

冲击压缩下甲烷-空气混合气体 状态参数实验研究*

王晓燕, 华劲松, 温上捷, 金山, 孙学林

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰物理
国防科技重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘要:为研究强冲击状态下混入少量空气的甲烷气体的冲击状态参数, 利用二级轻气炮加载技术, 使加速到 5 km/s 的钨合金飞片撞击封装有常态下空气混入量依次为零(纯甲烷气体)、1%、5%、10% 的甲烷-空气混合气体铝靶。采用六通道瞬态光学高温计记录冲击压缩气体的光辐射历程曲线, 得到了相同初始条件下 4 种不同比例混合气体的冲击状态参数。结果表明, 在强冲击压缩下, 混合气体的冲击温度随着空气混入比例的增大而增高, 冲击波后混合气体存在非平衡辐射过程。采用 Saha 电离平衡方程, 对空气混入量为 10% 的混合气体的电离度进行了估算。结果表明, 常态下空气含量 $C_{\text{air}} \leq 10\%$ 的甲烷-空气混合气体具有电探针保护能力。

关键词: 甲烷-空气混合气体; 冲击温度; 电离

中图分类号: O354; O521.2 **文献标识码:** A

1 引 言

电探针技术是目前流体动力学实验中用于测量飞片时间-位移曲线的常用手段。实验中电探针一般置于飞片的前方空腔中, 当飞片速度较大时, 空腔中的气体介质(如空气或具有一定真空度的空气)可能因强脱体冲击波加热而电离, 从而导致电探针电路的提前导通, 影响实验结果的分析。为防止这种情况发生, 相应的措施是采用难电离的气体介质代替空气作为电探针的保护气体。

1955 年, Duff 与 Goranson 等人经过实验探索^[1], 发现用甲烷气体作为电探针保护介质能有效地防止电探针提前接通。近年, 唐敬友等人^[2-4]通过对纯甲烷气体的冲击状态参数进行研究, 发现甲烷的冲击温度很低, 分析说明在如此强的冲击波压缩下, 甲烷反应体系无电离的可能; 同时数值模拟了飞片自由面速度在 3~9 km/s 范围内甲烷的非平衡化学反应流, 得到了与实验基本一致的结果, 从定量计算上进一步预测甲烷气体对电探针电路具有很强的保护作用。但在实际应用中, 探针空腔气体的置换是先将空腔抽成具有一定真空度的真空, 然后再充入甲烷。然而, 很高的真空度对实验装置和真空设备要求太高, 难以保证探针置于纯净的甲烷气体氛围, 其中往往会混入一定量的空气。特别地, 当实验装置的密封性能并不太好时, 空气的混入量更大。针对实际应用, 有必要研究部分空气的混入对电探针保护气体的保护能力会有多大程度的影响。此外, 甲烷是一种可燃性气体, 甲烷与空气在适当的混合配比下, 因冲击波的诱发, 可能会发生燃烧甚至爆炸, 这也是燃烧物理与冲击波物理中的一个基本问题。至今还未见有关于混入少量空气的甲烷气体的冲击状态方程实验研究的报道。

本工作采用二级轻气炮加载手段和光辐射法测温技术, 获得了同一飞片速度下、具有不同压力比的

* 收稿日期: 2008-08-06; 修回日期: 2008-11-19

作者简介: 王晓燕(1978—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事爆轰冲击动力学研究. E-mail: wxy_7846@yahoo.com.cn

甲烷-空气混合气体的冲击压缩参数,并初步分析了冲击压缩下混合气体的离解、电离特性,为流体动力学实验应用提供了参考价值,同时为甲烷和空气的冲击反应动力学研究提供了实验数据。

2 实验方法

2.1 实验装置设计

图 1 为实验装置及测试示意图。利用 $\varnothing 35$ mm 二级轻气炮作为加载手段,将平面钨(93W)飞片加速到 5 km/s 的速度,撞击 LY12 铝靶。撞击后在基板中形成的冲击波进入甲烷-空气混合气体样品,对混合气体进行冲击压缩,发出光辐射。光辐射信号通过靶盒背面的蓝宝石透明窗口(Al_2O_3)和光纤,传输到多通道光学高温计,高温计的输出电压信号用数字示波器进行记录,飞片速度用磁测速系统测量。

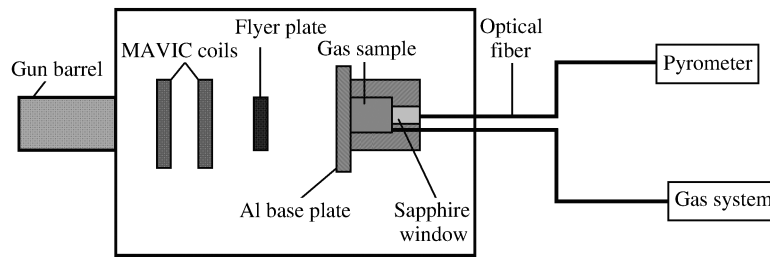


图 1 实验装置及测试示意图

Fig. 1 Sketch of experimental set-up and measurement

实验中混合气体的初始压力为 0.1 MPa,初始温度为室温,空气混入量(压力百分比)依次为零(纯甲烷气体)、1%、5%、10%。实验前,先将靶盒中的空气抽到所要求的压力(如 1% 的压比,抽到真空计读数为 1 kPa),然后充入甲烷气体到真空计读数为 0.1 MPa,如此控制甲烷-空气的压比。实验时,为防止测量过程中稀疏波赶上冲击波,靶盒空腔长度设计为 4 mm。实验中采用 7 合 1 石英光纤,光纤芯径为 100 μm ,数值孔径有两种: $\sin \alpha = 0.23$ 和 $\sin \alpha = 0.37$ 。高温计各通道滤波片的中心波长为 400、450、500、600、650、700、800 nm。

2.2 实验测试原理与方法

采用辐射比较法测量冲击温度,即测量待测气体的辐亮度并与标准光源亮度进行比较,根据待测气体的辐射规律求出其辐射温度。高温计有多个通道,对应不同的中心波长,使用前必须对每个通道进行严格的标定。本实验所用 WBR-LAMP 钨带灯($I = 11.757$ A, $T_c = 3150$ K)的参数见表 1,标定距离 $l_0 = 100$ mm。 $N_r(\lambda)$ 是标准灯的光谱辐照度,即标准灯在单位时间内辐射到距离它 l_0 处单位面积上、单位波长间隔的辐射能量。

表 1 标准灯的 N_r 值

Table 1 N_r data for standard lamp

$\lambda/(\text{nm})$	$N_r(\lambda)/(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1})$	$\lambda/(\text{nm})$	$N_r(\lambda)/(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1})$
400	17.9	650	131.0
450	35.7	700	148.0
500	98.8	800	167.0
600	109.0		

实验时,接收面积为 S 的光纤被安置在离样品发光面很近的位置上,待测样品的发光面足以充满光纤的孔径角 θ ,入射到第 i 通道光纤端面的辐射光功率 E_{exp} 为

$$E_{\text{exp}}(\lambda) = I_{\text{exp}}(\epsilon, \lambda, T) \pi N_a^2 S \quad (1)$$

式中: $I_{\text{exp}}(\epsilon, \lambda, T)$ 为实验测量的光谱辐亮度, λ 是波长, T 是温度, ϵ 是有效发射率, N_a 是光纤的数值孔

径。如果同时在若干个波长上测出了光谱辐亮度,便可利用最小二乘法通过(1)式拟合出高温物质的辐射温度 T 和有效发射率 ϵ ^[5]。

处理实验数据时所用 93W 和 LY12Al 材料的物性参数如表 2 所示。计算时采用了 $\rho\gamma = \rho_0\gamma_0$ 近似。

表 2 93W 和 LY12Al 的材料参数

Table 2 Material parameters of 93W and LY12Al

Material	$\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$c_0 / (\text{km}/\text{s})$	S	γ_0
93W ^[6]	17.64	4.01	1.28	—
LY12Al ^[7]	2.785	5.328	1.338	2.0

3 实验结果及分析讨论

3.1 实验信号

在甲烷-空气混合气体实验样品中,空气的混入量(压力百分比)依次为零(纯甲烷气体)、1%、5%、10%,初始压力均为 0.10 MPa,初始温度依次为 280、295、290、280 K。图 2 为 5% 空气混合比的 7 个通道的光谱辐亮度示波器记录波形,实验的原始记录数据是电压随时间的变化曲线,电压对应于光幅照亮度。图中,A 点是冲击波进入混合气体后,气体被压缩后开始发光的信号起跳点;B 点是冲击波到达气体/靶板后界面处所对应的信号点;后面的曲线是气体/靶板后界面处的反射冲击波二次压缩气体的发光信号。

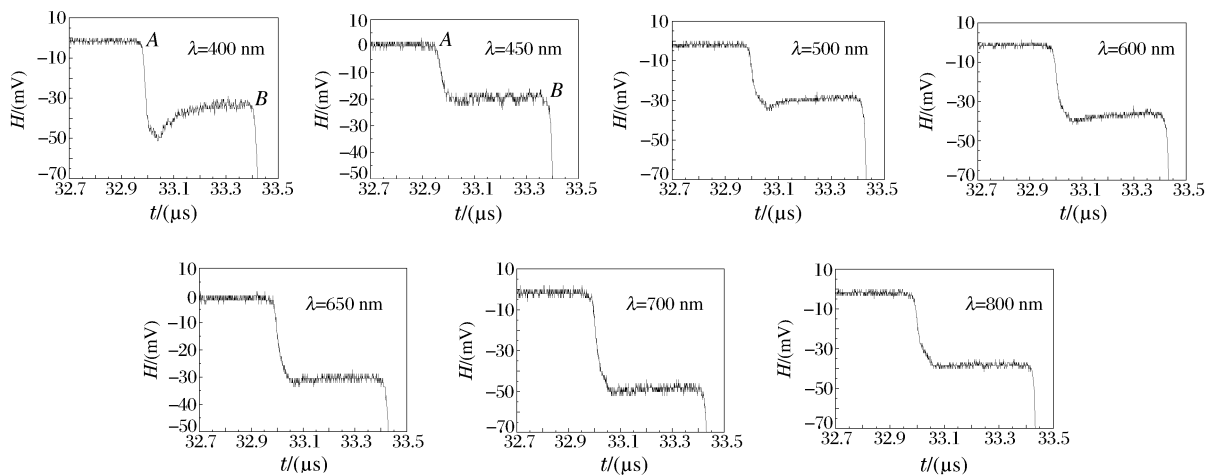


图 2 5% 空气混入量气体光谱辐亮度波形

Fig. 2 Typical radiance profiles of methane-air mixture with 5% air

3.2 实验结果

表 3 为空气混入量依次为零(纯甲烷气体)、1%、5%、10% 的气体冲击状态参数,表中 u 、 p 分别是靶板/气体界面处的粒子速度和压力。图 3 为通过 Plank 灰体模型拟合得到的冲击温度拟合曲线。

3.3 实验结果分析讨论

从图 2 的实验信号可以看出,冲击压缩的甲烷-空气混合气体的热辐射强度随时间变化,开始存在非平衡热辐射,但是随着时间的推移,最终达到了热平衡状态。文献[2]通过数值模拟,证明了甲烷冲击后由于发生复杂的化学反应,波后存在非平衡的化学反应过程和非平衡的热辐射过程。这里,实验观察到混合气体波后存在热力学非平衡辐射,这点表明,甲烷-空气混合气体在受到冲击波加热后,波后气体

温度迅速升高, 气体中的各种分子产生离解, 随即发生化学反应, 气体热力学平衡受到破坏, 出现了非平衡热辐射, 但是高温下, 混合气体的化学反应速率很大, 化学反应很快完成, 新的热力学平衡很快建立。

从表 3 数据可看出, 在相同的加载条件下, 不同混合比例的气体冲击波强度和波后粒子速度基本相同; 但是随着空气混入比例的增加, 气体的冲击温度升高。纯甲烷气体的冲击温度为 3 320 K, 10% 空气比例的混合气体的冲击温度为 4 318 K, 高出纯甲烷约 1 000 K。

表 3 甲烷-空气冲击压缩状态参数

Table 3 The experimental data of methane-air mixture under shock compression

$C_{\text{air}}/(\%)$	$w/(\text{km/s})$	$D/(\text{km/s})$	$u/(\text{km/s})$	$p/(\text{MPa})$	$T/(\text{K})$
0	4.99	9.0	7.68	49.06	3 320.0
1	5.15	9.1	7.89	51.98	3 885.4
5	5.06	8.8	7.77	50.74	3 950.0
10	5.03	9.2	7.72	54.61	4 318.7

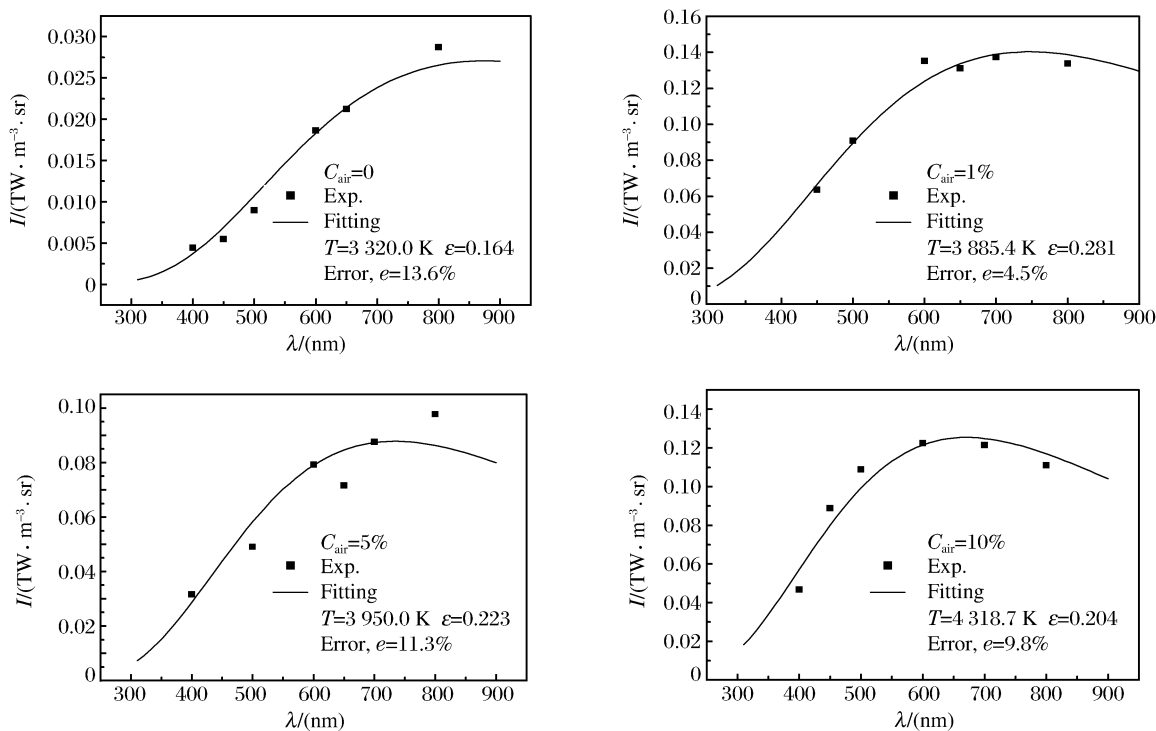


图 3 不同混合比例气体冲击温度拟合曲线

Fig. 3 Fitted shock temperature curves of methane-air mixture with different air ratio

假设冲击波传递给粒子的平均平动能为 $m \bar{u}^2/2$, 气体受冲击波加热而产生的内部平均能量转移 (如分子原子的激发或电离、分子的离解和各种辐射) 为 $\Delta \bar{E}$, 根据能量守恒定律, 气体的波后温升可用下式估算^[4]

$$\frac{n_f}{2} k \Delta T = \frac{1}{2} m \bar{u}^2 - \Delta \bar{E} \quad (2)$$

式中: k 是 Boltzman 常数, n_f 是气体分子的自由度, m 是粒子的平均分子量。由(2)式可知, 组成气体的平均分子量对气体波后温升起着重要作用, 平均分子量小的气体波后温升小。甲烷气体是分子量最小的多原子分子, 分子量为 16, 而空气的分子量为 29, 随着空气混入比例的增加, 气体的平均分子量增大,

气体的波后温升也就随之增大。

3.4 混合气体电离度的简单估算

在流体动力学测量中,对电探针保护气体的基本要求是,所用的气体在冲击压缩下尽可能不发生电离或电离度很小,而气体温度是决定其是否电离的关键因素。甲烷气体在保护电探针方面独具优点^[2-3],而在空气介质中,当物体运动速度超过 2.5 km/s 时,气体就发生电离^[6],这与两种气体的波后温升大小有很大关系。上述实验结果表明,混入一定比例空气的甲烷气体波后温升增大,这会影响到气体的电离度,给电探针的保护带来影响。

选取空气混入比例为 10% 的混合气体,应用 Saha 电离平衡方程对其一级电离度进行简单估算。表 4 是在计算中应用的各粒子的电离能参数。需要说明的是,这里对混合气体的电离度仅作简单估算,气体组元仅考虑甲烷和空气分子完全分解后的成分,没有考虑气体复杂的化学反应产物,而且各粒子的基态和一级简并度 g_0 、 g_1 取为 1, Saha 电离平衡方程为

$$\ln\left(\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2}p\right) \approx -\frac{I_n}{kT} + \frac{5}{2}\ln T + \ln\left[\left(\frac{m_e}{2\pi h^2}\right)^{3/2}k^{5/2}\right] + \ln\left(\frac{2g_n}{g_{n-1}}\right) \quad (3)$$

式中: $\ln[(m_e/2\pi h^2)^{3/2}k^{5/2}] \approx 0.477$, α 为电离度, p 是系统压强, I_n 为第 n 级电离能, k 是 Boltzman 常数, T 是温度, g_n 是第 n 级简并度。

表 4 各粒子的一级电离能

Table 4 First ionization potential of components

(Unit: eV)

$I_{1,N}$	$I_{1,O}$	I_{1,N_2}	I_{1,O_2}	$I_{1,NO}$	I_{1,CH_4}	$I_{1,C}$	$I_{1,H}$
14.53	13.614	15.51	12.5	9.5	12.90	11.26	13.60

将各粒子的电离能及系统压强 $p = 54.61$ MPa、 $T = 4318.7$ K 代入(3)式,计算得出的电离度 $\alpha < 10^{-4}$ 。由此说明,空气混入量 $C_{air} \leq 10\%$ 的甲烷气体,在初始压力为 0.1 MPa、波后粒子速度为 8 km/s 的条件下不会发生电离,该条件下的混合气体具有电探针保护能力。

4 结 论

采用二级轻气炮加载技术和光学高温计,获得同一飞片速度下、4 种不同压力比(0、1%、5%、10%)的甲烷-空气混合气体的冲击压缩状态参数。由实验结果与分析得到以下结论:

(1) 甲烷-空气混合气体在强冲击波作用下,气体中的各种分子产生分解,发生化学反应,波后存在热力学非平衡过程。

(2) 在相同的加载条件下,不同混合比例的甲烷-空气混合气体的冲击波强度和波后粒子速度基本相同,但是随着空气混入比例的增加,气体的冲击温度升高。10%空气比例的混合气体的冲击温度高出纯甲烷约 1000 K,这与其气体平均分子量的增大相关。

(3) 甲烷作为电探针保护气体,随着空气混入量的增加,会给电探针的保护带来影响。

(4) 空气混入量 $C_{air} \leq 10\%$ 的甲烷气体在 0.1 MPa 初始压力、波后粒子速度为 8 km/s 的条件下不会发生电离,该条件下的混合气体具有电探针保护能力。

References:

- [1] Duff R E, Houston E. Measurement of the Chapman-Jouguet Pressure and Reaction Zone in a Detonating High Explosive [J]. J Chem Phys, 1955, 23(7): 1268-1273.
- [2] Tang J Y, Gu Y, Hu H B, et al. Experimental Studies on Hugoniot Data of Gaseous Methane under Shock Compression [J]. Experiments and Measurements in Fluid Dynamics, 2001, 15(4): 31-36. (in Chinese)
唐敬友, 谷岩, 胡海波. 冲击压缩下甲烷的状态参数实验研究 [J]. 流体力学实验与测量, 2001, 15(4): 31-36.

- [3] Tang J Y, Yue P T, Gu Y, et al. Numerical Computation of State Parameters for Methane under Shock Compression [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2003, 21(2): 164-172. (in Chinese)
唐敬友, 岳鹏涛, 谷 岩, 等. 甲烷气体的冲击状态方程数值计算 [J]. *空气动力学学报*, 2003, 21(2): 164-172.
- [4] Tang J Y, Wu S Z, Wang F H, et al. The Effect of Shock-Heated Gaseous Helium and Argon on Pin Shortening [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 8(4): 254-262. (in Chinese)
唐敬友, 伍绍珍, 王藩侯, 等. 冲击波加热的氦气与氩气对电探针导通的影响 [J]. *高压物理学报*, 2000, 14(4): 285-290.
- [5] Tan H. Shock Temperature Measurement of Metals(I)—The Calibration of Pyrometer and the Determination of Interfacial Radiation Temperature [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1994, 8(4): 254-262. (in Chinese)
谭 华. 金属的冲击温度测量(I)——高温计的标定和界面温度的确定 [J]. *高压物理学报*, 1994, 8(4): 254-262.
- [6] Куракин И, Даниленко В В, Козерук Н П. Электрoкoнтaктная Метoдика Рeгистрaции, t -Диаграмм [J]. *Физика Горния ИВзрыва*, 1989, (5): 89.
- [7] Ouyang S W, Xie Z Q. High Temperature Nonequilibrium Air Flow [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. (in Chinese)
欧阳水吾, 谢中强. 高温非平衡空气绕流 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

Experimental Studies on Hugoniot Data of Methane-Air Mixtures under Shock Compression

WANG Xiao-Yan, HUA Jing-Song, WEN Shang-Jie, JIN Shan, SUN Xue-Lin

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics,*
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: To study the state parameters of methane-air mixture under shock compression, Aluminum target chamber filled with methane-air mixture were impacted by tungsten alloy projectiles. Projectiles were accelerated to about 5 km/s using a two-stage light gas gun. Methane-air mixture with different air ratios of 0, 1%, 5%, and 10% were tested, respectively. The radiance signals from shocked methane-air gases were recorded by an instantaneous pyrometer system. The Hugoniot data of four mixed ratio gases were obtained. The experimental results indicated that the shock temperatures of mixtures increase with rising of the air mixed ratio. The mixtures emitted non-equilibrium thermal radiation in shock downstream. The ionization of methane-air gas with 10% air mixed ratio is calculated by Saha ionization function. Calculated results indicated that methane-air mixed gases with an air mixed ratio less than 10% doesn't ionize, and can protect pins effectively.

Key words: methane-air mixtures; shock temperature; ionization