

关于计算爆炸力学的进展与现状¹⁾

宁建国^{*,2)} 王 猛^{*,†}

^{*}(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

[†](安徽理工大学弹药工程与爆炸技术专业教研室, 安徽淮南 232001)



宁建国, 博士, 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室教授, 教育部长江学者奖励计划特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, 新世纪百千万人才工程国家级人选入选者, 国务院“政府特殊津贴”获得者。1963年3月生于山西省太原市, 1985年毕业于兰州大学数学力学系, 1994年北京理工大学博士后出站到北京理工大学任教至今。主要研究领域为爆炸力学、计算力学与弹药工程。

任中国兵工学会应用力学专业委员会副主任委员, 中国力学学会计算力学专业委员会委员, 中国力学学会理性力学和力学中的数学方法专业委员会委员, 中国力学学会爆炸力学专业委员会计算爆炸力学专业组组长, 中国力学学会固体力学专业委员会塑性力学专业组组长; 《计算力学学报》、《爆炸与冲击》杂志编委等。第十、十二届全国自然科学基金委员会数理学部评审组专家。

出版学术专著或主编文集有《方方面面话爆炸》, 《爆炸与冲击动力学》, 《杨桂通八十华诞文集》, 《固体力学及相关进展》, 《高等板壳理论》, 《计算爆炸力学理论、方法及工程应用》。在国内外学术刊物上发表 SCI 和 EI 收录论文 100 余篇。

密切结合国家安全需求, 深入细致地开展了燃烧与爆轰、计算爆炸力学、结构动力学响应以及弹药工程等领域的研究工作, 取得了一系列具有创新的研究成果, 承担并完成多项国家自然科学基金课题、973 课题、国防预研课题及企事业单位课题, 曾获得国家科技进步二等奖一项, 省部级科技进步一、二等奖各一项, 申请并授权多项国防发明专利及计算机软件著作权登记。

摘要 爆炸问题由于其强烈的非线性, 绝大多数情况下不可能给出精确解, 并且爆炸在极短的时间内完成强烈的物理过程, 能通过实验获得的数据也有限。爆炸力学数值模拟及相关研究领域的工作极大地推动了爆炸力学学科以及武器装备的发展, 本文主要对爆炸力学数值方法、材料动态本构模型以及相关工程应用进行评述。

关键词 爆炸力学, 数值方法, 动态本构, 工程应用

中图分类号: O302 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2012)01-010-11

REVIEW ON COMPUTATIONAL EXPLOSION MECHANICS¹⁾

NING Jianguo^{*,2)} WANG Meng^{*,†}

^{*}(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[†](Section of Ammo Engineering and Blasting Technology, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China)

Abstract Exact solution of explosion problem cannot be achieved in most cases because of its strong non-linearity. And data gained from experiments are very limited because explosion is a strong physical course

2011-09-15 收到第 1 稿, 2011-11-25 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金重点资助项目 (11032002)。

2) E-mail: jgning@bit.edu.cn

finished in short duration. Simulation of explosion mechanics and related research has greatly promoted rapid development of both explosion mechanics and weaponry. This paper mainly reviews on explosion mechanics, dynamic constitutive model of material and related engineering applications.

Key words explosion mechanics, numerical method, dynamic constitutive model, engineering application

爆炸力学不仅在国防领域有重要作用，在民用领域，爆炸与安全技术也几乎涉及所有工业部门。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，涉及到多物质在高速、高温、高压等极端条件下的复杂物理行为，要给出其精确解是不可能的。由于爆炸都是在极短的时间内完成并具有强烈的毁伤作用，因此能获得的实验数据有限。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，爆炸力学数值模拟及相关研究领域的工作极大地推动了爆炸力学学科以及武器装备的发展。

1 爆炸力学数值方法

20 世纪 60 年代以来以美国 Los Alamos 实验室为代表，进行了大量的爆炸力学数值计算工作。现在由于计算机和数值计算的巨大解题能力，可以对很难求解的问题得到数值解，并通过改变参数的试算并把结果与实际对照使一些爆炸的模型逐渐清楚起来。进而，数值计算还可以发现一些新的爆炸现象。

计算爆炸力学以计算机为工具，探索爆炸的力学规律，加工实验数据，提供了解决爆炸力学问题的新方法^[1]。爆炸力学研究的问题原则上用双曲型方程组描述，这些方程属于多维不定常问题。它们比其他流体动力学与结构动力学问题要复杂得多，诸如材料大变形、高温高压高应变率下材料参数、材料破坏、化学反应、冲击相变、边界滑移、强间断等特殊要求。

爆炸力学计算方法按其所采用的离散化方式常分为两类：一类是先建立偏微分控制方程组，然后用网格覆盖时间和空间，用“以直代曲”的思想求得近似数值解，这类方法以有限差分方法 (FDM) 为代表。另一类是先将连续的目标空间分解成离散的有限个小单元，然后对离散化模型求近似数值解，这类方法以有限元 (FEM) 为代表。爆炸力学计算方法按其采用的坐标主要分为 Lagrange 方法和 Euler 方法，后来又出现了两者相混合的方法，如 ALE, CLE 等方法。近年来，TVD, NND, ENO, WENO 等为代表的高分辨率算法，光滑粒子流体动力学方法 (SPH)、无单元 Galerkin 方法等为代表的无网格方法，CE/SE 方法为代表的新型高精度算法，以及离散元、流形

元、边界元等方法的出现^[2]，极大地推动了计算爆炸力学的发展。下面就爆炸力学计算方法的主要趋势做简要评述。

1.1 Lagrange 方法

Lagrange 方法是将计算网格以随体坐标的形式固定在物体上，随物体一起运动或变形，如此处理自由面和物质内界面非常直观自然。同时由于一个网格或单元始终对应一块物质团，即网格点与物质点在物体的变形过程中始终保持重合。因此物质点与网格点之间不存在相对运动，这样就能准确地描述物体的移动界面，并可跟踪质点的运动轨迹，得到较精细的运动图像。此种情形下方程中无对流项，形式相对简单，大大简化了控制方程的求解过程，容易建立高精度的稳定格式。在对爆炸冲击动力学问题中的结构动力学响应过程进行数值模拟时，Lagrange 动力学有限元程序在处理结构破坏而导致的自由面产生、结构间复杂的相互作用方面有较强的优势。

美国 Lawrence Livermore 国家实验室主持开发完成的爆炸冲击动力学显式有限元程序 DYNA (图 1 为 DYNA3D 程序算例) 是 Lagrange 程序的典型代表。DYNA 特别适合求解各种结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等高度非线性瞬态动力学问题，在工程界得到广泛应用并被认为是最佳的显式分析软件包，与实验结果的无数次对比证实了其计算的可靠性和准确性。

DYNA3D 程序使用单点高斯积分，引入沙漏黏性控制零能模态，并应用中心差分法进行时间积分。其接触-撞击算法可以处理材料交界面的缝隙和滑动，提供的多种材料模型和状态方程，以及功能齐

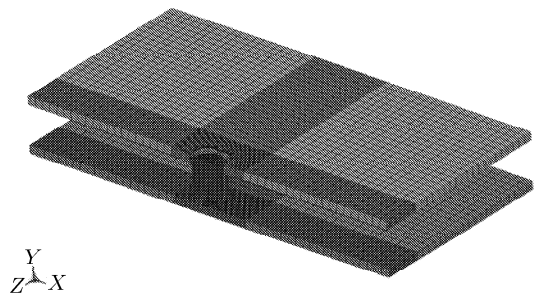


图 1 DYNA3D 程序计算弹丸侵彻双层金属靶

全的输入输出处理模块。

动力有限元程序多是用来计算高应变率和大塑性变形问题,在这种情况下材料的本构关系尚不十分清楚,一般采用静态下的弹塑性关系,只是根据压力、温度、有效塑性应变及应变率对屈服强度进行调整,并且在计算过程中一旦发现应力状态超出屈服面范围,则按比例缩小各应力偏量,以满足应力状态在屈服面上。

一般认为 Lagrange 方法有比 Euler 方法计算速度快、精度高、界面清楚等优点,但它也有严重的缺点,那就是比较难以处理大变形的网格畸变问题,这是由 Lagrange 方法自身特点所决定的。畸变严重的空间单元可能变得很长很窄,大边长会引起计算误差的增加,小边长又会引起时间步长的减小,计算机时间消耗增加,累计误差会显著增加。更有甚者当物质发生大变形时,相邻 Lagrange 网格彼此相交或重叠,导致计算无法进行下去。在计算中必须时刻检查单元畸变情况,随时采取再分区或侵蚀算法进行处理。

1.2 Euler 方法

爆炸力学问题往往涉及到材料的大变形, Euler 坐标是固定的空间坐标系, Euler 网格在计算中不发生变形,物质通过网格边界流进流出,物质的大变形不直接影响计算的时间步长。因此, Euler 方法善于处理大变形问题。在对爆炸流场与结构相互作用的流固耦合问题进行数值模拟时,可以通过流体弹塑性模型实现对流场和固体结构的统一描述,流体和固体之间的相互作用可以通过同一计算区域中不同物质界面间的识别及处理来实现。对流体弹塑性方程组进行的有限差分数值求解,已经发展出了不同类型的计算程序,其中具有代表性的是北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开发的 MMIC2D/3D 程序(图 2 为 MMIC3D 程序算例)。

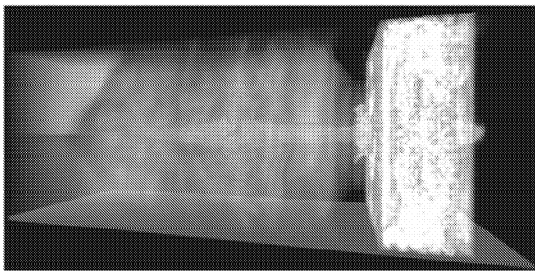


图 2 MMIC3D 程序计算模拟射流对靶板的侵彻

但是,采用空间坐标系难于跟踪物质的变形,在计算过程中会经常发生在同一网格中多物质混合

的问题,如果处理不好,会产生下列问题:(1)对分界面产生严重失实的描述;(2)在分界面上易产生非物理性的物质扩散;(3)在分界面物质网格上,容易产生数值振荡,严重时常常导致计算的终止。因此,如何确定物质界面的位置,如何计算混合网格的力学量,以及如何计算混合网格通过边界的输运量,一直是 Euler 型程序所面临的主要困难。

通常所说的多物质 Euler 方法基本上指的是两种物质,但实际情况是,往往遇到 3 种或 3 种以上物质同时存在于计算域中。准确跟踪多种物质之间的界面是 Euler 型程序计算各种物质输运量的基础。在实际问题求解中通常将弹塑性问题包括在内,即在原有的含有两种介质(比如爆轰产物、空气)的爆炸场中加入具有弹塑性性质的第 3 种甚至第 4 种物质(如混凝土、金属等),即所谓的气体和固体耦合问题的数值模拟。由于气体运动的复杂性,使其比一般流固耦合问题的求解更加困难。因此研究多物质 Euler 方法对于许多爆炸过程的数值模拟具有重要的实际价值,尤其是对于武器弹药的设计、研制以及威力评价更是意义重大。

对于 Euler 型数值方法中的物质界面处理,前人在该领域提出了很多方法,应用比较广泛的方法主要分为:格子类方法、VOF 方法和用函数描述界面的方法等几大类^[3]。

20 世纪五六十年代,界面处理的数值模拟方法有了较大的发展,其中美国 Los Alamos 实验室的科学家们提出和发展的格子类方法,在工程实践中发挥了巨大的作用。著名的格子类方法有 PIC、MAC、FLIC 等方法,在 20 世纪 60 年代,凭借 Los Alamos 得天独厚的软硬件条件,在武器数值模拟方面取得了突出的成果。在此期间, Hirt 和 Nichols 在 J.C.P 杂志上首先发表了著名的 VOF 论文,对于运动界面追踪问题的数值模拟研究做出了开创性的贡献。后来又有人提出 VOF 与 PIC 耦合的多物质界面处理方法,该算法对于所关心的重点计算区域,采用 PIC 方法加入较多的物质点进行精确计算,而对于其他区域采用连续输运计算,既保证了计算精度又提高了计算效率^[2]。如果说 20 世纪 90 年代以前是 VOF 方法的年代,90 年代以后则可以说是 Level Set 方法的年代。

20 世纪 80 年代末, Osher 逐渐发展了 Level Set 方法。此后,科研工作者采用 Level Set 方法,结合 Ghost 流体方法追踪运动界面,对二维激波作用水中气泡、内爆和两相流等问题进行了数值模拟。

从结果来看,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.进而有学者在此基础上采用快速杂交粒子 Level Set 方法,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、爆炸焊接及气液两相爆轰等问题^[2].

高精度格式计算模拟爆炸问题也是当前研究的热点之一,有关科研工作者采用高阶的 WENO 格式和两阶段化学反应模型,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传播及其对爆炸超压的影响规律.

对爆炸场中湍流的数值模拟一直是计算爆炸力学的另一难题,中国工程物理研究院采用大涡数值模拟方法对实验进行了对比数值模拟,取得了一些有价值的计算结果.

由于纯粹的 Lagrange 方法和 Euler 方法都有各自的优缺点,针对具体问题,现已提出了各种混合方法.事实上,著名的 PIC 方法即是混合方法.而 Lagrange 方法经过重分网格后,严格来说已经不再是纯粹的 Lagrange 方法了.混合方法一般针对具体问题提出,对处理特殊问题很有效,但移植过来处理其他问题往往不如纯粹的 Lagrange 方法和 Euler 方法有效.混合的方式主要有:(1)空间上的混合.如 CEL 编码,在变形较大的区域用 Euler 方法,另一些区域则用 Lagrange 方法.(2)时间上的混合.如 HOIL 在模拟聚能射流过程中,初期药型罩的畸变较小,用 Lagrange 编码 HEMP 计算;后期聚能射流形成畸变较大,用 Euler 编码 SOIL 来计算.(3)任意 Lagrange-Euler 方法(即 ALE 方法).ALE 是一种高度结合的 Lagrange-Euler 方法,像普通 Lagrange 方法一样,让网格嵌在流体内和流体一样运动.因为它有一套连续地重分网格的机制,所以比纯粹的 Lagrange 方法更善于处理较大畸变的流体运动,同时又能比纯粹的 Euler 方法提供更细致的结果.这一方法可望成为未来解决一般爆炸与冲击问题的通用方法.

对无网格方法的研究源于 20 世纪 70 年代对非规则网格有限差分方法的研究. Lucyt 和 Gingold 等分别提出光滑质点流体动力学方法 (SPH). Nayroles 等将移动最小二乘近似引入 Galerkin 方法中,提出离散元方法 (DEM). Belytschko 等对 DEM 进行改进,在计算形函数导数时保留被 Nayroles 忽略的所有项,并利用 Lagrange 乘子方法引入本质边界条件,提出无单元 Galerkin 方法 (EFG),给出了误差估

计,并成功应用于动态冲击计算分析,开启了无网格方法的研究时代^[4].在此之后,有限点方法、重构核点方法、无网格配点方法、HP 云团方法等则以自身的优势在计算爆炸力学领域中占有一席之地.

1.3 大规模计算

在进入 21 世纪的前几十年间,高端计算能力的发展主要是由 CPU 时钟频率的持续快速提高来支撑的,但对于超级计算机来说,当前其硬件性能的提升已经遇到了技术上的瓶颈.现实情况推动高性能计算系统体系结构,从传统的几何级数增加时钟频率向几何级数增加核心数目(多核)变换,这也必将导致今后大规模计算系统具有惊人数量级的并行度.服务器集群作为分布式存储并行机一种,因其高可靠性及高性价比在高性能计算领域应用越来越普遍,大部分科学研究的模型计算是在服务器集群上完成的.

对三维爆炸与冲击问题进行数值模拟,如果网格数过少,计算规模过小,则计算精度不够,一些重要的局部特征无法显示,达不到工程需求;同时为刻画大变形、追踪每一瞬间物质性状的变化以及算法要求的稳定性、收敛性都需要细化迭代时间步长.计算爆炸问题的需求已经远远超出了单机运算能力,迫切要求计算爆炸工作者进行并行计算方面的研究,开展大规模数值计算的工作.

并行算法设计过程中,必须首先发现算法的可并行性,进而根据并行性把计算和数据进行分区,分区主要有域分解和功能分解两种分区模式^[5].目前并行计算机的基本存储方式主要有共享式存储与分布式存储两种.针对共享式存储的并行算法相对简单,主要的并行模式有 OpenMP 和 GPU 技术.消息传递接口 (MPI) 是消息传递函数库的标准规范,是目前广泛使用的并行编程工具, MPI 基于分布式存储,但同样适应于共享存储,具有移植性好、功能强大、效率高等多种优点. MPI 主要采用在 C 语言或 Fortran 语言中增加进程间的消息传递函数,来完成大多数的并行程序设计.

当前,许多动力计算软件均已实现了并行化计算,如 DYNA3D 和 MMIC3D(如图 3 所示)等,计算规模达到几千万或几亿个网格,基本满足工程需求.但是,这并不能说明爆炸问题的计算已经解决了,一个数学物理问题或工程实际问题的求解,其核心是算法问题,并行计算只是实现算法的有效手段之一,更何况并行计算也会带来许多新的问题,如计算可靠性,计算误差以及计算成本等.

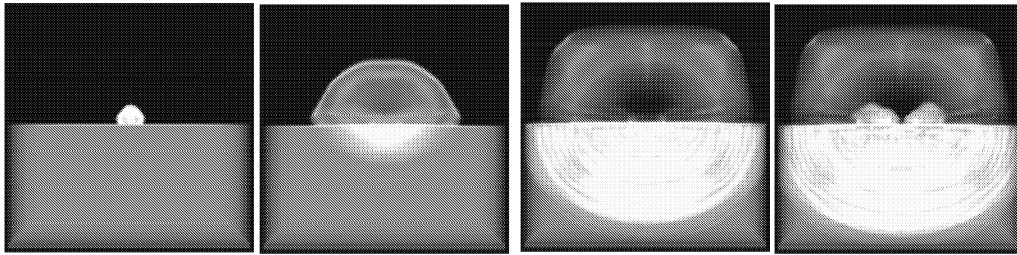


图 3 基于 MPI 并行程序计算裸露药包触地爆炸在服务器集群上运行结果 (6.4 千万网格)

2 材料动态本构关系

在国防与生产建设中, 结构和材料除了承受正常设计载荷外, 往往还要承受各种变化急剧的强动载荷, 如爆炸、冲击和撞击等. 在冲击载荷作用下, 材料通常呈现出明显的塑性变形及破坏行为, 发生几何大变形的同时还伴随着损伤的产生和发展过程^[6]. 材料中的应力和应变又常常以波的形式传播, 表现出极强的瞬态行为特征. 冲击载荷作用下材料本构关系的研究不仅具有理论价值, 而且是工程设计和计算分析的基础.

近年来, 一些典型材料被广泛应用于武器装备与防护工程的研制之中, 如混凝土材料、钨合金材料、陶瓷材料等. 研究这些材料在强动载荷下的力学行为具有十分重要的理论意义和实际应用价值.

2.1 混凝土材料

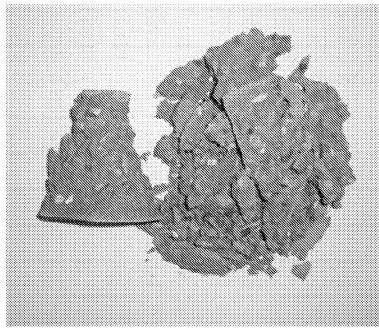
混凝土是民用、工业建筑以及军事和安全防护工程中最常用的重要工程材料. 混凝土结构在其工作过程中除了承受正常的设计载荷 (准静态载荷和蠕变载荷) 外, 在特定环境下还有承受爆炸和冲击等强动载荷, 其中包括: 大型混凝土坝体、混凝土桥梁、混凝土楼房、核反应堆外壳等经受地震和爆炸冲击, 以及一些战争中被重点打击的军事目标, 如指挥所、机场跑道、飞机库、控制通讯掩蔽处、潜艇修藏坞等遭受导弹袭击.

一般认为, 在动态载荷下的混凝土材料力学特性显著区别于其准静态情况, 主要影响因素是材料的应变率敏感效应^[7]. 当前学者们提出了引起混凝土材料动态力学特性变化的几种可能的解释. 其物理机制的解释可归结为黏性效应、裂纹演化和惯性效应. 除了材料应变率、敏感效应和静水压力相关特性以及裂纹扩展导致的各向异性特征外, 还有许多诸如拉压不对称性、剪胀与体积塑性、应变软化、加卸载的非线性滞回特性等. 如何从材料本构理论出发, 描述混凝土材料的动态响应特性, 进而发展相

应的本构模型是一项复杂而困难的工作. 日前对混凝土本构模型的研究主要包括动态应力经验公式、动态本构修正模型和动态本构分析模型等.

国内科研工作者在最近兴起的裂纹成核、扩展和贯穿的断裂理论和统计细观理论, 以及微空洞演化相关 Perzyna 黏塑性本构方程的基础上, 构建了混凝土材料含损伤的动态本构模型. 结合混凝土材料在冲击载荷作用下的破坏机理, 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. 对于钢筋混凝土材料, 虽然在其局部呈现非均匀和各项异性的变形特征, 但在强动载荷条件下, 具有宏观均匀性和宏观各项同性的变形特点, 因此可用均匀化方法研究爆炸作用下的材料动态行为, 即理想情况下钢筋混凝土本构关系可由混凝土材料与增强钢筋材料平均特性来确定, 在实验基础上得到钢筋混凝土的动态本构关系^[8](图 4 为混凝土的冲击破坏实验).

在已有研究成果的基础上, 混凝土材料的动态特性研究可从以下几个方面做进一步深入研究: (1) 根据粗骨料尺寸、含量及试件尺寸等对混凝土材料动态特性的影响, 充分考虑尺寸效应对混凝土材料力学性能的影响. (2) 结合混凝土内部微损伤的产生、扩展和汇合, 建立含有能够反映混凝土材料尺寸效应及微损伤因素的本构模型, 给出材料内部微细结构演化规律及其与宏观力学特性之间的关系, 构造出一个既具有物理意义又便于工程应用的本构模型是今后研究的重点方向. (3) 混凝土材料表现出的不连续性、非均质性、各向异性以及时空相关性等, 如何在本构模型中很好地表述这些材料特性还需要从宏观、细观相结合的角度深入研究. (4) 基于纳观、介观、细观和宏观相结合的多尺度数值计算已经成为研究的主流, 如何借助这一强有力的工具推动混凝土材料动态冲击问题的研究, 将是今后深入研究的主要方向之一.



(a) 混凝土试件



(b) 钢筋混凝土试件

图 4 混凝土和钢筋混凝土试件的冲击破坏实验

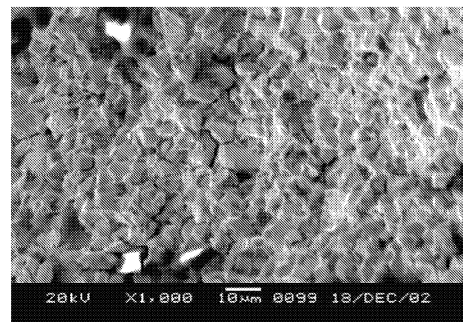
2.2 钨合金材料

合金是由两种或两种以上的金属与非金属经一定方法所合成的具有金属特性的物质。合金的许多性能优于纯金属，故在应用材料中大多使用合金。合金材料中的钨合金具有高强度、高密度、高熔点、优良导热性、小热膨胀系数、抗腐蚀等优点，而得到广泛的重视。特别是在军事工业中，钨合金的优良特性使其成为目前对付装甲目标的主要动能武器用弹芯材料。

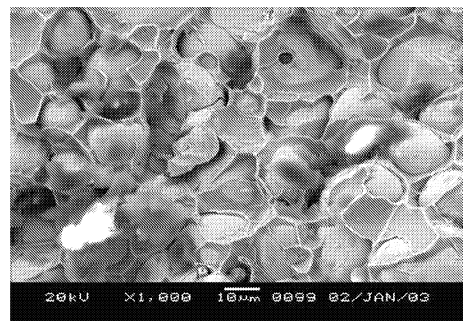
国外自二次世界大战以来，各国对钨合金的动态力学行为的研究一直给予高度的重视。经过数十年的发展，已经在加载手段和测试技术、动态响应、性能、材料的动态破坏以及动态变形和断裂的微观机制等材料动态力学行为研究领域的各个方面做了大量的工作。国外学者研究了钨合金材料在不同应变率条件下的动态力学性能，对其动态断裂强度的各向异性性质进行了研究，并认为裂纹形成与材料的微损伤特性与拉伸应力有关^[9]。

与此同时，国内学者对钨合金的动态性能也展开研究，获得了钨合金在不同应变率加载条件和温度条件下的动态性能数据，得出一些有意义的结论。

为了能进一步认识钨合金材料的微损伤力学特性，有必要开展相应的准静态实验，通过对晶粒度不同的钨合金材料进行在位拉伸和弯曲实验，研究其裂纹萌生、扩展过程及断裂行为，探讨了微结构对其力学性能的影响^[10](图 5 为钨合金断口显微电镜照片)。在此基础上，采用均匀化理论，建立了具有典型微观结构的钨合金有限元模型，通过数值计算方法对不同晶粒度的钨合金冲击载荷作用下的动态破坏过程进行了数值模拟，研究钨合金材料微观结构参数与材料宏观力学性能之间的关系，为材料的优化设计提供了理论基础^[11]。



(a) 晶粒度为 1~3 μm



(b) 晶粒度为 10~15 μm

图 5 钨合金断口形貌图

钨合金材料在冲击载荷作用下，由于近似处于绝热变形而导致温升，致使材料软化而出现绝热剪切带，这往往是钨合金材料断裂的开始^[12]。研究绝热剪切带的形成和扩展机制是目前固体力学和材料科学领域的一个热点。

经过几十年的研究，钨合金的动态力学性能与本构模型和绝热剪切带的形成等各个方面都取得了一定的成果，但由于其特殊制备工艺和极端使用条件，有如下几个方面的工作还需要进一步深入研究：

(1) 要加强高温、高应变率下钨合金力学性能的实验

研究工作,分析影响钨合金动态响应的主要参量和机理;(2)建立钨合金三维本构模型,考虑材料微观参量及其损伤演化方程对其力学性能的影响;(3)与材料学紧密结合,将钨合金制备工艺与力学性能相关联,以钨合金特殊需求为基础,促进其制备工艺的规范化与稳定化,进一步探索新型钨合金材料,不断开拓新型钨合金的应用领域。

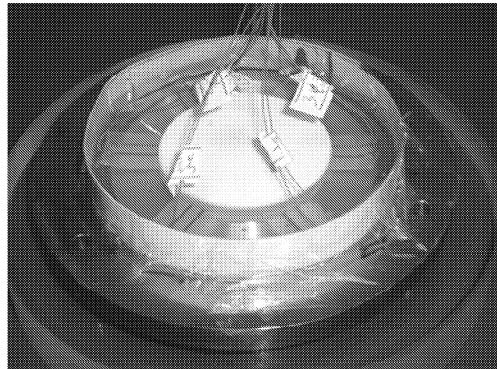
2.3 陶瓷材料

陶瓷材料的成份主要是氧化硅、氧化铝、氧化钙等。常见的陶瓷原料有黏土、石英、钾钠长石等。通常把氧化铝占85%以上的陶瓷称为氧化铝陶瓷,其以高硬度、低密度、高抗压强度、高声速等良好力学性能著称,广泛应用于军用车辆的装甲及航天、航空和舰船结构等防护领域。由于陶瓷装甲的大量运用,国内外学者对陶瓷材料的动态力学特性展开了较为深入的实验研究,主要有测定雨贡纽弹性极限、雨贡纽曲线、高压物态方程、层裂、冲击压缩损伤、冲击相变以及一些较低应变率下材料的力学响应等。

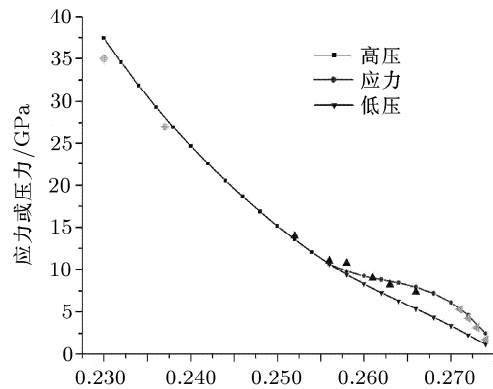
陶瓷材料是晶体材料,其内部微裂纹的成核机制有多种,如生产过程中使材料内存在大量不同取向的原始微气孔或微裂纹,冲击压缩下玻璃相中产生的微裂纹,以及基体与夹杂物热膨胀系数和弹性模量不同引起应变失配从而诱发的微裂纹,气孔压缩导致微裂纹开裂和少量位错堆积导致微裂纹形成等。由于这些微缺陷的存在,使得材料在达到最大载荷之前,将经历微裂纹的形成、扩展和汇合的损伤过程,而在应力应变关系上表现为在线弹性变形以后存在一个非线性变化过程^[13]。

国外公布的研究多集中在准静态或较低应变率情况,有关高应变率下因微裂纹损伤而引起非线性应力应变关系的讨论未见报道。针对这一情况,国内材料科学和力学工作者采用改进的 SHPB 实验方法以及轻气炮加载实验对氧化铝陶瓷的动态力学性能进行了研究,得到了材料在中高应变率范围内的动态应力应变曲线,利用拉氏分析方法对其动态力学特性进行了分析;运用损伤力学和细观力学结合的方法,研究陶瓷材料内翼型拉伸裂纹的产生、扩展和裂纹间相互贯穿的演化规律,探讨了氧化铝陶瓷在不同冲击加载方式下的动态损伤破坏机理,建立了冲击压缩下的脆性动态损伤本构模型和微孔洞塌陷与微裂纹损伤相耦合的塑性损伤本构模型。此研究给出了氧化铝陶瓷材料在动态冲击载荷下的破坏规律。氧化铝陶瓷 Hugoniot 曲线宏观实验表明

(图6为陶瓷撞击实验),高压下氧化铝陶瓷的形变过程是一个典型的弹塑性形变过程,塑性区与高压区的转折点约在11.4 GPa左右^[14]。



(a) 氧化铝陶瓷试件



(b) Hugoniot 曲线

图6 氧化铝陶瓷的平板撞击实验

20世纪90年代初,研究者在对玻璃进行冲击压缩时发现破坏波现象,而且在压缩应力低于和近似低于玻璃的弹性极限时也发生此现象。随后,对破坏波的研究在国际冲击物理学界引起了广泛地关注。此外,有学者对陶瓷冲击压缩下破坏波产生、传播的物理机制及破坏波的弛豫现象进行了研究,提出了表面裂纹扩展机制、冲击相变机制、剪切破坏机制等理论假说,建立了相应的理论分析模型。

经过长期的努力,国内外学者在冲击载荷下陶瓷材料的动态力学响应、本构模型和损伤特性方面取得了一些成果。结合以往的工作,需在以下几个方面展开进一步研究:(1)开展冲击载荷下陶瓷材料动态特性的实验研究,探讨陶瓷材料的 Hugoniot 弹性极限与损伤之间的关系,陶瓷材料弹性先驱波衰减与应变率的关系,陶瓷材料破坏的细观结构特征等;(2)材料本构模型中如何合理地描述陶瓷内

微裂纹的产生、扩展和汇合等特点，微空洞的压缩和微塑性的产生，损伤参数和陶瓷内微观结构的变化之间的联系；(3) 冲击压缩下破坏波形成的物理机理和条件、破坏波的传播速度，以及破坏波的物理力学性质。

3 相关工程应用研究

军事上应用的各种弹药和爆破器材都是通过炸药爆炸作用破坏目标的。在生产建设中，炸药爆炸这种高功率的含能材料也得到日益广泛的应用，如各种工程爆破和特种爆破等。因此爆炸对国防建设和经济建设都具有十分重要的实际意义。

3.1 深层毁伤

未来的战争中，敌方的地下指挥中心、机场(图 7 为机场跑道的毁伤实验)、桥梁、重要军事掩体以及高价值地下防护工程将成为被打击的重点目标。重要军事目标的坚固化和地下化，促进了各国把攻击目标转向于深埋地下的防护工程，重点发展反深层坚固目标弹药研制，同时对己方重要军事目标防护措施进行改进。在最近的一些局部常规战争中，钻地武器得到了较好的运用，成为摧毁敌方坚固目标及地下深层目标的利器。发展攻击地下防护工程的钻地弹是现代战争中能够取得胜利的一个关键性环节。

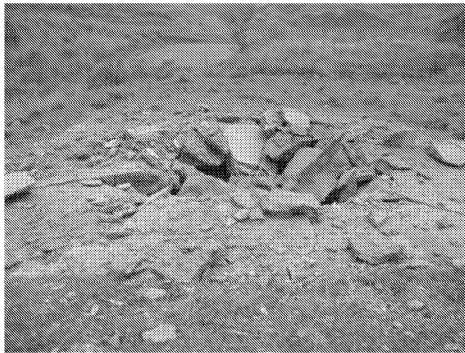


图 7 反跑道弹药毁伤效果

钻地弹又称深侵彻炸弹，是一种能够钻入目标深层引爆的弹药，一般由载体和侵彻战斗部组成。载体一般为巡航导弹弹体、航空炸弹弹体及火箭等；侵彻战斗部由内侵彻头、高爆装药和引信组成。常规钻地武器按功能可分为：反跑道、反地面掩体和反地下坚固设施三种类型；按侵彻头类型可分为：动能侵彻型和复合弹头型。

动能侵彻弹，是利用弹丸的动能，钻入地下掩体内部爆炸摧毁目标。美国的 GUB-28 可以侵彻 30 m

的土层和 6 m 的混凝土结构。美国继 GBU-28 钻地弹之后，又开发出它的改进型 GBU-37 钻地弹。该弹是将 BLU-113 的侵彻弹头安装到 GBU-28 炸弹上，并使用固体火箭发动机提高了飞行速度，使该弹的撞地速度达到 1 200 m/s，对混凝土的侵彻深度达 18 m 以上，具有攻击深藏在地下发射井中的洲际弹道导弹的能力。

复式侵彻弹一般由一个或多个安装在弹体前部的聚能空心装药弹头(预侵彻弹头)和安装在后部的主侵彻弹头(随进弹头)构成^[15]。聚能空心装药弹头由药型罩、壳体和高能钝感炸药组成，爆炸时产生的金属射流速度可达 6 000 m/s 以上，使混凝土等硬目标产生破碎和极大的变形，并沿弹头方向形成孔道，主侵彻弹头随孔道跟进，使钻地深度成倍提高。为了提高聚能空心装药的穿透能力，美国正研究采用多个空心装药串联结构的弹头。第一级空心装药主要用于扩大弹孔直径，第二级空心装药主要用于获得更大的钻深，同时设法提高跟进弹头的速度，以弥补空心装药穿透能力的不足。与动能侵彻弹相比，复式侵彻弹的效能更高。采用复式侵彻弹头可减轻武器的质量，同时又增大了武器的弹着角范围，产生跳弹的风险大为降低，是一种更为先进的侵彻弹头技术。

美国于 1997 年研制出由普通型核航弹改装成采用高强度的贫铀壳体的 B61-11 核钻地弹。为了实现钻地，弹头前端装有 1 cm 粗的钢质头锥，内有一个用于控制质心的平衡器。该弹从 12 000 m 的高空以自由落体的方式攻击目标时，可以钻入 6 m 深的岩石和土壤构成的混合介质中。如果一枚当量为 300 T 的 B61-11 钻入地下 3 m 处爆炸，大约能够摧毁埋在 15 m 厚的坚硬的岩石或混凝土结构下的目标，如果使用 3.4×10^5 T 当量的 B61-11 核钻地弹，钻地 3 m 时大约能摧毁 70 m 厚的坚硬的岩石或混凝土结构下的目标。

美国当前重点发展的摧毁深埋目标方式之一，是利用多枚弹在目标点处钻入地下一定深度后同时爆炸。这种方式的优点是：多枚弹爆炸所形成的高压力峰值比单枚弹爆炸时的高压力峰值一般要高出三四倍，甚至更高，足以摧毁地下坚固的各种防护工程。

为提高弹头撞地的速度，美国正计划研制高速穿甲弹。通过助推发动机，使导弹飞行速度达到 4 M 以上，接着利用冲压式喷气发动机将导弹加速到 7~8 M。弹壳采用镍钴合金，其侵彻能力高于前述各

种弹型。

国内有军工研究人员提出掘进武器系统, 即在前级聚能装药和随进战斗部之间安放掘进装置。掘进武器系统的掘进装置是在前级聚能射流侵彻战斗部完成侵彻混凝土掩体外层后开始工作的, 其任务是运载随进战斗部达到掩体内部。掘进装置采用螺旋冲击回转技术钻进, 掘进过程产生的震动相对较小, 从而保证了掘进装置的稳定性, 使随进战斗部在掘进过程中不会提前爆炸。掘进装置完成掘进任务后, 随进主战斗部爆炸, 预制破片完成杀伤任务。

目前, 钻地武器的发展严重滞后于所要对付目标的发展。由于地面目标和地下设施结构日趋复杂, 钻地武器的发展面临着严峻的挑战。尽管钻地核武器威力强劲, 但由于爆炸产生的核辐射无法控制, 因此属于限制使用武器, 钻地武器的发展将主要集中在常规武器方面。

在现代武器系统型号研制设计中, 普遍采用计算机辅助设计的方式。首先应用弹丸设计相关理论, 重点设计战斗部, 并完成对武器系统的气动外形布局及整体结构的初步设计; 然后依据武器系统的不同设计方案建立对目标毁伤的不同模型; 最后对按初步设计方案建立的不同模型进行爆炸与毁伤的数值模拟, 应用模拟结果作为依据和参考进一步完善武器系统的设计, 选择出最佳的设计方案。

在武器毁伤效应的数值计算中牵涉到爆炸数值方法和材料动态本构模型两个方面。由于要描述物质高速运动及大变形情况, Euler 型计算方法非常符合爆炸与冲击计算的需求; 而岩石、土壤、混凝土等防护材料以及合金等弹体材料在强冲击载荷下的高应变率动态本构研究^[16-17]则是计算获得成功的关键。

3.2 空中爆炸

空中爆炸是指爆心在离地面或者障碍物一定距离处发生的爆炸, 此时由爆心产生的初始冲击波的传播不考虑反射等复杂情况。

军事上最常见的爆炸现象是空中爆炸, 例如核武器、炸药、温压弹等未与目标物直接接触就在空中发生爆炸, 以冲击波、驱动破片、热及电磁辐射等形式毁伤目标。工业生产意外事故中的蒸汽云爆炸以及煤矿瓦斯爆炸等都会在空气中产生爆炸冲击波, 造成人员、设备和建筑物的破坏。炸药对目标作用的动态响应一直是国内外研究的一个热点, 炸药的能量释放规律和对目标作用两者是密切相关的。爆炸能量输出特性直接决定着对目标的作用效果, 考

核目标结构在战场环境下的生存能力或在意外事故中的抗爆能力; 而目标的毁伤效果反过来也能指导炸药的设计和应用, 评价新研制的炸药武器对目标打击的效果。

炸药在近场的作用主要是爆炸产物与冲击波对受载介质的直接作用。炸药在爆炸时生成的高温高压爆炸产物, 在对外膨胀时压缩周围受载介质, 从而使与其接触后的邻近物体产生变形、破坏和飞散。研究爆炸产物在空气中的扩张飞散运动对常规武器的研发和炸药能量的和平利用都有重大意义。

一般假定爆炸产物的膨胀过程分成两个阶段: 第一阶段爆炸产物绝热膨胀; 第二阶段爆炸产物作理想气体等熵膨胀。根据上述假设, 可以初步估算得出, 对于球形装药, 爆炸产物继续膨胀, 直到与周围未扰动空气的初始压力相平衡, 此时, 其相应的体积为爆炸产物的极限体积, 所对应的半径为极限体积半径。对于球形装药来说, 极限体积半径约为原来的 10 倍^[18]。本文作者用自行编制的程序对半径为 0.6 m、质量约为 1.5 T 的 TNT 球形装药爆炸做数值计算, 得到爆炸产物扩张以及冲击波传播的规律, 发现爆炸产物在 5.7 m (9.5 倍半径) 附近达到极限半径停止膨胀, 开始收缩。

炸药爆炸时, 高密度的高压爆炸气体产物高速膨胀, 周围空气介质受到冲击压缩而形成突变的界面, 即冲击波阵面。冲击波的研究是爆炸力学一个重要课题。弹药毁伤研究关注的重点是爆炸近场参数, 但由于传感器性能等原因限制, 对炸药近旁发生现象的认识还不是非常清楚, 尤其表现在压力的获得需要通过粒子速度来换算, 而无法直接测量。通过计算可以发现近场冲击波压力计算值和经验公式差别较大, 耽于实验条件限制, 我们只能用数值计算的方法从中远距离去反演爆炸近场的参数 (图 8 为数值计算和经验公式比较)。

除冲击波在空气介质中的传播外, 冲击波反射除一维情形下可以用非常流体力学求出解析解以外, 冲击波在楔角、管道、不规则面的多维反射情况没有解析解, 只能用数值模拟的方法求得数值解。实际上, 冲击波遇到目标障碍物的尺寸往往有限, 这时除了有反射冲击波以外, 还会发生冲击波的回流绕射。炸药空中爆炸 (图 9) 产生的冲击波的反射和绕射现象的研究对于目标的毁伤和防护具有极其重要的现实意义。

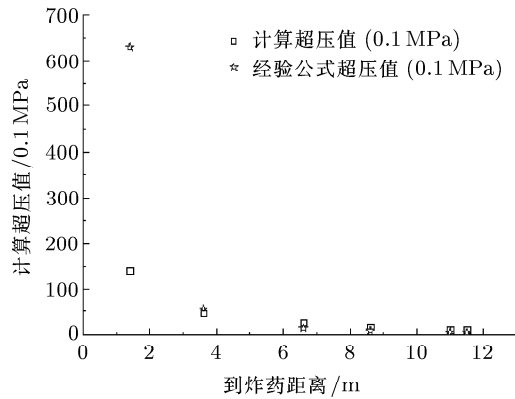


图 8 数值计算与经验公式结果比较

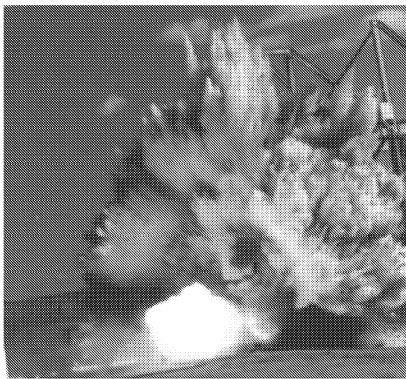


图 9 空中爆炸

4 结束语

经过数十年的努力，爆炸力学科研工作者在其各个领域都取得了巨大的进步。爆炸力学在武器装备研发、民用防护工程中具有极其重要的实际价值和广阔的应用背景。由于该领域研究对象的复杂性，研究内容和涉及学科范围广泛，难以在有限篇幅内详细评述。本文重点评述爆炸力学学科在数值仿真、材料本构及工程应用方面的研究成果、应用领域、发展趋势以及今后的研究热点。已有研究工作表明，数值计算手段正在逐渐成为爆炸力学学科重要的研究方法以及理论和实验之间的桥梁。在开展爆炸力学研究和有关工程设计的同时，应注意与相邻学科的交叉，加强计算爆炸力学理论和实验的结合，发展新的计算方法，进一步关注爆炸力学中的多尺度现象与计算模拟，使我国爆炸力学的研究迈向更高的水平。

由于爆炸力学学科的前沿性和复杂性，至今其许多物理特性还有待进一步的研究和认识，这需要广大数学、力学、物理学、化学等诸多学科科研工作者以及广大工程技术人员为之付出不懈努力。由于

笔者水平有限，文中难免有疏漏和不妥之处，欢迎广大同行和读者批评指正。

参 考 文 献

- 1 恽寿榕. 爆炸力学计算方法. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- 2 马天宝. 高速多物质动力学计算、软件 EXPLOSION-2D 的开发及研究. [博士论文]. 北京: 北京理工大学, 2007
- 3 Anderson CE, Jr Walker JD. An overview of the theory of hydro codes. *Int J Impact Engng*, 1987, 5: 33-59
- 4 刘儒勋, 舒其望. 计算流体力学的若干新方法. 北京: 科学出版社, 2003
- 5 都志辉. 高性能计算并行编程技术. 北京: 清华大学出版社, 2001
- 6 宁建国, 商霖, 孙远翔. 混凝土材料动态性能的经验公式、强度理论与唯象本构模型. 力学进展, 2006, 36(3): 389-405 (Ning Jianguo, Shang Lin, Sun Yuanxiang. The developments of dynamic constitutive behavior of concrete. *Advances in Mechanics*, 2006, 36(3): 389-405 (in Chinese))
- 7 胡时胜, 王道荣. 混凝土材料动态本构关系. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 242-246 (Hu Shisheng, Wang Daorong. Dynamic constitutive relation of concrete under impact. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(3): 242-246 (in Chinese))
- 8 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(6): 759-772 (Ning Jianguo, Liu haifeng, Shang Lin. Dynamic behaviors and constitutive relation of concrete under shock impact. *Science in China Series G: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2008, 38(6): 759-772 (in Chinese))
- 9 Cimpoeu SJ, Wooward RL. High strain rate properties of three liquid phase sintered tungsten alloys. *Journal of Material Science Letters*, 1990, 9: 187-191
- 10 宁建国, 宋卫东, 任会兰等. 冲击荷载作用下材料与结构的响应与防护. 固体力学学报, 2010, 31(5): 532-552 (Ning Jianguo, Song Weidong, Ren Huilan, et al. Response and protection of materials and structures under impact loadings. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 31(5): 532-552 (in Chinese))
- 11 Song WD, Ning JG, Wang J. Normal impact of truncated oval-nosed projectiles on stiffened plates. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 35(9): 5453-5458
- 12 Bai YL, Dodd B. Adiabatic Shear Localization. Oxford: Pergamon, 1992
- 13 任会兰, 树学锋, 李平. 强冲击荷载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, 2008, 38(6): 1221-1230 (Ren Huilan, Shu Xuefeng, Li Ping. Numerical and experimental investigation on the fracture behaviors of shock loaded alumina. *Science in China Series G: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2008, 38(6): 1221-1230 (in Chinese))
- 14 Ning JG, Ren HL, Li P. Mechanical behaviors and damage constitutive model of ceramics under shock compression. *Acta Mechanica Sinica*, 2008, 24: 305-315
- 15 邓国强, 周早生, 郑全平. 钻地弹爆炸聚集效应研究现状及展望. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2002, 3(3): 45-49 (Deng

(下转第 69 页)

型, 能够更加真实地反映系统的模态特征, 借助 Matlab 软件可以准确地预测装有钢丝绳隔振器系统的最大动变形, 最大响应加速度。同时还可以指导钢丝绳隔振器的生产, 更好地给出其有效高度。

参 考 文 献

- 1 胡振锡, 毛家祥, 蒋金南等. SJ-1 型钢丝绳隔振器的非线性特性及其应用. 振动与冲击, 1988, 7(3): 67-72 (Hu Zhenyang, Mao Jiexiang, Jiang Jinnan, et al. Nonlinear characteristics and application of SJ-1 steel wire isolators. *Journal of Vibration and Shock*, 1988, 7(3): 67-72 (in Chinese))
- 2 束立红, 周炜, 吕志强等. 钢丝绳隔振器在大型机械设备的振动冲击隔振设计中的应用. 振动与冲击, 2006, 8(4): 78-81 (Shu Lihong, Zhou Wei, Lü Zhiqiang, et al. Stainless steel wire-rope isolator used in vibration and impact isolation design for large machine equipment. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 8(4): 78-81 (in Chinese))
- 3 万叶青, 杨平, 张伟欣. 钢丝绳隔振器驾驶室减振性能研究. 拖拉机与农用运输车, 2006, 33(3): 22-24 (Wan Yeqing, Yang Ping, Zhang Weixin. Dynamic analysis on the operator's seat with steel wire isolator. *Tractor & Farm Transporter*, 2006, 33(3): 22-24 (in Chinese))
- 4 向红, 吴若梅. 钢丝绳隔振器在运输包装中的应用研究. 湖南大学学报 (自然科学版), 2002, 29(3): 65-67 (Xiang Hong, Wu Ruomei. Study of application of wire cable vibration isolator in fields of transport packaging. *Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 29(3): 65-67 (in Chinese))
- 5 朱海潮, 何琳, 霍睿等. 用钢丝绳隔振器进行船舶主机隔振. 航海工程, 2002, (4): 12-15
- 6 郭张霞, 潘玉田, 裴畅贵. 钢丝绳隔振器的元件及其特性. 机械管理开发, 2005, 2: 7-9 (Guo Zhangxia, Pan Yutian, Pei Changgui. Components and characteristics of wire-rope vibration isolator. *Mechanical Management and Development*, 2005, 2: 7-9 (in Chinese))
- 7 熊世树, 唐家祥. 钢丝绳隔振器三向性能试验研究. 华中理工大学学报, 1998, 26(2): 77-79 (Xiong Shishu, Tang Jiexiang. Experimental studies on three-dimensional performances of vibration isolator for steel wire rope. *J Huazhong Univ of Sci & Tech*, 1998, 26(2): 77-79 (in Chinese))
- 8 王勇, 黄映云. 锤击法测评小型钢丝绳隔振器冲击特性. 船舶工程, 2007, 29(4): 79-82 (Wang Yong, Huang Yingyun. Measuring the shock characteristic of small wire-rope vibration isolators by hammering. *Ship Engineering*, 2007, 29(4): 79-82 (in Chinese))
- 9 黄映云, 秦俊明, 吴善跃等. 钢丝绳隔振器冲击特性试验研究. 海军工程大学学报, 2007, 19(1): 23-26 (Huang Yingyun, Qin Junming, Wu Shanyue, et al. Experimental investigation on shock characteristic of wire rope isolator. *Journal of Naval University of Engineering*, 2007, 19(1): 23-26 (in Chinese))
- 10 万叶青, 范立民, 齐煜. 钢丝绳隔振器非线性特性分析. 振动与冲击, 2007, 26(7): 46 - 50 (Wan Yeqing, Fan Limin, Qi Yu. Nonlinear characteristics analysis for steel wire isolators. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(7): 46-50 (in Chinese))
- 11 张予. 钢丝绳隔振器的迟滞动力特性分析. 华东交通大学学报, 2004, 21(2): 38-40 (Zhang Yu. Analysis of hysteretic dynamical characteristics about cable wire shock absorber. *Journal of East China Jiaotong University*, 2004, 21(2): 38-40 (in Chinese))
- 12 周桐, 刘青林. 钢丝绳隔振系统简化模型分析. 振动与冲击, 2007, 26(9): 55-60 (Zhou Tong, Liu Qinglin. Simplified model analysis of wire-rope vibration isolator. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(9): 55-60 (in Chinese))
- 13 Ly BL. A note on the free vibration of a nonlinear oscillator. *Journal of Sound and Vibration*, 1980, 68: 307-309
- 14 Blaquiere A. Nonlinear System Analysis. New York: Academic Press, 1966
- 15 Pesterev AV, Bergman LA. An improved series expansion of solution to the moving oscillator problem. *J Vibration and Acoustics*, 2000, 122: 54-61
- 16 Lee V. Revisiting the moving mass problem: onset of separation between the mass and beam. *J Vibration and Acoustics*, 1996, 118: 516-521
- 17 Pesterev AV, Bergman LA. Response of a nonconservative continuous system to a moving concentrated load. *J Appl Mech*, 1998, 65: 436-444
- 18 Hayashi C. Nonlinear Oscillations in Physical Systems. New York: McGraw-Hill, 1964
- 19 Butenin NV. Elements of the Nonlinear Oscillations. New York: Blaisdell Publishing, 1965
- 20 Stoker JJ. Nonlinear Vibrations in Mechanical and Electrical Systems. New York: Interscience Publishers, 1950

(责任编辑: 刘俊丽)

(上接第 19 页)

- Guoqiang, Zhou Zaosheng, Zheng Quanping. Study status quo and development of aggregated effect of multiple earth penetrator bursts detonated simultaneously. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2002, 3(3): 45-49 (in Chinese))
- 16 李继承, 陈小伟. 尖锥头长杆弹侵彻的界面击溃分析. 力学学报, 2011, 43(1): 63-70 (Li Jicheng, Chen Xiaowei. Theoretical analysis on the interface defeat of a conical-nosed projectile penetration. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(1): 63-70 (in Chinese))
 - 17 何丽灵, 陈小伟. 高速侵彻混凝土弹体的形状演化模拟. 力学学报, 2011, 43(4): 707-715 (He Liling, Chen Xiaowei. Simulation of variation of projectile nose during high-speed penetration into concrete. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(4): 707-715 (in Chinese))
 - 18 Baker WE. 江科译. 空中爆炸. 北京: 原子能出版社, 1982

(责任编辑: 刘俊丽)