

第二届全国爆炸与冲击动力学青年学者学术研讨会报告综述¹⁾

郑志军^{*2)} 詹世革[†] 戴兰宏^{**}

^{*}(中国科学技术大学近代力学系中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230026)

[†](国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085)

^{**}(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 简要介绍了第二届全国爆炸与冲击动力学青年学者学术研讨会的情况, 概况总结了与会学者所做的报告内容. 报告包括 3 个特邀报告、14 个专题邀请报告和 24 个主题邀请报告, 其中主题邀请报告分为爆轰和爆炸动力学、结构动力学和多尺度高性能计算、材料动力学和实验测试技术、复合材料结构的动态力学行为、轻质结构的吸能特性和优化设计等 5 个主题.

关键词 爆炸与冲击动力学, 青年学者, 学术研讨会

REVIEW OF THE SECOND NATIONAL SYMPOSIUM ON EXPLOSION AND IMPACT DYNAMICS FOR YOUNG SCHOLARS¹⁾

Zheng Zhijun^{*2)} Zhan Shige[†] Dai Lanhong^{**}

^{*}(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[†](Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)

^{**}(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The Second National Symposium on Explosion and Impact Dynamics for Young Scholars was briefly introduced and all of the scientific reports presented at this symposium were reviewed. The scientific reports include three invited talks, 14 thematic invitations and 24 topic invitations, which were divided into five research topics, i.e. Detonation and Explosion Dynamics, Structural Dynamics and Multi-scale High Performance Computing, Material Dynamics and Experimental Testing Techniques, Dynamic Mechanical Behavior of Composite Structures, and Energy Absorption Characteristics and Optimization Design of Lightweight Structures.

Key words explosion and impact dynamics, young scholars, symposium

引言

爆炸与冲击动力学是一门力学分支学科, 与物

理学、化学、材料学、生命科学等学科存在许多交叉研究, 主要的研究是在爆炸、冲击和能量突然沉积等强动载荷下介质、材料与结构的力学响应、效应和工

本文于 2018-01-03 收稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (11642014).

2) 郑志军, 副教授, 主要研究方向: 冲击动力学、材料力学行为与设计. E-mail: zjzheng@ustc.edu.cn

引用格式: 郑志军, 詹世革, 戴兰宏. 第二届全国爆炸与冲击动力学青年学者学术研讨会报告综述. 力学学报, 2018, 50(1): 177-187
Zheng Zhijun, Zhan Shige, Dai Lanhong. Review of the Second National Symposium on Explosion and Impact Dynamics for Young Scholars. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(1): 177-187

程技术应用. 该领域的本质问题是瞬态特性与动态响应问题, 其研究极具挑战性, 这不仅表现在研究对象都是多相不均匀介质, 而且这些介质往往处于力、热、电、磁的多场耦合环境下, 以及高温、高压、高应变率条件下. 受航空航天、交通运输、防御工事和武器技术需求的牵引, 爆炸与冲击动力学的研究和应用已成为材料动态本构关系、结构耐撞性设计和试验、常规武器与核武器设计和试验的重要理论基础, 也推动了爆炸加工与爆破工程、爆炸驱动与冲击加载技术、爆炸安全理论与技术、爆炸与冲击问题多尺度高性能计算的发展. 随着动高压加载技术、测量手段和分析方法的快速发展, 爆炸与冲击动力学已发展到了一个崭新的阶段, 它必将在民用安全、航空航天和武器装备等领域发挥重要作用.

爆炸与冲击动力学及其相关学科的快速发展, 对研究人员提出了更高要求, 及时跟踪国际最新研究进展对青年学者成长非常重要, 而发展国际领先的创新方法、解决本领域前沿科学问题, 迫切需要在研究队伍方面培育新的增长点. 为了对学科发展的新趋势及面临的挑战进行深层次探讨, 为青年工作者提供深入交流与合作的机会, 2015 年 10 月 30 日—11 月 1 日, 由国家自然科学基金委员会数理科学部发起和资助, 并联合中国力学学会爆炸力学专业委员会共同主办, 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室承办的“首届全国爆炸与冲击动力学青年学者学术研讨会”在北京召开^[1]. 从而奠定了该系列会议成为爆炸与冲击动力学青年学者高端学术交流平台的坚实基础, 对培养爆炸与冲击动力学领域青年人才、促进我国爆炸与冲击动力学学科的可持续发展具有重要意义.

2017 年 10 月 27—29 日, 由中国科学技术大学工程科学学院近代力学系、中国科学院材料力学行为和设计重点实验室联合承办的“第二届全国爆炸与冲击动力学青年学者学术研讨会”在合肥召开. 中国科学技术大学郑志军副教授担任本次研讨会主席, 负责组织协调工作, 会务组成员还包括马宏昊、王鹏飞、赵凯、崔世堂、郑航和学生志愿者. 此次研讨会也是中国科学技术大学六十年校庆系列活动之一.

国家自然科学基金委员会数理科学部常务副主任孟庆国研究员、力学处处长詹世革研究员, 中国科学技术大学副校长陈初升教授, 中国力学学会副理事长、爆炸力学专业委员会主任委员戴兰宏研究员、爆炸力学专业委员会秘书长王成教授、副主任委员周风华教授, 顶峰多尺度科学研究所所长罗胜年

教授, 中国科学技术大学工程科学学院执行院长陆夕云教授、近代力学系主任丁航教授、虞吉林教授、文鹤鸣教授, 中国科学院材料力学行为和重点实验室主任吴恒安教授、副主任倪勇教授和姜洪源教授等特邀嘉宾与会. 来自近 30 所高校和科研院所的 60 余位青年学者和特邀代表参会. 会议开幕式由中国科学技术大学丁航教授主持.

开幕式上, 中国科学技术大学副校长陈初升教授代表中国科学技术大学对与会专家和青年学者的到来表示热烈欢迎, 对基金委领导和各位同行的支持表示衷心感谢. 他认为国家自然科学基金对我国自然科学发展和高端人才培养事业至关重要, 对青年学者的学术成长和整个事业生涯的发展起着巨大的助推作用. 在国家和基金委的持续稳定支持下, 在发展态势良好的科研平台支撑下, 我国当代青年学者正处于自然科学研究的最好时代. 国家自然科学基金委员会数理科学部常务副主任孟庆国研究员在致辞中回顾了青年研讨会这一个学术交流平台的创立和发展历程, 总结了近年来会议取得的重要成果. 他表示, 新时代有新内涵更要有新思考, 期望与会青年学者对今后爆炸与冲击动力学的构建与扩大进行思考, 对力学发展所面临的问题尤其是力学实验的建制进行思考, 携手推进爆炸与冲击动力学的学科建设进程. 中国力学学会副理事长、爆炸力学专业委员会主任委员戴兰宏研究员在致辞中肯定了基金委创立的青年学者研讨会对后备力量的培养和学科建设所发挥的重要作用, 他代表爆炸力学专业委员会对基金委领导、特邀嘉宾的支持和指导表示衷心感谢. 同时, 他还与青年学者分享了自己的体会, 希望年轻的同行们能够重视科研选题, 积极参与学术交流, 脚踏实地并全身心投入地去做“顶天立地”的研究. 中国科学技术大学工程科学学院执行院长陆夕云教授简要介绍了中国科学技术大学近代力学系爆炸与冲击动力学方向的发展历程和近期的研究成果. 他介绍了中国科学技术大学爆炸力学专业(现称为工程力学专业)创立的历史、取得的成果以及表达了发展爆炸力学专业的决心、目标和蓝图.

本届研讨会上, 3 位爆炸与冲击动力学领域的知名学者宁波大学周风华教授、顶峰多尺度科学研究所罗胜年教授和中国科学技术大学文鹤鸣教授应邀做了特邀报告, 来自国内 24 所高校和科研院所的 38 位从事爆炸与冲击动力学的 40 岁以下的优秀青年学者应邀分别做了专题邀请报告和主题邀请报告. 下面对与会学者所做的报告内容进行简要介绍, 并

附上相关的代表性论文作为参考文献供进一步了解。

1 特邀报告

周风华教授在题为《冲击载荷作用下固体材料的多重损伤破坏过程》的报告中, 首先简要介绍了宁波大学力学与材料科学研究中心的发展历程以及固体动态碎裂机制的研究课题^[2]。通过固体材料的多重破坏和破碎的实例, 详细介绍了材料在不同冲击载荷作用下可能出现的多重绝热剪切^[3-4]、多重颈缩、多重内聚破碎^[5]等现象及其发生机理和分析模型, 包括基于卸载波传播距离控制碎片尺寸模型、基于能量守恒准则的模型、基于统计断裂分析的模型和其团队提出的最快速卸载理论^[6-7]。着重介绍了一种新型的液压冲击膨胀环实验装置、测试手段、分析方法和韧性/脆性碎裂的实验结果。总结讨论了爆炸与冲击载荷作用下固体材料的破碎机制, 指出在一个自然碎裂过程中固体材料以最快的速度达到内部卸载是动态碎裂的基本特征, 利用该物理机制可以预测材料动态破碎过程中产生的平均碎片尺寸。

罗胜年教授在题为《Probe materials dynamics at multiscales》报告中首先简要介绍了顶峰多尺度科学研究所的发展历程和研究方向, 然后通过材料动态响应的特征阐述了材料多时空尺度研究中存在的巨大挑战和机遇, 并以材料广义相变为例具体阐述了材料动态响应的多时空尺度耦合特性和对高时空分辨探测技术的巨大需求^[8-10]。其次, 系统回顾了超快成像和原位诊断技术的发展史, 系统介绍了基于同步辐射 X 射线光源、自由电子激光、带电粒子、超快激光与太赫兹等的先进诊断技术, 以及基于 Hopkinson 杆、气炮、磁驱、激光等装置的动态加载技术, 重点介绍了其已经在第三代同步辐射光源上实现的基于 Hopkinson 杆和气炮加载的、动态原位同时同步辐射 X 射线相衬成像和 Laue 衍射技术^[11-13], 时空分辨率可达百皮秒和微米量级。最后, 通过实例指出多尺度计算和模拟在机理揭示上的重要性和必要性, 例如 Fourier 空间抽样(如衍射)有助于弥补实空间测量(如成像)的局限性, 但需要模拟来辅助解读。

文鹤鸣教授在题为《长杆弹侵彻的统一理论》报告^[14-19]中介绍了反装甲、反航母和反地下深层目标的研究现状以及 Alekseevskii-Tate(A-T) 模型的局限性, 研究了长杆弹高速侵彻下半无限靶的侵彻、开坑问题以及二次侵彻(after-flow) 机理, 分析了不同冲击情形下出现的界面失效、刚体侵彻、变形非

侵蚀侵彻和销蚀侵彻等侵彻模式, 建立了长杆弹侵彻的统一理论, 探讨了不同弹体强度与靶板静阻力的弹靶组合关系, 并定义了不同侵彻模式之间的转变速度, 理论预测了侵彻深度、开坑半径、残余长度、弹道极限和残余速度。结果表明 A-T 模型仅是统一理论在撞击速度趋于无穷时的一个特例, 并通过钨长杆弹/钢弹侵彻钢靶、钨合金弹侵彻装甲钢靶、铝弹侵彻铝靶、高强钢半球头弹/卵形弹侵彻铝合金靶^[19]、EN24 钢外套钨合金弹芯夹芯弹侵彻半无限装甲钢靶等一系列侵彻实验检验了统一理论的有效性。

2 专题邀请报告

在专题邀请报告中, 14 位 40 岁以下青年学者结合各自承担的国家自然科学基金项目汇报了相关的研究工作, 并交流了其在研究过程中所遇到的问题和困难。14 个专题邀请报告分成 5 个小节, 与主题邀请报告环节穿插进行。许骏、马天宝、张先锋、董奇和索涛先后主持了 5 个小节的专题邀请报告。

张先锋在题为《头部刻槽弹体侵彻行为研究》报告^[20-22]中介绍了刻槽弹体的设计方法及侵彻机理研究现状, 研究了典型头部刻槽弹体侵彻混凝土靶机理, 建立了头部刻槽弹体结构数学表征及其局部相互作用模型, 分别基于尖楔劈裂模型及考虑切向剪切效应空腔膨胀模型提出了头部刻槽弹体侵彻过程靶体响应力函数, 理论结果与试验结果吻合较好, 可用于不同头部刻槽弹体侵彻行为的计算分析。

柳占立在题为《抗冲击波多尺度结构复合材料设计》报告^[23-25]中介绍了多尺度设计方法及其在合成具有多层次微结构的聚合物基复合材料上的应用, 实现了在较宽的频率及应变率范围内应力波能量的有效衰减和导引。在微观尺度上, 通过粗粒化分子动力学方法调整嵌段共聚物软/硬段的比例和排序方式, 以优化聚合物的动态模量; 在细观尺度上, 通过散射和共振机制设计微米尺度夹杂, 以衰减应力波能量。基于力学理论和模拟分析, 通过自组装等方法合成新型聚合物基复合材料, 并初步应用于新型防护装备设计。

马宏昊在题为《爆炸复合技术》报告^[26-28]中介绍了多种爆炸复合方法及其相应的复合机理, 研究了多种金属板材、多种金属管材一次性实现复合的临界条件和技术实现, 阐明了金属在爆炸加载产生的高应变率下的结合机理和界面形态, 阐述了力学强度与爆炸复合相结合的方法特点。

缪馥星在《柔性基/硅层合元件的冲击响应》报告^[29-31]中研究了不同厚度柔性基 PDMS 的动力学应力-应变关系;建立了不同基底和封装层层合元件的分析模型,计算分析了不同应变率下,层合元件的硅层的位移、速度和加速度响应;提出了柔性基/硅层合元件的抗冲击性能的评价参数;综合分析了不同模量和厚度下,柔性基/硅层合元件的抗冲击性能。

李建玲在题为《能量释放的空间不均匀性对含能材料爆轰的影响》报告^[32-34]中介绍了含能材料爆轰中能量释放空间不均匀性效应.通过人为定义计算初值条件中的二维正弦波密度分布函数以及随机密度分布函数来引入炸药空间非均匀性,建立了惰性屈服约束的非均匀炸药定量分析模型,系统阐述了介观尺度的空间非均匀性对爆轰波结构、爆速、炸药临界尺寸等宏观参数的影响,定量显示了爆轰临界极限区域空间非均匀性对于维持爆震波传播的正面影响。

吴先前在题为《强激光驱动的爆炸与冲击效应》报告^[35-37]中介绍了高功率密度激光与物质相互作用诱导形成爆炸与冲击效应的物理机制和定量描述方法,研究了强激光诱导产生等离子体爆炸载荷特征、剪切增稠流体等先进材料在强激光作用下的宏微观力学行为,建立了强激光-等离子体-材料相互作用的多物理场耦合分析模型、数值计算方法和瞬态测量方法,获得了强激光诱导爆炸与冲击效应的相似律。

马天宝在题为《双曲守恒系统的伪弧长数值方法研究》报告^[38-40]中介绍了针对爆炸冲击波强间断高分辨率数值求解的伪弧长方法,通过人为解方法对其精度进行了验证;提出了三维伪弧长方法的物理量守恒重构方法,实现了三维大规模并行计算;通过典型气相及凝聚相炸药爆炸问题的数值算例,证实了该方法能够有效地实现爆炸冲击波强间断的高分辨率计算。

许骏在《冲击载荷下的的动力锂电池机械完整性研究初步》报告^[41-43]中介绍了锂电池组分材料动态力学行为的研究工作,探讨了锂电池单体在冲击载荷下的力学响应与短路行为,揭示了锂电池短路行为的力学特征,为后续量化短路特征奠定了基础.通过多物理场耦合的方式,建立了能够描述锂电池单体从机械变形、短路到热失控等一系列事件的完整模型框架以及模拟方法,为动力锂电池的碰撞安全设计提供了必要的理论指导与模拟手段。

敬霖在题为《高速铁路车轮扁疤引起的轮轨冲

击力学响应》报告^[44-46]中建立了含车轮扁疤缺陷的轮轨三维滚动接触有限元模型;基于轮/轨材料应变率、温度相关的动态本构关系,计及轮轨滑移/转情形下摩擦温升的影响,分析了纯机械载荷和热-机械耦合载荷下轮轨垂向冲击力、Mises 等效应力、等效塑性应变和剪应力的分布情况;讨论了列车速度、扁疤长度、轴重和材料应变率效应对轮轨冲击响应的影响规律。

索涛在题为《碳纤维增韧陶瓷基复合材料在超高温环境下的力学行为》报告^[47-49]中介绍了超高温环境下材料动态力学行为测试方法和损伤演化原位实验表征技术,研究了碳纤维增韧陶瓷基复合材料在温度高达 1600°C 时的力学行为,揭示了温度和变形速率对材料力学性能的耦合影响规律,并基于微观形貌分析阐明了力热耦合条件下碳纤维增韧的碳化硅陶瓷基复合材料的变形与损伤机制。

高光发在题为《混凝土动态力学性能与抗侵彻行为研究中几点问题的分析》报告^[50-52]中介绍了当前混凝土动态压缩强度及其应变率强化效应的研究成果,研究了混凝土大口径 SHPB 试验中存在的 key 问题及其影响规律,提出了一套能够准确获取混凝土动态压缩性能的试验和数据处理方法,给出了混凝土动态杨氏模量和屈服强度及其应变率强化方程。

胡玲玲在题为《拉胀多孔材料力学性能》报告^[53-55]中介绍了拉胀材料特有的力学行为,阐明了连续介质理论在对拉胀蜂窝力学性能预测方面的局限性,探讨了负泊松比效应,建立了动态承载力等力学性能与胞孔构型间的解析关系式,为拉胀蜂窝的胞孔结构设计提供理论参考;设计了零泊松比蜂窝和三维拉胀材料,并提出了增强拉胀蜂窝刚度和强度的设计方法。

董奇在题为《金属和复合材料壳体在内部爆炸载荷作用下的动态力学行为》报告^[56-58]中介绍了爆炸容器的动力屈曲和反直观行为.在金属壳体的弹性动力学研究中,提出了应变增长现象的动力屈曲机理;在金属壳体弹塑性动力学研究中,建立了能预测反直观行为的分析模型,成功预测了反直观区域,揭示了反直观行为机理;在复合材料壳体研究中,发现了金属内衬反直观失效模式和动力屈曲进而导致纤维分层的失效模式。

李翔宇在题为《梯度泡沫夹心柱壳在内部爆炸载荷作用下的动态响应》报告中^[59-61]介绍了均质泡沫/梯度泡沫在爆炸载荷下的动态响应,建立了泡

沫压溃过程的控制方程及分析模型;对均质泡沫/梯度泡沫夹心柱壳在内爆载荷作用下的动态响应进行了理论分析、数值模拟和实验验证,获得了内外壳及芯体的运动方程,分析了芯体梯度、内外壳、爆炸载荷等因素对能量吸收和外壳变形量的影响规律,研究结果为便携式防爆容器设计提供参考依据。

3 主题邀请报告

在主题邀请报告中,24位40岁以下青年学者围绕爆轰和爆炸动力学、结构动力学和多尺度高性能计算、材料动力学和实验测试技术、复合材料结构的动态力学行为、轻质结构的吸能特性和优化设计等5个主题分成5小节先后进行报告。每个主题小节包括主题介绍、个人介绍和集中交流讨论。赵生伟、刘岩、林玉亮、熊健和张建勋先后主持了5小节的主题邀请报告,并分别做了主题介绍。

3.1 爆轰与爆炸动力学

赵生伟在题为《光纤探针应用于炸药爆轰实验研究》报告^[62-63]中介绍了光纤探针在固体高能炸药爆轰和燃烧转爆轰研究中的应用。通过埋设于炸药内的光纤探针,能够准确获得炸药完全爆轰或燃烧转爆轰过程化学反应阵面传播速度及轨迹,并能够分析得出燃烧转爆轰的冲击形成距离。此外,光纤波形也能够用于爆轰波阵面组成结构的分析。

张博在题为《气相爆轰动力学复杂规律的特征》报告^[64-66]中介绍了近年来在气相爆轰动力学表征规律方面开展的研究工作,主要包括爆轰胞格结构尺寸、爆轰极限、爆轰临界直径和直接起爆形成爆轰的临界能量,探讨了各表征参数在复杂工况下的特征与规律,建立了各表征参数之间的动力学联系。

罗宁在题为《气液爆轰法制备碳基纳米材料及机理研究》报告^[67-69]中介绍了自主发明设计的爆轰设备,开展了气液爆轰制备碳基纳米结构材料的相关研究,探讨了不同环境下碳基纳米结构复合材料的形貌、结构、磁性等特征;建立了可描述气液爆轰一维数值计算程序,提出了一种高效、稳定的数值计算方法,初步实现了对多相爆轰的主动控制。

曾昊在题为《激波聚焦爆震起爆研究》报告^[70-72]中介绍了激波周向聚心入射起爆爆震的研究工作,利用暂冲式激波管开展了气相激波聚焦起爆试验,并通过数值计算模拟了详细的起爆过程;同时也介绍了连续射流聚心碰撞诱导激波聚焦的研

究工作,在二维和三维凹面腔内进行了连续射流碰撞实验,针对不能形成足够强度激波的情况提出了三个方面的模型优化方案。

3.2 结构动力学和多尺度高性能计算

刘岩在题为《强冲击下材料响应的质点型细观结构建模与模拟研究》报告^[73-75]中介绍了所发展的泡沫材料、蜂窝材料、纺织复合材料的新型细观结构建模方案,以及基于质点细观模型的强冲击过程的直接模拟方法。质点模型能更加真实、准确地体现材料内部细节,进而给出细观结构对于宏观动力学响应的影响机制。报告还介绍了基于细观直接模拟所发展的改进蜂窝高速撞击防护结构,在未增加新材料和质量的情况下大幅提升了防护效果。

裴晓阳在题为《计算爆炸与冲击动力学发展思考》报告^[76-78]中介绍了极端条件下爆炸与冲击动力学的应用需求和研究方向,分析了动态断裂、炸药安全性等典型问题的主要特征,强调了计算爆炸与冲击动力学存在的科学挑战和技术挑战,提出了对物理建模和计算方法方面发展的思考。

张锦华在题为《强动载下工程材料三维细观数值模拟初探》报告^[79-81]中介绍了冲击、爆炸、侵彻等强动载条件下普通混凝土/钢纤维混凝土等混凝土类材料、泡沫铝/泡沫陶瓷等多胞类材料、干砂/落石等颗粒类材料的细观建模方法,研究了强动载下材料的细观损伤破坏机理以及宏观力学性能,探讨了不同应变率条件下材料损伤破坏机理的变化规律。

汪亦显在题为《地铁盾构隧道衬砌管片动力响应研究》报告^[82-84]中介绍了全国地铁的建设概况,针对地铁衬砌管片接头张合状态建立了精细计算模型,采用刚度折减法分析了爆炸、地震作用下管片的动力响应及影响,提出了抗震、抗爆设计时应考虑的加固措施。

李干在题为《侵彻机理演变规律初步研究》报告^[85-87]中介绍了采用100/30mm二级轻气炮开展的1200~4000m/s花岗岩侵彻实验,发现侵彻深度与侵彻速度的关系呈现出先线性增大后急剧降低再缓慢变化的三段式、二次峰值的特征;提出了考虑弹体质量损失的侵深计算模型,并与实验结果相印证;探讨了超高速长杆弹对花岗岩侵彻深度递减现象的内在机制和演变规律。

3.3 材料动力学和实验测试技术

林玉亮在题为《膨胀管分离装置分离过程中冲击特性研究》报告^[88-89]中介绍了膨胀管线式火工

分离装置分离过程中的冲击环境问题,给出了分离过程中扁平管撞击边界板和分离板断裂这两类主要冲击源的定量占比,设计并开展实验考察了材料性能和断裂模式对冲击特性的影响,明确了影响冲击特性的关键材料参数和断裂角度,提出了分离装置一体式设计方案,有效降低了分离板断裂所产生的冲击。

郑宇轩在题为《液压膨胀环实验技术》报告^[2,90]中介绍了一种新型的液压驱动的冲击膨胀环实验技术。利用液体体积近似不可压缩的特性,通过液压仓截面积的大比例缩小,将较低速度的对活塞冲击转化为高速的圆环试件沿径向膨胀,从而驱动试件发生拉伸变形直至断(碎)裂,膨胀环试件不局限于韧性金属,对于脆性固体同样适用。

潘昊在题为《高压加载下金属材料强度特点及理论建模》报告^[91-93]中分析了高压、高应变率加载下金属材料宏观强度测量变化特点以及现有理论模型的不足,阐明了将材料的微观结构特性与宏观力学行为相联系的必要性,建立了含孪晶的热弹-黏塑性晶体塑性模型及相应计算程序,模拟了 Al、Ta 和 Be 材料在高压加载下的动力学变形及其织构演化过程,发现材料织构及孪晶变化等对于材料动态强度有着明显的影响,从细观出发建立的本构模型可以更好地描述材料在高压、高应变率下的动态响应行为。

罗斌强在题为《动高压下镁合金的力学行为》报告^[94-96]中介绍了磁驱动准等熵压缩实验设计、磁流体数值计算方法、实验数据处理方法和实验不确定度的评估,建立了磁驱动准等熵加载精密物理实验技术,发展了磁驱动斜波压剪联合加载实验技术,获得了典型金属材料在斜波压缩下的状态方程和高压强度。

徐豫新在题为《超高强度合金钢的动态力学行为与对钢板的侵彻效应》报告^[97-100]中介绍了典型超高强度合金钢 35CrMnSiA 在准静态拉伸和动态压缩下的失效机制,建立了以塑性应变能密度和塑性应变能密度增加率为参数的超高强度合金钢在中应变率下绝热剪切失效判据;通过平板撞击实验,获得了 35CrMnSiA 钢在高压下发生固态相变的压力阈值,发现当冲击压力超过相变阈值后,材料发生可逆相变,动态再结晶导致的晶粒细化使材料强度提升、塑性下降,微观组织演化出较多微孔洞使材料破碎更加剧烈;提出了防弹钢板强度和韧性并重的原则,建立了平头 35CrMnSiA 钢弹体对钢板高速冲击

下的材料失效判据。

3.4 复合材料结构的动态力学行为

熊健在题为《轻质复合材料结构爆炸与冲击力学行为研究》报告^[101-103]中介绍了轻质复合材料结构设计、制备、力学性能表征与评价方法,着重介绍了复合材料结构在动态载荷作用下的力学行为,研究了轻质复合材料结构和生物多孔结构在冲击/爆炸载荷作用下的失效机制与动态响应问题,并对轻质复合材料结构在舰船抗爆防护结构中的应用提出了若干建议,基于空穴膨胀理论建立了生物多孔结构在战场环境下冲击行为的细观有限元模型和理论预报模型,总结展望了生命科学领域存在的结构动态力学问题。

李鑫在题为《纤维金属复合结构的抗冲击性能》报告^[104]中介绍了纤维金属层合板、纤维增强梯度蜂窝夹芯板以及纤维金属复合圆管在撞击和爆炸载荷作用下的动力响应,研究了载荷强度、纤维类型以及纤维金属复合方式对结构动力行为的影响,得到了不同参数下结构的变形/失效模式以及能量吸收规律。研究表明与传统金属结构相比,纤维金属复合结构能有效提高结构的抗冲击性能。

范吉堂在题为《三种抗冲击材料的研发及防护结构设计的探索》报告^[105-107]中详细介绍了软体聚合物材料、硬质聚合物材料和梯度金属材料在抗冲击性能方面的研究成果。这三种抗冲击材料分别表现出了独特的性能,软体聚合物材料:透明、高动态硬化、大变形、形状可恢复;硬质聚合物材料:透明、动态硬化、动态延展性、高吸能;梯度金属材料:低模量、高应变硬化率、高断裂强度、抵抗动态软化。这三种材料可用于制备超高防护性能的透明结构和装甲结构等。

王鹏飞在题为《碳纳米管纤维的应变率效应及失效机理》报告中介绍了泡沫金属^[108]、层合结构^[109]和碳纳米管纤维^[110]的动态力学性能研究,着重介绍了具有不同螺旋结构的碳纳米管纤维的动静态力学性能,研究了单根碳纳米管纤维的应变率敏感性,阐明了应变率增强与失效机理,通过建立宏观和细观力学模型揭示了纤维的脆脆性对其动态破坏模式的影响。

3.5 轻质结构的吸能特性和优化设计

张建勋在题为《轻质金属夹芯结构的静动态力学行为》报告^[111-113]中首先介绍了泡沫金属材料及其夹芯结构的力学行为和轻量化设计,研究了两端

固支和筒支几何非对称金属泡沫夹芯梁的初始失效模式。基于所建立的理论分析模型构建了失效机制图,给出了几何非对称金属泡沫夹芯梁在大质量低速物体侧向撞击下的动态响应模型。采用塑性弦模型,给出了两端固支金属波纹形夹芯板在均布爆炸冲击载荷作用下动态响应的理论解。

侯兵在题为《多孔材料动态复合加载响应研究》报告^[114-116]中介绍了两种基于 Hopkinson 杆装置的多胞材料动态压剪复合加载实验技术,研究了金属蜂窝结构在不同压剪复合加载状态下的力学响应和变形模式,揭示了该材料基于横向惯性效应的动态强化机理,建立了其在平台应力阶段的屈服包线,用于指导其作为吸能元件的工程应用。

刘家贵在题为《泡沫金属动力学特性及冲击波的传播规律的实验研究》报告^[117-119]中介绍了一种基于 Hopkinson 杆直接撞击技术、光学应变测量技术和有限长杆两点应变法的应力波分离技术,提出了泡沫金属中应变率下从屈服到压实的测试方法,得到了泡沫铝动态全应力-应变曲线;同时介绍了 Taylor-Hopkinson 杆测试泡沫金属高速冲击性能的实验方法,并讨论了冲击波形成的判定方法。

陈立明在题为《点阵圆柱壳结构吸能特性研究》报告^[120-122]中介绍了纤维增强热固性和热塑性复合材料点阵圆柱壳结构设计制备与静动力学性能表征方面的研究进展,提出了一种多层级热塑性复合材料圆柱壳结构设计方法,可有效降低结构峰值应力和提高结构吸能效率,研究了梯度点阵圆柱壳在低速和高速动态压溃下的变形模式和吸能机制。

李世强在题为《梯度多孔夹芯结构的冲击动力学行为》报告^[123-125]中介绍了三种梯度多孔金属夹芯结构在爆炸载荷作用下的动态响应,通过实验研究和数值模拟分析了不同梯度夹芯结构在爆炸载荷作用下的抗冲击性能和吸能特性,对比了不同芯层排布方式对结构抗爆炸能力和层间力及应力传递特征的影响,给出了梯度夹芯结构的最佳芯层排布方式。

郑志军在题为《梯度多胞材料的耐撞性设计》报告中介绍了多胞材料的动态率敏感性^[126]和耐撞性设计^[127-128],研究了梯度多胞材料在冲击/爆炸载荷作用下的动态响应问题,建立了可描述梯度多胞材料动态压溃的细观有限元模型和一维冲击波模型,提出了一种基于冲击波模型反向求解密度梯度的耐撞性设计方法,通过引入连续梯度多胞材料实现了对冲击载荷的主动控制。

4 结束语

本届研讨会上,三类报告的时间安排基本合理,与会代表进行了较为充分的交流。尽管主题邀请报告中个人介绍时间较短,但是集中交流讨论环节尤为激烈,与会代表能够就爆炸与冲击动力学领域的研究热点和难点进行深入的交流和讨论,收到了预期的效果。

学术报告结束后,与会代表还就爆炸与冲击动力学的学科发展和前沿动态、学术成果的发表和交流,以及青年人才的培养和成长规划等话题进行了自由讨论。中国力学学会副理事长、中国力学学会爆炸力学专业委员会主任委员戴兰宏研究员主持了自由讨论环节。与会代表表示,研讨会为从事爆炸与冲击动力学的青年学者开展学术交流、建立学术友谊、增强学术合作提供了优秀平台,对学科的发展和建设起到了积极作用,也增强了青年学者积极投身爆炸与冲击动力学发展的信心和决心。

自由讨论结束后,国家自然科学基金委员会数理科学部力学处处长詹世革研究员作了总结讲话。詹处长首先向会务人员、特邀嘉宾和青年学者表达了感谢,其次对会议的格局、报告的水平 and 研究的覆盖面等三方面谈了感慨,最后就专业特色与学科交叉、研究方法与科学问题、基金申请与项目资助等三方面谈了感触。她认为新时代要开启新征程、谱写新篇章,本次研讨会正是在此背景下召开的一次盛会;她希望青年学者能够借研讨会之机,共商学术议题,共话研究进展,共同促进爆炸与冲击动力学学科的蓬勃发展;同时,她还建言青年学者开拓思维、解放思想,多关注与力学相关的交叉学科和研究方法,多深入面向科学前沿、面向国家重大需求、面向国际民生的大问题,提炼真正具有科学共性、机理性的学术选题并对之开展深入的研究。

最后,经与会青年学者无记名投票决定“第三届全国爆炸与冲击动力学青年学者学术研讨会”由南京理工大学承办。

参 考 文 献

- 1 刘彦,王成,詹世革等. 首届全国爆炸与冲击动力学青年学者学术研讨会报告综述. 力学学报, 2016, 48(4): 1013-1018 (Liu Yan, Wang Cheng, Zhan Shige, et al. Review of the first national symposium on explosion and shock dynamics for young scholars. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(4): 1013-1018 (in Chinese))
- 2 郑宇轩,周风华,胡时胜等. 固体的冲击拉伸碎裂. 力学进展

- 2016, 46: 201612 (Zheng Yuxuan, Zhou Fenghua, Hu Shisheng, et al. Fragmentations of solids under impact tension. *Advances in Mechanics*, 2016, 46: 201612 (in Chinese))
- 3 Zhou FH, Wright TW, Ramesh KT. A numerical methodology for investigating the formation of adiabatic shear bands. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2006, 54(5): 904-926
- 4 Zhou FH, Wright TW, Ramesh KT. The formation of multiple adiabatic shear bands. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2006, 54(7): 1376-1400
- 5 Zhou FH, Molinari JF, Ramesh KT. Effects of material properties on the fragmentation of brittle materials. *International Journal of Fracture*, 2006, 139(2):169-196
- 6 Zhou FH, Wang LL. Energy transform in a brittle fragmentation process and the estimation of fragment size. *Strength, Fracture and Complexity*, 2010, 6(1-2): 3-16
- 7 郑宇轩, 周风华, 余同希. 动态碎裂过程中的最快速卸载现象. *中国科学 (技术科学)*, 2016, 46: 332-338 (Zheng Yuxuan, Zhou Fenghua, Yu Tongxi. The rapidest unloading in dynamic fragmentation events. *Science China Technological Sciences*, 2016, 46: 332-338 (in Chinese))
- 8 Luo SN, An Q, Germann TC, et al. Shock-induced spall in solid and liquid Cu at extreme strain rates. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(1): 013502
- 9 Cai Y, Wu HA, Luo SN. Cavitation in a metallic liquid: Homogeneous nucleation and growth of nanovoids. *The Journal of Chemical Physics*, 2014, 140(21): 214317
- 10 Zhao F, Wang L, Fan D, et al. Macrodeformation twins in single-crystal aluminum. *Physical Review Letters*, 2016, 116(7): 075501
- 11 Lu L, Fan D, Bie BX, et al. Note: Dynamic strain field mapping with synchrotron X-ray digital image correlation. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(7): 076101
- 12 Fan D, Huang JW, Zeng XL, et al. Simultaneous, single-pulse, synchrotron x-ray imaging and diffraction under gas gun loading. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5): 053903
- 13 Lu L, Huang JW, Fan D, et al. Anisotropic deformation of extruded magnesium alloy AZ31 under uniaxial compression: A study with simultaneous in situ synchrotron x-ray imaging and diffraction. *Acta Materialia*, 2016, 120: 86-94
- 14 Wen HM, Lan B. Analytical models for the penetration of semi-infinite targets by rigid, deformable and erosive long rods. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 26(4): 573-583
- 15 Lan B, Wen HM. Alekseevskii-Tate revisited: An extension to the modified hydrodynamic theory of long rod penetration. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(5): 1364-1373
- 16 Wen HM, He Y, Lan B. Analytical model for cratering of semi-infinite metallic targets by long rod penetrators. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(12): 3189-3196
- 17 Wen HM, He Y, Lan B. A combined numerical and theoretical study on the penetration of a jacketed rod into semi-infinite targets. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(12): 1001-1010
- 18 He Y, Wen HM. Predicting the penetration of long rods into semi-infinite metallic targets. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(11): 2814-2820
- 19 Lu ZC, Wen HM. On the penetration of high strength steel rods into semi-infinite aluminium alloy targets. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 111: 1-10
- 20 庞春旭, 何勇, 沈晓军等. 刻槽弹体旋转侵彻混凝土效应试验研究. *兵工学报*, 2015, 36(1): 46-52 (Pang Chunxun, He Yong, Shen Xiaojun, et al. Experimental investigation on penetration of grooved projectiles into concrete targets. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(1): 46-52 (in Chinese))
- 21 Guo L, He Y, Zhang XF, et al. Thermal-mechanical analysis on the mass loss of high-speed projectiles penetrating concrete targets. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2017, 65: 159-177
- 22 Deng JJ, Zhang XF, Liu C, et al. Penetration performance of axisymmetric U-shape-nose grooved projectile into aluminum target: Theoretical model and experiment. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2017, under review
- 23 Liu ZL, Oswald J, Belytschko T. XFEM modeling of ultrasonic wave propagation in polymer matrix particulate/fibrous composites. *Wave Motion*, 2013, 50: 389-401
- 24 Zeng QL, Liu ZL, Xu DD, et al. Modeling arbitrary crack propagation in coupled shell/solid structures with X-FEM. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2016, 106(12): 1018-1040
- 25 Wang CY, Liu ZL, Gao LJ, et al. Analytical and numerical modeling on resonant response of particles in polymer matrix under blast wave. *Computational Materials Science*, 2017, 140: 70-81
- 26 Jiao L, Cai J, Ma HH, et al. Research on applications of rectangular beam in micro laser propulsion. *Applied Surface Science*, 2014, 301: 481-487
- 27 Lin MJ, Ma HH, Shen ZW, et al. Effect of Aluminum Fiber Content on the Underwater Explosion Performance of RDX-based Explosives. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2014, 39(2): 230-235
- 28 Miao GH, Ma HH, Shen ZW, et al. Research on honeycomb structure explosives and double sided explosive cladding. *Materials & Design*, 2015, 34(1): 31-35
- 29 Miao FX, Sun GJ, Chen KF. Transient response analysis of balanced laminated composite beam by the method of reverberation ray matrix. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 77: 121-129
- 30 Miao FX, Sun GJ, Chen KF, et al. Reverberation-ray matrix analysis of the transient dynamic responses of asymmetrically laminated composite beams based on the first-order shear deformation theory. *Composite Structures*, 2015, 119: 394-411
- 31 Miao FX, Sun GJ, Zhu PP. Developed reverberation-ray matrix analysis on transient responses of laminated composite frame based on the first-order shear deformation theory. *Composite Structures*, 2016, 143: 255-271
- 32 Li JL, Mi XC, Higgins AJ. Geometric scaling for a detonation wave governed by a pressure-dependent reaction rate and yielding confinement. *Physics of Fluids*, 2015, 27 (2): 027102-21
- 33 Li JL, Mi XC, Higgins AJ. Effect of spatial heterogeneity on near-limit propagation of a pressure-dependent detonation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 2025-2032
- 34 Li JL, Li HB, Zhao L, et al. The influence of spatial heterogeneity in energetic material on non-ideal detonation propagation//31th International Symposium on Shock Waves, July 9-14, 2017, Nagoya, Japan

- 35 Wu XQ, Duan ZP, Song HW, et al. Shock pressure induced by glass-confined laser shock peening: Experiments, modeling and simulation. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(5): 053112
- 36 Wu XQ, Tan QM, Huang CG. Geometrical scaling law for laser shock processing. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(4): 043105
- 37 Wu XQ, Zhong FC, Yin QY, et al. Dynamic response of shear thickening fluid under laser induced shock. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(7): 071903
- 38 Wang X, Ma TB, Ning JG. A pseudo arc-length method for numerical simulation of shock waves. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(3): 030201
- 39 Ning JG, Yuan XP, Ma TB, et al. Positivity-preserving moving mesh scheme for two-step reaction model in two dimensions. *Computers & Fluids*, 2015, 123: 72-86
- 40 Yuan XP, Ning JG, Ma TB, et al. Stability of Newton TVD Runge-Kutta scheme for one-dimensional Euler equations with adaptive mesh. *Applied Mathematics and Computation*, 2016, 282: 1-16
- 41 Xu J, Liu B, Wang X, et al. Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies. *Applied Energy*, 2016, 172: 180-189
- 42 Liu B, Yin S, Xu J. Integrated Computation model of lithium-ion battery subject to nail penetration. *Applied Energy*, 2016, 183: 278-289
- 43 Liu B, Zhao H, Yu H, et al. Multi-physics computational framework for cylindrical lithium-ion batteries under mechanical abusive loading. *Electrochimica Acta*, 2017, 256: 172-184
- 44 Jing L, Han LL. Further study on the wheel-rail impact response induced by a single wheel flat: the coupling effect of strain rate and thermal stress. *Vehicle System Dynamics*, 2017, 55(12): 1946-1972
- 45 Jing L, Su XY, Zhao LM. The dynamic compressive behavior and constitutive modeling of D1 railway wheel steel over a wide range of strain rates and temperatures. *Results in Physics*, 2017, 7: 1452-1461
- 46 Han LL, Jing L, Zhao LM. Finite element analysis of the wheel-rail impact behavior induced by a wheel flat for high-speed trains: The influence of strain rate. *Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 2017, DOI: 10.1177/0954409717704790
- 47 Suo T, Fan XL, Hu GL, et al. Compressive behavior of C/SiC composites over a wide range of strain rates and temperatures. *Carbon*, 2013, 62: 481-492
- 48 Chen X, Li YL, Shi CS, et al. The dynamic tensile properties of 2D-C/SiC composites at elevated temperatures. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 79: 75-82
- 49 Zhang C, Suo T, Tan WL, et al. An experimental method for determination of dynamic mechanical behavior of materials at high temperatures. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 102: 27-35
- 50 Gao GF, Qi MJ, Li YC. Random equilateral Kelvin open-cell foam microstructures: Cross-section shapes, compressive behavior, and isotropic characteristics. *Journal of Cellular Plastics*, 2016: 0021955X16670583
- 51 Guo YB, Gao GF, Jing L, et al. Response of high-strength concrete to dynamic compressive loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108: 114-135
- 52 高光发. 混凝土材料动态压缩强度的应变率强化规律. 高压物理学报, 2017, 31(3): 261-270 (Gao Guangfa. Effect of strain-rate hardening on dynamic compressive strength of plain concrete. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 261-270 (in Chinese))
- 53 Fu MH, Xu OT, Hu LL, et al. Nonlinear shear modulus of re-entrant hexagonal honeycombs under large deformation. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, 80: 284-296
- 54 Fu MH, Chen Y, Hu LL. Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs. *Composite Structures*, 2017, 175: 101-110
- 55 Fu MH, Chen Y, Hu LL. A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength. *Composite Structures*, 2017, 160: 574-585
- 56 Dong Q, Li QM, Zheng JY. Further study on strain growth in spherical containment vessels subjected to internal blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(2): 196-206
- 57 Dong Q, Li QM, Zheng JY. Further study on counter-intuitive response of single-degree-of-freedom structures. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(5): 305-308
- 58 Dong Q, Wang PL, Yi CH, et al. Dynamic failure behavior of cylindrical glass fiber composite shells subjected to internal blast loading. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*, 2016, 138(6): 1-5
- 59 Liang MZ, Lu FY, Zhang GD, et al. Experimental and numerical study of aluminum foam-cored sandwich tubes subjected to internal air blast. *Composite Part B: Engineering*, 2017, 125: 134-143
- 60 Liang MZ, Zhang GD, Lu FY, et al. Blast resistance and design of sandwich cylinder with graded foam cores based on Voronoi algorithm. *Thin-Walled Structure*, 2017, 112: 98-106
- 61 Liang MZ, Li ZB, Lu FY, et al. Theoretical and numerical investigation of blast responses of continuous-density graded cellular materials. *Composite Structure*, 2017, 164: 170-179
- 62 赵生伟, 王长利, 李迅等. 光纤探针应用于爆速测试实验研究. 应用光学, 2015(2): 327-331 (Zhao Shengwei, Wang Changli, Li Xun, et al. Experiment research of fiber probe applied in detonation velocity test. *Journal of Applied Optics*, 2015(2): 327-331 (in Chinese))
- 63 赵生伟, 丁洋, 王长利等. 快热作用下带壳梯黑铝炸药快速燃烧实验研究. 兵工学报, 2017, 38(11): 2105-2110 (Zhao Shengwei, Ding Yang, Wang Changli, et al. Experimental investigation about fast burning of TNT-RDX-Al explosive with shell at fast heating rate. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(11): 2105-2110 (in Chinese))
- 64 Zhang B, Mehrjoo N, Ng HD, et al. On the dynamic detonation parameters in acetylene-oxygen mixtures with varying amount of argon dilution. *Combustion and Flame*, 2014, 161: 1390-1397
- 65 Zhang B. The influence of wall roughness on detonation limits in hydrogen-oxygen mixture. *Combustion and Flame*, 2016, 169: 333-339
- 66 Zhang B, Liu H. The effects of large scale perturbation-generating obstacles on the propagation of detonation filled with methane-oxygen mixture. *Combustion and Flame*, 2017, 182: 279-287
- 67 Luo N, Jing HW. Gaseous detonation fabrication of CNTs and CNTs doping with Fe based composites. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2016, 7: 110-114
- 68 Luo N, Jing HW, Ma ZG, et al. Gaseous detonation chemical synthesis of onion-like carbons. *Mendeleev Communications*, 2017, 27:

- 1-3
- 69 Luo N, Jing HW, Ma ZG, et al. Growth characteristics of sphere titanium oxide nanoparticles during the rapid gaseous detonation chemistry reaction. *Particuology*, 2017, 2(14): 345-349
- 70 Zeng H, He LM. Investigation on shock wave focusing in 2-stage PDE//25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, August 2-7, 2015, Leeds, UK
- 71 Zeng H, He LM. Influence of cavity outlet area on shock wave focusing//10th Asia Pacific Conference on Combustion, July 19-22, 2015, Beijing, China
- 72 Zeng H, He LM. Experimental investigation on 2-stage pulse detonation combustion//10th Asia Pacific Conference on Combustion, July 19-22, 2015, Beijing, China
- 73 Liu Y, Gong WW, Zhang X. Numerical investigation of influences of porous density and strain-rate effect on dynamical responses of aluminum foam. *Computational Materials Science*, 2014, 91: 223-230
- 74 Liu P, Liu Y, Zhang X. Internal-structure-model based simulation research of shielding properties of honeycomb sandwich panel subjected to high-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 77: 120-133
- 75 Liu P, Liu Y, Zhang X. Simulation of hyper-velocity impact on double honeycomb sandwich panel and its staggered improvement with internal-structure model. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2016, 12(2): 241-254
- 76 Pei XY, Li P, Yu JD, et al. Shock-induced polymorphic phase transition and spallation in iron. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2010, 11: 231-234
- 77 Wang SJ, Sui ML, Pei XY, et al. Microstructural fingerprints of phase transitions in shock-loaded iron. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1086
- 78 Yao SL, Pei XY, Yu JD, et al. A dislocation based explanation of quasi-elastic release in shock-loaded aluminum. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(3): 035101
- 79 方秦, 张锦华, 还毅等. 全级配混凝土三维细观模型的建模方法研究. *工程力学*, 2013, 30(1): 14-30 (Fang Qin, Zhang Jinhua, Huan Yi, et al. The investigation into three-dimensional mesoscale modelling of fully-graded concrete. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 14-30 (in Chinese))
- 80 Fang Q, Zhang JH, Zhang YD, et al. A 3D mesoscopic model for the closed-cell metallic foams subjected to static and dynamic loadings. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 82:103-112
- 81 Fang Q, Zhang JH, Zhang YD, et al. Mesoscopic investigation of the sand particulate system subjected to intense dynamic loadings. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 89: 62-71
- 82 汪亦显, 单生彪, 任伟新等. 地震作用下盾构隧道衬砌结构动力响应分析. *土木工程学报*, 2016, 49(S2): 150-156 (Wang Yixian, Shan Shengbiao, Ren Weixin, et al. Dynamic response analysis of lining structure for shield tunnel under seismic loading. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(S2): 150-156 (in Chinese))
- 83 单生彪, 汪亦显, 郭盼盼等. 爆炸冲击下盾构隧道衬砌结构的动力响应特性. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 17(4): 315-321 (Shan Shengbiao, Wang Yixian, Guo Panpan, et al. Dynamic response characteristics of shield tunnel lining structure subjected to blasting shock. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 17(4): 315-321 (in Chinese))
- 84 汪亦显, 单生彪, 袁海平等. 盾构隧道衬砌管片接头张合状态力学模型及数值模拟. *建筑结构学报*, 2017, 38(5): 158-166 (Wang Yixian, Shan Shengbiao, Yuan Haiping, et al. Mechanical model and numerical simulation for patulous-occlusive situation of joint of shield tunnel lining segment. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(5): 158-166 (in Chinese))
- 85 Li G, Chen MS, Li XK. Slicing response model for ablation mass removal of Polyformaldehyde irradiated by pulsed CO₂ laser in vacuum. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(1): 158-162
- 86 Li G, Chen MS, Li XK. Ablation threshold and ablation mechanism transition of polyoxymethylene irradiated by CO₂ laser. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 7042-7049
- 87 李干, 宋春明, 邱艳宇等. 超高速弹对花岗岩侵入深度递减现象的理论及实验研究. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(1): 1-7 (Li Gan, Song Chunming, Qiu Yanyu, et al. Theoretical and experimental studies on the phenomenon of penetration depth reverse reduction in the penetration of granite by hyper-velocity projectiles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 1-7 (in Chinese))
- 88 Chen R, Li K, Xia KW, et al. Dynamic fracture properties of rocks subjected to static pre-load using notched semi-circular bend method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(10): 3865-3872
- 89 李康, 林玉亮, 陈荣等. 膨胀管分离装置中分离板材料参数引起的减冲击特性研究. *北京理工大学学报*, 2017, 已接受 (Li Kang, Lin Yuliang, Chen Rong, et al. Investigation on shock reduction characteristics caused by material parameters of separation plate in super*zip separation joint. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, in press (in Chinese))
- 90 郑宇轩, 周风华, 胡时胜. 一种基于 SHPB 的冲击膨胀环实验技术. *爆炸与冲击*, 2014, 34(4): 483-488 (Zheng Yuxuan, Zhou Fenghua, Hu Shisheng. An SHPB-based experimental technique for dynamic fragmentations of expanding rings. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(4): 483-488 (in Chinese))
- 91 潘昊, 胡晓棉, 吴子辉等. 钨低压冲击相变数值模拟研究. *物理学报*, 2012, 61(20): 206401-206401 (Pan Hao, Hu Xiaomian, Wu Zihui et al. Numerical study of shock-induced phase transformation of cerium under low pressure. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(20): 206401 (in Chinese))
- 92 Pan H, Hu X, Wu Z. Application backwards characteristics analysis method to dynamic response of metals under high pressure. EPJ Web of Conferences. *EDP Sciences*, 2015, 94: 01007
- 93 潘昊, 吴子辉, 胡晓棉. 非对称冲击 - 卸载实验中纵波声速的特征线分析方法. *物理学报*, 2016, 65(11): 116201 (Pan Hao, Wu Zihui, Hu Xiaomian. Characteristic method to infer the high-pressure sound speed in a nonsymmetric impact and release experiment. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(11): 116201 (in Chinese))
- 94 Luo BQ, Wang GJ, Mo JJ, et al. Verification of conventional equations of state for tantalum under quasi-isentropic compression. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116: 193506
- 95 Luo BQ, Li M, Wang GJ, et al. Strain rate and hydrostatic pressure effects on strength of iron. *Mechanics of Materials*, 2017, 114: 142-146

- 96 Luo BQ, Chen XM, Wang GJ, et al. Dynamic strength measurement of aluminum under magnetically driven ramp wave pressure-shear loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 100: 56-61
- 97 Ren J, Xu YX, Liu JX, et al. Effect of strength and ductility on anti-penetration performance of low-carbon alloy steel against blunt-nosed cylindrical projectiles. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 682: 312-322
- 98 任杰, 徐豫新, 王树山. 超高强度平头圆柱形弹体对低碳合金钢板的高速撞击实验. *爆炸与冲击*, 2017, 37(4): 629-636 (Ren Jie, Xu Yuxin, Wang Shushan. High-speed impact of low-carbon alloy steel plates by ultra-high strength blunt projectiles. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 629-636 (in Chinese))
- 99 任杰. 35CrMnSiA 钢对低碳合金钢的侵彻效应. [硕士论文]. 北京: 北京理工大学, 2017 (Ren Jie. Penetration effect of 35CrMnSiA steel to low-carbon alloy steel. [Master Thesis]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017 (in Chinese))
- 100 Ren J, Xu YX, Zhao XX, et al. Dynamic mechanical behaviors and failure thresholds of ultra-high strength low-alloy steel under strain rate 0.001/s to 10⁶/s. *Materials Science & Engineering A*, In review
- 101 Xiong J, Vaziri A, Ma L, et al. Compression and impact testing of two layer composite pyramidal-core sandwich panels. *Composite Structures*, 2012, 94(2): 793-801
- 102 Xiong J, Ma L, Pan SD, et al. Shear and bending performance of carbon fiber composite sandwich panels with pyramidal truss cores. *Acta Materialia*, 2012, 60: 1455-1466
- 103 Xiong J, Ma L, Vaziri A, et al. Mechanical behavior of carbon fiber composite lattice core sandwich panels fabricated by laser cutting. *Acta Materialia*, 2012, 60: 5322-5334
- 104 Li X, Zhang X, Zhang H, et al. Mechanical behavior of Ti/CFRP/Ti laminates with different surface treatments of titanium sheets. *Composite Structures*, 2017, 163: 21-31
- 105 Fan JT, Weerheijm J, Sluys LJ. High-strain-rate tensile mechanical response of a polyurethane elastomeric material. *Polymer*, 2015, 65: 72-80
- 106 Fan JT, Weerheijm J, Sluys LJ. Compressive response of a glass-polymer system at various strain rates. *Mechanics of Materials*, 2016, 95: 49-59
- 107 Fan JT. High-rate squeezing process of bulk metallic glasses. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45051
- 108 Wang PF, Xu SL, Li ZB, et al. Experimental investigation on the strain-rate effect and inertia effect of closed-cell aluminum foam subjected to dynamic loading. *Materials Science & Engineering: A*, 2015, 620: 253-261
- 109 Wang PF, Yang JL, Li X, et al. Modification of the contact surfaces for improving the puncture resistance of laminar structures. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6615
- 110 Wang PF, Zhang X, Hansen RV, et al. Strengthening and failure mechanisms of individual carbon nanotube fibers under dynamic tensile loading. *Carbon*, 2016, 102: 18-31
- 111 Zhang JX, Qin QH, Wang TJ. Compressive strengths and dynamic response of corrugated metal sandwich plates with unfilled and foam-filled sinusoidal plate cores. *Acta Mechanica*, 2013, 224(4): 759-775
- 112 Zhang JX, Qin QH, Ai WL, et al. The failure behavior of geometrically asymmetric metal foam core sandwich beams under three-point bending. *Journal of Applied Mechanics*, 2014, 81(7): 071008
- 113 Zhang JX, Qin QH, Xiang CP, et al. A theoretical study of low-velocity impact of geometrically asymmetric sandwich beams. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 96: 35-49
- 114 Hou B, Ono A, Abdennadher S, et al. Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression. Part I: Experiments. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(5): 687-697
- 115 Hou B, Patoatto S, Li YL, et al. Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression. Part II: Analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(5): 698-705
- 116 Hou B, Zhao H, Patoatto S, et al. Inertia effects on the progressive crushing of aluminium honeycombs under impact loading. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(19): 2754-2762
- 117 Liu JG, Saletti D, Patoatto S, et al. Impact testing of polymeric foam using Hopkinson bars and digital image analysis. *Polymer Testing*, 2014, 36: 101-109
- 118 Liu JG, Hou B, Lu FY, et al. A theoretical study of shock front propagation in the density graded cellular rods. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 80: 133-142
- 119 Liu JG, Patoatto S, Fang DN, et al. Impact strength enhancement of aluminum tetrahedral lattice truss core structures. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 79: 3-13
- 120 Chen LM, Fan HL, Sun FF, et al. Improved manufacturing method and mechanical performances of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich cylinder. *Thin-Walled Structures*, 2013, 68: 75-84
- 121 Han YS, Wang P, Fan HL, et al. Free vibration of CFRP lattice-core sandwich cylinder with attached mass. *Composites Science and Technology*, 2015, 118: 226-235
- 122 Chen LM, Zhang J, Du B, et al. Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load. *Thin-Walled Structures*, 2017, in press
- 123 Li SQ, Lu GX, Wang ZH, et al. Finite element simulation of metallic cylindrical sandwich shells with graded aluminum tubular cores subjected to internal blast loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 96: 1-12
- 124 Li SQ, Li X, Wang ZH, et al. Finite element analysis of sandwich panels with stepwise graded aluminum honeycomb cores under blast loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 80: 1-12
- 125 Li SQ, Li X, Wang ZH, et al. Sandwich panels with layered graded aluminum honeycomb cores under blast loading. *Composite Structures*, 2017, 173: 242-254
- 126 Zheng ZJ, Wang CF, Yu JL, et al. Dynamic stress-strain states for metal foams using a 3D cellular model. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014, 72: 93-114
- 127 Wang XK, Zheng ZJ, Yu JL. Crashworthiness design of density-graded cellular metals. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2013, 3(3): 031001
- 128 Yang J, Wang SL, Ding YY, et al. Crashworthiness of graded cellular materials: A design strategy based on a nonlinear plastic shock model. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 680: 411-420

doi: 10.6052/0459-1879-18-008