

核爆模拟*

——惯性约束聚变在核武器上的应用

曾先才

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

摘要 扼要介绍了核爆模拟的基本概念、主要研究内容及驱动器与靶物理研究的进展。同时,对核爆模拟的发展前景进行了简短的评述。

关键词 模拟,核武器,惯性约束聚变,驱动器,激光,Z-箍缩

SIMULATION OF NUCLEAR EXPLOSIONS

——APPLICATIONS OF INERTIAL CONFINEMENT FUSION TO NUCLEAR WEAPONS

ZENG Xian Cai

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract The basic concepts of nuclear weapon simulation and current research on driver development and target physics are reviewed. Future prospects of nuclear simulation are briefly presented.

Key words simulation, nuclear weapon, inertial confinement fusion, driver, laser, Z pinch

核武器的秘密讳莫如深,核爆炸的杀伤力令人恐怖。1996年虽然有核国家签订了全面禁止核武器试验条约,然而,核武器作为当今世界最大最有效的军事威慑工具,仍将在今后相当长的历史时期内存在,核军备竞赛也决不会因为全面禁试条约的签订而嘎然而止。只要世界上一天不彻底销毁核武器,有核国家就不可能停止核武器的研究。

全面禁试只是禁止在空中、地上和地下进行热核试验,并不是禁止继续制造、改进和发展核武器。全面禁试以后,有核国家几乎都在寻找确保库存核武器的安全性、可靠性、有效性和改进与发展核武器综合性能的办法,并同时设法长期维持一支高素质的核武器专家队伍。特别是美国,为了保持它的核霸主地位,不惜花巨资,另辟蹊径,推出了庞大的核武器管理计划(SSMP)和加速科学计算机创新(ASCI)计划,在实验室继续研究核武器物理。核爆模拟研究就是其中最重要的组成部分。其实,不仅是美国,而且几乎所有有核国家都在殊途同归地开展核爆模拟研究,都在为有效地保持自己的核力量和进一步改进与发展自己的核武器而努力。

1 核爆模拟的基本概念

所谓核爆模拟,主要指的是利用惯性约束聚变(inertial confinement fusion),在实验室开展有关核武器物理和核武器效应的理论与实验相结合的研究。惯性约束聚变包括直接驱动和间接驱动两种方式。由于间接驱动方式与核武器的驱动方式非常类似,都是靠X射线辐射烧蚀驱动的,所不同的是X射线辐射来源不同,前者靠激光在重金属转换出来的X射线辐射或Z-箍缩(Z-pinch)装置产生的X射线辐射,后者则靠核武器的初级提供的X射线来引爆次级^[1]。因此,在核爆模拟中,通常都采用惯性约束聚变的间接驱动方式来模拟核武器的物理过程。图1是间接驱动的示意图。

在间接驱动中,强激光从柱型黑腔金靶的两端入射到腔壁,立即形成称之为电晕区的高温低密度的稀薄的金等离子体。然后,激光继续打到腔壁上,在亚临界密度区域,通过逆韧致吸收和反常吸收加热等离子体,并通过电子热传导传至密度较高、温度

* 2000-07-06收到初稿,2000-11-13修回

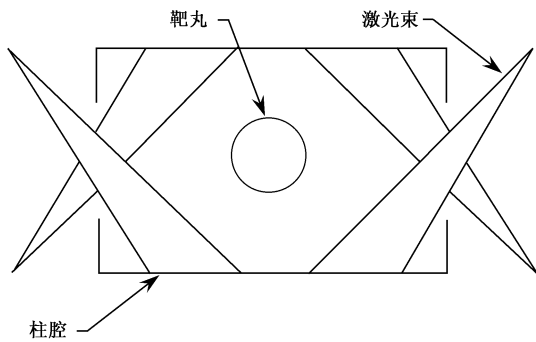


图1 间接驱动的示意图

较低电子烧蚀区,转换为 X 射线.烧蚀区的这种力学状态是金等离子体发射 X 射线的最佳状态,X 射线发射速率最大.转换出的 X 射线能量通过输运沉积到靶丸的外壳,由热辐射间接烧蚀外壳,产生内爆,压缩靶丸内的氘氚燃料,创造热核聚变点火燃烧的条件,实现高增益.因此,间接驱动有时又称之为辐射驱动.

目前用来研究核武器物理的 Z-箍缩装置,也是利用它产生的 X 射线辐射源来驱动靶丸内爆压缩氘氚燃料的,同属于惯性约束聚变间接驱动的范围.

现代的热核武器由初级和次级两级组成^[1].初级主要是裂变反应,裂变材料一般是次临界的 Pu^{239} 和 U^{235} ,由高能炸药产生爆轰把它们压缩到超临界,产生链式裂变反应.初级爆炸产生的 X 射线使次级产生内爆,进而实现热核点火和燃烧,产生热核爆炸.为了提高效率,现代核武器的初级含有氘氚气体,氘氚气体被压缩和加热后产生聚变,释放的高能中子使压缩后的钚和铀产生裂变反应.这种初级称之为加强型的初级(boost primary).美国现代的热核武器的典型威力是几十万吨 TNT 炸药当量.

核爆模拟的关键是在实验室创造一个与核武器性质相同的辐射场,在量上,辐射场的温度则要逼近核武器要求的辐射场温度,越接近越好.然后利用这个辐射场开展有关核武器物理的各种实验研究,并利用所得的实验结果校验核武器设计的计算机模拟程序.为此,在核爆模拟中,要求进行精密物理研究,即要求物理实验、物理诊断、理论研究和计算机模拟都要精密.密就是要全面覆盖各个物理过程、物理现象和物理因素;精就是要知道每个环节的根据、物理规律、影响范围和误差范围.要进行精密物理研究,制靶和驱动器等环节也必须精密.唯此方能正确地校验核武器设计的计算机模拟程序.

核武器是不可控的大威力的热核爆炸,惯性约束聚变则是可控的微型热核聚变.两者只是在性质上类似;在量上和装置的构型上以及所使用的材料等方面则均有极大的差别.因此,核爆模拟间接驱动的靶设计与惯性约束聚变间接驱动的靶设计大相径庭.惯性约束聚变的数据资料对核爆模拟的价值也很小.美国能源部规定,惯性约束聚变研究是公开的;但是利用惯性约束聚变对核武器物理进行的研究是保密的.规定中具体指出,凡涉及直径大于 1 cm 的聚变小囊,聚变小囊吸收的能量大于 10^6 J,辐射驱动温度大于 350 eV 以及含有裂变材料的惯性约束聚变靶等方面研究工作的所有信息资料都是保密的.由保密的程序计算非保密靶的结果,或利用惯性约束聚变软件包计算保密靶的结果,以及某些研究惯性约束聚变的计算机程序、保密靶的设计及相关的制靶技术,以及其他关于高能炸药或核爆炸驱动的惯性约束聚变的信息资料等都是保密的.

核爆模拟研究的目的,旨在全面核禁试后通过实验室研究的手段,用经过实验校验核武器设计的计算机模拟程序来继续研究核武器物理和核武器效应,以便确保库存核武器的安全性、可靠性与有效性,并进一步改善核武器的性能,甚至发展核武器.

2. 核爆模拟的主要研究内容

核爆模拟的研究目的决定了它的研究内容主要有以下几方面^[1]:

2.1 辐射流

核武器的次级是由初级的 X 射线辐射流引爆的.由于岁月的推移,储存核武器的性能可能发生变化,从而导致初级提供的 X 射线辐射流也发生变化.正确地理解经过储存的初级提供的 X 射线辐射流的大小和特性,对确认核武器的性能是非常重要的.过去计算辐射流的物理参数、方程、数学方法和计算机程序都有一定的不确定性,辐射流的数值模拟结果与地下核试验的结果不完全一致.核爆模拟研究可以利用惯性约束聚变的装置,在实验室安排一些实验,进一步研究辐射流的物理模型与计算方法及其适用范围,从而做到在没有热核试验的情况下,也能精确地知道初级提供的 X 射线辐射流的大小和特性.

2.2 材料性质

在核武器中,材料在高温高能量密度下的性质,即状态方程(equation of state)和不透明度(opacity)是

非常重要的.状态方程是物质的压力与密度、温度之间的关系式.不透明度是辐射在物质中如何被发射和被吸收的基本特性.在核武器设计中,要精确求解可压缩流体动力学问题,必须有正确的状态方程.高温物质的辐射不透明度在核武器研究中则是计算辐射流所必须的重要参数.因此,在实验室中创造高温等离子体状态,研究材料的状态方程和不透明度,外推到核武器的应用范围,是核爆模拟的重要课题之一.

2.3 混合和流体力学不稳定性

重物质与低密度的热核燃料之间的流体力学不稳定性和彼此混合,会降低核武器的当量.热核试验已一再证明了这种现象.从流体力学不稳定性发展到混合是一种高非线性混沌过程.目前甚至连超级计算机也还不能准确地模拟核武器中的这种混合现象.因此,通过惯性约束装置,在实验室研究这种流体力学不稳定的基本物理过程和核武器条件下的混合现象,乃是核爆模拟的又一重要任务.

2.4 热核点火过程

在核爆模拟中,不可能直接研究核武器的热核点火过程,但是可以将惯性约束聚变点火小囊的基准设计进行修改,用来研究某些武器的物理问题,将实验室的惯性约束聚变的热核点火过程外推到核武器的热核点火过程.例如,如果在实验室一旦实现热核点火,核武器科学家就可以借助惯性约束聚变的点火靶丸来研究含氘氚气体的加强型初级的有关物理过程,也可以研究流体力学不稳定性和混合的有害影响.

2.5 校验计算机软件

核武器的研制高度依赖于复杂的计算机软件和超级计算机.这些计算机软件涉及广泛的物理范畴,包括物质的运动、电磁辐射输运、中子和带电粒子输运、辐射和粒子与物质的相互作用、物质的性质、核反应、原子和等离子体物理过程等等.这些过程在核爆炸中一般都是在极端高温、高密度、高压的条件下和极短的时间尺度范围内以极其复杂的方式耦合在一起的.惯性约束聚变使用的计算机软件与核武器设计的软件有某些类似,但是惯性约束聚变的时间尺度和空间尺度非常小,原来在核武器设计的计算机软件中的某些近似在惯性约束聚变的研究中是不能用的,惯性约束聚变的靶设计在某些方面要求更精确的计算模型,计算机模拟也更费时间.但是可以借鉴惯性约束聚变的软件,改进核武器设计的计算方法和物理模型,进一步提高计算精度和增强研究

三维影响的能力.同时还可以利用惯性约束聚变的软件来设计实验室的微型的武器物理实验.

2.6 核武器效应

过去在地下热核试验时,通过把各种军用硬件和商用硬件直接暴露在坑道的实际核爆炸辐射环境中来研究核武器对它们的破坏效应,从而获取数据用以加固核武器或有关的军用设备和商用设备.在没有地下热核试验的情况下,核爆模拟可以通过惯性约束聚变的驱动装置产生类似核爆炸的 X 射线辐射环境来研究核武器效应;如果惯性约束聚变达到热核点火,则可以创造更大量的类似核爆炸的 X 射线辐射.热核点火还可以产生大量的高能中子,高能中子又可以通过增殖器进行增殖,可以用来产生 γ 射线,所有这些类似核爆炸的环境都可以用来研究核武器的破坏效应.如何在地面实验室创造这种类似的核爆炸环境,也是核爆模拟重要的研究课题之一.

3 核爆模拟的驱动装置

核爆模拟的驱动装置主要是巨型钕玻璃固体激光装置.最近的研究表明,Z-箍缩(Z-pinch)装置也很有希望创造一个好的辐射场,用于实现间接驱动内爆压缩过程和进行核武器物理研究.

3.1 巨型钕玻璃激光器

固体激光器的主要工作介质是钕玻璃.以前,高功率钕玻璃激光器的振荡器通常采用 Nd:YAG 晶体,而功率放大器则采用硅酸盐钕玻璃.现在在振荡器中则采用 Nd:YLF,在放大器中采用磷酸盐钕玻璃.因为在钕玻璃激光器中,玻璃的破坏阈值是 $3\text{J}/\text{cm}^2$,因此,激光聚变的高功率驱动器均采用多束激光.目前的固体激光器是用氙灯抽运的;由于二极管抽运的固体激光器(DPL)具有效率高、可靠性好等特点,将来氙灯抽运有可能被二极管抽运取代.

固体激光器激光聚焦性能好,波长和脉冲宽度可变,储存能量的能力可定标至高达数百万焦耳的量级,因此,目前世界各国几乎均采用固体激光器作为惯性约束聚变的驱动器.

3.2 Z-箍缩装置

Z-箍缩技术又称等离子体内爆技术.Z-箍缩装置基本的工作原理为:丝阵套筒是由许多金属丝组成的圆柱型的线阵空腔.由脉冲功率装置提供大电流,通过阴阳极负载.脉冲前沿或预脉冲使负载导体电离,形成部分等离子体.主脉冲电流产生环形磁

场,电磁向心力使等离子体加速向内运动,电磁能转化成负载介质的动能.当负载介质以接近 10^8 cm/s 的速度在中心对称轴坍塌或碰撞阻滞(stagnation)时,动能转化成等离子体的内能,形成高温等离子体,发射 X 射线.

脉冲功率装置驱动 Z- 箍缩负载的原理框图如图 2 所示.

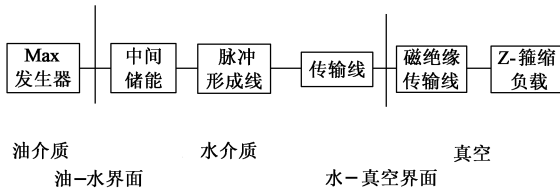


图 2 脉冲功率装置驱动 Z- 箍缩负载的原理框图

4 核爆模拟的历史和现状

全面核禁试条约签订以后,核爆模拟成了核大国,特别是美国研究核武器物理的主要工具.但是核爆模拟研究并不是从核禁试以后开始的.它的由来,最早可以追溯到 20 世纪 50 年代后期.从 1972 年美国发表的 John Nuckolls^[2,3]等人 50 年代后期的工作可知,实际上 50 年代末他们就开始研究最小的聚变爆炸究竟能小到多少,而且计算是以辐射驱动内爆为基础的.1960 年,激光问世后,利弗莫尔(Livermore)实验室的物理学家以极大的兴趣开展惯性约束聚变研究.当其他国家将注意力集中放在直接驱动内爆出中子实验研究之时,利弗莫尔实验室就已开始间接驱动内爆的研究.他们是从 60 年代末 70 年代初将研究的重点转移到间接驱动,即转移到核爆模拟研究上去的.

为了满足能源和核爆模拟研究的需要,美国研制了一系列的固体激光器,主要有 Janus, Argus, Shiva, Omega 和 Nova 等激光装置,其中以 Nova 激光装置(见图 3)为最先进. Nova 装置共输出 10 束光,脉宽为 1 ns 时,三倍频(波长等于 $0.35 \mu\text{m}$),在多种多样的脉冲形状下均可输出 30—40 kJ 能量.

其他国家也先后研制了大小不同的固体激光装置.日本大阪大学的 GEKKO II 激光装置,输出 12 束光,脉宽 1 ns 时,三倍频输出能量可达 10 kJ. 法国 Limeil 实验室的 Phebus 激光装置相当于 Nova 装置的两束.我国的神光 - II (Shenguang II) 激光装置(图 4), 8 束光,脉宽为 1.0 ns 时,三倍频输出能量为 3 kJ.



图 3 Nova 激光装置

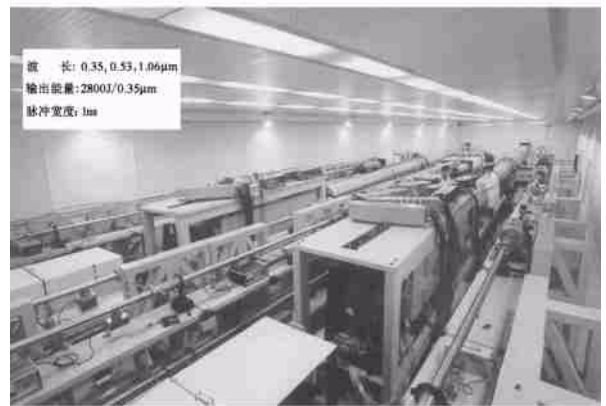


图 4 神光 - II 激光装置大厅

为了探索惯性约束聚变用于核武器物理研究的可能性,美国先后在 Argus, Shiva 和 Nova 固体激光装置上做了一系列的靶物理实验,其中包括激光等离子体相互作用、黑腔物理、辐射输运、内爆压缩等方面的实验,并且在 1976—1981 年期间还研究了 Cairn 系列的单壳层靶和 Apollo 系列的双壳层靶作为高增益靶的可能性^[4-8]. 1979 年,当清楚地知道在 Nova 装置上不可能实现热核点火后,美国在 Nova 装置上进行了一系列与“流体力学等当靶”接近的高增益靶物理实验和 Halite/Centurion(H/C) 地下核试验,检验了高增益靶物理,为点火和高增益驱动器的设计提供了依据.所谓“流体力学等当靶”指的是内爆动力学规律与核武器次级相同,几何尺寸按流体力学相似规律缩小的靶丸.H/C 是 1978 年至 1988 年洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)和利弗莫尔联合研究惯性约束聚变的地下核试验计划,该计划在地下试验中用核爆炸产生的 X 射线辐照氘氟小囊,实现了氘氟热核点火和自持燃烧的过程,为核爆模拟研究核武器的点火燃烧过程和高增益惯性约束聚变奠定了重要的

基础.1983年,在 Novette 装置上进行的 $0.53\mu\text{m}$ 波长 $7-9\text{kJ}$ 能量的激光黑腔靶耦合实验,黑腔辐射温度达到 $150-180\text{eV}$.1985年,在 Nova 装置上进行的实验中,黑腔辐射温度达到 $200-250\text{eV}$,而且超热电子很少,当时据此推测实现高增益需要输出能量为 $5-10\text{MJ}$ 的驱动器.1986-1990年,利弗莫尔实验室间接驱动靶物理研究取得快速进展.1990年初,在 Nova 装置上,黑腔辐射温度达到 300eV ,超热电子能量少于 1% .Nova 装置上的实验和定量的数值模拟演示了内爆对称性控制和 RT 不稳定性的发展过程,验证了脉冲整形的好处和辐射驱动内爆的定标规律等有关问题.内爆速度、流体力学不稳定性 and 黑腔辐射温度之间的综合分析表明,如果黑腔辐射温度能够达到 300eV ,内爆速度达到 $4 \times 10^7\text{cm/s}$,激光能量达到 $1-2\text{MJ}$,就可能实现热核点火和达到中等程度的增益.为此,美国国家科学院 Koonin 委员会 1990年9月的报告和美国能源部聚变政策顾问委员会的报告都建议建造 $1-2\text{MJ}$ 的玻璃激光器,争取大约在 10 年的期间内演示热核点火和中等增益的聚变反应,条件是在 Nova 装置上成功地完成黑腔等离子体对内爆对称性的影响和黑腔等离子体集体效应(包括参量不稳定性)的各种定标定律等一系列实验.为了完成这些实验和适应核爆模拟精密物理的要求,Nova 装置于 1993 年完成了精密化计划,进一步改善了光束质量、能量平衡和瞄准精度.1996 年已在精密 Nova 装置上成功地完成了上述实验.迄今为止,美国还做了许多有关物质不透明度和状态方程方面的实验,并取得了非常有意义的结果.

1993 年,美国能源部签署了建造国家点火装置(NIF)的任务并批准编写 NIF 的概念设计报告.1997 年 6 月,NIF 正式动工建造,投资经费为 12 亿美元.NIF 装置采用闪光灯抽运的 Brewster 角片状钽玻璃放大器激光系统,有 192 束光,净口径为 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$,脉冲形状可调,三倍频输出时到达靶面的能量为 1.8MJ ,输出脉冲峰值功率为 500TW ,在脉冲宽度大于 2ns 的时间范围内,光束功率平均为 $8\%_{\text{rms}}$,光束瞄准精度为 $50\mu\text{m}$.正式投入运行以后,每年可以打 50 发间接驱动当量为 20MJ 的聚变靶丸.

在美国的帮助下,法国从 1996 年开始计划建造 1.8MJ 的激光装置.目前我国也正在建造巨型神光-III 钽玻璃固体激光装置,准备进一步加强辐射驱动的研究.

Z- 箍缩是 50 年代就开始研究的技术^[9].当初是想用来做直接驱动,用磁场把氘氚温度压上去,并

将氘氚等离子体箍束住,产生热核聚变.后来发现流体力学不稳定性很严重,直接驱动的路子走不通.作为 X 射线源,20 世纪 90 年代中期以前,美国圣地亚(Sandia)实验室建立了 Supermite、Proto II 和 Saturn 装置,但 Z- 箍束产生的 X 射线能量只有几十到几百焦耳,主要原因也是内爆过程中的 Rayleigh - Taylor 不稳定性严重影响了 X 射线能量的转换效率.1995 年改进了 Saturn 装置的负载结构,采用直径为几个 μm 的钨丝轴向排列成柱形丝筒以后,有效地抑制了 Rayleigh - Taylor 不稳定性,X 射线能量的转换效率明显增加,X 射线的功率从 20TW 增加到 85TW ,总能量也上升到 $400-500\text{kJ}$.1995 年 7 月以后,圣地亚实验室进而将轻离子束的 PBFA - II 加速器改装成做快过程 Z- 箍缩实验的轻负载的 Z 装置,并进一步优化了钨丝套筒的结构,于 1997 年底获得脉宽为 4ns 、总能量为 1.8MJ 的 X 射线脉冲输出,功率达到 290TW ,黑腔的辐射温度为 155eV ,X 射线能量的转换效率达到 15% ,从而使 Z- 箍缩在核爆模拟中显示了颇有希望的应用前景.由于 Z- 箍缩装置的造价要比巨型固体激光器低得多,X 射线能量的转换效率又比较高,是将来核爆模拟驱动器的重要候选者.目前,美国的科学家已在 Z- 箍缩装置上做了很多 X 射线能谱测量等方面的实验研究,取得了很好的结果.

5 核爆模拟展望

截至 2000 年 1 月,NIF 工程项目已耗资 8 亿美元.由于管理层存在问题,工期已经拖延.能源部顾问委员会对 NIF 项目进行了评审,结果认为虽然经费超支,工期拖延,但是主要的工程技术已取得了重大的进展,最终仍能保证达标.现在预计 NIF 装置总经费要 $19.5-22.5$ 亿美元,要推迟到 2008 年才能建成.法国类似的装置大概要推迟到 2013 年才能建成.我国正在建造的神光 - III 激光装置也还要到 2008 年以后才能建成.

驱动装置的推迟建成,显然要影响到靶物理实验的全面开展,特别是影响有关核武器热核燃料点火燃烧过程的实验研究,从而影响核武器设计软件的全面校验.因此,在 21 世纪的头十年,核爆模拟不能开展与核武器热核点火有关的实验研究,只能研究上述所列内容的其他各项,即开展有关辐射流、物质的状态方程与不透明度、混合与瑞利 - 泰勒界面不稳定性以及内爆不对称性等方面的研究,并通过

获取精确的实验数据部分地校验计算机模拟软件。只有到了 21 世纪的 20 年代,才有可能进行与核武器热核点火和燃烧相关的实验研究,用获得的实验数据全面地校验计算机模拟软件。当然,也不能排斥 Z- 箍缩装置有加速发展的可能。由于 Z- 箍缩装置技术难度较固体激光装置低,造价也要低得多,很有可能异军突起,大大加快核爆模拟研究的进展。此外,快点火技术[点火激光的强度达到 $10^{19} - 10^{20} \text{ W/cm}^2$,脉宽为亚皮秒和皮秒($< \text{ps}$)量级]如能研究成功,也有可能降低靶丸对纳秒激光驱动装置的要求。

必须指出的是,在核爆模拟研究中,虽然 NIF 等驱动装置有望提供与核武器接近的能量密度,但如前所述,核爆模拟毕竟与核武器存在诸多的差别。例如,由于 NIF 等驱动装置所提供的能量只有核武器的百万分之一到十万分之一,因而靶丸的体积也只有核武器次级的百万分之一到十万分之一,这样的靶丸内爆所要求的能量大约也只有核武器次级对初级要求的能量的十万分之一;不但靶丸与核武器含氘氚的加强型初级的热核点火过程不尽相同,其热核点火和燃烧过程与核武器次级也有很大的差别;此外,由于核爆模拟中一般不直接采用裂变材料,因而缺乏与第一代核武器裂变装置的相关性,等等。由于存在这些差别,不但无核武器的国家,要从核爆模拟的微型靶丸的热核点火和燃烧的实验数据外推到全尺寸的核武器相当困难;就是有核武器的国家,将这些实验数据与过去大量的热核实验数据结合起来进行外推也并不是那么直截了当的。因此,用经过精

密物理全面校验的核爆模拟计算机软件,设计实验室范围的武器物理实验,取得结果,外推研究库存核武器的安全性、可靠性、有效性和核武器效应以及研究新性能的核武器,决非易事。在一定程度上甚至比禁试前的核武器研究更为困难和艰巨!要真正做到如美国所期望的用“全尺寸、全当量、全物理过程”的三维虚拟现实来模拟核武器和研制新性能的核武器,其路乃修远兮,尚须不断求索。

参 考 文 献

- [1] The U.S. Department of Energy Office of Arms Control and Non-proliferation. The National Ignition Facility(NIF) and Issue of Non-proliferation .1995 . NN- 40
- [2] Nuckolls J H, Wood L., Thiessen A *et al.* Laser implosion of DT to densities $> 1000 \text{ g/cm}^3$: Optimum pulse shape; Fusion yield vs laser energy. LLNL, CA, UCRL - 74116, 1972
- [3] Nuckolls J H, Wood L, Thiessen A. *et al.* Nature, 1972, 239: 129
- [4] James J D, Gregory AM. Inertial Confinement Fusion. A Willey-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 1982
- [5] Motz H. The Physics of Laser Fusion. London: Academics Press Inc. LTD, 1979
- [6] Storm E, Lindl J D, Campbell E M *et al.* Progress in laboratory high gain ICF: Prospects for the future. Submitted to Eighth Session of the International Seminars on Nuclear War. Erice, Sicily, Italy, 1988, 8, 20-23
- [7] Nuckolls J H. Laser induced implosion and thermonuclear burn. In: Schwaz HJ, Hora H eds. Laser Interaction and Related Plasma Phenomena. Plenum Press, New York: 1994. Vol. 3b. 399-425
- [8] John L. Phys. Plasmas, 1995, 2(11): 3933
- [9] Toni F. Phys. Today, 1998, 51(6): 56

(上接第 449 页)

量范围内扩展, $E_b - k_{\parallel x}$ 关系表现为抛物线形状,即具有类自由电子色散关系, $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2 m^*}$, 其中 $m^* = 0.9 m_e$ 。

还可以将原始数据转换成特定 E_b 的光发射强度分布图[在 \mathbf{k} 空间截面($k_{\parallel x}, k_{\parallel y}$)或截面($k_{\parallel x}, k_{\perp}$)].正如在($k_{\parallel x}, k_{\parallel y}$)截面强度分布所显示的那样,光发射谱亮斑与低能电子衍射图像一一对应,这反映了在准晶平面内的 10 次对称。光发射谱中心($\mathbf{k} = 0$)亮斑与环绕它的 10 个亮斑之间,距离均为 $|\Delta \mathbf{k}| = 2.6 \text{ \AA}^{-1}$,定量地再现了二维准晶平面内的准周期结构。在($k_{\parallel x}, k_{\perp}$)截面,光发射谱强度表现为一串中心位于 $k_{\parallel x} = 0$ 线而彼此间隔 $\Delta k_{\perp} = 1.55 \text{ \AA}^{-1}$ 的亮环,这反映了在 10 次轴方向完善的晶

格序,层间距 $d = \frac{2\pi}{1.55 \text{ \AA}^{-1}} = 4.05 \text{ \AA}$ 。

总之, Rotenberg 等的实验表明,被测二维准晶具有宽的能带和小的价电子有效质量。也就是说,准晶中的价电子在三维 \mathbf{k} 空间具有高度扩展特征。另一方面,光发射强度分布的反差随着偏离 $\mathbf{k} = 0$ 而减弱,这一观察表明,准晶中电子态的扩展程度与周期晶体相比仍较小。

参 考 文 献

- [1] Rotenberg E *et al.* Nature, 2000, 406: 602
- [2] Thiel P A, Dubois J M. Nature, 2000, 406: 570
- [3] 王建波.物理, 2000, 29: 633 [Wang J B. Wuli(Physics), 2000, 29: 633]

(中国科学院理化技术研究所 戴闻)