

文章编号:0253-4339(2025)04-0131-10

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.04.131

蒸汽喷射器非平衡凝结三维模型优化与对比

李熠桥^{1,2} 周丹² 费继友¹

(1 大连交通大学詹天佑学院 大连 116028; 2 冰山冷热科技股份有限公司 大连 116630)

摘要 蒸汽喷射器是喷射式制冷系统的关键设备,具有节能环保优势。同时考虑三维和非平衡凝结效应,优化、验证并对比了蒸汽喷射器模型。对比了考虑凝结效应的优化模型与理想气体模型的模拟结果。基于该凝结模型,研究了湍流处理方法(雷诺平均方法和大涡模拟方法)对模拟结果的影响。分析了不同模型捕捉到的非平衡凝结、激波等复杂流动现象。结果表明:优化后的蒸汽喷射器模型可以以最低计算成本可靠预测喷射器性能并捕捉其内部复杂流动现象,其中大涡模拟方法得到的最大液体质量分数低于雷诺平均方法,喷射系数与实验值的最大相对误差为11%;与理想气体模型相比,凝结模型可使喷射系数和临界出口压力与实验值之间的平均相对误差分别降低72.0%和29.9%。

关键词 喷射器;大涡模拟;非平衡凝结;激波;边界层

中图分类号:TB61⁺1;TK123;O354

文献标识码:A

Optimization and Comparison of 3-D Model of Steam Ejector with Non-Equilibrium Condensation

Li Yiqiao^{1,2} Zhou Dan² Fei Jiyou¹

(1. Zhan Tianyou College of Dalian Jiaotong University, Dalian, 116028, China; 2. Bingshan Refrigeration and Heat Transfer Technologies Co., Ltd., Dalian, 116630, China)

Abstract Steam ejectors are vital components of ejector refrigeration systems and have attracted considerable attention owing to their energy savings and environmental protection. In this study, steam ejector models were optimized, validated, and compared by considering the three-dimensional and non-equilibrium condensation effects. The simulation results of the optimization model were compared with those of the ideal gas model. Based on the condensation model, the effects of the turbulence models (Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) and large eddy simulation methods (LES)) on the simulation results were studied. Complex flow phenomena captured by different models, such as shock waves, non-equilibrium condensation, and boundary layer separation, were compared and analyzed. The results show that the optimized steam ejector model can credibly predict the ejector performance and capture the complex flow phenomena inside the ejector at the lowest computational cost. The maximum liquid mass fraction obtained using the large eddy simulation method is lower than that obtained using the Reynolds-averaged Navier-Stokes method. The maximum relative deviation against experiments of the entrainment ratio was obtained using the large eddy simulation method of 11%. The condensation model reduces the average relative deviations of the entrainment ratio and critical discharge pressure by 72.0% and 29.9%, respectively.

Keywords ejector; large eddy simulation; non-equilibrium condensation; shockwave; boundary layer

蒸汽喷射器可利用蒸汽余压回收低压蒸汽,无需额外消耗机械能^[1]。在工业制冷领域,传统电力驱动的机械压缩制冷系统越来越不符合节能环保需求。水兼具环保性和安全性,可在蒸汽喷射制冷系统中充当制冷剂,用蒸汽发生器和蒸汽喷射器取代压缩机,减少电能消耗,应用优势显著^[2]。

由于非平衡凝结、激波、边界层分离等复杂流动现象的存在,蒸汽喷射器流场涉及相变的快速发生和各种参数的突变,仅依靠实验难以对其内部过程进行深入研究^[3]。尤其在超声速流体中尚无法实现精确

无干扰测量,圆形横截面喷射器产生的光学畸变引起很大的实验误差问题尚无法解决,湍流的拟序结构无法得到^[4]。因此,目前可视化实验技术无法实现蒸汽喷射器内复杂流动现象的定量机理性研究,但可以为验证数值模拟方法的准确性提供重要判断依据^[5]。在验证数值模型可靠性基础上,数值模拟方法不仅比实验成本低,还可弥补实验方法的不足,捕获蒸汽喷射器内的复杂流动现象,并对其进行局部特征描绘,实现复杂因素作用下微观过程的详细分析,从而为研究物理本质提供依据^[6]。

计算流体力学中对湍流的处理方法有直接数值模拟 (direct eddy simulation, DNS) 方法、大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 方法及雷诺平均方法 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)。DNS 无需任何湍流模型,而是直接求解湍流运动 Navier-Stokes 方程。虽然可以获得所有尺度的湍流脉动信息,但计算量巨大,尚无法应用于喷射器的计算。目前可应用于喷射器的数值模拟方法为 RANS 和 LES。其中 RANS 最为常用,其核心是将 N-S 方程平均,用时均值和脉动值之和代替瞬时值,只能得到结果的平均值和湍流的宏观特性。在 LES 中,大尺度脉动用直接模拟方法计算,只将小尺度脉动对大尺度脉动的作用进行模型假设。LES 不仅可以通统计计算得到各个参数的平均量,还可以得到大于惯性子区尺度的脉动信息,以分析湍流拟序结构与宏观物理现象之间的内在关系和影响机理。因此,使用 LES 对喷射器进行数值模拟研究受到越来越多学者的关注,一些学者尝试使用该方法对空气喷射器进行数值模拟研究^[7-9]。许常悦等^[7]使用 LES 研究了超音速空气喷射器的内部流动,阐释了工作流体和引射流体的混合和失稳过程。A. Bouhanguel 等^[8]将空气喷射器的 LES 结果与可视化实验结果进行对比。结果表明,LES 可以预测超音速工作流体和亚音速引射流体相互作用期间在混合室直段中发生的流动不稳定性。然而,大涡模拟方法尚未被成功应用于涉及非平衡凝结的蒸汽喷射器,值得进一步探索。

蒸汽喷射器中水蒸气经历迅速降压降温的跨声速膨胀过程,该过程中水蒸气逐渐偏离饱和平衡态。随着这种不平衡态的发展,喷射器内发生对流场和性能均产生重要影响的非平衡凝结现象^[10]。刘中良团队^[11-12]观察并分析了蒸汽喷射器中凝结液滴的运动轨迹和运动特征。研究发现,在超声速射流中充满大量的凝结液滴,其粒径在各个垂直位置中的分布不同;混合室端部存在逆向冷凝流动截面,周围不断产生大量凝结液滴。Yang Yan 等^[13]对比了凝结模型和理想气体模型对蒸汽喷射器的模拟结果。结果表明,理想气体模型夸大了蒸汽喷射器喷嘴中的膨胀特性,高估了膨胀不足情况下流体的马赫数,导致对流体温度的预测出现偏差。

近年来蒸汽喷射器的模型优化与对比研究引起了众多学者的关注,但相关研究中通常将蒸汽喷射器简化为二维轴对称模型,将水蒸气视为理想气体,因而忽略了三维效应和凝结效应对模拟结果的重要影响。本文同时考虑了三维效应和非平衡凝结现象,优化、验证并对比了蒸汽喷射器模型。对比了考虑凝

效应的优化模型与理想气体模型的模拟结果。基于该凝结模型,对比研究雷诺平均方法 (RANS) 中的 6 种湍流模型 (标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、标准 $k-\omega$ 模型、SST $k-\omega$ 模型、过渡 SST 模型和雷诺应力模型) 和大涡模拟方法 (LES) 对模拟结果的影响。研究成果为蒸汽喷射器内复杂跨音速凝结流动现象与湍流拟序结构之间的内在关系和影响机理研究提供了方法可行性。

1 蒸汽喷射器的数值模型

1.1 数学模型

在可压缩流动的稳态计算中,湿蒸汽的质量、动量和能量守恒方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j v_i) = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}[v_j(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(v_j \tau_{ij}) \quad (3)$$

水蒸气真实气体状态方程采用三阶维里型热力学方程^[14]:

$$p = \rho_v RT(1 + B\rho_v + C\rho_v^2) \quad (4)$$

蒸汽和水的物性方程、饱和蒸汽线和饱和液体线的方程详见文献^[2]。

假设汽液两相无滑移流动,小液滴包裹的蒸汽空间无限大。因此, $T_1 = T_v, p_1 = p_v, v_1 = v_v$ 。而且液滴直径很小,液相密度远大于气相密度。因此,湿蒸汽的密度为:

$$\rho = \rho_v / (1 - \beta) \quad (5)$$

推广至湿蒸汽的其他物性参数:

$$\varphi = \varphi_v \beta + \varphi_g (1 - \beta) \quad (6)$$

基于欧拉坐标系建立针对汽液两相混合物的控制方程。其中输运方程(7)和方程(8)分别控制了液相质量分数和单位体积液滴数^[15]:

$$\text{div}(\rho \vec{v} \beta) = \Gamma \quad (7)$$

$$\text{div}(\rho \vec{v} \eta) = \rho J \quad (8)$$

当水蒸气处于过冷状态时,气液两相处于热力学不平衡状态。水蒸气凝结动力学中的核心问题是“成核理论”和“液滴生长理论”。水蒸气凝结涉及的成核是指当水蒸气处于一定的过冷状态下,水蒸气分子在分子作用力的作用下相互碰撞、不断聚集而形成微小分子团聚(凝结核)的过程;液滴生长则是水蒸气以凝结核为核心继续凝结,使液滴粒径继续变大的过程。因此,凝结过程中的液体质量生成率 Γ 是由 2 部分质量增加构成的。式(9)中,右端第 1 项表示自发成核产

生的液相质量(即临界尺寸液滴的形成),第 2 项表示成核后液滴增长产生的液相质量^[15]:

$$\Gamma = \dot{m}_1 = -\dot{m}_v = \frac{4}{3}\pi\rho_l J r_*^3 + 4\pi\rho_l \eta \bar{r}^2 \frac{\partial \bar{r}}{\partial t} \quad (9)$$

$$J = \frac{q_c}{(1+\theta)} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right) \sqrt{\frac{2\sigma}{M_m^3 \pi}} \exp \left[- \left(\frac{4\pi r_*^2 \sigma}{3k_B T_v} \right) \right] \quad (10)$$

$$\eta = \frac{\beta}{(1-\beta)V_d(\rho_l/\rho_g)} \quad (11)$$

V_d 为液滴平均体积:

$$V_d = \frac{4}{3}\pi(\bar{r})^3 \quad (12)$$

\bar{r} 为液滴平均半径,可由式(11)和式(12)联立推导:

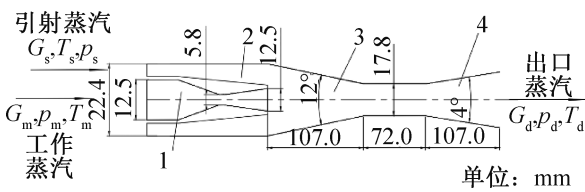
$$\bar{r} = \sqrt[3]{\frac{3\beta}{4\pi\eta(1-\beta)(\rho_l - \rho_v)}} \quad (13)$$

采用学者们广泛使用的简化 Young-Gyarmathy 液滴生长模型^[16]:

$$\frac{\partial \bar{r}}{\partial t} = \frac{p}{h_{lv}\rho_l \sqrt{2\pi RT}} \frac{\gamma + 1}{2\gamma} C_1 \left(1 - \frac{r_*}{\bar{r}} \right) (T_{sat} - T) \quad (14)$$

1.2 边界条件

1) 入口边界:初始液相质量分数 β_0 为 0,并通过给定进口总压、进口总温来确定水蒸气的进口初始参数。为实现模型验证后的准确分析,蒸汽喷射器的结构、尺寸及计算参数均取自 Chen Y. M. 等^[17]的喷射制冷循环系统实验,如图 1 和表 1 所示。



1 喷嘴;2 接受室;3 混合室;4 扩散器。

图 1 蒸汽喷射器的结构与尺寸

Fig.1 Structure and size of the steam ejector

表 1 计算参数

Tab.1 Computation parameters

算例	p_m/kPa	$T_m/^\circ\text{C}$	p_s/kPa	$T_s/^\circ\text{C}$	p_d/kPa
ag	11.9	51.3	1.8	15.8	1.9~2.1
bf	15.5	56.2	1.3	10.8	1.4~2.4
cf	19.6	61.6	1.3	10.8	1.4~2.9
df	24.8	66.8	1.3	10.8	1.4~3.2
be	15.5	56.2	1.0	13.2	1.1~2.2
ce	19.6	61.6	1.0	13.2	1.1~2.6
de	24.8	66.8	1.0	13.2	1.1~3.3

2) 出口边界:给定出口压力。

3) 壁边界:绝热、无滑移、无渗透的固体壁面。

4) 湍流边界条件:工作蒸汽和引射蒸汽的湍流黏度比分别为 500 和 100,工作蒸汽和引射蒸汽的湍流强度分别为 5% 和 2%。

1.3 区域离散与数值求解方法

建立蒸汽喷射器三维模型的六面体结构化网格。将蒸汽喷射器网格分为引射蒸汽流通的低速流区、喷嘴喉口至扩散器出口轴心区域的激波区以及近壁面的边界层区,如图 2 所示。低速流区雷诺数 (Re) 低、各种参数变化梯度小、涡尺度大,所需网格相对稀疏。激波区内存在复杂的超音速流动现象,如气动激波、凝结激波、壅塞和非平衡相变^[18]。边界层区存在边界层分离和漩涡^[19]。因此,激波区和边界层区的网格需局部加密。

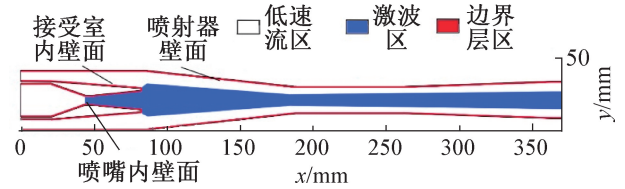


图 2 蒸汽喷射器网格分区

Fig.2 Grid partition of steam ejector

在此基础上,基于有限体积法对上述数学模型进行稳态数值求解。采用 $k-\omega$ SST 湍流模型处理 N-S 方程^[19]。使用密度耦合隐式求解器。变量梯度插值方法采用基于节点的 Green-Gauss 法。对流项和扩散项分别采用二阶迎风和 Roe-FDS 格式离散。

2 结果与分析

2.1 蒸汽喷射器建模优化及影响

2.1.1 边界层区网格优化及影响

根据壁面法线距离,湍流流动划分为内层和外层流动。外层的流动是完全湍流区,内层流体运动受壁面流动条件的影响显著。 y^+ 为网格第 1 层节点距壁面的无量纲距离,它不仅影响壁面附近流场,对整体流动特性的影响也较大,通常存在一个合适的取值范围使模拟结果最佳^[20]。若首先加密激波区或低速流区,势必影响近壁网格尺度(即 y^+),无法实现控制变量。因此,在蒸汽喷射器建模优化中应先确定最佳 y^+ 。

边界层的厚度与流体 Re 呈负相关,为了得到相同范围的 y^+ ,不同区域壁面加密程度不同。如图 2 所示,喷射器壁面附近是低速的引射蒸汽,流体 Re 最小,边界层最厚,近壁区网格无需大幅度加密即可满

足 y^+ 需求;喷嘴出口附近的压力低于引射蒸汽压,压差导致接受室内引射蒸汽速度逐渐增大, Re 逐渐增大,接受室内壁面边界层逐渐变薄,所以接受室内壁面近壁区网格需要进一步加密才可以满足 y^+ 需求;工作蒸汽在喷嘴喉口处达到音速, Re 大幅增大,边界层变得极薄,需要大幅度加密喷嘴近壁区的网格以满足 y^+ 需求。因此,既要保证 y^+ 要求,又要使网格数尽可能少,喷射器壁、接受室内壁和喷嘴区的加密程度应不同。

保持激波区、低速流区网格数不变,逐级加密边界层区网格,直至模拟结果与边界层区网格数量无关。图3所示为当 $x = 80 \text{ mm}$ 时(混合室收缩段,图2),喷射器三维网格的纵向剖面图,该位置可以同时显示出不同区域的网格疏密程度。

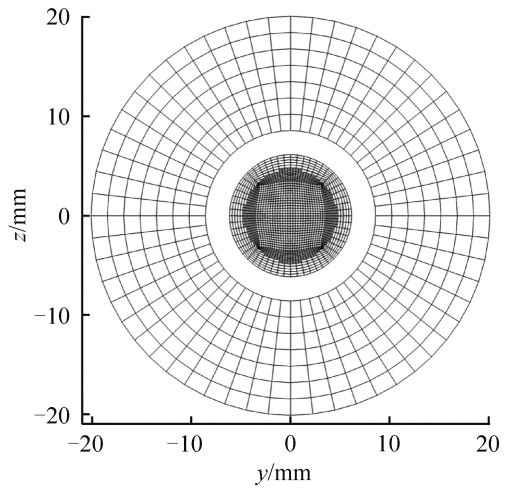
不同 y^+ 网格的模拟结果如图4所示。由图4可知,当所有壁面最大 $y^+(y^+_{\max})$ 等于 2.5 时,壁面切应力分布、轴线速度分布和喷射系数(引射蒸汽质量流量与工作蒸汽质量流量之比)均与 $y^+_{\max} = 0.85$ 时几乎相同。因此,图3(b)所示网格的模拟结果不再随着 y^+ 值的减小而改变,即 $y^+_{\max} = 2.5$ 时近壁区网格疏密程度最佳。在此之前, y^+ 对壁面附近流场、激波区和整体性能均有很大影响。流体受激波压缩,流动参数发生突跃变化:压力、温度和密度突升,速度突降。因此,流体速度突降的次数和波动幅度与激波的数量和强度呈正相关,如图4(b)所示。

随着 y^+ 增大,接受室壁面边界层分离位置后移喷射器总长的 5.9%, y^+ 过大 ($y^+_{\max} = 18$) 无法捕捉到扩散器内的边界层分离(图4(a));捕获的激波强度增大、第1激波区激波个数由4个增至6个,第2激波区激波个数由2个增至3个(图4(b));引射蒸汽质量流量增大 23%、工作蒸汽质量流量减小 4%、喷射系数提高 29%(图4(c))。

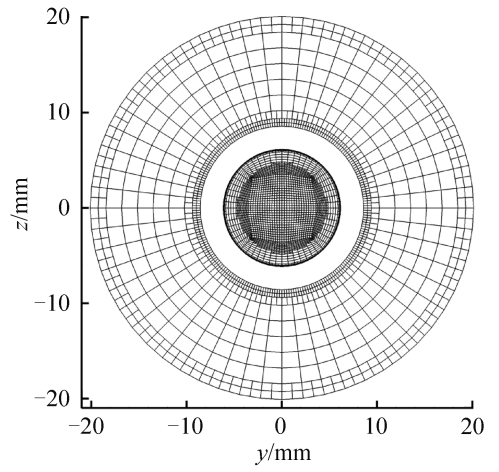
2.1.2 激波区网格优化及影响

在图3(b)所示的最佳近壁区网格的基础上,保持低速流区网格数不变,对激波区网格进行逐级粗化、细化,直至模拟结果与激波区网格数量无关,图5所示为当 $x = 120 \text{ mm}$ 时(混合室收缩段,图2),喷射器三维网格的纵向剖面图,该位置可以显示激波区网格的疏密程度。中尺度网格的模拟结果独立于激波区网格数,如图6所示。此时激波区和边界层区网格的疏密程度均最佳。

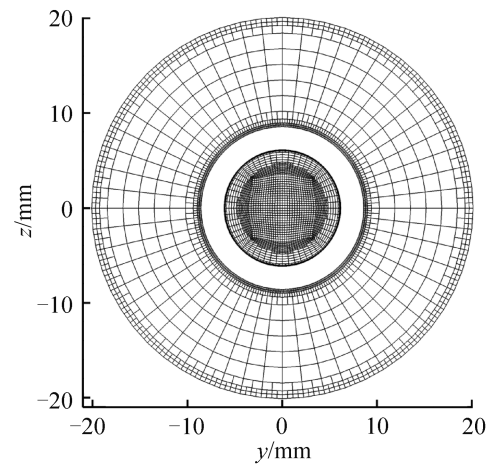
由图6可知,激波区网格主要影响激波区流场和整体性能。在达到最优网格之前,随激波区网格数增加,得到的激波强度越大,工作蒸汽质量流量不变、引射蒸汽质量流量和喷射系数均减小约 6%。



(a) 粗网格 ($y^+_{\max} = 18$)



(b) 中尺度网格 ($y^+_{\max} = 2.5$)



(c) 细网格 ($y^+_{\max} = 0.85$)

图3 y^+ 不同时的横截面网格

Fig.3 Different y^+ cross-sectional grids

2.1.3 低速流区网格优化及影响

在图5(b)所示的最佳激波区和边界层区网格的基础上,逐级粗化、细化低速流区网格,直至模拟结果与网格数量无关,此时喷射器网格最佳。图7所示为

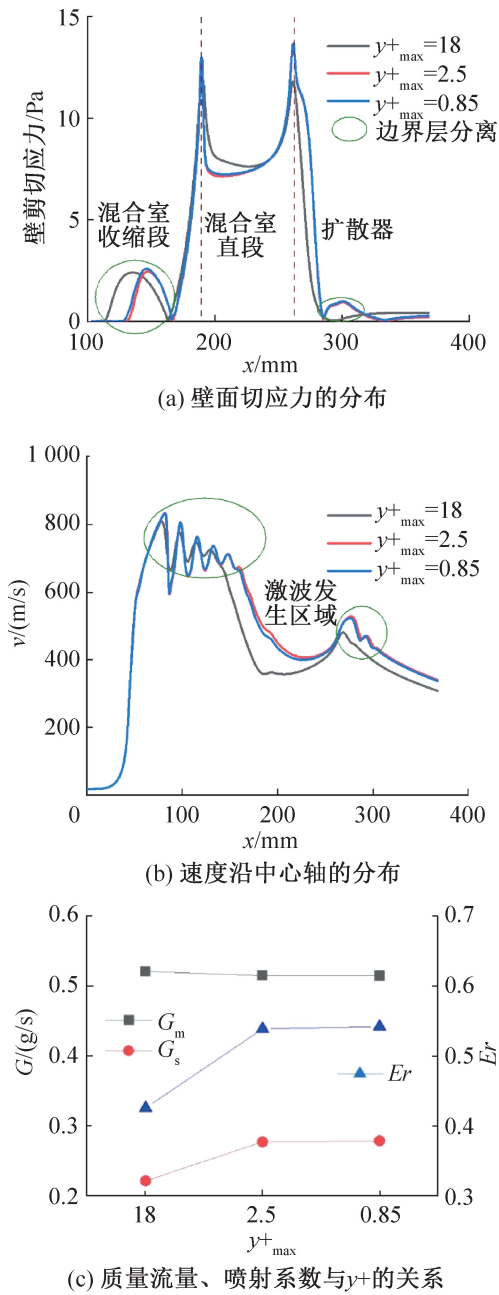


图4 不同 y^+ 网格的模拟结果

Fig.4 Simulation results of different y^+ grids

当 $x=80\text{ mm}$ 时,网格的纵向剖面图。图8所示为不同尺度的低速流区网格模拟结果,由图8可知,低速流区中尺度网格的模拟结果与细密网格结果一致。

如图8所示,低速流区网格数主要影响引射蒸汽质量流量。模拟结果与网格数独立前,随低速流区网格数增多,工作蒸汽质量流量几乎不变,引射蒸汽质量流量和喷射系数均增大大约17%,激波特性不变。

2.1.4 网格离散化精度分析与网格质量参数

离散误差取决于网格大小和间隔。本文使用网格收敛指数(grid convergence index, GCI)方法验证网格离散化精度^[20]。GCI方法基于Richardson外推

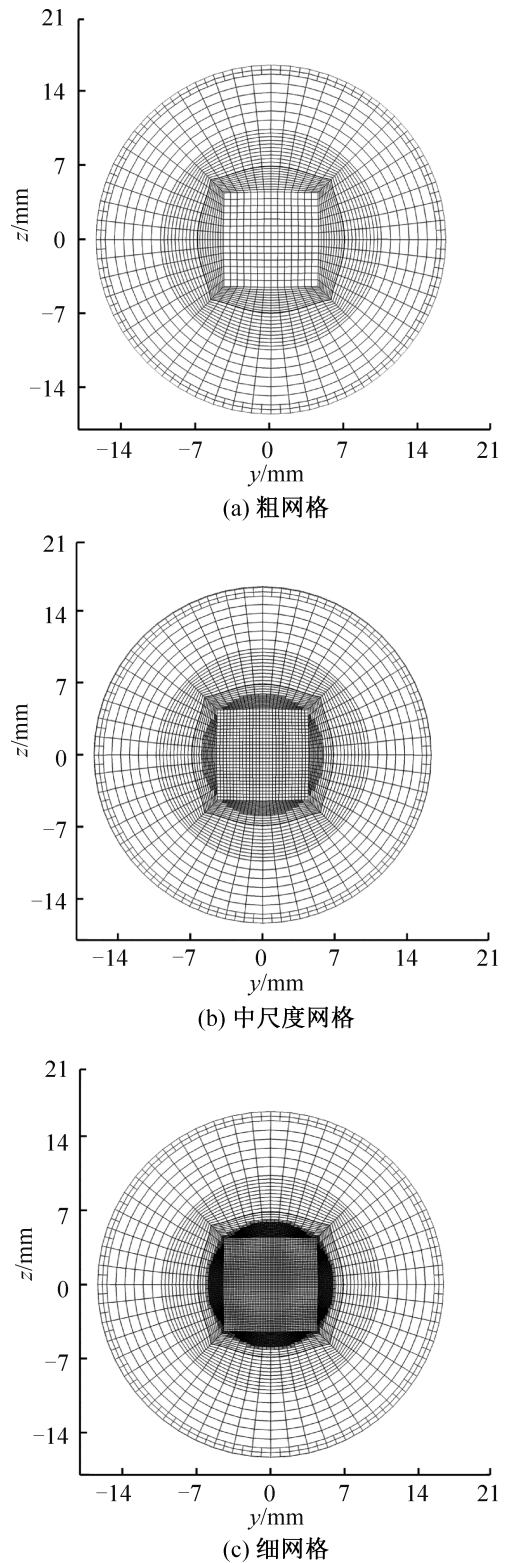
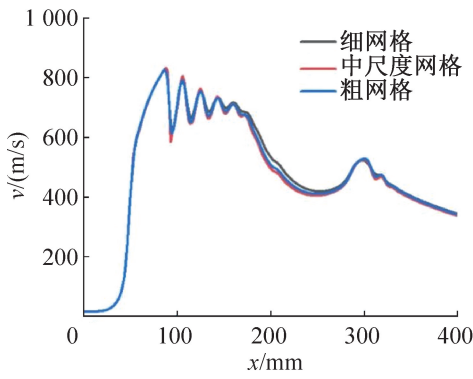


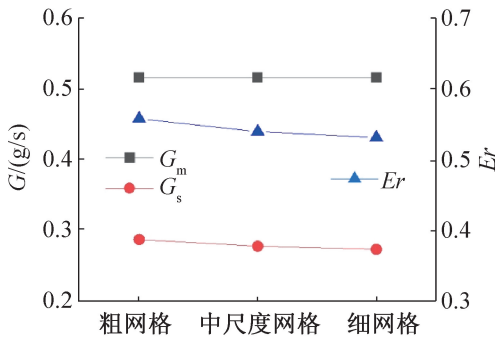
图5 不同尺度的激波区网格

Fig.5 Different scales of shock zone grids

法,根据3种不同尺度网格的计算结果,可以估算出无限细密网格得到的外推解,以确定上述3种不同尺度(细尺度网格1、中尺度网格2、粗尺度网格3)网格的离散化误差。选取轴线静压作为GCI计算结果的



(a) 速度沿中心轴的分布



(b) 质量流量、喷射系数与网格尺寸的关系

图 6 不同尺度的激波区网格模拟结果

Fig.6 Simulation results of different shock zone grids

分析参数,计算结果如表 2 所示。根据文献^[9]的判断标准,中尺度网格与细密网格模拟结果的相对误差 e_{21} 、细密网格模拟结果与外推解的相对误差 e_{ext} 均在可信范围内,验证了网格的离散化精度。因此,图 7 (b) 中尺度网格不仅满足解与网格数的独立性,而且具有很好的离散化精度,还因具有较少的网格数而降低了计算成本和时间成本,为蒸汽喷射器最佳网格。

表 2 不同模型的 GCI 计算结果

Tab.2 Calculated results of the GCI method

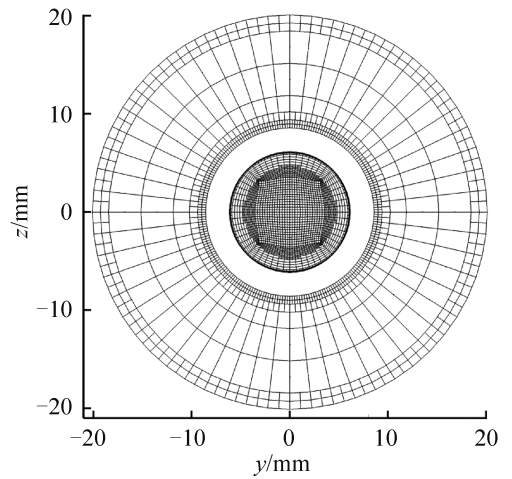
参数	P	$e_{ext}/\%$	$e_{21}/\%$	$GCI_{fine}^{32}/\%$	$GCI_{fine}^{21}/\%$
平均值	4.16	0.76	0.40	2.12	0.45
最小值	0.11	4.80×10^{-3}	4.60×10^{-5}	0.95	1.17×10^{-4}
最大值	18.99	18.21	5.92	102.15	26.48

注: GCI_{fine}^{32} 表示网格 3 和网格 2 之间的网格收敛指数; GCI_{fine}^{21} 表示网格 2 和网格 1 之间的网格收敛指数。

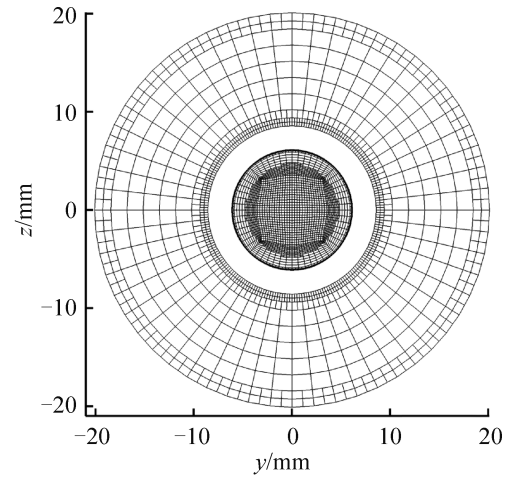
蒸汽喷射器三维六面体结构化网格如图 9 所示。优化后的网格数为 180 万,网格最大纵横比为 16、最小正交质量为 0.2、最小角度为 70° 、最低网格质量为 0.7。蒸汽喷射器不同壁面的 $y+$ 分布如图 10 所示。

2.2 非平衡凝结与理想气体模型对比分析

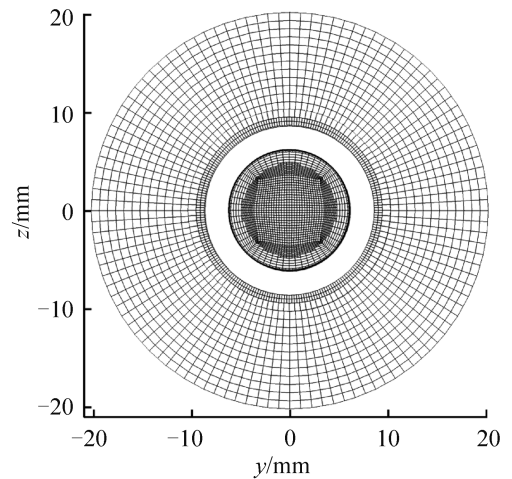
将上述非平衡凝结优化模型与理想气体模型的



(a) 粗网格



(b) 中尺度网格



(c) 细网格

图 7 不同尺度的低速流网格

Fig.7 Different scales of low-velocity flow zone grids

模拟结果与 Chen Y. M. 等^[17]实验结果进行对比,如图 11 所示(图中字母表示的工况参数见参考文献^[17])。与实验值相比,非平衡凝结模型得到的喷射系数 (Er_{max}) 和临界出口压力 (p_d^*) 的平均相对误差分别为 4.9% 和 13.4%,具有很好的一致性。此外,非

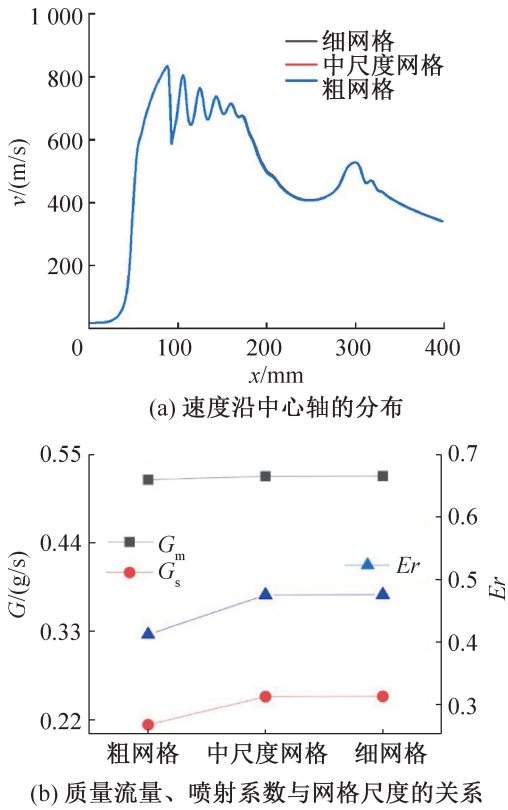


图8 不同尺度的低速流区网格模拟结果
Fig.8 Results of different low-velocity flow zone grids

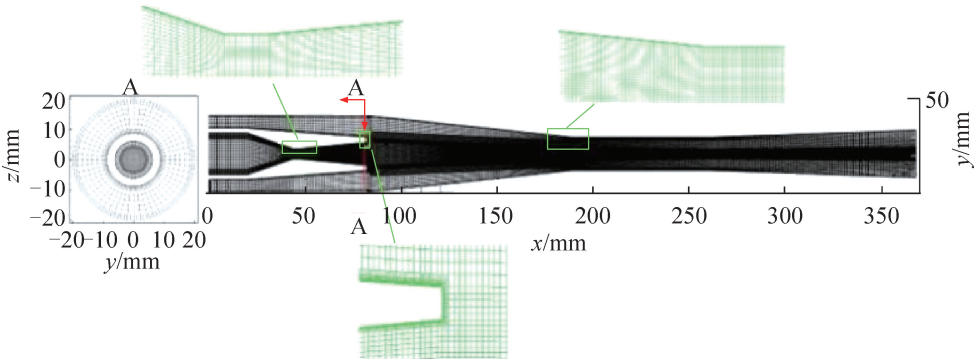


图9 蒸汽喷射器的最优三维网格
Fig.9 Optimal 3-D mesh for the steam ejector

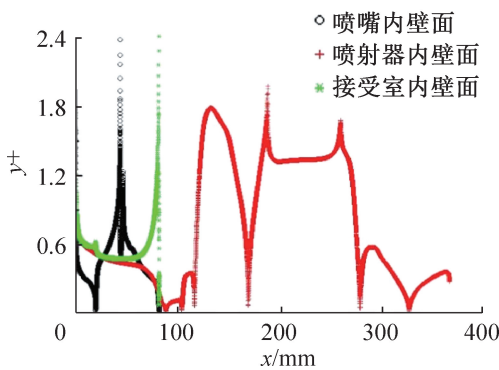


图10 不同壁面的 y+分布
Fig.10 y+ profile along different walls

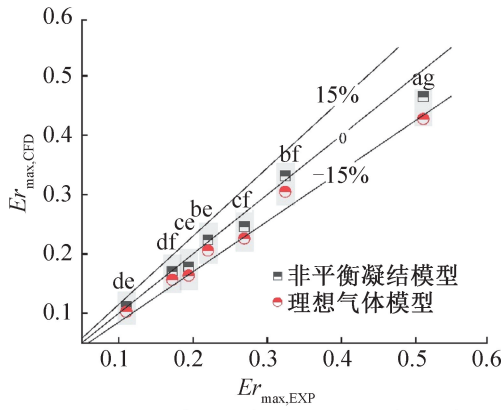
平衡凝结模型的模拟结果比理想气体模型的模拟结果更接近实验值。与理想气体模型相比,使用非平衡凝结模型可使 Er_{max} 与实验值的平均相对误差减小 72.0%、最大相对误差减小 45.6%, p_d^* 与实验值的平均相对误差减小 29.9%、最大相对误差减小 21.5%。这验证了本文非平衡凝结优化模型的可信性和优越性。

2.3 非平衡凝结模型湍流处理方法对比

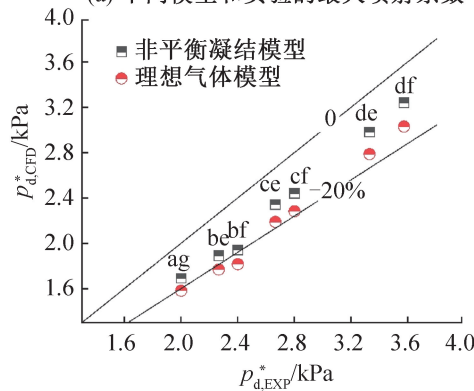
基于上述非平衡凝结模型,对比分析蒸汽喷射器内可压缩湍流的 2 种处理方法的模拟结果,即大涡模拟(LES)方法和雷诺平均方法(RANS)。图 12 统计了 7 种不同工况(表 1)下,分别使用雷诺平均方法中 6 种湍流模型($k-\epsilon$ Standard、 $k-\epsilon$ RNG、 $k-\omega$ Standard、 $k-\omega$ SST、Transition SST、RSM)和大涡模拟方法得到的喷射系数与实验值的相对误差。 $k-\omega$ Standard 模型总是高估喷射系数, $k-\epsilon$ Standard、 $k-\epsilon$ RNG、Transition SST、RSM 模型总是低估喷射系数。 $k-\omega$ SST 和大涡模拟方法的模拟结果最接近实验值,喷射系数相对误差小于 $\pm 11\%$,如图 12 中灰色区域所示。

图 13 对比了相同工况下($p_m = 11.9$ kPa, $p_s = 1.3$ kPa, $p_d = 1.4$ kPa),大涡模拟方法和雷诺平均方

法中的 $k-\omega$ SST 湍流模型、二维轴对称和三维 RANS 模型得到的蒸汽喷射器流场(液体质量分数云图)。湍流脉动的各向异性导致大涡模拟方法需应用于三维模型^[21]。大涡模拟方法得到了不同时间下的工作蒸汽和引射蒸汽混合过程:混合室内射流区和扩散器内的 2 列激波链分别逐渐形成,强度先增大后减小,激波链位置向上游移动;混合室内的冷凝液质量分数先增大后减小,扩散器内的冷凝液质量分数逐渐减小。在最终稳定状态时,与三维 RANS 中的 $k-\omega$ SST 湍流模型模拟结果相比,LES 得到的液体质量分数更低,尤其在扩散器区域。对比二维模型和三维模型的



(a) 不同模型和实验的最大喷射系数



(b) 不同模型和实验的临界出口压力

图 11 不同模型模拟结果与实验值的对比

Fig.11 Comparison of simulation results of different models with experimental values

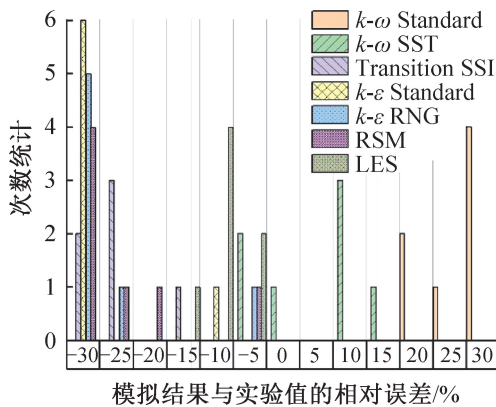


图 12 不同模型模拟结果与实验值相对误差的次数统计

Fig.12 y^+ relative error number between simulation results and experimental values of different models

模拟结果可知,二维轴对称模型流场中的冷凝质量分数(β)明显小于三维轴对称和三维非轴对称模型,这是由于三维效应消耗了混合过程中的更多能量。应用耦合非平衡凝结模型的大涡模拟方法对蒸汽喷射器的数值模拟,为后续工作中进一步深入研究蒸汽喷射器内复杂跨音速凝结流动现象与湍流拟序结构之间内在关系和影响机理提供了可行性。

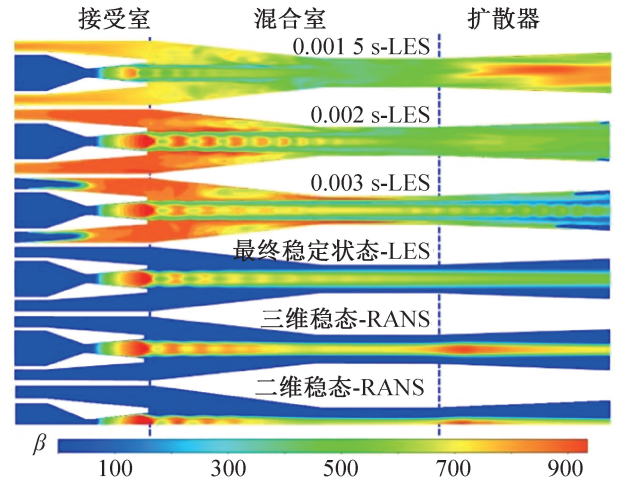


图 13 LES 和 RANS 的蒸汽喷射器液体质量分数云图

Fig.13 Liquid mass fraction contours of steam ejectors with LES and RANS

3 结论

本文同时考虑三维和非平衡凝结效应,优化、验证并对比了适用于喷射式制冷系统的低压力工况下的蒸汽喷射器数值模型。优化后的蒸汽喷射器模型可以以最低计算成本可靠预测喷射器性能并捕捉其内部非平衡凝结、激波等复杂流动现象。得到如下结论:

1) 蒸汽喷射器非平衡凝结模型得到的喷射系数和临界出口压力与实验值的平均相对误差分别为 4.9% 和 13.4%。与理想气体模型相比,本文的凝结模型可使喷射系数和临界出口压力的平均相对误差分别降低 72.0% 和 29.9%。

2) 在蒸汽喷射器建模优化中,第 1 层网格节点距壁面的无量纲距离 y^+ 、对壁面附近流场、激波特性和整体性能均有很大影响。在满足模拟结果与 y^+ 独立之前, y^+ 越大,捕获的激波强度越大、个数越多,引射蒸汽质量流量越大、工作蒸汽质量流量越小、喷射系数越大。 y^+ 过大时,无法捕捉到扩散器内的边界层分离。最佳近壁区网格的最大 y^+ 为 2.5。未达到最优网格前,加密激波区网格,捕获的激波强度越大,工作蒸汽质量流量几乎不变、引射蒸汽质量流量和喷射系数均越小;加密低速流区网格,引射蒸汽质量流量越大,喷射系数越大。

3) 耦合非平衡凝结模型的大涡模拟方法和雷诺平均方法中 $k-\omega$ SST 湍流模型对蒸汽喷射器的模拟结果吻合实验值,喷射系数的最大相对误差均小于 11%。前者得到的液体质量分数更低,且该方法弥补了蒸汽喷射器内复杂跨音速凝结流动现象与湍流拟序结构之间内在关系研究的方法欠缺。

符号说明

- B ——第二维里系数, m^3/kg
- C ——第三维里系数, m^6/kg^2
- E ——总能, J
- Er ——喷射系数
- G ——质量流量, kg/s
- h ——比焓, J/kg
- J ——成核率, $1/s$
- k_B ——玻尔兹曼常数
- M_m ——水分子质量, kg
- m ——质量, kg
- p ——压力, Pa
- P ——表观阶数
- q_c ——凝结系数
- r ——液滴粒径, m
- R ——气体常数, $J/(mol \cdot K)$
- S ——过饱和比
- T ——温度, K
- t ——时间, s
- V ——体积, m^3
- v ——速度, m/s
- β ——液体质量分数
- Γ ——液体质量生成率, kg/s
- ρ ——密度, kg/m^3
- η ——单位体积液滴数, $1/m^3$
- θ ——非等温校正系数
- τ ——应力张量, N/m
- λ ——导热系数, $W/(m \cdot K)$
- φ ——GCI 中的网格解
- γ ——比热容比
- δ ——表面张力, N/m

下标

- l——液
- v——气
- *
-
- sat——饱和
- d——出口流体
- eff——有效
- i ——空间方向
- j ——空间方向
- m——工作流体
- s——引射流体
- t——喉部

of Liaoning” (No. LJ212410150010).)

参考文献

- [1] 陈光明, 孙翔, 宣永梅, 等. 喷射器及其在制冷中的应用研究进展[J]. 制冷学报, 2021, 42(3): 1-18. (CHEN Guangming, SUN Xiang, XUAN Yongmei, et al. Review of ejector research and applications in refrigeration [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(3): 1-18.)
- [2] LI Yiqiao, SHEN Shengqiang, NIU Chao, et al. The effect of variable motive pressures on the performance and shock waves in a supersonic steam ejector with non-equilibrium condensing[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 185: 108034.
- [3] 李熠桥, 沈胜强, 张梦超. 非平衡凝结超音速蒸汽喷射器 RSM 模型壁面函数法比较与分析[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(9): 2321-2325. (LI Yiqiao, SHEN Shengqiang, ZHANG Mengchao. Near-wall treatments of non-equilibrium condensing RSM model of a supersonic steam ejector[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(9): 2321-2325.)
- [4] ARUN K M, TIWARI S, MANI A. Three-dimensional numerical investigations on rectangular cross-section ejector [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 122: 257-265.
- [5] 龙俊安, 宋霞, 施骏业, 等. 两相 CO₂ 喷射器混合室直径优化与模拟分析[J]. 制冷学报, 2023, 44(1): 122-128. (LONG Jun'an, SONG Xia, SHI Junye, et al. Optimization and analysis of mixer diameter of two-phase CO₂ ejectors[J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(1): 122-128.)
- [6] 李金梦, 郑宏亮, 刘霞, 等. 基于计算流体力学模拟的蒸汽喷射器结构优化[J]. 流体机械, 2016, 44(7): 42-46. (LI Jinmeng, ZHENG Hongliang, LIU Xia, et al. Optimal design of steam ejector by computational fluid dynamics simulation[J]. Fluid Machinery, 2016, 44(7): 42-46.)
- [7] 许常悦, 周涛, 王从磊. 平面超声速引射器内部流动的大涡模拟[J]. 航空学报, 2014, 35(8): 2136-2143. (XU Changyue, ZHOU Tao, WANG Conglei. Large eddy simulation of flow in a plane supersonic ejector[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(8): 2136-2143.)
- [8] BOUHANGUEL A, DESEVAUX P, GAVIGNET E. Visualization of flow instabilities in supersonic ejectors using Large Eddy Simulation[J]. Journal of Visualization, 2015, 18(1): 17-19.
- [9] CROQUER S, LAMBERTS O, PONCET S, et al. Large Eddy Simulation of a supersonic air ejector[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209: 118177.

本文受辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金资助 (LJ212410150010) 项目资助。(The project was supported by “the Fundamental Research Funds for the Provincial Universities

- [10] ZHU Jingwei, ELBEL S. Experimental investigation of a novel expansion device control mechanism; vortex control of initially subcooled flashing R134a flow expanded through convergent-divergent nozzles [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 85: 167–183.
- [11] TANG Yongzhi, LIU Zhongliang, LI Yanxia, et al. Visualization experimental study of the condensing flow regime in the transonic mixing process of desalination-oriented steam ejector [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 197: 111849.
- [12] 汤永智, 刘中良, 武洪强, 等. 蒸汽喷射器混合过程中凝结流态的可视化研究[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(10): 2364–2372. (TANG Yongzhi, LIU Zhongliang, WU Hongqiang, et al. Visualization study on the condensation flow regime in the mixing process of steam ejector[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(10): 2364–2372.)
- [13] YANG Yan, ZHU Xiaowei, YAN Yuying, et al. Performance of supersonic steam ejectors considering the nonequilibrium condensation phenomenon for efficient energy utilisation[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 157–167.
- [14] YOUNG J B. An equation of state for steam for turbomachinery and other flow calculations[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1988, 110(1): 1–7.
- [15] DAIGUJI H, ISHAZAKI K, IKOHAGI T. A high-resolution numerical method for transonic non-equilibrium condensation flows through a steam turbine cascade[C]// *Proceedings of 6th International Symposium on Computational Fluid Dynamics*. 1995, 1: 479–484.
- [16] SENOO S, SHIKANO Y. Two-dimensional analysis for non-equilibrium homogeneously condensing flows through steam turbine cascade [J]. *JSME International Journal Series B*, 2002, 45(4): 865–871.
- [17] CHEN Y M, SUN C Y. Experimental study of the performance characteristics of a steam-ejector refrigeration system [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1997, 15(4): 384–394.
- [18] LI Yiqiao, NIU Chao, SHEN Shengqiang, et al. Double choking characteristics of three-dimensional steam ejector with non-equilibrium condensing [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211: 118446.
- [19] LI Yiqiao, NIU Chao, SHEN Shengqiang, et al. Turbulence model comparative study for complex phenomena in supersonic steam ejectors with double choking mode[J]. *Entropy*, 2022, 24(9): 1215.
- [20] CELIK I B, GHIA U, ROACHE P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130(7): 078001.
- [21] SEMLITSCH B, MIHĂESCU M. Evaluation of injection strategies in supersonic nozzle flow [J]. *Aerospace*, 2021, 8(12): 369.

通信作者简介

李熠桥,女,讲师,大连交通大学詹天佑学院,冰山冷热科技股份有限公司,17824829321, E-mail: liyiqiao@djtu.edu.cn。研究方向:多相流传热传质。

About the corresponding author

Li Yiqiao, female, lecturer, Zhan Tianyou College of Dalian Jiaotong University, Bingshan Refrigeration and Heat Transfer Technologies Co., Ltd., 86 – 17824829321, E-mail: liyiqiao@djtu.edu.cn. Research fields: multiphase heat and mass transfer.