

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.024

数值计算在武器效应与毁伤评估研究中的应用简析*

刘飞¹,汪剑辉¹,周松柏¹,夏明¹,任新见^{1,2}

(1. 军事科学院国防工程研究院, 洛阳 471023; 2. 河南省特种防护材料重点实验室, 洛阳 471023)

摘要: 数值计算是武器效应与毁伤评估研究的重要途径,其作用集中体现在指导试验设计、优化方案,拓展试验结果及作为理论与试验研究的补充手段三方面。由国外武器效应数值计算软件的基本特点与国内效应计算软件的发展现状可知,国外商业软件的突出优势是研发力量强、操作方便、计算精度与结果可靠性高,前、后处理软件丰富,且计算并行化。从总体上看目前我国数值计算仍受制于人,在基础数据、求解规模、计算能力、二次开发四方面发展相对滞后;基于开源数值计算软件包进行二次开发是迅速缩小与国外成熟软件差距的有效途径。

关键词: 数值计算; 武器效应; 毁伤评估; 二次开发

中图分类号: O383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)01-0153-06

Brief Application Analysis of Numerical Computation in Weapon Effects and Damage Assessments

LIU Fei¹, WANG Jian-hui¹, ZHOU Song-bai¹, XIA Ming¹, REN Xin-jian^{1,2}

(1. Institute of Defense Engineering, AMS, PLA, Luoyang 471023, China;

2. Henan Key Laboratory of Special Protective Materials, Luoyang 471023, China)

Abstract: Numerical computation is an important way to study weapon effects and damage assessments. Its function is mainly reflected in three aspects: guiding test designs, optimizing schemes, and expanding test results as a supplementary means of theoretical and experimental researches. According to the basic characteristics of foreign software and the development status of domestic software for numerical computation of weapon effects, the outstanding advantages of foreign commercial software are strong research and development ability, convenient operation, high calculation accuracy and reliability, rich pre-processing and post-processing software, and parallel computing. On the whole, the numerical computation research in China is still restricted by others. Meanwhile, the developments of basic data, solution scale, computing ability and secondary development are relatively lagging behind. In order to overcome the bottlenecks, the secondary development technique based on open source numerical calculation software package is an effective way to rapidly narrow the gap with the mature foreign software.

Key words: numerical calculation; weapon effect; damage assessment; secondary development

数值计算的基本思想是将复杂的研究对象分解为若干个子对象,将基本物理定律应用到子对象获得物理现象细节,进而汇总得到总体参数;数值计算

软件融计算机技术、软件工具、算法为一体,是将计算力学的理论成果、算法转换为解决工程实际问题的主要工具^[1,2]。

爆炸与冲击毁伤效应的数值计算是武器效应与毁伤评估研究一种不可或缺的手段。数值计算在毁伤效应研究中发挥的作用无疑会影响到毁伤评估结果的准确性、可靠度,直接影响到毁伤评估工作的实

收稿日期:2020-10-02

作者简介:刘飞(1977-)男,高级工程师、博士,主要从事人防工程和综合防护技术研究。(E-mail) feiliu423@163.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1404107,11972201)

际开展。

国外武器效应分析与毁伤评估商业软件求解功能强、操作方便、界面友好,目前已在国内形成市场垄断,拥有绝对优势^[3,4]。引进国外软件,虽可满足一时之需,但从长远来看,我们需要具有自主知识产权、性能优越、操作方便的毁伤效应分析软件系统。本文重点分析数值计算在武器效应与毁伤评估研究中的重要意义与作用,简介国外武器效应数值计算软件的基本特点与国内效应计算软件的发展现状,提出武器效应与毁伤评估数值计算软件亟待解决的技术难题和破解困局的对策与建议。

1 效应研究与毁伤评估中数值计算的作用

毁伤评估以武器毁伤效应的准确计算为前提,而数值计算是效应计算不可或缺的手段,其结果是对武器毁伤效应试验结果与理论分析结论必要和有益的补充与完善。数值计算作为毁伤效应与毁伤评估研究的核心技术,其主要目的与作用集中体现为:

(1)为武器毁伤效应与毁伤评估研究的试验设计、方案优化提供技术指南。

试验研究花费大量人力、物力、财力,且周期长;如果毁伤效应与毁伤评估的规律全部通过试验来摸索,成本难于接受。可行的途径是先期进行所研究问题试验对应工况的数值计算,锁定试验结果可能的范围,从而大幅降低试验规模、减少试验次数,节约经费、缩短周期,收到“事半功倍”的效果^[5]。

(2)在毁伤效应试验的基础上合理拓展试验结果,并深入挖掘试验的“局部”信息。

由于试验条件、试验工况、测试传感器布置的限制,试验结论有效性涵盖的范围有限,即使在有效范围内,试验数据点也是不连续的。单纯通过试验无法获得所研究工况的“全场”信息。在通过试验标定计算方法、材料参数的基础上,采用数值计算,可以得到试验工况以外的结果,从而在一定程度上弥补单纯试验数据的不足^[6]。

进行武器效应规律与毁伤评估研究,“大数据”是必要条件;只有建立在充分多的数据信息基础上,总结得到的规律才有较好的普适性和鲁棒性。

借助计算机技术,数值计算结果可以采用图片、表格、曲线等多种形式显示。试验的结果多是不连续的,而数值计算可以得到不同时间点、不同空间位置的结果,即能得到时间、空间上均连续的几乎全部信息,这对毁伤效应的机理分析必不可少^[7]。

(3)待研究问题缺乏有效的理论分析与试验研

究手段时,采用数值计算可以作为一种有效的补充。

数值计算作为与理论解析、试验研究并列的三种毁伤效应研究手段之一,在其他两种手段缺乏实际可操作性时,数值计算呈现出明显的独特优势。受材料非线性及边界条件等诸多因素的限制,能够理论解析的毁伤效应及其评估问题非常有限;以试验为基础总结出的工程算法是一种有效的弥补手段,但每一种工程算法都有严格的随试验参数取值而变化的适用范围,换言之,工程算法只适用于典型工况,不具有普适性。

冲击波传播和侵彻是两种最主要的武器毁伤效应。以冲击波效应研究为例,冲击波的传播规律没有理论解析式,通用的做法是通过大量试验以量纲分析为基础拟合出经验公式,但经验公式都有其适用范围,某一特定空间中的冲击波衰减规律不适用于其它形状不规则空间^[8,9]。

因防护工程材料多为土、岩石或混凝土等,现有侵彻公式多面向这三种材料,表达形式、适用范围、精度因工况而异,虽多达40多种,仍不能解决诸如斜侵彻、多层间隔靶侵彻、分层介质侵彻等复杂工况的侵彻问题^[10]。实际工程防护结构的动力响应计算也存在类似问题,这种情况下,数值计算的作用愈发重要。

数值计算的上述目的与作用奠定了它在效应分析与毁伤评估研究工作中不可或缺的地位。

2 我国效应研究与毁伤评估领域数值计算现状

全球工业设计仿真软件现阶段主要由美、德、法三个国家把控,主流CAE软件基本被美国的ANSYS、德国的SIMENS、法国的DS Simula和美国的Altair、MSC垄断^[11];而爆炸与冲击毁伤效应的数值计算软件,更是受到国外国防军工部门的普遍重视,这方面美国一直处于世界的领先地位。主流的效应计算软件目前主要有LS-DYNA、AutoDyn、Abaqus三种^[12],这三种软件各有所长,如LS-DYNA的拉格朗日算法较强,接触类型丰富,可以方便地进行侵彻计算;AutoDyn的欧拉算法较强,更适合爆炸问题的求解;Abaqus的水下爆炸计算相对较强^[13-15]。

我国的数值计算起步始于上世纪六十年代末。原总参工程兵科研三所跟踪、引进、消化了国外ADINA等大型有限元软件,提炼软件编程理论和编程技术,同时参与北京大学NOLM程序开发,积累编程经验。在此基础上,1979年周早生根据工程施工中存在的实际问题,研发了我军第一套能够模拟

地下工程开挖的大型数值模拟软件 RSNOP,具有自主知识产权,在模拟初始地应力场、坑道断面的分步开挖与支护等方面达到国际先进水平,但 RSNOP 程序只能模拟二维问题,且采用 6912 机器语言,使用不便。周早生后将 RSNOP 程序采用 FORTRAN 语言改写并移植到大型计算机上,程序更名为 RSEAP,在地下工程洞室开挖、支护及稳定性分析上得到较广泛应用^[16]。

上世纪九十年代以前,原总参工程兵科研三所在核武器效应及其防护技术数值计算方面做了大量工作。杨秀敏等研编了二维流体弹塑性动力程序 RRPM,在触地爆炸、浅埋爆炸的计算中发挥了重要作用^[17];在核爆炸冲击波效应方面,进行了核武器空中爆炸、近地爆炸和触地爆炸的空气冲击波传播规律研究,如采用一维 Lagrange 方法研究了爆炸近区的真实气体效应,采用二维 Euler 方法对马赫波的生成及发展、激波的反射与绕射进行了研究^[18]。

随着计算机技术的发展,计算速度及数据存储容量已基本满足求解二维、三维 Euler 方程及 N-S 方程的需求。原总参工程兵科研三所刘瑞朝、周松柏编写的 BLAST3D 程序,可较好计算空气冲击波的传播;该程序计算基于考虑炸药爆轰的 Euler 控制方程进行,反应模型采用“点火-生长”反应模型,控制方程采用 JWL 状态方程封闭,计算方法为基于混合网格的有限体积法,空间离散采用 AUSM + - up 格式,时间离散采用二阶龙格库塔法^[19]。北京理工大学宁建国、王成编制的 EXPLOSION-3D 程序,可较好模拟凝聚相、气相爆轰的过程并计算爆炸效应参数的时空分布^[20];中国空气动力研究与发展中心倪鸿礼编写的 Cardc_cai 程序,在设定效应参数初始值的条件下可以计算效应场的分布^[21]。

从总体看,我国虽然也做了不少工作,取得了一些成果,编制了部分程序,但编程工作停留在程序方面,尚不能称之为成熟的软件,用户界面相对简单,鲁棒性较差,操作不够方便,编程人员自己使用尚可,第三方使用则往往面临各方面的问题;其次,程序的功能相对单一,如纯粹用来计算冲击波或侵彻,部分功能欠缺。目前我国数值计算仍处于受制于人的尴尬地位,发展相对滞后,具体表现为:

(1) 基础数据受限。

国外商业软件尽管功能很多,使用方便,但求解精度需要配套的材料模型库数据作支撑,而这方面一般不予提供(禁售);软件自带的材料模型,仅有粗略说明,这样就难于根据我们自己的试验资料,建立拥有自主知识产权的材料参数库。基础数据缺失

最终导致了软件应用受限,数值计算结果失真^[21]。

(2) 求解规模受限。

除了平面应力和平面应变问题,数值计算的工况不能简化为二维问题,必须三维建模;同时为了保证计算精度,模型网格制作时单元尺寸均较小。这样导致模型的网格规模动辄上百万乃至千万,而商业软件的求解规模一般被限制在百万量级。

(3) 计算能力受限。

武器效应的计算隶属军工领域,国外给我们提供的商业软件在性能上被人为限制,部分关键功能被有意屏蔽或剔除,与原版相比,软件功能缩水明显。

(4) 二次开发受限。

商业软件提供的是封装后的执行模块,类似于“黑匣子”;虽然部分软件提供二次开发功能,但由于用户无法全面掌握软件的理论架构与编程思路,实际使用过程中再次开发困难重重,所升级的功能也极其有限。

上述困难的直接后果是我们虽然有商业软件使用,可以一定程度上解决急需,但仅停留在“堪用”这个状态,其严重后果为:

一方面,随着主流商业软件的大规模使用,我国大部分数值计算的从业人员逐渐丧失了追本溯源、自己编程,从“根”上去解决毁伤效应数值计算的能力,而是停留在“应用商业软件、辅以理论分析”层面,知其然不知其所以然,这样,久而久之,我国具备自主开发能力的数值计算人员数量锐减,部分具有专业特色的自主研发程序将失去非常有限的市场,生存与发展空间进一步浓缩。

另一方面,在我军重点关注的毁伤效应与毁伤评估领域,应用商业软件进行数值计算,求解精度难于保证,计算规模不足,二次开发甚为困难,数值计算的可靠性、有效性大幅降低,以至于产生“商业软件虽好用,计算结果不敢用”等恶劣后果,直接导致我军现阶段毁伤评估工作基本完全依赖于试验,无法大规模有效开展。

综上所述,破解数值计算“受制于人”的瓶颈迫在眉睫。

3 破解困局的对策

数值计算研究是一个十分复杂的问题,其研究面宽,涉及学科多,对理论基础、数值分析及计算机软硬件平台都有很高的要求。

国外武器效应数值计算软件基本特点主要有:

1) 历史悠久、研发周期长,操作方便,计算精度、结果的可靠性较高。

2)前、后处理软件丰富。数值计算的基本流程为“前期建模-求解-结果后处理”,核心部分是求解。对成熟的商业软件,建模与后处理部分在各软件间是基本通用的,亦即可采用多种外围软件完成(如建模可与CAD软件无缝集成)。

3)计算并行化。武器效应的计算一般是流固耦合的三维问题,对硬件配置要求高,同时为了确保计算精度,网格规模庞大。一百万以下网格,可采用单机计算;超过一百万时,单机计算极其困难甚至无法进行,须采用分布式计算系统。主流软件均已推出适合多CPU共同计算的并行版本,计算效率得到极大提升。

数值计算包括硬件平台和软件两部分,我国对于硬件平台重视较多,目前已经研制出计算性能处于世界前列的超级计算机,但高性能的数值计算软件尚缺少。武器效应与毁伤评估数值计算软件需要攻克的技术难点主要集中在材料本构模型(确保计算的精度)、高效并行计算技术(保证计算的速度)两方面,而这两方面问题的解决,都以拥有自主可控的软件平台为前提。

自主软件开发可以借鉴国外商业软件的部分经验。虽不能完全了解其内部技术核心,但可以准确判断出整体技术路线、编程手段与功能设置,这就为软件的自主开发提供了对照,从而尽可能科学地进行顶层规划与设计,少走弯路。

武器毁伤效应与毁伤评估数值计算软件的实质是一个能够求解偏微分方程组特别是双曲型偏微分方程组的软件包。从功能的角度,它可分为以下部分:

1)基本数值算法:包括矩阵运算和特征值求解(典型实现如LAPACK、ARPACK、BLAS等)、数值积分等。

2)数据交互接口:包括并行计算接口(使用

MPI等)、大规模数值计算数据存储(使用HDF5格式等)、数据可视化(调用VTK接口等)。

3)基本专业算法:包括自适应网格划分等。

4)特定专业算法:包括各种材料参数模型以及针对特定模型或特定问题的求解算法等。

其中第4类专业算法是关注的重点,通常需要根据待解决的问题,查阅文献并形成求解算法,然后自主编程实现。因此,需要尽可能减小实现其他3类算法所需的工作量。

从实现途径上看,可分为以下四种:

1)改写文献中的软件(如OIL)。该方法优点是可与文献的计算进行对比,某种程度上可以“依葫芦画瓢”;缺点是目前的程序代码均较旧,如OIL是1964—1969年间的三种版本代码,使用Fortran IV语言,代码注释和说明文字较少;代码印刷模糊或缺少字母;数据输入采用读数据卡的方式。总的来说,需要靠经验和猜测对代码进行一些修改才能进行正确编译。

2)完全自行编写代码:优点是自己写的程序易于理解;缺点是可利用资源少,工作量太大,难以在可以接受的期限内完成。

3)基于商业软件进行二次开发:熟悉商业软件的前提下,只需进一步掌握二次开发接口即可,工作量相对较小;可实现的功能受商业软件二次开发接口开放程度的限制,也受限于软件的license。

4)基于开源数值计算包进行开发:优点是可供选择的开源数值计算包较多,所提供的功能较丰富,可节省相当的时间和精力,所需时间不会太长;缺点是需掌握Unix/Linux下的数值计算软件开发工具,熟悉并进一步开发开源数值计算包。

表1针对上述四种可能的数值计算软件实现方法,对比了它们的复用程度、优缺点及实现难度。

表1 各种实现方法的复用程度及实现难度的比较

Table 1 Comparison of reuse degree and implementation difficulty of various implementation methods

实现方法	代码复用/重用程度	优点	缺点
改写文献中的软件	基本数值算法、数据交互接口和基本专业算法需另外重用或实现;重用少量特定专业算法	可与文献进行对比;一定程度上可“依葫芦画瓢”	可用的程序较旧;需重新输入代码,并适当修改、调试;代码注释少,不便于理解修改;耗时长
完全自行编写代码	基本数值算法、数据交互接口和基本专业算法需自行研究如何重用或实现;不能重用特定专业算法	容易理解掌握	可用的基础少,工作量太大,耗时长
基于商业软件进行二次开发	可重用基本数值算法、数据交互接口及部分特定专业算法;没有自适应网格划分功能	工作量小;前后处理成熟;耗时最少	软件功能受制于商业软件license以及二次开发接口开放程度
基于开源数值计算包进行开发	可完全重用基本数值算法、数据交互接口和基本专业算法;可重用少量特定专业算法	程序框架较成熟;工作量适中;耗时较少	需掌握新的开发环境和开发工具

功能完善的数值计算软件包含数十万行甚至数百万行代码,工作量巨大。如果要在可以接受的期限内编制实现具有一定功能的数值计算软件,其关键是要考虑如何继承已有成果。综合衡量数值计算软件的开发难度和开发后可实现的功能,采用第4种方法基于开源软件包编写数值计算软件是一种切实可行的手段(建模和网格划分采用 Truegrid、Hypermesh、Gridgen 等商业软件,计算结果后处理采用 Tecplot、Origin、MATLAB 等专业的数据分析软件,主要精力集中于求解器研发)。

目前大多数开源数值计算包均运行于 Unix/Linux 平台,构建开源数值计算软件开发环境需要一定的 Unix/Linux 知识。对于所选择的开源数值包

而言,为便于进一步开发,须具有以下特点:较为丰富的文档资料;较高的声誉和知名度;以 C/C++ 语言为主要编程语言;支持 64 位并行计算、自适应网格划分以及较完善的前后处理等功能。

数值计算包方面,综合考虑多种因素,我们认为可选择 deal. II 和 OpenFOAM,其中 deal. II 采用有限元方法,擅长解决固体力学问题;OpenFOAM 以有限体积法为主,擅长解决流体力学问题。图 1 给出了基于开源数值计算包编制数值计算软件的主要步骤:构建开源数值计算软件开发环境→学习、掌握开源数值计算包→基于开源数值计算包,开发增加所需要的功能。

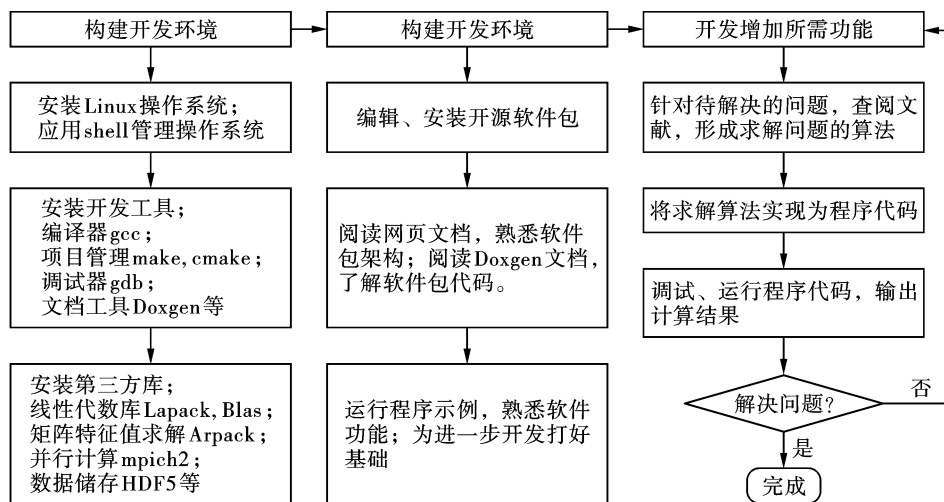


图 1 基于开源软件包编写数值计算软件的主要步骤

Fig. 1 Main steps of compiling numerical calculation software based on open source software package

4 结语

数值计算是武器效应与毁伤评估研究的核心技术,数值计算软件的自主研发是武器毁伤效应与毁伤评估专业发展长期战略任务。

本文总结了国外武器效应数值计算软件的基本特点与国内效应计算软件的发展现状,探讨了目前我国在该方向研究中亟需解决的关键问题与解决的技术途径,分析指出:

(1)数值计算在效应研究与毁伤评估中的作用集中体现在指导试验设计、优化方案,拓展试验结果及作为理论与试验研究的补充手段等方面。

(2)我国效应研究与毁伤评估领域数值计算滞后的领域集中在基础数据、求解规模、计算能力、二次开发等方面。

(3)基于开源数值计算软件包进行二次开发是缩小与国外商业软件差距的有效途径。

参考文献 (References)

- [1] 袁明武. 我国计算力学软件现状与思考现代力学与科技进步[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [2] MOBARAKI B, VAGHEFI M. Numerical study of the depth and cross-sectional shape of tunnel under surface explosion [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47:114-122.
- [3] 陈惠发. 土木工程材料的本构关系[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [4] 恽寿榕,涂侯杰,梁德寿. 爆炸力学计算方法[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.
- [5] 邓国强,王丽梅. 武器效应数值仿真发展瓶颈与对策分析[J]. 防护工程,2014,36(3):6-11.
- [5] DENG Guo-qiang, WANG Li-mei. Development bottleneck and countermeasure analysis of weapon effect numerical simulation [J]. Protective Engineering, 2014, 36(3):6-11. (in Chinese)

- [6] XIA Y,JIANG N,ZHOU C, et al. Safety assessment of upper water pipeline under the blasting vibration induced by Subway tunnel excavation[J]. *Engineering Failure Analysis*,2019,104:626-642.
- [7] 邓国强,郑全平. 武器效应下一代数值仿真平台构成要素[J]. *防护工程*,2015,37(2):1-6.
- [7] DENG Guo-qiang, ZHENG Quan-ping. Components of next generation numerical simulation platform for weapon effects[J]. *Protective Engineering*,2015,37(2):1-6. (in Chinese)
- [8] BELYTSCHKO T, WING Kan L, MORAN B. 连续体和结构的非线性有限元[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [9] PRASANNA R, BOOMINATHAN A. Finite-element studies on factors influencing the response of underground tunnels subjected to internal explosion[J]. *International Journal of Geomechanics*,2020,20(7):4020089.
- [10] TM5-1300. Structures to resist the effects of accidental explosions[R]. US Department of the Army. Washington, DC:2018.
- [11] 宋顺成,才鸿年. 弹丸侵彻混凝土的SPH算法[J]. *爆炸与冲击*,2003,23(1):56-60.
- [11] SONG Shun-cheng, CAI Hong-nian. SPH algorithm for projectile penetrating concrete [J]. *Explosion and shock*,2003,23(1):56-60. (in Chinese)
- [12] 钟万勰,程耿东. 跨世纪的中国计算力学. 科技进步与学科发展[M]. 北京:中国科学技术出版社,1998.
- [13] 邓国强,杨秀敏. 防护工程中冲击爆炸效应数值仿真的发展现状和未来[J]. *防护工程*,2009,31(4):24-28.
- [13] DENG Guo-qiang, YANG Xiu-min. Development status and future of numerical simulation of shock and explosion effects in protective engineering[J]. *Protective Engineering*,2009,31(4):24-28. (in Chinese)
- [14] 李思昆,蔡 勋,王文词. 大规模流场科学计算可视化[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [15] MALVAR L J, CRAWFORD J E, WESEVICH J W. A plasticity concrete material model for dyna3D[J]. *International Journal of Impact Engineering*,1997,19:847-873.
- [16] 杨秀敏,邓国强. 数值仿真在防护工程中的作用[J]. *防护工程*,2003,25(1):1-5.
- [16] YANG Xiu-min, DENG Guo-qiang. The role of numerical simulation in protection engineering[J]. *Protective Engineering*,2003,25(1):1-5. (in Chinese)
- [17] 杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
- [18] MUSSA M H, MUTALIB A, HAMID R. Assessment of damage to an underground box tunnel by a surface explosion[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2017,66:64-76.
- [19] 邓国强,周早生,杨秀敏. 常规武器效应数值仿真的几项关键技术[J]. *系统仿真学报*,2015,17(5):1059-1062.
- [19] DENG Guo-qiang, ZHOU Zao-sheng, YANG Xiu-min. Several key techniques for numerical simulation of conventional weapon effects[J]. *Journal of System Simulation*,2015,17(5):1059-1062. (in Chinese)
- [20] 宁建国,黄风雷. 计算爆炸力学理论、方法及工程应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2018.
- [21] 邓国强,杨秀敏. SPH方法在爆炸冲击效应计算中的应用[J]. *防护工程*,2004(6):46-49.
- [21] DENG Guo-qiang, YANG Xiu-min. Application of SPH method in the calculation of blast impact effect[J]. *Protective Engineering*,2004(6):46-49. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第104页)

- [11] 董 星, 张 哲,刘永强,等. 100 m 钢筋混凝土烟囱定向爆破拆除实践与数值模拟[J]. *爆破*,2020,37(4):100-105,115.
- [11] DONG Xing, ZHANG Zhe, LIU Yong-qiang, et al. Practice and numerical simulation of 100 m reinforced concrete chimney by directional blasting [J]. *Blasting*,2020,37(4):100-105,115. (in Chinese)
- [12] 马建军,王立锋,钟冬望,等. 烟囱爆破触地振动减震堤减震效果的实验研究[J]. *爆破*,2018,35(3):21-28,48.
- [12] MA Jian-jun, WANG Li-feng, ZHONG Dong-wang, et al. Experimental study on shock absorption effect of shock absorbing embankment touchdown vibration of chimney blasting[J]. *Blasting*,2018,35(3):21-28,48.
- [13] 谢亮波,王 铭,张西良,等. 薄壁型钢结构烟囱控制爆破拆除[J]. *爆破*,2020,37(2):75-79.
- [13] XIE Liang-bo, WANG Ming, ZHANG Xi-liang, et al. Controlled blasting demolition of Thin-walled Steel-concrete Structure Chimney[J]. *Blasting*,2020,37(2):75-79. (in Chinese)
- [14] 高文乐,吴 超,张泽华,等. 复杂环境下烟囱的机械与定向爆破联合拆除[J]. *爆破*,2018,35(4):94-98,140.
- [14] GAO Wen-le, WU Chao, ZHANG Ze-hua, et al. Combined mechanical and directional blasting demolition of a chimney in complex environment [J]. *Blasting*,2018,35(4):94-98,140. (in Chinese)

英文编辑:赵 亮