

DOI: 10.7652/xjtuxb201802019

低温透平膨胀机内非平衡自发凝结 两相流动的数值研究

孙皖¹, 牛璐², 步珊珊¹, 马在勇¹, 潘良明¹, 侯予²

(1. 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 400044, 重庆;

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: 针对低温透平膨胀机内复杂自发凝结三元两相流动问题, 基于非等温修正成核模型及 Gyarmathy 液滴生长模型, 采用非平衡凝结数学模型, 准确预测了气体快速膨胀中凝结成核和液滴生长的过程, 基于数值模拟结果, 研究了进口过热度 and 旋转作用对工作轮流道内自发凝结过程的影响, 并分析了流道内液滴数目密度、液滴直径及带液量的分布规律。模拟结果表明: 当进口过热度不够低时, 快速成核发生在工作轮内导流段并发展缓慢, 致使气体始终保持在较高的过冷度状态且成核区域较大; 非平衡自发凝结与二次涡流的相互作用产生的逆温梯度会带来附加热力学损失, 同时增大的逆压梯度会造成更强的边界层分离, 从而引起附加流动损失; 对于径-轴式工作轮, 在二次涡流区域、吸力面壁面附近及尾迹涡流区域内容易发生液滴的聚集, 这很容易引起二次成核并形成大尺寸二次液滴, 进而带来附加机械损失。

关键词: 透平膨胀机; 自发凝结; 低温两相流动; 成核

中图分类号: TB653 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)02-0125-05

Numerical Investigation for Non-Equilibrium Condensation Two-Phase Flow in Cryogenic Turbo-Expander

SUN Wan¹, NIU Lu², BU Shanshan¹, MA Zaiyong¹, PAN Liangming¹, HOU Yu²

(1. Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies & System, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

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

Abstract: In view of 3-D two-phase flow with spontaneous condensation in cryogenic turbo-expanders, a mathematical model of non-equilibrium condensation is employed to predict the condensation nucleation and droplet growth in gas repaid expansion, where the nucleation model corrected for non-isothermal effect and Gyarmathy droplet growth model are considered. Following the analysis for simulation results, the effects of inlet superheat degree and rotation on the spontaneous condensation in impeller flow passage are investigated, and the distributions of droplet number density, droplet diameter and wetness are obtained. A higher inlet superheat degree results in that repaid nucleation occurs in guiding section and consequently the process develops slowly, thus the gas remains in a higher supercooled state and the nucleation region is enlarged. Because of the interaction of condensation and secondary flow in impeller flow passage, the adverse temperature gradient causes an additional thermodynamic loss. Moreover, the

收稿日期: 2017-07-08。 作者简介: 孙皖(1988—),男,讲师,博士。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476122); 中央高校基本科研业务费资助项目(0903005203500)。

网络出版时间: 2017-11-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20171106.1715.016.html>

strength of adverse pressure temperature gradient promotes the separation of boundary layer and further causes additional flow loss. For radial and mixed-flow turbines, the small droplets very likely gather and form bigger ones in the secondary flow region, wall of suction side and wake flow region, which leads to secondary nucleation, secondary droplets on a large-scale and the further additional mechanical loss.

Keywords: turbo-expander; spontaneous condensation; cryogenic two-phase flow; nucleation

符号表

ρ_g	气体密度, kg/m ³	η	非等温效应因子	T_{sc}	过冷度, K
ρ_l	液体密度, kg/m ³	q_c	凝结系数	N_l	液滴数, m ⁻³
ρ_m	气液混合物密度, kg/m ³	γ	气体比热容比	σ	表面张力, N/m
α_g	气相体积分数	τ_{ij}	剪切应力张量	k_B	波尔里兹曼常数
α_l	液相体积分数	$h_{tot,g}$	气相总比焓, J/kg	v^l	单分子平均体积, m ³
m^*	临界核心质量, kg	$h_{tot,l}$	液相总比焓, J/kg	p_{sat}	饱和压力, Pa
m_1	单个分子质量, kg	Q_l	相界面热导率, W/m ²	Pr_g	气体普朗特常数
R	液滴半径, m	T_g	气相温度, K	Kn	克努森数
R^*	临界核心半径, m	T_l	液相温度, K	α_{th}	热适应系数
J	成核率, m ⁻³ /s	T_{sat}	饱和温度, K	h_{fg}	汽化潜热, J/kg

透平膨胀机作为大科学工程项目中低温系统提供冷量的重要装置, 广泛应用于气体分离与液化流程、液化天然气冷热电及朗肯循环能量回收等能源领域, 其运行安全性和效率是关乎企业经济效益的重要因素。随着设计人员和用户对于大型低温空气分离液化流程的经济效益和循环效率提升的需求, 人们的目光已经逐渐转移到透平两相流动上来。理论上, 膨胀气体进入两相区域越深, 带来的比焓降越多, 对空分装置提供的冷量越充足, 进而提高整套空分装置的经济性^[1]。低温透平膨胀机中两相流动主要是指存在同质自发凝结过程的气-液两相流动, 涉及低温相变、湍流、三元流动及液滴形成等复杂性的问题, 深刻理解低温工质非平衡自发凝结的机理是保证低温两相透平膨胀机安全和高效设计的基础。

自发凝结两相流动问题最早出现在湿蒸汽透平领域, 早期对于成核的实验与理论研究主要集中于水蒸气工质, 发展至今无论在实验方面还是理论模拟应用方面都已经取得了很多成果^[2-5]。然而, 在低温领域, 对于低温工质(如空气、氮气、氧气及氦气)自发凝结流动的研究起步较晚并进展缓慢。一方面, 由于低温工质关键物性的不确定性及分子间势能理论的缺乏^[6], 使得适用于低温工质自发凝结的成核模型及液滴生长模型发展不成熟; 另一方面, 低温环境下严格的密封性对成核率、过冷度及带液量

等关键参数的测量造成了很大困难。因此, 目前关于低温工质快速膨胀及自发凝结过程的理论与实验研究水平仍十分不成熟。

本文采用非平衡自发凝结模型, 通过成核和液滴生长实现气体自发凝结过程, 通过源项实现气液两相间质量和能量的交换, 基于一套小型空气分离液氮装置配套透平膨胀机的两相工况实验数据^[7], 借助商业 CFD 软件 ANSYS CFX, 完成了低温透平膨胀机内非平衡自发凝结两相流动的数值模拟, 并对模拟结果进行分析。

1 数学模型

非平衡凝结模型采用成核理论及液滴生长预测液滴的形成与生长, 是一种 Euler/Euler 双流体模型, 模型分别建立气液两相各自控制方程并进行求解, 通过控制方程中源项实现气液两相间的质量、动量与能量的交换。快速膨胀过程中自发凝结形成的液滴直径很小(小于 1 μm), 如此小的液滴在很短时间内就可以加速至与气相速度相近甚至相同, 因此可以近似认为液滴均匀分布在气相中并随气流一起流动, 即速度无滑移假设。成核预测采用经过氮气 Wilson 点实验验证的非等温修正成核模型^[8], 液滴生长预测则采用 Gyarmathy 模型^[9], 表 1 列出气液两相的控制方程。

表 1 气液两相质量、动量和能量方程

控制方程		表达式
质量方程	气相	$\frac{\partial(\rho_g \alpha_g)}{\partial t} + \alpha_g \left(\frac{\partial(\rho_g u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_g v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_g w)}{\partial z} \right) = - \left(\rho_l \frac{3\alpha_l}{R} \frac{dR}{dt} + m^* \alpha_g J \right) \quad (1)$
	液相	$\frac{\partial(\rho_l \alpha_l)}{\partial t} + \alpha_l \left(\frac{\partial(\rho_l u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_l v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_l w)}{\partial z} \right) = \rho_l \frac{3\alpha_l}{R} \frac{dR}{dt} + m^* \alpha_g J \quad (2)$
动量方程		$\frac{\partial \rho_m u_j}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (3)$
能量方程	气相	$\frac{\partial \alpha_g (\rho_g h_{tot,g} - p)}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_g \rho_g u_i h_{tot,g})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_g \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial (\alpha_g u_j \tau_{ij})}{\partial x_i} - \left(m^* \alpha_g J + \rho_l \frac{3\alpha_l}{R} \frac{dR}{dt} \right) h_{tot,l} + \frac{3\alpha_l}{R} Q_l \quad (4)$
	液相	$T_l = T_{sat} - T_{sc} \frac{R^*}{R} \quad (5)$
液滴数		$N_l = \frac{\partial(\rho_l N_l)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_l u N_l)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_l v N_l)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_l w N_l)}{\partial z} = \rho_l \alpha_g J \quad (6)$
成核率		$J = \frac{q_c - \frac{\rho_g^2}{1 + \eta \rho_l} \left(\frac{2\sigma}{\pi m_l^3} \right)^{1/2}}{\exp \left(- \frac{16}{3} \frac{\pi \sigma^3 (v^l)^2}{(k_B T_g)^3 (\ln(p/p_{sat}))^2} \right)} \quad (7)$
液滴生长率		$\frac{dR}{dt} = \frac{\lambda_g}{\rho_l R} \left(1 + \frac{2(8\pi)^{1/2}}{1.5Pr_g} \frac{\gamma}{1 + \gamma \alpha_{th}} \right)^{-1} \frac{(T_l - T_g)}{h_{fg}} \quad (8)$

非平衡自发凝结模型中,成核率计算需要知道过冷气体的吉布斯自由能变,因此对低温工质物性数据库的要求是能够涵盖过冷区域的气体物性。在 ANSYS CFX 中,Redlich-Kwong 气体状态方程满足气体状态外插值至过冷区域这一要求^[10]。

2 几何模型及边界条件

本文主要对文献[7]中自发凝结发展较为充分的两组实验工况进行数值分析。该两组工况下进口过热度较低,出口带液量较大,气体膨胀进入工作轮后很快达到凝结 Wilson 点,工况参数如表 2 所示,透平膨胀机设计参数及结构尺寸如表 3 所示。对喷

表 2 低温两相透平膨胀机实验工况^[7]

工况	喷嘴进口		扩压器出口	转速/ r · min ⁻¹
	温度/K	压力/MPa	压力/MPa	
<i>t</i> ₄	98.57	0.359	0.136	50 362
<i>t</i> ₅	100.30	0.427	0.143	55 102

表 3 透平膨胀机主要设计与结构参数^[7]

参数	数值	参数	数值
进口温度/K	118	喷嘴进口直径/mm	74
进口压力/MPa	0.41	工作轮进口直径/mm	56
出口压力/MPa	0.133	工作轮出口外径/mm	36.2
质量流量/kg · s ⁻¹	0.195	工作轮出口内径/mm	14.4
反动度	0.5	喷嘴和工作轮叶片数	25,12

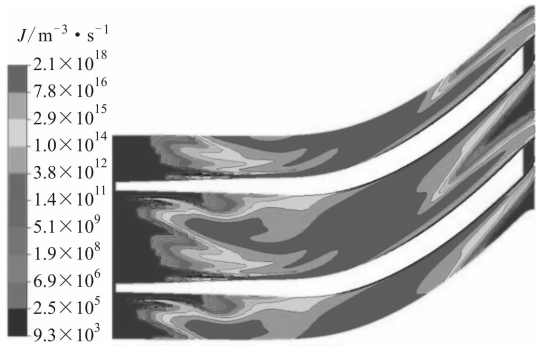
嘴、工作轮和扩压器流动区域采用六面体结构化网格进行划分。在 ANSYS CFX 中,选取 RNG *k-ε* 湍流模型,目标收敛残差设定为 10⁻⁵,完成透平膨胀机内非平衡自发凝结两相流动的数值模拟。

3 模拟结果与分析

工作轮是透平膨胀机实现能量转换及输出功的重要部件,本文基于数值模拟结果着重对工作轮流道内的自发凝结过程进行分析,关于网格无关性验证及模拟结果的有效性已在前述工作^[11]中完成。对比验证表明,数值计算的出口带液量预测值与实验值误差在 3% 以内,数学模型可以很好地预测低温两相透平内非平衡自发凝结过程。

3.1 进口过热度对自发凝结过程的影响

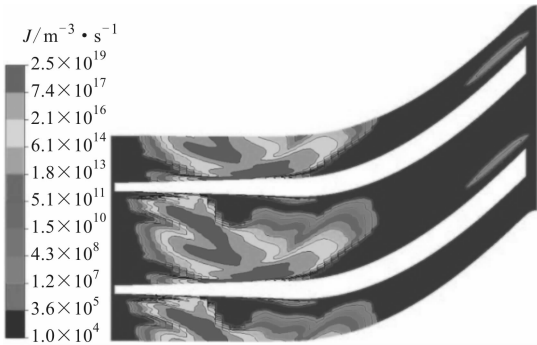
透平膨胀机中采用的工作轮是径-轴流式的,即由直线膨胀段和导流段两部分组成,气流在膨胀段内压降非常迅速,而在导流段内压降缓慢,当快速成核发生在不同位置时,流道内流动状态会有很大差异。图 1 为 *t*₄ 和 *t*₅ 工况下工作轮 10% 叶高位置流道展开面上的成核率分布图。对于 *t*₄ 工况,气体在导流段位置膨胀至最大过冷度并发生快速成核,由于导流段内气体压降速率变低,因此凝结成核不剧烈,气体始终保持在较高的过冷度状态,所以成核区域较大。在 *t*₅ 工况下,气体在膨胀段即达到 Wilson 点并发生快速成核,由于膨胀段内快速压降的作用,凝结成核过程非常剧烈,大量凝结潜热释放出来加



(a) t_4 工况



(a) t_4 工况



(b) t_5 工况



(b) t_5 工况

图 1 t_4 和 t_5 工况下工作轮 10% 叶高位置流道展开面上的成核率分布

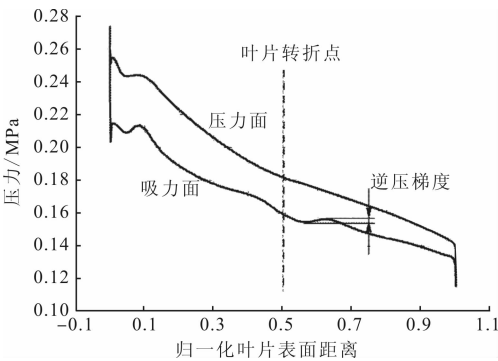
图 2 t_4 和 t_5 工况下工作轮 10% 叶高位置流道展开面上气体过冷度分布

热气流,气体的过冷度在很短的距离内就出现急剧下降。因此,在快速成核区域下游成核率也随之迅速降低,快速成核区域较小。

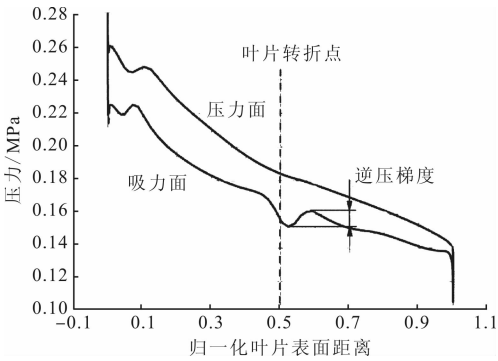
3.2 旋转作用对自发凝结过程的影响

在 t_5 工况下,主流区域成核过程发生在叶轮型线转折处上游,自发凝结与二次涡流耦合作用使流动参数发生变化。在旋转作用影响下,吸力面附近有二次涡流出现;同时,主流区域产生的大量凝结核心在压力梯度作用下扩散至二次涡流区域。从吸力面上游过来的过冷气体在这些凝结核心上发生冷凝,潜热的释放和气液之间的热交换使得过冷气体温度迅速上升,加强了这一区域内非平衡态的恢复,区域内过冷度迅速降低,如图 2 所示。

在 50% 叶高位置,二次涡流区域内剧烈凝结过程恰好发生在吸力面型线转折处上游。与平衡自发凝结模型^[12]对比,非平衡自发凝结模型中不仅有相变潜热,同时考虑了气液两相之间的传热。在凝结发生时,这两部分热量加热气流,提高了下游过冷气体的压力,与边界层流动分离叠加无疑增强了转折处的逆压梯度。图 3 所示为两种数学模型预测的 50% 叶高位置叶片表面压力变化曲线对比所示。非平衡自发凝结与二次涡流的相互作用,一方面引起



(a) 平衡自发凝结



(b) 非平衡自发凝结

图 3 两种数学模型预测的 50% 叶高位置叶片表面压力曲线对比(t_5 工况)

吸力面壁面附近过冷气体逆温梯度的产生,这无疑会带来附加热力学损失;另一方面增大的逆压梯度会造成更强的边界层分离,必然会引起附加流动损失。

3.3 液滴密度、直径及带液量分布

如前所述,主流区域大量凝结核心在压力梯度作用下扩散至吸力面壁面附近二次涡流区域,大量气体分子在凝结核心表面冷凝,过冷度迅速降低,所以几乎不再产生新的凝结核心,即液滴数目基本保持不变,但液滴直径得到迅速增加。由于大量凝结核心向吸力面的扩散,主流区域中气体过冷度下降缓慢,不断有新的凝结核心形成,所以主流区域内液滴数目在不断增加,但液滴直径较小。二次涡流区域内,部分较大直径的液滴随气流沿吸力面进入叶片尾缘,尾迹涡流区为流动死区,较大直径的液滴不断在这里聚集,使得该区域内液滴数目和液滴直径都比较大,因此带液量也非常高。工作轮尾迹区域内液滴密度、直径和带液量分布如图4所示。

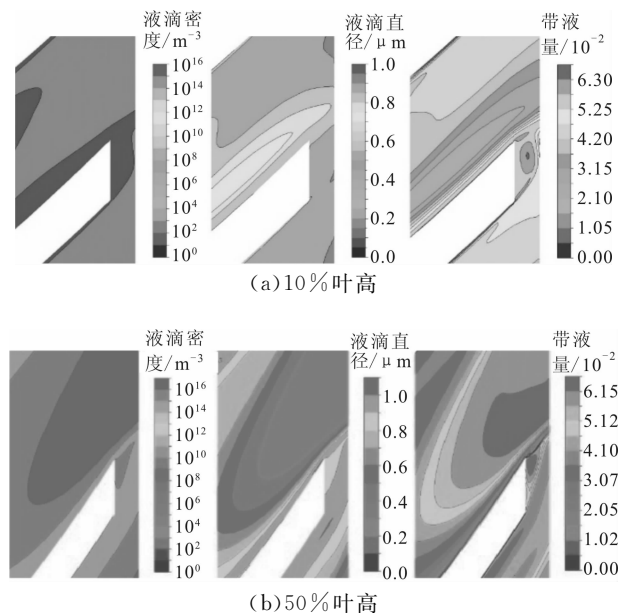


图4 工作轮尾迹区域内液滴密度、直径及带液量分布

4 结 论

本文采用非平衡自发凝结数学模型,对透平膨胀机工作轮流道内两相流动进行了数值研究,主要工作和结论如下。

(1)在自发凝结膨胀过程中,当进口过热度不够低时,快速成核发生在工作轮内导流段并发展缓慢。这种现象是由于导流段叶片弯曲程度不大使得压降速率较低引起的。

(2)非平衡自发凝结与二次涡流的相互作用,一

方面引起了吸力面附近过冷气体逆温梯度的产生,带来了附加的热力学损失;另一方面增大的逆压梯度会造成更强的边界层分离,引起附加的流动损失。

(3)对于径-轴工作轮,在二次涡流区域、吸力面壁面附近及尾迹涡流区域内,液滴不仅直径较大且数量也较多,这很容易引起二次成核并形成大尺寸二次液滴,进而带来附加机械损失。

参考文献:

- [1] KAUPERT K A. 两相流空气分离透平膨胀机的设计[J]. 深冷技术, 2010(1): 47-51.
KAUPERT K A. Design of two-phase flow air separation turboexpanders [J]. Cryogenic Technology, 2010 (1): 47-51.
- [2] YAMAMOTO S, SASAO Y, KATO H, et al. Numerical and experimental investigation of unsteady 3-D wet-steam flows through two-stage stator-rotor cascade channels [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2010; Power for Land, Sea and Air. New York, NY, USA; ASME, 2010: 2257-2265.
- [3] STARZMANN J, SCHATZ M, CASEY M V, et al. Modelling and validation of wet steam flow in a low pressure steam turbine [C] // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011. New York, NY, USA; ASME, 2011: 2335-2346.
- [4] LI Liang, LI Yu, XIE Xiaolong, et al. Quantitative evaluation of wetness losses in steam turbines based on three-dimensional simulations of non-equilibrium condensing flows [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part A Journal of Power and Energy, 2014, 228(6): 95-103.
- [5] SRIRAM A T, MISTRY H, MORAGA F, et al. Numerical sensitivity studies on nucleation of droplets in steam turbine [C]// ASME 2011 Power Conference. New York, NY, USA; ASME, 2012: 559-565.
- [6] 孙皖, 牛璐, 赖天伟, 等. 氮气在缩放喷管中非平衡自发凝结的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 130-133.
SUN Wan, NIU Lu, LAI Tianwei, et al. Numerical research on nitrogen spontaneous condensation in converging diverging nozzle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(4): 130-133.
- [7] NIU Lu, HOU Yu, SUN Wan, et al. The measurement of thermodynamic performance in cryogenic two-phase turbo-expander [J]. Cryogenics, 2015, 70: 76-84.

(下转第 135 页)