

# 基于电探针与光透射率探测技术测量冲击加载下硝基甲烷的辐射率历史

郝迎新 孙燕云

1 西南交通大学，四川成都，610031；

2 西南交通大学物理科学与技术学院高温高压物理研究所，四川成都，610031；

**摘要：**深入讨论了冲击加载下基于电探针和光透射率改变的实时探测技术。同时设计一种新型的6点式电探针，具有响应时间快，实验精度高等优点。并以硝基甲烷作为样品，研究其在8.4GPa的冲击载荷下的物理化学变化行为，为研究均质含能材料的冲击点火机理提供了参考。

**关键词：**硝基甲烷；点火起爆；电探针

**DOI：**10.69979/3041-0673.25.10.037

电子测试技术是电子工程的核心组成部分，在工业自动化，航空航天，国防建设以及很多领域都有应用。在高温高压领域，通常使用冲击加载<sup>[1]</sup>方式使目标材料达到极端条件，不过由于冲击波速度较高，常达到数千米每秒，往往难以对其冲击加载时间进行检测。电探针测试技术具有时间测试精度高，易布局和适配性强等优点，是检测冲击波加载时刻的有效手段。但是传统的电探针由于通常采用单根探针测量炸药爆轰驱动飞片运动到达特定位置的时刻，其精度相对较低，且具有偶发性，难以进行有效判读。

利用光学透射率分析材料的状态行为变化是一种较为常见的检测手段<sup>[2]</sup>，通过分析光信号在介质中的传播特征可以探测材料的动态响应。在冲击压缩实验中，冲击加载时间尺度通常为微秒级，如何保证探测光线与冲击波压缩的同步性是能否有效探测样品光透射率改变的关键。

硝基甲烷（NM, CH<sub>3</sub>NO<sub>2</sub>）<sup>[3]</sup>作为结构简单的有机硝基化合物，是最典型的液态含能材料之一，同时也是最常见的均质炸药。主要应用于气溶胶推进系统（依托快速汽化特性）、复合燃料配方设计（基于氮氧协同氧化机制）以及有机合成前驱体开发。其独特的分子对称性赋予体系优异的热力学稳定性，常作为研究均质含能材料冲击起爆机理的首选对象。Citroni<sup>[4]</sup>等人通过利用高压下红外辐射光谱技术考察了硝基甲烷在静压下的分解行为，同时基于密度泛函理论和ReaxFF分子动力学，结论得出硝基甲烷在压力加载下的分解反应符合双分子反应机制，即点火反应时第一个反应步骤是从甲基

到硝基的分子间质子转移形成CH<sub>3</sub>NOOH<sup>+</sup>和CH<sub>2</sub>N<sup>-</sup>O<sub>2</sub>。Han<sup>[5]</sup>等人基于Citroni的研究，使用ReaxFF分子动力学对高温高压环境下硝基甲烷的后续化学反应步骤进行了分子模拟，他们提出一种两阶段爆炸机制。在高温高压下，硝基甲烷发生质子转移现象后不久，OH从N上脱离，形成水后，放热反应开始。此阶段的反应并不完全，大部分的C,N被束缚在分子碎片中。随着反应的进行，分子碎片将被分解，产生NH<sub>3</sub>、CO、H<sub>2</sub>和各种C的冷凝物，从而完成爆轰。另一方面，Sheffield<sup>[6]</sup>等人曾利用VISAR激光干涉技术对硝基甲烷爆炸反应区的剖面进行了实验测量，他们发现当硝基甲烷被丙酮稀释后，其波阵面将出现蜂窝状结构，这被认为具有不稳定的爆轰性质，但在纯硝基甲烷中并未不稳定的前沿特征。他们这是因为硝基甲烷中的蜂窝状结构非常微小，难以被直接观察到。Leal-Crouzet<sup>[7]</sup>等人对硝基甲烷在8.5–12GPa压力区间进行了冲击加载实验，基于光辐射测温技术，发现硝基甲烷此时具有二次点火特征，出现超爆现象，且其超爆所需时间随压力增高而降低。Viviane<sup>[8]</sup>对收冲击压力为8.4GPa下的硝基甲烷进行了冲击辐射实验，他们发现在5微秒的观测区间内，硝基甲烷能够出现二次点火现象，同时认为硝基甲烷在受到冲击后光透明性不发生改变。最近，Nissen等人<sup>[9–12]</sup>利用桌面激光加载技术，结合多普勒测速仪和高速相机对硝基甲烷进行了大量冲击实验。他们通过高速相机，拍摄到了在点火压强附近的硝基甲烷冲击波前沿特征，发现其出现了类似热点的细胞结构，并且结构大小与冲击压力呈正相关。在此之前，类似现象往往于非均质含能

材料或掺杂后的硝基甲烷中的冲击加载下被观测到。综上所述探究硝基甲烷在冲击加载过程中的物理化学性质变化对含能材料的冲击点火机理研究非常重要。利用光学透射率分析材料的状态行为变化是一种较为常见的检测手段，通过分析光信号在介质中的传播特征可以探测材料的动态响应。本文通过研究硝基甲烷在冲击作用下的光透射率变化以及温度演化历史，为其冲击点火机理提供了实验依据。

## 1 实验装置及电探针设计原理

轻气炮加载技术由于其精度高，冲击载荷可调节，靶体易置换等特点，一直是探究极端条件下材料动态响

应的良好加载手段。本文基于二级轻气炮加载平台，结合光透射率原位检测技术和辐射测温技术，对硝基甲烷样品进行冲击加载。实验的测量方式如图1所示，利用火药爆炸产生的高温高压气体推动活塞运动，同时压缩管中轻质气体，轻质气体压缩至极限状态下冲击隔离膜片，从而推动带有弹丸的弹托。弹丸在具有高精度内壁的发射管中加速撞击装有样品的靶体从而形成冲击波，将样品瞬时加载到高温高压状态。其中弹丸的直径为24mm，厚度3mm，材料为铜。样品靶由所使用的盖板为1mm厚的铝质金属，后窗口为石英。当弹丸抵达样品靶时，将瞬间触发电探针，同时在靶和弹丸交界面产生一维平面波。

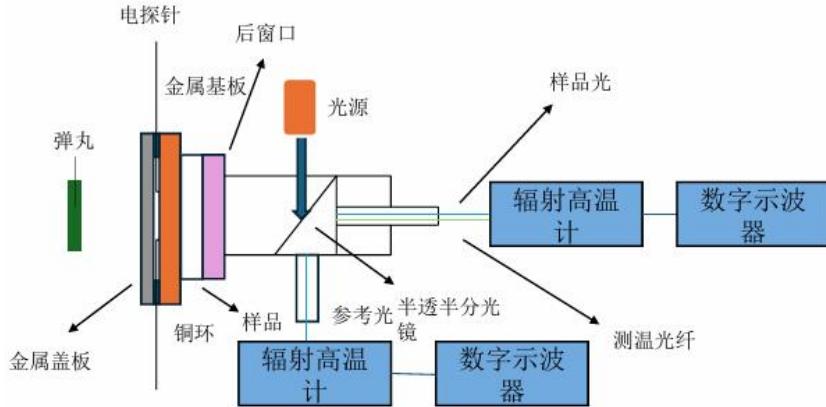


图1 实验的测量方式

为了提升其信号的可靠性和严谨性，在铝基板上总共设计了呈对称分布的6根电探针，其设计原理图如图2所示，厚度为3mm，相邻两根电探针夹角为60°。为保证电探针的顺利触发，相对两根电探针距离为15mm，小于弹丸直径，满足触发条件。在盖板与基板之间，用铜质薄膜圆环隔离，其目的是保留一定空间让弹丸碰撞到基板产生冲击波，压缩使其向前运动触发电探针。铜

膜圆环厚度为0.5mm，能够有效防止人工安装时电探针的误触情况其内径为25mm，外径与铝质盖板相同。盖板、铜质薄膜圆环与基板三者之间用AB胶水进行粘接密封。该胶水适应性强，粘接强度高，且具有良好的绝缘性能，能够在粘结的同时，有效防止样品泄露情况发生。实验前为保证产生的冲击波为一维平面波，弹丸、盖板与基板皆进行抛光处理。

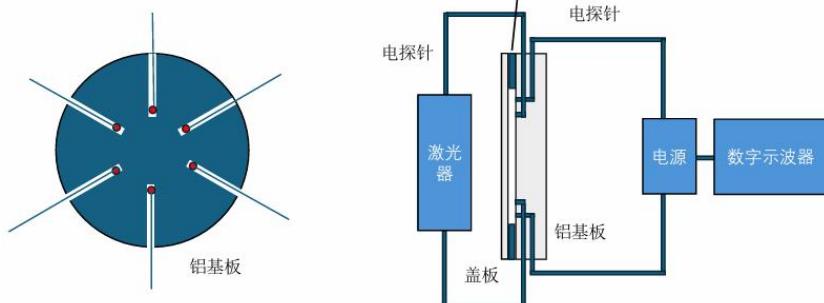


图2 电探针设计原理图

将基板上的六根电探针分为三组，相对的两根电探针为一组。将其中一组电探针作为激光器的自锁开关，

同时连接激光器的正极，激光器负极接地。当冲击波压缩盖板时，只需任意一根探针触发即可使激光器发光，

实现了双保险设计。另外两组电探针连接电源与数字示波器，示波器采样率为15GS/S，数据点读取误差不超过1ns。为防止电探针所加电压通过基板传导激光器上影响其正常工作，同时避免电压幅值超出示波器量程，电源设置电压应与激光器工作电压相比拟，不宜过大。冲击波到达基板面时，两组电探针的触发信号由数字示波器所记录。通过计算得到其平均触发时刻。

实验采用波长为 $650 \pm 10\text{nm}$ 的准直激光器（功率10mW，光斑尺寸2.5mm），触发后可稳定发光时间为5μs。光束由激光器发出后，经半透半反分光镜形成双光路结构：测量光路即样品光 $I_{\text{sample}}$ 满足透射-反射循环光路设计（后窗口→样品→前窗口→反射镜→收光透镜），参考光路即参考光 $I_{\text{reference}}$ 则采用垂直通道，透过分光镜后直接由收光透镜聚焦于传输光纤。光电信号转换通过多通道高温辐射计实现，最终由数字示波器捕获并存储动态数据。光透射率参数通过样品光 $I_{\text{sample}}$ 与参考光 $I_{\text{reference}}$ 的强度比值确定。

## 2 实验现象及分析

实验所得的电探针信号如图3所示，可以看出四根电探针皆成功触发，但由于弹丸与基板的碰撞并不是完全垂直碰撞，四个电探针的并不是同时触发， $t_1$ 时刻位于18ns处， $t_2$ 时刻位于19ns处， $t_3$ 时刻位于30ns处， $t_4$ 时刻位于27ns处。可以看出相邻两组误差为10ns，而相对两根电探针误差仅为3ns，总体误差在10ns内，工程适用性良好，显著提升了其数据精度。四个点探针跳变点的最高幅值最大相差0.5V左右，都在激光笔工作电压以内，表明四个电探针均正常工作。

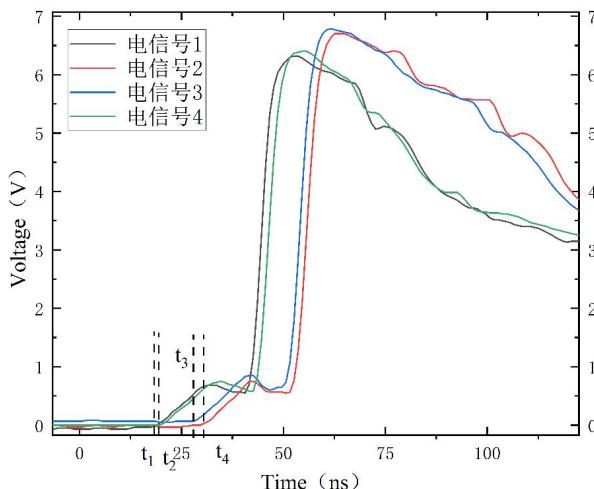


图3 电探针信号

实验获得的冲击下光信号改变图像如图4所示，冲

击压力为8.4GPa。冲击波加载到基板后，触发点探针使其立即发光， $t_A$ 为激光器触发时刻，该时刻与同时也应为冲击波到达基板时刻。激光器发光355ns后， $t_B$ 时刻出现跳变信号，可判断此时冲击波抵达硝基甲烷样品使其自身发光，同时根据热力学关系计算也说明 $t_B$ 为冲击波到达样品时刻。 $t_D$ 时刻冲击波出样品时刻。上述现象表明利用激光器发光作为辅助判据来判定冲击波抵达样品时刻是可行的。图5所示的为冲击加载时样品的透射率变化图像。当 $t_{B1}$ 时刻冲击波进入样品后，透射率立即升高，但并不稳定，随着冲击压缩过程的进行，透射率出现下降，并随后再次上升趋于平稳。说明此时硝基甲烷样品中有热点形式的散射源生成，其热点所含能量高，向外辐射能量区域多。随着冲击波进入样品深度的增加，热点的数目的影响逐渐大于其向外辐射能量的影响，形成了更多的散射源，使透射率逐渐稳定。

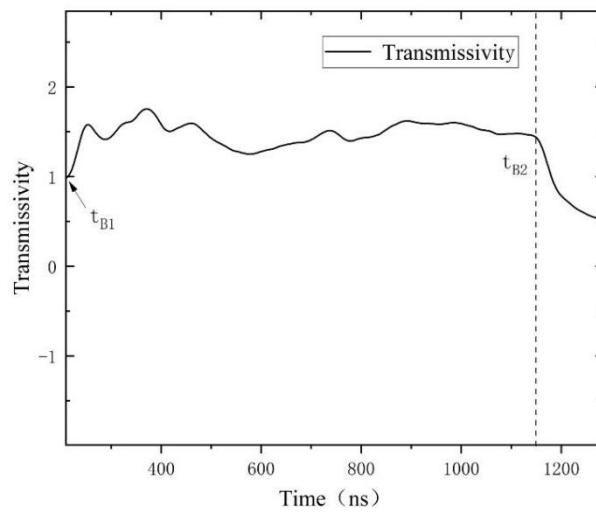


图4 冲击下光信号改变图像

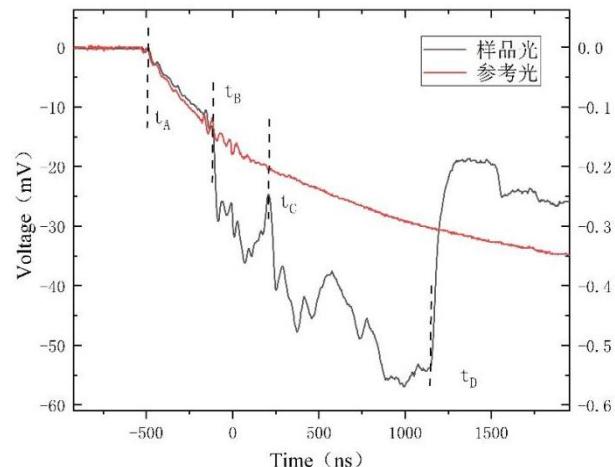


图5 冲击加载时样品的透射率变化图像

## 3 结论

改进后的6点式电探针作为一种信号传输装置，效应速度快，实验精度高，能够满足冲击加载实验在纳秒级别响应需求。同时，双保险设计的连接方式为光透射率探测提供了实验保障，极大提高了其探测效率。

在8.4GPa的冲击加载条件下，硝基甲烷在点火时有热点形式的散射源生成，且其数量随着冲击进程的持续，会逐渐上升，这为含能材料点火机理的研究提供了重要参考和依据。

### 参考文献

- [1]经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [2]廖文强. 基于光学透明性及光辐射法的98wt%双氧水的冲击起爆机理研究[D]. 西南交通大学, 2022. 10. 2 7
- [3]S F Trevino, E Prince, C R Hubbard. Refinement of the structure of solid nitromethane[J]. Chem Phys, 1980, 73, 2996 - 3000.
- [4]Citroni, Margherita, Bini, et al. Nitromethane Decomposition under High Static Pressure [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2010, 14, (29):9420-9428.
- [5]Han, Si-ping, van Duin, Adri C, et al. Thermal Decomposition of Condensed-Phase Nitromethane from Molecular Dynamics from ReaxFF Reactive Dynamics[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2011, 115, (20):6534-6540.
- [6]Sheffield, S. A., et al. Particle velocity measurements of the reaction zone in nitromethane. No. LA-UR-02-4331. Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM (United States), 2002.
- [7]Leal-Crouzet, B, Baudin, G, Presles, et al. initiation of detonation in nitromethane[J]. Combustion and Flame, 2000, 122, (4):463-473.
- [8]Bouyer V, Darbord I, Hervé P, et al. Shock-to-detonation transition of nitromethane: Time-resolved emission spectroscopy measurements [J]. Combustion and Flame, 2006, 144(1-2): 139-150.
- [9]Bhowmick M, Nissen E J, Dlott D D. Detonation on a tabletop: Nitromethane with high time and space resolution[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(7).
- [10]Nissen E J, Bhowmick M, Dlott D D. Imaging the reactive flow structure in shocked nitromethane and nitromethane with additives[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2020, 2272(1).
- [11]Nissen E J, Bhowmick M, Dlott D D. Shock-induced kinetics and cellular structures of liquid nitromethane detonation[J]. Combustion and Flame, 2021, 225: 5-12.
- [12]Nissen E J, Bhowmick M, Dlott D D. Ethylenediamine catalyzes nitromethane shock-to-detonation in two distinct ways[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2021, 125(29): 8185-8192.