

# 冲击波物理与爆轰物理研究进展<sup>\*</sup>

赵 锋<sup>†</sup> 谭 华 吴 强 蔡灵仓 谭多望 祝文军

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

**摘要** 在中国工程物理研究院(以下简称中物院)建院 50 周年之际,文章作者对近年来在中物院开展的冲击波物理与爆轰物理研究工作进展情况作了介绍。首先,对该项研究工作的意义作了说明。其次,简单回顾了过去完成的几个代表性研究工作。然后,对近期主要的研究方向,其中包括冲击波温度测量和高压熔化规律研究、高密度气体物态方程研究、固体物质的宽区物态方程实验和理论研究、高压本构关系研究、材料的损伤演化及动态破坏研究、爆轰波传播规律与驱动飞层研究,以及高能炸药起爆性能与热点形成机理研究在实验技术、规律性探索到理论建模方面取得的近期主要进展作了重点介绍。文章最后对未来研究作了展望。

**关键词** 核武器,冲击波物理,爆轰物理,冲击动力学,爆炸力学

## Shock wave and detonation physics research in the Chinese Academy of Engineering Physics

ZHAO Feng<sup>†</sup> TAN Hua WU Qiang CAI Ling-Cang

TAN Duo-Wang ZHU Wen-Jun

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** To celebrate the 50th anniversary of the founding of the Chinese Academy of Engineering Physics, a brief review is presented of the research on shock wave and detonation physics in the Academy. Concepts and applications are introduced first, followed by a brief review of some typical advances in the past years. We focus on the recent breakthroughs in experimental technology, theory, modeling and simulation. In particular, shock temperature measurements and melting diagnostics, the equation of state (EOS) of high density gases, the unified EOS of solid materials, the constitutive relationship of high pressure, dynamic damage evolution and fracture, propagation and acceleration of detonation, and the initiation and formation of hot spots for heterogenous explosives are explicitly described. Finally, we put forward some suggestions for future research.

**Keywords** nuclear weapon, shock physics, detonation physics, impact dynamics, explosion dynamics

## 1 概述

冲击波物理与爆轰物理是一门典型的交叉学科,它涉及到物理学中的高压凝聚态物理和爆炸物理,力学中的爆炸力学和冲击动力学,以及极端条件下的材料科学和化学等,它是发展核武器物理设计技术、工程设计技术和武器效应研究的重点基础学科,是建立武器物理学和工程学的主要科学基础。

中国工程物理研究院冲击波物理与爆轰物理学科的发展始终与我国核武器研制工作紧密联系。核武

器是利用高能炸药爆炸释放的化学能压缩核材料,并使之最终发生核爆炸的极其精密和复杂的系统。图 1 是氢弹动作的主要过程示意图,在所列出的 13 个关键过程中,起爆、传爆、冲击、卸载、推进、压缩、减速和压紧 8 个过程都属于冲击波物理与爆轰物理的研究范畴。因此,研究核武器从雷管点火到引发炸药爆炸,到爆轰波传播、推进并压缩飞层材料,直到最终发生

\* 国家自然科学基金(批准号:10772167)、中国工程物理研究院预研基金(批准号:2009A0201008)资助项目

2009-11-10 收到

† 通讯联系人。Email:ifpf@163.com

核爆炸的极其短暂的内爆过程中发生的各种物理、力学和化学现象,获取上述重要过程中的各种数据和规律性认识,是核武器设计、研制、改进和性能评估的重要依据,同时也构成了中物院冲击波物理与爆轰物理学研究工作的核心内容。

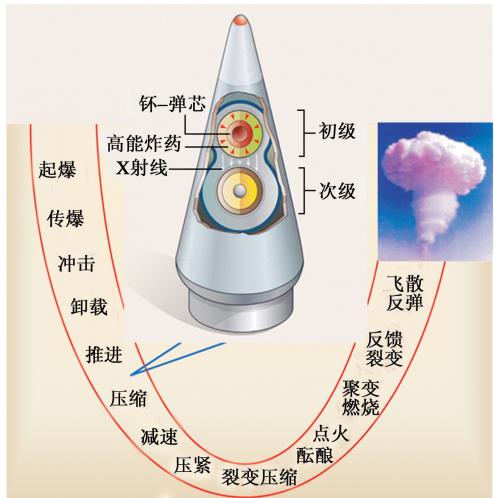


图 1 氢弹动作的主要过程示意图

## 2 研究工作的回顾

早期的研究工作是紧密围绕核武器设计开展的。主要的代表性工作包括爆轰波聚焦元件的设计、炸药网络起爆设计、化爆加载技术和气体炮加载技术,以及配套的实验诊断技术。在完成这些工作的基础上,开展了高能炸药冲击起爆和爆轰性能研究,材料冲击响应状态方程测量和冲击温度的测量、材料动态损伤和断裂以及材料的冲击相变与合成等方面的实验诊断技术、响应特性、理论模型和数值模拟计算的研究工作。提出或发展了流体动力学的特征线理论、实验物态方程理论、含空隙材料的状态方程、爆轰波传播的二维几何光学模型、高能炸药冲击起爆临界判据、材料断裂的损伤度函数模型、高压本构关系模型和冲击温度测量技术等<sup>[1-7]</sup>。这些研究进展的取得为我们进一步开展冲击波物理与爆轰物理奠定了坚实的基础。

## 3 近期研究工作进展介绍

### 3.1 冲击波物理研究进展

针对武器内爆过程中涉及的重要物理问题对冲击波物理研究工作提出的需求,开展了相关材料的冲击波温度与高压熔化特性研究,高密度气体物态方程研究,宽区物态方程实验和理论研究,高压本构关系研究和材料损伤演化及动态破坏研究等 5 个方面

面的系列工作。

#### 3.1.1 冲击波温度测量和高压熔化规律研究

材料在冲击压缩下的温度和熔化特性,直接关系到材料的压缩状态和动力学行为的精确描述。冲击波温度测量的方法之一是测量物质在高温下的辐射强度,通过与黑体或灰体辐射理论对比获得温度。以“理想界面模型”为基础的辐射法冲击波温度测量技术在实际运用中遇到了实验技术上和物理模型上两方面的困难:样品制备和实验数据解读。研究人员在过去工作的基础上提出了冲击波温度测量的“非理想界面模型”,以及直接测量高压熔化温度的模型和实验方法,对铁、铜、钼和陨石等典型材料的冲击波温度和熔化温度进行了系统研究,解释了长期以来困扰辐射法测温实验的一些问题,成功地得到了这些材料在数百 GPa 压力下的熔化温度<sup>[8-13]</sup>。

#### 3.1.2 高密度气体物态方程研究

高密度氢、氦及其同位素混合气体的物态方程是核武器物理建模所需的重要数据。将常温常压下的组分气体混合后进行冲击压缩,不能产生核武器物理感兴趣的高温、高压和高密度状态。为了得到高达 100 GPa 压力和 10<sup>4</sup> K 温度的混合气体物态方程数据,研制了首套适用于二级轻气炮实验的低温致密气体样品装置,用它测量了氢、氘、氦及其混合气体的冲击绝热线数据及冲击波温度。得到了气体中最高冲击压力达到 25 GPa,最高温度达到近 10000 K;同时还得到了受冲击气体的电子数密度与冲击温度的关系曲线,为研究氢、氘、氦混合气体物态方程提供了可靠的实验数据和基本物理图像<sup>[14,15]</sup>。我们还建立了多元稠密混合气体反应动力学模型,确立了对高密度氦部分电离区物态方程的计算模型,在考虑 He, He<sup>+</sup>, He<sup>2+</sup>, e 之间相互作用的基础上,建立了粒子化学势的非理想电离平衡方程;采用自洽流体变分过程对方程求解,计算了体系的热力学状态参量。以氢氦、氘氦二元混合气体为例,获得了密度  $\rho = 0.01 - 0.8 \text{ g/cm}^3$ , 温度  $T = 2000 - 10000 \text{ K}$  和在各种混合比例下的物态方程及离化度随密度和温度变化的曲线<sup>[16-19]</sup>。

#### 3.1.3 固体物质的宽区物态方程实验和理论研究

在核武器内爆过程中涉及的压力—密度—温度范围内,固体物质将经历固、液、气、等离子体等多种相态的变化,建立一个能够在宽广的热力学状态范围内对物质经历的固、液、气和等离子体态等物相变化过程进行全面描述的宽区物态方程,一直是研究工作关注的一个重要基础问题。

锆、铁、锡等典型金属材料在低压冲击下会发生固一固相变,通过波剖面测量,研究冲击相变波剖面的特征,首次观测到了冲击波压缩导致的金属锡从体心四方(bct)相到体心立方(bcc)相的固一固相变,由此确定了金属锡在冲击波压缩下随加载压力升高而发生的 $\beta$ 相 $\rightarrow$ bct 相 $\rightarrow$ bcc 相的复杂序列相变,解释了文献数据中提出的有关质疑<sup>[20,21]</sup>.其次,基于分子动力学计算模拟,揭示了冲击波压缩下金属铁在低压下的 $\alpha$ (体心立方结构) $\rightarrow$  $\epsilon$ (六方密排结构)相变的完整动力学过程及缺陷对相变机制的影响,对国外文献中争论多年的铁冲击相变机制问题提出了新的见解,为建立多相物态方程提供了物理依据<sup>[22]</sup>.

静高压实验中压力的定标是一个关键的要素.选择单质金属铂和化合物 Fe—O—S 等两种典型材料作为定标材料.利用静高压实验测量了金属铂等温物态方程的基本数据,共取得 49 个压力点和 153 个温度测点的实验数据,最高压力达到 45 GPa,最高温度为 1700 K.对比第一性原理计算以及冲击波压缩数据,建立了金属铂的宽区物态方程.其次,对化合物 Fe—O—S(地球深部的一种重要矿物)的高温高压物态方程进行了较为系统的研究.在 85—232 GPa 压力范围内建立了化合物 Fe—O—S 的高压物态方程,该研究结果不仅对静高压实验中压力的定标具有重要意义<sup>[23]</sup>,而且对地球深部物质组分的物理化学建模也具有重要意义.

基于第一性原理,采用原子集团变分法,对合金材料 Ni<sub>3</sub>Al 的冲击波压缩 Hugoniot 曲线进行了计算分析,发现在 205 GPa 压力下存在有序—无序结构相变.在理论解析计算方面,以 Murnaghan 方程、Holzapfel 方程、Venet 方程等为基础,在较宽的压力范围内建立了材料的通用解析物态方程,提出了符合高压极限的新型 Murnaghan 方程,将其应用于 40 余种常见材料,包括重要的标准材料如铝、铜、金等,在 TPa 数量级压力范围均与现有实验结果符合较好;对离子热压方程的问题及其解析方法进行了探讨,提出了新的理论方法,将理论结果与实验进行了对比,适用压力范围达到 TPa 数量级,温度达到上万 K<sup>[24—28]</sup>.

### 3.1.4 高压本构关系研究

固体材料高压本构关系可以解释高温高压作用下固体材料的剪切模量 G 和屈服强度 Y 的变化规律,是预测瞬态动力学行为的一组材料特性方程.剪切模量和屈服强度都可以通过声速测量确定.为此,我们发展了适用于高压声速测量的加窗 VISAR 技

术,建立了同时测量在冲击加载下的纵波和体波声速的方法,对 LY12 铝的高压声速展开了系统性研究,如图 2 所示,获得了 LY12 铝从固相区到冲击熔化固一液混合相区的声速随压力的变化规律,提出了剪切模量随压力变化的新方程,对一直沿用的 Steinberg 本构关系进行了分析并指出其不足.根据卸载波剖面表现出来的“准弹性”—塑性卸载特征,提出并建立了用“等效剪切模量”表征材料的准弹性卸载的方法,提出了描写等效剪切模量的“两段式”模型,首次得到了能够对冲击加载和准弹性卸载全过程进行描述的新型本构关系.利用新的本构方程模拟了多种铝材料在冲击加载下的波剖面,包括美国和我国发表的各种铝合金的波剖面数据,获得了令人满意的结果.在 2002 年首先提出 93 钨材料剪切模量与屈服强度之比遵循经验关系 G/Y = 常数<sup>[29]</sup>的基础上,我们又证实了该经验关系式对 Al, Cu, W 材料的适用性,从而也证明了该关系具有一定的普适性<sup>[30—34]</sup>,为解决冲击压缩下屈服强度测量方法提供了一条有效途径.

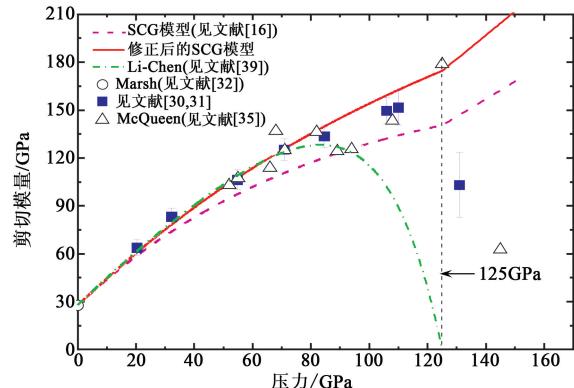


图 2 实验测量的剪切模量与压力关系

### 3.1.5 材料的损伤演化及动态破坏研究

金属材料的损伤破坏是一个多尺度、多物理相互作用的瞬变动力学过程,需要从多个方面开展研究.在微观尺度方面,对单晶铜中的单个纳米孔洞在动态加载下的演化发展进行了研究,得到了孔洞增长过程中的应力分布及孔洞增长演化的变化规律,揭示了空洞增长过程中周边基体介质的位错生成和位错发射机制,发现剪切型位错环发射的各向异性特征(如图 3 所示),推导出一个简明清晰的解析模型,解释了这种塑性特征的晶体取向效应.研究表明,基于剪切型位错环发射机制的弹性模型可以获得早期孔洞各向同性的演化规律<sup>[35,36]</sup>.

在断裂判据研究方面,针对延性金属提出了用

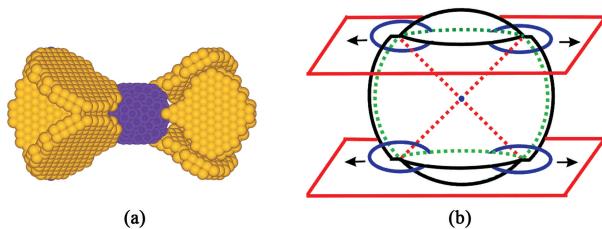


图 3 孔洞增长中的剪切型位错环发射 (a) 孔洞增长图像; (b) 剪切型位错环发射

孔洞占空比作为损伤度,并提出了标识损伤演化行为的两个临界阈值判据。如图 4 所示,第一个是微孔洞开始聚集的判据,其以后的演化行为可用逾渗理论描述;第二个是孔洞聚集程度达到发生灾变(崩溃)式拉伸型断裂行为的阈值条件,可以用作表征延性材料断裂的阈值判据。利用平面层裂实验确定的判据参数,成功地解释了滑移爆轰驱动下钢圆管内爆过程层裂和铝圆管膨胀过程的轴向断裂实验结果,进一步表明此拉伸断裂判据与样品几何结构无关<sup>[37,38]</sup>。

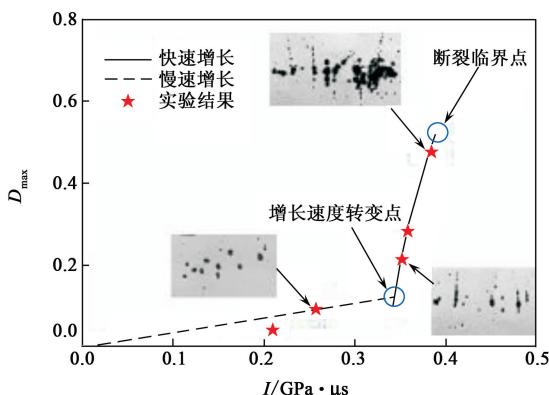


图 4 临界损伤度阈值判据

我们还利用该损伤模型对纳米晶体铜薄膜的动态拉伸破坏特性实验测量结果进行了解读<sup>[39,40]</sup>,揭示了纳米晶体铜薄膜在超高拉伸应变率( $10^6/s$ )下的层裂强度高达 3 GPa,明显高于多晶铜的层裂强度的原因。结合透射电镜观察分析和分子动力学模拟结果,推断出纳米晶体中存在的大量晶界有效地阻碍了位错运动,提高了抗拉伸强度,由此也印证了该损伤模型的合理性和普适性。

在裂纹传播方面,我们从细观尺度上研究了超弹性材料中裂纹的传播规律,发现了裂纹传播路径及速度不仅与裂纹周围的应力、应变及材料粘性有关,而且还与非局域效应的应力(或应变)梯度有关,并成功地解释了困扰国外同行多年的橡皮膜裂纹尖

端振荡传播的奇特实验现象(如图 5 所示),证实裂纹尖端的非局域效应可能是影响裂纹传播的关键作用因素<sup>[41]</sup>。

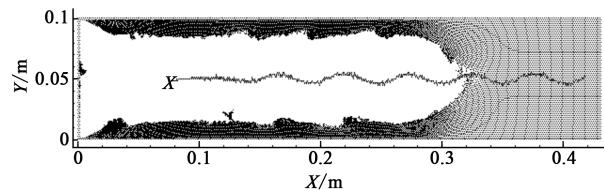


图 5 超弹性材料中裂纹的传播

### 3.2 爆轰物理研究进展

针对新形势下提出的改进、完善已有爆轰模型,探索深层次引爆机理以及确保武器安全性研究方面的要求,实验室从多个方面开展了钝感高能炸药爆轰波传播规律和驱动飞片能力的研究,起爆传爆性能及起爆器件设计的研究以及高能炸药起爆性能与热点形成机理的研究。

#### 3.2.1 爆轰波传播规律与驱动飞层研究

爆轰波传播规律与驱动飞层性能是近年来爆轰物理重点研究的基本问题。我们首先对钝感炸药的反应区及爆轰波传播规律作了深入的研究,研究了爆轰波后产物粒子速度剖面,炸药密度,颗粒度,爆轰波曲率半径,装药尺寸,边界约束和温度对爆轰波传播性能的影响,实验测量的爆轰波阵面见图 6,建立了描述钝感炸药非理想爆轰传播行为的模型,标定了计算模型中的参数。我们还设计了新型爆轰传递序列,其环境适应性优越,可靠性高,达到了国际先进水平,在核武器工程设计中有重要的应用前景<sup>[42-46]</sup>。

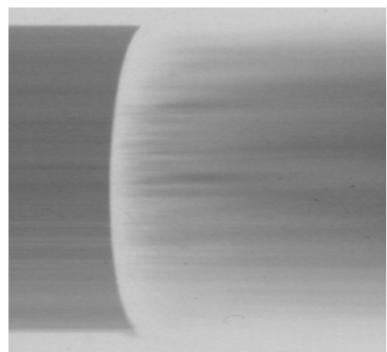


图 6 实验测量爆轰波阵面及其边界

在散心爆轰驱动方面,针对两种典型高能炸药,进行了多种点爆驱动的半球试验和大板试验以及平面驱动试验,测量了从散心爆轰驱动过渡到滑移爆轰驱动时飞片的运动规律。与平板飞片驱动试验比

较,发现如果采用圆筒试验方法对爆轰产物物态方程定标,存在起始点不清楚的缺陷,而平板试验恰好可以弥补这个缺陷.将平板和圆筒试验结合,二者相互弥补,获得了更优的炸药爆轰产物物态方程参数<sup>[47,48]</sup>.

### 3.2.2 高能炸药起爆性能与热点形成机理研究

炸药的安全性和动作可靠性是炸药在实际应用中的两个方面,在实际应用中我们要求炸药安全钝感,但是又必须有良好的起爆和爆轰性能.

利用单色谱仪技术、ICCD 瞬态光谱技术、X 光电子能谱技术、X 光衍射谱等技术在爆炸激波管中研究了纳米铝粉、纳米铜粉、纳米锌粉、铁粉添加到硝基甲烷、环氧丙烷、RDX 炸药粉等含能材料的催化微观机理.研究表明:纳米金属粉可以明显加速含能材料的快速反应,纳米铝粉可以使环氧丙烷的点火延迟时间缩短 70%;纳米铜粉、纳米锌粉可以使硝基甲烷、RDX 炸药粉的点火延迟时间缩短 30%;纳米铁粉可以使硝基甲烷、RDX 炸药粉的点火延迟时间缩短 20%.研究了硝酸丙酯、铝粉、戊二烯、苯、环氧丙烷复合燃料快速反应点火的微观机理.提出了一种从理论上确定最容易断裂键及可能较早出现的中间产物,实验上利用多种光谱技术确定复合燃料冲击点火延迟时间和临界条件.研究表明:环氧丙烷复合燃料受冲击后,最先点火的燃料是环氧丙烷,其次是硝酸丙酯,最后为铝粉.只有当这些有机物剥离、反应完后,汽化产生的铝原子才能和氧原子反应,为新型含铝炸药的研制提供了支撑<sup>[49-52]</sup>.

非均匀体系的计算方法是当前多个学科研究的前沿.在细观层次,塑料粘结炸药是典型的非均匀体系,如何模拟其在外载荷作用下的响应尚无统一的方法.我们建立了一种有限元与离散元的结合方法,解决了两种方法的界面耦合问题,可有效的应用于均匀材料与非均匀材料冲击作用下细观变形模拟.如图 7 所示,计算了冲击波作用下不规则多边形炸药晶体与粘结剂细观变形、脱粘及粘结剂断裂的现象及热点生成过程.加深了对炸药起爆热点机制的理解,对深入开展炸药细观层次的动态响应特性、炸药反应临界条件,设计具有新型微结构配方的塑料粘结炸药研究具有重要意义<sup>[53]</sup>.此外,还开展了复合炸药分子的第一性原理和分子动力学计算研究,揭示了其力学和化学性质.

### 3.2.3 复合炸药分子的第一性原理和分子动力学计算研究

采用第一性原理和分子动力学方法对炸药、粘

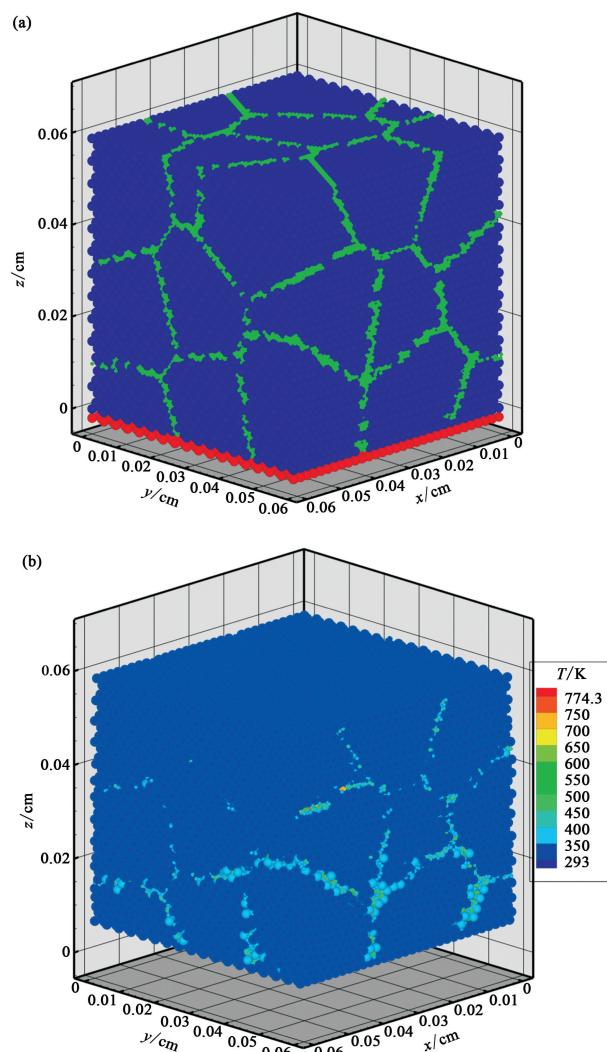


图 7 离散元计算的冲击波后颗粒材料的温度变化 (a)塑料粘结炸药计算模型;(b)冲击波后塑料粘结炸药温度分布图

结剂、钝感剂多组份体系的结构和性能进行了模拟研究.计算了各组份对主体炸药弹性性能、钝化反应、爆轰性能的作用.结果表明<sup>[54,55]</sup>,各塑料粘结炸药的弹性较纯 HMX 有所改善,以粘结剂组分对主体炸药的力学性能影响最大;各组分的加入均或多或少地降低主体炸药的爆热和爆速.研究结果和结论为以后此类炸药新配方的起爆和爆轰性能研究提供了具有参考价值的信息.

## 4 展望

现有的研究表明,在武器物理所涉及的高温高压条件下材料电子结构的变化、在原子尺度缺陷和细观尺度的非均匀性对其动力学过程的物理力学现象和规律都直接相关,仅仅依据现象学的宏观研究方式已经不能满足对武器动作过程和涉及的现象进

行精密预测的需求。结合禁核试条约后武器物理发展的需求,冲击波物理与爆轰物理学科发展将由过去单一宏观尺度研究拓展到宏观、细观、微观尺度的多尺度研究,逐渐由现象规律性研究深入到物理本质的机制研究,实现对于核武器内爆过程涉及的重要物理力学现象的精密和定量解读。

同时,冲击波物理与爆轰物理学科的发展离不开其他学科的发展。因此,它的研究成果也必将推动原子分子物理、地球物理、天体物理等基础学科,以及材料科学与工程、航空航天技术、新能源等应用科学与技术的进一步发展。

**致谢** 本文的编写工作得到了冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室领导和专家的直接指导和帮助,特在此表示衷心的感谢!

### 参考文献

- [1] 刘文翰.爆轰波聚焦元件设计原理.四川绵阳:中国工程物理研究院科技丛书,1994[Liu W H. Focus Principle of Detonation Wave. Mianyang, Sichuan: Sciense and Technology Series at CAEP,1994(in Chinese)]
- [2] 经福谦.实验物态方程引论.北京:科学出版社,1986[Jing F Q. Intrdacticn to Experimental Equation of State. Beijjing: Science Publishing company,1986(in Chinese)]
- [3] Wu Q, Jing F Q et al. Appl. Phys. lett., 1995, 67(1):3
- [4] 孙承纬,卫玉章,周之奎.应用爆轰物理.北京:国防工业出版社,2000[Sun C W, Wei Y Z, Zhou Z K. Applied Detonation Physics. Bejing: National Defense Industrial Publishing company, 2000(in Chinese)]
- [5] Feng J B, Jing F Q et al. J. Appl. Phys., 1997, 81:2575
- [6] 谭华.实验物态方程导引.北京:国防工业出版社,2007[Tan H. Guide to Experimental Equation of State. Beijing National Defense Industrial Publishing company,2007(in Chinese)]
- [7] 王金贵.气体炮技术.四川绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所科技丛书,1997[Wang J G. Techniques of Gas Gun. Mianyang, Sichuan: Sciense and Technology Series at Institute of Fluid Physics, CAEP,1997(in Chinese)]
- [8] Tan H, Dai C D, Zhang L Y et al. Appl. Phy. Lett., 2005, 87: 221905
- [9] 戴诚达,谭华.高压物理学报,2006,20(2):113[Dai C D, Tan H. High Pressure Physics, 2006, 20(2):113(in Chinese)]
- [10] Huang H J, Jing F Q, Cai L C et al. Chin. Phys. Lett., 2005, 22:836
- [11] Sun Y H, Huang H J, Liu F S et al. Phy. Lett., 2005, 22: 2002
- [12] Chen Q F, Cai L C, Duan S Q et al. Chin. Phys., 2004, 13: 1091
- [13] Cheng X L, Liu Z J, Cai L C et al. Chin. Phys. Lett., 2003, 20:2078
- [14] Chen Q F, Cai L C, Jing F Q et al. Shock Waves, 2003, 13: 231
- [15] Cai L C, Chen Q F, Gu Y J et al. Science in China (Series G: Physics Mechanics & Astronomy), 2005, 48: 695
- [16] Chen Q F, Cai L C, Zhang Y et al. J. Chem. Phys., 2006, 124: 075410
- [17] Chen Q F, Cai L C. International Journal of Thermophysics, 2006, 27: 437
- [18] Chen Q F, Cai L C , Chen D Q et al. Chin. Phys. 2005, 14: 2077
- [19] Chen Q F, Zhang Y , Gu Y J et al. Physics of Plasmas, 2007, 14: 012703
- [20] Li J, Zhou X M, Zhu W J et al. J. Appl. Phys., 2007, 102: 083503
- [21] Li Y H, Cai L C, Zhang L. Chin. Phys. Lett., 2007, 24: 784
- [22] 崔新林,祝文军,邓小良等.物理学报,2006,55:5545[Cui X L, Zhu W J,Deng X L et al. Acta Phys. Sin.,55:5545(in Chinese)]
- [23] Xiang S K, Cai L C, Bi Y et al. Phys. Rev. B, 2005, 72: 18410
- [24] Xiang S K, Cai L C, Jing F Q. Phys. Rev. B, 2004, 70: 174102
- [25] Geng H Y, Sluiter M H F, Chen N X. Phys. Rev. B, 2005, 72 : 014204
- [26] Sun J X, Cai L C, Wu Q et al. Phys. Rev. B, 2005, 71: 024107
- [27] Sun J X, Cai L C, Wu Q et al. Phys. Rev. B, 2006, 73: 155431
- [28] Sun J X , Jing F Q, Wu Q et al. Appl. Phys. Lett., 2006, 89 : 121922
- [29] Hua J S, Jing F Q et al. J. Phys. Condensed Matter., 2002, 14: 10843
- [30] Yu Y Y, Tan H, Dai C D et al. Chinese Physics Letter, 2005, 22 : 1742
- [31] Hu J B, Yu Y Y, Tan H et al. Chin. Phys. Lett., 2006, 23 : 1265
- [32] Peng J X, Jing F Q, Li D H et al. Journal of Applied Physics, 2005, 98 : 013508
- [33] Jing Q M, Bi Y, Wu Q et al. Rev. Sci. Instrum., 2007, 78: 073906
- [34] 彭建祥,经福谦,王礼立等.物理学报,2005,54(5): 2194[Peng J X, Jin F Q, Wang L L et al. Acta Phys. Sin., 54(5): 2194 (in Chinese)]
- [35] Zhu W J, Song Z F, Deng X L et al. Phys. Rev. B, 2007, 75: 024104
- [36] Song Z F, Zhu W J, Deng X L et al. Chin. Phys. Lett., 2006, 23: 3041
- [37] Wang Y G, He H L. J. Appl. Phys., 2007, 101: 103528
- [38] Wang W Q, Chen S W. Phys. Rev. Lett., 2005, 95 : 144301
- [39] Wang Y G, He H L, Wang L L et al. J. Appl. Phys., 2006, 99: 033511
- [40] Yu Y Y, Chen D N, Tan H et al. Inter. J. Impact Eng., 2007, 34: 395
- [41] Chen D P, He H L, Jing F Q. J. Appl. Phys., 2007, 102: 033519
- [42] 谭多望,方青,张光升等,爆炸与冲击,2003,23:300[Tan D W, Fang Q, Zhang G S et al. Explosion and Shock Waves, 2003, 23 (4):300 (in Chinese)]
- [43] 赵继波,赵锋,谭多望等.高压物理学报,2006,20:301[Zhao J B, Zhao F, Tan D W et al. High Pressure Physics, 2006, 20(3)301 (in Chinese)]
- [44] 黄文斌,文尚刚,谭多望等.爆炸与冲击,2006,26,373[Huang W B, Wen S G, Tan D W et al. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(4):373 (in Chinese)]
- [45] 赵继波,谭多望,赵锋等.含能材料,2005, 13:217 [Zhao J B, Tan D W, Zhao F et al. Energetic Materials, 2005, 13(4):217 (in Chinese)]

Chinese) ]

- [46] 孙承纬, 赵峰, 文尚刚 等. 爆炸与冲击, 2003, 23: 481 [Sun C W, Zhao F, Wen S G *et al.* *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 481 (in Chinese)]
- [47] 虞德水, 赵峰, 谭多望 等. 爆炸与冲击, 2006, 26: 140 [Yu D S, Zhao F, Tan D W *et al.* *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(2): 140 (in Chinese)]
- [48] 虞德水. 点爆发散爆轰驱动平板飞片的实验与计算研究, 四川绵阳: 中国工程物理研究院硕士论文, 2005 [Yu D S. *Researches on the Accelerating of Flyer by Divergent Detonation*. Sichuan, Mianyang: master thesis, 2005 (in Chinese)]
- [49] Yan Z X, Wu J H, Ye S *et al.* *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: 024905
- [50] Yan Z X, Wu J H, Hu D *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2006, 23: 217
- [51] Ye S, Wu J H, Wang Y P *et al.* *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40: 3541
- [52] 吴旌贺, 炎正馨, 叶松 等. 光学学报, 2007, 27: 1873 [Wu J H, Yan Z X, Ye S *et al.* *Optics*, 2007, 27: 1873 (in Chinese)]
- [53] 尚海林, 赵峰, 王文强等. 冲击作用下炸药热点形成的三维离散元模拟, 爆炸与冲击, 待发表(已接收) [Shang H L, Zhao F, Wang W Q *et al.* *Simulation for Hot Spot Formation in High Explosives By Three-Dimensional Discrete Element Method*, to be published (accepted), *Explosion and Shock Waves* (in Chinese)]
- [54] Ju X H, Ji G F, Xiao H M. *Chemical Physics*, 2006, 326: 395
- [55] 马秀芳, 赵峰, 肖继军等. 爆炸与冲击, 2007, 27: 109 [Ma X F, Zhao F, Xiao J J *et al.* *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27: 109 (in Chinese)]