

科技信息

美国武器物理研究的关键问题

由于国际形势的变化,全面核禁试可能实现。美国有关武器实验室对禁试后如何保持核威慑的有效性并维持科研队伍的素质,近年来采取了一系列措施。Los Alamos 国家实验室今年发表“当前决策构思的关键问题”(Key issues framing today's decisions)一文报导了一些情况,本文对此作简要介绍。

这篇文章指出,为了维持核力量在性能和安全方面的竞争力及自信心,核试验是必不可少的。利用一些适当的设施,进行地面模拟实验是至关重要的,现在尤为迫切的是加强投资,提高流体力学试验能力和增强计算模拟能力。以往核武器设计成功与否主要依靠地下核试验检验。禁试之后只能在地面上做非核模拟实验,Los Alamos 实验室把这类工作称为 AGEX (Above Ground Experiments)。AGEX 包括两个方面:AGEX I 指炸药爆轰实验;AGEX II 指高能密度物理学实验研究。

1 AGEX I

1.1 高级炸药(HE)的安全性和工作性能

为了保证核武器的一点安全,美国采用了 TATB 炸药并进行过跌落、撞击、烤燃等多项试验。但是他们认为冷战之后核武器将长期库存,公众对安全性的要求将会更高。为此必须研究炸药在各种事故场合可能有的响应,研究相应的起爆机理,特别是撞击引起炸药或火箭推进剂爆燃再发展为爆轰的过程(DDT)。各种类型 DDT 或延迟起爆(XDT)问题的研究,对常规武器和工业生产安全同样是十分重要的。虽然炸药的起爆实验和理论已有了很大进展,但钝感炸药(IHE)的理论模型仍是十分困难的问题。正在用更精密的模型和先进实验方法研究 IHE 的反应速率,以期更好地理解反应速率对炸药的热和撞击感度的影响。日益增长的计算能力,使得复杂几何形状炸药装置的炸轰性态的数值模拟成为可能。将来只要依靠一些选定的测定炸药性能的基础实验,就可用大型数值模拟预言复杂爆轰实验的结果。

炸药和爆轰的基础研究已深入到分子水平。这种微观研究的目的是提高预言新炸药性能的本领,争取用“第一原理”方法计算炸药的性能。最近 Los Alamos 科学家发现了一类新的钝感炸药,含有较多氮和较少碳和氧。其中首先被合成的 LAX-112 炸药比 TNT 钝感,但威力大于 TATB,正在继续合成性能不降低但更钝感的新炸药。如果这类新炸药成本不高的话,它们将在改进常规弹头性能方面大有作为。

炸药部件安全的另一要求是研制更安全可靠的引爆装置。与爆炸丝和飞片式电雷管比较,下一代起爆装置应更为安全,例如激光驱动飞片式或直接光分解式雷管,就可防止雷击射频或高功率微波造成的事故。他们还研究武器中拆除的炸药和推进剂的处理,以及炸药生产的环境保护问题。

1.2 地面流体力学爆轰实验

炸药球内爆可产生极高的压力和温度,达到高度的冲击压缩。在爆轰驱动状态下,金属和固体材料的强度都可忽略不计,其行为同流体类似。因此这门技术专门称为流体力学实验。

爆轰实验是破坏性的高速流逝过程,速度达数公里/秒,压力近百万吉帕,传统上用光电方法诊断。流体力学实验用来观察武器组件中裂变材料代用品的早期内爆运动规律,用以刻度和改进武器设计编码。六十年代出现了新的诊断技术——X 闪光照相,现有主要的 X 闪光机称为 PHERMEX (Pulsed High-Energy Radiographic Machine Emitting X-rays),它的巨大的射频线性加速器产生能量 30 MeV 的相对论电子束,轰击钨靶使电子能量转化为韧致辐射,大部分为 X 射线。通过不断改进和升级,这台机器具有目前世界上最强的辐射照相能力,而且可以同光、电技术联合应用,取得更多数据。

不久将建造名为 DARHT (Dual-Axis Radiographic Hydrodynamic Test) 的 X 光机,即用于流体力学试验

的双轴辐射照相设备。它从两个方向射出两束X光,可以进行运动物体的瞬间计算机辅助层析照相CAT(Computer Assistant Tomography),得到三维立体像,而且具有很好分辨率。

近十年来X闪光照相技术的最大进展是定量辐射照相术,已经能够测量被压缩物质的密度分布,以亚毫米的精度确定物质之间的界面位置和形状,用CAT技术重现物质内部各剖面的状态。

1.3 先进的光电诊断技术

电子学测量已达到纳秒级分辨率,一次流体力学试验中同时使用几百台这样的仪器。超高速彩色电影摄影机与比它快十倍的电子相机一起使用。已研制成功可精密测量自由表面速度的线成像激光速度干涉仪,可同时测量靶表面一条线上各点的速度历史。这种线成像VISAR的测速范围为0.1~20km/s,记录时间由ns至ms量级,被测靶表面线长范围0.3~30mm。这种仪器记录的数据量比通常VISAR大好多倍,具有极大优越性,尤其对于需要测量速度梯度的实验和靶体变形较大的情形。

微波技术已被用于精确测量物体中冲击波或爆轰波的波形。通过埋在物体内的多根微小的可弯曲电缆,微波干涉测量可确定到每根电缆远端的距离,波随时间前进的距离和形状的信息就可被测定。这种技术已被正常地使用于每次流体力学试验,确定波的传播形状、物质界面的位置、速度和状态。

由于计算模型和编码极大地依赖于实验,未来流体力学试验将要求更高的精度和尽可能详尽的诊断,非但是物质表面,而且是内部状态,还希望得到温度和断裂之类的信息。炸药爆轰的AGEX工作将在维护美国核力量中起到新的关键性的作用,同时也将对常规武器、材料科学及相关工业的发展作出贡献。

2 AGEX II

AGEX I的目的在于了解比爆轰加载更高压力和温度条件下物质的性态。由于核反应速度比声速高得多,在裂变开始初期核材料来不及发生力学稀疏,大量能量沉积于原来体积的物质之中,因此称与这有关的学问为高能量密度物理学。当然这里把能量快速沉积于物质内的手段不能是核反应,也不能是通常的力学加载,而是一些先进的激光、电磁和加速器技术。下表列出了高能量密度物理的一些例子。

能源	太阳	木星	炸药	激光	脉冲功率	核爆炸
温度/eV	10^8	1	~ 1	>100	100	$<10^3$
压力/MPa	10^8	10^5	10^4	10^7	10^6	$>10^6$
密度/(g/cm ³)	10	1	1	100	10	>10

计算表明,温度1keV(约一千万度)的正常密度铀内的能量密度约500MJ/cm³,即500kJ/mm³,后一个数字在实验室中可以实现。但是用外源把1mm³物质加热到一千万度,至少需几个纳秒,不能避免力学稀疏,导致非均匀状态。因此在实验室中全面模拟核反应开始时的状态是极困难的,只能进行降低一些能量密度的实验。产生一个足够稠密和高温的等离子体可以模拟强耦合作用并达到核反应物质的电离程度。这种实验要有足够的能量加热相当大小的物质试样,又要有很高的功率在物质稀疏之前完成所需要的加热。AGEX I的诊断更为困难,主要依靠各种辐射探头和高速变相管相机。没有一种AGEX I实验可以全面模拟核爆炸状态。Los Alamos实验室主要依靠三类设施得到较宽范围的高能量密度条件,即脉冲功率(以下特称为电磁内爆)装置、高功率激光器和高能粒子加速器。

2.1 电磁内爆的Athena计划

雅典娜(Athena)是希腊神话中掌握雷电的智慧女神,这里用以表征脉冲功率技术高能量密度物理研究。这计划又分为两部分:电容器组能源电磁内爆(Pegasus I)和炸药驱动能源电磁内爆研究(Procyon)。

Pegasus I计划中,144个电容器并联构成100kV、4.3MJ的能源。快速开关使放电时间缩短到0.3~6μs,峰值电流10MA,其功率超过美国电网的总和。外半径2cm、厚度0.1mm的金箔圆筒内爆到心的时间约6μs,峰值压力110GPa,内爆速度13km/s。Pegasus I在约1cm³体积物质中,产生几百万吉帕压力和

10^3kJ/cm^3 量级的能量密度。俄国有关工作已达到相当于每立方厘米 250~500 克炸药储能的高能量密度。

Pegasus I 装置有多种用途:①流体动力学内爆实验和材料性态的试验台,圆筒流体力学不稳定性实验研究。②内爆圆筒压缩靶心材料试样中可达几百万吉帕压力,使得原子中电子轨道重迭,引起热、电子和光子输运速率的变化。电磁内爆压力可持续微秒量级,是极端条件下物质输运性质和动态性能的理想试验工具。③电磁内爆还产生强烈的 X 辐射,可用来进行范围宽广的辐射输运研究和 X 射线与物质相互作用研究,在民用工业中有希望成为辐射加工和处理的新手段。内爆速度越高,产生的 X 射线越强,其总能量可达 10^4J 量级。由于磁压与内爆圆筒的质量无关,减小圆筒质量就可以提高内爆速度,例如 2500Å 厚的铝箔筒的内爆速度已达 100km/s 以上,但流体动力学不稳定性限制了极薄圆筒的使用。内爆到心的不同步性将降低等离子体的能量密度,并导致较软的 X 能谱。为了把电容器组的储能很快地、高效地注入圆筒,开关和功率调节技术十分重要,圆筒的合理设计也是达到最佳组合的途径。

Procyon 计划使用大型的爆炸磁压缩发生器(MFCG)作为能源,为了达到更高压力,要有 10^3J 的能源,比电容器组的最高水平大数十倍,所以只能依靠成本较低的炸药。Los Alamos 实验室研制的不太大的 Procyon (MFCG) 装置产生高达 150 MA 的脉冲电流,可放出 1MJ 以上能量用于内爆,达到 10^{12}W 的功率,而且成本不高。目前主要困难是需要进一步压缩脉冲时间,以产生更强的 X 射线或更高的压力。

下一步工作将研制一个名为 Atlas(希腊巨神)的电容器组,储能 25MJ,可用来进行体积达几十立方厘米的高能量密度物理实验。Procyon 装置也将升级,输出提高到 200MA。

2.2 高功率激光

由于激光脉冲十分窄,单色性和光束质量极好,可以在很小体积内沉积很高的能量密度。典型的脉宽为 1ns 左右,靶样体积为 1mm^3 量级。Trident(三叉戟)是 Los Alamos 的一台钕玻璃激光器,两路光束各为 100J,脉宽 100ps,靶丸直径为几百微米,沉积能量密度超过 1MJ/cm^3 。虽然这个数据高于电磁内爆装置 Pegasus I,但激光实验中样品的空、时尺度要小得多,以致诊断技术更加困难,主要使用惯性约束聚变研究中发展起来的各种谱仪和技术。

Trident 是一台使用十分方便的实验工具,其激光脉冲的形状和宽度可根据不同需要调节,还有能量较低的第三路光束,用来产生软 X 射线对靶丸进行照相,这对高压流体动力学实验特别有用。这时激光在适当的靶中引起的冲击波压力高达几百吉帕,并产生一定温度的 X 射线脉冲。

Livermore 实验室的 NOVA 激光装置,可使大一些体积的靶丸达到更高的温度。NOVA 是世界上最大的激光器,输出脉宽 1ns,能量 40kJ。利用 NOVA 已进行了很多辐射流体力学和 X 射线驱动内爆的实验。

依靠缩短激光脉宽和减小聚焦体积,究竟能达到多高的能量密度? Los Alamos 的另一台激光器 Bright Source I (高亮度光源)提供了回答。这台激光器现在输出为 1J,即将研制成功输出 10J 的新装置,其脉冲令人难以置信地压缩为 300fs ($3 \times 10^{-13} \text{s}$),即使以光速运动,这段时间内也只能前进 100 微米。聚焦体积尺度只有几个微米,入射光束的功率密度 $5 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$,比 NOVA 都高得多。激光辐照靶样达到 10^5GPa 的高压,但只能持续 1ps。这时辐照的光压已同能量沉积导致的热压相当。在这么短时间内,原子不可能实现核爆炸时达到的平衡态,薄膜靶温度高达 keV 量级,约 1% 的入射光能可转化为 2keV 左右的 X 辐射能,可用来研究 X 射线与物质的相互作用,探测在类似核爆炸环境中物质的结构和性质。这种快速过程也是研究瞬态化学反应动力学的有力工具。例如研究爆轰反应中 OH 基团在爆轰产物能量平衡中的作用。Bright Source II 正在设计之中,光强可达到 10^{20}W/cm^2 ,用来研究多光子 X 射线相互作用,可以突破核内静电场,造成电子-正电子对,从能量创造物质。

2.3 高能粒子加速器进行的核物理研究(从略)

(孙承纬)