

计算爆炸力学及相关进展

杨桂通

太原理工大学, 太原 030024

E-mail: gtyang@tyut.edu.cn

摘要 爆炸力学是研究爆炸的发生和发展规律以及爆炸的力学效应的利用和防护的学科。爆炸力学的数学模型是一组非线性偏微分方程, 过去用理论分析的方法研究爆炸力学问题, 主要是根据问题的性质将方程简化便于求解, 但其准确性和应用范围非常有限。随着数值计算方法的不断发展和计算机处理能力的不断提高, 计算爆炸力学成为爆炸力学的新学科分支。自 20 世纪 60 年代以来, 各国的爆炸力学工作者进行了大量爆炸力学数值计算工作, 极大地推动了计算爆炸力学的发展。本文主要对国内在计算爆炸力学领域取得的相关成果进行评介。

关键词

爆炸力学
数值计算
本构关系

爆炸力学是高效毁伤武器弹药设计和工业爆炸安全的学科基础, 涉及多物质在高速、高温、高压等极端条件下的复杂物理行为, 要给出其精确解几乎是不可能的。由于爆炸问题都是在极短的时间内完成并且其本身具有强烈的毁伤作用, 因此能获得的实验数据非常有限。随着数值计算方法的不断发展和计算机处理能力的不断提高, 计算爆炸力学已成为由爆炸力学、材料动力学与计算数学、计算机技术交叉而产生的新的力学学科分支, 该学科极大地推动了爆炸力学以及武器装备的发展, 从 20 世纪 60 年代开始, 以美国为代表的西方发达国家先后开发了 100 多个与此相关的计算代码。

目前国内应用的计算爆炸力学软件及其材料模型基本上被国外商业软件所垄断, 而且这些软件里有很多敏感模块是对我国封锁的, 如 Euler 模块中多物质界面处理方法。因此, 为了改变受制于人的局面, 我们迫切需要自主知识产权的数值方法、材料模型库及软件。我国的计算爆炸力学研究工作者, 特别是北京理工大学、中国工程物理研究院、北京大学及中国科技大学等单位, 在爆炸力学数值方法、材料动态本构模型以及自主知识产权的软件开发方面取得了若干原创性的成果。下面主要对这些成果进行评介, 此外也对爆炸力学有关的一些其他研究问题进行探讨。

计算爆炸力学按其所采用的方法分, 最常用的离散化方法有两类: 一类是建立偏微分方程组(控制方程), 然后用网格覆盖时间和空间进行近似的数值解, 这类方法以有限差分方法(Finite Difference Method)为代表。另一类是先将连续的目标空间分解成有限个小单元, 组成离散化模型, 然后对离散化模型求近似的数值解, 这类方法以有限元方法(Finite Element Method)为代表。按其采用的坐标主要分为 Euler 方法和 Lagrange 方法, 后来又出现了两者相混合的方法, 如 ALE(Arbitrary Lagrange Euler)方法, CLE(Coupled Lagrange Euler)等方法。爆炸力学问题往往涉及到材料的大变形, 对此类问题 Euler 方法有很大优势, 但 Euler 方法对混合网格的处理比较困难, 当系统中含有多种介质时, 会使物质界面逐渐模糊, 在界面两侧形成一个混合介质的过渡区。如何确定界面的位置, 如何计算混合网格的物理量, 一直是 Euler 程序所面临解决的问题。传统的物质界面处理方法有 PIC(质点网格法)和 VOF(流体体积法)型界面处理方法。Youngs 方法通过界面附近网格流体的细微输运, 几何地给出界面的位置变化, 成为现在 VOF 型方法的主流。传统的 Youngs 界面重构技术只确定了混合网格中物质界面的位置, 没有讨论如何确定两种物质的输运次序和输运量, 而这正是 Euler 方法的难题之一。文献[1]提出了一种改进的 Youngs

方法,增加了混合网格中物质输运次序的判据,较为精确地处理混合网格的界面及物质输运问题.而文献[2]采用对每种物质用一串首尾相接的线段链来逼近物质表面的曲线,每条线段的端点均定义在网格线上,显示材料的分界面由 Lagrange 型的示踪点跟踪物质变为沿网格线的示踪点跟踪物质.文献[3]提出了一种 VOF 与 PIC 耦合的多物质界面处理方法,该算法对于较关心的重点分析区域,采用 PIC 方法加入较多的质点进行精确计算,而对于其他区域采用连续输运计算,很好地跟踪了侵彻穿甲过程中的材料变形过程,其优点是既保证了计算精度又提高了计算效率. Level Set 界面处理方法在最近十几年得到广泛的应用与推广,文献[4]采用 Level Set 方法,结合 ghost fluid method 追踪运动界面,从对二维激波作用气泡、内爆和速度场等问题数值模拟结果来看,该方法极大地改进了原 Level Set 方法的界面处理能力,使得界面图像更加清晰.文献[5]采用快速杂交粒子 Level Set 方法,该方法将无质量的 Lagrange 粒子引入 Level Set 方法中,把基于 Lagrange 描述的粒子和基于 Euler 的 Level Set 方法相结合,并采用改进的 CE/SE 算法来离散控制方程,结合常用的化学反应模型,综合后的算法实现了多物质一体化计算,具有精度高、适用范围广及兼容性强等优点,有效地模拟了激波楔面反射、爆炸焊接及气液两项爆轰等问题.采用高精度格式来模拟爆炸问题也是当前研究的热点之一.文献[6]采用高阶的 WENO 格式和两阶段的化学反应模型,通过数值模拟与实验相结合的方法系统地研究了封闭管道内障碍物对煤气的爆炸火焰的传播及其对爆炸超压的影响规律.文献[7,8]空间上采用五阶的 WENO 格式,时间上采用三阶 TVD Runge-Kutta 对气相爆轰问题进行了深入的数值研究.同时,对湍流的数值模拟一直是计算爆炸力学的难题之一,文献[9]利用 Smagorinsky 亚格子湍流模型,采用大涡数值模拟方法对 LANL 激波加载 SF₆ 气柱的激波管实验进行了数值模拟,数值结果表明该方法在气柱宽度及高度上更接近实验结果.

然而现实中的爆炸力学问题都是三维的,仅有少部分问题可用二维模型进行简化,例如对装甲的侵彻问题,二维模型只能计算垂直侵彻问题,而事实上绝大多数情况下是斜侵彻,属于三维模型,况且把实际问题简化为二维问题,计算结果与实际情况有

一定的差距,因此要想真实地模拟爆炸过程,开展三维计算爆炸力学的研究是十分必要的.相对于二维问题的研究,三维问题的研究要困难得多,其研究深度和水平与二维相比还有一定的差距.首先,三维问题的几何拓扑情况复杂,传统的二维界面处理方法在理论上都可以向三维多物质扩展,但真正操作起来并不简单.文献[10]基于模糊数学应用理论提出一种“模糊界面”的处理方法,改变了传统的界面处理方法的视角.该方法的核心思想是在混合网格内不再精确地确定物质界面,而是根据模糊权重确定输运次序及输运量,具有逻辑简单、计算量小等优点.其次,三维问题的网格数多,计算规模大,受制于单机内存及处理器主频限制,当前的单处理器性能不可能满足三维计算的需求,因此在多机上开展计算爆炸力学并行计算研究也是十分必要的.文献[11]基于域分解方法,采用动态并行策略,实现计算域的自适应扩充与负载均衡调整,扩大了计算规模,加快了计算速度.

材料本构模型是计算爆炸力学的关键问题与难点,我们必须全面了解材料的动态力学性能并提炼出适用于数值计算的本构关系.任会兰等人^[12]对陶瓷做了经典的强冲击压缩下的声速测量实验,获得了陶瓷试件在不同冲击速度下自由面速度历史、Hugoniot 弹性极限和应力时间曲线.这些物理量的定量测定对数值模拟有重要意义,结合自由面历史和应力时间关系来拟合氧化铝陶瓷 Hugoniot 曲线,应用于数值模拟程序中陶瓷本构模型的流体弹塑性本构关系.基于可靠的实验参数,他们利用非线性动力学有限元程序模拟了陶瓷靶在高速冲击下的动态破坏过程,得到的应力波形曲线与实验曲线吻合得很好,印证了实验所确定的模型参数正确可靠.此外,他们还根据陶瓷靶受冲击过程中的破坏形态,分析了陶瓷靶的微裂纹破坏机理. Ning 等人^[13]建立了一个基于细观损伤力学的损伤模型,该模型考虑微裂纹成核与生长过程,从模型验证可知,微裂纹成核参数与初始裂纹尺寸对陶瓷材料的动态断裂强度有很大影响.

为了描述混凝土在受冲击载荷时的复杂力学行为,宁建国等人^[14]基于连续损伤力学理论、细观力学、黏塑性 Perzyna 本构方程,建立了一个损伤与塑性耦合本构模型.该模型假设混凝土是宏观均匀连续的,细观上含有大量的微裂纹和微孔洞.在受冲击

载荷下,微裂纹经历成核、生长和汇合的损伤演化过程,而微孔洞的塌陷造成了混凝土的压实.然而,该模型不考虑微裂纹和微孔洞之间的相互作用.刘海峰等人^[15]从细观力学着手,将混凝土材料看成混凝土无损基体和三组相互正交的微裂纹组成的四相复合材料.基于 Mori-Tanaka 理论和 Eshelby 等效夹杂理论,建立了混凝土材料在冲击载荷作用下的动态本构模型,并给出了微裂纹损伤演化方程.采用细观力学方法对混凝土材料的宏观性能进行研究,其优点在于能够体现出材料内部细微结构(如微裂纹和微空洞)的演化,把握住损伤的几何结构和物理意义.在研究钢筋混凝土的抗冲击力学响应中, Liu 等人^[16]采用一级氢气炮对钢筋混凝土进行高应变率冲击试验,应变率高达 $1 \times 10^4/s$,压力最高达到 1.5 GPa,利用拉氏分析技术获得了钢筋混凝土在不同撞击速度下的应力-应变曲线.通过分析,他们指出钢筋混凝土具有明显的非线性和率敏感性. Song 等人^[17]采用动量守恒定理,建立了刚性弹体侵彻贯穿加筋靶板的力学模型,该模型能够很好地预测弹体贯穿加筋靶板后的剩余速度.他们利用模型分析指出,加筋靶板中加强筋的尺寸对剩余速度有较大影响.

随着高放核废物地下处置库建设、热地资源开发利用、节能建筑以及二氧化碳地下封存等一批现代化岩土工程的发展,非饱和土的温度对基本力学特性影响越来越引起人们的注意.蔡国庆等人^[18,19]基于多相孔隙介质理论,对非饱和土广义有效应力原理、变形特性和本构关系进行了研究,并考虑气相和温度的影响,提出了相应条件下的土体本构模型,已有实验结果验证了模型的合理性.以上对材料动态本构关系的研究,都是计算爆炸力学的重要基础.由于材料的多样性以及新材料不断出现(如含能材料^[20]和泡沫金属^[21]等),研究相应材料的动态本构关系成为计算爆炸力学的重要领域.

近些年来,爆炸测试技术、材料合成和流固耦合等与爆炸冲击问题相关的领域也取得了长足的发展,不仅成功解决了实际问题,也为计算爆炸力学提供可靠的参考依据.

从气动光学来讲,爆炸的真实流场是一种变折射射流场,平行光束在这样的流场中传输时,会偏离其原来的传播方向,同时产生波前畸变.根据 Malus 定律,若能测得平行光束透过流场后的偏折角,就可采

用波前重构算法计算波前畸变的空分布.田立丰等人^[22]基于纹影模式的 BOS 系统,构建了波前畸变的空梯度和背景图像位移的定量关系,并用 Southwell 波前重构算法,开发了一种测量气动光学波前畸变的新方法——基于 BOS 的波前测量技术.该技术能够对波前的瞬态分布进行定量测量,具有高时间分辨率、高时间相关分辨率和较高的空间分辨率等优点.针对现有的气动光学畸变测量方法存在时空分辨率不高、受环境和积分效应影响等问题,易仕和^[23,24]等人开发了一种测量超声速流场精细结构的流动显式技术,并提出了一种新的超声速流场气动光学畸变测量方法,借助光线追迹法测量超声速流场某一界面对应的气动光学畸变.该方法具有很高的时空分辨率,可避免传统方法的积分效应,对所关心的局部流场进行研究,并且可避免超声速风洞实验段壁面边界层和环境扰动等因素的影响.

超声速飞行器的湍流问题目前仍没有得到很好的解答.超声速飞行器飞行中,燃烧室内部及飞行器周围流场结构复杂,存在激波与边界层相互作用和激波之间相互作用等复杂的物理现象.针对高速可压缩湍流流动,韩省思等人^[25]在已有的压力膨胀项和可压缩耗散率的可压缩性修正湍流模型基础上,引入激波不稳定效应修正,发展了一个新的可压缩性修正 $k-\epsilon$ 湍流模型.该模型能够抑制过大的湍动能增长,对复杂横侧射流干扰流场和超声速混合层流动都非常有效,并且改善了对强分离流动的预测结果,流体分离越强,修正模型效果越明显.

流固耦合动力学现象在工程应用中越来越受到人们的重视,其同时涉及到流体力学和固体力学,既具有复杂性又具有普遍性.在研究柔性体在流体中的耦合振动中,王思莹等人^[26]提出了一种数值方法,该方法采用二维面元计算流体作用力,用模态叠加法求解欧拉梁的运动控制方程,通过迭代来求解流固耦合问题.此方法不仅对模拟单个柔性梁的稳定边界和流体诱发有效,而且还可以模拟不同方式排列的多个柔性体在流体中的耦合运动.

由于金刚石是一种集多种优异性能于一体的多功能超硬材料,众多学者对合成金刚石进行了研究. Xiao 等人^[27]通过将一定比例的硼粉加入到石墨-KOV 触媒体系中利用温度梯度法成功合成出含硼 Ib 型宝石级金刚石单晶,经过观察指出,当更多的硼原子进

入金刚石晶格中, 晶体颜色将变黑, 晶体缺陷增多, 晶体的氮含量也会下降. 这些结果将会有助于促进含硼 Ib 型宝石级金刚石大单晶的技术开发和研究.

计算爆炸力学是一门新型的交叉学科, 正处于

发展和不断深化认识的阶段, 积极推动计算爆炸力学的发展是国防建设和武器弹药研制设计的迫切需求, 开发出我国自主知识产权的大规模数字化软件, 是未来计算爆炸力学工作者面临的巨大挑战.

参考文献

- 1 Ma T B, Wang C, Ning J G. Multi-material eulerian formulations and hydrocode for the simulation of explosions. *Comput Model Eng Sci*, 2008, 33: 155–178
- 2 Wang C, Ning J G, Ma T B. Numerical simulation of detonation and multi-material interface tracking. *CMC Comput Mater Cont*, 2011, 22: 73–95
- 3 马天宝, 王静, 宁建国. 一种 VOF 与 PIC 耦合多物质界面处理算法及其在侵彻问题中的应用. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1185–1194
- 4 吴开腾, 郝莉, 王成, 等. Euler 方法中的 Level Set 界面处理及其应用研究. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1204–1213
- 5 王刚, 王景焘, 刘凯欣. SUPER CE/SE 的新算法及其在爆炸力学中的应用. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1214–1220
- 6 王成, 马天宝, 卢捷. 管道内障碍物扰动对煤气爆炸特性影响的数值模拟. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1248–1257
- 7 Wang C, Ning J G, Ma T B. Numerical simulation for explosion wave propagation of combustible mixture gas. *J Central South Univ Tech*, 2008, 15: 361–367
- 8 Wang C, Ma T B, Ye T. Propagation mechanism of non-steady gaseous detonation. *Int J Nonlin Sci Numer Simul*, 2008, 9: 157–166
- 9 李平, 柏幼松, 王涛, 等. 激波作用下气柱不稳定性发展诱发湍流大涡数值模拟. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1241–1247
- 10 宁建国, 陈龙伟. Euler 方法中的模糊界面处理. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2004, 34: 776–792
- 11 Fei G L, Ma T B, Hao L. Large-scale high performance computation on 3D explosion and shock problems. *Appl Math Mech*, 2011, 32: 375–382
- 12 任会兰, 树学锋, 李平. 强冲击载荷下氧化铝陶瓷破坏特性的数值模拟及实验研究. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1221–1230
- 13 Ning J G, Ren H L, Li P. Mechanical behaviors and damage constitutive model of ceramics under shock compression. *Acta Mech Sin*, 2008, 24: 305–315
- 14 宁建国, 刘海峰, 商霖. 强冲击荷载作用下混凝土材料动态力学特性及本构模型. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38: 759–772
- 15 刘海峰, 刘海燕, 宋卫东. 混凝土材料冲击破坏特性. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1231–1240
- 16 Liu H F, Ning J G. Mechanical behavior of reinforced concrete subjected to impact loading. *Mech Mater*, 2009, 41: 1298–1308
- 17 Song W D, Ning J G, Wang J. Normal impact of truncated oval-nosed projectiles on stiffened plates. *Int J Impact Eng*, 2008, 35: 1022–1034
- 18 刘艳, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 考虑气相硬化影响的非饱和土本构模型. *科学通报*, 2010, 55: 2635–2642
- 19 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳, 等. 考虑温度影响的非饱和土变形特性. *科学通报*, 2011, 56: 1487–1496
- 20 吴艳青, 黄风雷. 动高压下 HMX 各向异性单晶及界面的热力学本构模型. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1195–1203
- 21 王志华, 张银钊, 任会兰, 等. 冲击波在泡沫金属材料中传播特性的研究. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39: 1258–1267
- 22 田立丰, 易仕和, 赵玉新, 等. 基于 BOS 的气动光学波前测量技术研究及其应用. *科学通报*, 2011, 56: 1515–1521
- 23 He L, Yi S H, Zhao Y X, et al. Visualization of coherent structures in a supersonic flat-plate boundary layer. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56: 489–494
- 24 易仕和, 田立丰, 赵玉新, 等. 基于 NPLS 技术的气动光学畸变测量方法与应用. *科学通报*, 2010, 55: 2283–2288
- 25 韩省思, 叶桃红, 朱旻明, 等. 激波不稳定性效应的 $k-\varepsilon$ 可压缩修正湍流模型. *科学通报*, 2008, 53: 2722–2729
- 26 王思莹, 尹协振. 模拟运动流体中柔性体耦合振动的数值方法. *科学通报*, 2010, 55: 2894–2903
- 27 Xiao H Y, Ma H A, Tian Y, et al. Effects of carbon diffusing field in alloy solvent on the growth of tower-shape diamond single crystal. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55: 7–10