

文章编号: 1000-5773(2002)02-0152-09

面向新世纪的冲击波物理学

——第 12 届凝聚介质冲击压缩国际会议简介*

龚自正^{1,2}

(1. 西南交通大学高温高压物理研究所, 四川成都 610031;

2. 西南交通大学理学院物理研究所, 四川成都 610031)

摘要: 对第 12 届凝聚介质冲击压缩国际会议(SCCM-2001)进行了简介和综合分析, 介绍了凝聚介质冲击压缩近年来的新进展, 回顾了 20 世纪动高压或应力下凝聚介质物理学和力学的基本范式和取得的成就, 展望了冲击波物理学在 21 世纪所面临的挑战和机遇。

关键词: 冲击波物理学; 进展; 成就与展望; 挑战和机遇

中图分类号: O347.5 **文献标识码:** D

1 概 况

由美国物理学会(APS)主办的以动高压或应力下凝聚介质的物理学、力学和材料科学为主题的凝聚介质冲击压缩国际会议第 12 届会议(12th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter)于 2001 年 6 月 24~29 日在美国亚特兰大市的佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)举行。会议由佐治亚理工学院和洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)联合承办。佐治亚理工学院的 Naresh Thadhani 教授和洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Yuki Horie 教授为本次会议的主席。来自美、俄、英、德、法、日、以、印、瑞典、意大利、波兰、韩、中国等国的 438 位学者出席了本次会议, 是该会议迄今出席人数最多的一次。大会共收到论文 452 篇, 其中特邀报告 8 个, 邀请报告 22 个, 一般口头报告 319 个, 展示论文 102 篇。除了研讨、交流该领域的新近进展外, 与历届会议不同的是, 本次新世纪会议设专题以全体会议形式讨论了“*What Is Shock Wave*”, 这是本次会议的重要内容和显著特色。本届会议交流内容分为 13 个专题: (1) 冲击波是什么? (2) 爆轰物理与含能材料; (3) 实验与仪器进展; (4) 状态方程; (5) 地质和行星物理; (6) 建模、模拟和分子动力学: 惰性材料; (7) 建模、模拟和分子动力学: 含能材料; (8) 变形机制和力学性质; (9) 侵彻力学; (10) 相变; (11) 材料合成; (12) 多孔、粉末和泡沫材料; (13) 光谱学和光学研究。

所收论文约 60% 来自美国, 俄罗斯约占 15%, 日本约占 8%, 英、法等各约占 5%。我国国内学者共提交了 12 篇论文, 只占论文总数的 2.6%, 其中中国科技大学力学与机械工程系唐志平教授(邀请报告)和西南交通大学物理所的龚自正教授(邀请报告)参加了本届会议。值得注意的是, 在本次会议上英国皇家军事学院(Royal Military College of Science, Cranfield University)和日本因其在较多研究方向上论文数量多、质量高而引人注目。这是英、法、日等加强在凝聚介质冲击压缩领域基础研究的一个反映。可以认为:

* 收稿日期: 2002-01-17

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(10032040)资助; 国家自然科学基金对外交流与合作项目(1010201135)资助; 中国工程物理研究院预研基金(990102)资助

作者简介: 龚自正(1964—), 男, 博士, 教授。

(1) 强动载荷下材料的力学性质和形变行为(强度、形变、损伤、断裂、穿甲等)、冲击诱导的炸药爆炸点火、凝聚介质中冲击波现象的数值模拟、状态方程、新的实验和测量技术仍然是当前该领域的研究重点和主流。这和现实中的军事需求牵引有直接关系。

(2) 瞬态光谱学和光学测量技术对冲击载荷下材料微观、介观过程的理解已经至关重要,因而近年来一直倍受重视。

(3) 冲击波现象的数值模拟已经占有十分重要的地位,成为研究能力的标志之一。

(4) 英国、法国、日本、印度等基础研究进展很快,有异军突起之势。相比之下,我们的基础研究无论是成果的质量还是数量,无论是队伍还是投入,与国际趋势之间的距离正在逐渐拉大。希望能引起有识之士和决策部门的关注和重视。

2 一些最新研究进展

2.1 爆轰物理和含能材料

Y. Grudkov^[1]报道了冲击波对 PETN 点火中各向异性的敏感机理研究。经过量子化学计算,对观察到的 PETN 冲击点火中的各向异性的机制给出了解释。在晶格尺寸上,分子剪切变形力学和 PETN 旋转结构相关联,各种稳定 PETN 的对称性和偶极矩不同,初始结构属于 S_4 分子点群,无偶极矩产生。由于剪切变形,分子改变了结构。沿 $[110]$ 方向冲击导致了体剪切阻碍,产生了偶极子结构。相反,沿 $[\bar{1}10]$ 方向冲击,导致了小的极化或无极化。因为在 $5\sim 10\text{GPa}$ 内 PETN 的分解由离子反应主导,晶格的局域化极化在反应中起关键作用。相反,非极化晶格导致非稳定的和低的反应率。其计算结果显示,分子结构的这种变化可由振动光谱来探测。他们正在进行静压和冲击压力下的 Ramann 光谱初步测量实验

Steven F. Son^[2]报道了炸药燃烧的研究进展。指出含能材料的安全性研究已经走过了 100 年历史,但对在所有可能的热和力学(碰撞)事故下炸药点火的理解仍显不足。传统的观点是简单波从点火点的继续传播。最近几个实验说明在热点火和炸药冲击中,活性反应裂纹与反应强度相关,这与经典假设相反。活性裂纹比简单波传播更重要。

M. M. KuKlja^[3]报道了他们关于点缺陷和线缺陷如何影响含能固体爆轰性能研究的最新进展。由第一性原理来计算与电子激发态有关的固体高能炸药的点火过程,建立了可靠的点火模型,这将有助于控制和预言更安全、更高能炸药的点火性质。其中的关键问题是由固体微结构性质研究来理解在点火刚刚开始的高级阶段是如何发展的,而目前的实验技术还无法对此进行观测。他们工作的特点是考虑到炸药中的杂质对爆炸点火有效值和阈值的影响。用量子化学方法仔细研究 RDX、HMX、PETN 等高能炸药中有点缺陷、线缺陷和面缺陷的原子和电子结构,从单分子空穴、空穴的聚集开始,然后是位错、分子的变形。

他们研究了每一个缺陷在点火中的作用及相对应的化学分解,把注意力集中在晶格缺陷与高能炸药临界能带中的光学带间隙改变的关系上。用等熵压缩和沿晶轴方向单轴压缩方法模拟了冲击在完美单晶和含缺陷晶体的传播,计算了完美固体和缺陷固体中绝缘体—金属转变的特征压力,估算并分析了电子从禁带到导带的转变。检验了在外界压力(冲击或碰撞)下晶格缺陷导致光学带间隙的剧减,引起了热电子向导带的转移,立即导致炸药分解。

2.2 实验技术和测试仪器

Marina Bastea 报道了简单分子流体(如氢、氧、氮)在冲击压缩下的电导率测量的新进展。用 Mott 绝缘体—金属转化理论分析了在 0.1TPa 压力下的金属化行为。对氧的单次冲击与多次冲击下的电导率进行了比较,对这两种不同状态的电导机理给出了定量的自洽分析。对现有的几乎所有关于分子流体电导率的实验与理论模型进行了比较,并提出此方面的研究将是令人震撼的。

D. S. Moore 等^[5]报道了金属和含能材料中由亚皮秒激光驱动的冲击波研究的进展。高能

秒激光既可用于在薄靶中驱动冲击波,也可用于冲击样品光谱学的研究。他们在薄的玻璃基体上沉积或蒸发喷涂上金属薄膜,再将分子材料沉积到金属薄膜上,制成供实验用的薄靶。亚皮秒激光与玻璃基体的非线性光学作用产生很快很平的冲击波,当冲击波从金属薄膜传到薄的分子材料中时,用亚皮秒时间和空间分辨干涉仪记录冲击波的变化,来观察冲击波在金属薄膜中的复杂反射特征,得到了受冲击分子材料(如:缩水甘油叠氮化物)的超快振动光谱。并用此方法研究了均匀的定向排列的薄的层状含能材料的情况。这为含能材料的冲击压缩光谱学研究提供了新的技术途径。

D. Hoffman^[6]报道了用稠密离子束研究极端能量密度下等离子体的物理学的新方法。因为构成宇宙的物质大多数处于高能量密度、稠密、强耦合的等离子体状态,等离子体物理学研究十分重要,而等离子体研究的重点是其状态方程、光运输和流体动力学行为。稠密离子束与等离子体之间的反应过程是研究高能量密度等离子体及其性质的理想工具。重离子束的高的动能,使其可侵彻等离子体靶的深部,其能量损失和最后的带电分布状态则可揭示离子束和等离子体之间的反应过程,从而得到靶等离子体的性质。近期的研究重点是:(1) 沉积能量的高精度计算;(2) 电荷的重组和交换过程;(3) 高强度重离子束辐射下物质的流体动力学响应。

2.3 状态方程

C. Hall^[6]报道了在 Sandia 的 Z 加速器上进行的准等熵压缩实验的新进展。Z 加速器是一个脉冲源,能在 200ns 内瞬时电流高达 20MA,这一电流可产生一光滑上升的、与时间相关的磁压强,可在几百微米厚样品中产生 0.2TPa 的高压。此压力经过几种厚度的材料后,可用于材料的准等熵压缩。最新的实验设计可使这一压力同时均匀的应用于 8 个样品中,并发展了几种诊断技术,包括线成像 VISAR、Bdot 探针等。最近通过消除低水平冲击的形成,可使样品厚度大于 1mm。并用新的方法处理了倾斜加载下样品/窗口界面的扰动。Z 加速器装置可用于研究状态方程、晶粒效应、力学性能、含能材料响应及各种材料的相变等。

NG Andrew^[8]报道了激光驱动冲击波产生等离子体的研究进展。指出高功率强激光产生的冲击压力已经超过 0.1TPa,在这一区域内,产生了热的、稠密的等离子体,这为研究由多体带电粒子相互作用主导的强耦合等离子体提供了激动人心的、关键的途径。他较系统地研究了激光驱动冲击波产生的等离子体的电导性,电子-离子平衡和压致电离现象等。这是状态方程研究的新方向。

2.4 地球和行星物理

龚自正^[9]介绍了将冲击波高压技术应用于地球内部物理研究的一些近期进展。他们较系统地研究了钙钛矿型顽火辉石($Mg_{0.92}, Fe_{0.08}$) SiO_3 在整个下地幔温压下的物理性质,包括状态方程、高压声速、冲击温度和高压熔化现象,证实了其在下地幔中的稳定性。其中高压声速、冲击温度和高压熔化数据均为国际上首次获得。在高压物性数据基础上,建立了能同时满足地震学的 PREM 约束,又符合地幔化学成分的宇宙化学模式和地表岩石分析结果,还为高温高压实验所接受的全新的下地幔矿物学模型,分析了下地幔中的横向温度不均一性。通过对铁高压声速和高压熔化特性,特别是高压熔化机理的研究,给出了铁高压熔化线的最新结果,这与俄罗斯 V. Dremov 等^[10]的理论计算结果较一致。并据此给出了等熵压缩下地核内纵向温度分布的最新结果。

2.5 数值模拟(惰性材料)

D. Meiron^[11]报道了爆轰作用下金属钽响应的欧拉-拉格朗日耦合模拟。介绍了位于 Caltech 的以模拟固体介质中由高能炸药爆轰引起的强冲击波的三维图像为主要任务的 ASCI 联合中心。Meiron 在 ASCI 的 10^{12} /s 次的计算机上,用欧拉法(用于模拟高能炸药的爆轰)和拉格朗日法(用于模拟固体的力学行为)耦合的并行算法程序,模拟了钽在硝铵炸药作用下的响应特征。指出用多尺度模型特别是亚网络(Sub-grid)模型可以揭示一般数值模拟中难以捕捉的物理长度和时间尺度。介绍了递减反应网络(Reduced Reaction Network)和钽的塑性响应模型的进展。

T. C. Germann^[12]报道了用大尺度分子动力学模拟来研究冲击致塑性和相变的最新进展。指出,

对于固体中的冲击波传播,现代计算机已经可以进行在真实相互作用势下几百万个原子的分子动力学模拟。对塑性、相变和含能材料爆轰过程可提供原子尺度变化过程的直接观察。对于完整的单晶金属,如铜,模拟已经揭示了塑性流机制与方向的明显相关性。固态铁的 α 相到 ϵ 相的转变途径也强烈地依赖于结晶方向。当冲击波沿[001]方向传播时,会产生一个稳定的 hcp 结构,并与冲击波阵面后一段小的距离相关联;相反,当冲击波沿[011]方向传播时,形成较复杂的小尺度上的纳米结构,这一结构的退火时间比模拟时间长几个皮秒。他对多晶样品也进行了一些模拟,发现在晶界上的不均匀成核降低了塑性或相变的阈值。并指出,由于激光冲击波实验中亚皮秒量级的 X 射线衍射技术的快速发展,使得从实验上直接证实这些过程已经指日可待。

唐志平^[13]报道了非均匀材料冲击过程的有限元模拟,包括时间步长的确定、与有限元大小相关的弥散和耗散、非线性粘弹性模型、气体元模型、准静态有限元和三维程序等。并报道了对 Pb/Sn、Cu/Al 复合材料的计算结果。

2.6 数值模拟(含能材料)

K. Roessig^[14]报道了塑性粘接的含能材料的介观力学(Meso-Scale Mechanics)。颗粒材料的动态行为对很多问题而言是十分重要的。就含能的颗粒材料来说,点火机理是安全和加工处理必须考虑的因素。对炸药力学做功可导致其加热和次生的化学反应。尽管此类材料的屈服强度非常低,一般认为不会高到足以产生相应的点火热,但应力链桥现象可以使应力和应变集中并得以发展。压缩加载可看成是大的流体静压与一个剪切应力的组合应力。次生应力链桥形变把压缩加载集中在一个很小的区域中,在材料内部提供了点火核心。通过对冲击后样品的分析表明,粒子基的损伤特征显示粒子的损伤沿着一定的路径,而没有固定的体变形。他们发展了由高速相机测量的光弹性实验来记录链桥形变,在这种实验中,粒子基中的应力集中可由简单的几何关系来确定。用 ALE3D 程序对实验结果进行了数值模拟,模拟结果刻画出了应力局域化的边界效应和应力链桥形变的边界效应。对介观(Meso-Scale)分析在其他交叉学科中的应用也作了讨论。

L. E. Fried^[15]报道了冲击压缩下固体硝基甲烷中电子激发研究的最新进展。他用密度泛函理论计算了流体静压力、单轴应变和剪切应变下晶体的能带间隙。在单轴应变下能带间隙的降低是由于分子缺陷和空穴的影响。对冲击波阵面上所有可能的最近邻碰撞进行了从头计算的分子动力学模拟,其中体剪切沿着阻碍滑移面方向,发现接近自由旋转的硝基甲烷组和局域化的 HOMO、LUMO 的本征状态起了重要作用,并发现动力学加载比静态加载对能带间隙有更明显的作用。若要产生明显的热激活态,分子的运动速度必须大于 6km/s。

2.7 变形力学与力学性能

G. Ravichdran^[16]报道了高应变率变形中塑性功和热之间的转变。他研究了金属在高应变率变形中塑性功转变成热的份额与应变、应变率的关系。利用分离式 Hopkinson 杆来确定高应变率下的力学性能,用高速红外探测器就位测量样品的温升。以 2024-T3 铝为对象,在实验的应变率范围内实验已经显示其流动应力与应变率是无关的。在低的塑性应变中,铝合金中储存的塑性功大于输入值的 0.6 倍,且这一份额在高达 $10^4/s$ 的应变率范围内对应变率不敏感。相反, α -Ti 的流动应力强烈地依赖于应变率,且在低应变率段比铝合金要耗散多得多的塑性功为热量。Ti 中储能(塑性功)的能力随塑性应变的增加而减小,在一定的应变下,塑性功转化成热量的份额随应变率的增大而增大。实验结果与广义的内变量连续热动力学模型预言一致。储能函数取决于对高应变率下金属变形的热-力学效应的了解,从而显示这一函数可以由单一的绝热实验中的应力和温度数据而导出。这一函数可以用来确定塑性功转化成热的份额。

M. Ortig^[17]报道了 Caltech 的 ASCI 中心对高温高压和高应变率下材料动态力学性质的虚拟测试(VTF)研究中多尺度模型的进展。建立了从原子尺度到宏观尺度的系统模型,这个模型中包括:(1) 双扭结变形和扭结运动的热激活;(2) 初始位错和 Forest 位错的密排之间的作用;(3) 位错割裂阶的变

形;(4) 位错对随机排列的 Forest 位错的渗透运动,引起的不同强度短范围的障碍;(5) 二重交叉滑移导致的位错增殖而引起的位错多级褶皱;(6) 位错的对消。这些模型中的参数由量子力学第一性原理计算和经验势拟合给出,状态方程由第一性原理计算。对钽晶体的计算结果与实验吻合很好。VTF 也包括了对损伤和碎片的描述。他们目前正在做爆炸作用下钽的动态响应模拟。

2.8 侵彻力学

James D. Walker^[18]报道了侵彻力学分析模型的新方向与挑战。自 20 世纪 40 年代以来,随着塑性理论的发展,侵彻力学模型已经可以进行精确的和解析的分析。现在解析的侵彻模型能够精确预言靶和侵彻体为简单的金属几何体时的侵彻深度。最精确的模型是利用复杂的塑性分析得到靶的力学状态,但这个模型经常是给出相对简单的微分方程。Walker 在报告中讨论了侵彻力学的中心方法(Central Approaches),如中心线动量平衡和空穴的膨胀,指出了在各种模型中每一项的物理实质,及这些项在不同模型中的对比。目前仍不清楚的问题包括:(1) 从侵蚀到刚性侵彻的转变;(2) 侵蚀体应力状态的转变;(3) 冲击坑直径的计算;(4) 陶瓷靶的失效时间;(5) 复合及纤维靶模型;(6) 斜侵彻的分析方法;(7) 后表面的冲塞模型;(8) 损伤及侵彻体的穿孔。

2.9 相变

S. C. Gupta^[19]报道了他对冲击相变的理论和实验研究。冲击加载可导致各种相变,如多晶型相变、非晶型相变、金属化相变和分子离解等。因冲击过程仅持续几个微秒或更短,就位的微观测量十分困难,尽管就位微观测量正在变得可能,但绝大多数相变的测量是宏观的。对相变的微观解释是通过与静高压数据的对比或纯理论的分析后获得的。对不可逆相变,通过对初始样品与回收样品的微观测量,可以提供相变的内在机制。从理论上说,建立在密度泛函理论基础上的、目前十分流行的对能带结构的从头计算,可以对小能量差异的结构相变作出精确计算。沿相变路径计算总能量,可以估算相变的激活势垒,可以研究相变动力学。对晶体到非晶体的相变,分子动力学计算已经十分流行。

Robert E. Setchell^[20]报道了压电陶瓷冲击响应研究的新进展。由于具有永久的剩余极性,自 20 世纪 50 年代以来压电陶瓷便被用于由冲击压缩来提供脉冲电源,在后来 20 多年的研究中,主要针对 PZT 陶瓷在冲击压缩下的压电响应特性,建立了简单的理论分析模型。一般而言,研究显示有限率释能对应力和场有复杂的依赖关系,并提出了介电松弛和冲击致导电机制。但最近 20 年的实验做得很少,影响了建立和发展更精细的模型。近几年来,发展数值模拟能力的强烈兴趣促进了实验及相应模型的研究。圣地亚实验室已经做过 70 多发轻气炮实验,来研究几种不同的压电陶瓷,主要是针对 95 陶瓷($Zr:Ti=95:5$),研究了宽广的冲击压力和强电场中未极化的、正规极化的和单轴极化的 PZT95/5,发现了释能及介电性质对应力和电场的定量依赖关系。他们正在发展和细化可用于脉冲电源装置的 PZT 材料响应模型,以便进行数值模拟。

2.10 新材料合成

T. Sekine^[21]报道了由冲击产生的立方 SiN 的特性,其屈服强度随压力的上升而增加,其 HEL 是 16GPa,相变点在 36GPa。高压相的 K_0 为 300GPa,因此为一超硬材料。回收得到的尖晶石相密度为 4.0g/cm^3 。对亚稳相 SiN 在 1500°C 范围内进行了考核,显示了高温下可能会有许多用途。MASNMR 与分析显示, SiN 尖晶石相有四面体 SiN_4 和八面体 SiN_6 两种结构。

2.11 多孔和粉末材料

David Benson^[22]报道了粉末材料冲击压缩的计算模型,其主要特点是用欧拉有限元来讨论介观尺度上的含能和惰性材料,考虑了混合理论和界面迹对计算的显著影响。

3 冲击波物理学面临的机遇和挑战

作为 Shock Compression of Condensed Matter 会议在新世纪的首次会议,本次会议设专题以全体

会议形式讨论了“*What Is Shock Wave*”,这在历次会议中是第一次。大会的 8 个特邀报告全部属于这个主题。专题会议“*What Is Shock Wave*”均由各领域的国际知名学者以特邀报告和专题报告的形式,系统、详尽地回顾总结 20 世纪动高压或应力下凝聚介质物理学和力学所取得的成就;评定、审视凝聚介质中冲击波的范式(Paradigms);讨论、检验冲击波物理的基本假设(Basic Assumptions);揭示对这些基本假设已经构成挑战的新的计算、测量和理论;展望新世纪该领域的研究前沿和新一代研究者所面临的机遇和挑战。

圣地亚实验室(SNL)的 James Asay^[23]和 L. Davison^[24]指出,冲击波研究的基本动机是为了理解材料在极宽的动载荷下的行为,冲击波技术在高压物理研究中已经扮演了十分重要的角色。对固体中的平面冲击波的基本假定是:(1)波是一维的;(2)应变是均匀的;(3)波是稳定的;(4)形变是热力学-力学相互耦合的。由此定义了压力、温度等热力学量,而热力学第一定律、Grüneisen 状态方程、Hugoniot 状态方程是描述热力学量的基本方程,用连续介质模型和微观力学模型可以充分地描写固体介质(比如铝)中稳定冲击波的传播。建立了低应力下的弹性模型、高应力下的流体模型和中间应力下的弹-塑性模型。这些假设及理论,过去 30 年在研究固体中冲击波和爆轰波的传播、应力引起的相变、应力引起的材料损伤等方面取得了巨大成就。

但是卸载和加载实验揭示了对理想弹-塑性模型的严重偏离;同时也发现冲击压缩下铝的强度与作用时间相关,这可能是由冲击压缩产生的剪应力状态变化引起的;实验还发现了变形和温度的不均匀状态。在加载和卸载时铝中弱激波明显表现出速度的弥散(Dispersion)。因此,需要建立冲击压缩下描述剪切状态变化的模型,需要对冲击变形过程进行就位测量(in-situ or Real-time Measurement)。为了充分详尽地预言冲击压缩过程中发生的物理现象及过程,必须发展、检验用以解释冲击波现象的基本假定和理论。例如,均匀介质中稳定冲击波后的稳定状态的假设对于介观尺度(Mesoscale)上来讲便不成立,因为从介观尺度上讲,冲击波后有非均匀性存在。变形特征与不同长度上冲击作用过程相关。另外,对铜的二维有限元模拟显示了异常的冲击波阵面:在波阵面上出现了旋转运动,且在波传播路径上存在温度分布。这使人们对分子动力学(MD)模拟今后可以揭示与以往已经接受的冲击波传播运动所不同的特征抱有希望。

洛斯阿拉莫斯实验室(LANL)理论部的 Brad Holian^[25]总结评述了从原子尺度研究凝聚介质中冲击波的成就和问题。认为在过去的 30 年中,强冲击波提供了极好的机会使得人们从原子尺度来模拟高温高压下的凝聚介质,分子动力学(MD)模拟方法在气体、固体、液体中取得了巨大的成功。而固体的情况要复杂得多,因为固体中存在缺陷,且缺陷(Defect)的固有长度比平均原子尺度要长。在强冲击波作用下,缺陷可被均匀产生;对弱激波,激波与已经存在的缺陷的作用可以非均匀地激活新的缺陷(非均匀成核的核心或位置)。在所有情况下,非平衡分子动力学模拟(Nonequilibrium MD)均针对稳定冲击波,且从碰撞时刻算起。

现今,MD 的模拟日益复杂化,包括:(1)结构相变;(2)塑性变形;(3)分子体系的化学反应。未来最大的挑战是对介观尺度(Mesoscale)物理特征的描写,如:(1)弱冲击波在晶粒尺度为微米的多晶体中的传播;(2)含有大化学反应区的复杂分子体系的爆轰。他相信从原子尺度的模拟一定会使我们更好地理解冲击波现象的基本过程,尽管这种理解有一定限度。

加州大学洛杉矶分校(UCLA)的 J. Gilman^[26]深刻分析了弹性和塑性的异同,比较了两者的相似性和物理本质的不同。指出不深入研究应力-应变曲线(包括静态及动态)已经导致了很多概念的混乱,如:弹性与塑性应变很相似,两者均以波的形式传播,两者的产生均是时间相关的,均服从一定的状态方程等等。但弹性应变在物理本质上与塑性应变完全不同。

弹性应变:储能;弹性功以应变能形式可逆地储存起来(小的非弹性响应除外);弹性形变以弹性波形式传播,由电子的松弛时间来控制。

塑性应变:耗散能量;塑性功或者迅速以热的形式通过粘性耗散掉,或者不可逆地以结构缺陷形式

而储存,然后转换成热(小的、可逆的弹性应变除外);塑性变形以位错线运动方式来传播,是率相关过程,由原子松弛时间来控制。

这两个过程在物理本质上的不同,决定了用单一的弹-塑性方程不能正确描写弹-塑性变形过程,而应增加含有位错变化的方程,进行联立求解。这将使冲击压缩波阵面结构和碰撞后的卸载行为变得更为复杂。

加拿大 McGill 大学的 John Lee^[27]评述了在强冲击波和强爆轰波传播中普遍存在的湍流现象。强冲击波在介质中传播时引起不可逆的物理和化学变化。若化学反应是放热的,则冲击波可自持。尽管冲击波和爆轰波是稳定的,能以定常速度传播,但其结构则是高度不稳定的,显示出大的流体动力学振荡——湍流。

最近的研究已发现多晶材料塑性形变时其冲击波后的粒子速度在介观尺度上有弥散现象,在高的雷诺数下,存在和流体流动中湍流相似的涡旋运动。在惰性气体中强电离冲击波和 CO₂ 气体中的离解冲击波中也发现了在非平衡冲击相变区中存在湍流密度函数。目前对不稳定结构研究得最充分的是气体炸药中的爆轰波。液体炸药(如硝基甲烷)中的爆轰波也存在不稳定结构。在一定条件下固体炸药中也存在类似的不稳定结构。

因此,强冲击波和爆轰波中的不稳定性更多地表现为一种普遍存在而非偶然的例外,其表现出的类湍流振荡特征要求我们在介观尺度和微观尺度上给以足够的深入研究。正确地定量描写冲击转变过程变得越来越重要了。尽管三维结构是不稳定的,但如果沿流动方向的平衡面足以使湍流振动衰减的话,在波传播方向上稳定的一维守恒关系律仍可应用于冲击波转变区。因此,冲击波和爆轰波一维传播的 Hugoniot 性质仍然是有效的。但应注意:守恒律不能描写波结构中极为重要的传播机制(如物理和化学过程,而这些过程对从初态到终态的转变过程有强烈影响)。

现在已经较好地建立了气体爆轰的复杂湍流结构,若气体的状态方程和气相反应化学定量已知,则复杂爆轰结构可以进行详细的数值模拟。但固体中的波结构仍是未知领域。

劳伦斯利弗莫尔实验室(LLNL)的 Craig Tarver^[28]从分子水平评述了炸药爆轰现象。对炸药分子来讲,冲击波使其压缩、加速、激活、碰撞。强冲击波激活亚稳态的分子振动键,炸药开始分解。冲击波持续足够长的时间,放能反应开始,产生了爆轰。理想爆轰是 Chapman-Jouguet(CJ)爆轰。在非均质的液体、固体炸药中会产生热点(Hot Spots),这是由于空穴的坍塌、粒子间的磨擦、剪切变形等因素。热点可以激发炸药分子产生爆轰,也会由于热扩散而使爆轰熄灭。自持的爆轰波(在所有炸药中)均表现出了复杂的三维马赫干反应(Mach Stem Interaction)结构。

俄罗斯科学院的 V. Fortov^[29]综述了冲击压缩产生的非理想等离子体的研究进展,冲击压缩产生的等离子体具有稠密、强耦合、高温等非理想特征。介绍了由炸药驱动飞片对碰来压缩多孔金属靶和固溶胶(Aerogal)样品产生的等离子体的状态方程、组成、热力学性质、输运性质、电导性和不透明度等实验研究成果和已经建立的很有效的理论模型。指出高度简并的费米型(Fermi-like)等离子体研究,及由冲击压缩下多孔金属靶的绝热膨胀来研究固-液中间相和金属—绝缘体转变是现今及今后该领域的前沿。

劳伦斯利弗莫尔实验室(LLNL)的 Jerry W. Forke^[30]回顾了凝聚介质冲击压缩国际会议的历史及历届凝聚介质冲击压缩奖获奖者,本届奖项授予了华盛顿州立大学冲击波物理研究所(Institute for Shock Physics, Washington State University)的 Y. M. Gupta 教授。

冲击压缩作为透析、理解凝聚介质和非线性物理学的重要技术和手段,在未来仍将继续发挥不可替代的作用,如下方面将是新世纪的冲击波物理研究者所面临的激动人心的挑战与机遇:

- (1) 冲击相变(特别是动力学过程);
- (2) 压缩及拉伸强度(特别是时间相关性 Time-dependent);
- (3) 凝聚介质中冲击波上升时间(Rise-time)的控制因素;

- (4) 凝聚介质中的稳定冲击波(Steady shock wave);
- (5) 弹-塑性(特别是再加载和卸载过程 Reloading/unloading);
- (6) 弱冲击波速度的弥散性(Dispersing)
- (7) 受冲击固体中波与缺陷的相互作用的数值模拟;
- (8) 冲击波作用下的非均匀变形过程的数值模拟,等等。

参考文献:

- [1] Grugdkov Y A. Shock Wave Initiation of Pentaerythritol Tetranitrate Single Crystals: Mechanism of Anisotropic Sensitivity [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [2] Son S F. The Combustion of Explosives [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [3] KuKlja M M. How Point and Line Defects Affect Detonation Properties of Energetic Solids [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [4] Bastea M. New Physics at Extreme Conditions: Outstanding Results on Shock Compressed Molecular Fluids [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [5] Moore D S, Funk D J, Gahagan J H, et al. Sub-Picosecond Laser-Driven Shocks in Metals and Energetic Materials [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [6] Hoffman D. Plasma Physics with Intense Ion Beams to Investigate Properties of Matter under the Conditions of Extreme Energy Density [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [7] Hall C. Recent Advances in Quasi-Isentropic Compression Experiments (ICE) on the Sandia Z Accelerator [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [8] Andrew NG. Shock Waves and Plasma Physics [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [9] Gong Z Z, Li X J, Jing F Q. The Possible Composition and Thermal Structure of the Earth's Lower Mantle and Core [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [10] Dremov V, Kutepov A, Petrovtsev A, et al. Equation of State and Phase Diagram of Iron [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [11] Meiron D. Coupled Eulerian-Lagrangian Simulations of Detonation Induced Shock Response in Tantalum [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [12] Germann T C. Large-Scale Molecular Dynamics Simulations of Shock-Induced Plasticity and Phase Transformations [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [13] Tang Z P. Discrete Element Modeling for Shock Processes of Heterogeneous Materials [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [14] Roessig K. Meso-Scale Mechanics of Plastic Bonded Energetic Materials [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [15] Fried L E. Electronic Excitations in Shocked Solid Nitromethane [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [16] Ravichandran G. On the Conversion of Plastic Work into Heat during High-Strain-Rate Deformation [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [17] Ortiz M. Multiscale Modeling of Shock-Loaded Materials [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [18] Walker J D. New Directions and New Challenges in Analytical Modeling of Penetration Mechanics [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.

- [19] Gupta S C. Experimental and Theoretical Investigations on Shock Wave Induced Phase Transitions [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [20] Setchel R E. Recent Progress in Understanding the Shock Response of Ferroelectric Ceramics [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [21] Sekine T. Shock-Induced Cubic Silicon Nitride and Its Properties [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [22] Benson d. Computational Modeling of the Shock Compression of Powders [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [23] Asay J. Shock Waves: Old Paradigms and New Challenges [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [24] Davison L. Traditional Analysis of Nonlinear Wave Propagation in Solids [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [25] Holian B. What Is a Shock Wave; The View from the Atomic Scale [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [26] Gilman J. Elasticity and Plasticity; Some Similarity; Much Difference [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [27] John Lee. Universal Role of Turbulence in Propagation of Strong Shock and Detonation Waves [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [28] Tarver C. What Is a Shock Wave to an Explosive Molecule? [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [29] Fortov V. Shock Compression of Condensed Non-Ideal Plasmas [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.
- [30] Forbes J. The History of the APS Shock Compression of Condensed Matter [A]. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. Atlanta, 2001.

**SHOCK WAVE PHYSICS: THE COMING CHALLENGES AND
EXCITING OPPORTUNITIES IN THE NEW CENTURY
—INTRODUCTION OF THE 12TH INTERNATIONAL
CONFERENCE OF SHOCK COMPRESSION OF
CONDENSED MATTER(SCCM-2001)**

GONG Zi-zheng^{1, 2}

*(1. Institute of High Pressure and High Temperature ,
Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031, China ;*

*2. Institute of Physics , Science College of
Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031, China)*

Abstract: The 12th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter (SCCM-2001) was introduced. Papers presented in SCCM-2001 were surveyed and the recent progresses on shock compression of condensed matter were retrospectively reviewed. The basic paradigms and the great achievements of the physics and mechanics of condensed matter at high dynamic pressure and stress were surveyed and reevaluated. The coming challenges and exciting opportunities of shock wave physics in the 21 century were prospectively reviewed.

Key words: shock wave physics; progresses; retrospect and prospect; challenges and opportunities