

文章编号: 1001-1455(2009)03-0323-05

超高速碰撞 LY12 铝靶产生 等离子体的电子温度诊断*

唐恩凌^{1,2}, 张庆明², 张 健¹

(1. 沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了诊断超高速碰撞过程中产生等离子体的电子温度, 进而研究不同碰撞速度、相同入射角度(弹道与靶板平面的夹角)下超高速碰撞产生瞬态等离子体在整个物理过程的电子温度随时间的演化规律, 设计了适用于瞬态等离子体诊断的扫描 Langmuir 探针诊断系统。通过二级轻气炮加载 LY12 球形铝弹丸, 运用设计的扫描 Langmuir 探针诊断系统分别进行了入射角度为 30°、不同碰撞速度下碰撞 LY12 铝靶产生等离子体的实验诊断。获得了整个物理过程在给定探针位置处等离子体的电子温度与碰撞速度的关系。

关键词: 爆炸力学; 电子温度; 超高速碰撞; 等离子体; 扫描 Langmuir 探针; LY12 铝

中图分类号: O383; O531

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引 言

超高速碰撞产生等离子体是物质在强动载作用下的物态转变, 涉及冲击动力学、固体物理、等离子体物理、高压物理等多个学科领域, 在天体物理和航天器对空间碎片的防护方面具有重要的应用价值。流星体、空间碎片的超高速碰撞将导致材料局部温度高达 10 kK 甚至更高。在碰撞过程的早期, 在这样极端的条件下喷出物的部分物质会发生电离, 产生等离子体^[1-6]。研究表明^[2-6], 由高频正弦电压驱动的扫描 Langmuir 单探针诊断系统可用于瞬态等离子体的特征参量诊断。

本文中利用自行构建的实验和扫描 Langmuir 探针诊断系统, 进行 2 种实验条件下超高速碰撞产生等离子体的电子温度诊断。

2 实验设计

2.1 实验系统构建思路

实验系统由弹丸加载系统、等离子体诊断系统及相关附属系统组成。产生超高速弹丸的加载系统由弹丸、靶板、弹丸发射系统、弹托分离、气体阻隔系统、测速系统、支撑连接系统组成; 弹丸发射系统为二级轻气炮系统。等离子体诊断系统由传感器、诊断电路、触发系统、记录系统组成。传感器为扫描 Langmuir 探针组, 用于诊断表征等离子体的特征参量; 记录系统由短路系统触发、示波器记录。支撑连接系统由靶板、垫板及靶架组成。传感器、靶板及附属系统安装在虚线框所示的加装靶室内, 传感器经同轴电缆引出靶室; 加装靶室用于隔离高压段内过来的气体。实验中, 被测对象与靶室的绝缘和喷溅大粒子的俘获是至关重要的, 在实验中做如下考虑: 采用厚 1 mm 的绝缘 PVC 板, 主要有 2 种用途: (1) 使电测系统接地与靶室地分开; (2) 吸收来自碰撞产生的大粒子, 防止大粒子与靶室直接碰撞产生 2 次蒸气云导致实验结果的不确定性。图 1 为实验系统构建框图。

* 收稿日期: 2007-12-12; 修回日期: 2008-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(10772028); 沈阳市人才资源开发专项基金项目(20081400103009)

作者简介: 唐恩凌(1971—), 男, 博士, 副教授。

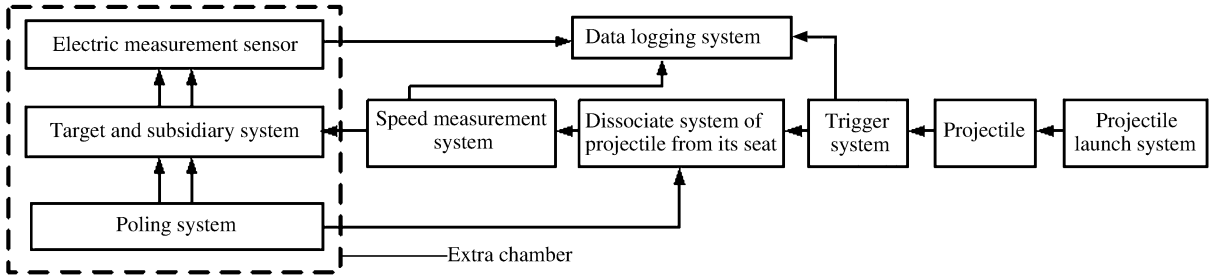


图 1 实验系统构建框图

Fig. 1 Block chart for experimental system

2.2 实验基本参数

实验在西南交通大学高压物理实验室的二级轻气炮上完成。弹丸为直径 6.4 mm 的实心球体,靶板厚 10 mm,材料均为 LY12 铝。弹丸碰撞角度(弹道与靶板平面的夹角)均为 30° ,实验 1、2 的碰撞速度分别为 5.35、5.97 km/s,靶室压力均为 67 Pa。

探针的安装方式:平行靶板、垂直弹道,探针中心与弹道在垂直于靶板的同一平面上。以弹丸着靶点作为坐标原点 O ,指向上弹道的方向作为空间 3 维坐标 y 轴的正方向,垂直于靶板平面且方向向上为 z 轴的正方向, x 轴的方向满足右手定则。探针在靶室内靶板垫板上的布局为,实验 1 和实验 2 中探针 1、2 的中心坐标均分别为 $(0, 0, 170 \text{ mm})$ 、 $(0, -100 \text{ mm}, 100 \text{ mm})$ 。探针材料均为铜丝,长 11.4 mm,直径 0.28 mm,用于测量等离子体的特征参量。

2.3 LY12 铝超高速碰撞产生等离子体的条件

国外的研究表明^[7],对于铝合金弹靶材料,其熔化的碰撞速度约 5 km/s;P. R. Ratcliff 等^[8]的研究得出结论:碰撞材料在熔化的同时伴有气化和等离子体化过程,是多个物理过程耦合在一起的。因此,实验要求碰撞速度大于 5 km/s。

2.4 实验及扫描 Langmuir 探针诊断系统

图 2 为实验及扫描 Langmuir 探针诊断系统示意图。Langmuir 探针组所需的扫描电压由函数信号发生器提供,实验中扫描频率取 $5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$,采样长度取为 20 ms;数字荧光示波器(DPO)记录扫描电压(即 CH1 与 CH3)以及实际加在探针 1 上的电压(CH2)与实际加在探针 2 上的电压(CH4),CH1 与 CH2 的电压之差除以电阻 R 即为流过探针 1 的电流,类似地,CH3 与 CH4 的电压之差除以电阻 R 即为流过探针 2 的电流。显然,当靶板上空不存在等离子体时,由于没有探针电流流过电阻 R ,CH2 (CH4) 的电压与 CH1 (CH3) 的电压相同,都是电压源的电压;当靶板上空出现等离子体并覆盖探针时,探针电流从电压源流过电阻 R 、探针、等离子体、靶板,从靶板地流回电压源,因此,CH2 (CH4) 的电压不再与 CH1 (CH3) 的电压相同,这就提供了等离子体的有关信息。以弹丸飞过磁测速线圈的瞬间所激发的电动势脉冲作为数字荧光示波器的外触发信号,示波器一经触发便记录 CH1~CH4 这 4 路电压在此

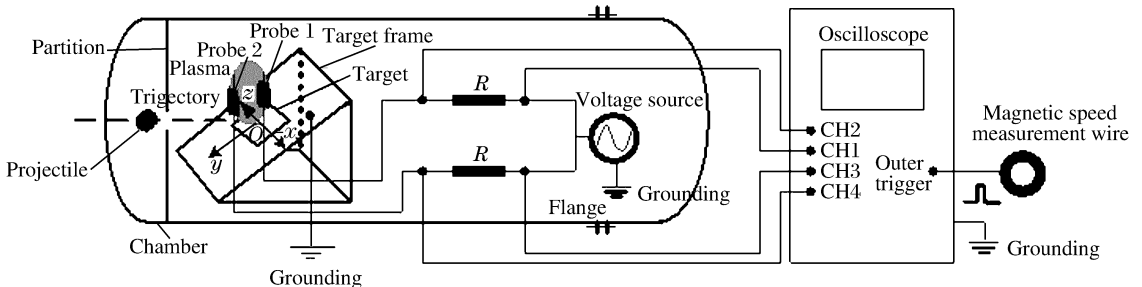


图 2 实验及扫描 Langmuir 探针诊断系统示意图

Fig. 2 Schematic chart of the experiment and diagnostic system for sweep Langmuir probes

后 20 ms 内的变化情况。这段时间对应弹丸尚未击中靶板至击中靶板后相当长的一段时间,因此,示波器记录到的信息可以反映弹丸击中靶板后所产生的等离子体需多长时间到达探针所在位置,以及此后它的演化过程直至消失的情况。原则上,要求 Langmuir 探针的伏安特性曲线在等离子体处于某一稳定状态下进行测量。在这里,假设在扫描电压的每半个周期(100 μs)内等离子体的状态是近似不变的。因此,对应扫描电压的每一个周期都可以测得一条伏安特性,而由每一条伏安特性曲线即可推算得等离子体电子温度等参数,因此可以求得探针所在位置电子温度等随时间变化的情况^[2-3,6]。

3 Langmuir 单探针诊断理论

当探针的电位大于等离子体的空间电势时,大部分探针流是由于电子引起的(电子热速度约 120 km/s),有

$$I_{\text{pr}} = \begin{cases} I_e e^{e(V_{\text{pr}} - V_p)/(kT_e)} & V_{\text{pr}} < V_p \\ I_e & V_{\text{pr}} > V_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_e = -neA\sqrt{kT_e/(2\pi m_e)}$, I_e 为电子流; I_{pr} 为探针电流; V_{pr} 为探针电位; e 为电子的电荷量; n 为电子数密度; k 为玻尔兹曼常数; V_p 为等离子体电势; m_e 为电子质量; A 为探针暴露部分的表面积(假设物质是单电离的)。离子饱和流可由下式给出

$$I_i = 0.6enA\sqrt{kT_e/M} \quad (2)$$

式中: M 为离子质量。由式(1)得到

$$\ln(I_{\text{pr}}/I_e) = e(V_{\text{pr}} - V_p)/(kT_e) \quad (3)$$

可以通过 $\ln I_{\text{pr}} - V_{\text{pr}}$ 的关系得到电子温度。

为了获得高时间分辨率等离子体的内部信息,扫描电压的频率 f_{sw} 应该高于等离子体波动频带 f_{fl} 的 2 倍;同时要求扫描频率不要过高以保证有足够的时间在探针周围形成鞘层。探针上作用适当扫描频率电压的目的是使等离子体处于准稳态,在该扫描频率下认为等离子体参数不随时间而变化。当输出电压 $V_s = V_0 \sin \omega t$ (V_0 为正弦波扫描电压的幅值, ω 为电压源角频率)的交流电压作用于探针时,探针的电压与电流将按照同频率变化。只有满足上述 2 个条件,才能得到随时间变化的等离子体参数。为了得到可靠的 Langmuir 探针测量结果,探针的扫描频率必须满足^[9]

$$2f_{\text{fl}} \leq f_{\text{sw}} \leq 1/\tau_{\text{sh}} \quad (4)$$

式中: τ_{sh} 是探针鞘层形成时间。鞘层形成频率 f_{sh} 的理论估计^[9]: $f_{\text{sh}} \approx (\alpha/2)(kT_e/(eV_0))\omega_{\text{pi}}$; 对于正弦波电压, $\alpha = 1/(2\pi)$; ω_{pi} 为等离子体的离子频率。

对于超高速碰撞产生的等离子体,基于理论和实验考虑,5 kHz、 ± 10 V 的正弦波电源可以提供 1 个不失真的 Langmuir 探针偏置电压,每个探针在半个周期内扫过约 50 个数据点。这个频率比电子频率低得多,电子频率大于 1 GHz,离子频率大于 3 MHz^[7]。因此,等离子体总是与探针电势近似平衡。

4 结果与分析

以实验 1 为例分析典型实验数据。图 3 为电源电压及探针对地电位、探针电流随时间的变化关系。着靶点到探针 1 中心的距离为 170 mm,由图 3(a)信号判读可知探针感受信号的起始时间为(98 \pm 10) μs ,持续到 4.52 ms。

着靶点到探针 2 中心的距离为 141.4 mm,由图 3(b)信号判读可知探针感受信号的起始时刻为(92 \pm 10) μs ,持续到 5.11 ms。

由实验可知,无论从探针感受到信号的起始时刻和持续时间^[4-5]还是探针 1、2 信号出现的先后都说明实验中有等离子体产生。

以实验 1 中探针 1 为例,触发后 1 620~1 718 μs 半个周期内 $I_p - V_p$ 、 $\ln I_p - V_p$ 曲线如图 4 所示。由图 4,结合公式(3)得到电子温度 $T_{eV} \approx 0.4$ eV。用同样的方法对探针 1、2 采集的数据每半个周期 100 μs

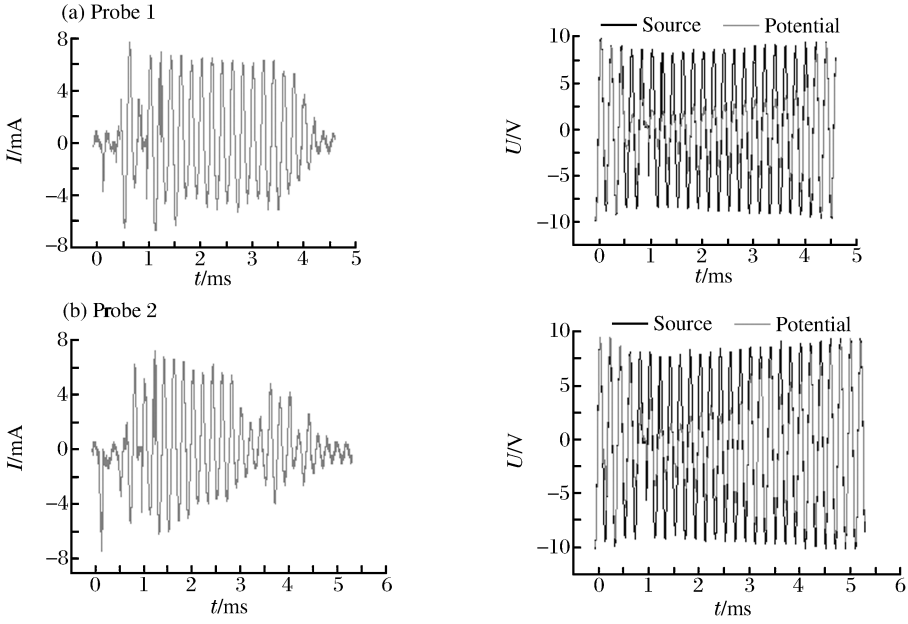


图 3 探针 1 和探针 2 的实验结果

Fig. 3 Experimental results on probes 1 and 2

进行处理,得到图 5 中的数据点。由此可见,探针的时间响应和布置还不足以获得碰撞瞬间的电子温度,探针获得的是膨胀以后羽流在空间给定位置的电子温度。给定位置探针处电子温度随时间的演化关系如图 5 所示,图中误差带为 5%。

由图 5 可知,实验 1、2 中探针 1 的平均电子温度分别为 0.42、0.50 eV,探针 2 的分别为 0.47、0.56 eV。同时可以看出,在碰撞角度相同、传感器布局相同的条件下,等离子体羽在膨胀、冷却、重组的整个过程中电子温度的变化趋势,膨胀过程中随着碰撞速度的增大,等离子体中的电子温度峰值有所升高。

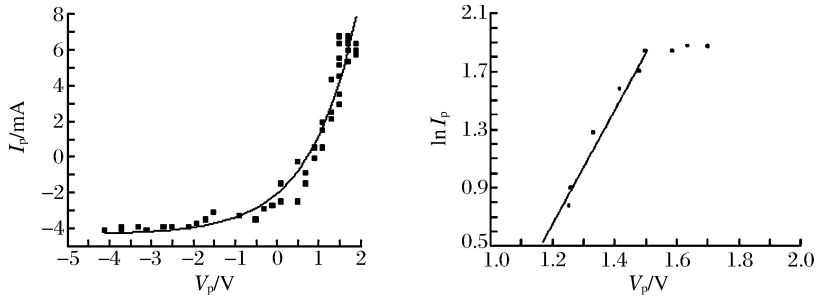


图 4 典型的 I_p-V_p 和 $\ln I_p-V_p$ 曲线

Fig. 4 Typical curves of I_p-V_p and $\ln I_p-V_p$

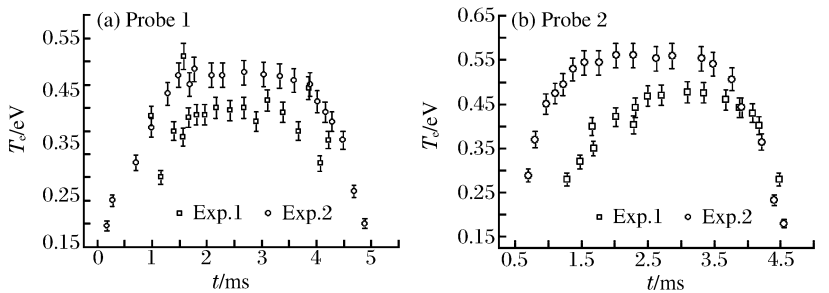


图 5 不同碰撞速度下电子温度随时间的变化

Fig. 5 Variation of electron temperatures with time at different impact velocities

5 结论

对 LY12 铝弹丸以 30° 的入射角度、5.35、5.97 km/s 的碰撞速度碰撞 LY12 铝靶产生的等离子体进行的诊断结果表明,用扫描 Langmuir 探针可以诊断超高速碰撞产生等离子体的电子温度;且在碰撞角度相同、传感器布局相同的条件下,电子温度随碰撞速度的增大有所升高。

感谢西南交通大学高压物理实验室的刘福生、张明建、薛学东等老师的支持与帮助。

参考文献:

- [1] Lai S T, Murad E, McNeil W J. Hazards of hypervelocity impacts on spacecraft[J]. *Spacecraft & Rockets*, 2002, 39(1):106-114.
- [2] 唐恩凌,张庆明,黄正平.超高速碰撞产生等离子体的电子温度诊断[J].北京理工大学学报,2007,27(5):381-384. TANG En-ling, ZHANG Qing-ming, HUANG Zheng-ping. Electron temperature diagnosis of plasma generated during hypervelocity impact[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2007,27(5):381-384.
- [3] TANG En-ling, ZHANG Qing-ming, OU-YANG Ji-ting. Fast diagnosis of transient plasma by Langmuir probe [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2007,16(3):375-378.
- [4] Crawford D A. The production and evolution of plasma associated magnetic fields during hypervelocity impacts: Implications for planetary paleomagnetism[D]. Providence, RI, USA: Brown University, 1992:52-73.
- [5] Crawford D A, Schultz P H. Laboratory investigations of impact-generated plasma[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 1991,96(E3):18807-18817.
- [6] TANG En-ling, ZHANG Qing-ming, HE Yuan-hang, et al. Preliminary study on diagnostic techniques for transient plasma generated by hypervelocity impact[J]. *Plasma Science and Technology*, 2008,10(6):735-738.
- [7] Kenneth E, Harwell K E, Kynric M, et al. Analytical model of the flash produced in aluminum-aluminum hypervelocity impacts[J]. *Spacecraft*, 1972,9(9):682-685.
- [8] Ratcliff P R, Reber M, Cole M J, et al. Velocity thresholds for impact plasma production[J]. *Advance Space Research*, 1997,20(8):1471-1476.
- [9] Mitchner M, Kruger C, Fontanesi M. A 400 kHz, fast-sweep Langmuir probe for measuring plasma fluctuations [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999,70(6):2681-2688.

Electron temperature diagnosis of plasma generated by hypervelocity impact of a LY12 aluminum projectile into a LY12 aluminum target

TANG En-ling^{1,2*}, ZHANG Qing-ming², ZHANG Jian¹

(1. *School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, Liaoning, China;*

2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)*

Abstract: A sweep Langmuir probe diagnostic system was designed to investigate the electron temperature evolution of plasma produced by hypervelocity impact of LY12 aluminum projectiles into LY12 aluminum targets. In the experiment, LY12 aluminum spherical projectiles were loaded by a two-stage light-gas gun, the incident angle of LY12 aluminum projectiles was 30° and the impact velocities were different. The relation between the electron temperature of plasma and the impact velocity for the whole physical process was obtained by treating the effective data, which at the given probe positions were measured by the designed diagnostic systems.

Key words: mechanics of explosion; electron temperature; hypervelocity impact; plasma; sweep Langmuir probe; LY12 Al

* Corresponding author: TANG En-ling

E-mail address: tangenling@126.com