

文章编号: 1001-4888(2018)03-0352-07

基于 TDLAS 的水蒸气非平衡凝结过程研究^{*}

范新冬¹, 彭冬², 金熠³, 杨基明¹

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽合肥 230027; 2. 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230027;

3. 中国科学技术大学工程与材料科学实验中心, 安徽合肥 230027)

摘要: 目前国内开展的高超声速飞行器地面模拟试验, 尤其是较大尺度的高焓试验, 大部分在燃烧加热风洞中进行。气流在喷管的膨胀加速过程中温度快速降低, 可能导致其中的水蒸气发生急剧凝结, 这一过程会带来试验流场参数的改变。为了考察水蒸气的凝结过程, 提出“空间转化为时间”思想, 即将喷管中气流参数沿喷管流向的变化转换为膨胀过程中固定位置气流参数随时间的变化, 设计搭建了一套模拟喷管凝结过程的试验装置, 通过调节连接段最小截面积实现不同的时间尺度, 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。结果表明: 在试验段内通过片光可以观测到水蒸气的凝结现象; 不同时间尺度下凝结过程中的温度变化趋势相近, 均为先下降后上升, 在温度趋势发生变化的时间点附近, 水蒸气摩尔分数迅速下降, 这一变化趋势与燃烧加热风洞喷管流动中参数变化的数值模拟结果具有较好的一致性; 这种“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。

关键词: 水蒸气; 凝结; 可调谐半导体激光器吸收光谱技术(TDLAS); 温度测量

中图分类号: V211.73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-014

0 引言

对高超声速飞行器技术研究而言, 地面模拟试验是认识高超声速飞行机理的重要手段。其中, 较大尺度的高焓试验大部分在燃烧加热风洞中进行, 燃烧加热后的试验气体经过喷管膨胀后温度下降, 气流中的水蒸气可能发生急剧凝结, 凝结释放潜热, 使气流参数尤其是温度发生变化, 给试验结果带来一定的不确定性。

国外对风洞中水蒸气凝结的研究开始较早, 从 1936 年 Prandtl 在喷管超声速流中发现了稳定的凝结激波^[1]之后, 喷管中凝结的研究得到了广泛的关注。Oswatitsch^[2]、Head^[3]、Lukaiewicz^[4]、Wegene^[5]从试验上对凝结现象进行了研究, 考察了凝结发生与喷管尺寸、相对湿度间的关系, 得到了描述两者关系的经验公式。本世纪初, 伍斯特理工学院应用 TDLAS 开展了重水在喷管中的凝结研究, 发现重水凝结时温度有回升趋势^[6-8]。在数值研究方面, 1966 年 Hill 基于成核和液滴生长理论提出矩方法, 开发了描述水蒸气凝结的一维程序^[9]。Saltanov 和 Thalenko 采用一维程序, 首次研究了非定常两相喷管流动中的纯蒸汽非平衡凝结过程^[10]。经过几十年的发展, 国外在试验和数值模拟方面均获得了很多成果, 但仍以数值模拟为主。国内对于喷管中水蒸气凝结的研究起步较晚, 且基本限于数值模拟方

^{*} 收稿日期: 2017-01-20; 修回日期: 2017-04-27

基金项目: 自然科学基金(11202204); 中央高校基本科研业务费专项资金(WK2091010001); 高超声速冲压发动机技术重点实验室基金(20130101005)

通讯作者: 金熠, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为光学精密检测技术、基于激光的高速流场显示和凝结现象机理的实验诊断。

Email: yjin@ustc.edu.cn

面。杨勇^[11]和 Wang^[12]等对超声速喷管中的水蒸气凝结过程开展了研究;乐嘉陵^[13]等分析了喷管中水蒸气的凝结过程和有限速率的液滴的增长过程;程万^[14]等对伴随水蒸气凝结的超声速相变流动机理及对流场品质的影响开展了较详细的数值研究。

迄今所开展的诸多研究主要集中在数值模拟方面,而针对喷管中水蒸气非平衡凝结的定量试验,尚未见到深入细致的系统性研究。此外,对于相同出口马赫数但不同尺寸的喷管来说,气流流经喷管的时间不同,水蒸气非平衡凝结对气流参数带来的影响是否一致,也关系到不同尺寸风洞试验参数和结果的一致性问题,目前这方面工作还远未形成足够的支撑。本文为了定量考察水蒸气非平衡凝结过程,并体现尺度效应的影响,研制了一套新型模拟装置。该装置采用“空间转化为时间”思想,即将喷管中气流参数沿喷管流向的变化转换为含蒸气容器膨胀过程中固定位置热力参数随时间的变化。通过调节泄压段的节流面积实现不同的膨胀时间尺度,对应不同尺寸风洞中的膨胀过程。利用这种模拟装置可以快速有效地开展水蒸气非平衡凝结过程的研究,同时避免了使用多种尺寸喷管带来的昂贵成本。

在测量方面,由于相变试验测量的困难,目前已开展的诸多的试验研究中,多关注总压和流场结构等综合性信息,定量测量多集中在凝结液滴尺寸方面。对于带相变的流场,气体温度和组分浓度的定量实时测量是研究相变现象的重要手段,而近红外可调谐半导体激光器吸收光谱(TDLAS)技术凭借其高灵敏度、响应快、非接触等优点使定量化获得凝结过程中参数的变化成为可能。

基于以上考虑,本文对三种膨胀时间尺度下水蒸气的非平衡凝结过程进行试验研究,利用 TDLAS 波长扫描法获取流场中组分含量和静温,获得凝结过程中的参数变化信息,同时辅以片光技术定性观察液滴形成过程,并与数值结果对比,以期揭示水蒸气凝结对气流参数的影响和提供第一手试验数据。

1 试验方法和设备

1.1 试验方法

作者课题组已在数值模拟方面针对喷管中的水蒸气凝结过程进行了大量研究,图 1 给出了典型状态下考虑水蒸气相变的喷管流场温度云图^[15],其中喷管长度 23.2m,喷管直径 5m。从云图上可以看出,由于水蒸气凝结释放热量,喷管在距喉道 8.4m 处温度出现回升。为了从试验方面考察喷管中的水蒸气凝结过程,本文开展了探索性的研究。考虑到沿喷管流向布置多个 TDLAS 测点不仅试验成本昂贵,而且不易捕捉水蒸气的完整凝结过程,基于此,提出了“空间转化为时间”的试验方案,将气流沿喷管的膨胀过程转变为试验段内气体随时间的膨胀过程,通过测量试验段内固定位置气体参数随时间的变化来体现气流沿喷管流向的变化。对于相同马赫数不同尺寸喷管,沿喷管的压力下降速率不同。试验中通过调节连接段的最小截面积控制试验段的压力下降速率,增加节流面积意味着压力下降的加快,与小尺度喷管相对应,反之亦然。

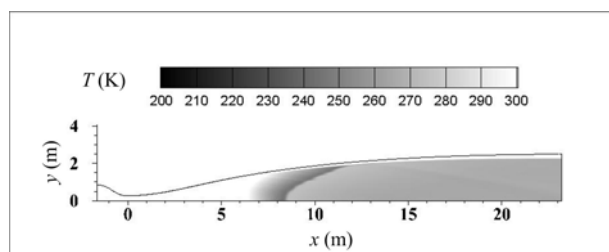


图1 考虑水蒸气相变喷管流场温度云图^[15]

Fig. 1 Temperature contour of nozzle flow field in the water vapor condensation flow^[15]

1.2 试验设备

本文的试验设备如图 2 所示,包括三个部分:喷管模拟系统、TDLAS 测量系统和片光显示系统。喷管模拟系统由试验段($400\times 100\times 35\text{mm}^3$)、连接段($\Phi 80\text{mm}\times 400\text{mm}$)、真空罐、气体注入装置、装膜段等部分组成。试验前,将试验段抽成真空,先后注入定压的水蒸气、甲烷和氮气,同时将真空罐抽到试验所需压力;在距离试验段 80mm 的连接段处使用 PET 膜将高低压隔开,采用电控破膜装置实现破膜。

TDLAS 采用波长扫描法,水蒸气的吸收谱线对选取 $1395.004\text{nm}/1409.27\text{nm}$ 。另外,本文还特别引入远离相变的甲烷示踪气体进行吸收谱线的同时测量,检测基于水蒸气吸收谱线测量结果的准确性。甲烷的吸收谱线选取 1653.7nm 。信号发生器产生频率 20kHz 的锯齿波输入激光控制器,控制激光器扫过对应的波长,其中水蒸气吸收谱线对采用相位差 180° 的半锯齿波,经过光纤耦合器,两束激光经同

一光路穿过试验段,甲烷吸收谱线则采用连续锯齿波,经单模光纤引入试验段。经过 400mm 光程后,多模光纤经探测器将光信号转换为电信号,利用示波器进行数据采集记录。对于暴露在空气中的光路部分,试验中通过加充满氮气的保护罩,消除空气中水蒸气对试验结果的影响。

片光流场显示系统主要由另一激光器光源与高速摄影组成。试验段底面和侧面均安装有机玻璃板,激光光源沿底部中线垂直射入试验段,高速摄影在侧面中心区域拍摄。其中激光器采用二极管泵浦固体激光器,发出功率 15000mW、波长 532nm 的绿光,高速摄影采样频率为 20000 幅/秒,曝光时间 $50\mu\text{s}$ 。试验中利用安装在试验段顶部的压力传感器和 DG645 数字延时发生器使 TDLAS、压力采集和片光拍摄实现同步,方便试验数据后处理。

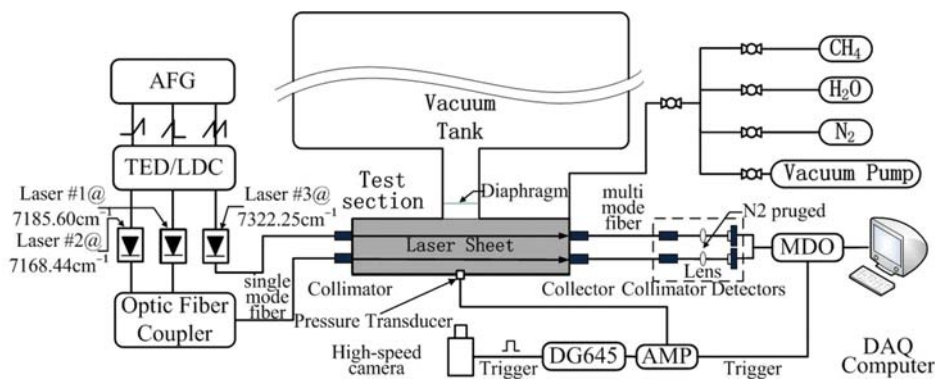


图 2 试验设备示意图

Fig. 2 Schematic of experiment system

1.3 系统标定与试验参数

试验前对 TDLAS 测量系统进行标定,采用水蒸气吸收谱线对测量室温,甲烷单条吸收谱线测量等熵膨胀温度变化过程。其中前者已有较好的准确度^[16],这里不再赘述。按照 TDLAS 测量原理,组分分压和温度在 TDLAS 测量原理中均为未知数,可以通过两条吸收谱线建立两个方程计算得到,而在利用甲烷谱线测量等熵膨胀过程温度变化标定试验中,由于只有单条吸收谱线,需要得知其中一个变量求解另一变量。考虑到在等熵膨胀过程中,甲烷不发生相变,其摩尔分数保持不变,该值为初始时刻的甲烷压力值和试验段总压力值之比,甲烷组分分压便可以通过甲烷摩尔分数和压力变化曲线得到,利用 TDLAS 原理即可计算得到温度。

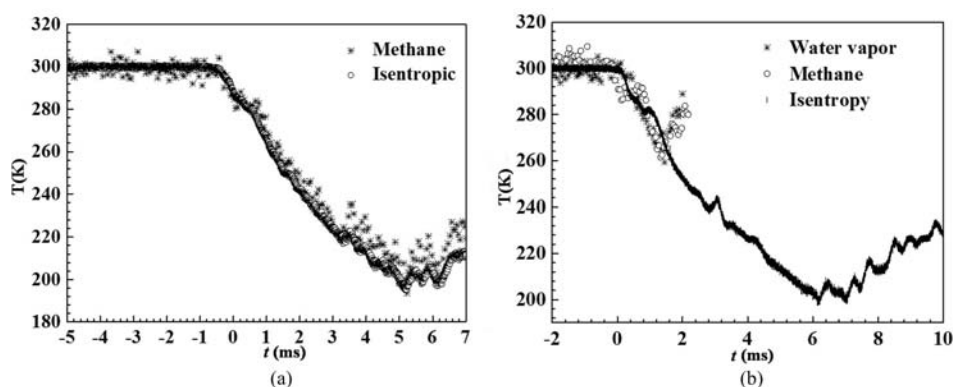


图 3 (a)甲烷测量与等熵计算温度对比图;(b)膨胀时间尺度 7ms 水蒸气测量、甲烷测量和等熵计算温度对比图

Fig. 3 (a) Comparison between TDLAS result based on methane and Isentropic theory; (b) Comparison among TDLAS result based on water vapor, methane and Isentropic theory of the 7ms inflation time scale

图 3(a)给出了等熵膨胀过程中利用甲烷单条吸收谱线 TDLAS 测量与按照等熵理论计算的温度对比图。试验前甲烷测量平均温度值为 299.1K,方差为 2.68K,温度计示数为 300K,甲烷测量温度与温度计示数偏差为 0.3%。试验过程中,3ms 前两者结果符合良好,之后由于甲烷分压过低,两种计算结果偏差稍有增加,总体两种方法结果符合较好,说明甲烷单线测量比较可靠。

图 3(b)为膨胀时间尺度 7ms 下利用水蒸气吸收谱线、甲烷吸收谱线和等熵关系理论计算出的温度结果。其中,等熵关系理论温度计算结果为持续下降趋势,与前两者有较大的不同,而基于水蒸气吸收谱线与基于甲烷吸收谱线的温度测量结果符合较好,均为先下降后上升再下降的趋势,说明在这类试验状况下水蒸气的相变对基于水蒸气吸收谱线的测量结果影响不明显。

试验中,通过在连接段中添加不同孔径的堵片进行节流,控制膨胀时间。不加堵片下,连接段的直径为 80mm,膨胀时间为 7ms;通过堵片可将连接段的最小直径调整为 30mm 与 20mm,相应的膨胀时间为 25ms 与 60ms。按照膨胀时间不同,试验分为三组(见图 4),膨胀时间分别为 7ms、25ms、60ms。其中第一组试验由于压力振荡,膨胀时间取压力到达第一个谷底的时刻,其余均为压力平稳时刻。对于相同马赫数不同尺寸喷管,气体流经整个喷管的时间不同,小尺寸喷管对应于小时间尺度,反之亦然。本试验中,通过三个膨胀时间尺度 7ms、25ms 及 60ms 来对应于小、中、大不同尺寸喷管。试验时,在高压段添加水蒸气 3.5kPa,甲烷 6.5kPa,其余部分为氮气,试验段内初始压力控制在 40kPa 左右,真空罐压力保持在 10kPa 左右,初始温度为室温 300K。

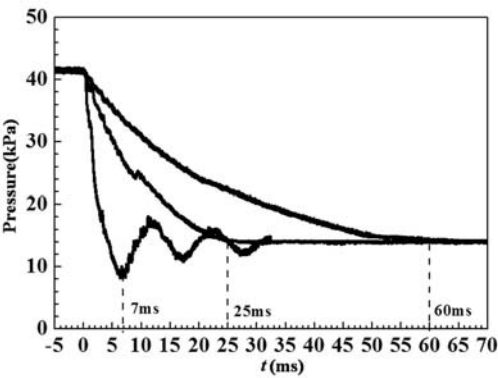


图 4 三种膨胀时间的压力曲线

Fig. 4 Pressure signal-time history in three inflation time scales

2 试验结果与分析

2.1 片光试验结果

图 5 为试验段内直接流场显示的片光结果,结果显示气流膨胀过程中存在水蒸气的凝结。以压力信号开始下降为时间起点,从 0.9ms 开始观察到片光图像变亮,即液滴出现;随着水蒸气持续凝结,液滴逐渐增多变大,亮度随之增强;试验后期,凝结强度减弱,4.7ms 之后,液滴密度减少,亮度减弱。

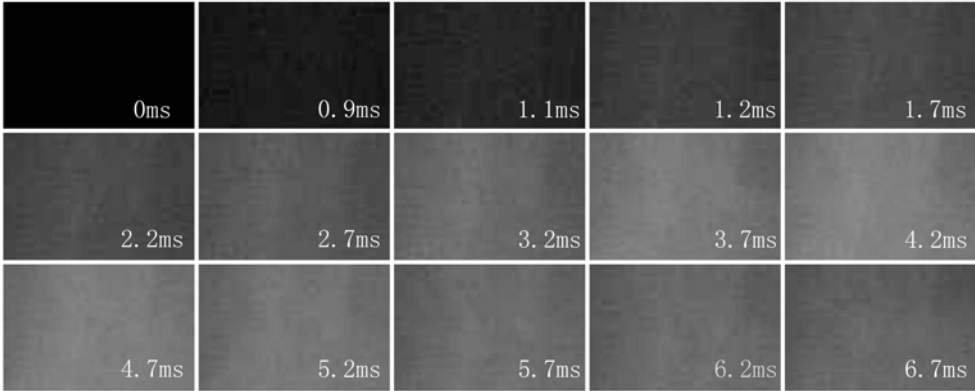


图 5 膨胀时间尺度 7ms 片光结果

Fig. 5 Planar laser scattering images of the 7ms inflation time scale

2.2 凝结对气流参数的影响

膨胀时间尺度 60ms 下水蒸气温度、摩尔分数变化趋势如图 6 所示。水蒸气摩尔分数为水蒸气分压与试验压力的比值,反映了在试验段气体中水蒸气占的比重。

试验前,测量温度为室温 300K,水蒸气摩尔分数为 8.8% 左右。试验开始后,气体膨胀带来温度下降,从室温 300K 下降至 220K 附近,19ms 至 21ms,温度开始出现上升;水蒸气摩尔分数在 18.5ms 之前基本维持不变,之后迅速下降。摩尔分数变化表明水蒸气发生凝结,凝结释放热量。从 18.5ms 至 19ms,随着时间推移和温度持续降低,水蒸气饱和度迅速升高,试验段内大量水蒸气发生凝结释放大量热量。当气流吸收凝结释放的热量超过膨胀消耗的热量时,温度曲线趋势由下降转为上升。

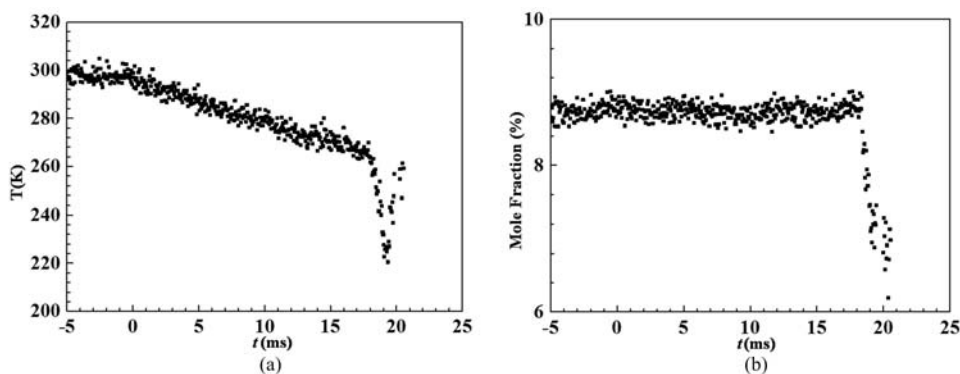


图 6 膨胀时间尺度 60ms 的试验结果 (a)温度变化曲线;(b)水蒸气摩尔分数变化曲线

Fig. 6 Results of the 60ms inflation time scale (a)Temperature-time history; (b)Mole fraction-time history

2.3 试验结果分析

三种膨胀时间尺度(7ms、25ms、60ms)下测量温度、水蒸气摩尔分数变化趋势如图 7 所示,其中水蒸气质量分数约 5%。试验结果表明,对于三种不同膨胀时间尺度,气流温度均呈现先下降后上升的趋势,在温度趋势出现上升的时刻,水蒸气摩尔分数呈现迅速下降趋势。略感不尽人意的是,对短膨胀时间工况(如 7ms)来说,由于试验段内存在一定的不均匀性,而试验中所采用的 TDLAS 为平均测量技术,测量结果反映的是整个光程内不同温度区域内的线平均结果,故温度结果出现上升时刻的数值难以准确地表示水蒸气凝结时的温度。随着膨胀时间尺度的增加,试验段内气流参数不均匀性逐渐降低,温度测量结果更接近于水蒸气凝结时的真实温度。

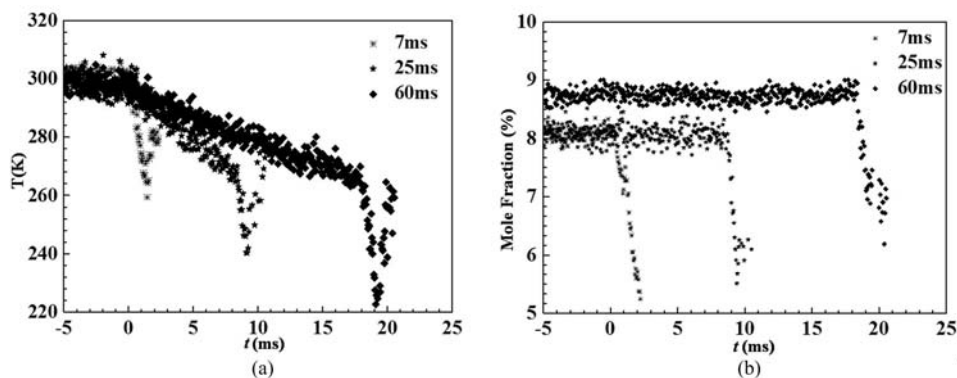


图 7 三种膨胀时间尺度的试验结果 (a)温度变化曲线;(b)水蒸气摩尔分数变化曲线

Fig. 7 Results in three inflation time scales (a)Temperature-time history; (b)Mole fraction-time history

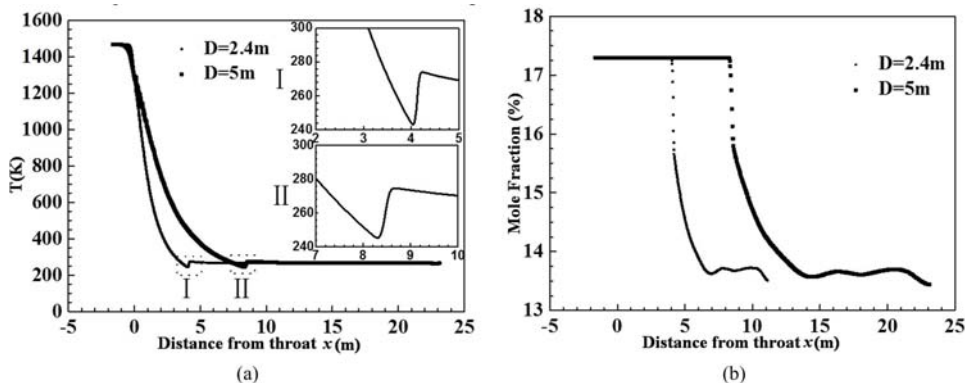


图 8 考虑蒸气相变喷管的数值模拟结果 (a)温度变化曲线;(b)水蒸气摩尔分数变化曲线

Fig. 8 Numerical simulation results of nozzle in the water vapor condensation flow

(a)Temperature result;(b)Mole fraction result

为了与喷管流动的数值计算结果进行比较,提取出了长度 $L=12.0\text{m}$ 、喷管直径 $D=2.4\text{m}$ 和长度 $L=23.2\text{m}$ 、喷管直径 $D=5\text{m}$ 两种不同尺寸喷管中的流场参数^[15]。图 8 为考虑水蒸气凝结相变喷管中温度、摩尔分数的数值模拟结果。可以看出,两种尺寸喷管温度从喷管喉道开始沿喷管流向迅速下降,分别在 4.0m 和 8.4m 附近到达最低点,之后出现上升趋势(图 8(a)),此时对应的水蒸气摩尔分数呈迅速下降趋势(图 8(b))。

对比试验结果与数值模拟结果可以发现,虽然试验模拟测量的是固定位置参数随膨胀过程的变化,但从温度变化趋势看,两者的气流温度均呈现先下降后上升趋势,且均在温度趋势出现转折位置水蒸气摩尔分数迅速下降,饱和度达到峰值,表明本文试验中发生了凝结。通过 TDLAS 定量获得凝结带来的气流参数变化,而这种“空间转化为时间”试验方案可在一定程度上模拟喷管中水蒸气的凝结过程。

3 结论

利用 TDLAS 结合片光、压力检测的综合流场诊断手段,开展了不同膨胀时间尺度下凝结过程的试验研究,试验结果表明:

- (1) 通过片光技术从试验上定性地观测到了凝结过程;
- (2) 不同膨胀时间尺度的凝结过程相似,温度趋势都为先下降后上升,在温度趋势变化时刻,水蒸气摩尔分数迅速下降,饱和度达到峰值;
- (3) 基于“空间转化为时间”思想的试验方案简单易行,可在一定程度上模拟喷管水蒸气凝结过程。

本试验中,试验段内气流参数均匀性还需改善,试验方案和试验设备均存在需改进之处,因此,更加深入和细致的研究有待在后续工作中进一步开展。

参考文献:

- [1] Prandtl L. Atti del convegno volta(1st ed)[M]. Roma: Reale Accademia D'Italia, 1936.
- [2] Oswatitsch K. Kondensationserscheinungen in überschalldüsen[J]. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1942, 22(1):1-14.
- [3] Head R M. Investigations of spontaneous condensation phenomena[D]. California Institute of Technology, 1949.
- [4] Lukasiewicz J, Royle J K. Effects of air humidity in supersonic wind tunnels[M]. HM Stationery Office, 1953.
- [5] Wegener P. Water vapor condensation process in supersonic nozzles[J]. Journal of Applied Physics, 1954, 25(12):1485-1491.
- [6] Paci P, Zvinevich Y, Tanimura S, et al. Spatially resolved gas phase composition measurements in supersonic flows using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. The Journal of Chemical Physics, 2004, 121(20):9964-9970.
- [7] Tanimura S, Zvinevich Y, Wyslouzil B E, et al. Temperature and gas-phase composition measurements in supersonic flows using tunable diode laser absorption spectroscopy: the effect of condensation on the boundary-layer thickness[J]. The Journal of Chemical Physics, 2005, 122(19):194304-194304.
- [8] Tanimura S, Wyslouzil B E, Zahniser M S, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy study of CH(3)CH(2)ODD(2)O binary condensation in a supersonic Laval nozzle[J]. The Journal of Chemical Physics, 2007, 127(3):034305-034305.
- [9] Hill P G. Condensation of water vapor during supersonic expansion in nozzles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1966, 25:593-620.
- [10] Saltanov G A, Tkalenko R A. Investigation of transonic unsteady-state flow in the presence of phase transformations[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1975, 16(6):873-878.
- [11] 杨勇, 沈胜强, 董国海, 等. 水蒸气超音速流动中非平衡相变的温度特性[J]. 化工学报, 2012, 63(2):401-407 (YANG Yong, SHEN Shengqiang, DONG Guohai, et al. Effect of temperature on non-equilibrium phase change in transonic steam flow[J]. CIESC Journal, 2012, 63(2):401-407 (in Chinese))
- [12] Wang C, Ding H, Wang H. Thermodynamic model and dynamic temperature compensation in positive-pressure-based sonic nozzle gas flow standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(5):

1154—1165.

- [13] 杨顺华, 乐嘉陵. 燃烧加热风洞中有限速率的水蒸气的凝结[C]. 第十届全国激波与激波管学术讨论会论文集, 2002:208—214 (YANG Shunhua, LE Jialing. Finite-rate water vapor condensation in combustion-heated wind tunnels[C]. Proceedings of the Tenth National Symposium on Shock and Shock Tubes, 2002: 208—214 (in Chinese))
- [14] 程万, 罗喜胜, 杨基明. 高超声速喷管中水蒸气凝结的数值研究[J]. 中国科学 G 辑, 2009, 39(9):1330—1337 (CHENG Wan, LUO Xisheng, YANG Jiming. Numerical analysis of water phase transition effects in hypersonic nozzles[J]. SCIENCE CHINA Series G, 2009, 39(9):1330—1337 (in Chinese))
- [15] 郭向东. 风洞流场和模型试验中相变影响的数值研究[D]. 中国科学技术大学, 2016 (GUO Xiangdong. Numerical evaluation of phase transition effects in wind tunnel flowfield and model test[D]. University of Science and Technology of China, 2016 (in Chinese))
- [16] 姜宏亮. 基于 TDLAS 的污染组分对高超声速试验热力学参数的影响研究[D]. 中国科学技术大学, 2014 (JIANG Hongliang. TDLAS-based investigation on the vitiation effects of hypersonic testing of aero thermal behaviors[D]. University of Science and Technology of China, 2014 (in Chinese))

Monitoring on the water vapour non-equilibrium condensation process based on TDLAS

FAN Xin-dong¹, PENG Dong², JIN Yi³, YANG Ji-ming¹

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. Department of Precise Machinery and Precise Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 3. Experimental Center of Engineering and Material Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: At present, domestic ground simulation experiment of hypersonic vehicle, especially most of larger scale high enthalpy experiments are carried out in combustion heated wind tunnel. The temperature rapidly decreases during the process of airflow expansion and acceleration in nozzle, which may cause rapid condensation of water vapour, particularly in combustion heated wind tunnel. This process will bring about the change of flow field parameters. In order to investigate the water vapor condensation process through nozzle, an idea that “space is transformed into time” was put forward, that is the change of the airflow parameters along flow direction in nozzle is transformed into air flow parameters change with time at a fixed position in expansion process. For this purpose, a set of experimental device for simulating the condensation process in nozzle was designed and constructed. Different time scales are achieved by adjusting the minimum cross section area of connecting section, the phenomenon of condensation is observed by means of planar laser scattering imaging technique, at the same time, the temperature variation in condensation process and water vapor content change are obtained with TDLAS based on water vapor spectral lines and methane spectral line. Experimental results demonstrate that water vapour condensation phenomenon can be observed in experimental section by planar laser scattering imaging technique. At different time scales, temperature change trends in condensation process are similar, all fall first and then rise. Near the time point of temperature trend change, the mole fraction of water vapor drops rapidly. This trend is in good agreement with the numerical simulation results of parameter variation in nozzle of combustion heated wind tunnel. The experimental scheme of “space is transformed into time” can simulate the condensation process of water vapor in nozzle to a certain extent.

Keywords: water vapor; condensation; tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS); temperature measurement