



岩石爆破基础理论研究进展与展望 II—动静关系

杨仁树 丁晨曦 杨立云 隋哲 王雁冰 左进京 何松林

Advancements and future prospects in the fundamental theories of rock blasting research —Dynamic-static relationship

YANG Renshu, DING Chenxi, YANG Liyun, SUI Zhe, WANG Yanbing, ZUO Jinjing, HE Songlin

引用本文:

杨仁树, 丁晨曦, 杨立云, 隋哲, 王雁冰, 左进京, 何松林. 岩石爆破基础理论研究进展与展望 II—动静关系[J]. 北科大: 工程科学学报, 2024, 46(12): 2133–2146. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2024.08.01.001

YANG Renshu, DING Chenxi, YANG Liyun, SUI Zhe, WANG Yanbing, ZUO Jinjing, HE Songlin. Advancements and future prospects in the fundamental theories of rock blasting research II—Dynamic-static relationship[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(12): 2133–2146. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2024.08.01.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.08.01.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

岩石爆破基础理论研究进展与展望 I—本构关系

Advancements and future prospects in the fundamental theories of rock blasting research I—Constitutive relationships

工程科学学报. 2024, 46(11): 1931 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.06.02.003>

炼铁新技术及基础理论研究进展

Progress of new technologies and fundamental theory about ironmaking

工程科学学报. 2021, 43(12): 1630 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.09.24.007>

应力波形对岩石爆生裂纹扩展机制影响的数值模拟

Effect of stress waveform on the rock blasting crack propagation mechanism using numerical simulation

工程科学学报. 2022, 44(12): 2057 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.04.14.004>

切缝药包爆破定向断裂机理及围岩损伤特性分析

Directional fracture mechanism and surrounding rock damage characteristics of slotted cartridge blasting

工程科学学报. 2023, 45(4): 521 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.20.002>

掏槽孔超深度对爆破效果的影响

Experiment study on overdepth coefficient of the cut hole in coal mine roadway excavation blasting

工程科学学报. 2023, 45(2): 182 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.11.30.006>

露天爆破中炸药单耗对岩石破碎块度的数值模拟研究

Effect of explosive powder factor on rock crushing block size in open-pit blasting

工程科学学报. 2024, 46(6): 973 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.09.11.003>

岩石爆破基础理论研究进展与展望 II—动静关系

杨仁树^{1,2)}, 丁晨曦^{1)✉}, 杨立云²⁾, 隋哲²⁾, 王雁冰²⁾, 左进京¹⁾, 何松林¹⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: dingcx91@sina.com

摘 要 炸药爆炸做功与岩体破碎耗能的耦合作用机理、炸药能量释放与爆炸裂纹扩展的精细控制原理, 是岩石爆破基础理论需要解决的两个关键科学问题; “动静关系”研究是解决关键科学问题的重要途径之一。本文采用文献综述分析方法对 2000 年—2023 年期间在中国知网数据库(CNKI)和科学引文索引数据库(WOS)收录的期刊论文进行了主题检索和分析, 将岩石爆破“动静关系”研究划分为三个不同阶段: 第 I 阶段(2006 年之前)、第 II 阶段(2007 年—2015 年)和第 III 阶段(2016 年至今)。确定了对“动静关系”研究有重要贡献的作者和研究机构, 揭示了关键词及其共现关系, 突出了研究的重点和趋势。通过对已有研究的系统梳理, 结合作者团队已经开展的研究工作和成果, 明确了新时期“动静关系”的研究方向, 即爆炸应力波与爆生气体的动静能量分布与高效利用、考虑岩石爆破破裂真实物理过程的数值模拟算法、爆炸应力波与爆生气体动静破岩效果的量化调控。“动静关系”的深入研究将推动爆破工程从“经验主导”走向“理论指导”, 从“粗放式”走向“精细化”。

关键词 动静关系; 岩石爆破; 爆炸应力波; 爆生气体; 破裂过程

分类号 TD235

Advancements and future prospects in the fundamental theories of rock blasting research II—Dynamic–static relationship

YANG Renshu^{1,2)}, DING Chenxi^{1)✉}, YANG Liyun²⁾, SUI Zhe²⁾, WANG Yanbing²⁾, ZUO Jinjing¹⁾, HE Songlin¹⁾

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail: dingcx91@sina.com

ABSTRACT Blasting is a process in which the chemical energy of explosives is rapidly released, causing strong impact on the rock mass and achieving efficient rock fragmentation. The blasting stress wave and blasting gas generated by explosive detonation are the main driving forces for rock fragmentation. The high peak value and short duration of blasting stress wave are generally referred to as “dynamic action”, the low peak value and long duration of blasting gas are generally referred to as “quasi-static action”. The coupling mechanism between the work done by explosive detonation and the energy consumption of rock fragmentation, as well as the fine control principle of explosive energy release and blast crack propagation, are two key scientific problems that need to be solved in the fundamental theories of rock blasting. The study of “dynamic–static relationship” is one of the important ways to solve key scientific problems. Because of the complexity of the blasting process, traditional blasting design often relies on empirical formulas and field tests, posing problems such as low efficiency, high cost, and uncontrollable safety risk. Traditional designs often only focus on the final crushing effect but ignore the fine control of the blasting process. However, the study of dynamic–static relations has introduced a new approach to solution. This article uses a literature review analysis method to conduct a topic search and analysis of journal papers published in CNKI (China national knowledge infrastructure) and WOS (Science citation index-expanded database) in 2000–2023. The study of the dynamic–static relationship in rock blasting is divided into three different stages: Stages I (before 2006), II (2007–2015),

收稿日期: 2024–08–01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51934001, 52227805, 52204085)

and III (2016–present). Stage I focuses on the dynamic action of blasting stress waves, revealing the propagation mechanism of blasting stress waves and providing a scientific basis for related engineering applications. Stage II studies the crack propagation behavior under the action of blasting stress waves; many studies researched the interaction mechanism between blasting stress waves and cracks and the change in the dynamic stress field at the crack tip, helping relevant researchers to understand the crack propagation and rock fracture process under the action of blasting stress waves. Under a national strategy, Stage III has a clear application scenario, and the effect of blasting gas has become the focus of this stage. Through the combination of experiments and numerical simulations, the mechanism of the effect of blasting gas on rock fragmentation, energy transfer, and crack propagation during blasting is deeply discussed. These studies reveal the behavioral characteristics of blasting gas under different conditions and provide theoretical support for practical engineering applications. In addition, authors and research institutions with important contributions to the study of dynamic–static relationships are identified. Keywords and their cooccurrence relationships are revealed, highlighting the focus and trends of the research. Through a systematic review of existing research, combined with the research work and achievements of the author team, the research direction of the dynamic–static relationship in the new era has been clarified, including the distribution and efficient utilization of dynamic–static energy between the blasting stress wave and blasting gas, numerical simulation algorithms considering the real physical processes of rock blasting fracture, and quantitative control of the dynamic–static rock breaking effect of blasting stress waves and blasting gas. The in-depth study of the dynamic–static relationship will promote blasting engineering, from experience-led to theoretical guidance and from extensive to fine.

KEY WORDS dynamic–static relationship; rock blasting; blasting stress wave; blasting gas; fracture process

21 世纪是地下空间开发利用的世纪. 随着我国西部大开发和“一带一路”战略的推进, 无论是矿产资源开发、水利水电设施建设, 还是交通隧道开挖、核废料储存, 都涉及地下工程施工. 钻孔爆破作为一种经济、高效的破岩手段, 在各个领域中发挥着重要的作用. 2023 年, 我国工业炸药年消耗量超过 450 万吨, 年石方爆破量超过 30 亿立方米, 居世界首位. 新时期, 随着地下工程和爆破行业转型升级与创新发展, 现有爆破技术已经难以适应工程发展需求^[1]. 开挖效率低、轮廓质量差、围岩损伤严重等成为岩石爆破开挖的共性难题, 安全高效、环境友好将成为新时期岩石爆破基础理论研究的主要目标. 在这样的背景下, 新时期岩石爆破基础理论需要解决的两个关键科学问题, 即: 炸药爆炸做功与岩体破碎耗能的耦合作用机理、炸药能量释放与爆炸裂纹扩展的精细控制原理; 而“三大关系”系列研究则是解决关键科学问题的具体途径, 即“本构关系”、“动静关系”和“波纹关系”. 其中, “本构关系”主要研究强动荷载下岩石的应力应变响应特征, 是预测和控制爆破效果的基础; “动静关系”主要研究爆炸应力波与爆生气体的破岩作用效应, 为装药结构设计提供指导; “波纹关系”主要研究爆炸应力波与裂纹的相互作用规律, 为孔网参数优化提供依据.

炸药爆炸是炸药化学能量迅速释放的过程, 对周边岩体产生强冲击作用, 从而实现高效破岩. 炸药爆炸产生的爆炸应力波和爆生气体是岩石破碎的主要动力^[2]. 爆炸应力波作用峰值高、时间

短, 一般被称为“动作用”; 爆生气体相对作用峰值低、时间长, 一般被称为“准静态作用”. 围绕“动静关系”的破岩效应, 众多科研工作者和工程技术人员开展了大量的研究并形成了许多理论成果. 其中, 爆炸应力波和爆生气体的动静综合作用理论考虑了爆炸应力波和爆生气体在岩石破坏过程中所起的作用, 更切合实际而被大多数研究者接受^[3]. 综合作用理论指出, 爆炸应力波的动作用是岩石中最初裂隙形成的主要原因^[4], 爆生气体的准静态作用使应力波形成的部分裂隙发生进一步扩展^[5]. 然而, 直至今天, 对于爆炸应力波和爆生气体各自在岩石爆破过程中的作用比重以及二者在时间和空间上的分配仍有不同的观点^[6–8]. 并且, 岩石爆破“动静关系”随着时间的推移、实验技术的改进又有新的变化. 很多学者采用了一些可行的变通方法对此进行了研究^[9–11], 对“动静关系”的认识和发展都起到了积极的推动作用, 但研究方法的局限性仍有待克服并解决. 本文聚焦分析“动静关系”的研究进展, 并对“动静关系”的发展方向提出展望.

1 动静关系的文献综述分析

1.1 发文量统计分析

为深化对岩石爆破“动静关系”的全面理解, 有必要对其发展历程及当前研究状况进行详尽调研与分析. 中国知网数据库(CNKI)是国内中文期刊论文收录最全面的数据库之一, 科学引文索引数据库(WOS)是国际英文期刊论文收录最权威的

数据库之一. 利用这两个数据库, 对 2000-01-01—2023-12-31 期间正式发表的期刊论文进行主题检索. 其中, 在 CNKI 以“爆炸应力波”或“爆生气体”为主题共检索文献 429 篇, 在 WOS 以“blasting stress wave”或“blasting gas”为主题共检索文献 1219 篇. 采用文献计量学方法对所检索的文献进行信息量化分析.

在分析学术领域研究的热度与发展速度时, 文献的发表时间以及按年度分类的发文量分布通常提供了直接且明显的指标. 现综合 CNKI 和 WOS 数据库中的发文量数据, 汇总统计绘制出图 1 所示的岩石爆破“动静关系”年度发文量趋势图. 可以发现岩石爆破“动静关系”研究领域的学术产出呈现逐步上升的发展态势, 并且可以划分为图 2 所示的三个发展阶段.

(1)第 I 阶段(2006 年之前): 年度发文量稳定在每年约 30 篇的水平, 反映出该研究领域处在萌芽期. 学术界对岩石爆破“动静关系”作用的研究开始起步, 研究基础仍在逐步建立之中. 该阶段的研究重点主要探讨了岩石破碎中爆炸应力波传播及衰减机制, 爆炸应力波的传播和衰减涉及到复杂的物理过程, 包括波的形成、传播、反射、折射以及能量的耗散. 在弹性、各向同性介质中, 爆炸应力波主要表现为球面波的形式向外扩散. 朱传云等^[12]通过数学物理方法, 对球形空腔受均布时

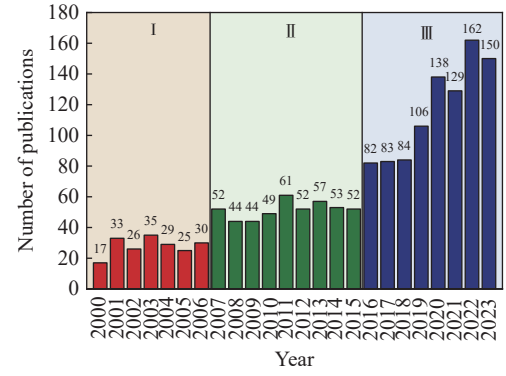


图 1 岩石爆破“动静关系”研究的年度发文量趋势图

Fig.1 Annual publication trend chart of research on the dynamic-static relationship in rock blasting

变压力作用下产生的球面波进行了解析, 并讨论了将球面波按平面波近似处理的误差. 崔新壮等^[13]通过对一维应力波在 Hopkinson 压杆试件内的衰减及折反射关系分析, 推导出了衰减率的表达式. 然后对含损伤的岩石试件进行冲击试验得到了衰减率与初始损伤的关系式, 通过应力等效模拟得到了球面与柱面爆炸应力波在各向同性损伤岩石的衰减规律. 这些研究为理解应力波在均质介质中的传播特性提供了基础, 但岩石介质的非均质性和各向异性对应力波的衰减有显著影响, 是不能忽视的. 王占江等^[14]通过分析花岗岩中化爆试验的应力波测试数据, 给出了自由场应力波衰减规律, 并指出岩体中应力波的传播与岩石的质量

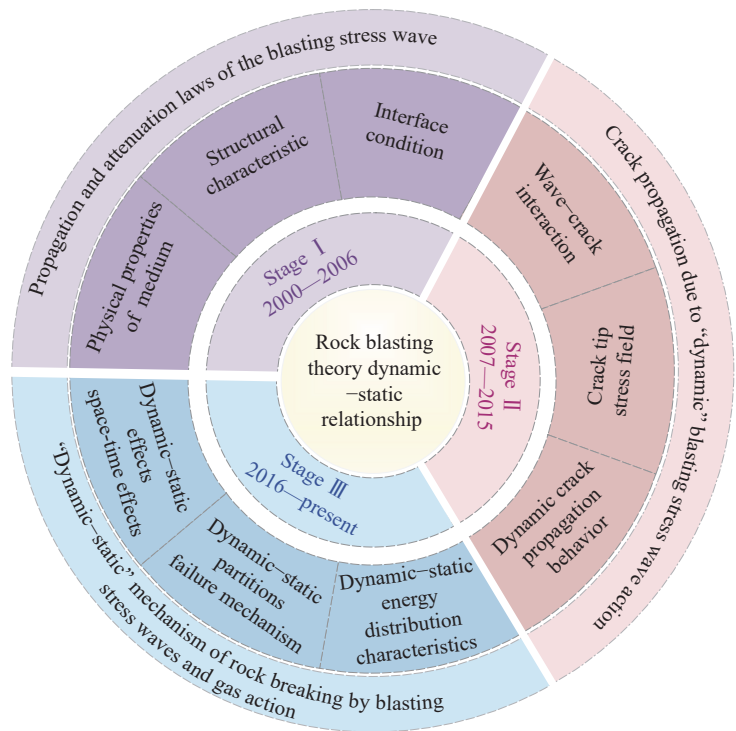


图 2 岩石爆破“动静关系”研究的三个阶段

Fig.2 Three stages of research on the dynamic-static relationship in rock blasting

及含水量明显相关. 数值模拟作为一种新兴研究方法, 已经用于爆炸应力波传播研究, 周钟等^[15]基于连续介质力学和不相融混合物理论, 提出了一种多孔含水介质流固耦合的本构模型, 并通过数值模拟研究水饱和岩石爆炸应力波的传播规律, 分析孔隙度、含水量等介质特性对爆炸应力波传播的影响. 岩石介质由于其结构的特殊性, 对应力波的传播和衰减有显著影响. 余永强^[16]等分析了层状岩体交界层面之间的受力状况, 探讨了爆炸应力波在层状岩体中的传播过程, 以及应力波在同一介质和不同介质中的衰减情况. 高文蛟等^[17]从波的基本理论出发, 推导了爆炸应力波入射一定厚度结构面时透射系数的理论计算公式, 并通过实验验证了理论的正确性, 揭示了透射率随入射角变化的规律.

爆炸应力波在不同介质中的传播和衰减规律受到多种因素的影响, 包括介质的物理特性、结构特征以及界面条件等, 该阶段的研究侧重于爆炸应力波的“动作用”, 揭示应力波的传播机制, 为相关工程应用提供科学依据.

(2) 第Ⅱ阶段(2007年—2015年): 随着技术的进步和科研兴趣的聚集, 该研究领域的发文量开始逐年上升, 表明该研究领域开始获得关注, 学术界开始意识到岩石爆破“动静关系”研究的重要性, 研究团队和机构相应增加了投入, 标志着这一时期学术研究活动的加速, 研究深度与广度均有所拓展. 该阶段学者对于岩石爆破的研究进一步深入到应力波的传播与裂纹扩展的联系, 普遍认为爆炸应力波的动作用是裂纹起裂的主要原因. 裂纹的扩展是一个高速动态过程, 应力波在材料中的传播会引起局部应力集中, 当应力超过材料的动态强度时, 裂纹开始扩展. 裂纹扩展速度极高, 有时可达数百米每秒. 这一过程不仅取决于爆炸荷载的特性, 还与材料动态力学性能和岩体结构面等密切相关^[18]. 21世纪初, 动态焦散线实验系统的引入得以观测应力波与裂纹的相互作用以及裂纹尖端应力场的状态, 杨仁树研究团队^[19-20]较为系统地研究了爆炸应力波作用下的裂纹起裂、扩展和相互勾连等一系列动态行为特征, 并对爆生裂纹扩展速度和裂纹尖端动态应力强度因子等动力学参数进行了详细地计算分析. 李清等^[21]通过实验发现爆破早期裂纹破坏模式为爆炸拉应力波作用下的Ⅰ型快速扩展裂纹, 裂纹尖端拉应力集中积聚的较大应变能维持了爆炸裂纹进一步扩展, 裂纹尖端扩展后期表现 P 波、S 波共同作用下

的复合型扩展特征. 数值模拟技术经过几年的发展在岩石爆破领域的应用已经相对成熟, Zhu 等^[22]引入了损伤模型来模拟岩石在静态和动态复合加载下的损伤和破坏过程, 并将其应用到 RFPA 动力学软件和 COMSOL Multiphysics 中, 以模拟岩石在静态和动态复合加载条件下的破坏, 并将地应力作用下的岩石爆破模拟为一个静—动—静复合过程, 即准静态地应力、爆破应力波和准静态爆生气体压力连续作用下的岩石损伤过程. 对于爆生气体的准静态作用, 杨小林等^[23]和贺顺吉^[24]认为爆生气体对爆破不同区域裂纹扩展的作用效应存在差别, 指出爆生气体是离炮孔较近区域微裂纹起裂和扩展的主要驱动力. Lanari 等^[25]提出了一种混合有限元—离散元的数值模拟方法, 初步模拟了爆生气体对裂纹面的作用效应, 研究了爆炸应力波和爆生气体对岩石损伤的相对贡献. 但相关研究对于准确量化爆炸应力波和爆生气体破岩的时空作用仍有很大困难.

这个时期由于数值模拟技术的进步成熟, 以及动态焦散线等光测力学方法在岩石爆破试验研究中的应用, 应力波作用下的爆生裂纹扩展机理不断深入, 针对应力波与裂纹相互作用机理、裂纹尖端动态应力场变化做出了大量研究, 帮助相关研究人员更好地理解应力波破岩和裂纹扩展这一过程, 并为相关工程提供理论支持和指导.

(3) 第Ⅲ阶段(2016年至今): 习近平总书记在 2016 年全国科技创新大会上提出了“向地球深部进军”的口号^[26], 强调我国应加大对地球深部探测与研究的力度. 在这一战略背景的号召下, 岩石爆破“动静关系”研究进入蓬勃发展时期. 从 2016 年起至今, 论文发表的数量不仅持续增长, 而且增速显著, 尤其到了 2021 年, 这一年的发文量激增至 162 篇, 标示该领域进入研究高峰期. 这种突飞猛进的增长可能得益于多种因素, 包括资金的增加、研究领域的国际合作、新技术的引入以及更多研究人员的参与. 这种增长不仅表明了岩石爆破“动静关系”研究的热度达到了新高度, 也意味着该领域的研究成果和理论进展达到了新的阶段. Zárate 等^[27]利用有限元—离散元方法模拟了岩石爆破过程中的多种破裂模式, 并通过嵌入流体—结构相互作用方法, 探讨了岩体裂缝内爆生气体的作用机制. Li 等^[28]利用功能原理描述了应力波能量、爆生气体能量和煤层表面应力之间的内在联系. 同时, 利用自主开发的 CO₂ 气体爆破试验平台获得了应力及超声波特性, 发现超声波的“双峰”

现象并不是偶然,它反映了在爆生气体协同作用下岩石内部能量的加速积累. Leng 等^[29] 分析了侧向起爆下爆炸能量的传递过程,结合现场爆破开挖试验发现,不同起爆方式之间的冲击波和爆生气体能量分配存在显著差异.与端部起爆相比,侧向起爆冲击能量可以转化为爆生气体能量,这导致冲击能量的减少和爆生气体能量的增加.此外,基于深部岩体爆破的工程背景,高地应力条件下的岩石爆破“动静关系”研究成为了热点研究方向,深部岩体爆破破裂是爆生气体对裂纹扩展“气楔”效应和地应力对裂纹扩展“阻滞”效应的博弈过程^[30]. 杨建华等^[31]开展的理论与数值模拟分析,结果证明了地应力对岩体爆炸应力与爆炸能量的分布有重要影响. 杨仁树等^[32]开展的模型实验结果表明,在含层理岩体中爆破时,爆生气体的能量难以得到有效利用,爆炸应力波对裂纹起裂和扩展的前期动力学行为起主导作用,地应力对裂纹扩展后期的行为特征产生主要影响.

在国家战略的指引下,岩石爆破“动静关系”研究有了更加明确的应用场景,爆生气体作用效应成为该阶段研究的重点. 研究人员通过试验和数值模拟相结合的方法,深入探讨爆破过程中爆生气体对岩体破碎、能量传递和裂纹扩展的影响机制. 这些研究不仅揭示了爆生气体在不同条件下的行为特性,还为实际工程应用提供了理论支持. 特别是在大型基础设施建设、矿山开采和隧道掘进等领域,理解和控制爆生气体作用效应对于提高爆破效率和保障施工安全具有重要意义.

1.2 作者与科研机构发文统计分析

作者是科学研究中的基石,他们在相应领域中扮演着至关重要的角色. 确定某一学科领域的关键作者对于掌握该领域的研究动态极为重要. 对上述 CNKI 和 WOS 数据库检索的文献进行作者

表 1 作者及其发文量统计

Table 1 Statistics of authors and their number of publications				
Order	Author		Number of publications	
	CNKI	WOS	CNKI	WOS
1	杨仁树	Yang Renshu	33	30
2	杨小林	Jiang Nan	21	20
3	余永强	Ding Chenxi	16	19
4	梁为民	Zhou Chuanbo	14	18
5	褚怀保	Lu Wenbo	14	14
6	岳中文	Yao Yingkang	12	13
7	卢文波	Yan Peng	11	13
8	宗琦	Wang Yi	11	13
9	丁晨曦	Yang Liyun	10	13
10	陈程	Li Haibo	10	12

分析,得到表 1 所示的作者及其发文量统计,并绘制得到图 3 所示的关键作者合作共现图.

发表的论文数量不仅是衡量科研机构在特定研究领域影响力的关键指标,而且能揭示出该时期内的科研动态,展示出研究的焦点和前沿领域. 根据 CNKI 和 WOS 数据库的统计数据,表 2 展示了关于“动静关系”研究发文量前五位的科研机构. 这些数据不仅反映了个别机构的学术产出,而且映射了整个研究领域的活跃度. 综合上述两个数据库的发文量统计,中国矿业大学(北京)和中国矿业大学领先,北京科技大学和中南大学紧随其后,这些机构构成了岩石爆破研究领域的主要力量,中国的高等教育机构作为此领域研究的重要推动者,不断加强科研能力并显著扩大了对国内外岩石爆破“动静关系”研究的学术贡献和影响.

杨仁树及其学者团队在 CNKI 和 WOS 数据库文章数量占有重要比例,对于岩石爆破“动静关系”相关研究相对深入. 工欲善其事,必先利其器,

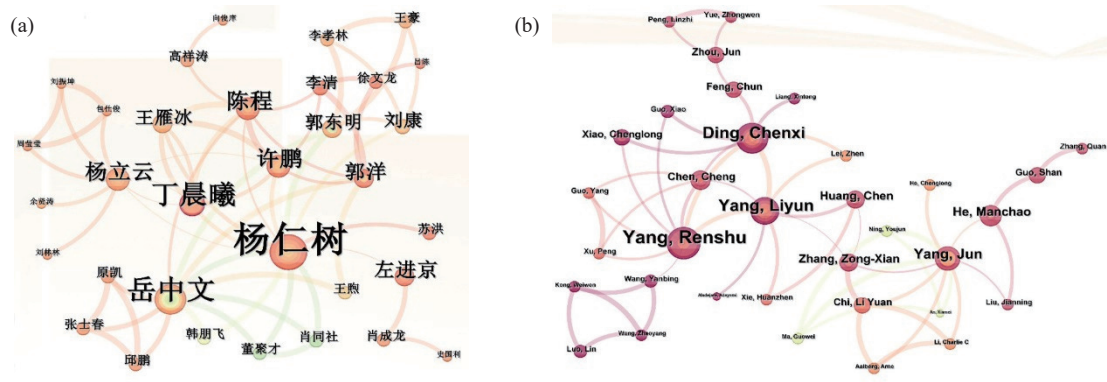


图 3 关键作者合作共现图.(a)CNKI 数据库; (b)WOS 数据库

Fig.3 Cooccurrence map of key author collaborations: (a) CNKI database; (b) WOS database

测试技术的进步极大地促进了岩石爆破基础理论的发展. 杨仁树及其学者团队在国内较早地将高速摄影技术和光测力学实验方法相结合, 发明了以探针取代桥丝引爆炸药的新方法, 将同步控制系统时间误差由 10 μs 控制到 1 μs, 由此开发出图 4 所示的数字激光动态焦散线实验系统^[33-35]. 该实验系统解决了爆炸应力波与爆生气体作用下裂纹尖端信息难以捕捉的难题, 标志着岩石爆破基础理

论研究朝着精细化方向发展. 在此基础上, 延伸开发了数字激光动态光弹性实验系统^[36-38](图 5)、超高速数字图像相关实验系统^[39-41](图 6)等, 形成了岩石爆破基础理论研究的系列实验方法.

这些实验系统与方法为岩石爆破“动静关系”研究提供了可靠手段, 产出了重要研究成果. 其中, 在相同的装药条件下, 分别采用堵塞炮孔和敞开炮孔的方式进行爆破模型实验, 炮孔半径 $r_1=2.5\text{ mm}$.

表 2 科研机构及其发文章统计

Table 2 Statistics of research institutions and their number of publications

Order	Research institution		Number of publications	
	CNKI	WOS	CNKI	WOS
1	中国矿业大学(北京)	China University of Mining and Technology	55	113
2	安徽理工大学	China University of Mining and Technology (Beijing)	32	70
3	中国科学技术大学	University of Science and Technology Beijing	31	54
4	中国矿业大学	Central South University	23	44
5	中南大学	Chinese Academy of Sciences	20	44

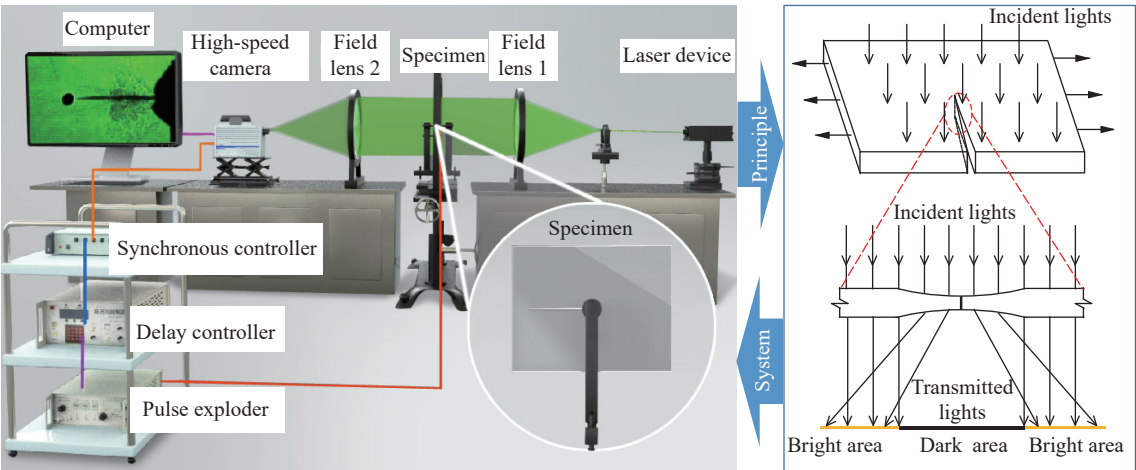


图 4 数字激光动态焦散线实验系统

Fig.4 Digital laser dynamic caustics experimental system

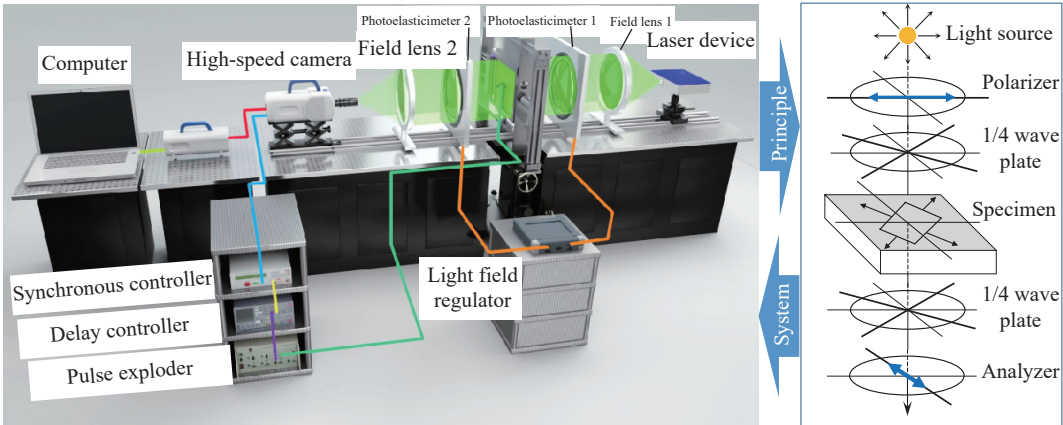


图 5 数字激光动态光弹性实验系统

Fig.5 Digital laser dynamic photoelasticity experimental system

认为堵塞炮孔爆破的试件破坏是由爆炸应力波和爆生气体综合作用造成的, 敞开炮孔爆破的试件破坏是由爆炸应力波作用导致的. 图 7 为试件破坏形态. 动静综合作用下, 炮孔周边产生粉碎区, 粉碎区半径约为 $5\text{ mm}(2r_1)$, 粉碎区外围产生十多条较长的爆生裂纹, 形成裂隙区, 爆生裂纹的长度为 $20\sim 40\text{ mm}(8r_1\sim 16r_1)$. 动作用下, 炮孔周边形成较大范围的粉碎区, 粉碎区半径约为 $10\text{ mm}(4r_1)$,

显著大于动静综合作用下的粉碎区范围, 无明显裂隙区形成. 爆炸应力波是粉碎区形成的直接原因, 爆生气体是裂隙区形成的主要动力. 爆生气体能够减小粉碎区范围, 增加裂隙长度, 提高爆炸能量利用效率.

此外, 图 8(a) 所示的是采用数字激光动态焦散线实验系统捕捉的爆生裂纹扩展过程, 清晰地呈现了爆生气体驱动爆生裂纹持续扩展的动态过

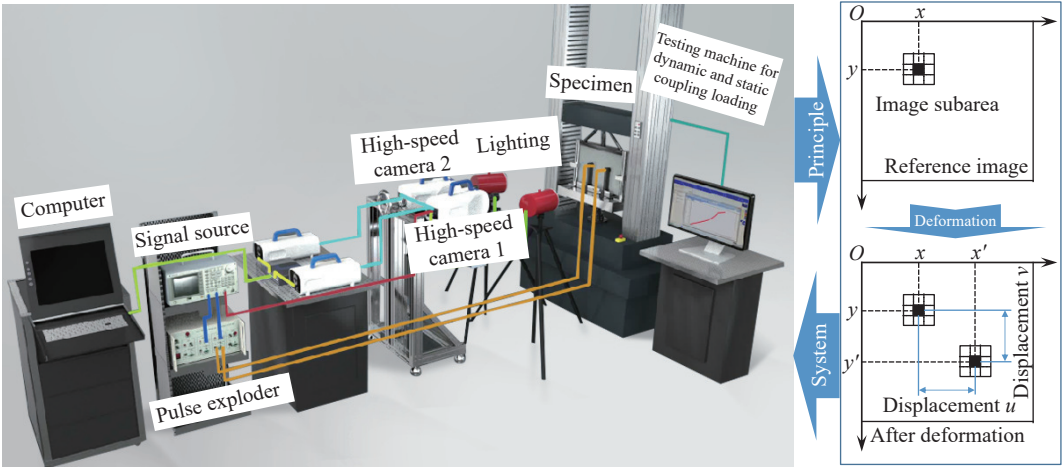


图 6 超高速数字图像相关实验系统

Fig.6 Ultrahigh-speed digital image correlation experimental system

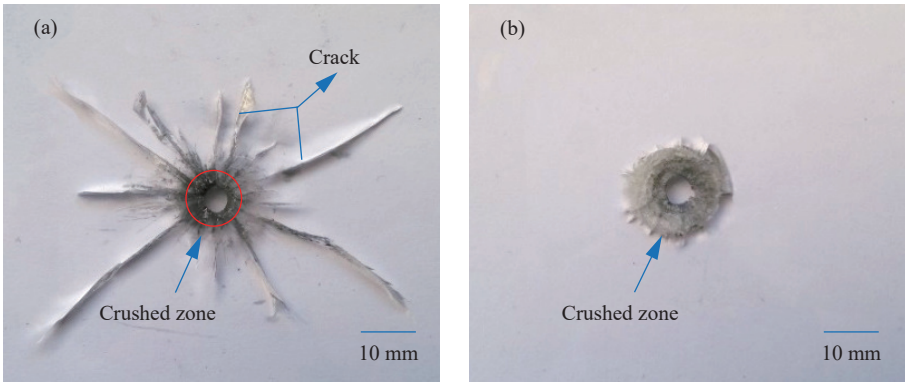


图 7 试件破坏形态^[3]. (a) 动静综合作用; (b) 动作用

Fig.7 Failure pattern of the specimen^[3]: (a) dynamic-static action; (b) dynamic action

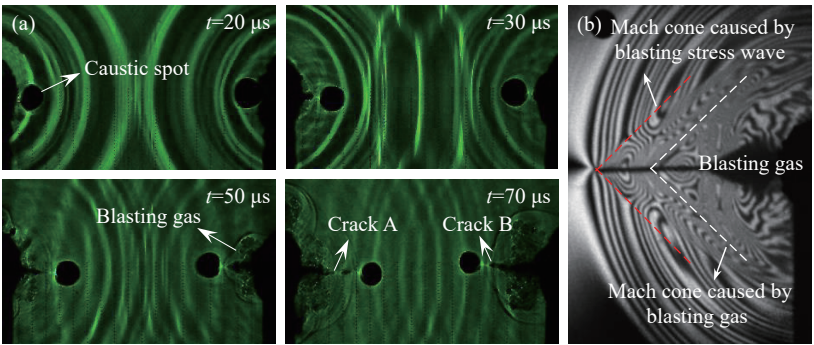


图 8 爆炸应力波和爆生气体作用效应的实验过程. (a) 动态焦散线实验; (b) 动态光弹性实验

Fig.8 Experimental process of the action effect of the blasting stress wave and blasting gas: (a) dynamic caustics experiment; (b) dynamic photoelasticity experiment

程. 进一步地, 图 8(b)所示的是采用数字激光动态光弹性实验系统捕捉的爆炸应力波和爆生气体先后作用过程, 发现爆炸应力波与爆生气体先后作用的“马赫锥效应”, 爆炸应力波作用在先, 爆生气体作用在后, 两种作用时间间隔 $5 \sim 8 \mu\text{s}$. 结合光测力学实验方法的相关精细化爆破实验研究为岩石爆破“动静关系”的认识提供了新思路、新视野.

岩石爆破“动静关系”研究领域的发展是一个复杂且多方位的过程. 这一过程由不断增长的文章量、关键作者和科研团队的投入, 以及科研机构的强有力支持共同推动. 这些因素相互影响, 共同促进了岩石爆破“动静关系”研究的快速发展和学术深度的不断拓展.

1.3 关键词共现分析

关键词共现分析对于研究者来说是发现文献中关键词之间相关性和联系的有效工具. 它不仅帮助研究者识别研究热点, 还在文献计量可视化中扮演着不可或缺的角色. 如图 9、10 所示, 岩石爆破“动静关系”领域的关键词共现图中, 节点的大小反映了关键词在文献中的出现频率和受关注程度. 节点越大, 表示该关键词的受关注程度越高. 去除与检索直接相关的关键词后, 剩余频次较多的关键词有“数值模拟”、“裂纹扩展”、“地应力”、“切缝药包”、“numerical simulation”、“model”、“crack propagation”和“wave propagation”, 这些关键词一定程度反映了当前的主要研究方法与研究方向.

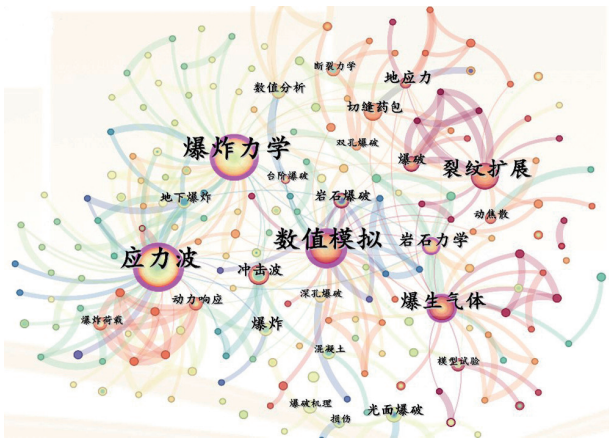


图 9 CNKI 数据库关键词共现图
Fig.9 Cooccurrence map of keywords in the CNKI database

对应“数值模拟”、“裂纹扩展”、“numerical simulation”、“crack propagation”和“wave propagation”这几个关键词. 由于爆破过程的复杂性, 难以获得岩石介质的应力分布和破碎形态的理论解析

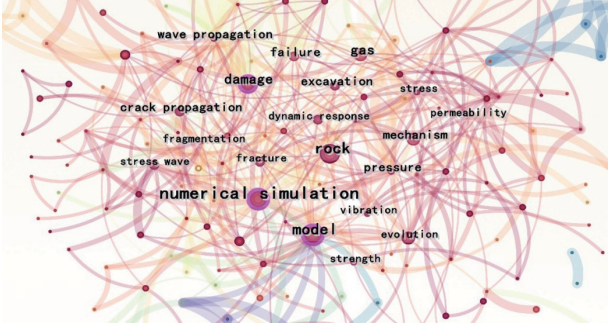


图 10 WOS 数据库关键词共现图
Fig.10 Cooccurrence map of keywords in the WOS database

解. 目前, 用于研究岩石爆破“动静”作用的主要手段是实验室模型试验和数值模拟. 其中, LS-DYNA 在处理非线性大变形和高应变率的情况时具有显著优势, 适用于模拟爆破中的瞬时现象和应力波的传播. 研究人员利用 LS-DYNA 模拟爆炸应力波的传播、反射和衰减过程, 获得岩体内部裂纹的动态扩展规律. ABAQUS 在处理静态应力分析和准静态问题方面表现卓越, 广泛用于研究爆破后的应力场分布和裂纹扩展行为. 凭借其丰富的材料模型和先进的数值算法, ABAQUS 能够精确模拟不同类型岩石在静态和动态荷载作用下的力学响应. 此外, 基于离散元方法的数值模拟技术在岩石爆破领域也开始得到应用, 有效克服了传统连续数值方法在处理爆破模拟中单元大变形和材料断裂现象时的局限性, 从而显著提升了模拟的准确性和可靠性.

尽管当前的数值模拟方法在岩石爆破破裂物理过程的模拟方面取得了一定进展, 但仍然存在诸多不足. 基于理想化假设的数值模型难以完全捕捉实际物理过程中存在的细微差异. 例如, 模拟爆破过程中所涉及的高温、高压、化学反应, 以及多物理场耦合等复杂现象, 现有模型难以精确描述. 爆炸产生的气体对岩石破坏机制和爆破能量分布的计算, 也存在挑战. 针对爆生气体的“气楔”效应这一复杂物理过程, 模型爆破实验成为研究爆生气体作用机理的主要方法, 对应关键词“model”. 在系统分析中, 学者们通过径向不耦合装药结构的二维模型实验, 结合高速数字图像相关实验系统, 深入研究了爆炸应力波与爆生气体对破碎区形成的作用效果. 研究表明, 爆生气体的作用显著减小了粉碎区的尺寸, 增加了裂纹扩展的长度, 同时提高了介质的应力峰值. 此外, 轴向不耦合装药结构(即空气间隔装药结构)也是研究爆生气体作用的重要方式之一. 径向不耦合

装药结构和轴向不耦合装药结构的本质区别在于采用不同方向的空气调控爆生气体,从而在时空上实现爆生气体与爆炸应力波作用的分离,以更好地探究其具体作用机制。

关键词“切缝药包”指的是在岩石爆破中“动静关系”作用机制的具体应用。如图 11 所示,作为一种定向断裂控制爆破技术,切缝药包广泛应用于岩石巷道掘进过程中^[42-44]。当切缝药包中的炸药起爆时,首先产生的爆轰波沿着切缝传播,进入切缝管与炮孔之间的空气中,形成空气冲击波。这道空气冲击波直接作用于炮孔孔壁,并逐渐衰减为应力波。在这一过程中,切缝方向上会形成初始裂纹和损伤区。在非切缝方向,由于切缝药包管壳的惯性效应对爆轰产物传播的阻隔作用,孔壁受到冲击的时间有所滞后,且冲击波的峰值减小。这种效应抑制了非切缝方向炮孔孔壁初始裂纹的形成,从而保护了非切缝方向岩体的稳定性。随后,爆炸产生的气体跟随冲击波进行传播。由于非切缝方向上的管壳阻碍作用,爆生气体向切缝方向

聚集,对切缝方向的炮孔孔壁产生强烈的射流冲击,进一步加剧了切缝方向孔壁岩石的损伤。因此,切缝药包爆破依靠切缝管的结构,充分利用岩石爆破“动静关系”,实现定向断裂爆破。

2 动静关系的研究展望

2.1 爆炸应力波与爆生气体的动静能量分布与高效利用

爆炸应力波和爆生气体是炸药爆炸能量的主要载体,深入了解不同工况条件下爆炸应力波和爆生气体的能量分布特征是进行爆炸能量高效利用的前提条件。明确爆炸应力波和爆生气体的能量分布特征,并实现爆炸能量的高效利用将是岩石爆破“动静关系”基础理论研究的一个重要方向。作者曾设计了一种爆炸水射流的实验方法,通过实验测算炸药爆炸作用下的水柱射流的速度和动能,来量化评估爆炸应力波和爆生气体的能量分布特征^[45]。如图 12 所示,该实验验证了炸药爆炸产生爆炸应力波无法驱动水柱射流,水柱射流的

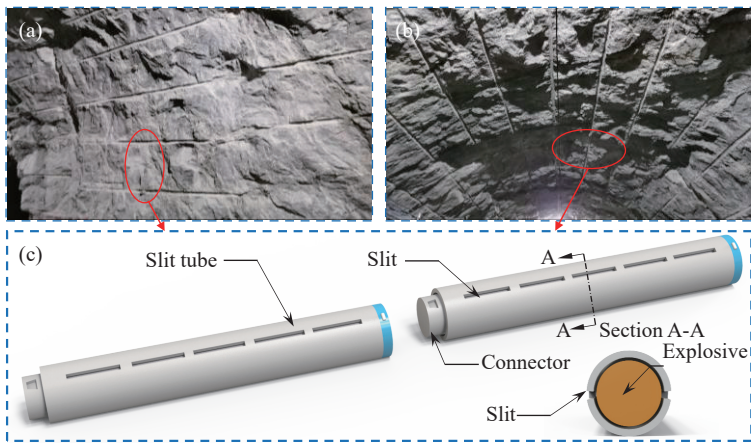


图 11 切缝药包的结构及其工程应用^[42]。(a)巷道两帮;(b)巷道顶板;(c)切缝药包

Fig.11 Structure of slit charge and its engineering application^[42]: (a) roadway side; (b) roadway roof; (c) slit charge

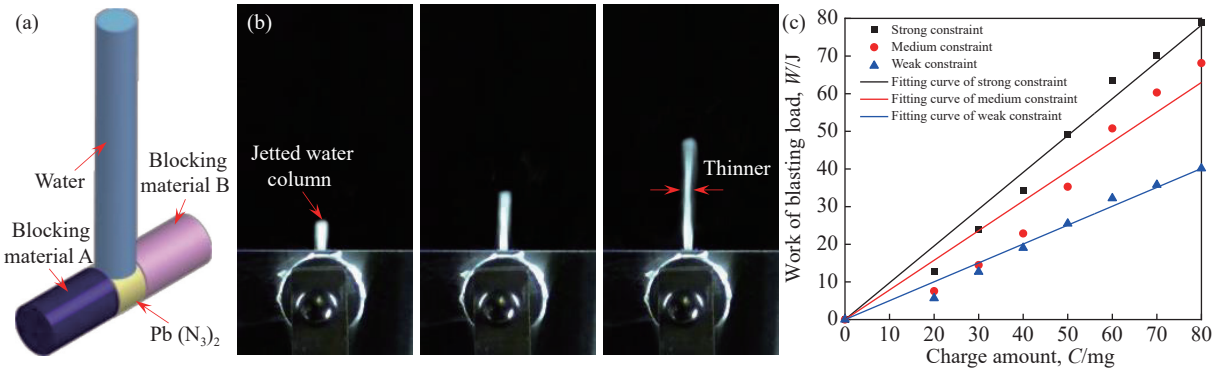


图 12 爆炸水射流实验^[45]。(a)结构示意图;(b)爆炸荷载下水柱射流照片;(c)爆炸做功与药量的关系

Fig.12 Water jet experiment under blasting load^[45]: (a) structure diagram; (b) water jet photos under blasting load; (c) relation between the work of blasting load and the charge amount

动能全部来源于爆生气体. 由此, 屏蔽了爆炸应力波的作用效应, 为单独研究爆生气体的能量分布提供了测试方法. 在此基础上, 可以进一步研究不同堵塞约束条件下爆生气体能量利用效率. 在强约束条件下, 爆生气体能量基本转化为水柱射流的动能, $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 炸药爆炸的爆生气体能量占爆炸总能量的 64% 左右, 爆炸应力波能量占爆炸总能量的 36% 左右. 此外, 本实验的强约束、中约束和弱约束条件下水柱射流的爆炸总能量利用效率分别为 64%、51% 和 33%, 爆生气体能量利用效率分别为 100%、80% 和 52%.

2.2 考虑岩石爆破破裂真实物理过程的数值模拟算法

受制于爆破器材管控, 岩石爆破模型实验研究受到较大限制. 此外, 由于炸药爆炸高温高压和爆破过程的瞬态性, 岩石爆破现场检测手段较为单一. 数值模拟成为岩石爆破基础理论和应用技术研究的重要手段. 目前, 在岩石爆破研究领域, 广泛使用的大型数值模拟软件主要是 LS-DYNA 和 ABAQUS, 这两种数值模拟软件被广泛应用于岩石爆破破裂过程研究, 取得了广泛的工程应用效果. 但这些基于连续介质力学开发的软件, 爆破破裂和失效等都采用了等效处理的方法, 并没有考虑爆炸应力波和爆生气体破岩的实际物理过程, 使得相关计算和分析结果的科学性和可靠性受到质疑. 因此, 开发考虑岩石爆破破裂真实物理过程的数值模拟算法是一个亟待发展的研究课题. 考虑岩石爆破破裂真实物理过程的数值模拟方法研究将是岩石爆破“动静关系”基础理论研究的另一个重要方向, 可以从以下两个方面着手.

(1) 考虑爆破粉碎区耗能的能量折减算法. 炸药爆炸是一个能量瞬态释放的高速过程, 与炸药直接接触的孔壁介质受到高温高压的强烈作用,

涉及复杂的化学反应过程和相变过程, 这一过程形成的机理目前尚未得到令人信服的解释. 因此, 这一复杂过程的模拟成为数值模拟算法的盲区, 短期内难以得到有效解决. 炸药爆炸形成粉碎区的范围十分有限, 工程实践中通常不关注粉碎区的形成和范围. 但是, 粉碎区的形成却消耗了大量的炸药能量. 目前, 数值模拟通常忽略粉碎区的形成过程和能量消耗, 认为炸药爆炸的能量均用于形成外围的裂隙区, 这显然与岩石爆破的真实物理过程相违背. 因此, 对爆破粉碎区的能量消耗进行准确计算, 并基于能量守恒原理对其进行折减, 从而准确获得用于形成爆破裂隙区的能量, 这是岩石爆破数值模拟算法研究应当首要解决的一个关键问题. 作者通过理论计算得出粉碎区的耗能特性, 并开发了一款能量折减计算插件^[46]. 在此基础上, 如图 13 所示, 基于 CDEM 方法和 GDEM 软件平台, 提出了适用于爆生裂纹扩展研究的改进 CDEM 方法, 使得数值模拟计算更贴近于爆生裂纹扩展的物理过程, 为考虑爆破粉碎区耗能的能量折减算法研究提供了思路.

(2) 考虑爆生气体作用效应的数值模拟算法. 已有研究均指出爆生气体的“气楔”作用是爆破裂隙区形成的主要动力, 爆生气体作用效应对于岩石爆破效果有显著影响. 因此, 如何真实模拟爆生气体作用效应, 成为岩石爆破数值模拟算法研究的一个难点. 基于连续介质力学的有限单元法和有限差分法是目前主要数值模拟手段. 这些方法适用于爆炸应力波传播和衰减等连续性作用过程的求解和分析, 为爆炸应力波作用效应的相关课题研究提供了方法支撑. 然而, 由于爆生气体膨胀、逸散等物理过程的复杂性, 这些数值模拟方法难以实现对爆生气体破岩作用过程的精准刻画. 作者在 CDEM 的计算框架下提出了拉格朗日有限

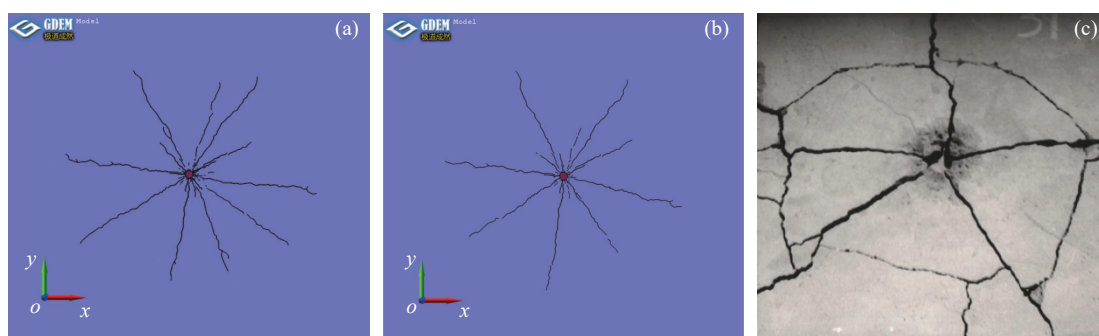


图 13 单孔爆破数值模拟与实验结果对比^[46]. (a) CDEM 方法计算结果; (b) 改进 CDEM 方法计算结果; (c) 模型实验结果

Fig. 13 Comparison of numerical simulation and experimental results of single borehole blasting^[46]. (a) calculation results of the CDEM; (b) calculation results of the improved CDEM; (c) experimental results

元和欧拉有限体积法的耦合数值仿真方法,即采用拉格朗日有限元刻画被爆介质中应力场的动态变化,采用欧拉有限体积法模拟爆生气体的压力场演化及扩散过程^[47].初步实现了图 14 所示的考虑爆生气体作用效应爆破破裂数值模拟研究,为相关爆生气体破岩作用效应研究抛砖引玉.考虑爆生气体作用效应的数值模拟算法研究还需要科研工作者投入更多的时间和精力.

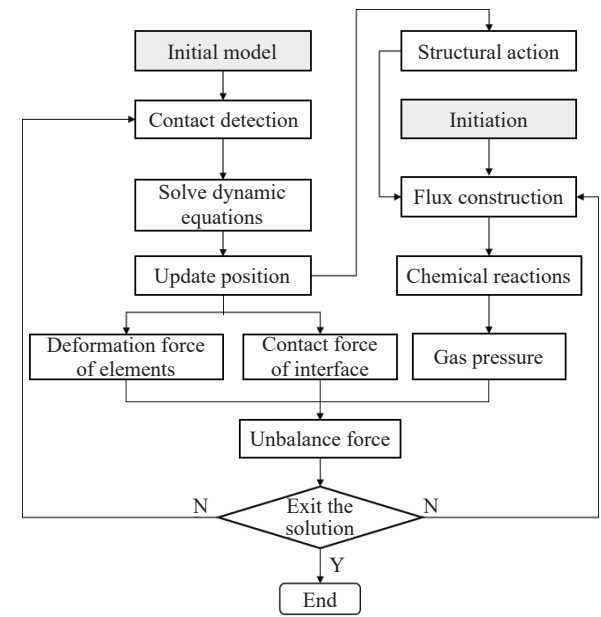


图 14 数值模拟计算流程图^[47]

Fig.14 Flowchart of the numerical simulation^[47]

2.3 爆炸应力波与爆生气体动静破岩效果的量化调控

在工程实践中,利用爆炸应力波和爆生气体的破岩作用特性,科研工作者和工程技术人员提出了径向不耦合装药爆破技术和轴向不耦合装药爆破技术,这两种爆破技术均主要利用炮孔内空气对爆生气体逸散和冲击的缓冲效应,削弱爆破

冲击、均匀孔内压力、延长作用时间.然而,对于诸如不耦合装药爆破的装药结构调控研究目前主要集中在工程应用效果的研究上,其理论基础是爆炸应力波与爆生气体破岩效果量化调控,还亟需深入系统研究.如图 15 所示,作者提出了一种空腔装药结构,初步从时间和空间尺度上实现了对爆炸应力波和爆生气体作用效应的量化区分^[48].具体地,通过改变炮孔装药结构,在药包和孔壁之间设置空腔,调控爆生气体的时空作用特征,获得了爆炸应变的“双峰值”演化规律,第一次峰值由爆炸应力波作用产生,第二次峰值由爆生气体作用产生,并且第二次峰值延后于第一次峰值产生.进一步分析表明空腔对爆炸应力波和爆生气体作用效应的影响存在差异.如图 16 所示,在空腔装药结构中,通过调控药包位置和空腔体积,可以充分利用爆炸应力波和爆生气体的时空作用效应,实现可控的岩石破碎.

3 结论

利用 CNKI 和 WOS 数据库,对 2000-01-01—2023-12-31 期间正式发表的期刊论文进行主题检索.其中,在 CNKI 以“爆炸应力波”或“爆生气体”为主题共检索文献 429 篇,在 WOS 以“blasting stress wave”或“blasting gas”为主题共检索文献 1219 篇.采用文献计量学方法对所检索的文献进行信息量化分析.发现岩石爆破“动静关系”研究领域的学术产出呈现逐步上升的发展态势,并且可以划分为三个发展阶段:第 I 阶段(2006 年之前)、第 II 阶段(2007 年—2015 年)和第 III 阶段(2016 年至今).岩石爆破“动静关系”研究领域的发展是一个复杂且多方位的过程.这一过程由不断增长的发文量、关键作者和科研团队的投入,以及科研机构的强

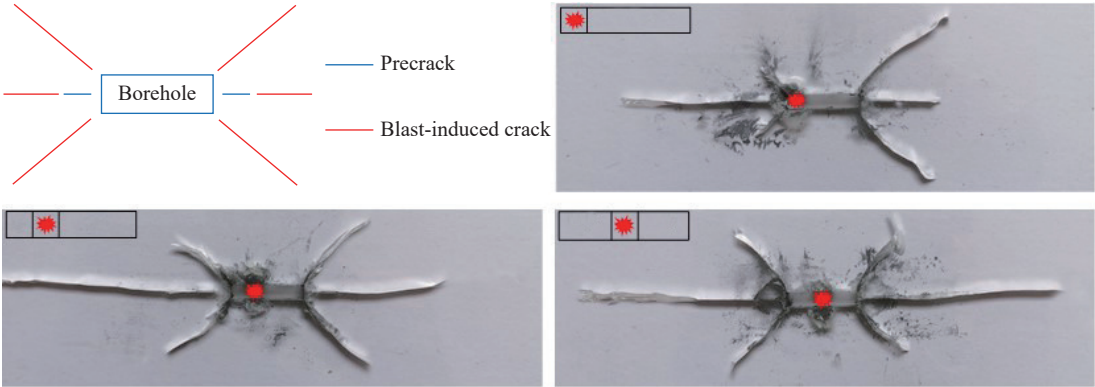
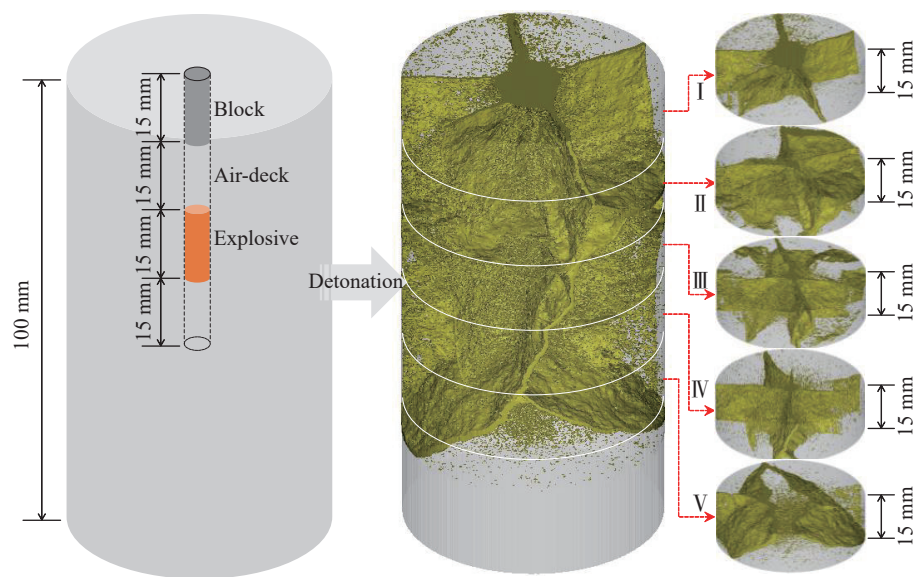


图 15 空腔装药结构的二维实验结果^[48]

Fig.15 Two-dimensional experimental results of the cavity charge structure^[48]

图 16 空腔装药结构的三维实验结果^[47]Fig.16 Three-dimensional experimental results of the cavity charge structure^[47]

有力支持共同推动. 这些因素相互影响, 共同促进了岩石爆破“动静关系”研究的快速发展和学术深度的不断拓展. 此外, 通过对已有研究的系统梳理, 结合作者团队已经开展的研究工作和成果, 明确了新时期“动静关系”的研究方向, 即爆炸应力波与爆生气体的动静能量分布与高效利用、考虑岩石爆破破裂真实物理过程的数值模拟算法、爆炸应力波与爆生气体动静破岩效果的量化调控.

炸药爆炸做功与岩体破碎耗能的耦合作用机理、炸药能量释放与爆炸裂纹扩展的精细控制原理, 是新时期岩石爆破基础理论需要解决的两个关键科学问题. “动静关系”研究是解决关键科学问题的重要途径之一, 旨在深入理解爆炸能量在岩石中的转化、传递以及由此产生的岩石破碎机理, 为装药结构优化提供科学指导. 传统的爆破设计, 由于爆破过程的复杂性, 往往依赖于经验公式和现场试验, 存在着效率低下、成本高昂、安全风险不可控等问题. 此外, 传统设计常常只关注最终的破碎效果, 而忽略了对爆破过程的精细控制. “动静关系”研究为解决这些问题带来了新的曙光. 它从能量传递和转化的角度, 揭示了爆破过程的内在规律, 为优化爆破设计、提高爆破效率提供了坚实的理论依据. 通过对炸药、装药结构、起爆方式等参数的精准控制, “动静关系”研究可以引导裂纹的产生和扩展, 实现对爆破效果的精细化控制, 从而提高爆破效率, 降低成本, 并提升安全性. 相信随着“动静关系”研究的不断深入, 爆破工程必将逐步发展成为一门更加科学、精准、可控

的技术, 为工程建设提供更加安全、高效、环保的爆破方案.

参 考 文 献

- [1] Yang R S, Yang G L, Gao X T. *Theory and Practice of Directional Fracture Controlled Blasting*. Beijing: Science Press, 2017
(杨仁树, 杨国梁, 高祥涛. 定向断裂控制爆破理论与实践. 北京: 科学出版社, 2017)
- [2] Yang R S, Ding C X, Yang L Y, et al. Visualizing the blast-induced stress wave and blasting gas action effects using digital image correlation. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2018, 112: 47
- [3] Yang R S, Ding C X, Wang Y B, et al. Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas. *Chin J Rock Mech Eng*, 2016, 35(S2): 3501
(杨仁树, 丁晨曦, 王雁冰, 等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 3501)
- [4] Chu H B, Yang X L, Hou A J, et al. A simulation-based experimental study on explosion stress wave propagation and attenuation in coal. *Explos Shock Waves*, 2012, 32(2): 185
(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. 爆炸与冲击, 2012, 32(2): 185)
- [5] Zhang Z X. *Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016
- [6] Trivino L F, Mohanty B. Assessment of crack initiation and propagation in rock from explosion-induced stress waves and gas expansion by cross-hole seismometry and FEM-DEM method. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2015, 77: 287
- [7] McHugh S. Crack extension caused by internal gas pressure compared with extension caused by tensile stress. *Int J Fract*, 1983, 21(3): 163

- [8] Brinkmann J R. An experimental study of the effects of shock and gas penetration in blasting // *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Brisbane, 1990: 55
- [9] Cho S H, Kaneko K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004, 41(5): 771
- [10] Li Y P, Feng C, Ding C X, et al. A novel continuous-discontinuous multi-field numerical model for rock blasting. *Appl Sci*, 2022, 12(21): 11123.
- [11] Dehghan Banadaki M M, Mohanty B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock. *Int J Impact Eng*, 2012, 40-41: 16
- [12] Zhu C Y, Xu G S. Analysis and study on dealing with blasting wave as planar-wave. *Rock Soil Mech*, 2002, 23(4): 455
(朱传云, 许桂生. 爆炸应力波近似处理的分析与研究. 岩土力学, 2002, 23(4): 455)
- [13] Cui X Z, Li W M, Duan Z P, et al. Stress wave attenuation in isotropic damaged rocks. *Explos Shock Waves*, 2001, 21(1): 74
(崔新壮, 李卫民, 段祝平, 等. 爆炸应力波在各向同性损伤岩石中的衰减规律研究. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 74)
- [14] Wang Z J, Li X L, Ge L, et al. Free-field stress wave propagation induced by underground chemical explosion in granite. *Chin J Rock Mech Eng*, 2003, 22(11): 1827
(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. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1827)
- [15] Zhou Z, Wang X J, Zhao K, et al. Numerical simulation for blast wave in water-saturated rock. *Explos Shock Waves*, 2005, 25(4): 296
(周钟, 王肖钧, 赵凯, 等. 水饱和岩石中爆炸应力波传播的数值模拟. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 296)
- [16] Yu Y Q, Qiu X D, Yang X L. The mechanism analyses of bedded rock blasting damage and fracture. *J China Coal Soc*, 2004, 29(4): 409
(余永强, 邱贤德, 杨小林. 层状岩体爆破损伤断裂机理分析. 煤炭学报, 2004, 29(4): 409)
- [17] Gao W J, Shan R L, Li J X, et al. Analysis of transmission coefficient of blasting stress wave entering structural face of certain depth. *Min Metall Eng*, 2001, 21(1): 16
(高文蛟, 单仁亮, 李建湘, 等. 爆炸应力波入射一定厚度结构面时透射系数分析. 矿冶工程, 2001, 21(1): 16)
- [18] Aliabadian Z, Sharafisafa M, Mortazavi A, et al. Wave and fracture propagation in continuum and faulted rock masses: Distinct element modeling. *Arab J Geosci*, 2014, 7(12): 5021
- [19] Yue Z W, Yang R S, Dong J C, et al. Dynamic propagation behaviors of an oblique edge crack in material under blast loading. *Explos Shock Waves*, 2011, 31(1): 75
(岳中文, 杨仁树, 董聚才, 等. 爆炸载荷下板条边界斜裂纹的动态扩展行为. 爆炸与冲击, 2011, 31(1): 75)
- [20] Yue Z W, Yang R S, Yang L Y, et al. Crack growth behavior of an edge sharp V-notch tip under blasting load. *Eng Blasting*, 2011, 17(1): 8
(岳中文, 杨仁树, 杨立云, 等. 爆炸载荷下边界锐 V 型切口尖端裂纹扩展行为. 工程爆破, 2011, 17(1): 8)
- [21] Li Q, Wang P H, Yang R S, et al. Experimental investigation on dynamic mechanical behaviors of cracks induced by V-notch borehole blasting with dynamic caustics. *Explos Shock Waves*, 2009, 29(4): 413
(李清, 王平虎, 杨仁树, 等. 切槽孔爆破动态力学特征的动焦散线实验. 爆炸与冲击, 2009, 29(4): 413)
- [22] Zhu Z M, Mohanty B, Xie H P. Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2007, 44(3): 412
- [23] Yang X L, Wang M S. Mechanism of rock crack growth under detonation gas loading. *Explos Shock Waves*, 2001, 21(2): 111
(杨小林, 王梦恕. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 111)
- [24] He S J. Analysis on the role of explosive gas in blasting rock breaking. *Sci Technol Inf*, 2009, 7(25): 130
(贺顺吉. 浅析爆生气体在爆破破岩中的作用. 科技资讯, 2009, 7(25): 130)
- [25] Lanari M, Fakhimi A. Numerical study of contributions of shock wave and gas penetration toward induced rock damage during blasting. *Comput Part Mech*, 2015, 2(2): 197
- [26] Xi J P. Striving to build a powerful country in science and technology in the world-speech at the national conference on science and technology innovation, the academicians conference of the chinese academy of sciences and the 9th national congress of the chinese association for science and technology. *People's Daily*, 2016-06-01(2)[2024-08-01]
(习近平. 为建设世界科技强国而奋斗——在全国科技创新大会、两院院士大会、中国科协第九次全国代表大会上的讲话. 人民日报, 2016-06-01(2) [2024-08-01])
- [27] Zárate F, Gonzalez J M, Miquel J, et al. A coupled fluid FEM-DEM technique for predicting blasting operations in tunnels. *Underground Space*, 2018, 3(4): 310
- [28] Li J W, Pan H Y, Gong W L, et al. Study on rock breaking characteristics of stress wave and blast-induced gas during CO₂ gas blasting. *J Pet Sci Eng*, 2022, 219: 111142
- [29] Leng Z D, Lu W B, Chen M, et al. Explosion energy transmission under side initiation and its effect on rock fragmentation. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2016, 86: 245
- [30] Lu W B. *Mechanism and Effect of Transient Unloading in Deep Rock Excavation*. Beijing: Science Press, 2018
(卢文波. 深部岩体开挖瞬态卸荷机制与效应. 北京: 科学出版社, 2018)
- [31] Yang J H, Peng C, Ye Z W, et al. Energy distribution of shock wave in deep rock mass blasting. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(6): 1735
(杨建华, 彭超, 叶志伟, 等. 深部岩体爆破冲击波能量分布特征. 兵工学报, 2024, 45(6): 1735)
- [32] Yang R S, Ding C X, Yang L Y. Blast cracking of borehole-

- crossed bedding under high stress condition. *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37(4): 801
(杨仁树, 丁晨曦, 杨立云. 高应力状态下穿过层理爆破致裂的动态行为研究. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 801)
- [33] Yang R S, Ding C X, Yang L Y, et al. Model experiment on dynamic behavior of jointed rock mass under blasting at high-stress conditions. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2018, 74: 145
- [34] Ding C X, Yang R S, Yang L Y. Experimental results of blast-induced cracking fractal characteristics and propagation behavior in deep rock mass. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2021, 142: 104772
- [35] Yang L Y, Yang R S, Xu P. Caustics method combined with laser & digital high-speed camera and its applications. *J China Univ Min Technol*, 2013, 42(2): 188
(杨立云, 杨仁树, 许鹏. 新型数字激光动态焦散线实验系统及其应用. 中国矿业大学学报, 2013, 42(2): 188)
- [36] Liang X T, Ding C X, Zhu X G, et al. Visualization study on stress evolution and crack propagation of jointed rock mass under blasting load. *Eng Fract Mech*, 2024, 296: 109833
- [37] Chen C, Yang R S, Xu P, et al. Experimental study on the interaction between oblique incident blast stress wave and static crack by dynamic photoelasticity. *Opt Lasers Eng*, 2022, 148: 106764
- [38] Yang R S, Chen C, Yue Z W, et al. Dynamic photoelastic investigation of interaction of normal incidence blasting stress waves with running cracks. *J China Coal Soc*, 2018, 43(1): 87
(杨仁树, 陈程, 岳中文, 等. 正入射爆炸应力波与运动裂纹作用的动态光弹性实验研究. 煤炭学报, 2018, 43(1): 87)
- [39] Ding C X, Yang R S, Feng C. Stress wave superposition effect and crack initiation mechanism between two adjacent boreholes. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2021, 138: 104622
- [40] Yang R S, Ding C X, Yang L Y, et al. Study of decoupled charge blasting based on high-speed digital image correlation method. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2019, 83: 51
- [41] You S, Yang R S, Xiao C L, et al. Study on the superposition effect of stress waves and crack propagation law between blastholes at different angles. *Opt Lasers Eng*, 2024, 178: 108193
- [42] Ding C X, Su H, Yang H T, et al. Fracture and damage of slit charge blasting in the layered rock mass. *Appl Sci*, 2024, 14(13): 5840
- [43] Ding C X, Yang R S, Chen C, et al. Experimental study of the interaction of directional crack and open joint in slit charge blasting. *Chin J Eng*, 2021, 43(7): 894
(丁晨曦, 杨仁树, 陈程, 等. 切缝药包爆破定向裂纹与张开节理相互作用的实验研究. 工程科学学报, 2021, 43(7): 894)
- [44] Yang R S, Ding C X, Li Y L, et al. Crack propagation behavior in slit charge blasting under high static stress conditions. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2019, 119: 117
- [45] Ding C X, Yang R S, Lei Z, et al. Experimental study on blasting energy distribution and utilization efficiency using water jet test. *Energies*, 2020, 13(20): 5340
- [46] Ding C X, Liang X T, Yang R S, et al. A study of crack propagation during blasting under high *in situ* stress conditions based on an improved CDEM method. *Mech Adv Mater Struct*, 2024, 31(20): 4922
- [47] Ding C X, Yang R S, Zhu X G, et al. Rock fracture mechanism of air-deck charge blasting considering the action effect of blasting gas. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2023, 142: 105420
- [48] Ding C X, Yang R S, Chen C, et al. Space-time effect of blasting stress wave and blasting gas on rock fracture based on a cavity charge structure. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2022, 160: 105238