

矿山岩石动力学研究现状及展望

赵林海¹, 吴功勇^{2*}, 聂兴信², 李广齐², 阮顺领², 江 松², 李宗利¹, 苟晓斌¹, 王 超¹

(1. 宝鸡西北有色二里河矿业有限公司; 2. 西安建筑科技大学资源工程学院)

摘要: 矿山岩石动力学问题是矿山安全生产的重点和难点问题, 具有很强的工程实践背景, 而工程实际中矿山岩石爆破振动、机械开挖扰动、深部“三高一扰动”等环境下的岩石动力学问题研究是矿山安全生产和灾害防治的关键。阐述了近年来矿山岩石动力学灾害问题并进行分析, 从矿山岩石动力学理论发展及阶段性成就、研究方法、研究手段三方面总结归纳, 浅析了中国矿山岩石动力学的研究进展; 提出了矿山岩石动力学发展中的部分关键性科学问题并展望了其发展趋势, 以期为中国矿山岩石动力学研究提供理论支持。

关键词: 矿山工程; 岩石动力学; 灾害问题; 理论发展; 研究方法; 新成就

中图分类号: TD853 TD311

文章编号: 1001-1277(2025)01-0037-10

文献标志码: A

doi: 10.11792/hj20250107

引 言

矿产资源作为经济建设和社会发展的物质基础, 随着社会发展和经济增长, 其需求量与日俱增。矿产开采逐步从浅部走向地球深部, 开采手段也从传统开采向机械化、智能化和科技化发展。随之而来的矿山岩石动力学灾害问题也日益突出, 如深部开采冲击地压问题^[1-3]、高地应力条件下硬脆岩体的岩爆^[4-6]、爆破和机械开采等产生的动载扰动问题^[7-9]、高烈度地震带矿区的震灾问题^[10-12]等系列问题成为研究的重难点。而频繁发生的矿山岩石动力学灾害事故, 带来巨大的经济损失和人员伤亡的同时, 也严重制约着矿山的安全生产。

中国矿山岩石动力学问题的研究最早可以追溯到 20 世纪 60 年代初^[13], 经过近 80 年的研究和发展, 目前取得了丰硕的成果。但是, 中国幅员辽阔、地形地貌丰富多样, 矿山种类繁多、情况复杂, 矿山岩石动力学灾害问题更为复杂和常见, 因此, 中国矿山安全生产形势依旧严峻。本研究首先分析近 10 年中国矿山岩石动力学灾害问题, 说明矿山岩石动力学深入研究的重要性和迫切性; 其次从岩石动力学的理论发展及阶段性成果、研究方法、研究手段三方面浅析研究现状; 最后在此基础上指出目前存在的系列关键性科学问题并对未来发展方向进行展望, 以期对中国矿山岩石动力学问题的研究和发展有所裨益。

1 中国矿山岩石动力学事故分析

矿山岩石动力学问题是矿山生产中常见的安全隐患, 在阅读大量文献和分析事故资料的基础上, 得出其主要存在以下几方面问题: ①在开挖扰动、机械振动及其他动载荷作用下, 矿山边坡、硐室等抗动载荷响应能力不足; ②高烈度区域内, 矿山构筑物、防护体及地面和地下结构所面临的抗震和防震问题; ③爆破施工对边坡稳定性、地下空间稳定性及耐久性产生的影响; ④深部地下采场中, 在“三高一扰动”环境下发生岩爆和冲击地压等。常见矿山岩石动力学事故如图 1 所示。根据常见工程中存在的岩石动力学问题分析结果, 在各类矿山岩石动力学事故中频发且造成重大损失事故的主要有深层岩爆(如图 1-a)所示)、冲击地压(如图 1-b)所示)、震灾(如图 1-c)所示)及由爆破和机械振动引起的动载荷事故等。

据不完全统计, 2014—2023 年, 中国仅冲击地压灾害、岩爆灾害、震灾及由爆破和机械振动引起的动载荷事故等矿山岩石动力学事故发生 1 000 余起, 造成直接经济损失超过 70 亿元, 导致 1 000 余人死亡, 1 300 余人受伤, 具体情况如图 2-a) 所示, 这不仅给人民生命和财产带来严重威胁, 而且极大地制约着中国采矿业及相关领域的进步与健康持续发展。由图 2 可知: 矿山岩石动力学灾害事故呈现逐年攀升趋势, 伤亡人数和经济损失也与日俱增, 呈动态增加的态势。而随着中国持续高速发展, 对矿产资源需求量的增加, 各类矿山的数量、规模将进一步增加, 矿山岩石

收稿日期: 2024-07-07; 回修日期: 2024-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374136, 52374160)

作者简介: 赵林海(1988—), 男, 高级工程师, 从事矿山建设、地下开采、安全管理等工作; E-mail: 15229686417@163.com

* 通信作者: 吴功勇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿山岩土工程、矿山安全等; E-mail: 3173018929@qq.com



图1 常见矿山岩石动力学事故

Fig. 1 Common rock dynamics disasters in mines

动力学的深入研究对中国矿山的安全生产、资源利用 显得更为重要。

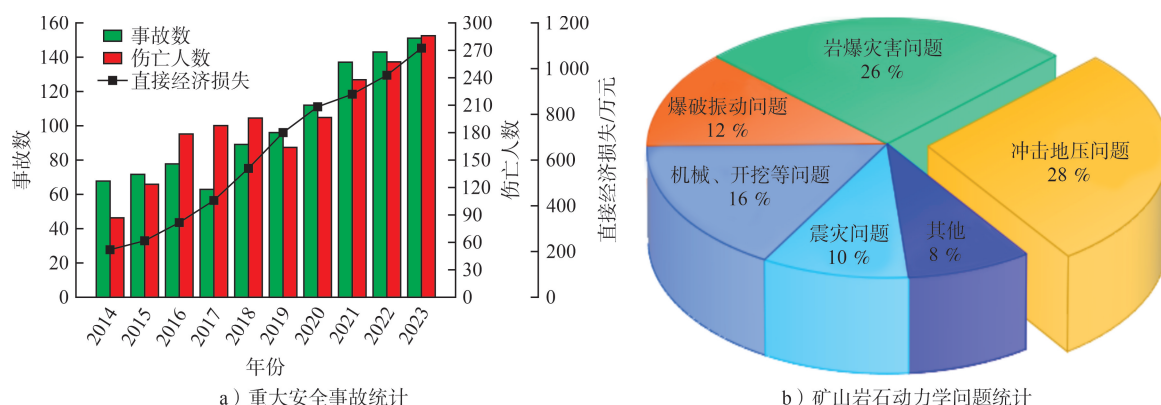


图2 2014—2023 年中国矿山岩石动力学事故分析(数据来源于应急管理部)

Fig. 2 Analysis of mine rock dynamic disasters in China (2014-2023)

由此可见,矿山岩石动力学问题在工程中较为突出,同时它的研究和发展对矿山的工程建设、安全生产、灾害防治、其他相关领域的发展和国家经济建设等都有着非常重要的意义。

2 矿山岩石动力学理论发展历史及阶段性成就

矿山岩石动力学问题最早开始于 19 世纪末,初步理论是 1912 年海姆等为解决岩体开挖力学计算问题提出的静水压力理论。而中国矿山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^[13]。也可以说,中国学者对岩石动力学的研究就是从矿山岩石动力学开始的。矿山岩石动力学属于固体力学范畴,以弹性、黏弹塑性力学、损伤力学等理论为其理论基础,其特殊和复杂之处在于它的载荷形式为动载荷,在分析和考虑问题时无法忽略材料的惯性效应。从发展进程来看,中国矿山岩石动力学在近 70 年的不断深入研究中逐步发展、完善并取得了一定的研究成果。因此,在简单阐述中国矿山岩石动力学发展历史的基础上,总结了矿山岩石动力学取得的部分阶段性成就。

2.1 理论发展历史

2.1.1 20 世纪在中国的发展

20 世纪 70—80 年代初,中国矿山岩石动力学主要服务于大型国防军事设施及相关大型项目,以及国防建设、矿山建设和全国地震构造图册完善等方面^[14-15];1986 年,首次在中国召开有关岩石力学问题的国际学术讨论会^[16];1987 年 10 月,中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会成立^[17],同时召开相关会议阐述该学科是岩石力学的一个重要分支及与冶金矿山的重要关系;20 世纪 90 年代末,中国矿山岩石动力学的研究重点是基础理论的研究。

在这一阶段,许多专家学者进行了广泛的研究。例如:李夕兵等^[18-19]对岩石在不同加载波条件下矿岩破碎的耗能规律进行研究、冲击载荷下岩石动态应力-应变全图测试中的合理加载波形的探讨、在不同加载波条件下能量耗散的理论探讨、岩石在不同加载波下动载强度的阐述及应力-应变规律的研究等;乔河等^[20-21]先后对强动载下岩石动态本构关系进行了试验研究、爆炸作用下花岗岩动态本构关系试验研究及高应变率下岩石动态本构关系试验研究等;黄理兴等^[22-23]指出,岩石动力学的动载荷研究范畴为载荷应变率为 $10^{-2} \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$,这从定性定量角度确定了岩

石动力学的研究范畴等。而后,随着研究方法、研究手段及研究条件的不断丰富和完善,矿山岩石动力学的研究逐渐向深入和细致的角度发展。

2.1.2 21世纪中国20余年的发展

矿山岩石动力学在21世纪近20年的发展相对较快,从时间上大致分为4个阶段:2000—2005年,中国矿山岩石动力学研究的重点逐渐从基础理论转向了实践应用,主要涉及大型矿山深部开采、岩石灾害防治和爆破工程等方面的实际问题;2005—2010年,中国矿山岩石动力学研究范围进一步扩大,重点研究内容包括岩石断裂与破坏机理、岩石动态力学性能的测试和分析、岩体稳定性评价与监测等,同时借助新的试验仪器设备和数值模拟方法,研究人员开始探索岩石动力学的微观-宏观尺度耦合问题;2010—2015年,中国矿山岩石动力学研究在技术手段和研究方法上开始取得突破,数字化岩石动力学试验技术得到广泛应用,大大提高了试验数据的采集和分析效率,同时微观-宏观尺度相结合的研究思路,为岩石动力学理论的深入发展提供了更多可能性;2015年以后,中国矿山岩石动力学研究逐渐注重将其应用于实际工程和工业生产中,研究成果和工程实践案例的突破性进展得到广泛关注,在深部金属矿山、煤矿瓦斯抽采、大型隧道建设等领域的应用取得了显著成果,同时岩石动力学与地质、岩土工程、结构力学等领域跨学科合作的学科交叉应用逐渐强化。

在这一阶段,随着岩石动力学的发展,矿山岩石动力学研究逐渐走向丰富和多元化的研究方向。目前,矿山岩石动力学的理论研究主要涉及岩石介质材料的动力特性及相应本构关系研究^[24-25]、动载波通过地质断裂构造时的模型理论与试验研究^[26]、关于岩石断裂动力学的理论研究^[27-28]、应力波与岩石(体)动力学相互作用的研究^[29-30]等。在这些研究的基础上,工程中常见的岩爆问题、冲击地压问题、震灾问题及爆破动载问题等的研究热度与日俱增,也取得了一系列的研究成果。例如:张东奎^[31]、刘卫东等^[32]对岩爆问题的发生和破坏机理进行了研究;陈则黄等^[33]提出基于集成算法和普通机器学习算法相结合预测岩爆各个等级,充分发挥不同算法在某一岩爆等级预测的优势并形成互补;石增柱等^[34]以实际工程灾害为研究背景,分析了冲击地压的显现特征及发生机制等。

2.2 矿山岩石动力学部分阶段性成就

2.2.1 岩石动力学性质与相应本构关系研究

掌握矿山岩石(体)的动态力学性质及本构关系,是研究矿山动力灾害事故的基础,也是矿山岩石动力学理论不断完善和发展的基石,通过本构关系的

研究,对防治爆破振灾、机械振灾、地震动灾、岩爆地压灾害等有重要意义。目前,许多学者在这方面展开了研究,并取得了一系列丰硕的成果。例如:夏开文等^[35]采用SHPB试验装置研究深部岩石动力学性质,从轴向、静水及三轴等不同围压条件下讨论岩石在动态压缩拉伸弯曲剪切强度下的动态响应特性并进行耦合分析,建立相关本构关系;杜瑞锋等^[36]为研究砂岩的黏弹性损伤特性,通过等效动变形模量来反映砂岩在动载作用下的损伤变化特点,从微观和宏观两方面出发推导相关黏弹性本构关系曲线;邓勇等^[37]从能量消耗角度通过岩石动态破裂强度、破碎时间和破碎能耗建立了一种研究动态力学的模型,以试验方法分析岩石动态力学性质的破坏强度、破坏时间及破坏过程中的能量耗散特征;钱七虎等^[25]根据岩石(体)强度与应变率之间的关系及其机制,提出了强度对于应变率依赖关系的摩尔-库仑准则,确定了岩石(体)的破坏尺寸与应变率之间的关系等。

2.2.2 动载应力波传播与衰减变化规律研究

研究应力波在矿山岩石(体)中的传播与衰减规律是研究地震、爆破和机械开采等动载作用下矿山动力灾害事故的前提。岩石(体)作为应力波的传播媒介由于岩石(体)结构的不均质性受岩石(体)结构、节理裂隙、材质及构造等的影响,因此研究该类动载产生的应力波传播与衰减规律对进一步研究矿山岩石动力学问题至关重要。应力波的传播与衰减规律的研究,在分析矿山岩石动力学问题中卓有成效。例如:王爱文等^[38]通过建立梯度围岩结构应力波透射模型,从波场分解和能量分配角度研究梯度围岩卸压带的密度和入射角对各折、反射波能量系数的重要影响,揭示了梯度围岩结构的吸能防冲力学机理;LYU等^[39]为研究煤炭巷道冲击地压应力防治问题,根据动载作用下组合承载体应力波传播衰减规律及能量耗散的特征,分析煤岩体在阻隔层影响下的应力波传播衰减规律、能量耗散特征及表观破坏程度;褚怀保等^[40]在岩石爆破理论分析的基础上,研究了煤体中爆炸应力波的作用机理,借助损伤力学理论探讨了煤体在爆炸应力波作用下的损伤断裂准则,进而研究煤体中爆炸应力波传播与衰减规律等。

2.2.3 矿山爆破动载与破岩机理研究

爆破作业是矿山开采过程中最为常用的开采手段之一,也是矿山开采时最为常见的动载源。从中国矿山岩石动力学发展伊始,便有众多学者对矿山爆破动载与破岩机理展开研究。随着研究方法和研究手段的不断完善,目前研究的内容和深度不断丰富。例如:金解放等^[41]、张平等^[42]采用SHPB试验装置、现场实测、数值模拟及理论分析等多种方法研究了岩石

及围岩等在爆破效应影响下的响应规律;YE等^[43]利用非线性有限元分析软件模拟爆破产生的爆炸应力波在不同级别岩石上随时间的变化,分析了爆炸应力波在不同岩石级别下的传播衰减规律;陈何^[44]研究了束状孔爆破存在爆腔形态转换与准静态破岩机理、应力波叠加作用与反射拉伸破岩机理、束状孔爆破漏斗规律及束状孔大规模采矿技术实现等科学问题;王明洋等^[45-46]在对岩体爆炸与冲击破坏过程研究中,提出真实变形与破坏过程必须基于微观物理原理和细观物理力学理论,建立工程实用的爆炸和冲击作用下分阶段连贯的不同时空尺寸的动力本构模型等。

2.2.4 深层地压岩爆与冲击地压机理研究

中国幅员辽阔、地形地貌丰富多样,矿山种类繁多、情况复杂,岩爆与冲击地压的矿山岩石动力学灾害问题是工程中常遇见的情况,矿山开采进入深部地下空间时,冲击地压和岩爆事故是常见的深地开采事故灾害,其发生机制及预测预报预警的研究是目前的关键科学问题和技术难题。目前,对岩爆问题的研究主要集中在三大方面^[13,17,22,47]:①研究岩爆现象、机理等理论和模型;②岩爆试验系统的研究与开发;③相关风险评估和工程中岩爆预测、预报方法及控制措施。岩爆和冲击地压问题虽然还有待进一步发展,但也取得了一定的成绩。例如:宫凤强等^[48]深入分析岩爆和冲击地压的差异解析及深部工程地质灾害关键机理问题;孙嘉豪等^[49]、侯克鹏等^[50]、宋英华等^[51]利用学科交叉融合的方法将层次分析法、模糊数学、灰色关联、遗传算法、突变理论等理论应用到岩爆灾害问题预测中,极大地丰富了岩爆的预测评定方法;邓树新等^[46]、CHEN等^[52]采用数值模拟、高速摄影、微震监测及物理试验等方法不断对岩爆的破坏机理和破坏形式进行研究。

2.2.5 深部矿山开采岩体“三高一扰动”环境研究

浅部矿产资源日益枯竭,矿产开采进入深部阶段,在深部高地应力、高地温、高渗透压、强采动、强流变及多场耦合的“三高一扰动”复杂环境下出现了一系列难题,目前在开采技术、开采理论方面的研究成为一大热点。例如:深部开采理论与方法的研究、深部巷道围岩破坏机理与控制技术的研究、深部岩体热力学与热能利用的研究等,郭平业等^[53]、何满潮等^[54]系统阐述了矿山工作面受热害影响的深部矿井中,地热致灾形式、热害控制技术、热能利用方法等,总结归纳了近年来已取得的一些成就;谢和平^[55]阐述深部开采目前存在的一些问题及研究的重点,初步构建深部岩体力学与开采理论研究体系;赵兴东等^[56]结合深部开采现状及经验,提出深部金属矿超前序次释压机理与调控方法,将采动地压调控分为基

本地压调控和二次地压调控等。

3 矿山岩石动力学研究方法与发展

矿山岩石动力学研究方法主要分为三大类:数值模拟研究方法、现场试验研究方法、模型试验研究方法。它们是分析矿山岩石动力学最基础、最重要也是目前最成熟的方法。在此基础上,采用各种研究手段进一步推动矿山岩石动力学的发展。而在矿山岩石动力学的研究中,主要研究手段按照研究层次分为细观研究手段、宏观物理试验研究手段和宏观-细观耦合研究手段3种(如图3所示)。

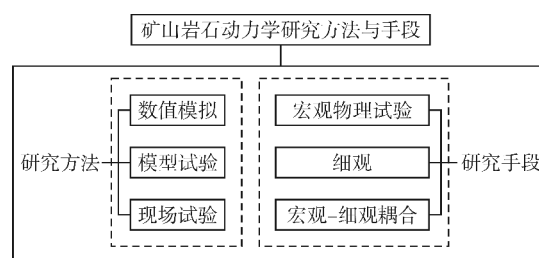


图3 矿山岩石动力学研究方法与发展

Fig. 3 Research methods and techniques for rock dynamics in mines

3.1 矿山岩石动力学研究方法

3.1.1 数值模拟方法

数值分析与数值计算是随着计算机科学技术的发展逐渐兴起和推广的数值模拟方法,开展动力数值模拟在中国最早始于20世纪70年代初,主要应用于核爆与化爆的工程效应,但近年来,数值计算、数值仿真被广泛应用于各个领域。数值模拟方法是综合应用现代计算机技术和岩石动力学理论,模拟岩体在不同载荷作用下的力学响应、破坏过程和变形规律的研究方法。为了达到准确、可靠的模拟结果,需要采用一系列数值模拟方法。目前,矿山岩石动力学数值模拟中广泛运用的方法有:有限元法^[57]、离散元法^[58]、边界元法^[59]、黏弹塑性本构模型分析法^[60]及细观数值法^[61]等。矿山岩石动力学问题研究中常用的数值模拟软件主要有Flac^[62]、LS-DYNA^[63]、PFC^[64]、UDEC^[65]等。

矿山岩石动力学研究中采用数值模拟方法取得的研究成果也颇为丰硕。例如:赵文博等^[66]对岩石的动态拉伸力学性能展开研究,采用霍普金森杆(SHPB)对试件进行不同冲击速度下的巴西劈裂试验,研究高应变率下花岗岩的动态抗拉强度、破坏模式及应力波形曲线,同时基于LS-DYNA软件对动态劈裂试验进行了数值模拟对比;王军祥等^[67]基于LS-DYNA数值模拟方法研究动静组合SHPB加载下砂岩变形破坏、能量演化特性;赵光明等^[68]利用ANSYS数值模拟软件模拟SHPB冲击过程,对比试

验与数值模拟结果,分析试件中有效应力的传播过程并提出相关破坏模式;LIANG 等^[69]采用数值模拟的方法,对地下硐室爆破开挖在动应力和地应力的共同作用下,基于二维动力损伤本构模型对不同静力条件下岩体动态破坏机制进行研究,分析了不同加载条件下裂纹的产生机理及非均匀性对裂纹扩展的影响;周小平等^[70]对光滑粒子流体动力学 (SPH) 法进行改进,以此为基础,采用数值模拟研究了单轴压缩条件下岩石破坏规律;王培涛等^[71]建立粗糙裂隙网络数值模型,开展数值模拟试验研究,分析结构面的空间分布及几何粗糙度对岩体的破坏模式和声发射特性的影响等。

虽然数值模拟在矿山动力灾变问题的研究中被广泛应用,从位移变化、应力变化综合分析,研究破坏机理、动载效应等方面有较大的优势和便捷性,但受制于矿山动力灾变问题的复杂性,数值模拟的效果和准确性相较于矿山静力灾变问题可靠程度有所降低。这主要是岩石(体)介质间的物理力学性质差异比较大,所建数值模拟模型的可靠性问题是模拟时的一大难点,无法在动载模拟时充分考虑岩石(体)的各向异性、岩体缺陷等问题在数值模拟计算中缺乏较好的解决方法,未能科学合理地解释分析。

3.1.2 模型试验研究方法

模型试验是指在满足相似原理的条件下,建立与原型相似但缩小尺寸的物理模型开展试验研究。在力学模型试验中,能较真实反映岩体与工程结构间的真实关系,同时直观地观察岩体在开挖开采、爆破振动及其他加载扰动等条件下的受力、变形特征。模型试验在中国矿山岩石动力学研究中发挥着重要作用,它极大地推动了边坡、地下硐室及深部矿井等的稳定性及破坏机理方面的研究,是大型岩体工程的重要研究方法。

中国最早是一些科研院所、高校等机构在依托一大批国家重点建设工程中开展模型试验研究。模型试验研究取得了很多研究成果,现阶段也是常用的一种研究方法。王怀文等^[72]将数字散斑这一光学测量方法应用于相似材料模型试验中,分析煤层上覆岩层的移动规律;黄锋等^[73]引入弹塑性损伤本构模型利用数值模拟和模型试验相结合的方法研究软弱夹层对隧道围岩稳定性的影响;徐干成等^[74]利用相似模型试验,研究不同性状岩体加固后的抗爆炸性能;袁亮等^[75]为研究深部巷道围岩破裂机理,利用模型试验系统分析深部巷道围岩在最大初始开洞载荷与硐室轴线平行作用下直墙拱顶试验的破坏形态和机理等。

3.1.3 现场试验研究方法

岩石动力学现场试验指通过在施工场地进行的

试验、测试和监测来研究岩石在实际工程中的动力学性质和行为。它能更好地了解岩石在实际工程中的响应和行为,结果的可靠度高、指导工程实践性强,但一般成本相对较高、过程较复杂。在岩石动力学研究中,现场试验一般有现场岩土体理化性质的试验、变形监测试验、爆破试验、开挖试验等。

现场试验研究方法在一些复杂工程、军事项目及其他重大工程项目中运用较多。例如:江权等^[76]为研究深部高应力条件下硐室、巷道变形问题,以金川二矿深部巷道为对象,采取多手段原位监测手段研究其变形、破坏机制并总结防治措施;冯夏庭等^[77]对中国锦屏地下实验室二期工程展开变形、开裂、弹性波、爆破振动测试等原位综合监测方法,研究深部岩体变形特征和破坏模式;赵周能等^[78]在锦屏二级水电站 TBM 开挖过程中,采用现场微震监测数据和岩爆实例,研究深埋隧洞 TBM 掘进过程中微震与岩爆时空分布特征及岩爆孕育过程微震演化规律;郭德勇等^[79]为研究深部地应力分布规律及其影响因素,以首山一矿为研究对象,基于矿井实测地应力数据并与其他分析方法结合,探究测点地应力类型、大小和方向分布规律,确定了影响地应力分布的主控因素等。

3.2 矿山岩石动力学研究手段

3.2.1 细观研究手段

矿山岩石动力学细观研究手段指采用科学的研究方法从微细观角度研究矿山岩石动力学内在结构,分析破坏构造变化并阐述破坏机理的方法,从本质上揭示动载下岩石损伤破坏规律。在现有研究方法中运用较为成熟且广泛的手段主要有:X 射线衍射技术^[80]、计算机断层扫描 (CT)^[81]、扫描电子显微镜 (SEM)^[82]及核磁共振成像技术 (NMR)^[83]等。它们各有优势同时也存在一些不足,部分细观研究手段及特点如表 1 所示。

许多学者在细观研究领域不断进行研究并取得了不少成果。例如:徐景龙等^[84]为研究循环冲击载荷下红砂岩的细观损伤演化规律和能耗特性,采用核磁共振成像仪成像并对能耗规律进行分析;李兆霖等^[85]为分析岩石破坏全过程内部裂隙及孔洞扩展演化过程规律,专门研制出一套能够与 CT 系统配套的真三轴加载试验设备进行试验分析;WANG 等^[86]通过 CT 图像及 AE 监测分析,研究花岗岩中冻融和单轴变形引起的岩桥断裂特征;左建平^[87]采用 SEM 研究砂岩在温度影响下的细观破坏和断裂机制,并用数字散斑相关方法研究细观变形情况;朱红光等^[88]利用 CT 研究轴压破坏岩石裂隙的演化规律,提出微裂隙体积率分形指标描述压缩破坏过程中微裂隙演化行为;陈家嵘等^[89]借助数字图像相关技术

表 1 部分细观研究手段及特点
Table 1 Some microscale research methods and their features

研究手段	特点
X 射线衍射技术	研究岩石矿物类型组成及演化规律的技术手段,具有操作简便、可重现性强、技术成熟和精度高等优点
计算机断层扫描	具有直观、无损获取试件内部三维信息的能力,但常用 CT 分辨率相对较低
扫描电子显微镜	一种高分辨率技术设备,分辨率高,但仅能观察试件表面的结构特征
核磁共振成像技术	克服只能观察试样表面的不足,能快速和无损测量,被广泛应用在岩石孔隙度计算、表征孔径分布、渗透率估算等领域

(DIC)结合 SEM 研究砂岩试样的压剪试验;段永婷等^[90]为研究页岩细观矿物条带对宏观破坏的影响,采用轴压试验并结合 CT 试验研究其破坏机制等。

3.2.2 宏观物理试验手段

1)霍普金森杆。在矿山岩石动力学研究中,霍普金森杆碰撞装置是研究岩石动载特性最基础也是运用最广泛的试验仪器,它的出现使得岩石动力学的研究在近几十年取得了长足发展。该装置最早是由

国外研究者 PANICO 等^[91]在前人的研究基础上改进的一种动态加载装置,以 2 根钢杆加持试样进行加载是分离式霍普金森杆的基本雏形。分离式霍普金森杆是现阶段研究高应变率加载条件下材料力学行为最重要的试验装置,同时更是考虑围压状态下岩石动力学研究领域不可或缺的试验装置。分离式霍普金森杆原理如图 4 所示。

基于 SHPB 试验装置研究岩石动力学中各个方

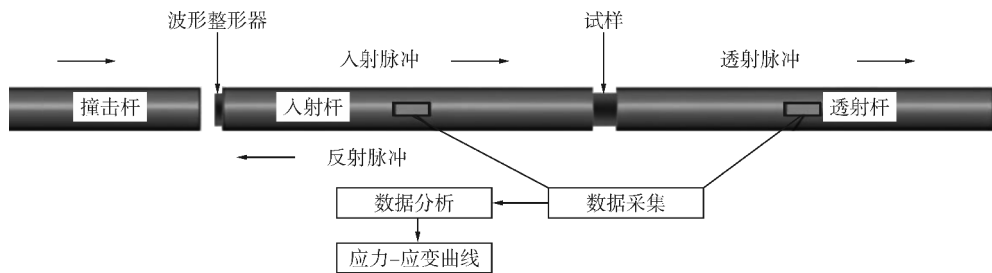


图 4 分离式霍普金森杆原理示意图

Fig. 4 Schematics of the detached Hopkinson rod mechanism

面的问题日益普遍。例如:杨洪升等^[92]采用考虑横向惯性效应的 Rayleigh-Love 杆理论分析了一个弹性试件在分离式霍普金森杆加载过程中的内部弹性波传播过程,运用 Laplace 变换和反变换方法,得到了试件内部各点的变形、速度、应变和应力解析解;LI 等^[93]利用 SHPB 和 DIC 的煤体应力波多次传播特性及表面位移行为试验研究,基于多重分形理论探讨了应力波与位移的相关性;孙晓元等^[94]为研究冲击动载条件下的煤岩破坏特征并分析煤岩系统破坏失稳机理,基于 SHPB 动载系统对煤岩试件进行不同速度的冲击破坏并收集碎块进行了筛分试验等。

2)其他试验装置。岩石动力学试验装置除了应用最广泛的霍普金森杆碰撞装置,还有振动台试验装置、动态剪切试验机、动态压实机等动态加载试验设备,以及岩石力学常规试验装置,研究岩石的物理特性如单轴抗压试验机、三轴抗压试验机、拉伸试验机等。

这些试验装置对矿山岩石动力学的发展也起着

至关重要的作用,应用广泛。例如:周宏伟等^[95]采用轴压试验、劈裂试验研究赋存深度对岩石物理力学参数的影响;黄正均等^[96]用岩石力学试验机开展三轴动态疲劳压缩试验,研究加载频率对岩石变形特性和损伤演化的影响;郭奇峰等^[97]为研究高温岩石的热冲击损伤问题,采用不同温度的轴压试验,提出热-力耦合损伤本构模型。

3.2.3 宏观-细观耦合研究手段

在研究矿山岩石动力学问题时采用宏观-细观耦合研究手段进行分析,可以充分发挥不同研究方法的优势,从不同方面对矿山岩石动力学问题展开研究和讨论。宏观-细观耦合研究手段不仅可以从细观角度分析岩体在动载作用下内部的变化情况,而且宏观变形破坏同步观察可以更好地分析变形、破坏机理。

它是目前研究的一个热点,也是促进矿山岩石动力学发展的重要研究手段。郑迪^[98]利用霍普金森杆试验与 X 射线计算机断层扫描技术相结合的方法,

分析不同平均应变率下试件的动态抗压强度和破坏模式,探明低应变率冲击下组合体试件的内部破坏模式,研究动载作用下胶结充填体宏细观力学特性与损伤演化机制问题;张明涛等^[99]利用分离式霍普金森杆试验装置进行动态冲击试验并结合波速测试试验、CT扫描试验分析试样的整体破坏过程、裂纹分布及应变-损伤演化规律等。

4 关键性科学问题

矿山岩石动力学的发展一般是基于矿山动力灾害问题的发生而逐渐发展完善起来的,因此矿山岩石动力学关键性问题常源于矿山动力灾害问题。在分析矿山岩石动力学灾害问题现状、理论发展及部分阶段性成果、研究方法及手段的基础上,归纳总结目前存在的部分关键性科学问题:动力灾害破坏机理及预警监测问题、数值模拟分析局限性问题、动载作用下矿山防护工程耐久性及安全问题、深井条件下高地应力问题、深部岩体原位力学行为与地应力环境问题、多相并存与多场耦合关键性问题等。

1) 动力灾害破坏机理及预警监测的局限性问题。矿山岩石动力学作为一种特殊工程动力学实践问题,现有研究方法和理论在动力灾害破坏机理分析和预警监测的复杂性方面存在局限性,导致分析结果指导工程实践具有一定的局限性,缺乏相关破坏机理研究理论及灾害预警监测机制。虽然研究方法和研究手段不断创新和改进,从现场试验、模型试验、数值模拟,再到宏细观研究手段的应用,对矿山岩石动力灾害破坏机理的研究在逐步深入;但岩石在动载下的破裂、断裂、流变性质及本构关系仍不完全清楚,而且从宏观到细观再从细观到宏观的研究,仍未架起宏观破坏现象与细观结构变化特征间关联的桥梁,无法从宏观-细观-宏观的分析思路解释岩石在动载作用下的破坏机理及其能量耗散特征。在动灾预警监测机制的建立方面目前也不完善,无法建立准确化、精细化和科学化预警监测的有效保障体系,存在监测技术与手段的范围精度有限、数据处理分析及时性和准确可靠性问题、预警准确和及时性等问题等。

2) 数值模拟分析的局限性问题。数值模拟分析时,由于问题的复杂性,没有完全考虑岩石(体)的各向异性、节理裂隙等问题在数值模拟计算中缺乏较好的解决方法,不同岩石本构模型的差异和不准确性未能科学合理地解释分析。同时,目前用于矿山岩石动力学的计算软件较多,也各有特点,在数值模拟时模拟方法的选择、岩体参数的确定、选取本构关系模型、其他耦合因素分析等,都是影响数值模拟结果可靠性的重要因素,数值模拟分析时需对模型进行合

适的检验校准并且模拟结果正确性分析也严重影响和制约数值模拟的运用。在进行数值模拟分析时,岩石本构模型选取的准确性问题、模型参数的确定及优化问题、实际与模拟的边界条件问题等都是数值模拟计算中的重要问题。

3) 地震、爆破等动载作用下矿山安全性问题。震灾和爆破振动引起的动力学灾害常常是非常严重的,制约着矿山安全生产,许多学者从不同方向对此展开研究,但仍然缺乏指导工程实践的突破性成果。目前,尤其是高烈度地区及地层地质条件复杂的矿区硐室、边坡、巷道及矿井等在爆破动载及地震波等作用下的耐久性及安全性问题,是矿山在实际工程中采取相应的控制和防护措施来减轻动载影响的关键。

4) 深井开采高地应力问题。目前深地科学逐渐发展为新的研究领域,对动力学灾害与其他深地多场耦合问题的研究,是逐步厘清灾害演化过程建立相关监测及预警防治体系的关键。受制于各种高温、高压、高应变率等极端深地条件使得灾害演化过程呈现多样性,导致深地动灾演化过程极其复杂,尤其是工程中常见的硬脆性岩体的岩爆、深层冲击地压等的防治、监测及预警技术有待提升,是矿山岩石动力学研究的重大课题。

5) 深部岩体原位力学行为与地应力环境问题。传统岩石动力学及开采理论对深部环境的矿山开采的局限性,严重制约着中国深部矿山开采的发展。要突破传统岩石动力学及开采理论,研究深部岩体原位力学行为及地应力环境是基础,对于解决深部取样的保真性问题、深部原位测试及反馈困难问题、揭示深部地应力复杂环境问题等至关重要。目前,亟须发展深部原位状态与工程扰动影响的采动岩石力学新原理、新理论、新方法,实现深部取样保真性良好、原位监测科学精准、分析反馈可靠等的目标。

6) 多相并存与多场耦合关键性问题。矿山岩石动力学多相并存与多场耦合问题随开采深度的增加日益突出,在深部开采的高地应力、高地温、高渗透压及强烈开采扰动的“三高一扰动”环境下,矿山深部环境是一个固、液、气多相并存,多产耦合的状态。在深部开采中多场共同作用下的岩体变形破坏机理问题、建立多相条件耦合的岩体模型问题、多相并存条件下岩体损伤及变形的时空演化规律问题等是研究的难点。

5 未来展望

通过浅析矿山岩石动力灾害事故和矿山岩石动力学研究现状,分析目前存在的一系列关键性科学问题可以看出,矿山动力灾害的深入研究是目前矿山工

程亟待解决的一个重大课题,它对矿山工程安全有序开展工程建设至关重要,其仍存在众多复杂和极具挑战性的关键性问题尚未得到很好解决。为进一步深入研究矿山岩石动力学问题,有效指导工程实践并保障矿山工程在生产建设中的安全性,未来研究应在以下方面给予足够重视:

1) 矿山岩石动力学研究的复杂性和鲜明的实践性,决定了对它的研究是一个既有理论性又有实践性的研究课题,在研究分析时要充分考虑多学科交叉融合的思想和方法,提出创新性的分析方法。例如:在风险分析时宜采用多种因素综合考量分析的各类不确定分析手段和确定性分析手段相结合的风险分析方法;物理试验分析时采用多种不同分析仪器、方法综合应用发挥各自特长,为研究提供更可靠优质结果;在理论分析及基础研究中注重多学科理论的综合交叉融合等。

2) 深部开采“三高一扰动”的复杂多场耦合环境下,应加快深部岩体原位力学行为与地应力环境的研究,开发出原位取芯、原位测试的理论和技术、“三高一扰动”环境条件下的试验系统、深部岩体冲击型和应变型岩爆试验系统等研究技术和分析方法。为深入研究深部开采多场耦合条件下岩体冲击动力发生的非线性力学行为和机理、岩体多相并存下的变形及破坏规律、相关深部动灾问题的防治等创造良好条件,亟须进一步加快深部开采的相关理论和技术的创新和发展。

3) 现阶段对岩石在动载下的变形、断裂、破坏研究集中于常规试验,在今后研究中应不断引进新方法、新理论、新技术及新手段,用更加精细化的仪器分析微观尺度的变化,把矿山岩石动力学宏观破坏问题与细观变化相结合,从宏观-细观-宏观的研究方向解释动载作用后岩体的变化,研究岩石(体)在动载作用下的破坏模式及能量耗散特点,以这种方式从本质上阐述岩石破坏机理是矿山岩石动力学问题未来发展的一个重要方向。

4) 矿山工程动力灾变问题研究中,岩石动力学的研究和发展未来可以集中在岩石力学和本构关系上;岩石材料动载作用下的断裂与破碎;数值模拟与智能化及常见动灾的监测预警、深部岩体原位力学行为与地应力环境、多相并存与多场耦合关键性问题等方面。

[参考文献]

- [1] 袁亮,王恩元,马衍坤,等.我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J].煤炭学报,2023,48(5):1 825-1 845.
- [2] 姜海涛,刘明淳,蒋加森,等.基于声发射指标的常规卸压机制分析与预测信度应用[J].黄金,2023,44(8):10-14.
- [3] 赵兴东.黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J].黄金,2024,45(8):1-18.
- [4] WU G Y, NIE X X, ZHAO L H, et al. Study on the stability of waste rock filling in goaf based on dynamic comprehensive analysis method [J/OL]. Heliyon, 10-24[2024-10-23]. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41023>.
- [5] KHAN M, HE X Q, GUO J, et al. Accurate prediction of indicators for engineering failures in complex mining environments[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 155: 107736.
- [6] 李夕兵,周健,黄麟淇,等.中国黄金矿山开采技术回顾与展望[J].黄金,2020,41(9):41-50.
- [7] 胡学敏,曾晟,宋良灵.基于灰狼算法改进随机森林算法的爆破振动速度预测研究[J].黄金,2024,45(1):12-16.
- [8] GAO K, QIAO G D, LIU Z G, et al. Damage characteristics caused by deep-hole blasting near normal fault and its effects on coal and gas outbursts[J]. Geofluids, 2022(3):1-13.
- [9] 王润,孟兴涛,曹洋,等.爆破荷载下露天矿边坡动力放大效应试验研究[J].黄金,2021,42(11):39-43.
- [10] LYU P F, LU K B, CHEN X H. Mining stress distribution in stope and overlying rock fracture characteristics and its disaster-pregnant mechanism of coal mine earthquake [J]. Shock and Vibration, 2022, 2023(1):1-17.
- [11] 聂兴信,吴功勇,张鑫,等.露天矿高陡复杂边坡软弱岩层组“坐落-滑移式”破坏模式研究[J].工业安全与环保,2024,50(5):40-44.
- [12] 何玉龙,王栋毅,李海龙.BMS微震监测系统在深部岩体稳定性监测中的应用[J].黄金,2024,45(4):5-8,17.
- [13] 黄理兴.岩石动力学研究成就与趋势[J].岩土力学,2011,32(10):2 889-2 900.
- [14] 朱世龙.《中国岩石圈动力学图集》评审会议在武汉召开[J].中国地震,1985(4):49.
- [15] 王靖涛.加速发展岩石动力学[J].岩土力学,1989,10(3):6-12.
- [16] 卓家寿.岩石力学的新发展——记第五届国际岩石力学大会[J].华水科技情报,1984(2):8-17.
- [17] 黄理兴.中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会成立[J].岩土力学,1988,9(1):82.
- [18] 李夕兵,刘德顺,古德生.消除岩石动态实验曲线振荡的有效途径[J].中南工业大学学报,1995,26(4):457-460.
- [19] 李夕兵,赖海辉.高应变率下的岩石脆断实验技术[J].凿岩机械气动工具,1990,16(4):39-43.
- [20] 乔河,唐春安,傅宇方,等.岩爆及采矿诱发岩体失稳破坏过程数值模拟研究[J].中国矿业,1997,6(6):48-50.
- [21] 乔河,刘殿书,王树仁.强动载下岩石动态本构关系试验研究[J].爆破,1996,13(2):1-6,15.
- [22] 黄理兴.岩石动力学研究现状与展望[C]//中国科学技术协会,中国岩石力学与工程学会.2009—2010岩石力学与岩石工程学科发展报告.北京:中国科学技术出版社,2010:143-151,216-217.
- [23] 代豪,田锐,李铭松,等.岩石动力学在工程爆破中的研究现状与展望[J].世界有色金属,2020(6):199-200.
- [24] LI K, ZHANG B Y. Research on overlying strata movement and deformation under the conditions of shortwall and longwall mining[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90/91/92/93:1 299-1 302.
- [25] 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(12):1 599-1 605.

- [26] 宋海燕,刘宗民,梁立孚.线粘弹性动力学的拟变分原理及其应用[M]//龚自正.数学·力学·物理学·高新技术交叉研究进展——2010(13).北京:科学出版社,2010:20-24.
- [27] ZHAO F,SHI Z M,YU S B,et al.A review of fracture mechanic behaviors of rocks containing various defects[J].Underground Space,2023,12:102-115.
- [28] DEYAB S M,ADEL A,HAMED R,et al.Investigating microwave treatment of rocks based on fracture mechanics analysis in mode I fracture toughness test[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2023,56(7):5 275-5 291.
- [29] 赵洪宝,吉东亮,刘绍强,等.冲击荷载下复合岩体动力响应力学特性及本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):88-99.
- [30] 孙钧.岩石动力学研究的若干问题[C]//同济大学.盛世岁月——祝贺孙钧院士八秩华诞论文集.上海:同济大学出版社,2006:150-158.
- [31] 张东奎.岩爆发生机理探讨与分析[J].山西建筑,2011,37(10):63-64.
- [32] 刘卫东,于清军,吕军恩,等.玲珑金矿深部岩爆发生机理分析[J].中国矿业,2009,18(5):112-115.
- [33] 陈则黄,李克钢,李明亮,等.基于集成算法和普通机器学习算法的岩爆分级预测及选择[J].有色金属(矿山部分),2023,75(4):114-124.
- [34] 石增柱,贾冬旭,马宏军,等.唐山矿“8.2”冲击地压显现特征及发生机制分析[J].煤炭技术,2023,42(7):57-61.
- [35] 夏开文,王帅,徐颖,等.深部岩石动力学实验研究进展[J].岩石力学与工程学报,2021,40(3):448-475.
- [36] 杜瑞峰,裴向军,贾俊,等.多次冲击下砂岩粘弹性损伤本构关系[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(2):638-649.
- [37] 邓勇,陈勉,金衍,等.冲击作用下岩石破碎的动力学特性及能耗特征研究[J].石油钻探技术,2016,44(3):27-32.
- [38] 王爱文,孙邦齐,潘一山,等.梯度围岩结构应力波透射模型与传播衰减规律[J].煤炭学报,2023,48(5):1 969-1 984.
- [39] LYU X F,LIN X,OUYANG W,et al.Stress wave propagation attenuation law and energy dissipation characteristics of rock-barrier-coal composite specimen under dynamic load[J].Journal of Central South University,2023,30(1):276-288.
- [40] 褚怀保,杨小林,侯爱军,等.煤体中爆炸应力波传播与衰减规律模拟实验研究[J].爆炸与冲击,2012,32(2):185-189.
- [41] 金解放,杨益,廖占象,等.动荷载与地应力对岩石响应特性的影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):1 990-2 002.
- [42] 张平,袁梅,王元智,等.穿越煤层段隧道爆破振动对围岩稳定性影响研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(11):39-44.
- [43] YE Y,LIU Q S.Research on the law of propagation and attenuation of the explosive stress wave in surrounding rocks at different levels[J].Applied Mechanics and Materials,2015,723:279-284.
- [44] 陈何.束状孔爆破机理及增强破岩作用模型研究[D].北京:北京科技大学,2022.
- [45] 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.
- [46] 邓树新,王明洋,李杰,等.冲击扰动下滑移型岩爆的模拟试验及机理探讨[J].岩土工程学报,2020,42(12):2 215-2 221.
- [47] 刘思好,徐则民.基于动-静应力耦合的深埋隧道岩爆灾害控制[J].自然灾害学报,2010,19(1):177-184.
- [48] 宫凤强,潘俊峰,江权.岩爆和冲击地压的差异解析及深部工程地质灾害关键机理问题[J].工程地质学报,2021,29(4):933-961.
- [49] 孙嘉豪,王文杰,解联库.基于微震监测和概率优化朴素贝叶斯的短期岩爆预测模型[J].岩土力学,2024,45(6):1 884-1 894.
- [50] 侯克鹏,包广拓,孙华芬.改进的 MVO-GRNN 神经网络岩爆预测模型研究[J].安全与环境学报,2024,24(3):923-932.
- [51] 宋英华,庞昭胜,李墨潇,等.基于反赋权与 MBCT-SR 多维云模型算法岩爆预测研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(3):39-46.
- [52] CHEN Y Y,XIAO P W,LI P,et al.Formation mechanism of rock-burst in deep tunnel adjacent to faults:Implication from numerical simulation and microseismic monitoring[J].Journal of Central South University,2022,29(12):4 035-4 050.
- [53] 郭平业,卜墨华,张鹏,等.矿山地热防控与利用研究进展[J].工程科学学报,2022,44(10):1 632-1 651.
- [54] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等.深部采矿岩石力学进展[J].煤炭学报,2024,49(1):75-99.
- [55] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.
- [56] 赵兴东,朱乾坤,代碧波,等.深部金属矿超前序次释压机理与调控方法研究进展[J].金属矿山,2023(8):153-161.
- [57] 吴功勇,聂兴信,张鑫,等.基于主客观综合赋权-正向云模型的露天矿含软弱岩层组高陡复杂边坡稳定性分级评定[J].有色金属工程,2024,14(9):150-162.
- [58] FAN R,LUO Y,GONG H L,et al.Dynamic damage and fracture characteristics of granite under cyclic impact simulated with coupled finite-difference and discrete element methods[J].Mechanics of Time-Dependent Materials,2023,27(2):469-487.
- [59] 王梦,范立峰.岩体内应力波传播的研究进展与展望[J].北京工业大学学报,2021,47(7):802-814.
- [60] 张明天,龚原,董法,等.某矿区近地表开采地质灾害模拟研究[J].黄金,2021,42(8):42-47.
- [61] WU G Y,NIE X X,ZHANG X,et al.Stability of high and steep slope of weak rock formation in open pit mine based on subjective and objective comprehensive weight-forward cloud model[J].Non-ferrous metal engineering,2024,14(9):150-162.
- [62] 张旭飞,郭运鸿,王兴亚,等.焦家金矿巷道掘进过程中围岩变形及应力分布演化规律[J].黄金,2024,45(6):1-5.
- [63] 郭陈响,朱建国,刘恩彦,等.动态冲击下龄期较短充填体的力学特性研究[J].黄金,2024,45(1):6-11.
- [64] 姜兆阳,郑浩田,蒲江涌.极不稳固矿岩无底柱分段崩落采矿法崩步距优化数值模拟及应用[J].黄金,2022,43(6):35-39.
- [65] 周成,邓涛,廖元欢,等.爆破动荷载作用下露天矿岩质边坡稳定性及支护研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(5):76-82,106.
- [66] 赵文博,邓丽梅,赵大凯,等.高应变率下花岗岩动态力学性能试验及数值模拟研究[J].爆破,2022,39(3):10-15.
- [67] 王军祥,赵硕龙,孙港,等.基于 LS-DYNA 的砂岩动静组合 SHPB 数值模拟[J].沈阳工业大学学报,2023,45(1):97-105.
- [68] 赵光明,马文伟,孟祥瑞.动载作用下岩石类材料破坏模式及能量特性[J].岩土力学,2015,36(12):3 598-3 605,3 624.
- [69] LIANG Z Z,QIAN X K,ZHANG Y F,et al.Numerical simulation of dynamic fracture properties of rocks under different static stress conditions[J].Journal of Central South University,2022,29(2):624-644.
- [70] 周小平,赵毅,钱七虎.单轴压缩条件下岩石破坏的光滑粒子流体动力学数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):

- 2 647-2 658.
- [71] 王培涛,刘操,马驰,等.基于离散裂隙网络的岩体各向异性莫尔-库仑表征方法研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增刊1):3 266-3 280.
- [72] 王怀文,周宏伟,左建平,等.光测方法在岩层移动相似模拟实验中的应用[J].煤炭学报,2006,31(3):278-281.
- [73] 黄锋,朱合华,徐前卫.含软弱夹层隧道围岩松动破坏模型试验与分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊1):2 915-2 924.
- [74] 徐干成,袁伟泽,顾金才,等.不同性状岩体加固抗爆炸性能模拟试验研究[J].防护工程,2019,41(4):5-10.
- [75] 袁亮,顾金才,薛俊华,等.深部围岩分区破裂化模型试验研究[J].煤炭学报,2014,39(6):987-993.
- [76] 江权,史应恩,蔡美峰,等.深部岩体大变形规律:金川二矿巷道变形与破坏现场综合观测研究[J].煤炭学报,2019,44(5):1 337-1 348.
- [77] 冯夏庭,吴世勇,李邵军,等.中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(4):649-657.
- [78] 赵周能,冯夏庭,陈炳瑞.深埋隧洞 TBM 掘进微震与岩爆活动规律研究[J].岩土工程学报,2017,39(7):1 206-1 215.
- [79] 郭德勇,揣筱升,张铁岗,等.首山一矿深部地应力分布规律及影响因素[J].煤炭学报,2024,49(5):2 360-2 375.
- [80] 徐景龙,郭连军,王军祥,等.基于细观角度的岩石冲击动力学研究进展及展望[J].矿业研究与开发,2022,42(9):68-78.
- [81] 王磊,王安敏,陈礼鹏,等.含瓦斯煤循环冲击动力学特性与裂隙扩展特征[J].岩石力学与工程学报,2023,42(11):2 628-2 642.
- [82] 张竞,李骏.不同温度热处理橡胶-尾砂充填体能量损耗本构关系[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(4):88-97.
- [83] 李松,闫雷,刘连生,等.冲击荷载下弱风化花岗岩细观损伤研究[J].矿业研究与开发,2019,39(9):76-80.
- [84] 徐景龙,郭连军,王军祥,等.循环冲击荷载下红砂岩细观损伤演化及能耗特性研究[J].工程爆破,2023,29(4):24-34.
- [85] 李兆霖,王连国,姜崇扬,等.基于实时 CT 扫描的岩石真三轴条件下三维破裂演化规律[J].煤炭学报,2021,46(3):937-949.
- [86] WANG Y, FENG W, WANG H, et al. Rock bridge fracturing characteristics in granite induced by freeze-thaw and uniaxial deformation revealed by AE monitoring and post-test CT scanning[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 177: 103115.
- [87] 左建平,谢和平,周宏伟,等.温度影响下砂岩的细观破坏及变形场的 DSCM 表征[J].力学学报,2008,40(6):786-794.
- [88] 朱红光,谢和平,易成,等.岩石材料微裂隙演化的 CT 识别[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1 230-1 238.
- [89] 陈家嵘,周昌台,周韬,等.压剪荷载下含单一裂隙砂岩的应变演化与破坏特征研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(7):1 743-1 758.
- [90] 段永婷,冯夏庭,李晓.页岩细观矿物条带对其宏观破坏模式的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):43-52.
- [91] PANICO M, COZZOLINO E, PAPA I, et al. An investigation of the mechanical properties of flax/basalt epoxy hybrid composites from a sustainability perspective[J]. Polymers, 2024, 16(19): 2 839.
- [92] 杨洪升,郑宇轩,周风华,等.弹性 SHPB 试件内部纵向应力波传播及所产生的横向约束应力[J].固体力学学报,2023,44(6):815-830.
- [93] LI X L, ZHAO E L, LIU Z T, et al. Experimental study on multiple propagation characteristics of stress wave and surface displacement behavior in coal based on SHPB and DIC[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(7): 246.
- [94] 孙晓元,李吉辉,丁浩,等.基于 SHPB 动载过程的煤岩冲击破坏特征试验研究[J].煤炭与化工,2022,45(8):1-5.
- [95] 周宏伟,谢和平,左建平,等.赋存深度对岩石力学参数影响的实验研究[J].科学通报,2010,55(34):3 276-3 284.
- [96] 黄正均,赵星光,蔡美峰,等.三轴压缩加载频率对花岗岩疲劳特性影响试验[J].中国矿业,2019,28(4):150-155,162.
- [97] 郭奇峰,钱志海,潘继良,等.高温花岗岩热冲击后力学特性及损伤演化规律研究[J].工程科学学报,2022,44(10):1 746-1 754.
- [98] 郑迪.动载下胶结充填体宏细观力学特性与损伤演化机制研究[D].北京:北京科技大学,2022.
- [99] 张明涛,王伟,王奇智,等.基于 SHPB 实验的砂岩动态破坏过程及应变-损伤演化规律研究[J].爆炸与冲击,2021,41(9):40-53.

Current research status and prospects of mine rock dynamics

Zhao Linhai¹, Wu Gongyong², Nie Xingxin², Li Guangqi², Ruan Shunling², Jiang Song²,

Li Zongli¹, Gou Xiaobin¹, Wang Chao¹

(1. Baoji Northwest Nonferrous Erlihe Mining Co., Ltd.;

2. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology)

Abstract: Mine rock dynamics is a critical and challenging issue in ensuring mine safety, with significant engineering applications. In practice, the study of dynamic problems in mining environments, such as blast vibrations, mechanical excavation disturbances, and deep "three-high and one-disturbance" conditions, is crucial for safe production and disaster prevention in mines. This paper analyzes recent issues related to mine rock dynamics disasters and reviews progress in the field from 3 perspectives: the theoretical development and preliminary achievements of mine rock dynamics, research methods, and investigative tools. Key scientific challenges in the development of mine rock dynamics are identified, and future development trends are outlined.

Keywords: mining engineering; rock dynamics; disaster issues; theoretical development; research methods; new achievements