

DOI: 10.7652/xjtuxb201307007

低温透平膨胀机内平衡凝结两相流动的数值模拟

孙皖¹, 马斌¹, 牛璐¹, 侯予^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 采用 Peng-Robinson 方程及零压多项式拟合了低温空气二元混合物的物性, 利用商业软件 ANSYS CFX 对设计工况下的单相流动及进口升压降温后平衡凝结两相流动进行了数值模拟, 得到了全低压空气分离流程中的低温两相透平膨胀机喷嘴和工作轮的温度场、压力场、流线及带液量云图, 同时推导了该工况下膨胀机的等熵效率。结果表明, 工作轮流道内吸力面壁面处的涡流会延迟凝结相变发生, 叶片后缘处的尾迹使得吸力面壁面处的带液量有所减小。最后, 通过实验验证了模拟结果, 表明利用平衡凝结相变模型能够模拟小带液量透平膨胀机流道内的两相流动。该结果可为低温两相膨胀机研究提供参考。

关键词: 透平膨胀机; 平衡凝结; 两相流动; 等熵效率; 带液量

中图分类号: TB653 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)07-0036-04

Numerical Simulation of Equilibrium Condensation Two-Phase Flow in Cryogenic Turboexpander

SUN Wan¹, MA Bin¹, NIU Lu¹, HOU Yu^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The binary mixture properties of cryogenic air were fitted by the PR equations and the zero pressure polynomial. The single-phase flow under the design conditions and the equilibrium condensation of two-phase flow at higher pressure and lower temperature were numerically simulated by ANSYS CFX. For a cryogenic turboexpander in air separation process, the temperature field, pressure field, streamlines and liquid mass fraction in the nozzle and impeller were obtained. The isentropic efficiency of the turboexpander was calculated. The results show that the eddy occurring on the suction side of the impeller would delay the phase-change condensation, and the wake at the trailing edge of the blade would lead to the decrease in the local liquid mass fraction. The simulation results agree well with the experimental data, confirming that the model of the equilibrium condensation can be applied to the simulation of the two-phase flow turboexpander having a small liquid mass fraction.

Keywords: turboexpander; equilibrium condensation; two-phase flow; isentropic efficiency; liquid mass fraction

收稿日期: 2012-12-28。 作者简介: 孙皖(1988—),男,博士生;侯予(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976082);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090201110006);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2013-06-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130617.1818.013.html>

透平膨胀机是低温精馏空分及气体分离和液化流程中的重要装置之一,低压空分流程中 85% 以上的冷量来自膨胀机的等熵膨胀过程,因此空分技术的发展在很大程度上与透平膨胀机的发展密切相关^[1]。1930 年 Linde 首次成功地把单级轴流冲动式透平膨胀机用于气体液化装置中,1937 年 Kapitza 院士提出反动式向心径流透平膨胀机的概念,1970 年 Swearingen 成功地实现了带液的两相透平膨胀机。

目前,空分流程最后一级多采用传统焦-汤节流阀降压,这会造成能量不可逆损失,诱发气化,导致气体提取率降低和气蚀损坏,单位产品能耗增大。采用两相透平膨胀机替代节流阀的技术,膨胀机制冷效应因远大于节流阀而使单位能耗降低,加上回收的膨胀功,一套空分或液化设备的总能耗可降低 3%~6%。对于自发凝结两相流动,国内外对汽轮机中湿蒸汽成核^[2]、平衡凝结及非平衡凝结的研究比较成熟^[3],对于低温两相透平中的反动式径流膨胀,其转速、膨胀工质、膨胀比、相态变化等,难以用成核理论及物性参数来确定。国外的设计水平已初步实现了一般带液率的两相透平膨胀机的设计与运行,但关于该方面公开发表的文献较少。

本文利用软件 NIST REFPROP 拟合了混合物气液两相的物性参数,采用软件 CFX 中平衡凝结模型模拟了低温透平膨胀机工质在设计工况下单相流动及变工况下平衡凝结两相流动,并对模拟结果进行了实验验证和分析。

1 物性参数处理及数学模型

空分流程中低温透平两相流动的模拟存在着湍流、三元流动及液滴形成等复杂性问题,所以本文对求解平衡凝结两相流动进行了以下简化:①在工作轮出口带液量较小的情况下,气相中微小液滴均匀分布(速度无滑移);②在软件 CFX 中,二元混合物用 Peng-Robinson(PR)状态方程^[4]及零压多项式定义,相变过程为定温定压过程。

气液两相的连续方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(r_a \rho_a) + \nabla \cdot (r_a \rho_a \mathbf{U}) &= \Gamma_{a\beta} + S_{MSa} \\ \frac{\partial}{\partial t}(r_\beta \rho_\beta) + \nabla \cdot (r_\beta \rho_\beta \mathbf{U}) &= \Gamma_{\beta a} + S_{MS\beta} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: r_a 、 ρ_a 分别为气相的体积分数和密度; r_β 、 ρ_β 分别为液相的体积分数和密度; $\Gamma_{a\beta}$ 为从液相到气相传递的单位体积的质量流率; $\Gamma_{\beta a}$ 为从气相到液相传递

的单位体积的质量流率; S_{MS} 为连续方程的质量源项(就气液两相总体而言,系统与外界并无质量交换,所以该项为 0)。

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U} - \mu(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) = \mathbf{S}_M - \nabla p \quad (2)$$

式中: $\rho = r_a \rho_a + r_\beta \rho_\beta$, $\mu = r_a \mu_a + r_\beta \mu_\beta$ 分别为气、液两相的动力黏度。由于气相和液相之间是速度无滑移的,其内部转移项被抵消,所以气相和液相之间本质是一变密度与变动力黏度的单相动量方程。

能量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(r_a \rho_a h_{a,\text{tot}}) - r_a \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (r_a \rho_a \mathbf{U}_a h_{a,\text{tot}}) = \\ \nabla \cdot (r_a \lambda_a \nabla T_a) + r_a \nabla \cdot (\mathbf{U}_a \cdot \boldsymbol{\tau}_a) + S_{Ea} + Q_a + \\ (\Gamma_{a\beta}^+ h_{\beta s,\text{tot}} - \Gamma_{\beta a}^+ h_{a s,\text{tot}}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $h_{a,\text{tot}}$ 、 T_a 、 λ_a 分别为气相的总比焓、温度、导热系数,总比焓 $h_{a,\text{tot}} = h_a + \mathbf{U}^2/2$; S_{Ea} 为外部热源,由于膨胀过程可认为是绝热过程,所以该项为 0; Q_a 为系统内部气相与液相相界面之间传递的热量,平衡凝结相变时,气液两相温度相等; $(\Gamma_{a\beta}^+ h_{\beta s,\text{tot}} - \Gamma_{\beta a}^+ h_{a s,\text{tot}})$ 为相间质量传递引起的热量传递^[5]。

2 模拟结果与分析

本文模拟的透平膨胀机为 KDN-30(Y)型空分设备的配套主机之一。塔底的富氧液态空气经节流后进入主冷凝蒸发器的蒸发侧,并作为冷源气化为富氧空气,富氧空气经透平膨胀机进一步降温,而被冷却的空气是来自纯化系统的即将进入分馏塔底部的高压热流空气。透平膨胀机的主要参数见表 1。

在三维建模软件 Solidworks 中,根据透平膨胀机参数对喷嘴及工作轮建模,然后导入 Numeca 的软件 AutoGrid 进行网格划分。软件 CFX 前处理包括自定义混合物物性参数、设定边界条件、导入网格文件。紊流的数值模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型和壁面函数,空间离散采用有限容积法,动静转子之间的参数传递采用混合平面模型,相变采用平衡凝结模型,迭代收敛精度为 1.0×10^{-6} ^[6]。

等熵效率是衡量热力性能的重要参数,表示透平膨胀机中能量转换过程的完善程度,计算式为透平膨胀机进出口实际比焓降与等熵比焓降之比^[7]

$$\eta = \frac{h_{\text{in}} - h_{\text{out}}}{h_{\text{in}} - h_{\text{out},s}} \quad (4)$$

式中: h_{in} 为进口比焓值; h_{out} 为出口实际比焓值; $h_{\text{out},s}$ 为出口理想等熵比焓值。

表 1 膨胀机设计参数及喷嘴、工作轮的结构参数

膨胀机设计参数	参数值	喷嘴结构参数	参数值	工作轮结构参数	参数值
氧的体积分数/%	40	叶片数	25	叶片数	12
氮的体积分数/%	60	喉部宽度/mm	1.8	进口直径/mm	56
标况下体积流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	480	叶高/mm	2.7	出口外径/mm	36.2
进气温度/K	121	出口叶片角/ $^\circ$	16	出口内径/mm	14.4
进气绝对压力/MPa	0.41			进口叶片高度/mm	3.3
排气绝对压力/MPa	0.133				
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	56 300				
等熵效率/%	77				

影响等熵效率的因素按其产生的原因分为流道损失和非流道损失。喷嘴及工作轮流道内的工质流动会与壁面、气流之间发生摩擦,从而引起不可逆的损失,称为流道损失或流动损失,只考虑流动损失时的效率用流道效率表示。非流道损失主要包括轮背摩擦损失和内泄漏损失^[8]。

本文首先模拟了一组实验工况(喷嘴进口温度分别为 118.25、117.05、116.05、115.05、114.25、113.55 K)下的单相流动,得到工作轮进出口状态参数,并依据膨胀机原理计算轮背摩擦损失、内泄漏损失及扩压器中的流动,从而得出扩压器出口的状态参数,模拟数据与实验数据对比如图 1 所示。由图 1 可以看出,各参数在每个工况点下相差不大。由于数值模拟在理想环境下进行,所以各参数呈线性变化,但总的变化趋势与实验结果一致。

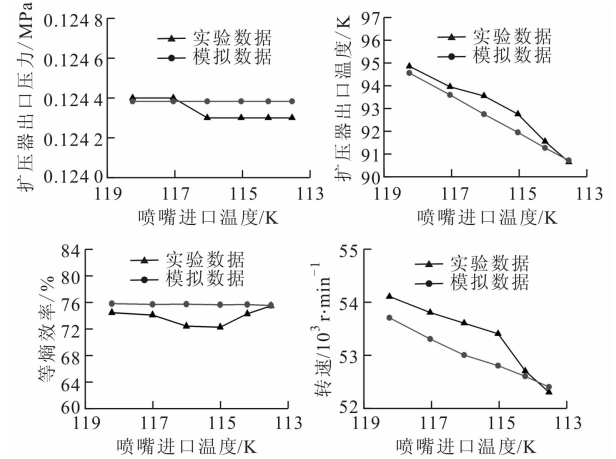


图 1 实验数据与模拟数据对比

为了深入分析膨胀机流道内低温工质流动特性与能量转换的过程,以第一个实验工况点,喷嘴进口温度为 118.25 K 时的数值模拟结果为例,取喷嘴及工作轮叶片从叶根到叶顶的中间位置截面,从而获得相应的温度场、压力场及中叶展处流线,如图 2~图 4 所示。由图 2 和图 3 可以看出,温度与压力沿流道方向呈下降趋势,压力面压力高。由图 4 可以

看出,工作轮进口的冲击角很小,吸力面壁面处存在旋涡,由于叶片的尾部有一定的厚度,当气体从叶道中流出时会形成充满旋涡的尾迹气流,这与实际情况是一致的。

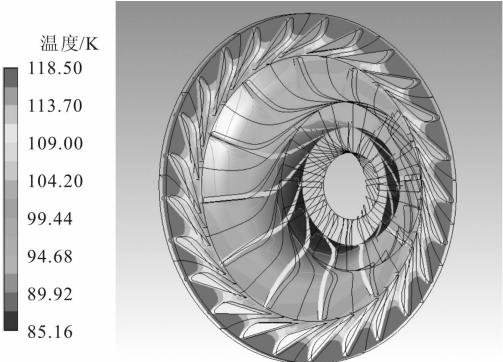


图 2 单相流动温度场

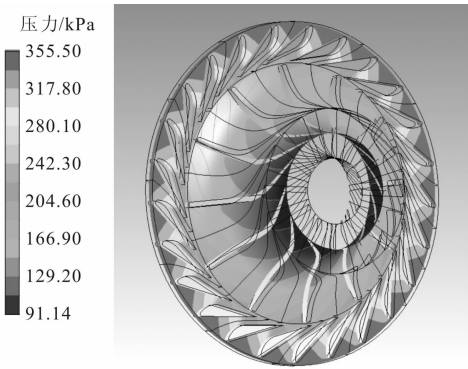


图 3 单相流动压力场

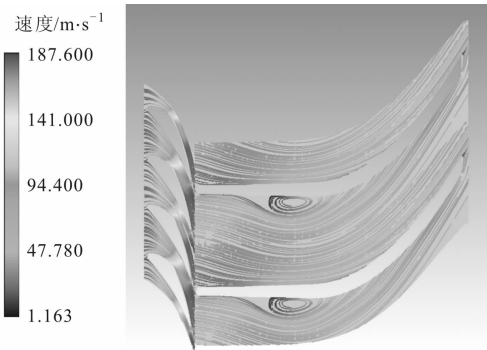


图 4 单相流动中叶展流线

为了完成平衡凝结两相流动的模拟,本文采用提升进气压力、降低进气温度的方法使膨胀过程在两相区域进行,但是应避免喷嘴出口带液,以防止液滴在进入工作轮时冲击叶片。由进气压力为 0.58 MPa,进气温度分别为 116、115、114 K 时,温度及带液量(质量分数)模拟结果表明,当喷嘴进口温度为 115 K 时,喷嘴出口保证不带液,工作轮中存在凝结两相流动,如图 5~图 7 所示。

流道内涡流的存在会影响凝结的发生及带液量的大小。由图 7 可以看出:由于吸力面壁面边界层及涡流的存在,吸力面壁面压力低于主流,而温度高于主流,因此吸力面壁面发生凝结相变的位置相对于主流是滞后的;在叶轮叶片的后缘处存在尾迹,尾

迹区域内温度高、压力低,所以该区域带液量比周围区域的小。

3 结 论

本文通过软件 CFX 对一实际运行的低温透平膨胀机进行了设计工况下单相流动及变工况下平衡凝结两相流动的数值模拟,同时对比、分析了模拟结果。对于全低压空分流程中低温透平膨胀机,采用的物性参数处理方法及数学模型能够很好地模拟流道内二元混合物平衡凝结两相流动,计算所得的压力场、温度场、速度场及等熵效率等均与实际吻合较好。

数值模拟结果的分析表明:工作轮内吸力面壁面处涡流会使该区域内的凝结滞后于主流区域,叶片后缘处由于尾迹的存在使得带液量有所减小,而凝结相变的存在并不会大幅改变工质的做功能力。

参考文献:

[1] 江楚标. 透平膨胀机及发展动态 [J]. 深冷技术, 2001 (5): 1-9.
JIANG Chubiao. Turboexpanders and recent developments [J]. Cryogenic Technology, 2001(5): 1-9.
[2] KEVIN A K. 两相流空气分离透平膨胀机的设计 [J]. 深冷技术, 2010(1): 47-51.
KEVIN A K. Design of two-phase flow air separation turboexpanders [J]. Cryogenic Technology, 2010(1): 47-51.
[3] 李瑜, 李亮, 钟刚云, 等. 低压汽轮机中平衡与非平衡凝结流动的对比较研究 [C]//中国工程热物理学会热机气动热力学 2009 年学术会议论文集. 北京: 中国工程热物理学会, 2009: 1-6.
[4] PENG Dingyu, ROBINSON D B. A new two-constant equation of state [J]. Industrial and Engineering Chemistry, Fundamentals, 1976, 15(1): 59-64.
[5] ANSYS Inc. . ANSYS CFX: solver theory guide [M]. New York, USA: ANSYS Inc. , 2010: 145-167.
[6] DENTON J D, DAWES W N. Computational fluid dynamics for turbomachinery design [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1998, 213: 107-123.
[7] GHOSH S Kr. A numerical model for the design of a mixed flow cryogenic turbine [J]. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, 2 (1): 175-191.
[8] WHITFIELD A, BAINES N C. Design of radial turbomachines [M]. New York, USA: Longman Scientific & Technical, 1990: 68-82.

(编辑 苗凌)

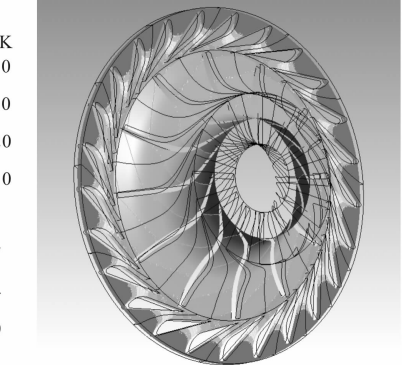


图 5 平衡凝结两相流动温度场

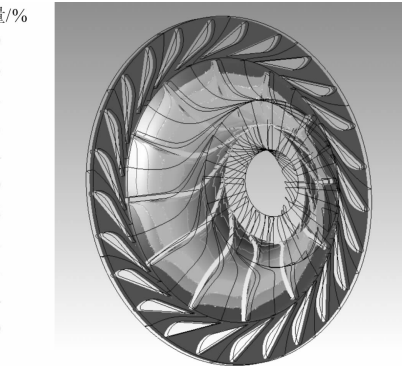


图 6 平衡凝结两相流动带液量云图

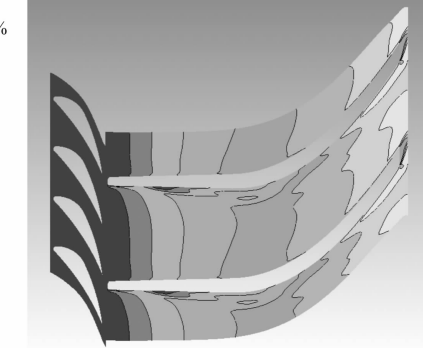


图 7 平衡凝结两相流动中叶展带液量云图