

# 浅谈军备控制中的物理学问题

杜祥琬 李彬

〈北京应用物理与计算数学研究所, 北京100088〉

宋家树

〈中国核材料学会, 北京100082〉

朱光亚

〈中国科学技术协会, 北京100081〉

军备控制中许多科学技术问题的研究, 例如武器效能和战争效应、军备控制的系统分析、核查技术、武器销毁技术等, 涉及到各种物理学问题, 正逐步发展成为物理学应用研究的一个新的分支, 可称之为军备控制物理学。它的产生和发展不仅推动了世界和平与裁军进程, 而且丰富了物理学的内容。

There are many scientific and technical problems in arms control research, such as the function of weapons and the effect of war, system analysis of arms control, verification techniques, and techniques for destruction of weapon, etc. These are essentially physical problems. A new branch of physics which may be called "arms control physics" is thus developed. Its development can not only give an impetus to the course of peace and disarmament, but also enrich the contents of modern physics.

近几百年来, 战场上使用的武器经历了由冷兵器到热兵器的转变, 发展到今天, 出现了常规武器、生物武器、化学武器及核武器并存的局面, 甚至可能出现空间武器。超级大国的军备竞赛消耗了大量的人力、物力, 并且对人类的生存构成了极大的威胁。在这种情况下, 军备控制对于节约人类资源, 减小战争威胁和战争损失就显得特别重要。

军备控制是指限制某类武器的部署、储存、生产或试验以及制订一些控制军备竞赛和防止战争的安全保障措施, 所以, 军备控制是比裁军更为广义的概念。最初, 军备控制研究主要是在政治、法律、外交等领域进行, 基本上属于社会科学的范畴。从80年代起, 军备控制逐渐进入实质性阶段, 开始涉及越来越多的自然科学范畴的问题。核和空间武器属于当前军备控制的重要内容, 其中涉及到的主要是物理问题, 在这种情况下军备控制物理学应运而生。目前军备控制物理学正逐步发展成为物理学应用研究的一个新的分支, 研究涉及军备控制的各种物理和技术问题, 包括武器效能和战争效应、军备控制的系统分析、核查技术、武器生产和销毁技术等。

## 一、武器效能和战争效应

武器效能的评估研究包括武器的杀伤破坏机制、杀伤能力、生存能力和费用等, 这些问题不仅仅是武器专家研究的课题, 而且还是军备控制研究的重要课题。武器专家和研究军备控制问题的科学家由于认识上的差异, 对武器的生存能力和杀伤能力的评估也可能有所差别。例如, 美国总统里根在1983年提出战略防御倡议计划(SDI)以后, 美国物理学会(APS)对定向能武器的评估<sup>[1]</sup>和战略防御倡议署(SDIO)的看法就有所不同。

首先, 单个武器的效能是应用系统分析方法研究军备控制问题的基础。例如, 就核武器而言, 如果我们要计算某个国家拥有的核武器的总破坏力, 就不能简单地数一下这些核武器的个数, 因为不同型号的核武器, TNT当量可能差别很大; 也不能把当量相加, 而是把“等效百万吨当量”相加。“等效百万吨当量”是TNT(以百万吨

为单位)当量的 $2/3$ 次方.采用这样的定义原因在于,经过对核武器效应的研究,发现一枚爆炸的核武器在地面的杀伤面积与其当量的 $2/3$ 次方成正比.在建立交战模型(见下文)时,必须知道洲际弹道导弹每个弹头对点目标的单发杀伤几率(SSKP),这个量也与每个弹头的等效百万吨当量有关.

其次,对武器效能的研究本身对军备控制就有一定意义.原则上说,有矛就有盾,没有终极的最厉害的武器,引进一种新武器往往会引起新的军备竞赛.因此,对武器效能的充分研究可以使得发展武器的决策者认识到,由于反措施的存在,发展这种新武器的意义并不大.另外,一种武器在发展初期往往被美化或神化,科学家的论证可以揭示这些新武器的真实作用和实际能力.1972年美国和苏联签订了《反弹道导弹条约》,其原因之一就是,科学家们证明用当时的技术拦截导弹非常困难,而且费用太高,“效费比”(交换比)不上算.

1983年美国提出战略防御倡议时,声称空间防御系统是纯防御性的武器系统.各国科学家通过研究空间防御武器的杀伤机制和杀伤能力等武器效应证明<sup>[2]</sup>,具有反导弹能力的武器系统肯定可以用来攻击卫星,因此这样的系统不可能是防毒面具式的纯防御系统.这一观点现在被广为接受,对抑制空间军备竞赛具有积极的意义.

多个武器同时使用所产生的效应并不只限于单个武器效应的简单迭加,而可能会产生复合效应,即战争效应.目前,对核战争的效应研究得比较细致和深入.在一次大规模核战争中,数百枚到数千枚核武器在很短的时间内陆续爆炸,除了武器本身特有的强冲击波、光辐射、早期核辐射、放射性沾染、核电磁脉冲等杀伤破坏作用之外,还有一些复合效应.其中主要的有两个<sup>[3,4]</sup>:第一,地面温度下降;第二,臭氧层变薄.

1983年Turco等人提出了核冬天理论<sup>[4]</sup>.在一场大规模的核战争中将会发生多处工业基地、城市和森林火灾,大火产生的烟尘颗粒较小,能够在大气中飘浮很长时间.经过一段时间的积累,烟尘连同核爆炸吸起的地面灰尘会弥散到地球大部分地区的上空,使到达地面的阳光减少,地面温度下降,出现寒冷和饥荒.为了定量估算温度下降的幅度,Turco等人建立了核战争模型、粒子-微观物理模型和辐射-对流模型.随后其他一些科学家也做了类似的计算,都得出了地面温度要明显下降的结论,但估算的下降幅度有些差别.

核爆炸产生的火球,中心温度高达千万度以上,在高温火球附近的氧气和氮气化合生成一氧化氮.这些一氧化氮随火球上升到高层大气层,与那里的臭氧发生反应生成二氧化氮,大量地消耗臭氧,使得臭氧层变薄,穿过大气的紫外线大幅度增加.这一过程比核冬天开始早,在核冬天结束之后还要继续一段时间.强烈的紫外线会灼伤人畜和庄稼,使得人类的生存环境变得极为恶劣.

物理学家对核战争效应的研究,使得人们认识到,在一场大规模的核攻击之后,即便能够解除对手的核报复能力,由于核战争给全球造成的后果,发动攻击的一方也会面临核战争效应带来的巨大灾难,这使得有核国家对发动核战争持十分谨慎的态度.

## 二、军备控制的系统分析方法

物理学家参与军备控制问题的研究,引进了一些定量的概念和定量分析方法,为各国科学家甚至外交人员提供了容易互相理解和接受的语言.例如,在核军备控制研究中,科学家们引进了两个极为重要的概念:危机稳定性和军备竞赛稳定性.前者表示在发生危机时对峙并拥有核武器的双方不发动首先攻击的可能性,后者表示军备竞赛的诱因的强弱.这两个概念有比较明确的数学定义<sup>[5]</sup>,被广泛用于评价各

种军备发展状况和裁军方案,这些定义以物理学家的眼光来看还太粗糙,但是这比纯描述性的研究已经有了很大的进步。

有了上面这些定量的定义,就可以运用系统分析方法研究什么样的裁军方案符合本国利益并有利于世界安全,引入一类新武器会如何影响军备竞赛升级,一个裁军方案是否能得到有效执行等问题。

首先需要建立交战模型。常规武器早就开始用交战模型描述战斗过程,下面提到的只是战略交战模型。交战双方各类武器和各种目标的性能指标以及数量可以看成是被研究的系统中的元素,它们之间有一定的关系。这些关系可以根据武器的效能和目标的特征求出来,并表示成数学表达式。在核交战情况下,袭击弹头的数量与被摧毁的地下发射井的数量之间的关系可以通过单发杀伤几率求出来,同一时期发展的各类武器数量的关系可以用每个武器的造价及总的军费开支求出来。有了这些关系就可以建立模型,描述战略交战的过程:交战双方战略武器消耗和损失的情况,双方遭受打击的情况。由于战略武器受环境影响较小,容易控制,而且数目不多,因此描述战略交战过程的交战模型,比描述常规武器作战过程的战斗模型要可靠得多。输入不同的武器数量和性能指标就能得到不同的交战结果,这样就可以找出哪些因素有利于危机稳定性和军备竞赛稳定性,而哪些因素有害。

Sagdeev<sup>[6]</sup>对美国、苏联削减战略核武器谈判(START)的裁减方案进行了分析,认为这种裁减不会降低危机稳定性;Kerby讨论了引进空间防御系统对危机稳定性的影响,结论是单方或双方部署空间防御系统都不利于危机稳定性。

利用交战模型的计算结果,还可以分析军备竞赛的发展趋势,评价军备竞赛稳定性。如果某一方发展一种新型武器,另一方的实力就相对有所削弱,因此会发展相应的武器系统予以对抗。给定经济的和技术的约束条件,根据交战模型的结果和一定的军备发展模式,可以计算出军备竞赛的双方今后一段时间军备发展的状况。一些初步研究结果表明<sup>[7]</sup>,SDI计划并不能引导世界武器格局向防御的模式转变,而是会导致军备竞赛出现不稳定。

系统分析方法在军备控制研究中的另一个应用,是论证裁军条约的可靠性。影响签约国是否守约的因素有三个:秘密违约能得到多大的好处,核查违约行为的能力有多强,对违约行为作出反应的强度如何。例如,根据这三个因素的相互关系可以论证,什么样的地震监测网能够保证《限当量条约》的实施。

### 三、核 查 技 术

核查技术是军备控制物理学研究的一个重点,对达成和保证实施条约有着极其重要的意义,因而受到了各国政府和联合国的充分重视。

#### 1. 核爆炸试验的核查<sup>[8]</sup>

为了监督《限当量条约》的实施以及达成《核禁试条约》,需要对地下核爆炸进行核查。其核查方法主要有两个:地震法和流体力学方法。天然地震是由岩层错动产生的,而且尺度大、持续时间长,因此产生的地震波主要是横波,而且主要在低频段;核爆炸持续的时间短、尺度小,主要通过挤压岩石产生地震波,因此产生的地震波主要是高频段的纵波。根据核爆炸和天然地震产生的地震波的这些差别,可以区分地震和核爆炸。核爆炸引起的地震波在某个位置的最大振幅与爆炸当量有关,在识别出核爆炸信号之后,根据当量与地震震级之间关系的半经验公式,利用测到的地震波的震级,可以估算出核爆炸当量。联合国裁军委员会设有专门研究和评估这种技术的专家小组,成员主要是地震专家和物理学家。

地下核爆炸开始以后,形成的冲击波高速向外扩展,在刚开始的一段时间冲击波波前速度与爆炸当量有关,采用流体力学方法可以计算出这一关系。科学家们研

究出了半径随时间变化试验的连续反射测量 (CORTEX) 技术<sup>[8]</sup>, 用于测量冲击波波前速度. 采用流体力学方法对核爆炸当量的估算精度比地震法高. 进行核试验的一方对核爆炸当量的估算还有一些更精确的方法, 但是如果把这些方法用作核查方法就显得“入侵性”太强了, 被核查方难以接受.

## 2. 核弹头的核查

在核裁军的过程中 (如START), 会有很多核弹头从部署地点裁减下来, 为了确保这些弹头确实得到裁减, 需要对核弹头进行核查. 对核弹头的核查包括主动方法和被动方法. 主动方法是利用外部激励产生可探测信号的方法, 例如利用中子激活弹头中的裂变材料, 观察裂变放出的中子和 $\gamma$ 射线; 被动方法是利用被探测物体本身发出的信号进行观察, 例如探测弹头中裂变材料自发裂变产生的中子和 $\gamma$ 射线. 这方面现在已经有了很多理论工作<sup>[9]</sup>, 在前苏联政府和军方的支持下, 美国和苏联科学家还进行过大型实验, 证实了核弹头的可核查性<sup>[10]</sup>.

## 3. 核不扩散问题中限制军用钚材料生产的核查技术

反应堆中的铀-238经过中子辐照后可以转变为钚-239, 如果延长照射时间就会进一步生成钚-240甚至钚-241. 钚-239可以用作原子弹的裂变材料, 但是含有钚-240和钚-241同位素的钚效率太低, 不适合做原子弹的裂变材料. 这里的原因是, 钚-240自发裂变率太高, 在裂变物质充分压缩之前就引起链式反应, 使得装置的裂变功率很低<sup>[11]</sup>. 因此, 给反应堆规定一个较长的换料时间, 使生成的钚材料中含有足够的钚-240和钚-241, 就可以使得这个反应堆不能生产武器级的钚. 控制反应堆的换料时间可以用贴封条或安装图像监视器等方法来完成.

## 4. 激光武器实验的核查<sup>[12, 13]</sup>

在美国的战略防御计划中, 地基强激光武器是一类重要的反导弹武器, 研制地基的反导弹激光武器必须进行高功率的激光大气传输试验. 激光在大气中传播时会受到气溶胶的散射, 散射光的强度与激光功率成正比; 另一方面, 只有功率高于一定阈值的激光束对空间目标才具有有效的杀伤能力. 因此, 物理学家们就考虑利用测量散射光来监测激光实验的功率, 为将来可能限制激光实验功率提供核查技术.

## 5. 空间反应堆的核查

部署天基的定向能武器、电磁轨道炮等空间武器, 可能用到空间反应堆, 因此限制空间反应堆可以限制相当一部分空间武器<sup>[14]</sup>. 空间反应堆在空间运行时由于温度很高, 有强烈的红外辐射. 根据反应堆的功率和散热机制以及现有红外望远镜的分辨本领, Hafemeister<sup>[15]</sup>证明, 运行中的空间反应堆可以得到有效的核查.

对准备发射到外空的空间武器, 如电磁轨道炮、粒子束武器和激光武器等, 还可以根据各类武器的特征在卫星发射场进行现场核查<sup>[16]</sup>.

研究军备控制的核查技术, 一般要建立一个关于核查对象的理论模型, 找出被核查量的特征, 然后根据现有的探测器的分辨本领, 设计出核查方法, 并证明这种方法的可行性. 军备控制的核查技术必须是有效的, 也就是说其探测方法必须足够灵敏, 不致由现漏报和误报. 同时这种核查方法又要能为被核查方接受, 这就要求探测方法不能太灵敏, 否则就得到了过多的信息, 泄漏了被核查方的军事秘密, 被核查方不能接受. 因此, 核查方法必须设计得足够灵敏而又不过分灵敏, 恰到好处. 这就是研究军备控制核查技术的困难所在, 同时也是其魅为所在.

# 三、与武器销毁有关的技术

在签订裁军协定之后, 被裁减下来的武器必须予以销毁, 才能保证这些武器不被重新部署. 从核查和鉴定出应该裁减的武器开始, 到构成这些武器的材料不再能够复原为武器或者这么做不合算, 这一整个过程包含各种复杂的技术, 不仅要保证

被裁减的武器确实得到销毁,而且要保证武器被销毁的一方军事秘密不被泄漏,还要保证拆卸和改性后的武器材料的存放不会给人类带来危害.首先要保证经过核查被鉴定出的武器在销毁过程中不被偷换,可采用“指纹”技术和标签技术.“指纹”是指单个武器自身带有的可辨认而且不易改变的特征,例如核弹头中的裂变材料自发裂变产生的中子和 $\gamma$ 射线,在穿出弹头时会被吸收或激发新的 $\gamma$ 射线,由于每个弹头的结构和成分以及生产日期略有不同,在弹头外测到的 $\gamma$ 射线能谱也略有不同.在每个弹头的固定方位测量 $\gamma$ 能谱,作为其“指纹”储存起来,可以防止将该弹头“掉-包”.标签技术是在核查后的武器上加上独一无二而且不能仿制的记号.有人提议,将细小的晶体颗粒加在涂料里,涂在核查后的武器上,再在固定角度用光照射,将其拍成照片,用于核对.晶体颗粒的分布和朝向是完全随机的.几乎不可能出现两个完全一样的图案.标签和“指纹”技术也可看成是核查技术的一部分.

被打上标签或辨认过“指纹”的武器被包装起来运到销毁工厂,不同的武器部件在不同的车间加以销毁.这里以核弹头的销毁为例<sup>[16]</sup>.核弹头被运到工厂后要重新确认上面的标签或“指纹”,然后进行拆卸.拆卸出来的钚由弹头所有国回收,可用于补充未裁减弹头中钚的衰变损耗(半衰期12年).高爆炸药由专门车间烧掉,其他非核部件在粉碎车间粉碎.核裂变材料的处理则较为复杂.由于一个弹头的杀伤威力与裂变材料的成分和数量密切相关,为了保密起见,可以把几种不同型号的裂变材料混合之后再交付处理.其中的浓缩铀在稀释车间用天然铀稀释之后,用作反应堆的燃料;其中的钚-239用反应堆废料混合后储存起来,前文提到,这样的钚不再能用来制造核武器.

稀释裂变材料需要较高的费用和一定的时间,因此可以考虑先将未经稀释的裂变材料直接存放起来.这样做要防止这些裂变材料超临界.可以用性质稳定而且坚硬的物质将未达到临界的裂变材料隔离开来,隔离距离可以根据隔离物质的硬度以及可能受到的挤压的强度计算出来.

控制武器及其材料的生产,可以保证被销毁的武器不能得到补充,甚至还可以通过控制武器材料的生产达到销毁武器的目的.例如有人提议通过停止钚生产来自然削减核弹头.在有些核弹头中要用到钚,而钚每年要衰变掉5%,如果停止了钚的补充,这些弹头每年就有5%要淘汰掉.

与武器销毁有关的技术问题不全是物理问题,还包括自然科学中很多其他领域的问题.目前,武器销毁技术的研究水平还远不如核查技术,其根本原因在于,军备控制要求核查已经有很多年了,武器销毁只是最近才开始的,裂变材料如何处理等仍处在讨论阶段.实质性的裁军是必须销毁武器的,因此今后武器销毁技术必然会得到进一步的重视.

军备控制物理学是一门应用性的学科,涉及到物理学的很多领域,例如核物理、工程物理、激光物理等;同时它又是一门交叉学科,与国际政治、国际法、经济学以及工程技术有着密切的关系.物理学家对军备控制物理学的研究使得人们了解了进行军备竞赛和发动战争对人类带来的危害,物理学家还使军备控制的分析研究开始定量化和科学化,并且能为军备控制提供有效的核查方法和销毁技术.军备控制物理学的形成和发展促进了整个军备控制研究的发展,为推动裁军进程和争取世界和平发挥了重要的作用;同时,军备控制物理学的研究也丰富了物理学的内容.

目前,有很多物理学家从事军备控制物理学的研究,并成立了一些研究组织,例如美国军备控制协会、美国科学家联合会、(前)苏联科学家委员会,我国也有科学家研究小组.这些团体为开展军备控制物理学的研究和推动这方面的学术交流做了很多工作.现在,除了不定期的学术会议之外,比较著名的有每年一次的普格瓦什(Pugwash)会议和科学与世界事务夏季讲习班.1991年的普格瓦什会议已在北京召开,1992年的科学与世界事物夏季讲习班也将在我国举办.以前,军备控制物理学的

研究成果主要是出文集或专著,有时也在相近的物理杂志上发表,如美国的Physics Today上就有军备控制专栏,现在已经有了国际性的专业杂志Science and Global Security,这标志着军备控制物理学的研究已经走向一个新的阶段.

[1] Report to the American Physics Society of the Study Group on Science and Technology of Directed Energy Weapons, (1987).

[2] 杜祥琬等,制止空间武器—军备控制的紧迫任务,中国核情报所, (1990), CNIC - 00401.

[3] D. Schroerer, Science, Technology, and the Nuclear Arms Race, John Wiley & sons. New York, (1984), 95.

[4] R. P. Turco et al., Science. 222(1983),1283.

[5] P. L. Chrzanowski, Energy and Technology Review, Uni. Of California, (1987), UCRL-52000-87-1-2.

[6] R. Z. Sagdeev and A. A. Kokoshin, Selected Readings in Arms Control & Disarmament,9(1990), 12.

[7] A. M. Saperstein and G. Mayer-Kress, J, of Conflicts Resolution, 32-4(1988), 638.

[8] Report of the OTA on seismic Verification of Nuclear Testing treaties, (1988), 050888, OTA.

[9] S. Fetter et al., Science & Global Security, 1(1990), 225.

[10] S. Fetter et al., Science & Global Security, 1(1990), 323.

[11] 同[3], 287.

[12] T. H. Braid, Science & Global Security, 2(1990), 59.

[13] A study Group Report to the Federation of American Scientists. Laser Asat Verification, (1991).

[14] Du Xiangwan et al., XLI-C15, 41<sup>st</sup> Pugwash conference on Science and World Affairs, 17-22, September, 1991, Beijing, China.

[15] D. W. Hafemeister, Science & Global Security, 1(1989), 73.

[16] T. B. Taylor, Science & Global Security, 1(1989), 1.