

文章编号: 1000-7598 (2011) 10-2889-12

岩石动力学研究成就与趋势

黄理兴

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉, 430071)

摘 要: 在岩石动力学研究范畴, 岩石承受的典型荷载是冲击荷载, 加载应变速率在 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 之间, 通过如动载机、霍布金逊压杆、常规爆炸荷载等试验装置来研究岩石的动态力学性质与本构关系。由于岩石的动载作用必须考虑惯性效应, 即波效应, 因此, 岩石动力学是以应力波理论为基础, 研究应力波在岩体(石)中的传播与衰减规律、应力波与岩体节理裂隙的相互作用、应力波通过层状介质结构面折、反、透射关系及边界效应。我国岩石动力学研究最早可以追溯到 20 世纪 60 年代初大冶铁矿边坡稳定性研究中的爆破动力效应试验。比较全面地开展岩石动力学研究应该始于 1965 年由国家科委与国防科委同意成立防护工程组, 并将“防护工程建设与研究”增列为 10 年规划中的国家重点项目, 从而奠定了我国岩石动力学研究的基础。1987 年, 中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会的成立, 标志着我国岩石动力学学科发展走向新的里程, 成员单位涵盖水利水电、能源矿山、煤炭石油、铁路交通、建筑国防、大专院校与科研院所等。岩石动力学专委会每两年组织召开“全国岩石动力学学术会议”, 至今已举办十一届, 对我国岩石动力学发展起到了促进与推动作用。文中介绍了我国岩石动力学近 10 年来具代表性的研究成果, 分岩石动力学研究主要成就、岩石动力学研究发展趋势两部分来介绍, 供同行们参考。

关 键 词: 岩石; 动力学; 成就; 展望

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Development and new achievements of rock dynamics in China

HUANG Li-xing

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In rock dynamics, one of typical types of loading is impact loading, which can induce the strain rate up to $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Impact loading can be generated by a dynamic machine, Hopkinson bar testing equipment and blasting, and is used to investigate the dynamic behavior of rock. When rock is subjected to dynamical loading, inertial effect will become significant. Hence the objective of rock dynamics is to investigate the propagation and dissipation of stress waves in rock, the interaction between the stress waves and the joints of rocks, the reflection, diffraction and injection of the stress waves in layered materials. Initial study of rock dynamics in China could be traced back to the early sixties of last century, when the dynamic effect of blasting on the slope stability of Daye Iron Mine was investigated. Comprehensive research for such a subject started in 1965, when State Commission of Science & Technology and National Defense Commission of Science & Technology approved to establish the defense engineering research group, and launched “construction and research for protective engineering” as a key national research program. Through such events, China built up the foundation for its rock dynamics study. In 1987, the Commission of Rock Dynamics, a sub-committee of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering was founded; and this event became the milestone of the further development of rock dynamics. Members of the commission came from universities and research institutions of water conservancy, hydropower, energy, mining, coal, petroleum, railway transportation etc. Organized by the commission, the “National Conference for Rock Dynamics” has been held every two years, making a great contribution to the advancement of rock dynamics research. This paper will introduce the development and new achievements of rock dynamics in China recent 10 years; and it can be divided into two parts, i.e. the past achievements and the future development trends.

Key words: rock; dynamics; achievements; development

收稿日期: 2010-03-04

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目 (No. 2011CB710602); 国家自然科学基金资助项目 (No. 40972201)。

作者简介: 黄理兴, 男, 1953 年生, 研究员, 副总工程师, 主要从事岩土力学与工程研究。E-mail: lxhuang@whrsm.ac.cn

1 引 言

岩石力学从广义的角度可分为岩石静力学和岩石动力学，它们虽然都是以固体力学为基础，严格地说是以弹塑性、黏弹塑性力学为其理论基础，但它们之间存在有其荷载形式不同这一主要差别。

图 1 中，时间相关性的现象涵盖了整个应变率范围，准静态和动态的界线区别是不确定的^[1]。虽然岩石动力学领域通常认为应变率超过 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 将

会产生振动，而实验室测试的准静态应变率是没有实际意义的。常规的岩石力学系指应变率在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 之间的荷载范围，如常规的刚性伺服试验机荷载；当应变率小于 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时，属于岩石流变学研究范畴；当应变率大于 $1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 时，岩体处于热流体状，属爆炸流体力学范畴。因此，只有当应变率在 $1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 之间的荷载范围，才属于岩石动力学研究范畴，如动载机、霍布金森压杆、常规爆炸荷载等。

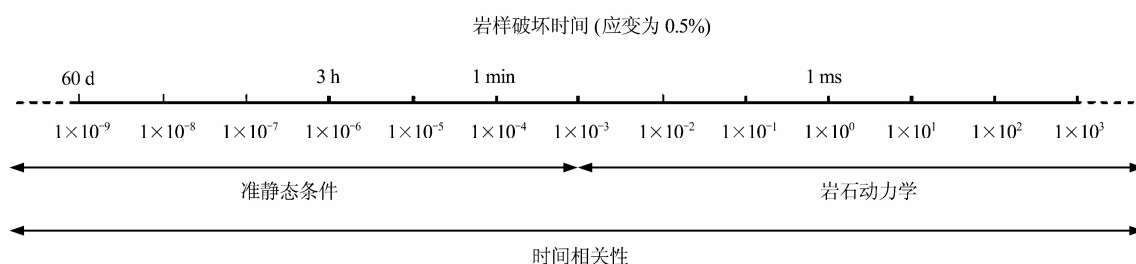


图 1 与应变率相关的岩样破坏时间

Fig.1 The broken time of rock samples with strain rate

在岩石动力学研究范畴，岩石承受的荷载典型的是冲击荷载，因而必须考虑惯性效应，即波效应。岩石动力学也是以应力波为其理论基础，但由于受载岩石结构构造的非均质、各向异性以及岩石的脆性与多节理裂隙性，作为理论基础的应力波也需针对岩石作些特定的限定与发展。因此，应力波在岩体（石）中的传播与衰减、应力波与节理裂隙的相互作用、应力波通过层状介质结构面折反透射关系及边界效应，均是岩石动力学研究重点。

我国岩石动力学研究可以追溯到 20 世纪 60 年代初湖北大冶铁矿边坡稳定性研究中的爆破动力效应试验，而较全面开展的岩石动力学研究，应该始于 1965 年由国家科委与国防科委同意成立防护工程组，并将“防护工程问题的研究”增列为 10 年规划中的国家重点项目^[2]。从 1965—1980 年 15 年的历程中，我国曾多次进行大规模的防护工程与国家安全工程现场试验，在爆炸现场主要测量岩体内位移、速度、加速度及压力等运动参数与力学参数，分析应力波在岩土中的传播与衰减规律，开展了岩体本构关系、应力波在毛洞周围绕射的动光弹与高速摄影研究，同时研制了一批压力、位移、速度和加速度等测量系统以及岩石动载机、霍布金森压杆等一系列试验设备，有限元法等数值模拟计算也取得了重要成果。我国防护工程的建设与研究，奠定了我国岩石动力学研究的基础。

1977 年，由国家计委组织、兵器工业部和国家贮备局牵头，全国 20 多个部委、兵种、大专院校与科研院所参加的地下炸药库安全问题的研究（“七七工程”），研究过程历时 10 多年，是我国首次进行的大比例现场化爆试验，最大规模做到 1:1 的 500 t TNT 原型洞库炸药试验，在国际上也属罕见。与岩石动力学相关的研究课题有岩体中应力波传播与衰减规律，爆破漏斗与破坏分区。室内试验有岩石动态力学性质和岩石断裂机制以及相关的数值计算。该工程项目的研究，是我国国防与地方携手联合完成国家层面重大项目的一部巨著。

1987 年，中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会的成立，标志着我国岩石动力学学科发展走向新的里程。从 1988 年始，岩石动力学专委会每两年组织召开“全国岩石动力学学术会议”，2011 年 10 月将在北京举办第十二届。学术大会坚持学术交流推动学科发展的宗旨，将全国从事岩石动力学研究的学者、技术人员召集在一起，共同研讨我国岩石动力学学科建设，交流研究成果、展望发展趋势，在我国岩石动力学发展中起到了促进与推动作用。

10 年前，黄理兴等^[3]在《岩石力学与工程学报》曾对我国岩石动力学研究成就已作了总结。本文主要介绍近 10 年来我国在该领域取得的具代表性的研究成果，并对岩石动力学研究趋势作了展望。

2 岩石动力学研究取得的新成就

2.1 岩石动态力学性质与本构关系研究

各种动荷载作用下所引起的地运动的预报以及对岩石结构建筑物破坏的预报, 岩石中结构物的抗爆炸破坏能力的估计, 以及这些结构物的合理设计等要求充分地掌握岩石和岩体的动态力学性质、本构关系, 特别是在爆炸荷载作用下的本构关系, 它是研究岩石爆破机制、应力波传播规律、防护工程设计以及地震工程、岩土基础工程等所必需的重要资料。

王礼立等^[4-5]基于拉格朗日分析方法研究率型材料的动态力学性能, 对 Fowles 等提出的传统的 Langrangian 分析方法, 从理论分析和数值模拟两方面相结合作了检验分析, 建立了拉氏分析与 ZWT 率型本构模型之间的定量关系。尹光志^[6]在对岩石进行了平面应变、常规三轴和声发射试验及煤岩 CT 扫描试验的基础上, 采用非线性分叉理论、混沌理论对岩石在断裂失稳过程中的局部化分叉与混沌特征以及冲击地压的混沌特性进行了研究, 获得平面应变和常规三轴状态下岩石断裂失稳不同的本构特性。王占江等^[7]用点荷载爆炸模拟核爆状态来研究蓝田花岗岩的本构关系。单仁亮^[8-9]利用 SHPB 装置, 分别研究了花岗岩、大理岩和砂岩的单轴冲击本构关系。

对岩石动力特性, 人们最感兴趣的是岩石材料对加载速率的响应。钱七虎等^[10]就岩石及岩体的强度对于应变率的依赖关系及其机制进行了理论研究, 给出了考虑强度对于应变率依赖关系的摩尔-库仑准则, 确定了岩体的破坏尺寸与应变率之间的关系, 并讨论了若干时间性破坏准则。李海波等^[11-12]对取自新加坡 Bukit Timah 地区的花岗岩岩芯作了动态压缩性试验。试验结果表明, 单轴动载荷作用下岩样呈锥型破坏模式; 三轴情况下岩样呈剪切破坏模式。当应变速率从 10^{-4} 增加到 10^0 s^{-1} 时, 花岗岩的抗压强度约增加 15%, 花岗岩的弹性模量和泊松比随应变速率的增加没有明显的变化趋势。

李夕兵等^[13-14]提出了虚拟损伤的概念, 对大理岩在单向载荷作用下的虚拟损伤阶段进行研究, 结果表明虚拟损伤和实际损伤过程都具有非线性特点, 损伤变量服从指数分布, 同时还开展了岩石高温 ($100 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$) 下动态力学性质的研究, 获得了粉砂岩的全应力-应变关系结果, 表明随着温度的提升, 粉砂岩的峰值应力、应变、弹模都相应降低。

王启智等^[15]首次把平台巴西圆盘试样引入动

态劈裂试验, 利用分离式 Hopkinson 压杆对大理岩巴西圆盘和平台巴西圆盘试样进行了宽应变率范围 ($14.6 \sim 163.0 \text{ s}^{-1}$) 的动态劈裂实验, 得到了不同尺寸的大理岩试样在不同应变率下的破坏应变。李宁等^[16]对循环荷载下冻结裂隙砂岩动疲劳特性进行了研究, 试验结果显示, 裂隙砂岩比完整砂岩疲劳效应明显, 冻结作用能减弱试样的疲劳效应与加载速率效应。徐松林等^[17]在用激光辐照砂岩和大理岩的试验中, 得到了相应的温度场与压力场, 并获得岩石中热耦合效应比应力波和冲击波慢得多的现象。

岩石动态力学性质的研究, 除上面表述的外, 在我国防护工程领域也做了大量岩石动力学研究, 涉及国防的研究成果本文不宜列入。从总的研究情况来看, 岩石动态力学性质研究率效应大多在 10^0 s^{-1} 到 10^3 s^{-1} 之间, 结合工程项目的应用研究较多, 系统的岩石动态力学性质研究较少。类比的结果较多, 机理性的研究较少, 对有些岩石率效应不明显的现象, 可能与高孔隙率有关, 尚未找到理论支持。可喜的是, 目前一大批 Hopkinson 压杆试验装置的建立, 特别是带温度、围压设备的研制成功, 对今后岩石动态力学性质的研究带来了技术保障。

岩石本质揭示了岩石的物理、力学特性和工程性状的缘由, 它的研究和界定无疑将为岩石力学与岩石工程提供重要的基础。由于岩石是在地质环境中生成、演化而形成的, 岩石的本质性包含其物质性、结构性、赋存性以及演化时态性。岩石材料的非线性、不均匀性、各向异性和不连续性成为建立岩石本构模型的制约条件。因此, 岩石动态本构模型研究, 许多学者曾潜心研究, 所获得成绩可喜, 但并没有取得突破性成果。

2.2 应力波传播与衰减规律研究

研究应力波在岩石介质中传播与衰减的规律, 是期待爆炸波对地下工程及建筑物的破坏效应最小。在矿山破岩等实际工程中, 要充分利用其爆炸能量以获得最佳爆破效果。在地震工程中, 期望了解地震波对地面建筑物、构筑物的破坏效应。因此, 研究应力波在岩土介质中传播与衰减规律, 对国防建设和国民经济都具有重大意义。

应力波传播的媒介是地质体, 研究波与地质构造、波与结构面、波与节理裂隙的相互作用, 对研究波的传播与衰减至关重要。李永池等^[16]开展了应力波的演化机制及其对防护工程应用的研究, 对应力波演化中的材料黏性耗散效应、几何效应、空穴隔离和绕射效应、波阻抗梯度效应等若干基本问题

进行了较系统的研究,建立了含损伤弹黏塑性材料本构关系的理论框架,并考察了材料的黏性效应影响冲击波衰减和应力波演化的一般规律,得出了材料的黏性对冲击波的衰减、应力波的演化以及层裂效果的影响规律。李建春等^[19]基于黏弹性理论,提出了平行节理岩体的一维动态等效连续介质模型,主要描述应力波通过节理的衰减和时间的滞后,通过和位移不连续方法的比较,验证了模型的正确性,该研究成果可简化应力波传播问题的复杂性。王占江等^[20]在花岗岩岩体中,经过系列化爆试验,获得了自由场应力波传播规律可与核爆试验可比的结果。张继春等^[21]对软弱夹层岩体爆破运动特征进行了试验研究,以单孔台阶爆破为原型,进行含软弱夹层的混凝土模型爆破试验,利用高速摄像观测爆破过程中夹层土的运动状态,分析不同炮孔装药量、夹层土含水率和最小抵抗线条件下夹层土的运动特征及其变化规律。黄永林等^[22]研究了郯庐断裂带鲁苏沂沭段几条平行的深大断裂构造对汶川地震波的隔震效应,地震波传播通过郯庐断裂带产生多次的反射与折射,利用汶川地震时的人员反应和地震记录,分析表明郯庐断裂带鲁苏沂沭段阻碍了地震波的传播,验证了郯庐断裂带对地震波有隔震作用的判断。王鲁明^[23]研究了节理岩体中的应力波传播规律,讨论了位移不连续模型与特征值法结合的方法,对垂直于单一线性变形节理、多个平行线性节理、单一非线性变形节理,分别采用线性变形不连续模型、双曲线变形不连续模型进行了相应的研究,并数值模拟了爆炸波在节理岩体中传播与衰减过程。

波动是动载的惯性作用。目前人们研究波在岩体中的衰减,主要是研究应力波、地震波、超声波的传播与衰减。从防护工程的角度,人们更关心冲击波传播对构筑物的影响;从地震工程的角度,人们更关心表面波的传播与衰减及与自由面的相互作用。这类成果目前少见。

2.3 岩石的声学特征研究

应用声学方法研究岩石物理力学特性,是声学与岩石动力学学科相互交叉的结果。岩石超声测试技术是通过测定声波穿透岩石(岩体)后声学参数(波速、波形、波频、波谱)的变化,间接了解岩石(岩体)的物理力学特性及结构特征。

赵明阶等^[24]在 21 世纪初曾对岩石声学特性研究现状作个概述,对岩石声学特征研究方法与发展提出了自己的观点。史调等^[25-26]选用具有代表性的深井砂岩、泥岩样品,研究了孔隙结构、孔隙流体性质、岩石骨架在声波压实效应中所起的作用。研

究发现,纵波时差的压实效应随孔隙度增大而趋明显,孔隙度越大,时差随压力变化越快;随着上覆有效压力的增大,时差与孔隙度的线性相关程度减弱;孔隙中所饱和的液体对横波速度影响不明显,而纵波气饱和的样品波速明显小于液体饱和的波速,且气饱和岩样的波速在低压时随压力的变化率比液体饱和的大。葛洪魁等^[27]也研究了砂岩孔隙弹性特性,利用“不套封”加压试验、围压下的波速测量,获得了砂岩骨架材料的力学特性。邓向允等^[28]研究了玄武岩中裂隙分布形式对声波传播的影响,对加工成含不同组合裂隙的玄武岩岩样,进行了在 25~1 000 Hz 5 种不同频率作用下的声波测试,结果表明,裂隙方向与波传播方向夹角对波传播有很大影响,当裂隙方向与波传播方向垂直时,散射效应最大;而当裂隙方向与波传播方向平行时,影响最小。楚泽涵等^[29]建立了平面声波在平行界面上反射和折射的理论模型,推导了该理论模型下的反射系数表达式,对反射系数随入射角的变化规律作了分析和探讨,对在第一和第二临界角附近的反射系数大小的讨论,有助于研究声波全波系列中滑行纵波、滑行横波和伪瑞利波的幅度特征。邓涛等^[30]通过对烘干和饱和状态下大理岩进行了声波对比测试,发现饱水后的大理岩波速发生变化并数据明显分散,波速各向异性也被弱化,长期浸泡后,大理岩的波速还会降低。邵明申等^[31]对龙游石窟砂岩在不同含水状态下的弹性波速进行了测试,含水率为 15% 时,弹性波速出现反常,降低到一个很低的值,分析认为是与砂岩中含较多膨胀性的黏土矿物有关;各向异性受含水率的影响不明显。嵇少丞等^[32]研究了苏鲁超高压变质岩中波速随围压的变化规律,建立了波速与围压及温度的定量关系。丁梧秀^[33]在研究了岩石(体)弹性波波速与应力的关系后,提出岩石(岩样)应力变化与波速没有直接的关系,控制波速的直接因素,是裂隙的发育程度与闭合程度的变化。在声波测试技术方面,伍向阳等^[34]提出了一种测量岩石声波速度和衰减谱的技术,可直接比较来自岩样顶界面的反射波和穿透岩样的透射波,通过波谱分析并考虑漫射修正,从而给出连续的声波速度和衰减谱。

由于岩石(岩体)材料的复杂性,对于岩石声学特性与岩石应力状态的相关性、对于与应力状态相关联的加载和卸载过程、对于声波信号如何应用等等,仍需深入研究的课题。

2.4 爆破效应与破岩机理研究

在爆破破岩效应研究方面,赵阳升等^[35]提出了

岩体动力破坏的最小能量原理，即岩体动力破坏真正需要消耗的总是单向应力状态的破坏能量。王明洋等^[36]对岩体在爆炸与冲击下的破坏过程作了研究，提出岩体中爆炸与冲击真实变形与破坏过程必须基于研究微观物理原理和细观物理力学理论，建立工程实用的介质在爆炸和冲击作用下的统一的分阶段连贯的不同时空尺寸的动力本构模型，提出必须研究材料在不同特征能量尺度及其传输速度下统一的分阶段连贯的动力破坏过程和动力破坏准则的论断。戚承志等^[37]研究了冲击载荷作用下岩石变形破坏的细观结构特性，得出在细观水平上黏性随着应变率增加而减小与介质变形的转动模式有关。许红涛等^[38]以瞬态载荷作用下弹性介质中球形空腔的动态响应解析解为基础，分析了爆炸荷载动态卸载时对介质中应力分布的影响，探讨了动态卸载效应在爆破破岩过程中的作用，并对一些爆破现象作了合理的解释。罗云滚等^[39]根据爆炸相似律探讨了炮孔水耦合装药结构的孔壁压力，建立了爆炸荷载作用下岩石的动态应力场，从理论上求出了炮孔水耦合装药爆破时裂隙区半径、粉碎区半径和光面爆破的最佳装药不耦合系数。单仁亮等^[40]基于软弱夹层爆破理论，探讨分析了软弱夹层的位置、数量、厚度以及走向等对巷道爆破的影响，采用改变炮眼布置方式、调整起爆顺序、减少装药量等方法，炮孔利用率高于 92%，循环进尺由原来的 115 m 提高到 213 m。肖正学等^[41]研究了断裂控制爆破裂纹发展规律，提出了采用不同爆破方式和装药结构时，孔壁裂纹扩展速度的计算方法，阐述了孔壁产生裂纹长度和裂纹数目的条件。郑长青等^[42]研究了爆破滑动破岩技术，对于倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 、走向单一的层状岩体，当 w/H （最小抵抗线/药包中心至地面高度） $= 0.25$ 时，利用爆破滑动破岩技术，可获得安全高效的破岩效果。李晓红等^[43]结合某料场硐室大爆破的工程实践，分析了硐室爆破破岩机制，条形药包与集中药包的作用机理，根据地质特点，提出了有效地控制破岩块石直径的方法。苏国韶等^[44]则提出了用高斯过程方法预测岩体爆破效应的新方法，与神经网络方法相比，它具有算法参数自适应化的特点，适应于小样本问题，预测精度高，具有良好的工程应用前景。

2.5 数值分析与数值计算

我国开展动力有限元法的研究始于 70 年代初，应用背景是核爆与化爆的工程效应。近十多年来，数值计算、数值仿真得到空前发展。雷卫东等^[45]结合离散元程序，提出了一种在 UDEC 中全面处理各

节点或单元中心波幅的数据处理新方法，给出了岩石动力学中波动问题研究的应用实例。卢文波等^[46]应用大型有限元计算软件 LS-DYNA 对延长装药在岩石介质中爆破破坏过程的应力场、传播过程、岩石爆破漏斗进行了数值模拟。对不同方式下数值模拟的结果与理论解进行了比较，并在爆破漏斗破坏范围的定性和定量确定方面进行了探讨。结果表明，反向起爆的破坏效果最好，正向起爆的破坏效果最差。王志亮等^[47]基于 Taylor-Chen-Kusmaul 模型中的拉裂损伤演化方程和材料双线性、弹塑性本构耦合在一起，简洁地嵌入到有限元分析软件 LS-DYNA 中，通过半无限岩体中柱形药包爆破实例，验证了其合理性与正确性，对球形药包爆破问题也进行了数值分析。高文学等^[48]基于所建立的岩石动态损伤模型，对岩石冲击损伤实验和沟槽深孔爆破进行了数值模拟，计算结果再现了实验观测曲线，客观地反映了岩石动态损伤演化规律。夏祥等^[49]对岩体爆生裂纹的产生与扩展进行了数值模拟，结果表明，岩体爆破粉碎区约为装药半径的 6.5 倍，裂隙区约为 75 倍。唐春安等^[50]运用岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统，通过对岩石试样中预制的倾斜裂纹扩展过程的数值模拟，研究了材料非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响，再现了受压试样在裂纹扩展过程中逐步演变的应力场和应变场，以及与岩石非均匀性有关的声发射和断裂扩展模式的“岩桥”现象。模拟结果说明，岩石的非均匀性对含裂纹试样的变形、破裂过程及其破坏模式有很大的影响。朱万成等^[51]以巴西试验为研究对象，获得了不同冲击应力波幅值条件下岩石试样的典型破裂模式，在动载下，应力波幅值较低时试样表现出与静态加载时类似的破裂模式，随着应力波幅值的增加，破裂模式将出现更多破裂裂纹。在岩石动态剥落破裂数值模拟中，再现了均匀杆在不同应力波幅值下表现出的不同剥落形式，还得出在动荷载作用下岩石动强度高于静强度是由于岩石材料的非均质造成的结论。

2.6 岩爆与冲击地压机理研究

我国现阶段的岩石工程规模大、难度高，为世界所瞩目。无论是矿山工程，还是水电工程和交通工程，很多工程的开发进入了深部地下空间，不少工程都遇到了岩爆现象。特别是近年来发生了多起岩爆引起的重大事故，造成了人员伤亡和施工装备的严重破坏。岩爆机制及其预测预报预警的研究已经成为我国岩石力学界必须致力解决的关键科学问题和技术难题，由此也带来了“岩爆热”。2010 年

11 月在西昌召开的“岩爆监测与预报学术会议”及 2011 年 7 月在北京举行的“岩爆机制探索”学术沙龙就是范例。

岩爆研究从第三届全国岩石动力学会议开始,就作为一个专题讨论,系统地从岩爆机制到工程防治进行了卓有成效的研究。研究大致可分为 3 大类:研究岩爆的现象、机理等理论和模型分析;岩爆的实验系统的研发和风险评估和工程中岩爆预测、预报方法及控制措施。

岩爆机制的研究目前大多停留在定性解释阶段,岩爆的预测预警虽进行了大量工程实践的探索和研究,取得了不少成功的经验,但尚未上升到系统的理论。钱七虎^[52]对岩爆作了新的诠释,从动力学角度开始研究和思考岩爆问题,并用理论上的简化模型量化地分析岩爆现象。张镜剑等^[53]对岩爆及其判据和防治作了概述,结合锦屏二级水电站辅助洞岩爆特征,对岩爆判据、分级和防治提出了看法。冯夏庭等^[54]提出了基于支持向量机的岩爆预测方法,通过对影响岩爆因素的分析,运用支持向量机理论建立岩爆预测的支持向量机模型。许迎年^[55]等选取了最具岩爆倾向的材料制作含硐室岩体的岩爆模拟试验,探讨了不同加载条件、开孔方式、几何特性等诸多因素影响下的岩爆发生机制。何满潮等^[56-57]利用研发的岩爆过程模拟实验系统,对深部高地应力条件下的岩块进行了一系列岩爆实验,获得了花岗岩岩爆破坏的 4 种形式,对岩爆过程能量变化特征与岩爆机制进行了探讨。李廷芥等^[58]借助电镜扫描实验结果,通过测量岩石破坏过程中裂纹分形维数,建立分形维数值与岩石成份及应力状态之间的关系,来探讨岩爆发生机制。唐春安等^[59]进行了不同轴向应力下瞬态卸载诱发岩爆的数值模拟结果表明,当低轴向应力卸掉围压时,试样呈张性为主剪切为辅的复合形式破坏,高轴向应力卸掉围压时,试样呈剪切为主瞬时块状塌落破坏。郭长宝等^[60]进行了挤压和剪切构造环境下深埋隧道岩爆的对比研究,岩爆发生强度与隧道所在的地质构造中的不同部位具有较大关系,当隧道位于背斜轴部和褶皱翼部且隧道轴线与褶皱轴线相平行时发生岩爆的可能性最大。与隧道轴线平行的走滑断层对隧道开挖后围岩应力重新分布有较大影响,发生局部岩爆的可能性较大。

冲击地压发生在煤矿开采中,有些专家建议将冲击地压归属为岩爆类。潘一山等^[61]对我国冲击地压的分布、类型、机制及防治进行了系统总结,将冲击地压分为煤体压缩型、顶板断裂型和断层错动

型 3 种基本类型,提出了通过煤层注水、卸压爆破、机械振动致生裂隙煤体结构性质来防治煤体压缩型冲击地压;通过开采解放层、本层煤解放的高压水射流钻孔割缝、留设煤柱改变顶板运动规律防治顶板断裂型冲击地压;通过限制断层移动防治断层错动型冲击地压等针对性的防治措施。齐庆新等^[62]分析了原岩应力和采动应力对冲击地压发生的影响,通过采用采动应力监测系统直接监测煤岩体的应力和采动微震监测系统间接监测煤岩体应力的方法,分析了采动引起的应力变化,进而对监测区域内煤岩体的冲击危险性进行评估,验证了冲击地压的应力控制理论。

2.7 岩石动力学在工程中的应用

岩石动力学最重要的研究对象是爆破工程、防护工程及地震工程。随着国民经济建设的高度发展,岩土工程中的基础工程也需要岩石动力学的研究成果,随着我国岩土工程高、大、深、复杂结构项目建设的不断增加,一些新的研究成果也不断涌现。岩石动力学研究成果应用是广泛与普遍的。李俊如等^[63]、卢文波^[64]、李新平^[65]等在爆破开挖振动监测作了大量应用性工作。蒋金宝、田和金等^[66-67]利用爆破震动技术改善低渗油田特性提高油气采用率。李术才等^[68]在隧道开挖超前预报探测技术方面作了许多研究,并在工程中广泛应用。钱七虎^[69]、潘一山等^[70]、陈士海等^[71]对深部岩体工程分区破裂化现象进行了系列研究(这有别于 70 年代中国科学院武汉岩土力学研究所提出的爆破破坏分区结果),深部岩体往往伴有岩爆等动力特征,因此深部岩体破裂化现象也属动力学研究范畴。曾宪明等^[72-73]研制了一种新型复合锚固结构,弱化效应吸能效果非常显著,其抗爆效应是单一锚固结构的 1.8 倍。汶川特大地震的发生,从一个侧面推动了岩石动力学应用研究的发展。从地震灾区可见,许多建筑物、构筑物的受损是强大的地震波引发的。许多专家认为,汶川特大地震造成的损害,相当于数百颗百万吨级原子弹的爆破效应。黄润秋等^[74-75]对汶川特大地震触发山体边坡崩滑机制进行了研究,通过现场调查,他们发现,除地震引发山体震松、震滑、震裂外,强大的动力特性,是造成巨石高速抛射的主因,并提出了岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制原理。

3 岩石动力学研究发展趋势^[76-77]

3.1 岩石动态力学与本构关系

岩石动态力学性质反映的是岩石变形与破坏的

动态过程, 时间起着关键作用。很多岩石变形损伤演化方程及破坏准则实际上都是极有时间构造性, 因此进一步完善岩石变形与破坏的时间构造性仍是一个重要课题。由于岩石材料的特殊性与复杂性, 使得岩石材料本构关系的建立十分困难。虽然曾有人通过室内试验建立本构模型, 但符合现场实际状态的力学本构模型几乎空白。此外, 不仅要研究高压(高温)-高应变率的问题, 还应重点研究中等压力-中等应变速率问题。大尺度、多尺度、多因素问题以及耦合效应, 也是主攻方向之一。人们已经普遍认识到, 用一种本构关系来表现岩石材料的共性是不现实的。针对某一种具特定地理位置、特定生成年代、特定埋深的岩石材料来研究其本构特性将是今后研究的方向, 其成果也最具工程意义。

岩石动力强度理论和破坏准则仍是深入研究的课题, 特别是破坏过程的研究。岩石本构理论的细观演化与宏观破坏准则, 应变速率效应和软化, 围岩加固和应力转移技术等课题的研究尤为紧迫。

3.2 岩石(体)中应力波的传播与反演

岩体中爆炸产生的应力波向四周传播时, 随着几何扩散而引起衰减外, 又受到岩体的塑性、非线性和黏性等阻尼作用, 其能量大大衰减。而塑性、非线性和黏性受地质条件的影响, 由于岩性的随机性很大, 所以岩体中应力波的传播和衰减是一个十分复杂的问题。

研究岩体中应力波传播与衰减规律及动力断裂和破碎过程, 均需要了解岩体材料的力学性质与本构方程, 因此这两方面研究是紧密联系的。关于波的反问题, 一类是介质反问题, 另一类是源反问题, 如岩体物理力学特性参数的探测就是介质反问题, 确定波源性质的, 如震源机制属于另一类反问题。优先研究的课题有: 开展波传播反问题的不适定性根源的研究; 发展解不适定反问题的新方法; 进一步研究层状介质的反问题, 特别是研究黏弹性波的反演模型。

波与岩石材料天然缺陷(如裂隙、节理、断层等)的相互作用, 波与结构物、构造物的相互作用, 特别是层状介质中, 高阻抗失配材料中波的传播与衰减规律, 都有着十分重要的战略意义。在 20 世纪发现的孤立波, 其形成机理及传播与衰减规律仍是值得探索的课题。

3.3 岩石材料的断裂与破碎

爆炸所引起的动荷载可视为作用在岩体表面或岩体内部的点(爆心)荷载, 岩体的断裂与破碎由于点源荷载作用下岩石内部缺陷的扩张、传播、分

叉, 直至贯通而造成的。因此研究岩体损伤、断裂随时间增长发展最终破坏失稳的机制、模式和判据, 确定岩体时效损伤断裂的统一机制十分必要, 并求得岩石断裂动力学问题的精确封闭解。

3.4 数值模拟与智能化

数值模拟分析不单纯是应力分析的一种手段, 也是一种试验的工具, 尤其对岩石动力学更具有特殊的意义。由于动力过程极其复杂, 进行物理模拟试验比较困难, 一方面是设备复杂昂贵; 另一方面是动力相似律不易满足。因此必须大力发展岩石动力断裂过程的数值模拟与虚拟仿真技术。

数字模拟试验机的提出, 将会进一步提高人们对数值模拟技术的认识, 也必将促进许多现场无法实现的试验通过计算机模拟技术来实现。其中关键技术是减小人与计算机间的隔阂; 使计算机从串行变成大规模并行; 从单维变成多维; 从封闭到开放系统; 不是预定程序, 而强调面对具体对象, 使虚拟变成现实。

3.5 工程中岩石动力学问题的研究

高烈度地震区的边坡、坝基、地下洞室以及岩体构建筑物的抗震与减振仍是研究的首要问题。高地应力条件下脆、硬弹性岩体突发岩爆、矿井深部冲击地压等地运动研究与工程处理, 包括监测、预警技术与防治技术目前是工程上急需解决的难题。高速铁路、公路运营中隧洞及地下构筑物的振动特性、耐久性与安全防护也亟待解决。还有岩岸工程受台风、波浪的撞击与拍击下动力特性与爆炸冲击、岩崩等高速碰撞等对周边环境的影响等。

3.6 试验设备改进与试验方法的制定

试验技术与试验设备是研究岩石动力学的基础或先决条件, 近年来除 Hopkinson 压杆试验装置与平面波发生器有新的改进外, 我国大部分动载机仍停留在 20 世纪 80 年代的水平, 试验设备有待提高与升级, 特别现场模拟实验装置的研发有待加强。在测试技术上目前尚没有权威的试验方法与统一标准, 试验结果的可比性一直是困扰人们的难题。目前国际岩石力学学会岩石动力学专业委员会已在组织有关专家编写岩石动力学有关试验技术的推荐方法, 这对岩石动力学研究与学科发展是一个福音。

参 考 文 献

- [1] 冯夏庭, 等译. 工程岩石力学(下卷): 实例问答[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 地下炸药库爆炸应

- 力波试验与理论分析[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1986.
- [3] 黄理兴, 陈奕柏. 我国岩石动力学研究状况与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1881—1886.
HUANG Li-xing, CHEN Yi-bai. Rock dynamics in China: Past, present and future[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1881—1886.
- [4] 王礼立, 赖华伟. 拉格朗日分析方法的研究及其在率型材料中的应用[硕士学位论文 D]. 浙江: 宁波大学, 2004.
- [5] 王礼立. 爆炸与冲击荷载下结构和材料动态响应的新进展[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 81—88.
WANG Li-li. Progress in studies on dynamic response of structures and materials under explosive/impact loading[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2001, 21(2): 81—88.
- [6] 尹光志, 鲜学福. 岩石力学中的非线性理论与冲击地压预测的研究[博士学位论文 D]. 重庆: 重庆大学, 1999.
- [7] 王占江, 张德志, 张向荣, 等. 蓝田花岗岩冲击压缩特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 797—802.
WANG Zhan-jiang, ZHANG De-zhi, ZHANG Xiang-rong, et al. Testing study on shock compression for Lantian granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(5): 797—802.
- [8] 单仁亮, 陈石林, 李宝强. 花岗岩单轴冲击全程本构特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 22(1): 32—38.
SHAN Ren-liang, CHEN Shi-lin, LI Bao-qiang. Experimental study of granite constitutive properties under uniaxial impact[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2000, 20(1): 32—38.
- [9] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1771—1776.
SHAN Ren-liang, XUE You-song, ZHANG Qian. Time dependent damage model of rock under dynamic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1771—1776.
- [10] 钱七虎, 戚承志. 岩石、岩体的动力强度与动力破坏准则[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 3367—3372.
QIAN Qi-hu, QI Cheng-zhi. Dynamic strength and dynamic fracture criteria of rock and rock mass[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2008, 36(12): 3367—3372.
- [11] 李海波, 赵坚, 李俊如, 等. 花岗岩动态压缩力学特性的实验以及理论研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(4): 474—477.
LI Hai-bo, ZHAO Jian, LI Jun-ru, et al. Experimental and theoretical study on dynamic compressive mechanical properties of a granite[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)**, 2001, 20(4): 474—477.
- [12] 李海波, 赵坚, 李俊如, 等. 三轴情况下花岗岩动态力学特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 474—477.
LI Hai-bo, ZHAO Jian, LI Jun-ru, et al. Triaxial compression tests of a granite[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2004, 24(5): 470—474.
- [13] 洪亮, 李夕兵, 马春德, 等. 岩石动态强度及其应变率敏感性尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 526—533.
HONG Liang, LI Xi-bing, MA Chun-de, et al. Study on size effect of rock dynamic strength and strain rate sensitivity[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 526—533.
- [14] 尹士兵, 李夕兵, 周子龙, 等. 粉砂岩高温后动态力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1060—1063.
YIN Tu-bing, LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, et al. Study on mechanical properties of post-high-temperature sandstone[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(6): 1060—1063.
- [15] 王启智, 宋小林. 大理岩动态劈裂拉伸强度和裂纹起裂扩展特性[硕士学位论文 D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [16] LI Ning. Dynamic fatigue properties of the cracked sandstone samples under freezing and cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 636—639.
- [17] 徐松林, 席道瑛, 唐志平, 等. 岩石热冲击研究初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3468—3472.
XU Song-lin, XI Dao-ying, TANG Zhi-ping, et al. A preliminary investigation of rocks subjected to thermal shock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 3468—3472.
- [18] 李永池, 姚磊. 应力波的演化机制及其对防护工程的应用[博士学位论文 D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [19] 李建春, 李海波, 马国维, 等. 节理岩体的一维动态等效连续介质模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 4063—4067.
LI Jian-chun, LI Hai-bo, MA Guo-wei, et al. An equivalent 1D dynamic continuum model for rock mass

- with parallel joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.1): 4063—4067.
- [20] 王占江, 李孝兰, 戈琳, 等. 花岗岩中化爆的自由场应力波传播规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1827—1831.
WANG Zhan-jiang, LI Xiao-lan, GE Lin, et al. Free-field stress wave propagation induced by underground chemical explosion in granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1827—1831.
- [21] 张继春, 肖正学, 郑爽英, 等. 含软弱夹层岩体爆破的夹层土运动特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1697—1703.
ZHANG Ji-chun, XIAO Zheng-xue, ZHENG Shuang-ying, et al. Experimental study of motion characteristics of weak intercalation in rock blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(8): 1697—1703.
- [22] 黄永林, 朱升初. 郯庐断裂带鲁苏沂沭段对汶川地震波的隔震效应[C]//第十一次全国岩石动力学会议. 武汉: 武汉中科兴业印务有限公司, 2009.
- [23] 王鲁明, 赵坚, 华安增, 等. 节理岩体中应力波传播规律研究的进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 602—606.
WANG Lu-ming, ZHAO Jian, HUA An-zeng, et al. The progress in study of regularity of a stress wave propagation in the jointed rock mass[J]. **Rock And Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 602—606.
- [24] 赵明阶, 徐蓉. 岩石声学特性研究现状及展望[J]. 重庆交通学院学报, 2000, 19(2): 79—84.
ZHAO Ming-jie, XU Rong. The present situation and prospect of the acoustic properties research in rock[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong Institute**, 2000, 19(2): 79—84.
- [25] 史譔, 沈联蒂, 王建新. 岩石声波压实效应的实验研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(2): 177—183.
SHI Ge, SHEN Lian-di, WANG Jian-xin. Study on compaction effect of rock sonic wave[J]. **Acta Scientiarum Naturalum Universitatis Pekinesis**, 2004, 40(2): 177—183.
- [26] 史譔, 杨东全. 岩石波建孔隙度, 泥质含量之间的差异研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 379—384.
SHI Ge, YANG Dong-quan. The regression analysis study on velocity and porosity, and clay content of rocks[J]. **Acta Scientiarum Naturalum Universitatis Pekinesis**, 2001, 37(3): 379—384.
- [27] 葛洪魁, 韩德华, 陈颀. 砂岩孔隙弹性特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 332—337.
GE Hong-kui, HAN De-hua, CHEN Yong. Experimental investigation on poroelasticity of sandstones[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(3): 332—337.
- [28] 邓向允, 徐松林, 李广场, 等. 玄武岩中裂隙分布形式对声波传播的影响[J]. 实验力学, 2009, 24(5): 421—427.
DENG Xiang-yun, XU Song-lin, LI Guang-chang. Study of crack distribution effects on sound wave propagation in basalt[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2009, 24(5): 421—427.
- [29] 楚泽涵, 彭斐. 平面声波在平行界面上反射和折射的理论计算[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(5): 31—32.
CHU Ze-han, PENG Fei. Theoretical calculation about reflection and refraction of plane sound wave on parallel interface[J]. **Journal of the University of Petroleum, China**, 2006, 30(5): 31—32.
- [30] 邓涛, 韩文峰, 保翰璋. 绝水大理岩的波建变化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 762—765.
DENG Tao, HAN Wen-feng, BAO Han-zhang. On the characteristics of wave velocity variations for marbles saturated in water[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(6): 762—765.
- [31] 邵明申, 李黎, 李最雄. 龙游石窟砂岩在不同含水状态下的弹性波速与力学性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3514—3518.
SHAO Ming-shen, LI Li, LI Zui-xiong. Elastic wave velocity and mechanical properties of sandstone under different water contents at Longyou grottoes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.2): 3514—3518.
- [32] 嵇少丞, 王茜, DENIS Marcotte, 等. 苏鲁超高压变质岩中地震波速随围压的变化规律[J]. 地质学报, 2006, 80(12): 1807—1812.
JI Shao-cheng, WANG Qian, DENIS Marcotte, et al. Pressure-dependence of P-wave velocities in Sulu-UHP metamorphic rocks[J]. **Acta Geologica Sinica**, 2011, 80(12): 1807—1812.
- [33] 丁梧秀. 岩石(体)弹性波波速与应力关系新探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(3): 43—47.
DING Wu-xiu. A recent study on the relation between elastic wave velocity and stress of rock (rockmass)[J].

- Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1997, 8(3): 43—47.
- [34] 伍向阳, 陈祖安, 魏建新. 一种测量岩石声波速度和衰减谱的技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 895—898.
WU Xiang-yang, CHEN Zu-an, WEI Jian-xin. A technique for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 895—898.
- [35] 赵阳升, 冯增朝, 万志军. 岩体动力破坏的最小能量原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1781—1783.
ZHAO Yang-sheng, FENG Zeng-chao, WAN Zhi-jun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1781—1783.
- [36] 王明洋, 钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 42—46.
WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(2): 42—46.
- [37] 戚承志, 王明洋, 钱七虎. 冲击载作用下岩石变形破坏的细观结构特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(Supp.): 3367—3372.
QI Cheng-zhi, WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu, et al. Mesostructural aspects of deformation and fracture of rock under shock loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.): 3367—3372.
- [38] 许洪涛, 卢文波. 爆破破岩过程中的动态卸载效应探讨[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 969—973.
XU Hong-tao, LU Wen-bo. Study on dynamic unloading effect during process of fragmentizing rock by blasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 969—973.
- [39] 罗云滚, 罗强, 宗琦. 炮孔水耦合装药爆破破岩机理研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2004, 24(增刊 1): 60—63.
LUO Yun-gun, LUO Qiang, ZONG Qi. Study on mechanism of rock blasting fragmentation of water coupling charge in bore hole[J]. **Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science)**, 2004, 24(Supp.1): 60—63.
- [40] 单仁亮, 黄包龙, 张怀文, 等. 厚软弱夹层岩巷中深孔爆破试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(6): 39—41.
SHAN Ren-liang, HUANG Bao-long, ZHANG Huai-wen. Experiment and research on deep borehole blasting in mine rock roadway with thick soft and weak parting[J]. **Coal Science and Technology**, 2009, 37(6): 39—41.
- [41] 肖正学, 张志呈, 郭学彬. 断裂控制爆破裂纹发展规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 546—549.
XIAO Zheng-xue, ZHANG Zhi-cheng, GUO Xue-bin. Research on crack developing law of rock fracture controlled blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 546—549.
- [42] 郑长青, 潘晋, 卢云明, 等. 爆破滑动破岩技术探讨[J]. 爆破, 2003, 20(3): 14—16
ZHENG Chang-qing, PAN Jin, LU Yun-ming, et al. Discussion on rock slipping blasting[J]. **Blasting**, 2003, 20(3): 14—16.
- [43] 李晓红, 周东平, 卢义玉, 等. 硐室爆破中块度级配控制及工程应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(5): 692—694.
LI Xiao-hong, ZHOU Dong-ping, LU Yi-yu, et al. Engineering control and application of fragmentation graduation in chamber blasting[J]. **Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)**, 2008, 27(5): 692—694.
- [44] 苏国韶, 宋咏春, 燕柳斌. 岩体爆破效应预测的一种新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3509—3514.
SHU Guo-shao, SONG Yong-chun, YAN Liu-bin. A new method for forecasting of blasting effect in rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 3509—3514.
- [45] 雷卫东, Ashraf Mohamed HEFNY, 赵坚, 等. 岩石动力学中离散元程序处理波幅的新方法[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 170—174.
LEI Wei-dong, Ashraf Mohamed HEFNY, ZHAO Jian, et al. A new method of processing of wave amplitude using discrete element modeling in rock dynamics[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2005, 34(2): 170—174.
- [46] 卢文波, 旭浩. 岩石爆破漏斗理论与数值模拟研究[硕士学位论文 D]. 武汉: 武汉大学, 2003.
- [47] 王志亮, 郑明新. 基于 TCK 损伤本构的岩石爆破效应数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 230—234
WANG Zhi-liang, ZHENG Ming-xin. Numerical simulation of effect of rock blasting based on TCK damage constitutive model[J]. **Rock And Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 230—234.
- [48] 高文学, 刘运通. 岩石动态损伤得数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2000, 26(2): 5—10
GAO Wen-xue, LIU Yun-tong. Numerical simulations on dynamic damage in brittle rocks[J]. **Journal of Beijing**

- Polytechnic University**, 2000, 26(2): 5—10.
- [49] 夏祥, 李海波, 李俊如, 等. 岩体爆生裂纹的数值模拟[J]. 岩石力学, 2006, 27(11): 116—120.
XIA Xiang, LI Hai-bo, LI Jun-ru, et al. Numerical simulation of blast-induced cracks in rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 116—120.
- [50] 唐春安, 刘红元, 秦四清, 等. 非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 116—120.
TANG Chun-an, LIU Hong-yuan, QING Shi-qing. Influence of heterogeneity on crack propagation modes in brittle rock[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2000, 43(1): 116—120.
- [51] 朱万成, 逢铭璋, 黄志平, 等. 岩石动态剥落破裂的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 552—555.
ZHU Wan-cheng, PANG Ming-zhang, HUANG Zhi-ping, et al. Numerical simulation on dynamic rock spalling[J]. **Journal of Northeastern University(Natural Science)**, 2006, 27(5): 552—555.
- [52] 钱七虎. 岩石爆炸动力学的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 1945—1968.
QIAN Qi-hu. Some advances in rock blasting dynamics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(10): 1945—1968.
- [53] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2034—2042.
ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and its criteria and control[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2034—2042.
- [54] 冯夏庭, 赵洪波. 岩爆预测的支持向量机[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(1): 57—59.
FENG Xia-ting, ZHAO Hong-bo. Prediction of rockburst using support vector machine[J]. **Journal of Northeastern University(Natural Science)**, 2002, 23(1): 57—59.
- [55] 许迎年, 徐文胜, 王元汉, 等. 岩体模拟试验及岩爆研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1462—1466.
XU Ying-nian, XU Wen-sheng, WANG Yuan-han, et al. Simulation testing and mechanism studies on rockburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1462—1466.
- [56] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865—876.
HE Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at depth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 865—876.
- [57] 何满潮, 杨国兴, 苗金丽, 等. 岩爆实验碎屑分类及其研究方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1521—1529.
HE Man-chao, YANG Guo-xing, MIAO Jin-li, et al. Classification and research methods of rockburst experimental fragments[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(8): 1521—1529.
- [58] 李廷芥, 王耀辉, 张梅英, 等. 岩石裂纹的分形特性及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 6—10.
LI Ting-jie, WANG Yao-hui, ZHANG Mei-ying, et al. Fractal properties of crack in rock and mechanism of rock-burst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(1): 6—10.
- [59] 黄志平, 唐春安, 赵文. 不同轴向应力下瞬态卸载诱发岩爆破坏数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 859—863.
HUANG Zhi-ping, TANG Chun-an, ZHAO Wen. Numerical simulation of rockburst failure induced transient unloading under different axial stresses[J]. **Journal of Northeastern University(Natural Science)**, 2011, 32(6): 859—863.
- [60] 郭长宝, 张永双, 孙东生, 等. 挤压和剪切构造环境下深埋隧道岩爆对比研究[J]. 地质学报, 2011, 85(1): 66—77.
GUO Chang-bao, ZHANG Yong-shuang, SUN Dong-sheng, et al. Comparison study of rock bursts of deep buried tunnels in the shear and compression tectonic environments[J]. **Acta Geologica Sinica**, 2011, 85(1): 66—77.
- [61] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844—1851.
PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, ZHANG Meng-tao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1844—1851.
- [62] 齐庆新, 陈尚本, 王怀新, 等. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1852—1858.
QI Qing-xin, CHAN Shang-ben, WANG Huai-xin, et al. Study on the relations among coal bump, rockburst and mining tremor with numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1852—1858.

- [63] 李俊如, 李海波, 高建光, 等. 黄麦岭采场边坡爆破振动响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2954—2958.
- LI Jun-ru, LI Hai-bo, GAO Jian-guan, et al. Response of Huangmailing rock slope to explosion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(17): 2954—2958.
- [64] 卢文波, 赖世骧, 朱传云, 等. 三峡工程岩石基础开挖爆破振动控制安全标准[J]. 爆炸与冲击, 2001, (1): 27—32.
- LU Wen-bo, LAI Shi-xiang, ZHU Chuan-yun. Safety standards of blast vibrations adopted in rock base excavation of Three Gorge Project[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2001, (1): 27—32.
- [65] 李新平, 陈俊桦, 李友华, 等. 溪洛渡电站地下洞室群爆破地震效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 493—501.
- LI Xin-ping, CHEN Jun-hua, LI You-hua, et al. Study of blasting seismic effects of underground chamber group in Xiluodu hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 493—501.
- [66] 蒋金宝, 林英松, 丁雁生. 利用爆炸技术改善低渗储层的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2830—2835.
- JIANG Jin-bao, LIN Ying-song, DING Yan-sheng. Experiment research on low permeability reservoir improved by explosion technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 2830—2835.
- [67] 田和金, 李灏, 王爱华, 等. 岩石动力学实验及其在油田开发中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 889—894.
- TIAN He-jin, LI Dang, WANG Ai-hua, et al. Dynamic mechanics experiment of rock and its application to development of oil field[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 889—894.
- [68] 李术才, 刘斌, 李树忱, 等. 基于激发极化法的隧道含水地质构造超前探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1297—1309.
- LI Shu-cai, LIU Bing, LI Shu-chen, et al. Study of advanced detection for tunnel water-bearing geological structures with induced polarization method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(7): 1297—1309.
- [69] 钱七虎, 李树忱. 深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1278—1284.
- QIAN Qi-hu, LI Shu-chen. A review of research on zonal disintegration phenomenon in deep rock mass engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1278—1284.
- [70] 潘一山, 李英杰, 唐鑫, 等. 岩石分区碎裂化现象研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3335—3341.
- PAN Yi-shan, LI Ying-jie, TANG Xin, et al. Study on zonal disintegration of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 3335—3341.
- [71] 曾宪明, 李世民, 林大路, 等. 新型复合锚固结构抗爆宏观效应与分析[J]. 预应力技术, 2010, 78(1): 30—35.
- [72] 王光勇, 顾金才, 陈安敏, 等. 端部消波和加密锚杆支护硐室抗爆能力模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 51—58.
- WANG Guang-yong, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al. Model test research on anti-explosion capacity of underground openings with end wave-decay by holes and reinforced by dense rock bolts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 51—58.
- [73] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机理及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239—1249.
- HUANG Run-qiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(6): 1239—1249.
- [74] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525—1544.
- HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1525—1544.
- [75] 孙钧. 岩石动力学研究的若干问题[C]//中国岩石力学与工程学会编: 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- [76] 王思敬. 中国岩石力学与工程——世纪成就[M]. 南京: 河海大学出版社, 2005.
- [77] 王思敬. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 433—450.
- WANG Si-jing. Geological nature of rock and its deduction for rock mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 433—450.