

核爆炸和核诊断中的物理问题

叶立涌 吕敏

核爆炸是剧烈的能量释放过程,在微秒级时间内使装置变成高温高密度等离子体,向周围空气辐射,形成火球等核爆炸效应。目前各国核试验目的在改进核武器设计,都已转入地下进行。核试验中现场实时物理诊断是为了提供核装置反应的实际数据,可以分为:核反应历史诊断(γ 测量);核爆炸中温度参数诊断(N, X 测量);核反应区空间参数诊断(针孔照相)等。它们是在恶劣环境中进行的单次、快速测量,是特殊类型的核物理实验,所用技术可概括为脉冲射线束测量。

一、核爆炸与核试验

1945年7月16日美国在新墨西哥州阿拉莫果多进行了塔上原子弹试验,首次实现了核爆炸;并接着于8月6日与9日先后在日本广岛和长崎投下了当时仅有的两枚原子弹,显示了核武器的巨大杀伤破坏力。

核武器的出现,对国际政治、军事和外交态势产生了重大影响。我国本着一定要加强国防的决心,坚持自力更生的方针,全国军民大力协作并经过艰苦的努力奋斗,1964年10月16日在西部核试验场首次原子弹试验成功,并以与世界上有核国家相比最快的速度从原子弹过渡到氢弹的研制,完成了百万吨级威力的氢弹空投试验,我国掌握了核武器大大提高了我国的国际地位。

核武器的发展是科学技术的成果,核武器的发展也推动了众多的科学技术的发展。

核爆炸的实现包含着复杂的物理过程,而且是一个独特的物理现象。核爆炸瞬间释放出巨大的能量,使它很难在实验室再现。因此,核武器的研制与发展都相伴着对应的核试验,通过核试验也可对核爆炸的物理过程与现象得到更多的了解。

核爆炸首先是剧烈的能量释放过程,在微秒的短时间内,放出相当于几千吨甚至百万吨梯恩梯炸药(TNT)爆炸的能量。核装置内的

裂变材料要发生高超临界的裂变链式反应,聚变材料要发生高物质密度的高温聚变反应,在这些核过程中伴随着裂变、聚变反应,产生大量的中子和 γ 射线。核装置体积内突然释放如此巨大的能量,装置结构物质全部电离,形成高温高密度等离子体,温度可达百万甚至几千万度。爆炸产生的巨大能量向周围传播,发生与周围介质条件密切相关的物理现象。

在大气层中发生核爆炸^[1],高温高密度等离子体——火球,不断向外发出热辐射,同时在辐射过程中膨胀、冷却,最后熄灭。火球发出的光(热)辐射是核爆炸的重要杀伤因素之一。火球膨胀、冷却过程中不断对地面上尘土抽吸而形成核爆炸壮观的蘑菇云。火球膨胀过程压缩周围空气产生强而传播范围极广的冲击波,冲击波将造成大范围的杀伤破坏。核反应过程中伴放出极强的中子和 γ 射线,中子在大气中传播被空气中氮原子俘获又放出强的 γ 射线,高温等离子体又要辐射出强的X射线,核爆炸相当于一个强的辐射源,向周围放射出强的射线,构成了核辐射杀伤因素。大量的射线在空气中造成大范围的电离和电子流,不均匀电子流分布会激励出强的电磁脉冲,这种电磁脉冲频谱很宽,又称核电磁脉冲。烟云中含有大量的放射性物质,随风飘散后会在下风方向造成大范围的放射性沉降。这一幅爆炸景象,其中包含了极丰富的光学、力学、原子及核物理学与电磁学等各方面的物理现象。

为掌握核武器的性能, 必须通过核爆炸实际测定其爆炸威力; 为改进核武器设计, 必须详细了解核爆炸反应过程的各种参数; 为了核武器的使用和防护, 还需要掌握核爆炸效应参数规律。因此, 为了真正掌握、发展核武器必须进行核试验, 在核试验中进行大量的诊断与测量工作。

核爆炸是核反应能量释放和积聚的结果。核反应过程都伴有特征性的射线放出, 这些射线如中子与 γ , 具有强的穿透能力, 能够穿出核装置, 因此, 测量这些穿出的射线就能诊断核装置内的核反应过程。为了进行射线诊断, 希望核爆炸是定点爆炸, 便于对这个极强的脉冲射线源进行准直, 引出待测的射线, 同时屏蔽住其他不被测量的杂散射线。自然, 地下核试验对于射线诊断具有许多有利条件, 而且地下核试验还把核爆炸的放射性产物封闭于地下, 不造成环境污染, 放射性物质不会飘散, 也利于保守核装置的机密。因而核试验的发展, 作为武器研制与发展的需要, 都会转入地下进行。

本文也仅就地下核试验中的物理诊断方面作一简要介绍。

二、核爆炸中的物理诊断问题

核武器设计必须具备先进的武器物理思想, 经过许多精确的计算。这样复杂、详尽的计算不经过实验验证是不会有把握的, 必须依靠核试验来获取实验数据。因此, 实质上试验的目的就在于诊断。

作为核爆炸现场实时的射线物理诊断, 从实验技术上可以概括为“脉冲射线束测量”, 它包括脉冲射线束探测, 快信号传输和单次快信号记录等。核试验中的脉冲射线束测量具有复杂和困难的特色。核爆炸只是单次过程, 不能重现, 诊断测量必须保证一次取到正确的数据。整个测试过程在现场实施时都是无人操作, 需要自动进行, 因而测试系统都要具有自动控制性能。核爆炸过程又是一个很快的物理过程, 测量的快信号要经过长距离的传输, 给信号的

物理

记录带来许多困难。可以看出核爆炸的射线物理诊断工作属于很特殊的、很困难的一种核物理实验。

地下核试验中的射线测量, 就竖井方式地下试验的例子来说, 需把射线诊断的探测器和屏蔽其它射线的屏蔽物体都按设计方案安装在一个测试钢架上, 这个测试钢架与核装置连在一起, 一并吊放到地下竖井里去, 探测的信号由同轴电缆与光缆传到地面远处的记录站去, 由单次高速示波器或瞬态信号数字化仪进行记录。系统放入井底后, 井筒内用回填料填满到地面, 中间还要用水泥或特殊材料做成封闭的塞子, 保证爆炸时没有放射性泄漏。记录下的信号供数据分析。

核爆炸需要诊断的物理内容很多, 包括高能炸药爆轰过程、裂变链式反应过程、轻核材料聚变过程、能量传递过程以及爆炸的威力和核材料的燃耗等等。这里只能就射线诊断中的几种典型物理问题与相关技术简述如下。

1. 核爆炸反应随时间变化历史诊断^[2]

裂变型原子弹爆炸过程中链式反应增长规律可用指数形式表示,

$$N_f(t) = N_f(t_0)e^{\alpha(t-t_0)},$$

$N_f(t)$ 为 t 时刻的裂变数, 参数 α 为增殖因子, 诊断其爆炸过程主要是测定 α 以及其随时间的变化即 $\alpha(t)$ 。聚变型的核弹爆炸, 聚变反应持续的时间及聚变反应变化的历史同样是诊断的重要物理量。

这里以裂变反应参数 $\alpha(t)$ 的诊断测量为例。 α 参数反映核裂变材料受压缩后的状态, 达到超临界后的裂变材料就会自持裂变, 不断放出能量, 待能量积聚到一定程度, 发展到弹体解体, 链式反应也就终止。裂变是由裂变中子引起的, 裂变过程也放出 γ , 诊断裂变反应的过程通常是测量出弹的 γ 射线强度随时间的变化。原子弹爆炸的链式反应的时间只延续微秒量级, 但测量的 γ 射线强度变化往往要跨越 14 至 15 个量级, 要完整地诊断出反应过程就要全面覆盖极宽的测量量程, 实验技术上要采用不同灵敏度的多个多种探测器来配接, 粗略的诊断

简图如图 1。

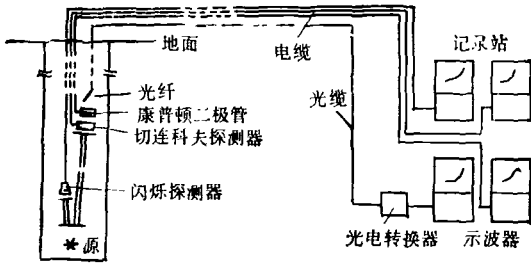


图 1 核反应时间变化历史诊断布置示意图

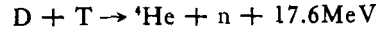
低量程的探测器布放在较近的测点，高量程的距离远些，距离选择是调节量程的一个因素。核爆炸产生的脉冲射线束很强，选用的探测器多是探测灵敏度较低的，但又要快响应的探测器。闪烁光电探测器灵敏度相对较高，多用于低量程，切连科夫探测器、康普顿二极管或光纤受射线直照产生切连科夫效应来测量 γ 强度等，都是常用的探测手段。这些探测器统一标定灵敏度，便于量程上配接。由于信号要传输到较远的记录站记录，希望探测器输出的电流要大，经过传输衰减后还有好的信噪比。整个测量系统的时间响应都是快的，需要达到纳秒量级；各路信号之间在时间上互相要有严格的关联；因此，在这些诊断工作中需要用大量价格昂贵的大直径同轴电缆，需要用大量高性能快速记录示波器。这样，最终在宽动态范围获取 γ 射线强度随时间的全谱形，从中推出指数增长规律中 $\alpha(t)$ 参数的结果。

可见，这是一项规模相当大的测量工作。至于聚变反应过程的诊断，其持续的时间更短而且变化更快，自然更加困难了^[1]。

2. 核爆炸过程中温度参数诊断^[1]

聚变反应有时称为热核反应，它只有在高温、高密度下才起自持反应，反应率随温度变化十分敏感，因此核爆炸中诊断聚变反应区氘氚等离子体温度状态非常重要。

氘氚反应



产生快中子，其能量会受到氘氚离子运动速度的展宽，多普勒展宽与等离子体的温度有关，简单的关系有

$$\Delta E_n \approx 0.177 \sqrt{kT} \quad (\text{MeV}),$$

ΔE_n 指中子能谱展宽的宽度， k 是波耳兹曼常数， T 是温度， kT 用 keV 为单位。因此测量聚变反应中子的能谱展宽，就能反映聚变区等离子体温度。

测量中子能谱利用飞行时间法是有效的手段。让中子飞行一段距离 l ，所需的时间由中子运动的速度来决定，即与中子能量有关，有简单的关系式

$$t_f = \frac{72.2 l}{\sqrt{E_n}} \text{ ns},$$

距离 l 用米，中子能量 E_n 用 MeV 单位，飞行时间 t_f 就是纳秒数值。测量中子能谱就变成测量中子的时间谱形，好的时间分辨测量系统就能测好中子谱形，典型的诊断系统原理图如图 2 所示。

由图可见，中子飞行后打在含氢的薄靶上，碰撞出的质子沿侧向运动，用半导体 PIN 探测器去记录反冲质子，产生的电信号经过同轴电缆传到记录站记录，就获取了中子的时间谱形。

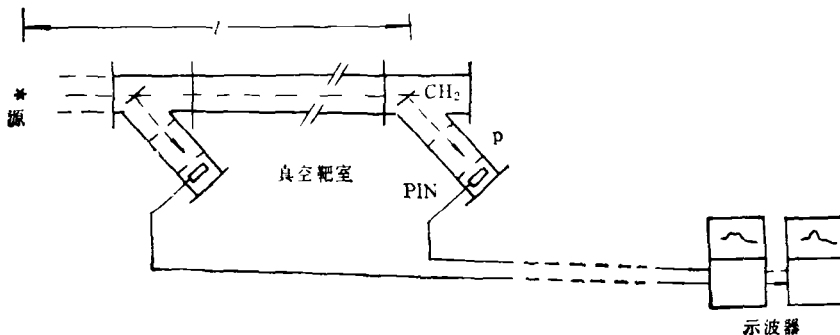


图 2 聚变反应温度诊断示意图

当然,做起来是相当复杂的,要考虑合适的飞行距离而能达到合适的时间分辨,要考虑探测器灵敏度与记录效率,要考虑源发射自身时间展宽的影响,要考虑 γ 本底的抑止,要考虑系统对波形畸变的修正,以及效率计算与刻度,它们都是细致而复杂的工作。但是这些数据对于核爆炸的诊断来说,却是很重要的结果。

诊断核爆炸过程中温度参数还有许多内容,例如要了解特定部位的等离子体温度也是核装置研究中重要的性能参数。依靠等离子体高温辐射出的X射线进行诊断的方法,亦属重要的诊断手段。当然还有其他的诊断方法。

3. 核爆炸中核反应活性区空间参数诊断^[1]

核爆炸中核材料都是在高度压缩状态下发生反应的,显然理论工作者十分关心压缩后的几何形状和尺寸,而几何形状和尺寸也就成为核爆炸中物理诊断的重要参数。

核材料在核装置内部,只能通过穿透能力很强的中子和 γ 射线来诊断。核爆炸过程中活性区是不断变化的动态过程,要拍摄出某一时刻的几何图象自然又增加了困难。中子, γ 不能聚焦,只能借助几何光学中古老的针孔成像原理拍摄核反应的图象,但是作为阻断射线的针孔就不能像阻断可见光一样用薄的阑片做成,要用相当厚的重金属做成厚针孔。为了提高空间分辨能力,要分辨到亚毫米的空间图象,厚针孔的直径也要小到亚毫米大小,厚针孔需要采用特殊的加工技术来制作。射线经过针孔成象在发光的闪烁体上,采用光学反射镜把图象偏离开原来的方位,防止射线对传输图像系统的干扰。微弱的发光图象要经过快速的带微通道板的象增强器放大,再由高帧频的摄像机拍摄下图象,图象经传输到记录站后显示在监视器上进行数据处理或拍摄下照片以供分析。其系统原理简图参见图3。

可见,空间图象诊断系统是很复杂的系统,

环节多。在现场的实际测量中,要防止干扰,屏蔽杂散的射线。适当的时间选择(快门选择)以及时间同步都需要精心考虑才能获得珍贵的图象以提供参数。

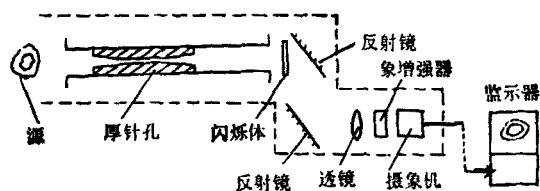


图3 核爆炸空间参数示意图

核爆炸过程包含有十分丰富的物理内容,上面只是简介了利用地下核试验进行的部分射线物理诊断内容,都是现场实时的物理诊断,也并不是实时诊断的全部。作为一次地下核试验的诊断和测量,保障试验安全以及试验效应研究,还需要进行许多物理工作。例如研究地下核爆炸空腔形成的流体力学过程,冲击波产生和传播规律;还要研究射线在管道和介质中散射、传播规律,以制定各诊断项目协调布置,排除射线干扰;研究管道和电缆上辐照电流引起的电磁脉冲场,以制定各项目抗电磁干扰措施;更重要的,每一次试验都要测定爆炸的总威力,测定核材料的燃耗和裂、聚变的分威力等等。研究测定的方法也是多种多样的,就不在此介绍。总之,利用地下核试验的核爆炸条件可以进行许多有意义的物理诊断课题研究,其结果将为改进核武器设计与发展做出重要贡献。

- [1] Samuel Glasstone, Philip J. Dolan, *Effects of Nuclear Weapons* (Third Edition), DOD, Washington D. C., (1977).
- [2] Paul J. Eber, UCRL-53724, (1986).
- [3] J. E. Broolley et al., LA-UR-83-1864
- [4] D Clark et al., UCRL-51122, (1971)
- [5] R. Lear, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, NS-31 (1984), 495.