

# 喷管非平衡态凝结研究进展

余建平, 刘雨, 王美琪, 韩永东, 胡爽, 孟成峰

(兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 气体节流过程中会产生温变效应, 喷管的凝结液化在制冷领域应用广泛。就节流过程而言, 在流动空间各点蒸汽参数变化剧烈, 是典型的非稳态、非平衡态、熵增的过程。受到流动空间及蒸汽状态参数的影响, 节流中出现变温、激波、热声、涡阶等各种有序耗散结构, 这些特殊的结构与金属材料疲劳失效产生相互关联。气体在经过喷管急速流过时存在非平衡凝结和凝结激波的产生过程: 由于急速膨胀, 热力学非平衡累积到极限而突然发生凝结, 在产生大量凝结核的同时释放出大量凝结潜热, 这部分凝结潜热释放到周围流场, 对处于超音速流动状态的水蒸气起到加热作用, 使超音速流动状态朝着音速流动状态发展, 流场发生紊乱, 导致阻塞凝结激波的产生。

**关键词:** 喷管; 凝结; 非平衡态; 激波

**中图分类号:** TK14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0935 (2020) 11-1395-04

**DOI:** 10.14029/j.cnki.issn1004-0935.2020.11.019

超声速喷嘴内的高速流动主要是产生超声速气流, 在航空航天领域应用较多。在超音速喷管的形成过程中, 会产生大量的扰动。其中所含的定常或非定常情况下激波对流场产生影响, 是航空飞行器流动的基础。喷管是火箭发动机和导弹动力系统的主要部件, 通过控制截面积的大小来调节流量大小, 膨胀加速使其获得更大的动能, 从而使得航空的动力系统具有较好的巡航能力。拉瓦尔喷管是一种典型的超音速喷管, 它通过控制管道截面的变化来调节气体流场的变化。在超声速流动中, 增大截面以提高流体速度。在跨音速的水蒸气流动中, 由于迅速膨胀, 容易发生不平衡的凝结。冷凝不仅包括相变、传热传质, 还包括冷凝激波和边界层间的扰动, 这个过程相当复杂。在缩放喷嘴中水蒸气自发凝结流动的研究中, 孙秀玲<sup>[1]</sup>等建立湿空气非平衡凝结流动数值模型, 对缩放喷管、透平叶栅及绕 CA-0.1 圆弧翼型的湿空气非平衡凝结流动进行了数值分析。杨勇<sup>[2-3]</sup>等建立跨声速非平衡流动数值模型, 研究了喷管内气动激波与凝结激波的相互作用, 同时也指出非平衡凝结相变的特性, 指出水蒸气凝结相变过程释放出大量凝结潜热, 使压力骤增, 形成凝结激波, 对超音速喷管里面的流动产生了阻塞作用。

## 1 数学模型

气相流动控制方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_g u_j) &= S_m; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_g u_j u_i) &= \frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ u \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \right] + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i' u_j') &+ S_u; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g E) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_g u_j E + u_j p) &= \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{eff}) &+ S_h. \end{aligned}$$

液相流动控制方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_S) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_S) &= S_{YS}; \\ \frac{\partial \rho N_S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho N_S u_j) &= J_S; \\ r_d &= \sqrt[3]{3Y_S / (4\pi\rho_l N_S)}. \end{aligned}$$

式中: 质量  $S_m = -m_s$ , 动量  $S_u = -m_s u_i$ , 能量  $S_h = m_s (h_{1g} - h)$ , 气液相运输方程的源项  $S_{YS} = m_s = J_S \rho_l \frac{4\pi r_c^2}{3} + 4\pi r_d^2 N_S \rho_g \rho_l \frac{dr_d}{dt}$ ,  $\rho_l$  为液相密度,  $\rho_g$  为气相密度,  $Y_S$  为湿度,  $N_S$  为液滴数,  $r_d$  为液滴平均半径,  $h_{1g}$  为相变潜热,  $J_S$  为成核率,  $r_c$  为临界半径,  $m_s$  为单个蒸汽分子的质量。

## 2 物理实验研究进展

代钦<sup>[4]</sup>等介绍了采用数字式互相关粒子图像测速系统 (DPIV) 在测量超音速喷流实验中的应用。实验数据给出马赫数  $Ma = 1.5$  的小型拉瓦尔喷管在不同总压和反压比条件下速度场、流线、涡量分布

基金项目: 甘肃省自然科学基金 (项目编号: 1610RJZA029)。

收稿日期: 2020-07-14

作者简介: 余建平 (1970-), 男, 甘肃省白银市人, 副教授, 博士, 研究方向: 流体与传热数值。

通信作者: 刘雨 (1991-), 男, 硕士, 研究方向: 流体与传热数值。

情况。最后得出在激波前后流体形成涡的分布产生明显的变化。

王超<sup>[5]</sup>等利用凝结实验,研究了音速喷嘴内湿空气凝结现象,实验数据表明在不同条件的喷嘴沿程压力,并建立了凝结流动 Eulerian 两相模型,利用数值模拟方法探究了对凝结过程可能的影响,使实验与数值模拟相互验证。

范新冬<sup>[14]</sup>等提出“空间转化为时间”思想,将喷管中流体参数随喷管出口方向转换为膨胀过程中确定位置流体参数随时间的变化,控制最小截面积来调节不同的时间尺度,采用片光技术实现凝结现象的观测,同时根据水蒸气和甲烷吸收光谱获得凝结过程中的温度变化以及水蒸气含量变化。“空间转化为时间”的试验方案可以在一定程度上模拟喷管中水蒸气的凝结过程。

曹学文<sup>[6]</sup>等实验采用消光法液滴在线测量仪,气体在喷管内高速膨胀产生的低温效应可实现混合气体的分离。Laval 喷管内气体凝结流动过程,气体在喷管喉部处发生温度降低产生凝结,液滴数目增长。不同的结构凝结效果也不一样。

边江<sup>[7]</sup>等为揭示入口温度对天然气混合物超声速凝结液化过程的影响,建立了双组分天然气混合物超声速凝结流动数学模型。结果表明,保持 Laval 喷管入口压力及气体成分不变,降低入口温度,凝结位置会靠前,同时会使更多气体发生凝结现象。

王成鹏<sup>[17]</sup>等基于纹影和剪切敏感液晶摩阻显示技术得到形成激波串的第一道激波的三维特征。控制喷管进出口压降比,对固定马赫数情况下研究了激波从喷管喉部到出口的结构特性。

翟小飞<sup>[8]</sup>等为了开展飞行马赫数 8、9 的超燃冲压发动机直连式试验研究,将中国空气动力研究与发展中心 FD-14 激波风洞改造成了激波加热超声速燃烧室直连式试验台。采用 Park、Gupta、Dunn/Kang 3 种不同的纯空气化学反应动力学模型,对 2 种马赫数喷管中的化学非平衡流动进行了数值模拟研究,并对这不同 3 种纯空气化学反应模型进行了分析。

### 3 数值模拟现状

杨勇<sup>[9]</sup>等利用数值模拟对水蒸气在喷管中流动进行了探究,研究了水蒸气超音速流动过程中的非平衡相变及凝结激波现象,揭示了压缩激波在流动之间相互作用的非平衡流动规律,发现了激波产生

的耗散效应对非平衡相变的影响,探讨了激波发生时,波阵面处核化凝结、液滴生长的变化规律。

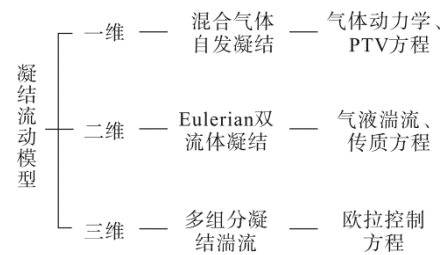


图 1 凝结流动模型

廖国进<sup>[10]</sup>等基于水蒸气非平衡凝结动力学模型和真实水蒸气模型,建立了水蒸气跨声速非平衡凝结流动数值模型,对喷管内水蒸气非平衡凝结流动进行了数值模拟,模型成功地捕捉到了凝结激波,通过实验验证了数值模拟的可靠性。非平衡凝结现象产生激波对流场形成复杂流动。

华枫<sup>[11]</sup>等引入水蒸气真实气体物性,考虑相变、速度滑移等影响因素,进行了数值模拟研究,清晰地捕捉到了“X型”凝结激波,并对其形态形成原因进行了分析,发现在喉部下游 0.1 m 处,液滴数由 0 突跃至  $10^{14}$  数量级,表明水蒸气发生非平衡凝结,极短时间内产生了大量凝结核,液滴半径和湿度也在短时间内迅速增加。

马平平<sup>[12]</sup>等引入水蒸气真实气体物性。通过 Moore 实验数据与软件模拟对比,讨论不同模型的数据计算结果。捕捉到了凝结激波现象,分析了流场参数随着凝结激波产生的影响。

曹学文<sup>[13]</sup>等基于欧拉-欧拉双流体模型,建立气相及液相流动控制方程组,对喷管内  $\text{CO}_2$  气体的凝结特性进行了数值模拟研究,指出  $\text{CO}_2$  气体凝结潜热相对于水蒸气比较小,形成激波也不明显。

龙学渊<sup>[15]</sup>对气体在高速膨胀后自发形成凝结机理研究的基础上,建立了描述气体旋转超音速凝结流动的双流体数学模型,将结构设计分析与内部流动机理研究相结合,进行了三维全流场模拟,对影响超音速喷管性能的核心指标进行了室内实验测试,采用实验与数值模拟相结合的方法,分析了所设计装置关键工艺参数的最佳运行范围,得到了一套完整的 LNG 超音速旋流分离器设计方案。

HRIC<sup>[21]</sup>等主要研究了非平衡凝结模型,在高压下到低压的过程膨胀。蒸汽的特性是通过基于样条的查表方法(SBTL)来逼近水和蒸汽的 IAPWS-95/97 热力学方程集来实现的。

曹学文<sup>[16]</sup>对空气+水+乙醇三组分(双可凝)气体超声速流动条件下凝结特性进行了数值计算,研究了三组分气体超声速凝结特性影响因素,通过与空气+水双组分(单可凝)气体对比,分析了第二种可凝组分对凝结成核的影响,指出随着三组分气体中乙醇含量的升高,Laval喷管内成核率增大,成核区域变窄,液滴形成的位置提前。

傅健<sup>[22]</sup>等引入真实气体状态方程和湍流流动的方程,研究了CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>混合气体在喷管中凝结流动过程的变化。

SUN<sup>[20]</sup>等对气体在跨音速或超声速流动中的自发凝结现象,修改了液滴形成模型。利用 Gyarmathy 模型和 Young 模型对氮气凝结流进行了模拟。通过对两相流场的传热传质分析,讨论了液滴对流场的作用结果。

邓清华<sup>[18]</sup>等针对不同进气参数条件下水蒸气从过热区膨胀进入湿蒸汽区的自发凝结规律问题,数值模拟深入分析了进气参数对水蒸气非平衡凝结过程的过冷度、液滴数、湿度、压比以及马赫数的影响,详细比较了其平衡凝结和非平衡凝结特性的差异。通过比较水蒸气的平衡凝结和非平衡凝结特性,发现喷管进气压力较低时,水蒸气非平衡凝结与平衡凝结计算结果的差异显著,Wilson 点在平衡态中湿度达到 8.40%;而当进气压力接近临界压力时,平衡凝结的计算结果基本接近非平衡凝结的结果,Wilson 点在平衡态中的湿度仅为 1.98%。

EDATHOL<sup>[19]</sup>等采用已建立的欧拉-欧拉方法可以对蒸汽非平衡凝结的超声速流动进行数值模拟。基于密度的求解器,修改控制方程的源项来考虑相变的影响。基于压力的求解器上建立欧拉-欧拉混合模型,用于预测非平衡流动。采用 IAPWS-IF97 补充状态方程描述了蒸汽的状态,并利用附加经验关系式估算了凝聚相的性质。采用 Gyarmathy 方程计算液滴增长速度。

## 4 结束语

1) 研究气体凝结成核和液滴生长的理论模型,目前国内外普遍应用的理论模型均与实验测试结果存在较大的误差,气体凝结释放的潜热对连续相气体产生的热效应影响机理研究还不够深入。

2) 多组分凝结湍流模型没有考虑气液两相之间的速度滑移边界条件以及液体相对于气相流场的影

响。欧拉双流体冷凝模型考虑了速度滑移与气液耦合之间的相互作用。

## 参考文献:

- [1] 孙秀玲,李亮,吴联为,等.跨音速湿空气非平衡凝结流动的数值研究[J].应用力学学报,2011,28(5):493-498.
- [2] 杨勇,于欢,沈胜强,等.水蒸气跨声速流动中非平衡相变与激波的耦合作用[J].工程热物理学报,2013,34(7):1347-1351.
- [3] 杨勇,沈胜强,张琨.水蒸气超音速流动中的非平衡相变特性[J].工程热物理学报,2010,31(9):1581-1584.
- [4] 代钦,魏润杰,黄湛,等.超音速喷流 DPIV 瞬时速度场实验测量[J].北京航空航天大学学报,2001,27(6):666-669.
- [5] 王超,林大炬,丁红兵,等.基于凝结实验平台的音速喷嘴凝结现象研究[J].北京航空航天大学学报,2017,43(11):55-62.
- [6] 曹学文,牟林升,赵西廓,等.Laval 喷管气体超声速凝结流动实验研究[J].低温与超导,2019,47(1):12-17.
- [7] 边江,曹学文,杨文,等.入口温度对天然气超声速液化性能的影响[J].制冷学报,2019,40(1):110-116.
- [8] 翟小飞,张扣立,白蕊尘,等.激波加热超声速燃烧室直连式试验台喷管中的化学非平衡流动[J].空气动力学学报,2020,38(2):78-83.
- [9] 杨勇,沈胜强.水蒸气超音速非平衡凝结流动中的激波效应[J].工程热物理学报,2009,30(4):97-99.
- [10] 廖国进,张军强,华枫.喷管内水蒸气非平衡凝结流动数值模拟研究[J].应用力学学报,2015,32(1):99-104.
- [11] 华枫,廖国进.喷管内水蒸气凝结相变的数值模拟研究[J].热能动力工程,2016,31(8):25-30.
- [12] 马平平,华枫,胡强,等.水蒸气超音速流动非平衡凝结相变研究[J].真空,2017,54(1):62-66.
- [13] 曹学文,赵西廓,孙文娟.超声速喷管内 CO<sub>2</sub> 气体凝结特性研究[J].石油与天然气化工,2017,46(6):7-13.
- [14] 范新冬,彭冬,金熠,等.基于 TDLAS 的水蒸气非平衡凝结过程研究[J].实验力学,2018,33(3):352-358.
- [15] 龙学渊.基于超音速流相变凝结机理的天然气液化技术研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [16] 曹学文,边江,靳学堂,等.三组分气体超声速凝结过程数值模拟与实验研究[J].石油学报(石油加工),2019,35(1):113-124.
- [17] 王成鹏,杨锦富,程川,等.超声速喷管启动过程激波结构演化特征[J].实验流体力学,2019,33(2):13-18.
- [18] 邓清华,胡乐蒙,石志昊,等.进气参数对拉伐尔喷管中水蒸气自发凝结的影响[J].西安交通大学学报,2020,54(10):116-123.
- [19] EDATHOL J, BREZGIN D, ARONSON K, et al. Prediction of non-equilibrium homogeneous condensation in supersonic nozzle flows using Eulerian-Eulerian models[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020,152:119451.
- [20] SUN W, CHEN S, HOU Y, et al. Numerical studies of nitrogen spontaneous condensation flow in laval nozzles using varying droplet growth models[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019,121:103118.
- [21] HRIC V, HALAMA J. On the numerical solution of non-equilibrium condensation of steam in nozzles[J]. *Advances in Computational Mathematics*, 2019,45(4):2147-2162.
- [22] 傅健,袁汝华,李大全,等.天然气超声速脱二氧化碳技术研究[J].当代化工,2019,48(10):73-77.

(下转第 1404 页)

- [ 12 ] KHAN K M, KHAN M, ALI M, et al. Synthesis of bis-Schiff bases of isatins and their antiglycation activity[J]. *Bioorganic & medicinal chemistry*, 2009, 17(22):7795-7801.
- [ 13 ] KHAN K, KHAN M, AMBREEN N, et al. Bis-Schiff Bases of Isatins: A New Class of Antioxidant. *Journal of Pharmacy Research*[J]. *Journal of Pharmacy Research*, 2011, 4:3402-3404.
- [ 14 ] KHAN M, KHAN K M, RAHIM F, et al. Synthesis Leishmanicidal Activities of bis-Schiff Bases of Isatins[J]. *Journal of The Chemical Society of Pakistan*, 2015, 37(6):520-526.
- [ 15 ] MUSHARRAF S G, BIBI A, SHAHID N, et al. Acylhydrazide and Isatin Schiff Bases as Alternate UV-Laser Desorption Ionization (LDI) Matrices for Low Molecular Weight (LMW) Peptides Analysis[J]. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2012, 3(12):779-789.
- [ 16 ] QURAIISHI M A, SARDAR R. Aromatic Triazoles as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Acidic Environments[J]. *Corrosion*, 2002, 58(9):748-755.
- [ 17 ] ABD EL-MAKSOU D S A, FOU DA A S. Some pyridine derivatives as corrosion inhibitors for carbon steel in acidic medium[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2005, 93(1):84-90.
- [ 18 ] EMREGÜL K C, DÜZGÜN E, ATAKOL O. The application of some polydentate Schiff base compounds containing aminic nitrogens as corrosion inhibitors for mild steel in acidic media[J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(10):3243-3260.
- [ 19 ] QURAIISHI M A, AHAMAD I, SINGH A K, et al. N-(Piperidino-methyl)-3-[(pyridylidene)amino]isatin: A new and effective acid corrosion inhibitor for mild steel[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 112(3):1035-1039.
- [ 20 ] KHAN K M, KHAN M, ALI M, et al. Synthesis of bis-Schiff bases of isatins and their antiglycation activity[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2009,17(22):7795-7801.
- [ 21 ] NAVANEETHAN M, ARCHANA J, NISHA K D, et al. Synthesis of wurtzite ZnS nanorods by microwave assisted chemical route[J]. *Materials Letters*, 2012, 66(1): 276-279.
- [ 22 ] WANG H, TIAN T, YAN S, et al. Large-scale synthesis of ZnSe nanoribbons on zinc substrate[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311(14): 3787-3791.
- [ 23 ] FLORENCE S S, UMADEVI M, AROCKIASAMY D L, et al. Tailoring of Morphology and Optical Properties of Bishydrazone-Capped ZnSe Nanorods[J]. *Australian Journal of Chemistry*, 2015, 68(10): 1508-1512.

## Research Progress in Bioactivity of Isatin Dihydrazone Compounds

YU Jie, YU Jian, YAN Guo-bing\*  
( Lishui University, Lishui Zhejiang 323000, China )

**Abstract:** Isatin dihydrazone compounds are important derivative of isatin, which has many biological activities. For further researching the relationship between the bioactivity and the structure-activity of isatin dihydrazone compounds, numerous modifications of isatin dihydrazone compounds have been carried out in recent years, and some compounds with strong activity have been synthesized. In this paper, research progress in biological activities and structure-activity relationships of isatin dihydrazone compounds was reviewed.

**Key words:** Isatin derivatives; Isatin dihydrazone compounds; Biological activity

( 上接第 1397 页 )

## Research Progress of Nozzle Non-equilibrium Condensation

YU Jian-ping, LIU Yu, WANG Mei-qi, HAN Yong-dong, HU shuang, MENG Cheng-feng  
( Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China )

**Abstract:** The temperature change effect will occur during the gas throttling process, and the condensation and liquefaction of the nozzle is widely used in the field of refrigeration. In terms of throttling process, the steam parameters change drastically at various points in the flow space, which is a typical process of non-steady state, non-equilibrium state, and entropy increase. Affected by the flow space and steam state parameters, various ordered dissipative structures such as temperature change, shock waves, thermoacoustics, and vortex orders appear in the throttle. These special structures are related to the fatigue failure of metal materials. When the gas flows rapidly through the nozzle, there is a process of non-equilibrium condensation and condensation shock waves: due to the rapid expansion, the thermodynamic non-equilibrium accumulates to the limit and condensation occurs suddenly, releasing a large amount of condensation latent heat while generating a large number of condensation nodules. Part of the latent heat of condensation is released into the surrounding flow field, which heats the water vapor in the supersonic flow state, so that the supersonic flow state develops toward the sonic flow state, and thermal congestion occurs in the flow field, resulting in the generation of condensation shock waves.

**Key words:** Nozzle; Condensation; Non-equilibrium state; Shock wave