.54~2.02时,射流泵效率最高;Fan等^[12]借助于CFD数值计算方法,通过调整射流泵几何结构参数,提高了其效率;Ji等^[13]对0°,0.5°,1.0°,2°,3.5°和4.5°收缩段角度进行了数值研究,认为收缩角为1.0°时性能最优;龙新平等^[14-15]对射流泵最佳喉嘴距和喉管长度进行了数值模拟;周凌九等^[16]对射流泵液固两相流三维大涡进行了模拟,等等.以上研究成果表明结合实验的数值模拟已经成为研究射流泵的有效手段.

然而,上述研究工作主要集中在水力机械方面,其工作介质、工作条件一般为常温状态下的水.在飞机的燃油系统中,射流泵的工作介质则为

不同牌号的航空燃油,且在实际的飞行过程中,航空燃油温度将产生较大的改变.如图1所示,水和燃油在不同温度下,其密度和运动黏度有很大差异^[17-18],即使对于不同的航空燃油,相互之间的差异也很大,特别随着温度降低,图1所示的RP3和JET-A燃油的运动黏度差异也逐渐增加.对于射流泵而言,介质的物理性能变化,特别是运动黏度的不同将造成引射泵性能及其变化规律的改变,但目前国内外均缺乏相关研究.

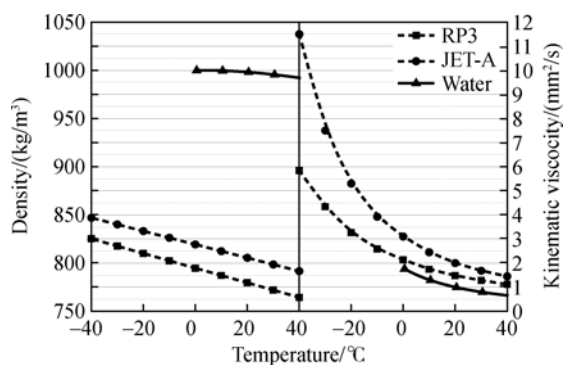


图1 燃油与水密度及运动黏度差异比较

Fig. 1 Comparison of density and kinematic viscosity under fuel and water

事实上,正是由于飞机活动区域大、范围广,需要经常采用不同牌号的燃油和工作于不同温度区间;因此,在适航认证中,对不同介质、不同温度下的燃油射流泵性能也提出了明确的要求.也就是说,研究燃油牌号、温度对射流泵性能的影响有其现实意义.

本文基于C919某型燃油射流泵结构参数,首先采用数值计算方法,建立了射流泵数学模型,并通过实验方法,采用RP-3号燃油,验证了模型的正确性.然后选择了RP-3和JET-A燃油,详细探讨了不同操作工况(如压比)下,射流泵工作特性随温度的变化关系.

1 射流泵数值计算模型

1.1 简化物理模型

忽略外部结构与壁面厚度,对射流泵进行简化,如图2所示,其结构尺寸见表1.

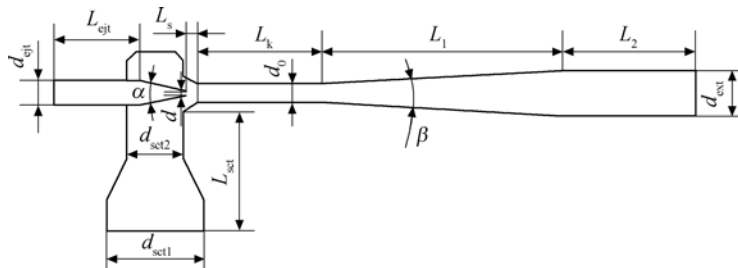


图2 射流泵简化物理模型图

Fig. 2 Simplified physical model of injection pump

表1 射流泵的结构尺寸

Table 1 Structural dimension of injection pump

部件	结构尺寸
压力管路	$L_{ejt} = 36.15 \text{ mm}$, $d_{ejt} = 10.68 \text{ mm}$
喷嘴	$d = 2 \text{ mm}$, $\alpha = 24.76^\circ$
喉嘴距	$L_s = 4.85 \text{ mm}$
垂直吸入室	$L_{sct} = 46.11 \text{ mm}$, $d_{sc1} = 41.25 \text{ mm}$, $d_{sc2} = 24 \text{ mm}$
喉管	$L_k = 50.2 \text{ mm}$, $d_0 = 8 \text{ mm}$
扩散管	$L_1 = 105.4 \text{ mm}$, $d_{ext} = 19 \text{ mm}$, $\beta = 6^\circ$

1.2 数学建模

射流泵内部流动为定常不可压流动,控制方程采用 standard $k-\epsilon$ 两方程湍流模型封闭的雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方程。

耦合解法联立求解连续方程和动量方程,计算量较大,但经实践证明,其求解精度高,同时,可利用可耦合解法(coupled)来解决速度和压力耦合问题。

计算中,固体壁面为无速度滑移和无质量渗透,采用标准壁面函数处理;离散格式采用了2阶逆风格式,残差低于 10^{-5} ;且以进出口流量相对误差低于 0.1% 作为收敛标准。

1.3 网格划分

射流泵流动属于高雷诺数的强剪切湍流流动,内部流动复杂,必须结合高质量网格进行分析。

本文采用三维结构化网格生成技术,根据速度梯度和压力梯度调节网格分布,在工作流体入口、被引入流体入口及流体出口处进行局部网格加密;在喷嘴出口至喉管前部的流体混合段,由于工作流体和被吸入流体开始进行动量剪切和能量交换,存在较大的紊流剪切力,也需要进行加密。本文生成的网格如图3所示,其数目为64万。

1.4 特性参数

射流泵流量比 q 和压比 h 定义如下:

$$q = \frac{Q_s}{Q_o} \quad (1)$$

$$h = \frac{p_c - p_s}{p_o - p_s} \quad (2)$$

式中 Q_s , Q_o 为被引入与工作流体的流量; p_c , p_s 和 p_o 为流体出口、被引入和工作流体总压。



图3 网格划分图

Fig. 3 Mesh generation

射流泵特性曲线反映了压比 h 与流量比 q 之间的关系,在任一压比 h 下,依据相应的边界条件求解速度场和压力场,可获得对应的流量比 q 。依据压比与流量比对应关系,即可获得该射流泵特性曲线。

在实际工作中,由于工作流体与被引流体入口均为压力入口,因此计算中将流体出口亦设置为压力出口。

2 模型验证

2.1 实验系统

实验验证系统如图4所示,该系统由供油泵、储油箱、燃油射流泵、调节阀、计算机、电磁流量计(IFS4000,0.5级精度)与压力传感器(CY3018, -0.1~2.5 MPa 量程、0.3级精度)组成。其中燃油射流泵结构尺寸与表1参数完全一致。

供油泵从储油池中将燃油以恒定的流量抽出,调节阀 F1 与电磁流量计 L1 调节工作流体流量,并经供油泵增压后供给射流泵;调节阀 F2 与压力传感器 Y1 调节工作流体的压力;出口压力通过调节阀 F3 与压力传感器 Y3 调节为指定值。

记录流量与压力,将其作为一个工况点,然后保持工作流体的流量与压力,通过改变出口压力的大小来获取下一个工况点。

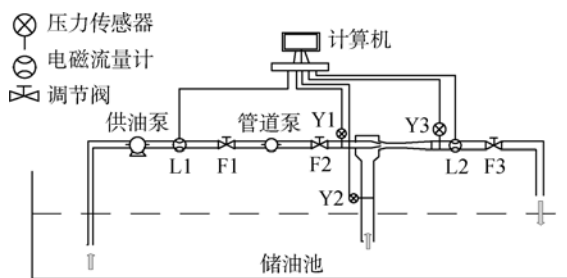


图4 实验系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental apparatus

计算机可对每次实验的工作流体流量、被引入流体流量、出口流量、工作流体压力、被引入流体压力与出口处压力进行自动测量和记录。

在进行数据读取时,先保持系统稳定运行2~3 min,待其读数基本稳定后,才记录结果。

2.2 模型验证

表2为实验工况及结果,实验中燃油牌号为RP-3,温度 $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表2 实验工况及结果

Table 2 Experimental conditions and results

p_o/kPa	p_c/kPa	$Q_o/(\text{kg/h})$	$Q_s/(\text{kg/h})$	$h/10^{-2}$	q
132.41	9.92	323.30	139.8	7.5	2.313
132.11	11.04	230.64	139.2	8.4	1.657
132.61	12.18	135.56	138.6	9.2	0.978
132.01	12.75	81.70	138.6	9.7	0.589

按表2所示工况进行计算,预测与实验流量比的比较结果如图5所示。从图中可见,计算流量比 q_c 与实验流量比 q_e 十分接近,其最大误差为

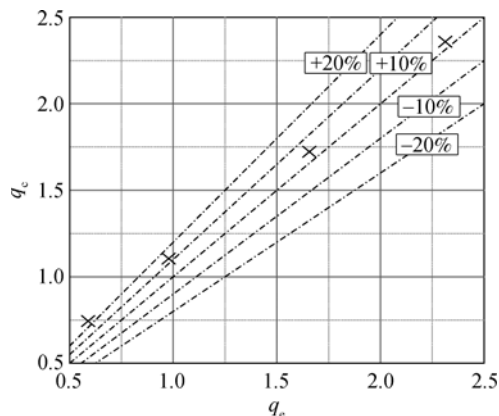


图5 计算与实验流量比的比较

Fig. 5 Comparison of computation and experiment flow ratio

20%,而且误差随着压比减少而降低,这表明计算模型具有足够的精度,可用于后续分析。

3 温度对喷射器性能影响分析

分别以RP-3与JET-A为工作介质,压比取为 4.77×10^{-2} , 5.51×10^{-2} , 6.87×10^{-2} , 7.79×10^{-2} 和 9.60×10^{-2} ,其部分计算结果如表3所示。

图6以压比为0.0687,温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,研究RP-3与JET-A燃油射流泵内部压力场和速度场。由压力场可以看出,RP-3型射流泵真空度较大,因此会吸入更多流体,由表3中计算数据也可看出RP-3被引入流量为0.09632 kg/s,而JET-A被引入流量为0.07414 kg/s。由速度场看出,最大速度位于喷嘴出口处,RP-3与JET-A最大速度为17.5 m/s和17.2 m/s,这与压力场相对应。

图7根据计算结果总结了不同压比、介质下温度比流量比的影响。从图中可以看出,在相同压比情况下,温度越高,流量比越大,这是由于温度上升燃油黏度下降,流体之间内摩擦减小所造成。在所有的压比下,采用RP-3燃油射流泵性能均优于JET-A燃油,当燃油温度较高时,此差异不大,但是随着温度降低,其差异越来越大。

通常在设计射流泵时,并不考虑燃油温度对性能的影响,且燃油温度大多选取为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此图8中以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的流量 $Q_{t=20\text{ }^{\circ}\text{C}}$ 为标准,列举出其他温度下的性能的相对偏差 RD (relative deviation,量符号记为 D_r),可用如下表达:

$$D_r = \frac{Q_t(h) - Q_{t=20\text{ }^{\circ}\text{C}}(h)}{Q_{t=20\text{ }^{\circ}\text{C}}(h)} \quad (3)$$

从图8中可见,当燃油温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,RP-3和JET-A燃油射流泵与标准温度下的偏差均在 $-10\% \sim 10\%$ 之内。当燃油温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着温度降低,其性能下降越来越明显,温度下降为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,压比为 9.60×10^{-2} 时,RP-3燃油射流泵的性能偏差达到 -15% ,而JET-A燃油射流泵性能偏差接近 -30% ,当温度下降为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,RP-3燃油射流泵的性能偏差达到 -40% ,而JET-A燃油射流泵性能偏差超过 -80% 。当压比降低时,偏差会有所减少,但是即使压比为 4.77×10^{-2} ,RP-3和JET-A燃油的偏差仍达到约 -15% 和 -35% 。

结合图1可知,其原因在于当温度下降后,燃油密度增加,工作流体通过喷嘴后的流速降低,驱动能力下降,特别是温度降低后黏度急剧上升,流体混合时损失及吸入过程中流动阻力大大增加。而高压比下,这些损失的影响要大于低压比时。

表 3 部分计算结果
Table 3 Part of computation results

燃油	温度/℃	工作 压力/Pa	出口 压力/Pa	h	工作流量/ (kg/s)	被引入 流量/(kg/s)	q
RP-3	−20	132 379.3	6 314.49	0.0477	0.04128	0.15600	3.7791
JET-A	−20	132 379.3	6 314.49	0.0477	0.04171	0.14346	3.4391
RP-3	30	132 379.3	6 314.49	0.0477	0.04025	0.16310	4.0523
JET-A	30	132 379.3	6 314.49	0.0477	0.04098	0.16354	3.9908
RP-3	−40	132 379.3	7 294.10	0.0551	0.04137	0.12132	2.9328
JET-A	−40	132 379.3	7 294.10	0.0551	0.04050	0.08603	2.1241
RP-3	10	132 379.3	7 294.10	0.0551	0.04064	0.14424	3.5489
JET-A	10	132 379.3	7 294.10	0.0551	0.04131	0.14273	3.4555
RP-3	−30	132 379.3	9 094.46	0.0687	0.04117	0.09632	2.3393
JET-A	−30	132 379.3	9 094.46	0.0687	0.04064	0.07414	1.8244
RP-3	30	132 379.3	9 094.46	0.0687	0.03995	0.10815	2.7074
JET-A	30	132 379.3	9 094.46	0.0687	0.04069	0.10839	2.6637
RP-3	0	132 379.3	10 312.35	0.0779	0.04040	0.08008	1.9820
JET-A	0	132 379.3	10 312.35	0.0779	0.04104	0.07632	1.8596
RP-3	40	132 379.3	10 312.35	0.0779	0.03958	0.08193	2.0698
JET-A	40	132 379.3	10 312.35	0.0779	0.04028	0.08232	2.0435
RP-3	−30	132 379.3	12 708.42	0.096	0.04056	0.02483	0.6123
JET-A	−30	132 379.3	12 708.42	0.096	0.03976	0.01196	0.3007
RP-3	10	132 379.3	12 708.42	0.096	0.03990	0.03107	0.7786
JET-A	10	132 379.3	12 708.42	0.096	0.04050	0.02941	0.7263

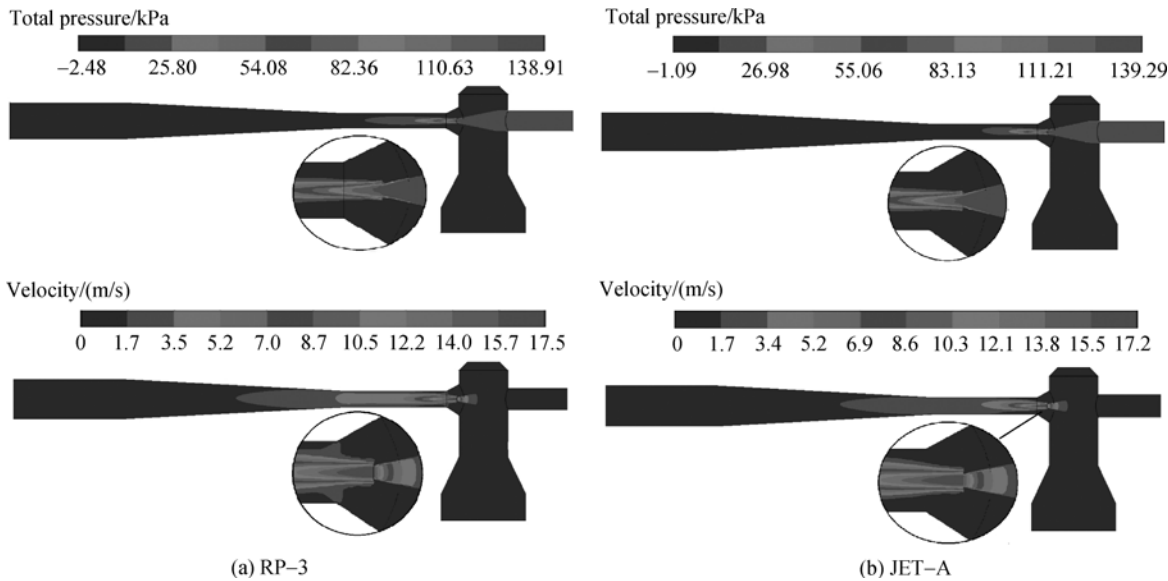


图 6 射流泵内部压力场和速度场
Fig. 6 Pressure and velocity field of injection pump

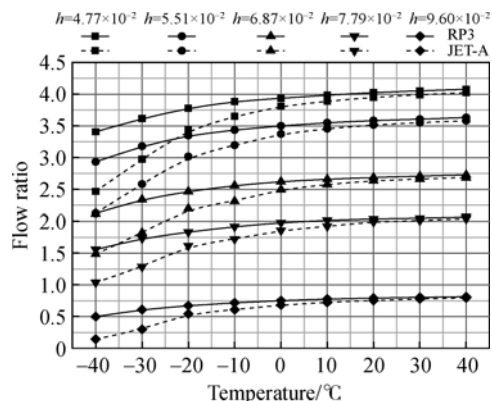


图7 不同压比、介质下温度比流量比的影响
Fig. 7 Flow ratio under various pressure ratios and mediums

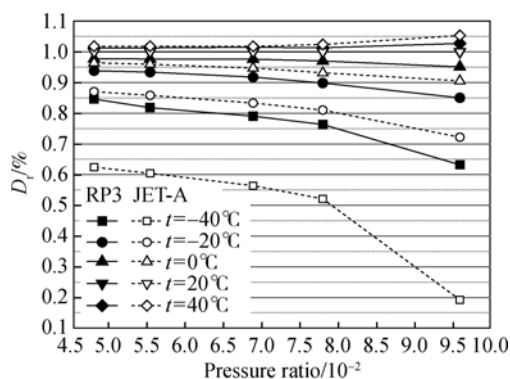


图8 不同温度下射流泵性能与标准温度下的相对偏差
Fig. 8 Relative deviation of the performance between various temperatures and standard temperature

图9选择了4个典型温度,给出了射流泵压力比对流量比的影响.从图中可更加明显地看出,在20℃和40℃下,两种燃油射流泵的差异很小,但是在-20℃和-40℃下,则差异较大.同时,温度不会对其基本关系产生影响,压比和流量比关

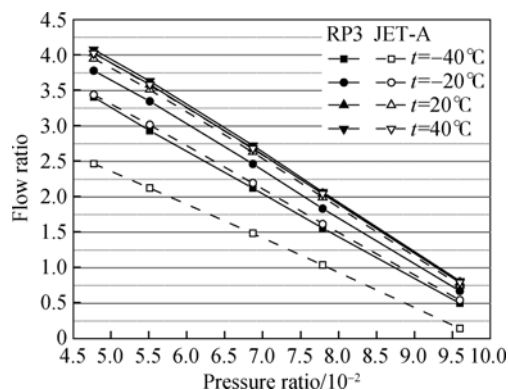


图9 几个典型温度下压比对流量比的影响
Fig. 9 Effects of pressure ratio on flow ratio under several typical temperatures

系基本保持直线.

4 结 论

通过实验与计算结果比较后显示本文所建立的射流泵模型具有较高的准确性,可反映射流泵各工况下性能.

由于 RP-3 燃油的黏度和密度较 JET-A 燃油低,因此有利于射流泵工作,模拟结果也显示在所有的温度范围内,同样压比下,采用 RP-3 燃油的射流泵可引射更多燃油.

当温度高于 0℃ 时,两者彼此差异很小,且温度对性能影响不明显,偏差均在 -10%~10% 之内,因此可以忽略温度的影响.但是如果温度低于 0℃ 后,由于燃油黏度急剧上升,两种燃油射流泵与标准温度(20℃)下的工作性能偏差明显增加,特别是在温度为 -40℃ 及压比为 9.60×10^{-2} 时, JET-A 号燃油射流泵的偏差超过 -80%,而采用 RP-3 燃油射流泵的偏差也达到约 -40%,因此必须考虑温度对性能的影响,否则按照标准温度下设计的射流泵引射能力将严重不足.

参考文献:

- [1] Nanda R, Gupta S, Shukla A K N. Experimental setup for performance characterization of a jet pump with varying angles of placement and depth[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2011, 1(2): 107-110.
- [2] Yamazaki Y, Nakayama T, Narabayashi T, et al. Effect of surface roughness on jet pump performance[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, 2009, 49(4): 928-932.
- [3] Kandulal J, Kumar M V. Experimental analysis on multi hole nozzle jet pump[J]. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), 2013, 3(1): 193-198.
- [4] Shah A, Chughtai I R, Inayat M H. Experimental and numerical investigation of the effect of mixing section length on direct-contact condensation in steam jet pump[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72(2): 430-439.
- [5] Shah A, Chughtai I R, Inayat M H. Experimental and numerical analysis of steam jet pump[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(10): 1305-1314.
- [6] ZHU Yin Hai, JIANG Pei Xue. Experimental and analytical studies on the shock wave length in convergent and convergent-divergent nozzle ejectors[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 88: 907-914.
- [7] Filin N V, Simkhovich S L, Sultanov I F. Mathematical modeling of a cryogenic jet pump with flows of different temperatures[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1990, 26(1): 18-22.

- [8] Beithou N, Aybar H S. A mathematical model for steam-driven jet pump[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26(10):1609-1619.
- [9] Gazzar M E, Meakhail T, Mikhail S. Numerical study of flow inside an annular jet pump[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2006, 20(4):930-932.
- [10] Winoto S H, Li H, Shah D A. Efficiency of jet pumps[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(2):150-157.
- [11] Mallela R, Chatterjee D. Numerical investigation of the effect of geometry on the performance of a jet pump[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 225(7):1614-1625.
- [12] Fan J, Eves J, Thompson H M, et al. Computational fluid dynamic analysis and design optimization of jet pumps[J]. *Computers and Fluids*, 2011, 46(1):212-217.
- [13] Ji M K, Utomo T, Lee Y H, et al. CFD investigation on the flow structure inside thermo vapor compressor[J]. *Energy*, 2010, 35(6):2694-2702.
- [14] 龙新平, 程茜, 韩宁, 等. 射流泵最佳喉嘴距的数值模拟[J]. *核动力工程*, 2008, 29(1):35-38.
- LONG Xinping, CHENG Qian, HAN Ning, et al. Numerical simulation of optimal nozzle-to-throat clearance of jet pump[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2008, 29(1):35-38. (in Chinese)
- [15] 龙新平, 朱劲木, 梁爱国, 等. 射流泵喉管最优长度的数值计算[J]. *水利学报*, 2013(10):14-18.
- LONG Xinping, ZHU Jinmu, LIANG Aiguo, et al. Numerical calculation of optimal length of throat pipe in jet pump[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013(10):14-18. (in Chinese)
- [16] 周凌九, 袁玲丽. 射流泵液固两相流特性三维大涡模拟[J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(5):522-526.
- ZHOU Lingjiu, YUAN Lingli. Performance of liquid-solid two-phase flow in jet pump by LES[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(5):522-526. (in Chinese)
- [17] 刘济瀛. 中国喷气燃料[M]. 北京:中国石化出版社, 1991.
- [18] Coordinating Research Council. Handbook of aviation fuel properties[R]. Coordinating Research Council, CRC Report No. 530, 2004.

(编辑:秦理曼、王碧琚)