

文章编号: 1672-9897(2006)04-0069-04

激波管中测量 JP-10 点火延时的吸附问题研究

勾华杰¹, 王 苏², 范秉诚², 何宇中², 张胜涛¹, 崔季平²

(1. 重庆大学化学化工学院, 重庆 400044; 2. 中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京 100080)

摘要:在 JP-10 点火延时的激波管实验中, JP-10 在激波管壁的吸附导致气相浓度的不确定是测量结果分散的主要原因之一。利用精确测定的吸附曲线确定了实验时 JP-10 真实的气相浓度, 解决了高碳数碳氢燃料点火延时激波管实验时管壁吸附影响燃料气相浓度确定的困难。实验显示 JP-10 的吸附符合 Langmuir 吸附等温关系。

关键词: 吸附; 激波管; 点火延时; JP-10

中图分类号: O647.3; O354.5 文献标识码: A

Experimental studies of the adsorption in shock tube measurements of the JP-10 ignition delay time

GOU Hua-jie¹, WANG Su², FAN Bing-cheng², HE Yu-zhong², ZHANG Sheng-tao¹, CUI Ji-ping²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In shock tube measurements of the JP-10 ignition delay time, the uncertainty of the gas concentration due to the adsorption of JP-10 in shock tube is one of the main reasons resulting in large scatter of measurement data. By measuring the adsorption curve accurately, the gas concentrations were determined, which overcomes the difficulty in determining the gas concentrations of heavier hydrocarbon fuels due to the adsorption on the wall in shock tube experiments. The present results of experiments show that the adsorption of JP-10 is in accord with Langmuir's adsorption isotherm.

Key words: adsorption; shock tube; ignition delay time; JP-10

0 引言

一定比例的燃料和氧化剂具备了物理的点火条件, 延迟一段时间后才被点燃的现象称为点火延时。在超燃冲压式发动机中, 以燃料点火延时为特征时间与发动机内流动时间之比是判断发动机点火与持焰稳定性的关键参数。准确测量燃料的点火延时有助于了解其燃烧反应机理并可作为简化燃烧反应化学动力学模型的判别标准。在工程应用的条件下碳氢燃料的点火延时时间一般为毫秒量级。激波管采用

激波加热, 可以在微秒时间内从室温升至 2000K 甚至更高的温度, 并持续几个毫秒, 激波管是测量碳氢燃料点火延时的理想工具。在高碳数碳氢燃料点火延时激波管实验中, 气相燃料初始浓度的不确定性所造成测量数据的分散, 成为液态燃料点火延时测量误差的主要来源之一。高碳数碳氢燃料室温条件下通常为液态, 饱和蒸气压很低。实验时气相分压值很低, 在激波管壁上容易吸附和凝结, 吸附效应相对于燃料的气相浓度不容忽略。

JP-10 (exotetrahydrodicyclopentadiene) 分子式为

* 收稿日期: 2006-02-05; 修订日期: 2006-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90305021)。

作者简介: 勾华杰(1979-), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生。研究方向: 高温气体动力学。

$C_{10}H_{16}$ (外挂式四氢双环戊二烯), 沸点 193°C , 室温下饱和蒸气压约为 400Pa , 具有高能量密度, 为典型的高碳数碳氢燃料, 是超燃发动机和脉冲爆轰发动机的重要应用燃料^[1]。已有的 JP-10 点火延时的测量结果比较分散。Hanson 等人认为 JP-10 在配气室和激波管中的吸附是点火延时测量中主要的误差来源, 也是 JP-10 点火延时实验数据分散的主要原因^[2]。David 等人将液体 JP-10 注射进配气室内, 使燃料和氧化剂预混后, 再送入激波管进行实验^[3]。他们利用注入量确定 JP-10 的气相浓度, 不考虑 JP-10 在配气室和激波管内的吸附对实验气相浓度的影响。以预混方式进样的还有 Colket 等人, 他们把 JP-10 与惰性气体 Ar 和氧化剂 O_2 按照一定的分压比配制于配气室中, 混合 10 小时后充入激波管内进行实验^[4]。Hanson 等人在配气室中将 JP-10 蒸气、Ar 和 O_2 混合均匀后充入激波管中, 通过测量 JP-10 在 He-Ne 激光 $3.39\mu\text{m}$ 处的吸收确定了激波管内 JP-10 的气相浓度值^[5], 但是这种方法必须精确地测量无吸附条件下的吸收系数, 这是比较困难的。另外预先恒温加热激波管可减小 JP-10 的吸附量, 如 Hanson 小组的激波管和配气室恒温加热于 35°C , Ryan 等人测量液体燃料燃烧反应特性的爆轰管也处于恒温加热状态^[6]。Hanson 等人对 JP-10 的点火延时实验共做了两次, 第一次指出 JP-10 在管壁上的吸附导致的浓度不确定性是测量误差的主要原因^[2]; 第二次实验时发现通过测量配气室内 JP-10 分压所确定的 JP-10 气相浓度与激光吸收法在激波管内直接测量的 JP-10 浓度值相差在 5% 以内^[5]。JP-10 在激波管内的吸附对浓度的确定究竟有多大影响, 以及如何用简便的方法解决高碳数碳氢燃料在激波管实验过程中因吸附导致浓度确定的困难, 还需要进一步的探讨。实验通过精确测量激波管内 JP-10 的气相压力和测得的吸附曲线, 确定了 JP-10 在实验时的气相浓度, 消除了 JP-10 吸附对实验浓度确定的影响。

1 实验

吸附实验在内壁光滑的不锈钢激波管低压室内进行, 低压室长 1.8m , 内径 44mm 。实验前低压室由分子泵抽至极限真空度 $4 \times 10^{-2}\text{Pa}$, 20min 内漏率为 $6 \times 10^{-3}\text{Pa}/\text{min}$ 。当激波管达到极限真空度时在低压室尾盖处注入一定量的液体 JP-10, 由北京真空仪表厂生产的 ZDM-1 薄膜真空计测量低压室 JP-10 的气相压力, 其测量范围为 $1.3\text{Pa} \sim 10^5\text{Pa}$, 在 1000Pa 以下

的测量精度为 0.1Pa 。记录 JP-10 注入低压室到吸附基本达到平衡过程中气相压力的变化, 得到了不同浓度的 JP-10 在低压室内气相分压和吸附量的关系。

1.1 激波管预先恒温加热对 JP-10 吸附的影响

在极限真空度条件下, 激波管在室温 27°C 和预先恒温加热于 70°C 时分别注入 $10\mu\text{L}$ 的 JP-10, 测量气相压力的变化如图 1 所示。由图 1 可知, JP-10 在高真空度的环境中气化速率很高, 注入 JP-10 后约 10s 时, JP-10 的气相压力达到最大, 随着吸附的发生, 气相压力逐渐下降直到吸附平衡保持稳定。在 27°C 和 70°C 的条件下, 注入 $10\mu\text{L}$ 的 JP-10 平衡气压分别为 13Pa 和 33Pa 。室温和加热条件下的吸附曲线形状相似, 但无论是最高气相压力还是平衡气压, 激波管加热时都比室温条件下气相中的 JP-10 浓度高, 大约要高出 2 倍左右。如果 JP-10 不被吸附而完全挥发, 27°C 和 70°C 时理论气压分别约为 61Pa 和 70Pa 。吸附量可以用理论压力值与平衡压力的差表示, 吸附程度可以表示为吸附量与理论压力值的比。 27°C 和 70°C 时的吸附量分别为 48Pa 和 37Pa , 吸附程度分别为 78% 和 53% 。从吸附的绝对量与吸附程度都表明 JP-10 在激波管中存在明显的吸附, 而且低温条件下的吸附比高温下严重。激波管的恒温加热提高了 JP-10 的饱和蒸气压, 同时减小了 JP-10 在管壁上的绝对吸附量。低压室预先恒温加热既减小了吸附对气相浓度的影响程度, 也提高了 JP-10 实验的浓度测量范围。继续提高激波管的预加热温度, 虽然有利于进一步降低 JP-10 的吸附程度, 但受限于激波管的密封性能和测量用传感器的工作温度而没有采用。

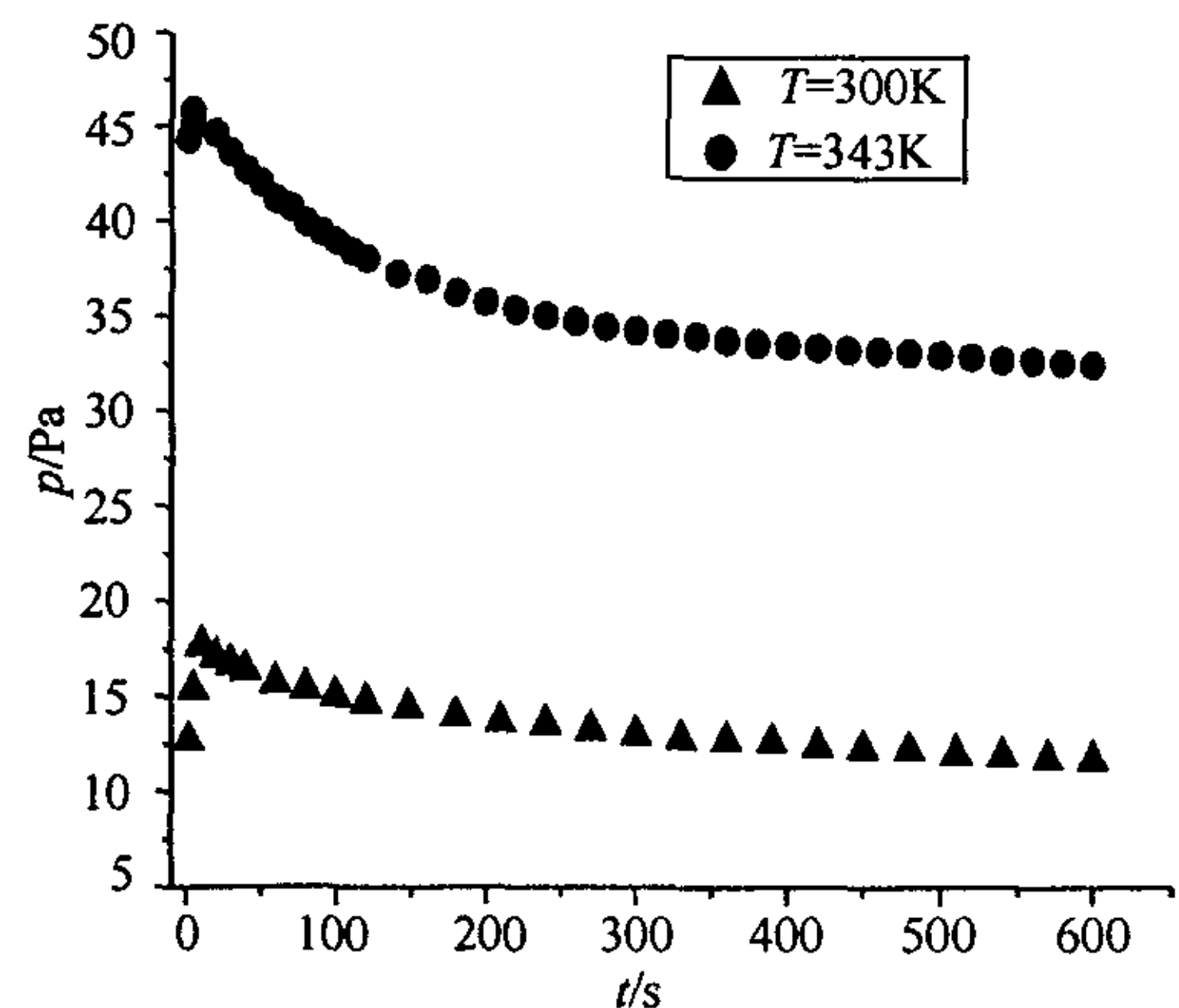


图 1 不同温度下 JP-10 吸附曲线对比

Fig. 1 Comparison of the adsorption curves of JP-10 at different temperatures

1.2 不同浓度下 JP-10 的吸附曲线

激波管预先恒温加热于 70℃, 真空度为 4×10^{-2} Pa 时分别注入 5 μ L、10 μ L、20 μ L 的 JP-10, 测量 JP-10 的气相压力随时间的变化, 所得的吸附曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 不同注入量的吸附曲线基本类似, 注入量较少时更容易达到吸附平衡。这 3 种注入量条件下, 在注入 5min 后气相压力随时间的变化已经很缓慢, 到 10min 时基本达到了吸附平衡。注入量不同, 5min 和 10min 时的气相压力差也不同, 根据这种差别可以由 5min 时的压力值推断出 10min 时的吸附平衡气相压力, 这在激波管点火延时的实验中很重要。因为在激波管实验中, 需要由加入稀释气(通常为 Ar 与 O₂ 的混合气)前测量的 JP-10 压力推算出与稀释气混合后 JP-10 分压, 以确定实验气相浓度。

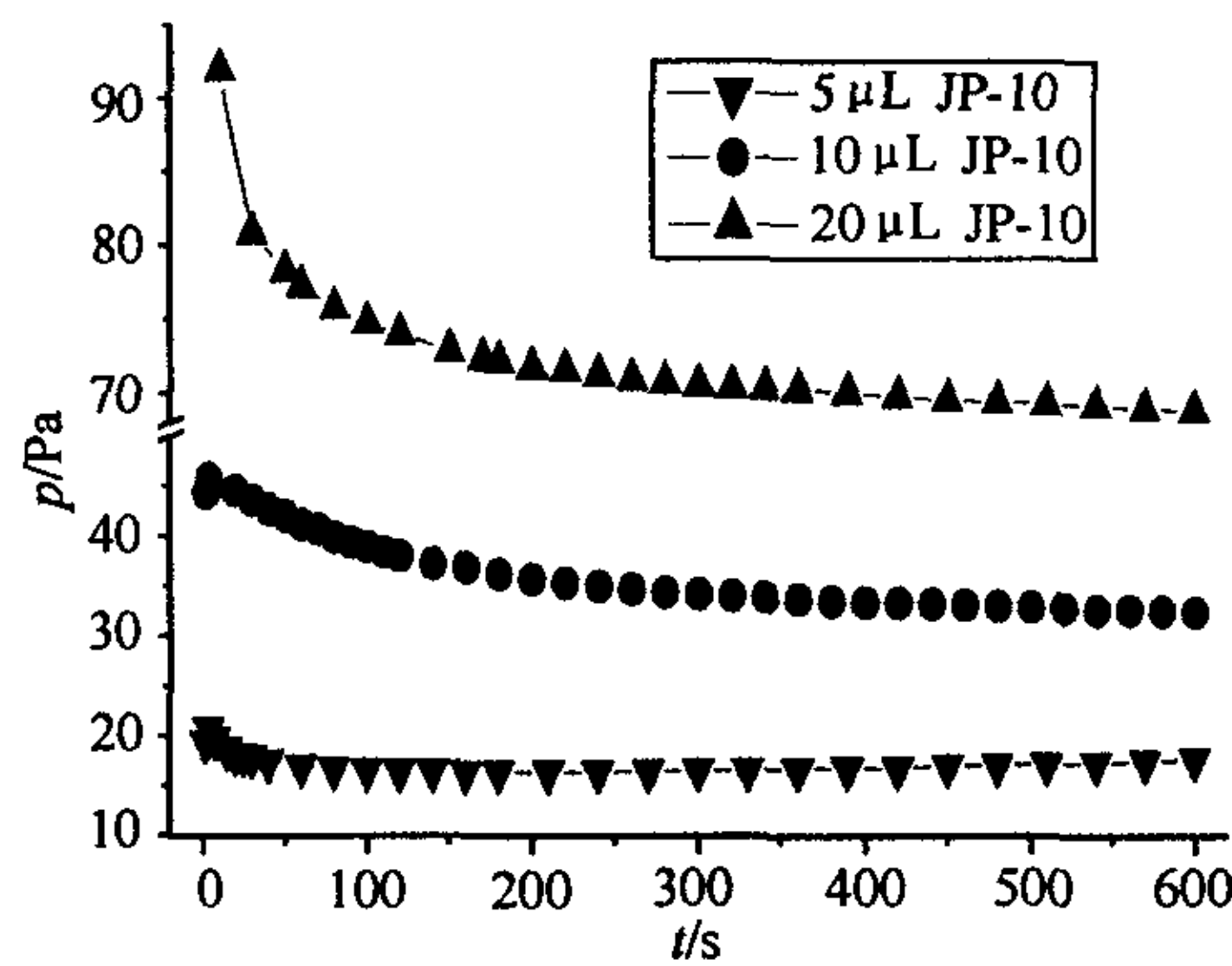


图 2 不同注入量的 JP-10 吸附曲线对比

Fig.2 Comparison of the adsorption curves of JP-10 with different injection volumes

1.3 JP-10 的吸附等温线

为了了解 JP-10 在激波管内的吸附情况, 在激波管预先恒温加热于 70℃、真空度为 4×10^{-2} Pa 的情况下, 测量了不同注入量时 JP-10 的气相压力及吸附情况, 结果如表 1 所示。在低于饱和蒸气压完全气化的条件下, 不同注入量时 JP-10 的理论气压值为:

$$P_{\text{理论}} = \frac{\rho LRT}{MV} \times 10^{-3} (\text{Pa})$$

其中 ρ 为 JP-10 的密度(g/cm^3), L 为 JP-10 的注入量(μL), R 为摩尔气体常数, T 为激波管温度(343K), M 为 JP-10 的摩尔分子量(g/mol), V 为激波管低压室体积(m^3)。表 1 中 $p_{5\text{min}}$ 、 $p_{10\text{min}}$ 指 JP-10 注入后吸附 5min 和 10min 时 JP-10 的气相压力。 $\Delta p = p_{5\text{min}} - p_{10\text{min}}$ 指 JP-10 在注入 5min 到 10min 的时间内压力的变化量, 吸附量 $\alpha = p_{\text{理论}} - p_{10\text{min}}$ 。由于 JP-10 注入 10min 后,

吸附已经达到了平衡, 此时的气相压力为平衡气相压力 p , 吸附量 α 表示吸附达到平衡时被吸附的总量。

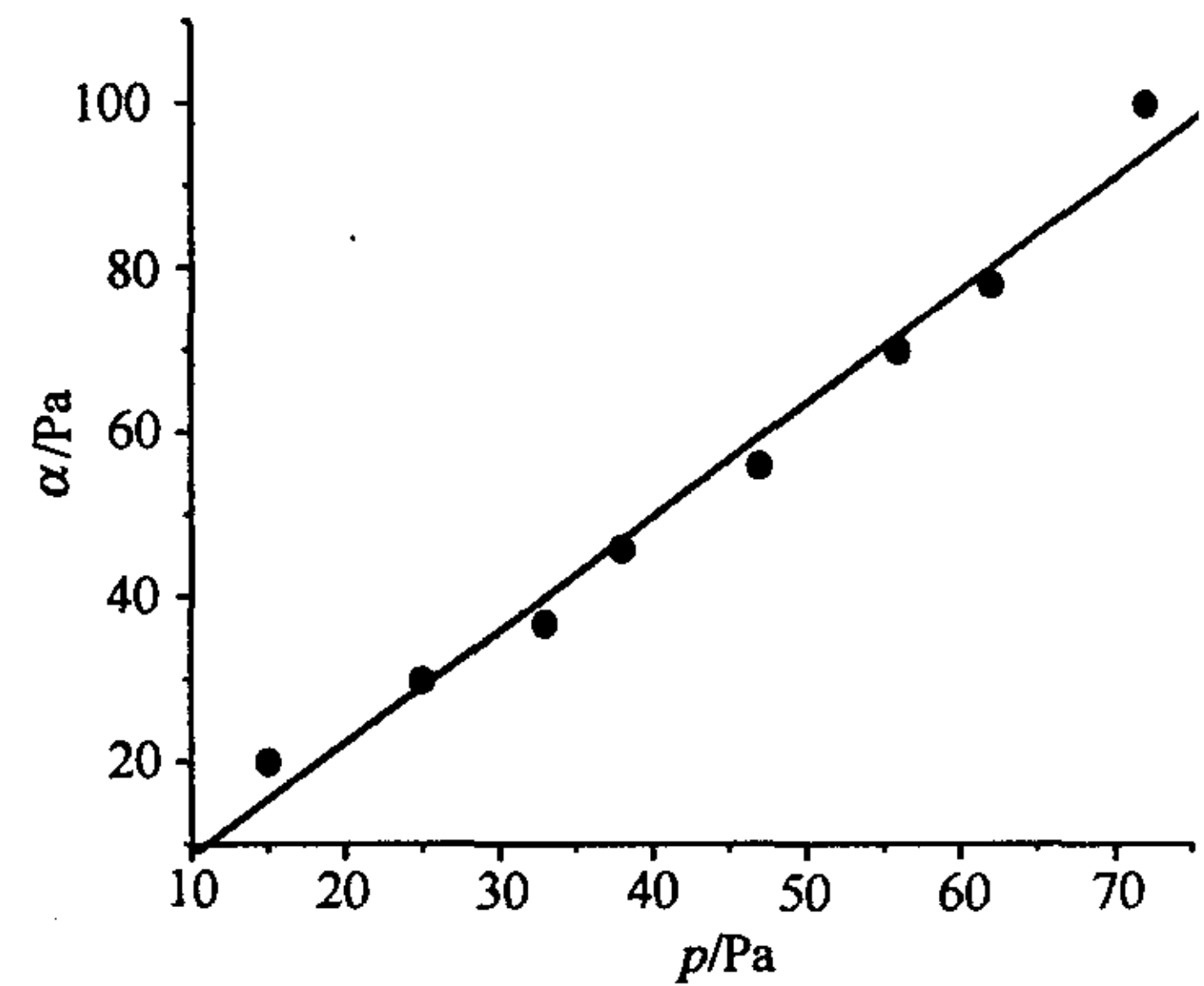


图 3 70℃时 JP-10 在激波管内的吸附等温线

Fig.3 The adsorption isotherm of JP-10 in shock tube at 70℃

表 1 70℃条件下 JP-10 吸附量测定结果

Table 1 The adsorbance measurements of JP-10 at 70℃

JP-10 注入量 (μL)	$P_{\text{理论}}$ (Pa)	$P_{5\text{min}}$ (Pa)	$P_{10\text{min}}$ (Pa)	Δp (Pa)	吸附量 α (Pa)
5	35	15	15	0	20
8	56	26	25	1	31
10	70	35	33	2	37
12	84	40	38	2	46
15	105	49	47	2	58
18	126	59	57	2	69
20	140	70	68	2	72
25	175	75	72	3	103

以吸附量 α 对平衡气相压力作图, 得到 JP-10 在 70℃时的吸附等温线, 如图 3 所示。由图 3 可知, 吸附量 α 与平衡气相压力 p 成正比关系, $\alpha = 1.22p$ 。JP-10 在 70℃时激波管壁上的吸附符合 Langmuir 吸附等温线在低压区的吸附。由表 1 可知表征吸附程度的吸附量与理论气相压力 $P_{\text{理论}}$ 的比值近似为一常数, 即 $\alpha/P_{\text{理论}} = 0.55$, 表明在给定的温度下注入量的变化不改变吸附程度。

2 结论

实验采用预先加热激波管的方式增加了 JP-10 的饱和蒸气压, 降低了 JP-10 在激波管壁上的吸附量, 减小了吸附对浓度测量的影响, 也提高了 JP-10 实验的浓度范围。利用准确测量 JP-10 的气相压力和获得的吸附曲线确定了 JP-10 的气相浓度, 解决了

高碳数碳氢燃料点火延时激波管实验时管壁吸附影响燃料气相浓度确定的困难。实验发现 JP-10 的吸附符合 Langmuir 吸附等温关系式。实验结果显示, JP-10 在激波管中存在较为严重的吸附, 必须考虑对点火延时实验中气相浓度的影响。采用准确测定气相压力及其吸附曲线的方法为高碳数碳氢燃料在激波管内的浓度确定提供了一种简便途径, 并将提高激波管点火延时实验结果的准确度。

参考文献:

- [1] BURDETTE G W, LANDER H R, MCCOY J R. *J. Energy*, New York. 1978, (2): 289 ~ 292.
- [2] DAVIDSON D F, HORNING D C, HANSON R K [R]. Shock tube ignition time measurements for N-heptane/O₂/Ar and JP-10/O₂/Ar mixtures. AIAA 99-2216, Jun. 1999.
- [3] MIKOLAITIS D W, SEGAL C, CHANDY A. Ignition delay for jet propellant 10/air and Jet propellant 10/high-energy density fuel/air mixtures [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(4): 601 ~ 606.
- [4] COLKET M B, SPADACCINI L J. Scramjet fuels autoignition study [R]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(2): 315 ~ 323.
- [5] DAVIDSON D F, HORNING D C, HERBON J T, et al. Shock tube measurements of JP-10 ignition [R]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28: 1687 ~ 1692.
- [6] RYAN T W, SCHWAB S T, HARLOWE W W. Aluminum alkyl derivatives-ignition and combustion enhancers for supersonic combustors [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(1): 124 ~ 129.

(上接第 68 页)

5 结束语

以上的试验结果说明了在风洞的吹风试验过程中, 由模型支撑引起的弹性角变化对模型迎角的影响是十分可观的, 因此, 有必要对模型的迎角进行实时的非接触测量。笔者描述的系统, 初步实现了在风洞试验过程中对模型迎角的实时非接触测量, 取得了较理想的试验结果, 并对相关的技术进行了有益的探索和研究。

参考文献:

- [1] SHARON S G, ALPHEUS W B. Development of an intelligent videogrammetric wind tunnel measurement system[R]. NASA-2001-46spie-ssg.
- [2] TIANSHU L, CATTAFESTA L N III, RADEZTSKY R H. Photogrammetry applied to wind tunnel testing [J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(6): 964 ~ 971.
- [3] RAFAEL C G, 等. Digital image processing [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [4] 何斌, 等. Visual C++ 数字图像处理 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [5] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [6] 梁华为. 直接从双峰直方图确定二值化阈值 [J]. *模式识别与人工智能*, 2002, 15(2): 253 ~ 256.