中国科学: 技术科学 2016 年 第 46 卷 第 4 期: 323 ~ 331
SCIENTIA SINICA Technologica tech.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述 “强冲击载荷下钢筋混凝土的本构关系、破坏机理与数值方法”专辑

强冲击载荷下钢筋混凝土的本构关系、破坏机理与数值方法

宁建国[①*], 周风华[②], 王志华[③], 马天宝[①]

① 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;
② 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 宁波 315211;
③ 太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所, 材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 太原 030024
* E-mail: jgning@bit.edu.cn

收稿日期: 2015-12-03; 接受日期: 2016-01-28; 网络出版日期: 2016-03-22
国家自然科学基金重大项目(批准号: 11390360)资助

摘要 钢筋混凝土不但在土木工程领域有着广泛的应用, 而且其强动载荷下动态力学行为的研究在国家安全方面也具有十分重要的需求, 其非均质、各向异性、多组分的特性亦给其动力学特性的研究带来诸多困难. 本文针对强冲击载荷下钢筋混凝土的力学行为的研究进展进行了评述, 具体包括: 1) 钢筋混凝土材料动态力学行为、破坏机理及动态本构模型; 2) 钢筋混凝土结构的侵彻及爆炸作用破坏机理; 3) 强冲击载荷下结构力学行为的数值模拟方法与软件. 在此基础上, 分析了针对强冲击载荷下钢筋混凝土的动态特性、侵彻机理和数值方法等方面的研究所存在的不足之处, 并对需要进一步深入开展的研究工作进行了展望.

关键词 钢筋混凝土, 强冲击载荷, 本构关系, 高速侵彻, 数值模拟

1 引言

强冲击载荷下材料与结构的动态力学特性与破坏行为不仅在爆炸与冲击动力学领域占有非常高的地位, 而且在国防工业和民用安全领域具有极其重要的工程应用价值. 由于强冲击载荷具有短历时、高幅值以及变化剧烈等特征, 材料在爆炸或高速冲击等强冲击载荷作用下, 必须考虑应变率效应和惯性效应[1], 此外, 由于材料的动态破坏不仅与外部的加载条件有关, 还与材料内部的微细观结构有关, 因此其动态损伤演化的机制是十分复杂的, 这方面的研究一直是爆炸与冲击动力学学科急需解决的热点和难点问题. 在第二次世界大战期间, 由于军事工程的需要, 材料动态特性的研究引起了人们新的兴趣. 进入 20 世纪 90 年代, 材料动态损伤和破坏的研究有了进一步的深入, 并作为一门新兴的学科受到众多学者的关注.

目前, 高强合金钢材料、钨合金材料、陶瓷材料、泡沫金属材料、轻质高强合金材料以及钢筋混凝土等材料, 在弹体结构和防护工程结构中有着重要的应

引用格式: 宁建国, 周风华, 王志华, 等. 强冲击载荷下钢筋混凝土的本构关系、破坏机理与数值方法. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 323–331
Ning J G, Zhou F H, Wang Z H, et al. Constitutive model, failure mechanism and numerical method for reinforced concrete under intensive impact loading (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 323–331, doi: 10.1360/N092016-00003

© 2016《中国科学》杂志社

用[2], 国内外学者近年来在这方面开展了大量的研究工作, 分析了这些材料与结构在强冲击载荷下的损伤演化规律及破坏过程[3~5], 建立了相应的动态本构模型[6], 揭示了其破坏机理[7,8]. 特别是钢筋混凝土, 不但在土木工程领域有着广泛的应用, 而且在深层地下工事、防护设施等(图 1)军事领域也具有非常重要的应用价值.

钢筋混凝土具有非均质、各向异性、多组分的特性, 给其动力学特性的研究带来诸多困难. 此外, 由于钢筋的植入进一步增加了材料本身的非均质、各向异性等特点, 使其动力学行为变得更加复杂, 特别是钢筋与混凝土各组分之间相互作用的力学参数是很难获得的. 根据配筋率的高低不同, 钢筋混凝土力学行为的研究一般有两种处理方法.

一种对于低配筋率钢筋混凝土, 将其作为加钢筋的混凝土结构(在此钢筋仅起抗拉的作用, 如图 2 所示)[9,10], 研究其在外载下的力学响应, 这方面的研究工作主要集中在如何分析钢筋与混凝土之间的滑移分离机制和破坏模式, 如何确定动态黏结的相关特征参数如黏结刚度、摩擦系数等, 由于配筋率低, 由此带来的计算复杂性和计算量不是太大.

另一种是将高配筋率的钢筋混凝土作为各向异性非均质复合材料[11,12](图 2), 研究其整体的宏观力学行为. 一般来讲, 军事防护结构中的钢筋混凝土, 其配筋率是比较高的, 因此, 在强冲击载荷条件下, 可以将钢筋混凝土作为加筋各向异性非均质复合材料, 研究其动态力学响应与破坏机理, 从而避免了研究分析钢筋与混凝土各组分之间极为复杂的物理和力学关系, 这样, 对建立钢筋混凝土动态本构关系、破坏失效准则等复杂问题的力学规律, 可以采用连续介质力学统一的理论与方法进行研究与分析.

图 1 (网络版彩图)钢筋混凝土飞机掩蔽库

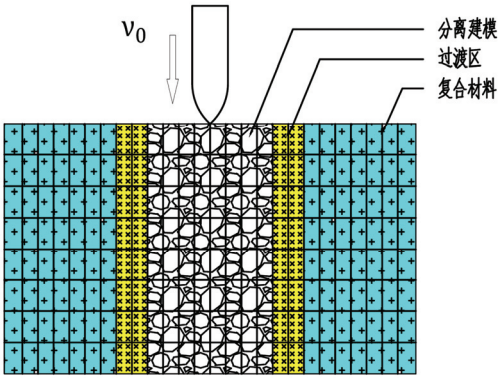

图 2 (网络版彩图)钢筋混凝土力学行为研究的两种处理方法

为了深入研究强冲击载荷下钢筋混凝土的动态力学特性, 需要从以下三方面开展研究: 第一个方面, 通过动高压加载实验, 获得对强冲击载荷下钢筋混凝土材料动态力学行为的认识, 从而构建既具有物理意义又便于工程应用的率相关含损伤的能反映配筋率影响的动态本构模型和高压状态方程, 这也是研究结构破坏机理的基础. 第二个方面, 研究高速侵彻及爆炸载荷作用下钢筋混凝土结构的破坏机理, 从而将材料力学特性研究与数值模拟研究有机结合起来. 由于强冲击载荷下材料动态力学特性和破坏机理研究的复杂性, 给理论分析和实验研究都带来很大的难度, 从 20 世纪 50 年代起, 数值模拟技术就直接应用于爆炸与冲击问题的求解并且取得了很大的成功, 此外, 计算机数值仿真具有安全保密、设计灵活、可重复性好、环境和过程可控、效费比高等优点, 是未来提高强冲击载荷下材料与结构的动态力学特性与破坏机理研究水平的有效手段. 因此, 第三个方面需从数值模拟的角度开展研究, 发展三维高精度数值方法, 开发强冲击载荷下结构力学行为大规模高精度计算软件, 特别是结合高速侵彻及爆炸载荷作用下钢筋混凝土破坏问题的研究, 给出钢筋混凝土动态力学响应的计算方法, 从而为推进强冲击载荷下钢筋混凝土动态力学行为研究提供数值模拟新方法和手段.

由于强冲击载荷下钢筋混凝土的动态力学特性与破坏行为在国防工业和民用安全领域具有极其重要的应用价值, 近些年来, 国内外学者对其进行了大量的探索与基础研究, 然而总的来讲, 研究工作主要集中在混凝土方面. 钢筋混凝土由于其非均质、各向

异性、多组分的复杂特性, 特别是钢筋的植入, 给其动力学行为和破坏机理的研究带来诸多困难和挑战. 当前, 相关研究工作的主要进展综述如下.

2　钢筋混凝土材料动态力学行为、破坏机理及动态本构模型

为了准确测定混凝土类材料的动态力学性能, 研究者相继建立了直径 76 mm, 甚至直径 100 mm 的 SHPB 实验装置. Hopkinson 束杆技术[13,14](图 3)由于能够有效解决大直径杆带来的波弥散效应, 是一种比较理想的测试混凝土类材料动态力学特性的实验技术, 所测试件尺寸可达到 150 mm×150 mm, 甚至更大. 在更高应变率范围内, 平板撞击实验是获得材料力学特性的有效手段, 可利用其测定的冲击绝热数据拟合材料在内部空隙压实后的状态方程参数, 文献[15,16]对此问题进行了相关的研究. 为实现对大尺寸钢筋混凝土试件的高速一维平面应变加载, 宁建国研究组[17,18]利用炸药驱动飞片, 设计了一套简单易行的化爆加载装置, 该方法提供了一种实现大尺寸钢筋混凝土高速加载的新思路.

混凝土类材料具有极其复杂的动力学特性, 涉及到材料应变率敏感性、静水压力相关特性、裂纹扩展导致的各向异性、拉压不对称性及剪胀与体积塑性、应变软化、加卸载的非线性滞回特性等. 如何较好地描述这些特性, 进而发展相应的本构模型是一项比较复杂而困难的工作. 文献[1]综述了近 20 年来混凝土类材料动态力学特性和本构关系研究方面的

图 3　(网络版彩图)捆绑式束杆

进展状况. 目前, 混凝土类材料的动态本构特性研究现状可归纳如下: 一类是在大量实验研究的基础上, 对实验数据进行回归分析从而建立经验公式[19,20]; 另一类是基于材料变形机理的本构模型[21,22], 主要包括建立在黏弹性、黏塑性力学基础上以及建立在损伤力学、断裂力学基础上的本构模型[23,24]两类.

冲击载荷下, 混凝土类材料的力学特性及本构关系的研究须关注应变速率和静水压力相关性、损伤相关性以及须引入状态方程来描述动高压加载下的体积响应. 目前对于混凝土类材料在这几个方面的研究仍然存在较大的不足. 首先, 受限于现有的实验技术和测试条件, 大部分的研究成果主要集中在采用 SHPB 实验技术获得的中等应变率区域, 对于轻气炮加载或更高应变率范围内的实验数据仅有少部分的报道. 因此迫切需要对更高应变率范围内混凝土类材料的力学特性进行系统研究. 其次, 现有的本构模型只能片面地描述混凝土类材料在某一方面的力学特性(如拉伸、压缩等), 而不能较好地表征其综合、全面的力学行为. 特别是在考虑损伤时, 学者们对于如何较准确地用某一损伤变量来描述混凝土类材料的动态损伤演化过程仍然存在很大的争议. 而对于高应变率下混凝土类材料的高压状态方程的研究更是鲜有报道.

对于实际工程中广泛应用的钢筋混凝土, 由于钢筋的植入进一步增加了材料本身的非均质、各向异性等特点, 使其动力学行为研究变得更加困难. 宁建国研究组[11,12]利用 SHPB 和一级轻气炮实验装置研究了钢筋混凝土在强冲击载荷作用下的冲击响应特性, 从细观复合材料的角度出发, 将钢筋混凝土材料看成四相复合材料, 建立了单向加筋混凝土材料的细观本构模型; 在理想黏弹性理论的基础上, 构建了钢筋混凝土材料的动态本构模型, 定义了微裂纹和微空洞损伤, 给出了损伤演化规律. 由于受加载试件尺寸的限制, 实验中的钢筋混凝土试件与工程实际还有一定的差别, 尚不能准确地反映真实的钢筋混凝土的动态力学响应, 因此需要发展大尺寸的高速加载实验装置和测试技术.

综上所述, 针对强冲击载荷下钢筋混凝土材料动态力学性能的研究, 急需发展大尺寸的高速加载实验装置和测试技术, 开展大尺寸钢筋混凝土及其组分材料在更高应变率范围内的动态力学性能研究, 分析其在强冲击载荷下从变形、损伤到失稳或破坏过

程, 揭示材料在骨料以及钢筋尺寸范围的细观结构的损伤演化规律以及与宏观力学特性之间的关系, 从而构建其动态本构方程、状态方程以及损伤破坏规律.

3 钢筋混凝土结构的侵彻、爆炸作用破坏机理及弹靶结构响应

目前, 对素混凝土的侵彻及爆炸作用研究, 无论工程模型、实验研究、理论建模或数值分析, 都相对较为成熟. 但对钢筋混凝土来说, 在强冲击载荷下, 其各组分间的变形、破坏及相互作用更为复杂, 给其动力学特性的研究带来更大的困难. 特别是近年来, 由于超高速飞行器等武器平台和深层坚固地下工事的出现, 使得侵彻速度可达 1500 m/s, 侵彻深度达 30 m. 相对于低速侵彻问题的研究, 高速深侵彻机理更为复杂, 而且, 侵彻贯穿目标后往往还伴随着爆炸破坏问题, 给研究工作带来了更大的难度.

国内外对钢筋混凝土的高速侵彻机理的认识并不完善, 主要表现在: 如何考虑钢筋对混凝土破碎区的约束及对应的空腔膨胀理论完善, 侵彻阻力如何考虑钢筋作用阻力项, 钢筋几何分布对弹道稳定性的影响, 钢筋混凝土的材料本构关系与失效判据, 如何认识侵彻过程中钢筋与混凝土的相互作用与分离机制等. 目前, 对于钢筋混凝土较为成功的侵彻理论模型为空腔膨胀模型[25,26], 但如何考虑钢筋作用因素, 仍是一个难题. 对钢筋混凝土介质侵彻问题的理论建模通常忽略钢筋或人为将配筋作用局限化[27,28], 其他一些近似则包括将其等效为强度增强的均匀混凝土介质, 或将其等效为混凝土和薄钢板的叠压夹层结构等, 只有少部分工作涉及具体配筋对侵彻过程的影响[29,30].

过去一个世纪, 各国开展了大量的混凝土靶侵彻实验研究并给出了大量的侵彻/穿甲经验公式[31,32], 其中以 Petry, ACE, Barr(或 UKAEA)及 NDRC 等公式应用最为广泛. 尽管众多实验数据来源于钢筋混凝土靶, 除 Petry, Barr(或 UKAEA)和 Boswell 等公式计及钢筋对穿甲极限的影响外, 绝大多数公式没有考虑钢筋因素.

针对钢筋混凝土的侵彻实验, 目前的发射手段包括轻气炮、火炮、平衡炮等技术, 以及导弹发射的实弹打靶等. 如何实现大质量弹体的高速发射并保证正确的着弹姿态, 如何在缩比侵彻实验中进行等效钢筋混凝土靶体的设计, 以达到正确模拟实际防护结构的功能和作用, 都是需要重点解决的难题. 侵彻实验研究需重点分析混凝土强度、配筋率等参数以及尺寸效应对侵彻性能的影响. 目前高速侵彻实验中的相关测试技术与表征方法还需进一步发展, 急需发展多轴加速度传感器, 以获得多轴加速度时程曲线, 近期发展的靶体预埋格栅和压力传感器、加速度计的实验测试技术可间接实时获得高速侵彻过程中靶体结构响应及弹体侵彻轨迹等参数, 若进一步完善可成为较成熟技术.

在钢筋混凝土的高速侵彻过程中, 弹、靶的结构响应事实上是相互耦合的. 钢筋混凝土的变形、破坏等结构响应, 将令其对弹体的侵彻阻力由单纯的轴向载荷变化为轴向与横向载荷交互作用, 从而导致弹体产生复杂的结构响应. 为实现钢筋混凝土高速侵彻条件下弹体结构稳定和弹道稳定, 预测弹体的结构响应[33], 研究者需要解决的科学问题是: 正/非正侵彻条件高速弹体的力学承载条件及弹靶结构响应分析模型; 攻角、倾角及非对称头部侵蚀等对弹体结构响应的影响规律; 钢筋对弹体侵彻过载的影响; 非刚性侵彻条件下弹体实时结构响应特征定量预估; 弹靶结构失效破坏判据等.

钢筋混凝土的高速侵彻中, 弹体通常会发生质量侵蚀(图 4). 质量侵蚀将改变弹体头部形状, 影响弹体的侵彻性能和弹道稳定性[34,35]. 质量侵蚀主要包括两个方面[36,37]: 1) 基于侵彻体表面动力学摩擦; 2) 基于极端条件(高温高压)下的磨损切削. 此外, 高速侵彻过程伴生的材料熔化、相变、金属屑氧化等现象对弹体质量损失都有贡献. 由于钢筋和骨料的影响, 将会令弹体质量侵蚀机理更复杂. 目前, 质量侵蚀分析大多以弹体的初、终形态比较和质量变化进行

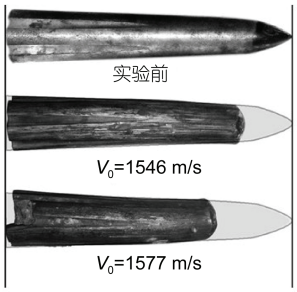

图 4 弹体质量侵蚀图

校验分析, 建立经验/半经验的质量侵蚀模型, 由于没有具体的物理机制, 不能反映弹体质量侵蚀实质, 因此, 从物理机制上认识刚性弹到变形/侵蚀弹的转换及其条件, 对侵彻深度预测及侵彻动力学发展都具有重要意义.

高速侵彻的弹道稳定性对弹头非对称质量侵蚀(也称偏磨)也是非常敏感的[38]. 目前弹体变形及弹道偏转的研究大都局限于非侵蚀弹体, 因质量侵蚀导致弹道或弹体结构失稳的研究工作仍然非常有限, 许多关键问题没有解决, 如非对称侵蚀导致弹道失稳的临界条件、弹道及弹体结构失稳模式等. 因此, 迫切需要研究钢筋混凝土高速侵彻过程中钢筋及骨料对弹体质量侵蚀的作用, 并将刚性弹体的侵彻动力学理论推广到侵蚀/变形弹体.

针对钢筋混凝土高速侵彻问题, 尽管在工程模型、理论建模、数值分析和实验研究等方面开展了大量工作, 但仍然没有完全认识其深侵彻破坏机理, 仍然缺乏有效的研究方法与模拟手段, 工程设计仍然缺乏必要的理论指导. 国内外目前仍缺乏钢筋混凝土的高速侵彻机理与规律、缩比模拟实验与测试技术、弹靶结构响应、弹道稳定性、弹体侵蚀及破坏失效、多轴侵彻过载研究等诸多机理、理论和基础数据.

侵彻钢筋混凝土的目的是为了毁伤由其构成的钢筋混凝土结构, 这个目标通常是通过炸药爆炸作用钢筋混凝土来完成的. 目前, 针对爆炸载荷作用下混凝土的破坏效应, 国内外已开展了较为深入的研究, 包括应力波的传播特性、爆破漏斗特征尺寸、装药壳体对爆炸破坏效应的影响等. 关于钢筋混凝土爆炸破坏效应的研究工作则相对较少, 主要原因是钢筋与混凝土之间的相互作用机理认识不够. 顾晓辉等人[39]开展了 TNT 装药在钢筋混凝土靶中爆炸作用实验研究; 付跃升和张庆明[40]利用损伤理论建立了内爆荷载作用下钢筋混凝土中爆破漏斗的特征尺寸模型, 并通过实验验证了模型的有效性; 宁建国[41]针对钢筋混凝土机库在爆炸载荷作用下的破坏效应进行了实验研究与理论分析.

上述爆炸载荷作用下钢筋混凝土结构破坏效应的研究都是围绕某一具体方面展开的, 还缺乏系统的分析, 如混凝土强度、钢筋配筋等参数对钢筋混凝土爆炸破坏效应的影响等. 在爆炸载荷作用下, 应力波效应的影响十分显著, 特别是对于钢筋混凝土这类非均匀介质来说, 应力波传播规律更为复杂, 如应力波与钢筋、骨料等各组分、裂纹间的相互作用, 以及对整体破坏性能的影响等, 这也是需要解决的关键问题.

4　强冲击载荷下结构力学行为的数值模拟方法与软件

对于强冲击载荷下结构力学行为问题的研究, 可以用双曲型偏微分方程组来描述, 属于二维或三维非定常问题. 传统上讲, 按其采用的坐标可分为 Lagrange 方法和 Euler 方法两大类. 尽管 Lagrange 法引入了一些算法, 在一定程度上解决了网格畸变等问题, 但与 Euler 法相比, 仍不可能像 Euler 法那样自然地反映大变形过程, 特别是对于钢筋混凝土深侵彻及爆炸作用这类强流固耦合大变形问题. 由于 Euler 软件涉及武器弹药仿真设计的核心技术, 国外对我们是禁运的, 因此深入进行强冲击载荷下结构力学行为的 Euler 数值方法研究以及软件开发是十分必要的.

如何合理、比较精确地分析和分辨非定常、多介质、强间断流场一直是困扰爆炸力学工作者的重要问题. Harten 率先提出了总变差减小(total variation diminishing, TVD)的概念, 对数值格式的发展产生了重要的影响. 为了克服 TVD 格式的弱点, 发展了 ENO 格式, 在此基础上, Jiang 和 Shu[42]提出有限差分形式的 WENO 格式. Ning 研究组将 WENO 格式推广应用于气相爆轰问题[43,44]及空中爆炸、水中爆炸等问题[45]的数值模拟, 并发展了高阶精度的边界条件计算方法[46], 但将上述方法推广应用于涉及固体大变形的强冲击问题的数值模拟, 还有许多需要解决的问题.

对于强冲击载荷下结构力学行为数值模拟的 Euler 数值方法, 当流场中包含多种物质时, 不可避免地要出现混合网格, 随之而来的关键问题就是如何追踪多物质界面. 早期计算多物质的方法具有代表性的是质点网格 PIC 方法, Noh 的 CEL 方法以及 HELP 程序中使用的无质量示踪粒子跟踪界面法等. 近年来, 以 Youngs 方法为基础的 VOF 方法[47]以及 Level Set 方法[48]等得到了广泛的应用. 上述方法推广到三维三种及其以上物质界面的处理还有很大的难度, 为此, Ning 和 Chen[49]针对二阶精度的计算格式提出了三维模糊界面方法, 从而实现三维多物质

混合网格的处理.

Euler 方法虽然适于处理大变形问题, 但其难于准确描述结构局部的断裂、破坏问题. 因此, 可以考虑在 Euler 方法中引入 Lagrange 方法的思想, 发挥各自的优势. Ma 等人[50]和 Ren 等人[51]将 PIC 方法和多物质 Euler 方法相耦合, 用来模拟侵彻过程中弹靶作用区附近材料的变形破坏. 近年来发展的无网格物质点法(material point method, MPM)[52]采用 Lagrange 质点进行离散求解, 可以有效地处理固体结构的超大变形问题. 此外, 物质点法采用了 Euler 背景网格, 易于和 Euler 方法相结合来处理流固耦合问题.

从 20 世纪 60 年代开始, 以美国三大国防实验室为代表, 开始了爆炸力学数值方法的研究及仿真程序的开发工作. 经过近半个世纪的发展, 目前国际上已经形成了多个著名的爆炸力学数值仿真软件, 典型的商业化软件包括 ANSYS/LS-DYNA, AUTODYN 和 MSC/DYTRAN 等. 此外, 比较有代表性的 Euler 型非商业软件有 CTH 及 SMERF, Lagrange 型软件有 MESA3D 和 EPIC 等, 这些非商业软件对我国是禁止的. 上述商业软件由于代码的保密性, 使得我们不能加入新的算法模块, 在应用上受到了很大的限制, 而且计算规模受到严格的限制, 难以满足工程实际的计算要求. 为了国防安全需求, 迫切需要开发出具有自主知识产权的 Euler 型仿真计算软件.

近年来, 国内爆炸力学自主程序开发工作取得了很大的进展. 总参四所杨秀敏[53]开发了基于 WENN 的空气冲击波三维流场计算程序 EF3D; 北京应用物理与计算数学研究所在 Euler 型多物质流体动力学数值方法研究及程序开发方面开展了大量的研究工作[54]; 北京大学刘凯欣研究组[55]对 CE/SE 算法进行了研究, 开发了 SUPER CE/SE 计算程序; 清华大学 Zhang 研究组[52]对 MPM 物质点法在爆炸与冲击问题中的应用进行了深入的研究, 并开发了相应的 MPM3D 软件. 北京理工大学宁建国领导的爆炸与冲击动力学学科组[56,57]经过十余年的努力与积累, 对爆炸力学多物质 Euler 数值方法进行了深入的研究, 基于流体弹塑性理论, 开发了二维及三维爆炸与冲击问题仿真软件系统 EXPLOSION-2D/3D, 该软件能够有效模拟炸药爆轰、爆炸冲击、侵彻等各种强冲击载荷下结构的动态响应问题, 已通过国防科技成果鉴定, 并在国内多家单位的武器装备研究项目及民用安全领域得到了推广应用.

近年来, 国内外学者对弹体高速侵彻混凝土及钢筋混凝土问题开展了大量的数值模拟研究工作. Beissel 和 Jonhson[58]基于显式动力学有限元程序, 利用弹体表面节点回退引入质量损失, 给出了描述弹体质量侵蚀的算法; Ma 等人[50]和 Ren 等人[51]提出了一种 VOF 与 PIC 耦合的物质界面处理方法以及质点映射算法, 可有效模拟弹体高速侵彻混凝土靶过程中的弹体变形及靶板破坏过程; Zhang 研究组[59]提出了自适应物质点有限元法以及杂交物质点有限元法, 实现了混凝土与钢筋的分离式建模与耦合求解; 王可慧[60]采用 SPH 算法对高速弹体侵彻混凝土过程中的质量侵蚀问题进行了模拟; Huang 等人[61]将混凝土与钢筋采用分离式建模, 对弹体贯穿钢筋混凝土过程进行了数值模拟分析; 屈明和陈小伟[62]比较了混凝土和钢筋相互作用的不同处理方式对侵彻性能的影响.

上述数值模拟工作大部分采用的是 Lagrange 型算法, 可以模拟低速弹体、侵深较浅的工况. 但对于高速深侵彻问题, 相比于 Euler 算法, Lagrange 型算法还存在不可逾越的难题. 此外, 由于商业软件的内部代码是不公开的, 其计算结果能否真实地反映侵彻机理, 还有待于进一步研究和探索.

针对爆炸载荷作用下混凝土及钢筋混凝土的动态响应问题, Krauthammer 和 Qtani[63]对钢筋混凝土结构爆炸加载下数值模拟中网格质量、重力加速度和加载量等参数的影响因素进行了分析; 孟阳和文鹤鸣[64]采用 LS-DYNA 软件和混凝土材料的 HJC 模型, 将钢筋和混凝土分离建模, 对钢筋混凝土在爆炸载荷作用下的破坏问题进行了数值模拟; 武海军等人[65]利用 LS-DYNA 软件的流固耦合算法, 将混凝土材料的 TCK 模型和 HJC 模型相结合, 通过建立分离式钢筋混凝土有限元模型, 进行了钢筋混凝土在内部爆炸载荷作用下毁伤破坏效应的数值计算分析; 吴吉林[66]将钢筋混凝土等效为相应厚度和强度的混凝土, 采用自主开发的 EXPLOSION-3D 软件, 对爆炸载荷作用下飞机掩蔽库的毁伤及其对飞机的毁伤效应进行了分析.

通过以上分析可以看出, 对于钢筋混凝土高速侵彻及爆炸作用的数值模拟, 国内主要采用商业软件来进行分析, 并且以 Lagrange 型算法为主, 由于算法和计算规模等的限制给深侵彻及爆炸作用的计算带来了不可逾越的困难. 因此, 需要发挥国内自主开

发的 Euler 型软件的优势, 结合钢筋混凝土高速深侵彻及爆炸作用机理的研究, 开展三维高精度的 Euler 计算格式与多物质界耦合算法研究, 开发 Euler 型强冲击载荷下结构力学行为的三维大规模高精度仿真软件, 为强冲击载荷下钢筋混凝土力学行为的研究提供数值模拟的新方法和手段.

综上所述, 可以看出针对强冲击载荷下钢筋混凝土的动态特性、侵彻机理和数值方法等方面的研究还存在很多不足, 特别是以下几方面:

1) 大尺寸的高速加载实验装置和测试技术;

2) 可用于计算的钢筋混凝土的动态本构模型和高压状态方程;

3) 钢筋混凝土高速深侵彻及爆炸作用实验测试技术;

4) 弹体侵蚀机理及弹道稳定性;

5) 强冲击载荷下钢筋混凝土动态破坏的 Euler 数值方法.

5 展望

针对强冲击载荷作用下钢筋混凝土的非均质性、强非线性、流固耦合以及尺度效应等特性, 面向国家安全重大需求与学科前沿, 迫切需要从材料力学性能、结构破坏机理和数值算法三个方面开展系统的应用基础研究. 以建立材料本构模型和结构破坏机理为切入点, 形成以机理研究推动工程应用的研究方法; 以材料性能表征、结构动力破坏作为力学与材料学科交叉的结合点, 开展综合性研究; 以强冲击载荷下结构力学行为的高性能数值方法为突破点, 为爆炸与冲击动力学的研究提供具有自主知识产权的仿真软件. 通过力学、材料学与计算机科学的交叉研究, 为推进强冲击载荷下材料与结构的动态力学行为研究提供新的理论、方法和模拟手段, 提升我国在爆炸与冲击动力学领域的创新能力, 为我国武器装备与防护工程的现代化设计提供关键支撑.

参考文献

1 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: 389–405

2 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学. 北京: 国防工业出版社, 2010

3 周风华, 王永刚. 影响冲击载荷下脆性材料碎片尺度的因素. 爆炸与冲击, 2008, 28: 298–303

4 王志华, 朱峰, 赵隆茂. 多孔金属夹芯结构动力学行为及其应用. 北京: 兵器工业出版社, 2010

5 Zhou F H, Wang L L. Energy transform in a brittle fragmentation process and the estimation of fragment size. Int J Strength Fract Complex, 2011, 6: 3–16

6 Wang L L, Zhou F H, Sun Z J. Studies on rate-dependent macro-damage evolution of materials at high strain rates. Int J Damage Mech, 2011, 20: 1243–1262

7 Xie Q H, Jing L, Wang Z H, et al. Deformation and failure of clamped shallow sandwich arches with foam core subjected to projectile impact. Compos Part B Eng, 2013, 44: 330–338

8 Jing L, Wang Z H, Ning J G, et al. The mechanical response of metallic sandwich beams under foam projectile impact loading. Lat Am J Solids Struct, 2011, 8: 107–112

9 过镇海. 混凝土的强度和变形-实验基础和本构关系. 北京: 清华大学出版社, 1997

10 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析. 北京: 清华大学出版社, 2006

11 商霖, 宁建国, 孙远翔. 强冲击载荷作用下钢筋混凝土本构关系的研究. 固体力学学报, 2005, 26: 1–8

12 Liu H F, Ning J G. Mechanical behavior of reinforced concrete subjected to impact loading. Mech Mater, 2009, 41: 1298–1308

13 董新龙, 张胜林, 苑红莲, 等. Hopkinson 束杆技术及混凝土动态性能的实验研究. 见: 第十届全国冲击动力学讨论会. 太原, 2011

14 Abertini C, Cadoni E, Labibes K. Dynamic mechanical behavior of large concrete specimens by means of a bar bundle. In: Chiem C Y, Wang L L, Tanimura S J, eds. Proceedings of the 2nd International Symposium on Impact Engineering. Beijing: Chinese Journal of Mechanics Press, 1996. 214–219

15 Rinehart E J, Welch C R. Material properties testing using high explosive. Int J Impact Eng, 1995, 17: 673–675

16 宁建国, 商霖, 孙远翔. 混凝土材料冲击特性的研究. 力学学报, 2006, 38: 199–208

17 张柱, 宁建国, 栾广博. 爆炸驱动飞片的实验研究. 北京理工大学学报, 2011, 31: 104–107

18 张柱, 栾广博, 宁建国. 爆炸载荷作用下锥形飞片的平面度研究. 高压物理学报, 2011, 25: 221–226

19 Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension. ACI Mater J, 1998, 95: 735–739

20 Tedesco J W, Ross C A, Kuennen S T. Experimental and numerical analysis of high strain rate splitting tensile tests. ACI Mater J, 1994, 90: 162–169
21 Winnicki A, Pearce C J, Bicanic N. Viscoplastic hoffman consistency model for concrete. Comput Struct, 2001, 79: 7–19
22 Liu H F, Ning J G. Mechanical behavior of reinforced concrete subjected to impact loading. Mech Mater, 2009, 41: 1298–1308
23 刘海峰, 宁建国. 冲击荷载作用下混凝土材料的细观本构模型. 爆炸与冲击, 2009, 29: 261–267
24 夏梦棼, 韩闻生, 柯孚久, 等. 统计细观力学和损伤演化诱致突变. 力学进展, 1995, 25: 1–23
25 Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. Int J Impact Eng, 2006, 32: 1584–1594
26 Li Q M, Chen X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. Int J Impact Eng, 2003, 28: 93–116
27 Luk V K, Forrestal M J. Penetration into semi-finite reinforced concrete targets with spherical and ogival nose projectiles. Int J Impact Eng, 1987, 6: 291–301
28 Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. Int J Impact Eng, 1994, 15: 395–405
29 Amini A. Modeling of projectile penetration into reinforced concrete targets. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. McLean, Virginia, 1997
30 Chen X W, Li X L, Huang F L, et al. Normal perforation of reinforced concrete target by rigid projectile. Int J Impact Eng, 2008, 35: 1119–1129
31 Goldsmith W. Non-ideal projectile impact on targets. Int J Impact Eng, 1999, 22: 95–395
32 Li Q M, Reid S R, Wen H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. Int J Impact Eng, 2005, 32: 224–284
33 何丽灵, 高进忠, 陈小伟, 等. 弹体高过载硬回收测量技术的实验探讨. 爆炸与冲击, 2013, 33: 608–612
34 Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles. Int J Impact Eng, 1996, 18: 465–476
35 Frew D J, Hanchak S J, Green M L, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods. Int J Impact Eng, 1998, 21: 489–497
36 何丽灵, 陈小伟, 夏源明. 侵彻混凝土弹体磨蚀的若干研究进展. 兵工学报, 2010, 31: 950–966
37 Klepaczko J R, Hughes M L. Scaling of wear in kinetic energy penetrators. Int J Impact Eng, 2005, 31: 435–459
38 Zhao J, Chen X W, Jin F N, et al. Analysis on the bending of a projectile induced by asymmetrical mass abrasion. Int J Impact Eng, 2012, 39: 16–27
39 顾晓辉, 宋浦, 王晓鸣. TNT 在钢筋混凝土靶中爆炸的试验研究. 火炸药学报, 2009, 32: 33–36
40 付跃升, 张庆明. 钢筋混凝土中爆破漏斗特征尺寸研究. 北京理工大学学报, 2006, 26: 761–769
41 宁建国. 爆炸冲击波对机库毁伤的实验与机理研究. GF 报告. 2000
42 Jiang G S, Shu C W. Efficient implementation of weighted ENO schemes. J Comput Phys, 1996, 126: 202–228
43 Wang C, Shu C W, Han W H, et al. High resolution WENO simulation of 3D detonation waves. Combust Flame, 2013, 160: 447–462
44 Han W H, Wang C, Ning J G. Propagation mechanism of cylindrical cellular detonation. Chin Phys Lett, 2012, 29: 108201-1–108201-5
45 Wang C, Han W H, Ning J G, et al. High resolution numerical simulation of methane explosion in bend ducts. Safety Sci, 2012, 50: 709–717
46 Tan S R, Wang C, Shu C W, et al. Efficient implementation of high order inverse Lax-Wendroff boundary treatment for conservation laws. J Comput Phys, 2012, 231: 2510–2527
47 Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J Comput Phys, 1981, 39: 201–225
48 Mulder W, Osher S, Sethian J A. Computing interface motion in compressible gas dynamics. J Comput Phys, 1992, 100: 209–228
49 Ning J G, Chen L W. Fuzzy interface treatment in Eulerian method. Sci China Ser E-Tech Sci, 2004, 47: 550–568
50 Ma T B, Wang J, Ning J G. A hybrid VOF and PIC multi-material interface treatment method and its application in the penetration. Sci China Phys Mech Astron, 2010, 53: 209–217
51 Ren H L, Ma T B, Yao X H. Numerical studies of penetration problems by an improved particle method. Sci China Phys Mech Astron, 2012, 55: 2273–2283
52 Ma S, Zhang X, Lian Y P, et al. Simulation of high explosive explosion using adaptive material pointmethod. CMES Comp Model Eng, 2009, 39: 101–123
53 杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010
54 刘军, 何长江, 梁仙红. 三维弹塑性流体力学自适应欧拉方法研究. 高压物理学报, 2008, 22: 72–78

55 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
56 Ma T B, Wang C, Ning J G. Multi-material Eulerian formulations and hydrocode for the simulation of explosions. CMES Comp Model Eng, 2008, 33: 155–178
57 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
58 Beissel S R, Johnson G R. A three-dimensional abrasion algorithm for projectile mass loss during penetration. Int J Impact Eng, 2002, 27: 771–789
59 Lian Y P, Zhang X, Ma Z T, et al. A FEMP method and its application in modeling dynamic response of reinforced concrete subjected to impact loading. Comput Method Appl M, 2011, 200: 1659–1670
60 王可慧. 高速弹体侵彻混凝土靶研究. 博士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2011
61 Huang F L, Wu H J, Jin Q K, et al. A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets. Int J Impact Eng, 2005, 32: 173–187
62 屈明, 陈小伟. 钢筋混凝土穿甲的数值模拟. 爆炸与冲击, 2008, 28: 341–349
63 Krauthammer T, Otani R K. Mesh, gravity and load effects on finite element simulations of blast loaded reinforced concrete structures. Comput Struct, 1997, 63: 1113–1120
64 孟阳, 文鹤鸣. 钢筋混凝土靶板在弹丸冲击及爆炸载荷下响应的数值模拟. 高压物理学报, 2011, 25: 370–378
65 武海军, 黄风雷, 付跃升, 等. 钢筋混凝土中爆炸破坏效应数值模拟分析. 北京理工大学学报, 2007, 27: 200–204
66 吴吉林. 三维多物质欧拉界面处理算法及其应用. 博士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2010

Constitutive model, failure mechanism and numerical method for reinforced concrete under intensive impact loading

NING JianGuo[1], ZHOU FengHua[2], WANG ZhiHua[3] & MA TianBao[1]

[1] *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*
[2] *Ministry of Education Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;*
[3] *Shanxi Key Lab. of Material Strength & Structural Impact, Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*

Reinforced concrete has been widely used in the field of civil engineering, and the dynamic mechanical behavior of reinforce concrete under intensive dynamic loading is also a very important requirement for national security. However, the characteristics of its heterogeneity, anisotropy and multicomponent bring many difficulties to the study of its dynamic characteristics. Research progress of mechanical behavior of the reinforced concretes under intensive impact loading were reviewed in this paper, including: 1) the dynamical properties and the macrosopic constitutive laws of the reinforced concretes; 2) mechanisms of the penetration of the reinforced concrete structures; 3) numerical simulation method and software of structural mechanical behavior under intensive impact loading. On this basis, the inadequacy of the research which including the dynamic characteristics, penetration mechanism and numerical methods of the reinforced concretes under intensive impact loading were analyzed, and the further in-depth research work need to do in the future was prospected.

reinforced concrete, intensive impact loading, constitutive relation, high speed penetration, numerical simulation

doi: 10.1360/N092016-00003