

激波管内水汽相变滞后效应的实验研究*

傅云飞 韩肇元 龚闽卫

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026)

摘要 本文研究了激波管中稀疏波、反射稀疏波对水汽-空气混合气体作用的非定常瞬态相变过程。利用两种不同波长光束的消光方法对水汽相变过程进行了测试。结果表明: 水汽非定常瞬态相变发生的温度远远低于出现于自然大气中的凝结或冻结温度。混合气体膨胀越强, 水汽瞬态相变的温度越低。非定常瞬态膨胀时的压力迅速下降是水汽瞬态相变温度远远低于自然大气中水汽相变温度的主要原因。水汽瞬态相变过程中, 生成的微滴尺度均匀, 但微滴的数密度却随时间发生变化。

关键词 激波管 稀疏波 相变

1 引言

在大气环境中, 水汽和小水滴组成的两相混合气体的变化, 决定了云雾生成及消散过程。而这种混合气体的非定常非平衡变化对云雾及水汽的影响具有重要意义。如在人工影响天气方面的人工降雨、消雹等过程中, 爆炸波对水汽、液滴及过冷水滴的作用, 迄今未能完全搞清其机理。由于非定常非平衡凝结及蒸发现象还出现在诸如超音速喷管、汽轮机、燃烧发动机等的流动过程中, 国内外均给予了重视。通过膨胀云室和扩散云室、超音速喷管和膨胀管等方法, Kotake^[1]和 Peters^[2], 对非定常成核和凝结过程进行了研究。Marble^[3]、Netteton^[4]总结了液滴中激波传播引起的蒸发现象, Goossens^[5,6]和 Smolders^[7,8]对激波在云雾中传播过程中, 导致的非定常蒸发及激波结构也进行了研究。

本文针对水汽非定常相变问题, 着重研究了水汽非定常瞬态相变的滞后效应。首先由激波管中非定常稀疏波和反射稀疏波, 在试验段使未饱和湿空气发生同质核化和相变, 然后, 考察相变形成的微滴尺度和浓度在反射稀疏波后的静止流区的变化。在进行实验时, 使用两只不同波长激光器, 通过测定其消光的方法^[9], 确定微滴尺度大小及浓度。最后, 对非定常状态下, 水汽瞬态相变进行分析。

2 实验原理及测试方法

进行实验的设备见图1。使用的激波管长4.35 m, 口径为94 mm×94 mm, 其中, 高压段长2.35 m, 低压段长2.00 m, 试验段即高压段。测试窗口距破膜位置2.15 m。在本实验过程中, 破膜后到达测试窗口波系的时间顺序: 稀疏波头, 稀疏波区, 稀疏波与反射稀疏波混合区, 反射稀疏波区, 反射稀疏波波后均匀区, 反射压缩波区(如图2

1995-02-23收到, 1995-05-12收到再改稿

* 本研究在国家科委基础研究和博士后科学基金资助下完成

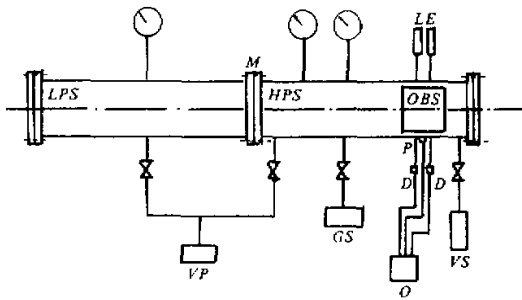


图1 实验设备

HPS: 高压段, LPS: 低压段, M: 膜, VP: 真空泵,
VS: 水汽罐, GS: 气泵, LE: 激光器, P: 压力传感器,
D: 光敏二极管, O: 瞬态波形存储器, OBS: 测试窗口

能使得水汽发生异质核化的凝结核, 然后再将纯净的湿空气充入其中并达到所需压力。通过电加热方式破膜。压力信号由安装在实验段测试窗口附近管壁的压力传感器接收。由于在实验段同一截面上没有压力梯度, 在壁面上所测得的压力信号变化就代表了测试区域的压力变化。破膜前试验段湿度由湿度计测出。

本试验采用的光学测量方法称为 DQ 方法, 即在给定微滴大小分布函数宽度的情况下, 通过两种不同波长光束的消光强弱, 来确定相变所形成微滴的半径和浓度。其工作原理即平面波光强在云雾中的衰减是波长的函数, 按 Lambert-Beer 定律, 光强随波长的变化, 可由下式表示为

$$I = I_0 \exp(-\beta L),$$

其中 I_0 为入射光强度, I 为透射光强度, L 为介质厚度, $\beta = N_p \pi < r^2 Q >$ 为衰减系数, r 为介质的尺度 (对球型粒子即为半径), N_p 为介质的数密度 (即浓度), Q 为消光效率因子, 它由 Mie 散射理论确定。对于两种不同波长 λ_1 和 λ_2 , 由光强变化可得出散射商 D_Q :

$$D_Q = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{< r^2 Q_1 >}{< r^2 Q_2 >}.$$

对于一定尺度的微滴分布, D_Q 值随着微滴粒子尺度的增大而强烈减小至最小值。这个极小值由微滴尺度分布的宽度决定。本实验水汽相变控制在膨胀波作用过程中, 相变后

所示)。稀疏波与反射稀疏波的瞬态膨胀降温作用使得水汽发生相变, 而反射压缩波使得相变后的微滴发生蒸发。使用的实验设备还包括: 真空泵、气泵、双波长激光测试仪、压电晶体压力传感器和瞬态波形存储器。

实验选用聚脂膜片, 通过调节激波管的高压段与低压段之间压力, 可在试验段获得混合气体具有不同膨胀率的试验。实验前, 先将试验段, 也就是高压段抽到高度的真空, 以清除其中可

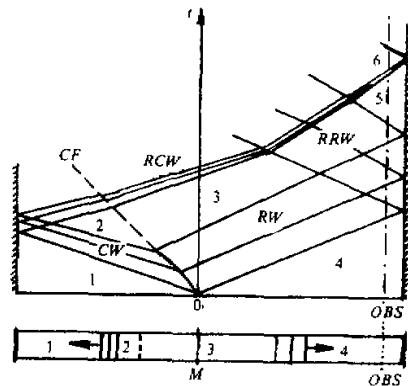


图2 破膜后激波管内波系

RW: 稀疏波, RRW: 反射稀疏波, RCW: 反射压缩波, CW: 压缩波, CF: 接触面

微滴变化过程主要位于反射稀疏波后的静止气流区(即⑤区),可以避免气流扰动对微滴的影响。对于某时刻,由于微滴尺度的分布宽度很小^[10],即微滴尺度大小近似相同,因此,通过测量两束不同波长光的消光强弱,可直接解出该时刻微滴平均尺度和浓度。我们使用的双波长激光测试仪由两只半导体激光器和光敏二极管组成,两只半导体激光器的波长分别为 670 nm 和 780 nm,激光光信号由光敏二极管接收。光信号及压力信号随时间的变化由瞬态波形存储器记录,最后由计算机对其数据进行采集和处理。

3 实验结果及分析

本文给出了两种不同压比,水汽-空气相对湿度(65%)相同条件下的典型实验。破膜前后激波管内各参数如表 1 所示。

表 1 破膜前后激波管内温压参数

	p_1 / Pa	p_4 / Pa	p_{41}	T_4 / K	p_5 / Pa	T_5 / K	T_c / K
A 组	$0.1 \times 1.013 \times 10^5$	$1.7 \times 1.013 \times 10^5$	17.0	298.0	$0.046 \times 1.013 \times 10^5$	106.0	115.0
B 组	$0.5 \times 1.013 \times 10^5$	$2.1 \times 1.013 \times 10^5$	4.2	298.0	$0.422 \times 1.013 \times 10^5$	188.0	213.0

注: p_1 : ①区压力, p_4 : ④区压力, p_{41} : ①区和④区压力比, T_4 : ④区温度, p_5 : ⑤区压力, T_5 : ⑤区温度, T_c : 相变发生温度

表 1 中 p_5 、 T_5 是按等熵关系求得的, 这与实验所测到的⑤区压力有些不同, 因为混合气体瞬间膨胀过程中, 一旦发生了相变现象, 将有潜热释放出来, 故混合气体发生相变后, 不再遵从等熵关系变化。但在相变发生之前的瞬间膨胀过程中, 混合气体是遵从等熵关系变化的。那么, 根据试验段初始状态 (p_4 , T_4) 和测得相变发生时的压力 p_c , 可求出水汽-空气混合气体发生相变时的温度 T_c 。对于本文两组试验情况, 混合气体发生相变的温度 T_c 分别约为 115 K 和 213 K。表明对相同湿度的混合气体而言, 不同膨胀率的膨胀过程中, 水汽瞬态相变的温度不同, 膨胀率越强, 水汽瞬态相变的温度越低。

图 3 为这两组试验测得的压力信号和消光信号随时间的变化。由于测试窗口距高压段端壁很近, 此处没有测到稀疏波和反射稀疏波之间均匀区的压力信号, 压力波形直接由①区膨胀到⑤区, 此时压力信号反应了稀疏波和反射稀疏波两次膨胀过程。压力信号在⑤区保持均匀不变, 表明了反射稀疏波后也是一压力均匀区, 并且因反射稀疏波后气体和相变物必须满足固壁边界条件, 因此⑤区的气体和微滴是处于静止状态, 在该区观测混合气体瞬态相变后相变物的变化, 可避免气流运动引起扰动的影响。由于激波管的低压段不长, 破膜后低压段中没有形成激波, 而是出现了压缩波, 它在低压段端壁发生的反射仍是压缩波, 故在测试窗口测得缓慢上升的反射压缩波压力信号。压力信号由①区到⑤区的时间分别为 5.0 ms (A 组) 和 5.9 ms (B 组), 压力信号在⑤区持续时间 9.5 ms (A 组) 和 6.2 ms (B 组)。消光信号开始出现在膨胀波区, 随后它在反射稀疏波后的均匀区随时间发生变化, 这表明了相变物在均匀静止流区发生的变化过程。两组实验说明, 由于膨胀率的不同, 消光信号出现的时间也不同, 它们与④区压力信号开始

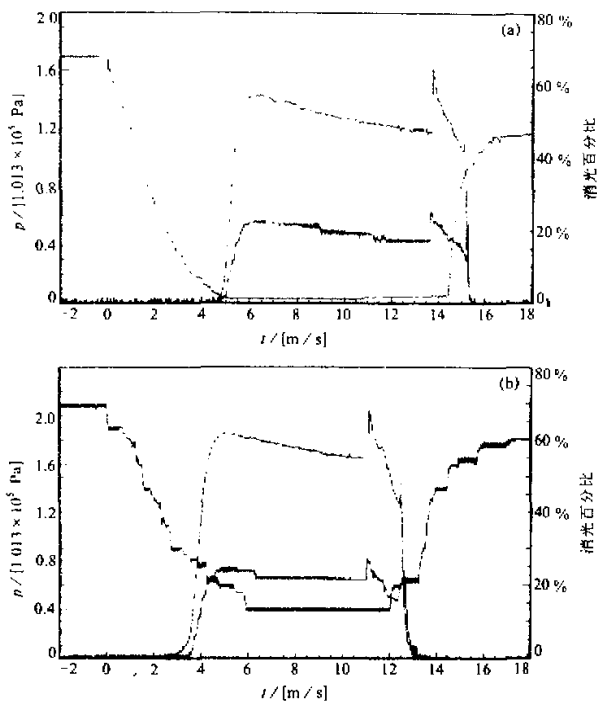


图3 压力信号与消光信号随时间变化曲线
(a) $p_{41} = 17.0$; (b) $p_{41} = 4.2$

下降的时间间隔分别为 5.0 ms (A 组) 和 3.7 ms (B 组)。这说明不同膨胀率的水汽瞬态相变对初始状态的滞后不同, 膨胀率越强, 水汽瞬态相变滞后初始状态的时间就越长。

图 4、图 5 为 A、B 两组水汽瞬态相变过程中微滴半径 r_d 和微滴浓度 N_p 随时间的变化。可以看到相变后微滴尺度在反射稀疏波后基本保持稳定, 但微滴浓度随时间发生变化。以微滴浓度变化来考察相变过程, 水汽相变过程可分为两个阶段。第一阶段水汽很快由气相变到液相 (或固相), 我们称之为相变初始阶段, 在我们的实验范围内, 该阶段一般约为 1 ms 左右, 相变物浓度在这段时间里很快增大, 即水汽质量减少, 液相 (或固相) 质量增多。第二阶段比较复杂, 我们称之为相变趋于平衡阶段, 它涉及到在低温低压状态下气相和液相 (固相) 的瞬态相互作用过程, 因为这一过程中微滴尺度保持不变, 微滴浓度的变化就反应了微滴总体质量的变化。初步的解释认为这一过程可能反应了瞬态水汽相变后, 蒸发与凝结 (或冻结) 的动态平衡过程, 即在微滴形成后, 环境湿度将减小并有相变潜热释放出来, 释放的潜热又使得部分微滴发生蒸发, 将导致环境湿度上升和温度下降, 又再次促使水汽发生相变。如果这种动态平衡过程成立的话, 微滴蒸发时并不表现为微滴半径的减小, 而是表现为微滴数量的减少, 这是一个尚不清楚的现象, 可能是由于在我们的实验条件下, 微滴尺度太小同时状态变化又极快的缘

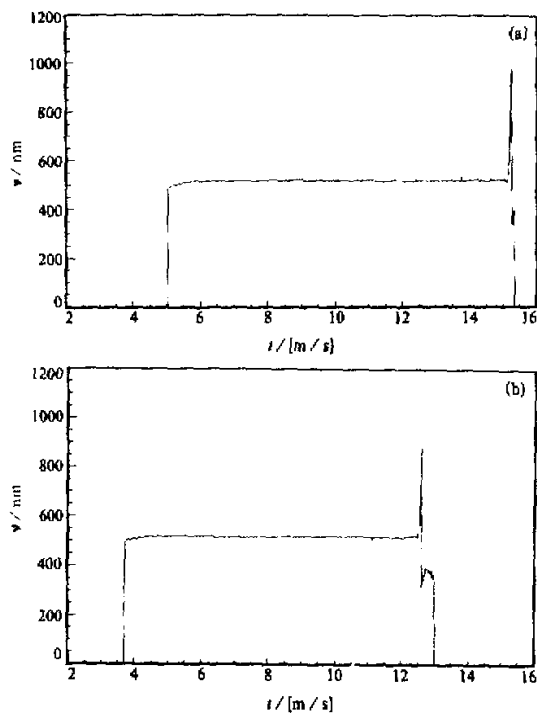


图4 微滴半径随时间变化曲线

(a) $p_{A1} = 17.0$, (b) $p_{A1} = 4.2$

故。由于压力传感器灵敏度的限制,这一过程中压力的微小变化尚不能测出,有待今后实验进一步证实。

通过以上的实验结果可以看到,膨胀降温过程对水汽瞬态相变有重要作用。从平衡热力学观点出发,在自然大气中,一般认为水汽在 0°C 可发生凝结,对于过冷水滴,它在 -40°C 左右也将变为冰晶,而对于非定常瞬态膨胀降温过程,水汽相变的温度可以很低。不同膨胀率的膨胀过程,水汽相变对初始状态有不同的滞后效应,膨胀越强,水汽开始相变滞后初始状态的时间越长,这表明了压力下降是水汽瞬态相变滞后水汽平衡相变的重要因素。瞬态波形存储器记录的数据表明,水汽从气相变到液相(或固相)的时间小于 $20\ \mu\text{s}$,与压力膨胀过程相比,可认为气相到液相(或固相)的变化是一突变过程。液相(或固相)形成后,微滴尺度可保持不变,但浓度出现了变化,这一过程如何用热力学观点来解释,有待以后研究。另外,本实验得到的微滴浓度接近 $10^{13}/\text{m}^3$ 量级,比实际大气云雾中云滴或雾滴的浓度大得多,因为实际大气云雾中水汽的凝结属于异质核化凝结,云滴或雾滴浓度取决于外来核的数量和小滴相互间的碰并增长过程,而本实验中水汽瞬态相变发生在同质核化基础上,相变时间极短,因此微滴浓度很大。应该指出,这种瞬态非定常非平衡过程中,水汽在低压低温状态下发生相变的产物,究竟是液态还是固态,目前尚未定论,有关细节有待进一步研究。

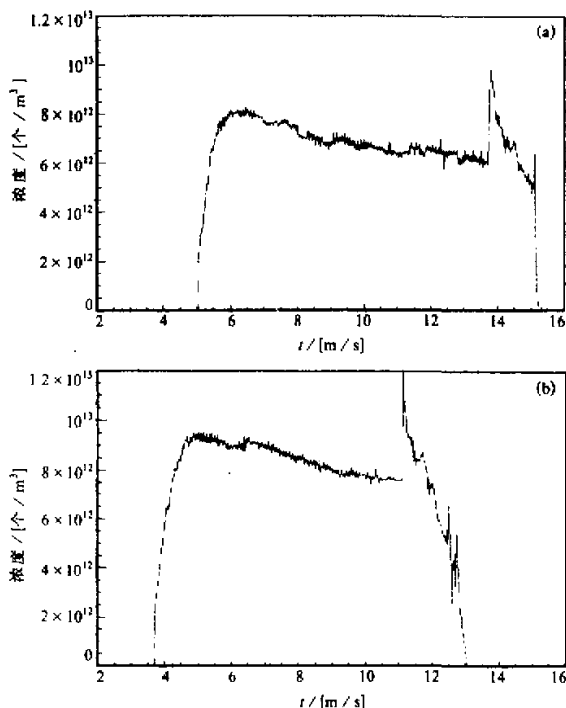


图5 微滴浓度随时间变化曲线

(a) $p_{d1} = 17.0$, (b) $p_{d1} = 4.2$

4 结论

本文利用激波管作为实验工具, 并采用光学测试方法, 通过实验研究了水汽-空气混合气体在激波管中稀疏波和反射稀疏波作用下的非定常瞬态相变过程, 结果表明:

(1) 在非定常瞬态膨胀过程中, 水汽发生非定常瞬态相变的温度远远低于自然大气中水汽发生相变的温度。膨胀越强, 水汽发生相变的温度越低。

(2) 非定常瞬态膨胀过程中, 压力迅速下降是该过程水汽相变温度滞后自然大气中水汽相变温度的主要原因。

(3) 水汽非定常瞬态相变过程中生成的微滴尺度大小均匀, 但微滴浓度随时间发生变化。其机理有待深入研究。

致谢 本文曾与黄美元研究员进行过比较深入的讨论, 在此特表示感谢。此外还感谢李光华高级工程师为本研究工作的实验设备改装和加工所给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Kotake, S. and Glass, I. I., 1981, Flows with nucleation and condensation, *Prog. Aeros. Sci.*, **19**, 129 ~ 196.
- 2 Peters, F. and Paikert, B., 1989, Nucleation and growth rates of homogeneously condensing water vapor in argon from shock tube experiments, *Exp. Fluids*, **7**, 521 ~ 530.
- 3 Marble, F.E., 1969, Some gasdynamic problems in the flow of condensing vapors, *Astronaut. Acta*, **4**, 585 ~ 614.
- 4 Nettleton, M.A., 1977, Shock-wave chemistry in dusty gases and fogs: a review, *Combust. Flame*, **28**, 3 ~ 16.
- 5 Goossens, H.W.J., Berkelmans, M.J.C.M., and van Dongen, M.E.H., 1986, Experimental investigation of weak shock wave propagating in a fog, In: (Bershafer, D., Hanson, R. eds.) *Proceeding of the 15th International Symposium on Shock Waves and Shock Tube*, Stanford, USA (July, 1986), Stanford Univ Press, 721 ~ 727.
- 6 Goossens, H.W.J., Cleijne, J.W., Smolders, H.J. and van Dongen, M.E.H., 1988, Shock wave induced evaporation of water droplets in a gas-droplet mixture, *Exp. Fluids*, **6**, 561 ~ 568.
- 7 Smolders, H.J., de Kok, C.J.G.M. and van Dongen, M. E. H., 1992, Condensation and evaporation reaction induced by non-linear waves, In: (Takayama, K. ed.) *Proceeding of the 18th International Symposium on Shock Waves and Shock Tube*, Sendai, Japan (July, 1991), Springer Verlag, 475 ~ 480.
- 8 Smolders, H.J., Willems, J.F.H., de Leringe, H.C. and van Dongen, M.E.H., 1989, Wave induced growth and evaporation of droplet in a vapor-gas mixture, In: (Kim, YW. ed.) *Proceeding of the 17th International Symposium on Shock Waves and Shock Tube*, Bethelhelem, USA (July, 1989), Springer Verlag, 802 ~ 807.
- 9 Wittig, S., Zahoranski, R.A., and Sakbani, Kh., 1981, The dispersion quotient technique in submicron particle size analysis, *J. Aerosol. Sci.*, **12**, 183 ~ 191.
- 10 Hastings, D.L. and Hodgson, J.P., 1979, The formation of an aqueous fog in a shock tube, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **12**, 2111 ~ 2122.

Experimental Investigation of the Delay Effect of Phase Transformation of Water Vapor in Shock Tube

Fu Yunfei, Han Zhaoyuan and Gong Minwei

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract Processes of the unsteady transient phase transformation of water vapor and gas mixture induced by rarefaction waves and reflected rarefaction waves in a shock tube were studied experimentally. The phase transformation processes of water vapor were measured by dual-wavelength light extinction method. The experimental results show that the temperature for the unsteady transient phase transformation of water vapor is much lower than the condensing-point or freezing-point occurring in the atmosphere. The more the mixture gas expands, the lower the temperature point for the transient phase transformation of water vapor is. It is mainly because the pressure of the gas mixture decreases rapidly during the processes of transient expansion that the temperature of transient the phase transformation of water vapor is much lower than that of an equilibrium phase transformation of water vapor. It is also shown that during the processes of the unsteady transient phase transformation of water vapor the size of the formed droplets after the transient phase transformation is kept constant, but the number density changes with time.

Key words shock tube rarefaction waves phase transformation