

流体弹塑性理论模型的历史意义和发展前景

邓国强, 杨秀敏

HISTORICAL SIGNIFICANCE AND DEVELOPMENT PROSPECT OF HYDRO-ELASTO-PLASTIC THEORY MODEL

Deng Guoqiang and Yang Xiumin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-22-240>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

结构性软土弹塑性模型的隐式算法实现

Implicit numerical integration of an elasto-plastic constitutive model for structured clays

力学学报. 2018, 50(1): 78-86

微磁检测应力和塑性区的磁弹塑耦合理论

THEORETICAL MODEL OF MAGNETO-ELASTOPLASTIC COUPLING FOR MICRO-MAGNETIC NON-DESTRUCTIVE TESTING METHOD WITH STRESS CONCENTRATION AND PLASTIC ZONE

力学学报. 2021, 53(12): 3341-3353

考虑材料温度相关性的二维轮轨弹塑性滑动接触温升分析

FRICIONAL TEMPERATURE ANALYSIS OF TWO-DIMENSIONAL ELASTO-PLASTIC WHEEL-RAIL SLIDING CONTACT WITH TEMPERATURE-DEPENDENT MATERIAL PROPERTIES

力学学报. 2020, 52(5): 1245-1254

基于中间构形的大变形弹塑性模型

A LARGE DEFORMATION ELASTOPLASTIC MODEL BASED ON THE INTERMEDIATE CONFIGURATION

力学学报. 2019, 51(1): 182-191

旋转圆柱绕流流场特性分析

ANALYSIS OF FLOW CHARACTERISTICS AROUND A ROTATING CYLINDER

力学学报. 2021, 53(7): 1900-1911

中国高速列车研发与展望

RESEARCH, DEVELOPMENT AND PROSPECT OF CHINA HIGH-SPEED TRAIN

力学学报. 2021, 53(1): 35-50



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑哲敏先生逝世周年纪念专刊

流体弹塑性理论模型的历史意义和发展前景

邓国强¹⁾ 杨秀敏²⁾

(军事科学院国防工程研究院, 北京 100850)

摘要 郑哲敏与合作者一起创建的流体弹塑性理论, 是研究强作用下物质力学行为特征的一门基础工程科学. 该理论从创建至今近 60 年, 经历了模型化、软件化、工程化等发展阶段, 日臻成熟, 从中研发出的系列工程化模型, 对解决强爆炸效应等科学计算难题, 起到了核心支撑作用. 具体工程应用中, 尚须进一步发展, 需要做到: 完善的理论能真实反映岩石力学多变行为、成熟的模型能全面描述强作用下岩石破坏过程、新型计算框架能满足基础理论普适性要求、多种材料试验能提供仿真全方位数据需求、破坏分区能精细刻画常规侵彻爆炸破坏特征. 做到上述内容, 需继续完善该理论模型, 建立起国家层面的工程化构架和标准, 并研发可外挂到数值仿真软件系统的流体弹塑性模型软件包和相应数据库.

关键词 历史意义, 发展前景, 流体弹塑性, 理论模型, 工程化, 强作用

中图分类号: O383 文献标识码: A doi: [10.6052/0459-1879-22-240](https://doi.org/10.6052/0459-1879-22-240)

HISTORICAL SIGNIFICANCE AND DEVELOPMENT PROSPECT OF HYDRO-ELASTO-PLASTIC THEORY MODEL

Deng Guoqiang¹⁾ Yang Xiumin²⁾

(Institute of Defense Engineering, AMS, PLA, Beijing 100850, China)

Abstract The hydro-elasto-plastic theory independently created by Che-Min Cheng and his collaborators is a fundamental engineering science to investigate the mechanical properties of materials under violent dynamic loads. The theory has been in development for nearly 60 years since its establishment, and it has gone through the development stages of modeling, software, and engineering, and become increasingly mature. The series of engineering models developed from it have played a core supporting role in solving scientific computing problems such as strong explosive effects. However, in specific engineering applications, further development is required, and the following aspects should be done, such as improving the theory which can truly reflect the changeable behavior of rock mechanics, developing the mature model which can comprehensively describe the failure process of rock under violent dynamic loads, establishing a new computing framework which can meet the universal requirements of basic theory, conducting a variety of material tests which can provide all-round data requirements for numerical simulations, and establishing refined zones which can describe the damage characteristics of conventional penetration and explosion effects. To achieve the above, it is necessary to further improve the theory model, establish engineering frameworks and standards at the national level, and develop hydro-elasto-plastic model software packages and corresponding databases which can be plugged into the numerical simulation software system.

2022-05-31 收稿, 2022-08-08 录用, 2022-08-09 网络版发表.

1) 邓国强, 正高级工程师, 主要研究方向: 武器效应与工程防护. E-mail: hnjia@sina.com.cn

2) 杨秀敏, 中国工程院院士, 主要研究方向: 爆炸力学. E-mail: zhezhou@sina.com.cn

引用格式: 邓国强, 杨秀敏. 流体弹塑性理论模型的历史意义和发展前景. 力学学报, 2022, 54(8): 2075-2084

Deng Guoqiang, Yang Xiumin. Historical significance and development prospect of hydro-elasto-plastic theory model. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(8): 2075-2084

Key words historical significance, development prospect, hydro-elasto-plastic, theory model, engineering, violent dynamic loads

引言

1964 年, 郑哲敏先生与合作者一起独立于国外提出了流体弹塑性理论, 之后, 又进行了十年时间的完善. 该理论认为, 当作用力 (如爆炸地冲击波等) 远大于材料强度时, 采用无黏性可压缩流体处理; 当作用力接近材料强度时, 需计其材料强度效应; 当作用力再低, 只考虑弹性. 具体推导中, 将全应力分解为球应力和偏应力两部分之和, 球应力由状态方程控制, 偏应力由强度方程控制. 爆炸等强作用近区压力大, 状态方程起主导作用, 介质呈近似流体特性; 远区冲击波衰减后压力低, 强度开始起作用, 介质呈固体性质. 全部过程用统一方程组描述, 避免了固体和流体分区难题, 故称为流体弹塑性理论模型. 该理论模型的建立, 奠定了地下核爆炸力学效应科学计算的理论基础^[1-4], 为我国首次地下核爆当量预报做出了历史性贡献. 随后, 郑先生将流体弹塑性理论应用到破甲机理分析中^[5-8], 用近十年时间建立了优于国外的侵彻深度计算公式. 同时, 乔登江、郝保田、曾惠泉等将流体弹塑性理论应用到核爆炸效应分析中, 获得了地下核爆炸^[9-10]、触地核爆炸^[11]时岩体破坏分区和地运动等基本规律, 奠定了地下核爆炸效应试验及核袭击下工程防护的技术基础. 流体弹塑性理论从提出至今近 60 年, 发展日臻成熟, 应用领域不断拓宽, 成为了武器侵彻、爆炸等强作用问题解析计算、数值仿真等的理论基础, 获得了学术界的普遍认可^[12].

但流体弹塑性理论模型跨越流体和固体两大领域, 自身复杂, 需要多团队合作和长时间积累, 因而推广应用中遇到了发展瓶颈: 一是基础数据不全面, 理论模型涉及面广, 需要多种试验支撑, 而现有试验数据有限、使用条件限制多, 且多为最终结果, 缺少详细过程, 利用非常困难; 二是工程模型不统一, 在数十年中提出了各种各样的工程模型, 但这些模型并没有统一的框架, 更没有公认的标准, 因而各不通用, 形不成统一的软件模块; 三是细节处理不到位, 强作用涉及的物理力学问题多, 从作用近区的汽化、液化、粉化, 到作用中远区的剪切破碎、拉伸开裂等, 当前处理比较粗糙, 缺乏精细的理论、算法

和控制参数. 这些瓶颈, 已经严重制约了流体弹塑性理论模型的工程化, 使其难以充分发挥出核心支撑作用. 基于流体弹塑性理论, 系统建立强作用下岩土等介质力学特性与破坏行为的模型、算法和数据库, 即流体弹塑性理论模型的工程化, 在国家战略需求中的作用越来越显著, 也越来越紧迫.

本文借鉴钱学森先生和郑哲敏先生倡导的工程科学理念^[13], 就突破现有瓶颈、实现流体弹塑性理论模型的工程化, 提出解决思路.

1 流体弹塑性理论发展历程

流体弹塑性理论模型国内外发展过程类似, 大致都经历了理论创建阶段、模型化发展阶段、软件化实现阶段、工程化应用阶段, 当前处于从软件化向工程化过渡阶段. 这四个阶段独立存在, 依次递进, 循环发展, 正如钱学森先生所言“自然科学、技术科学和工程技术之间的相互影响和相互提携”. 但四个阶段时间跨度近 60 年, 阶段之间的时间界限并不清晰, 因而本文以十年为周期, 以十年内相关学者的主要研究内容为划分依据.

1.1 理论创建阶段 (20 世纪 50—70 年代)

20 世纪 50—70 年代是强作用下材料动力特性研究的黄金时期, 因地下核爆炸效应研究的需要, 对主要试验场地岩土介质的物理力学行为进行了系统深入的研究, 基于现场试验获得爆炸破坏分区的等级划分及其介质的破坏特征, 提出了可统一描述这些特征的流体弹塑性理论模型, 解决了强作用近区到远区的一体化计算难题.

1959 年, Nuckolls^[14] 提出了地下核爆炸的计算模型, 把岩石的变形分为汽化、压碎、破裂、弹性四个区域, 并对 Rainer 爆炸试验进行计算. 郑哲敏先生针对该模型的不足, 于 1964 年独立于国外^[15] 建立了一套自己的流体弹塑性理论^[1], 并持续改进完善^[2-4], 该理论将爆后岩石分为汽化、液化、压碎、破裂和弹性五个区域 (图 1 和图 2), 采用统一方程组进行描述: 在弹性区为各向同性弹性体; 在破裂区认为仍处于弹性状态, 但增加裂纹宽度限制; 在压碎区认为仍是连续介质, 较高压力时接近于可压缩理想流体, 较低压力时接近于有一定弹塑性性质的沙介

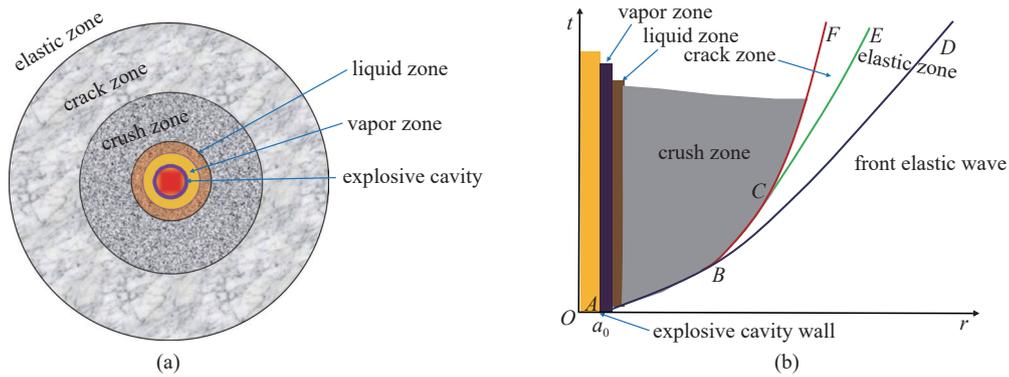


图 1 (a) 五分区空间分布和 (b) 激波走时和分区形成

Fig. 1 (a) Spatial distribution of five zones and (b) wave travel time and zones evolution

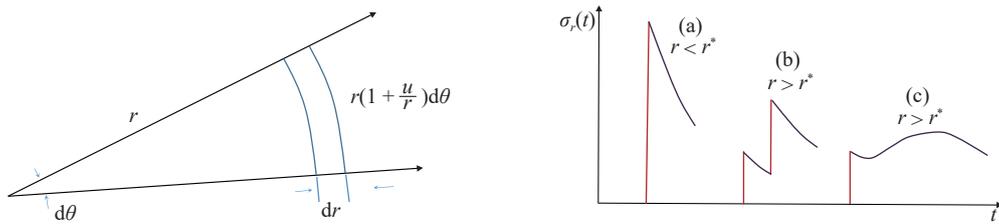


图 2 地下核爆炸中岩石变形分区

Fig. 2 Rock deformation zones in underground nuclear explosions

质; 液化区和汽化区, 介质直接按流体处理. 岩石具体状态, 由地冲击压力确定. 采用这一套方程组型, 结合岩石力学参数, 通过数值计算, 就可预测出地下核爆炸应力波衰减规律、破坏分区及空腔尺寸等. 而国外同时期建立的类似模型, 被称为弹塑性流动 (elastic-plastic flow), 由 Wilkins^[15] 建立, 1963 年 4 月 Wilkins 提交了题为“Calculation of elastic-plastic flow”的 AD 报告, 报告号为 ADA395185, 该内容同时被 1964 年公开出版的 *Methods in Computational Physics* 第三卷收录, 1969 年 Wilkins 又进行了修正并公开发表. 1964 年和 1969 年的两篇文献是 Wilkins 本人及他人的主要参考文献, 1963 年的报告直到 2001 年后才有引用.

复杂的流体弹塑性模型, 需要有介质力学行为特征的系统试验数据, 包括超高压物态方程、基本弹塑性参数、压实效应参数、动力效应参数、破裂参数等. 围绕这些需求, 国内外开展了系列的试验设备研制和材料数据测试.

20 世纪 60 年代, 美国研制出适用于动高压段的炸药平面波发生器, 并进行了大量地质材料冲击压缩试验; 20 世纪 70 年代初, 美国又研制出适用于低压段的多种类型的轻气炮、空气炮, 进行了 10 GPa 以下的材料动力学冲击试验. 与此同时, 提出

了拉格朗日等分析方法, 通过试验应力、质点速度曲线导出本构关系. 采用这些设备和技术, 对花岗岩、石灰岩、凝灰岩等进行了系统试验, 形成了完整的冲击压缩数据^[16-18]. 同一时期, 原苏联梁霍夫等^[19-21], 获得了强冲击下花岗岩、大理岩、石灰岩等的动力学性能, 指出在吉帕量级或更高的压力下岩石性状和晶体结构的变化及相变有关.

1.2 模型化发展阶段 (20 世纪 70—80 年代)

在积累了大量原始数据后, 流体弹塑性理论进入模型化发展阶段, 这得益于两个方面的进步: 一是计算机硬件系统进入了快速发展阶段, 超大规模集成电路计算机已面世, 体积更小, 重量更轻, 运算速度更快, 巨型机升级, 微机开始出现, 高级编程语言开始标准化推广, 如 1977 年形成并使用至今的 Fortran 77 标准; 二是数值仿真计算软件逐渐成熟, 由简单的计算程序发展到仿真软件, 如美国强作用计算中使用最多的专业软件 CTH^[22], 最早可追溯到一维拉氏状态方程 CHARTD, 在 CHARTD 基础上, 1979 年推出欧拉版 CSQ, 1982 年发展到二阶精度, 1990 年形成完整软件包, 并命名为 CTH, 随后研发了适应超算平台的并行版 PCTH; 又如当前国内使用较广的动力学软件 Ls-Dyna3d^[23], 可追溯到美国

劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 研发的 1976 版, 1988 年开始由 LSTC 公司进行商业化。20 世纪 80 年代, 是数值仿真计算软件的大发展时期, 也是流体弹塑性理论进入模型化的重要阶段。

流体弹塑性模型有很多, 典型代表有 Tillotson 状态方程与 Mohr-Coulomb 强度方程的组合。Tillotson 状态方程^[24]考虑了固体、流体及流固共存的三种状态: 其在高密度和低内能的条件下, 为固体状态形式, 在低密度和高内能的条件下, 为理想气体形式; 实现了固态到流体、流体到固态及共存状态的平滑过渡, 在中高压段能与 Hugoniot 资料相匹配, 在超高压段又能近似到托马斯-费米-狄拉克 (Thomas-Fermi-Dirac, TFD) 理论^[25]; 该公式形式相对简单, 使用方便, 既能应用到金属, 也可应用到岩石。考虑压实效应时, 典型方程来源自 TENSOR 程序的孔隙塌漏 (pore collapse) 模型^[26], 该模型仅需要两条试验曲线, 能与试验紧密结合, 假设更少, 也就能更接近真实的物质世界。在孔隙塌漏状态方程的基础上, 开发出更为简化的数据列表型的状态方程^[27]和解析型的 Johnson-Holmquist 状态方程^[28], 这两方程在编制思路与空隙塌漏状态方程完全一致。在国内, 曾惠泉等^[11]在研究触地爆炸地运动规律时, 对不同压力段的状态方程采用 Grüneisen 形式进行拟合, 使方程能描述从低压段到高压段, 并考虑了压力卸载后的压实效应。乔登江^[9]在计算分析地下核爆炸时, 采用了 Tillotson 状态方程, 而在强度方程时考虑了静水压力及岩石破碎的影响。

1.3 软件化实现阶段 (20 世纪 80 年代)

在流体弹塑性理论模型化的同时, 多数模型也编制出了相应的软件模块, 包括两个方面的工作: 一是模型计算方法的软件包; 二是与计算方法相一致的材料数据库。

在软件包方面, 基于全面系统的试验数据, 逐渐提炼出物理力学模型, 建立起通用的材料行为计算软件标准模块, 可嵌入到不同的数值仿真软件系统中, 典型模块如 ANEOS^[29-30], SESAME^[31-32]等, 这样不仅减轻了数值仿真软件系统研发的难度, 也极大地方便了用户的使用。例如, 前面提到的 CTH 软件, 最早源自状态方程计算程序, ANEOS 模块也脱胎于该状态方程, 当前两者独立发展, ANEOS 能与 CTH 友好结合, 也可与其他类似软件结合。SESAME 模块同样出自美国洛斯阿拉莫斯国家实验室, 由状

态方程理论组的 Abdallah 等研发, 是当前使用更广的强作用物态方程软件包, 被大多数流体动力学数值仿真软件所采纳, 该软件包考虑了静水压力、内能、自由能以及空隙可压实性等, 提供有标准接口, 包含了当前使用的大多数材料类型, 且不断更新。

在试验数据库方面, 完成了系统冲击动力学试验, 积累了大量岩石和矿物等材料的冲击压缩性能数据。例如, 俄罗斯联邦核研究中心的 Trunin 等^[21]收集整理了俄罗斯从 1949 年到 2000 年间对凝聚态物质的冲击压缩、绝热膨胀试验结果, 其中包含了 50 余种岩石和矿物的数据。同样, 美国也开展了大量类似试验, 如洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LASL) 因曼哈顿项目等的需要, Marsh 收集整理 5000 余组冲击压缩试验数据, 并于 1980 年由加利福尼亚大学出版社出版^[16]。

流体弹塑性软件包, 既是对理论模型的具体化, 是知识的积淀; 也是对大量试验数据的洗涤, 是时间的积累。

1.4 工程化应用阶段 (20 世纪 90 年代)

流体弹塑性理论模型的工程化应用, 离不开与数值仿真软件系统的结合。国外以美国桑地亚、劳伦斯利弗莫尔等国家实验室为代表的一批研究机构, 同步研制出了一系列强作用数值仿真专业软件系统, 如 CTH 和 PRONTO^[33]等, 且不断地根据工程应用需要, 将更先进的数值计算技术、更高性能的硬件计算平台, 综合集成到数值仿真之中, 使其具有更加强大的计算功能, 而流体弹塑性软件包所提供的材料动力学算法和数据, 则是其中关键环节。当前成熟的数值仿真软件系统, 一般都自带有适合强作用的材料本构模型和数据参数库, 大部分还留有流体弹塑性专用软件包的接口。

流体弹塑性软件包和数值仿真求解系统两者独立研发、集成使用, 如 SESAME 软件包, 在 CTH 等数值仿真软件中采用外挂形式加载, 即数值仿真软件仅留有调用接口, 若无特殊授权, 则无实质求解模块和具体数据。这样带来的优势非常显著。从研发角度看, 实现了求解系统和流体弹塑性模型的分离, 两者可由多个不同的团队独立研制, 能发挥各自的专业特长, 且标准的流体弹塑性软件包可与不同数值仿真软件配合使用, 这样大大增加了专业性、减少了研发难度、降低了研发成本、加快了研发进程。从工程应用角度看, 使用者并不需要系统的流体弹

塑性理论知识,也不需要技术复杂、种类繁多、花费高昂的材料动力学试验,而仅需要把握问题的属性、有基本的力学数据即可开展相应的工作,这是工程化的意义所在。从软件监管角度看,实现了对强爆炸相关计算模块的掌控,可严格控制其流向,可实现数值仿真软件系统在更大范围内的使用。另外,工程中遇到的具体问题,反过来也将对理论模型提出新的要求,从而促进理论模型的完善。然而,流体弹塑性模型工程化需要一项一项来实现,过程漫长,当前模型工程化程度尚低。

2 流体弹塑性模型工程化发展现状

2.1 总体上种类多且工程背景强

数十年间因各种特定需要,研究人员建立了各种各样的工程化模型,其中针对地下核爆炸效应的工程化模型,涵盖的压力区间宽、考虑的影响因素多。然而,这些模型大多作为整体研究的一部分出现,公开资料有限,难以把握全貌,下面选取公开程度相对高、代表性强的几种模型进行简单介绍。

国内在郑哲敏先生提出的流体弹塑性理论基础上,先后建立了多种典型工程化模型:一是为研究触地核爆炸效应,原工程兵科研三所(简称工程兵三所)曾惠泉等^[11]建立的压实效应模型;二是为分析地下核爆炸力学试验,西北核技术研究所(简称西核所)郝保田等分别建立的变量模量模型、三卸载模型、含水影响模型^[10];三是为分析地下强爆炸试验中早期辐射输运影响,西核所田宙等建立的辐射输运与流体动力学耦合计算模型^[34];四是为研究地下核爆炸中远区应力波衰减,中国科学技术大学(简称中科大)刘文韬等^[35]建立的流体弹塑性损伤模型。

国外工程化模型数量更多,分通用模型和专用模型两类。在通用模型方面,依据流体弹塑性模型将变形分解为体积变形和剪切变形两部分,前者由状态方程控制,后者由强度方程控制。高压状态方程中,有四分区 Tillotson 方程(1962)、三分区 Puff 方程(1966)^[36]、六分区 TAM 方程(1971)^[37]、SESAME 方程、ANEOS 方程等。强度方程中,有 von Mises 方程、Mohr-Coulumb 方程等,这些模型中大部分已嵌入到流体动力学数值仿真软件中,并且状态方程和强度方程可搭配使用,从而满足多种工程应用需要。在专用模型方面,可计算地下核爆炸效应的数值仿真软件系统中,都嵌入了专用的流体弹塑性工程化

模型,一般对强作用下介质力学行为有全面细致的处理,包括岩石介质的汽化、液化,空隙压缩和体积变形耦合,加、卸载时的模量变化,温度效应,岩石从屈服、强化到软化等。

2.2 几种典型流体弹塑性模型比较

整理历年资料,综合对比可发现流体弹塑性模型的典型代表仍是来自地下核爆炸效应计算,这里选取国内外不同时期的 8 组模型进行比较分析,如表 1 所示。这 8 组模型的建立,均有地下核爆炸效应研究的背景,且均是针对具体试验场岩石介质的一种或几种效应而建立的,因而各不相同、各有特色;但从力学原理分析,又都是在流体弹塑性理论这一大框架下进行的,是对理论的具体模型化结果,并能嵌入到相应的数值计算软件系统中。

从压力区间适应性看,这些模型中分两类,一类是适应于近区到远区,可详细计算地下核爆炸的 5 个区域,如西核所模型^[10]和 LLNL 的全过程模型^[38];另一类主要偏重于中远区的地运动规律和地应力波传播,如工程兵三所的压实模型^[11]、中科大的损伤模型^[34]和 LLNL 的花岗岩模型^[39]。从屈服破坏全过程角度看,早期模型大多基于 von Mises 屈服准则,对岩石破坏全过程描述比较简单,而后期模型,如中科大的损伤模型和 LLNL 的花岗岩模型,则详细将屈服破坏过程分为弹性、强化、软化和残余几个阶段。从辐射流体角度看,大部分流体弹塑性模型都假定辐射流体阶段已结束,并将辐射流体结束时的结果作为初始条件,但详细考虑爆轰瞬间爆室岩石壁能量来源时必须从辐射流体段开始。

2.3 流体弹塑性模型发展的主要特征

梳理总结上述材料,流体弹塑性模型发展的主要特征如下。

(1) 流体弹塑性模型已成为强作用力学效应计算的理论基础。在高压状态方程方面,一般通过加卸载走不同路径、变模量等技术来考虑岩石的压实效应,较高压力段考虑岩石的液化、汽化等;在强度方程方面,考虑静水压力对强度的影响,并且将岩石屈服破坏过程分为两个或三个阶段,部分模型考虑了应变率和温度的影响,开始实现对岩石从完整到破碎全过程的定量描述。

(2) 流体弹塑性模型软件包已开始与数值仿真软件系统分离,由不同部门独立研发,专业性变强,研发难度降低,使用便捷性加大,相互促进、发展更

表 1 8 种典型流体弹塑性模型

Table 1 Eight typical fluid elasto-plastic models

序号	模型名称	提出背景及时间	模型描述	模型特点
1	工程兵三所压 实模型 ^[11]	触地核爆炸二维地运动规律, 1972—1984	状态方程为Grüneisen形式,分高压段和低压段,考虑压实效应;强度方程采用von Mises屈服准则.	考虑高压岩石压实效应,形式 简洁、参数易定
2	西核所变模量 模型 ^[10]	地下核爆炸效应试验二维数值 计算,1970—1999	状态方程为Tilloson形式,考虑了介质的固态、气态和固气共存三 种情形,通过加卸载路径不同来考虑压实效应;在弹塑性区,考虑 静水压力影响,采用von Mises屈服准则;岩石分完整和破碎两种 情况.	考虑多物理状态变化、压实 效应、岩石完整性等影响
3	西核所三卸载 模型 ^[10]	地下核爆炸效应试验一维数值 计算,1970—1999	加载方式同2.卸载可用三种形式:Grüneisen方程、Tilloson方程 和考虑冷压、热压及电子压的三项式.强度方程基本同上.	卸载有三种形式可选
4	西核所含水模 型 ^[10]	岩石含水量对地下核爆炸效 应的影响,1970—1999	将岩石看作由岩石和水两组分组成;状态方程采用Water-Boote模 型;当冲击波压力高于5 GPa时,水全部汽化,密实岩石和水的压力 平衡迅速.	可考虑岩石含水量影响
5	西核所辐射耦 合模型 ^[34]	地下核爆炸早期辐射运输对 地运动影响,2012	采用辐射流体与流体弹塑性耦合模型.地下核爆炸时,辐射运输 能量在爆室壁面沉积而形成壁面压力,压力振荡增大,但最终计 算结果,辐射耦合模型与流体弹塑性模型计算结果趋于一致.	考虑地下核爆炸时辐射运输 能量在爆室壁面沉积过程
6	中科大损伤模 型 ^[35]	地下核爆炸时中远区应力波 传播,2002	状态方程以实验Hugoniot曲线多项式拟合,考虑孔隙率修正.强度 方程以初始、极限和残余三个屈服面为基准,分别以塑性应变和 损伤度控制屈服过程,考虑应变率提高效应.	以三个屈服基准面详细考虑 了岩石屈服破坏全过程
7	LLNL全过程 模型 ^[38]	地下核爆炸效应全过程, 1974	状态方程将加载和卸载分别考虑.压力分解为流体压力和固体压力, 考虑相变和压实效应影响.流体压力采用Tillotson方程,低压 段与Hugoniot数据匹配,高压段与TFD理论相符;固体压力采用 Walsh观点,考虑裂纹、孔洞、温度等影响.卸载时考虑残余体积 变形,采用四段分别计算弹性、部分压实、完全压实及相变.偏 应力计算考虑温度软化效应,采用Mohr-Coulumb理论和von Mises屈服准则.	考虑了地下核爆炸效应全 过程,适应范围比较宽
8	LLNL花岗岩 模型 ^[39]	地下核爆炸、超高速撞击等 效应计算,2001—2003	状态方程考虑动力空隙压缩以及塑性变形引起的膨胀.强度方程 考虑尺度影响、体积变形、屈服、材料损伤、空隙压缩等影响, 采用弹性-黏塑性模型,耦合了损伤模型.	详细考虑花岗岩屈服 破坏过程

快,可实现数值仿真方法在更大范围内的应用,也方便对特殊用途的流体弹塑性模型及参数进行严格监管.

(3) 流体弹塑性理论创建时间国内外基本同步,但软件化和工程化阶段差距明显,主要表现在:国内数据基础薄弱,建立的模型相对简单,抓住了主要因素,但考虑因素较少、没有完成模型的软件化;国外试验数据丰富,建立的模型数量多,考虑的因素更全面、更细致,且已形成数个软件包,可与不同的数值仿真软件系统配合使用.

3 流体弹塑性模型工程化发展方向

流体弹塑性理论的建立为解决地下核爆炸效应问题提供了科学基础,但具体工程应用要复杂得多,存在各种问题,需要更进一步发展.

3.1 完善理论真实反映岩石力学多变行为

岩石是矿物或岩屑在地质作用下按一定的规律聚集、演化而形成的,具有自身的矿物成分、结构与构造^[40],而这些矿物成分的存在以及其性质、结构、构造等的变化,都会对岩石的物理力学性质产

生影响,导致岩石真实力学行为十分复杂,带有固有的多变性和不确定性;并且,受到载荷性质、温度、时间、加载速率以及材料应力历史和加载路径等各种因素的综合影响.这些都已成为岩石本构理论建立的制约条件,使得至今没有形成如同金属一样、受到公认的岩石本构理论^[41-44].

流体弹塑性理论是一种抽象本构理论,是在掌握介质力学行为客观规律的基础上,进行简化精炼后,基于连续介质或非连续介质框架而主观建立的;其建立存在一个逐渐完善的过程,因而主、客观之间必然存在一定差异,差异的大小,既取决于对介质行为的认知程度,也受当时力学水平的制约,还受试验条件和精度需求的影响.国内外流体弹塑性理论创建时均以地下核爆炸效应研究为背景,岩石多为完整性较好的花岗岩,因而除明显的节理、裂隙外,多采用连续介质模型,且对遇到的各种问题做了极大简化,利用当时极其简陋的计算条件进行分析,早期计算结果在近区与试验结果基本一致,但在中远区则存在一定差异,后期更详细考虑岩石力学特性,也取得了与试验基本一致的结果.花岗岩是地壳的

主要成分,但地下工程建设中寻找花岗岩地质却并不容易,多数为沉积岩或变质岩,其节理、裂隙发育,属于自然缺陷明显的复杂结构体,随着科学计算技术进步,可以定量考虑更多复杂因素,也需要进一步扩充、完善流体弹塑性理论。

3.2 成熟模型全面描述强作用岩石破坏过程

强作用下复杂多变的岩石力学行为,自然形成了类型丰富的岩石流体弹塑性理论模型。现有岩石本构模型和状态方程,大多是在均质金属理论的基础上,考虑岩石的某些力学特性演化而来的,但两者存在明显差异:岩石属于不均质体,大体由结构体和结构面组成,强度方程必将受此影响,因此,强度方程建立时必须考虑岩石的完整性;静水压力对强度有非常强烈的影响,三轴试验表明,岩石屈服强度随着静水压力的增加而急剧增长,刚度、强度、变形做功等随着静水压力增加而增大;岩石属于脆性材料,抗压强度远高于抗拉强度和抗剪强度,且与静水压力有关,且允许体积压缩或膨胀;三轴破坏面与 π 平面的截线形状随着正应力的增加逐渐从带圆角的三角形过渡到圆形;材料表现为非关联塑性流动;稳定性不符合 Drucker 假设,一般由依留申稳定性假设决定;动力提高系数在相同应变率时拉伸比压缩提高幅度要大些。

对于上述特征,需要更精细的弹塑性理论进行处理:在应变空间表述的岩土介质的屈服面不仅可以扩大、不动,还可收缩;岩土介质的屈服面经常不能用单一的正则函数表述,需要使用奇异屈服面;正交的流动法则经常不成立;弹性系数不再是常数,它可随塑性变形的发展而变化,成为弹塑性耦合。

另外,在物理本质上,强作用下岩石的破坏全过程是大量微裂纹及微空隙在加卸载时的扩展、汇聚,宏观上表现出开裂和破碎,破碎成颗粒后因内摩擦而具有部分承载力;在力学特征上,强作用下岩石的破坏全过程表现为强化、软化和残余。但传统塑性模型不能很好描述这些现象,需要建立塑性损伤或连续与非连续耦合等新型模型。

3.3 新型计算框架满足基础理论普适性要求

流体弹塑性理论是一种基础工程科学,反映出强作用下材料的力学行为特征,具有普适性,是一种根本性的指导原则。但这类理论是一套非常复杂的体系,解析方法很难获得解析解,需要与相应的数值仿真软件结合,借助高性能计算机方可求解。但这些

数值仿真软件多是针对某一类问题而研发,有固定的基本控制方程、求解理论框架和数据传递流程,这些方程、框架和流程一旦确定后就固化到软件系统中,改动非常困难,并且软件规模越大,改动越难。各软件求解理论框架不同、各自优势不同,如:地下核爆炸力学效应计算中多采用欧拉型有限差分法求解,容易采用高精度格式来处理冲击波间断,但难以处理物质界面,即使采用物质示踪点、体积份额法等物质算法获得物质界面,也只是一种近似,难以达到拉格朗日型的清晰程度,在处理拉伸断裂等新出现的内界面时难度大;且如果岩石发生汽化、液化时,也很难将汽、液、固三者界面清晰呈现,这样当同一个网格中存在汽、固两种形态时,将很难区分是介质汽固共存状态导致,还是含物质界面导致。

另外,这些数值仿真软件中,一般都集成了一种或多种类型的流体弹塑性模型,拥有特定的算法流程和数据接口,换言之,这些流体弹塑性模型也是针对特定问题而研发的,具有一定的适用区间,超出区间则不可用。如常用的 $P-\alpha$ 方程,则仅适用于压力较低的空隙压实段,而不适用于汽化、液化段;Tillotson 方程则刚好相反,适用于高压段的汽化、液化等,而对压力较低的空隙压实没有专门处理;Johnson-Holmquist 对压缩段处理较详细,而对 Lode 角、拉伸断裂等处理过于简单。

3.4 多种材料试验提供仿真全方位数据需求

在强作用数值仿真模型中,岩石力学性能的描述需要考虑近区的压实、液化和汽化,也需要考虑中远区静水压力、应力角、应变率等对强度的影响,还需要考虑岩石自身节理、裂隙、孔洞等初始缺陷的影响,因而,需要的数据将非常庞大。既需要高压段的飞片等冲击压缩试验,也需要中低压的 SHPB 等试验;既需要单轴试验,也需要三轴试验,获得空间屈服面;既需要抗压型试验,也需要抗拉型试验;既需要破坏前完整岩石的试验曲线,也需破坏后的残余承载能力参数;既需要室内试件的岩石试验,也需要现场原位的岩体试验;既需要汽化前的 Hugoniot 试验确定,也需要汽化后的 TFD 理论估算。

当前,中低压段岩石的静态和动态试验数据很多;但高压段数据仍非常少,且这些数据均未形成系统,仅针对某一特定问题而进行,只是所需数据的一小部分,又因岩石自身特性各异,因此,难于应用到其他场合。另外,当前的绝大部分物态方程数据是针对

对单质材料的,关于岩石的数据非常稀少且粗略,是一种理想化情况,没有涉及到岩石颗粒结构、初始缺陷、应力角等的影响,国外也仅有十余种岩石的完整试验数据.如此稀少的试验数据,难以支撑起精确理论分析和数值仿真的需要,因此,不得不避开高压区,而以近区试验数据代替,以此来分析中远区的应力传播规律,也不得不将材料模型简化到极限,以使分析能进行下去,这也是造成数值仿真数据与现场试验结果之间存在较大差异的一个重要原因.

简而言之,数值仿真对材料力学性能参数的需求是全方位的,需要的是强度-压力-密度-内能-加载率等的多维空间数据,而每种类型的精细材料试验,只能获得某一个加载区段或某个方面的数据.因此,不经过全面规划、长期积累,是难以系统地构建起多维材料数据空间的.

3.5 精细分区刻画常规侵彻爆炸破坏特征

郑哲敏先生在建立流体弹塑性理论时,将岩体破坏分为 5 个区域.对于地下核爆炸近区强作用而言,这样分区是可行的;但对于常规武器侵彻、爆炸类不能使岩石液化的弱作用而言,则这样分区略显粗糙,需要更为精细的描述.以侵彻、爆炸效应为例,弹头接触面附近压力远超岩石材料强度,表现为材料被完全粉碎为白色粉末并充满弹道,其后被爆炸气体排出,形成烟雾;随着离弹道距离的增加,材料破坏程度递减,依次呈现出粉末、小颗粒、小岩块和大岩块的状态,对应着空腔区、体积压碎区、剪切破坏区和拉伸破坏区.表层岩石因抗拉强度低而出现自由面效应,形成弹坑;对于中远区的地下结构,还需要考虑岩石结构面的影响,不同峰值、不同作用时间的载荷将激活不同尺度的岩块,使之发生层裂或震塌,破坏地下结构.

上述分析总体上与原有流体弹塑性模型一致:在作用近区状态方程起主导作用,岩石发生压实、粉化等体积变形破坏;在中远区则强度方程起主导作用,岩石发生剪切、拉伸破坏.但为更准确地反映岩石的破坏特征,则需要对全作用过程下岩石的力学行为进行更系统、深入的描述,如:考虑空隙压实后加、卸载路径不同而导致的作用近区粉化现象;考虑加载速率不同而导致的裂纹密度的不同;考虑应力波波形对不同尺度岩石块体的激活;考虑已有节理、裂隙等缺陷对新裂纹形成、演化的影响等.

4 流体弹塑性模型工程化建议

郑哲敏先生 2011 年发表在《力学学报》的《学习钱学森先生技术科学思想的体会》一文中,明确指出:“力学作为自然科学中最早趋于成熟的学科,其作为基础学科发展的空间,相对地说已经比较小了,而它在解决工程技术乃至其他学科中的问题的作用却不断在扩大”.这里顺着钱先生和郑先生的学术思想,对流体弹塑性理论模型工程化,提出建议如下.

4.1 进一步完善流体弹塑性理论和模型

流体弹塑性理论经过数十年发展,体系已完备,但主要针对的是地下核爆炸这一特定的需求背景,当时没有性能强大的计算硬件,也没有功能全面的数值软件,且缺乏可信的试验数据.当前环境与理论创建时已大有不同,“禁核”已是全球共识,计算软、硬件已发生质的飞跃,各种公开数据较多.但对于地下核爆炸、超高速碰撞等重要的强作用,仍有诸多问题尚待进一步扩充、完善,主要有以下几点.

(1) 建立从辐射流体到流体动力学的传递机制.地下核试验中,核装置放置在爆室之中,爆室内充满空气,首先计算的是爆后形成辐射波和强冲击波,然后将其结果提供给围岩流体弹塑性方程,作为方程的边界条件(岩石烧蚀层);而对钻地核武器,弹头与岩石紧密接触,核装药起爆后将烧蚀周围的岩石,使花岗岩分为烧蚀流体区和流体弹塑性区两个部分;以花岗岩为例,其主要由 SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O 等氧化物构成,涉及七种主要元素,这些元素对核爆 X 射线的吸收率不同,因此,需要确定出花岗岩在不同密度和温度条件下的吸收系数,且计算过程中须考虑光电效应、康普顿效应等,而这些基础数据是当前缺乏的,也就不能定量获得不同介质中核爆炸辐射能量到流体动力学能量的传递机制.

(2) 完善动高压段岩石卸载粉化破坏过程描述.核爆炸强作用下,近区岩石发生汽化、液化和粉化,这个过程消耗的爆炸能量最多,其中汽化和液化取决于强冲击作用幅值与岩石汽化能和液化能,是比较明确的;粉化是因卸载路径与加载路径不同而导致,是一种卸载破坏,尽管加载时已有比较完善的试验测试手段和理论计算方法,但对卸载破坏过程尚缺少系统的研究,在当前数值仿真中,多用空隙率或变模量来计算卸载过程,但卸载过程不仅与空隙率还与密实岩石矿物自身结构等因素相关.

(3) 改进动载下中低压段岩石破坏全过程描述. 岩石的屈服过程一般经历弹性、强化、软化、残余等阶段. 载荷超过初始屈服点后, 进入相对平缓的强化上升阶段, 岩石内微裂纹形成、扩展、相互交联, 对应的塑性应变增大, 此时可以采用塑性理论来描述; 在达到极限承载点之后, 进入陡峭的软化下降阶段, 甚至认为是突变, 最终因颗粒内摩擦而使岩石具有一定的残余强度. 对于软化、残余以及加载速率等研究尚不充分, 没有覆盖全过程.

(4) 加强动载下远区岩石块体导致的非连续性研究. 实际工程中自然岩体一般存在由节理、裂隙等软弱面构成的结构面, 岩体承载能力与结构面的分布、性质和力学特性等密切相关, 结构面的存在使岩体具有非连续性, 削弱其整体强度、降低其稳定性, 是地下工程破坏的一个重要因素. 在工程设计中, 多采用综合考虑结构面状态得到的折减强度作为设计值. 在流体弹塑性模型中, 则需要将连续介质发展到非连续介质, 将岩石结构面作为影响爆炸作用远区工程安全的一个关键因素加以考虑.

4.2 建立工程化模型国家构架及行业标准

从流体弹塑性理论的模型化过程可知, 其需要庞大的数据支持和全面的专业知识, 这是普通项目或工程难以支撑的, 也是短时间内难以实现的, 更是普通试验设备所不具备的, 但这些数据又极其重要, 也是国外对我国的严格限制之处. 因而流体弹塑性模型工程化必定是在国家层面统一进行, 各行业共同参与. 具体来说, 分以下两步进行.

(1) 在国家层面建立流体弹塑性模型工程化构架. 流体弹塑性模型是一种系统的、复杂的、通用的基础模型, 其工程化实现涉及领域多、资金耗费大、时间花费长, 必须由国家主导, 在国家层面建立起工程化构架, 引导各部门协作, 保持各行业独立, 同时获得数据内部共享, 对每种材料或介质根据需求逐项推进, 这样才能最终实现流体弹塑性模型的工程化. 美国是在其能源部主导下, 以合同形式委托不同机构来统一进行的, 实现了项目发展有序、数据利用高效.

(2) 在行业领域建立流体弹塑性模型工程化标准. 流体弹塑性模型需求的数据类型繁多、每种类型数据量庞大, 且可能是在不同的机构、由不同的科研人员、在不同精度的试验设备上、在不同的时间段获得, 在这种状况下, 如果事先没有形成统一标

准, 也没有统一的采纳准则和更新机制, 则很难将这些数据有效利用, 必须国家分工、行业合作建立起工程化标准. 美国的工程化标准由其国家实验室专门团队负责, 在团队内拥有各个领域的专业人员, 相关成果实时发布.

4.3 研发流体弹塑性模型工程化软件包

流体弹塑性理论模型自身复杂且专业性强, 因而发展趋势是将流体弹塑性模型工程化软件包与数值仿真软件系统独立研发, 从而降低研发难度, 增加专业性, 加大便捷性. 建议如下三点.

(1) 设立流体弹塑性模型的专业研发团队. 流体弹塑性理论模型涉及的专业有流体力学、固体弹塑性力学、量子力学、高速试验力学、软件技术等, 专业差异极大, 如果没有一个高水平的专业团队长时间坚持, 是走不到软件化的, 更走不到工程化的.

(2) 研发跨平台、兼容强的工程化软件包. 经历数十年的发展, 当前已经具备研发流体弹塑性模型工程化软件包的条件, 但这一软件包需要可挂载到不同的数值仿真软件系统中, 因而应具有跨平台特性, 可兼容不同的编程环境.

(3) 建立内容全面、可持续更新的数据库. 一方面根据流体弹塑性模型需要进行各种条件的基础试验, 另一方面根据软件包需要收集整理数据库, 去伪存真, 不断充实发展, 达到工程化, 为数值仿真最终走向数字试验提供坚实基础.

参 考 文 献

- 1 郑哲敏, 解伯民. 关于地下爆炸计算模型的一个建议//郑哲敏文集. 北京: 科学出版社, 2004: 166-190 (Zheng Zhemin, Xie Bomini. A suggestion on the calculation model of underground explosion//Collected Works of Zheng Zhemin. Beijing: Science Press, 2004: 166-190 (in Chinese))
- 2 郑哲敏, 谢伯民, 刘育魁等. 关于地下核爆炸理论计算方案的一个建议 (第 2 稿)//郑哲敏文集. 北京: 科学出版社, 2004: 191-201 (Zheng Zhemin, Xie Bomini, Liu Yukui, et al. A proposal on the theoretical calculation scheme of underground nuclear explosion (second draft)//Collected Works of Zheng Zhemin. Beijing: Science Press, 2004: 191-201 (in Chinese))
- 3 郑哲敏, 谢伯民, 刘育魁等. 地下核爆炸力学效应 1967 年计算小结//郑哲敏文集. 北京: 科学出版社, 2004: 202-216 (Zheng Zhemin, Xie Bomini, Liu Yukui, et al. The 1967 calculation summary of the mechanical effects of underground nuclear explosion//Collected Works of Zheng Zhemin. Beijing: Science Press, 2004: 202-216 (in Chinese))
- 4 郑哲敏, 谢伯民, 刘育魁等. 地下核爆炸的流体弹塑性计算方案和若干结果//郑哲敏文集. 北京: 科学出版社, 2004: 217-223 (Zheng Zhemin, Xie Bomini, Liu Yukui, et al. The fluid Elasto-plastic calculation scheme and some results of underground nuclear explosion//Collected Works of Zheng Zhemin. Beijing: Science

- Press, 2004: 217-223 (in Chinese))
- 5 郑哲敏. 破甲过程初步分析及一些基础知识//郑哲敏文集. 北京: 科学出版社, 2004: 224-294 (Zheng Zhemin. Preliminary analysis of armor breaking process and some basic knowledge//Collected Works of Zheng Zhemin. Beijing: Science Press, 2004: 224-294 (in Chinese))
 - 6 郑哲敏, 谈庆明. 破甲机理的力学分析及简化模型//郑哲敏文集. 北京: 科学出版社, 2004: 295-294 (Zheng Zhemin, Tan Qingming. Mechanical analysis and simplified model of armor breaking mechanism//Collected Works of Zheng Zhemin. Beijing: Science Press, 2004: 295-294 (in Chinese))
 - 7 郑哲敏. 关于射流侵彻的几个问题. 兵工学报, 1980, 1: 13-22 (Zheng Zhemin. Several issues about jet penetration. *Journal of Ordnance Engineering*, 1980, 1: 13-22 (in Chinese))
 - 8 郑哲敏. 聚能射流的稳定性问题. 爆炸与冲击, 1981, 1: 6-17 (Zheng Zhemin. Stability of shaped jet. *Explosion and Shock*, 1981, 1: 6-17 (in Chinese))
 - 9 乔登江. 地下核爆炸现象学概论. 北京: 国防工业出版社, 2002: 49-62 (Qiao Dengjiang. Introduction of Underground Nuclear Burst Phenomena. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 49-62 (in Chinese))
 - 10 郝保田. 地下核爆炸及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2002 (Hao Baotian. Underground Nuclear Explosion and Its Application. Beijing: National Defense Industry Press, 2002 (in Chinese))
 - 11 曾惠泉, 杨秀敏, 焦云鹏等. 触地爆炸流体弹塑性模型数值计算. 爆炸与冲击, 1982, 2(2): 47-56 (Zeng Huiquan, Yang Xiumin, Jiao Yunpeng, et al. Numerical calculation of fluid elasto-plastic model for contact explosion. *Explosion and Shock*, 1982, 2(2): 47-56 (in Chinese))
 - 12 戴兰宏. 工程科学前沿的拓荒者——郑哲敏. 力学进展, 2013, 43(3): 265-294 (Dai Lanhong. A pioneer in the frontier of engineering science—Zheng Zhemin. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(3): 265-294 (in Chinese))
 - 13 郑哲敏. 学习钱学森先生技术科学思想的体会——纪念钱学森先生百年诞辰. 力学学报, 2011, 43(6): 973-977 (Zheng Zhemin. The experience of studying Mr. Qian Xuesen's technical and scientific thoughts: Commemorating the centennial birthday of Mr. Qian Xuesen. *Journal of Mechanics*, 2011, 43(6): 973-977 (in Chinese))
 - 14 Nuckolls JH. A computer calculation of Rainier (the first 100 Milliseconds). UCRL-5675. USA: California, 1959
 - 15 Wilkins ML. Calculations of elastic-plastic flow//Alder B, Fernbach S, Roterberg M, Eds. *Methods in Computational Physics*. New York: Academic Press, 1964: 211-262
 - 16 Marsh SP. LASL Shock Hugoniot Data. California: University of California Press, 1980
 - 17 Ahrens TJ, Johnson ML. Shock Wave Data for Rocks. American Geophysical Union (AGU), 2013
 - 18 Barnes JF, Lyon SP. SESAME equation of state No. 7530, basalt. (LA-11253-MS, DE88 010483) 1988
 - 19 Lyakhov GM, Okhitin VN. Plane waves in nonlinear viscous multicomponent media. *Journal of Applied Mechanics & Technical Physics*, 1977, 18(2): 241-248
 - 20 Batsanov SS. Effects of Explosions on Materials. New York: Springer, 1994
 - 21 Trunin RF, Gudarenko LF, Zhernokletov MV, et al. Experimental data on shock compression and adiabatic expansion of condensed matter. Sarov: RFNC-VNIIEF, 2001
 - 22 Mcglaun JM, Thompson SL, Elrick MG. CTH: A three-dimensional shock wave physics code. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 10(1-4): 351-360
 - 23 Hallquist JO. LS-Dyna Theory manual, 2006
 - 24 罗斌强, 王桂吉, 莫建军等. 准等熵压缩下几种常用物态方程的适用性检验//第十三届全国物理力学学术会议论文摘要集, 2014 (Luo Binqiang, Wang Guiji, Mo Jianjun, et al. Applicability test of several commonly used equations of state under quasi-isentropic compression//Abstracts of the 13th National Conference on Physical Mechanics, 2014 (in Chinese))
 - 25 汤文辉, 张若棋. 物态方程理论及计算概论, 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2008 (Tang Wenhui, Zhang Ruoqi. Introduction to Theory and Computation of Equation of State, second edition. Beijing: Higher Education Press, 2008 (in Chinese))
 - 26 Burton DE, Bryan JB, Lettis LA, et al. Application of the implicit TENSOR Code to studies of containment of underground nuclear tests, UCRL-87296// Monterey Containment Symposium, 1982
 - 27 Riedel W, Wicklein M, Thoma K. Shock properties of conventional and high strength concrete: Experimental and mesomechanical analysis. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(3): 155-171
 - 28 Holmquist TJ, Johnson GR, Cook WH. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures//Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics, 1993
 - 29 Thompson SL. ANEOS analytic equations of state for shock physics codes input manual. Sandia National Laboratories, 1989
 - 30 Brown WT. ANEOS (Analytic Equation of State Package) Models for Shock Compression of Saturated Limestone: Applications to Ground Shock Calculations, 1989
 - 31 Andersen TS, Hughes PS, Mutone GA. SESAME'83: Report on the Los Alamos Equation-of-State Library, 1983
 - 32 Young GA, Abhold H. Sesame IO Library User Manual Version 8, 2017
 - 33 Flanagan LM, Flanagan DP. PRONTO3D: A three-dimensional transient solid dynamics program. SAND87-1912, Sandia National Labs, Albuquerque, NM, March 1989
 - 34 田宙, 郭永辉, 乔登江. 地下强爆炸辐射流体力学过程的二维数值模拟. 计算物理, 2012, 29(3): 361-368 (Tian Zhou, Guo Yonghui, Qiao Dengjiang. Two-dimensional numerical simulation of hydrodynamic process of underground strong explosion radiation. *Computational Physics*, 2012, 29(3): 361-368 (in Chinese))
 - 35 刘文韬, 王肖钧, 周钟等. 一种岩石损伤本构模型在地下强爆炸中的应用. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 207-213 (Liu Wentao, Wang Xiaojun, Zhou Zhong, et al. Application of a rock damage constitutive model to strong underground explosions. *Explosion and Shock*, 2003, 23(3): 207-213 (in Chinese))
 - 36 Barrett WH. An investigation of a mixed-phase equation of state for the PUFF 66 Computer Code, AD726992, 1971
 - 37 Maxwell DE, Moises H. Hypervelocity impact cratering calculation. NASA, N72-16248, 1971
 - 38 Schuster SH, Isenberg J. Equations of state for geologic materials. Defense Nuclear Agency, AD749382. USA: California, 1972
 - 39 Antoun TH, Lomov IN, Glenn LA. Simulation of the penetration of a sequence of bombs into granitic rock. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 29(1/10): 81-94
 - 40 沈明荣. 岩体力学. 上海: 同济大学出版社, 1999 (Shen Mingrong. Rock Mass Mechanics. Shanghai: Tongji University Press, 1999 (in Chinese))
 - 41 王仁, 殷有泉. 工程岩石类介质的弹塑性本构关系. 力学学报, 1981, 17(4): 3-11 (Wang Ren, Yin Youquan. Elasto-plastic constitutive relation of engineering rock media. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1981, 17(4): 3-11 (in Chinese))
 - 42 殷有泉, 周早生. 岩土介质在屈服面奇异点处的本构方程. 岩石力学与工程学报, 1985, 4(1): 36-41 (Yin Youquan, Zhou Zaosheng. Constitutive equation of geotechnical media at singularity point of yield surface. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1985, 4(1): 36-41 (in Chinese))
 - 43 Yu MH. Unified Strength Theory and Its Application. Berlin: Springer Press, 2006
 - 44 Feng XT, Hudson JA. Rock Engineering Design. CRC Press, 2011