

采矿与矿山安全

文章编号: 1004-4051(2024)10-0168-09

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241586

## 诱导下岩体裂隙扩展规律研究 存在问题及对策

何荣兴, 张智源, 张星宇, 章雅雯  
(东北大学资源与土木工程学院 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 大部分地下工程的失稳都是岩体在长期的“诱导”作用下裂隙扩展、贯通从而改变岩体本身的强度特征导致的结果, 因此, 研究岩体中裂隙的扩展演化规律, 对进一步揭示岩体工程失稳、岩石破坏现象的机理和本质具有重要意义。本文从物理实验、数值模拟和力学理论三个方面介绍了目前对于裂隙岩体扩展的研究现状, 并结合地下工程的演化过程和工程需求分析了目前裂隙扩展研究中存在的问题, 提出了更适应工程问题需求的研究思路: 以相似材料、3D 打印和声发射技术为手段, 首先通过小试样压缩实验确定适用于声发射技术监测的相似材料成分及配比范围, 然后采用 3D 打印的方法制作成交叉裂隙的拉、剪实验试件并开展拉、剪蠕变试验, 研究裂隙扩展致裂规律, 裂隙岩体拉、剪蠕变声发射特征及破坏的前兆特征, 分析岩体强度随蠕变时间的变化规律, 在此基础上建立裂隙岩体的大型相似材料模型, 研究开挖诱导下随裂隙参数、时间等因素的预测模型和岩体冒落触发时间与裂隙参数、开挖空间的关系模型, 揭示裂隙岩体冒落演化机制, 预测岩体冒落时间和范围, 为地下工程长期稳定性和岩体冒落调控提供理论支撑。

**关键词:** 裂隙岩体; 裂隙扩展; 演化规律; 3D 打印; 声发射

**中图分类号:** TD325 **文献标识码:** A

### Problems and countermeasures in the study of fracture propagation laws of rock mass under induction

HE Rongxing, ZHANG Zhiyuan, ZHANG Xingyu, ZHANG Yawen  
(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The instability observed in most underground engineering projects is typically attributed to the expansion and penetration of fractures in the rock mass due to long-term “induction” effects, which alter the inherent strength characteristics of the rock mass. Consequently, the study of the spatiotemporal evolution patterns of fractures in rock masses is deemed crucial for elucidating the mechanisms and essence of rock instability and failure phenomena. In this paper, the current research status on the expansion of fractures in rock masses is introduced from three aspects: physical experiments, numerical simulations, and mechanical theory. Moreover, the issues present in current fracture propagation research are analyzed in conjunction with the evolution process of underground engineering and its requirements. To address these issues and better align with engineering requirements, a novel research

收稿日期: 2024-08-16 责任编辑: 刘硕

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(编号: 5227040703)

第一作者简介: 何荣兴(1981—), 男, 河北唐山人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事散体移动规律及力学特性、地下开采工艺和岩体冒落规律研究, E-mail: herongxing@mail.neu.edu.cn。

引用格式: 何荣兴, 张智源, 张星宇, 等. 诱导下岩体裂隙扩展规律研究存在问题及对策[J]. 中国矿业, 2024, 33(10): 168-176.

HE Rongxing, ZHANG Zhiyuan, ZHANG Xingyu, et al. Problems and countermeasures in the study of fracture propagation laws of rock mass under induction[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(10): 168-176.

approach has been proposed: methods involving similar materials, 3D printing, and acoustic emission are proposed. The composition and mixing ratio range of similar materials suitable for acoustic emission monitoring are determined through compression experiments on small samples, and then 3D printing techniques are employed to fabricate specimens with intersecting fractures for tensile and shear tests. Creep experiments are conducted to investigate the propagation patterns of fractures and their associated failure precursors through acoustic emission. Additionally, the changes in rock mass strength over time due to creep are analyzed. On this basis, a large-scale similar material model of fractured rock masses is established to investigate predictive models for excavation-induced changes in fracture parameters over time. Furthermore, the relationship between the initiation time of rock mass collapse, fracture parameters, and excavation space is explored. The evolution mechanism of fractured rock mass collapse is aimed to be revealed, along with the prediction of the timing and extent of collapse. The theoretical support provided by these findings is intended to contribute to the long-term stability and collapse control of underground engineering projects.

**Keywords:** fractured rock mass; fracture propagation; evolution law; 3D printing; acoustic emission

## 0 引言

地下采矿是对矿产资源、周边岩体不断开挖的过程,大规模开采产生了大量地下巷道、硐室和采空区等地下工程,地下工程覆岩在长期“诱导”作用下,由最初的稳定状态出现围岩变形、开裂最终诱发地面沉陷、空区覆岩失稳坍塌、冲击地压、冲击波等灾害,采空区已成为影响我国矿山安全生产的主要危险源之一,表 1 统计了国内外部分矿山采空区突发冒落灾害事故情况。岩体工程变形、失稳具有明显的滞后性、突发性特征。主要原因在于,岩体工程开挖尺寸都是按照岩体静态的强度参数进行设计的,

具有稳定性,然而天然岩体是岩石和各种不同尺寸不连续弱面、裂隙、构造的结合体,裂隙在开挖空间的“诱导”作用下,裂隙两端会萌发新的裂纹,进而发生扩展、贯通破坏,岩体中裂隙的存在改变了岩体的受力状态和强度特征,在外界扰动作用下最终引发地下工程的突发性失稳破坏并引发灾变。因此,研究岩体裂隙扩展的时空演化规律,对进一步揭示岩石和地下岩体工程破坏现象的机理和本质,推动岩石力学学科的发展具有重要意义,也为地下岩体工程长期工程稳定性维护和参数设计、灾害预测提供理论支撑。

表 1 国内外矿山采空区重大灾害事故

Table 1 Major disasters and accidents in goafs at home and abroad

事故地点	矿山类型	事故描述	日期	死亡人数/人
中国河北邢台	石膏矿	采空区发生严重坍塌	2005-11-06	33
中国广西合浦	石膏矿	顶板大面积垮落	2001-05-18	29
中国广西大厂	锡矿	陷落坑直径约 70 m, 坑深约 30 m	1993-03-19	13
中国山东青州	铁矿	地表突然塌陷, 坑内陷入 8 户居民	1987-10-07	11
中国福建永定	铁矿	空区发生塌陷, 采区人员被掩埋	2011-06-24	13(死伤)
赞比亚	铜矿	空区陷落后 68 万 m <sup>3</sup> 尾矿涌入坑内	1970-11-25	89
哥伦比亚	金矿	滑坡导致矿山塌陷	2001-11-23	70
菲律宾	金矿	爆破引起巷道崩塌	2005-10-27	50
哥伦比亚	金矿	滑坡导致矿山塌陷	2007-10-13	24
几内亚	金矿	废弃矿井崩塌	2008-11-12	14

## 1 裂隙扩展规律研究现状

目前,针对裂隙岩石的科学研究主要采用以下三类方法。①室内试验研究:将裂隙岩石或相似材料制作成标准试件,通过不同的路径加载,采集试验过程中的应力、应变、声发射等试验数据,并且根据试样破裂形式和裂隙位置总结相关的规律;②数值模拟研究:利用数值软件模拟裂隙岩体工程、试件,

结合室内实验结果反演参数,模拟岩体工程失稳破坏规律;③力学理论研究:主要通过建立相关的本构模型和强度破坏准则来判断裂纹的扩展方向和形式。基于上述研究手段,裂隙岩体扩展的研究取得了较多成果。

### 1.1 室内试验研究

裂隙岩体的室内试验是认识岩体裂隙的重要手

段,通过室内试验可以量化岩体的各种力学性质,如单轴抗压强度、抗拉强度、剪切强度、弹性模量、泊松比等,这些力学性质对于评估岩体的稳定性具有重要的意义,室内试验是促进科学研究发展的重要手段,通过对比不同条件下的实验结果,可以深入地研究裂隙岩体的形成机制、演化规律和破裂机理,为数值模拟和理论分析提供数据支持,从而推动相关领域的研究进展。徐东晶<sup>[1]</sup>对采动条件下的拱形裂隙类岩体破坏机理及其模型进行了研究,发现裂隙的演化是每次采动时,在覆岩的不同层位形成拱形次生裂隙,在诱导力的作用下汇合并继续延伸,形成最终的拱形裂隙形态。李硕等<sup>[2]</sup>对含有裂纹的类岩石试件进行单轴压缩试验,研究次裂纹角度、长度和岩桥尺寸对多裂纹岩体的破坏机制和裂纹扩展特征的影响规律。徐军<sup>[3]</sup>采用石膏模拟岩石进行现场实验,对非穿透裂纹诱导的岩石破裂过程进行研究,得出了岩石的失效判据,将剥落现象看作是试样进入破坏失效阶段的标志。裴志茹<sup>[4]</sup>利用 CT 扫描识别获取岩石内部结构,基于 3D 打印技术制得裂隙岩体试样并开展力学特性进行研究,发现随着预制裂隙倾角的增大,试样的抗压强度表现为先减小后增大的趋势(图 1)。郭树海<sup>[5]</sup>采用相似材料进行室内模拟实验,通过对位移和声发射的监测研究岩体在锚固作用下的裂隙演化和力学机制,结果表明锚固裂隙试样的抗压强度显著增强且较非锚固岩体试样的残余强度有较强的声发射信号。曹澈<sup>[6]</sup>利用制备的岩石相似材料研究不同的倾角和不同的数量的裂隙岩体的强度特性和损伤变量。王志国<sup>[7]</sup>利用相似材料模拟上覆岩层采动岩体裂隙扩展分布情况,并采用分形维数描述采动裂隙在空间的分布特征,模拟结果表明:随着开采宽度的增加,上覆岩层采动岩体裂隙的分形维数在总体上呈现增大的趋势。滑笑笑<sup>[8]</sup>基于 3D 打印技术制备了三种不同材料的岩石试样,并研究了它们在单轴压缩条件下的力学特性和破坏形式(图 2)。金爱兵等和王本鑫等<sup>[9-16]</sup>通过 3D 打印技术制得不同形式的节理模型,结合室内试验探究了不同形式的节理模型裂隙岩体的破坏规律和机理(图 3)。李春廷<sup>[17]</sup>通过在岩石内预制不同倾角的裂隙研究了不同种类岩石在不同荷载作用下的应力-应变曲线、强度和应变特征,以及裂纹的起裂、扩展和破坏模式,并通过数值模拟研究对比了不同岩石的裂隙扩展过程。邓帅等<sup>[18]</sup>使用侧向加压设备对岩石试件施压模拟原岩应力,探究了原岩应力对裂纹的动态断裂行为的影响规律。方林东<sup>[19]</sup>对断续裂隙试件开展单轴压缩瞬时实验和单轴压缩蠕变实验,研

究裂隙倾角和锚固角度对于试件力学特性的影响,结果表明:加锚可以明显提高试件的强度且加锚试件表现出更好的延性,基于单轴压缩蠕变实验的结果,在较低的加载应力水平下蠕变应变量小于瞬时应变,在较高的加载应力水平时则相反。裂隙岩体在开挖后,受到外荷载发生变化,而在地下工程中,岩体的变形、破坏、冒落,甚至最后发生灾变,都是开挖后形成空区的覆岩或者位于临空部位的岩体发生破坏演化而成的,裂纹扩展的时效变形特性关系着地下矿山、隧道的长期完整性和稳定性,对地下工程长期利用和设计有重要意义。在现有的研究中,许多学者进行了不同加载路径下的蠕变实验,王鑫<sup>[20]</sup>对深部岩体预制不同角度的双裂隙,分析其在蠕变作用下的力学特性,发现在恒轴压和逐级卸围压的卸荷应力路径下,岩样的蠕变变形能力会逐渐增强且径向的变形能力较轴向的变形能力增加程度更大,裂隙在受到一定程度的挤压会使岩样的蠕变量减小,此外还建立了蠕变损伤本构模型并进行参数反演验证了该本构模型的合理性。赵娜等<sup>[21]</sup>、邓广哲等<sup>[22]</sup>对蠕变作用下的岩体裂隙的扩展和长期强度进行研究,结果表明:含单裂隙的岩体的蠕变变形和蠕变速率,以及破裂程度会随着裂隙长度的增加而增加,随着裂隙倾角的增加出现先增加而后减小的情况。

## 1.2 数值模拟研究

随着计算机科学的不断发展,数值模拟方法被



图 1 天然砂岩试样及 3D 打印试样巴西劈裂破裂  
Fig. 1 Brazilian test of natural sandstone samples and 3D printed samples

(资料来源:文献[4])

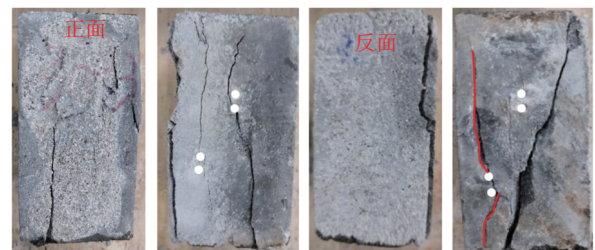


图 2 不同空间裂隙倾角试样破坏模式  
Fig. 2 Failure modes of specimens with different space and dip angles

(资料来源:文献[8])

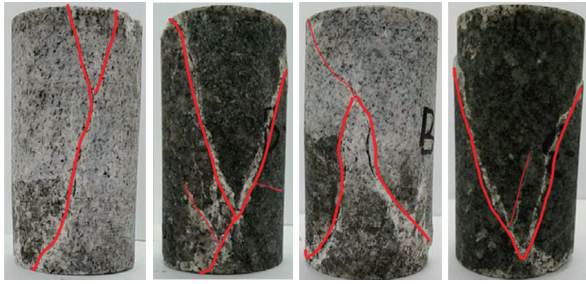


图 3 三轴压缩破裂形式

Fig. 3 Rupture types of triaxial compression tests

(资料来源: 文献 [15])

广泛应用于解决各种复杂的岩石力学问题。在实际的工程中, 节理、裂隙等软弱面的存在严重影响岩体的各项力学参数, 并使岩体呈各向异性, 因此, 结合数值模拟对裂隙岩体的力学性质进行研究是十分重要的。

FLAC、PFC、UDEC、3DEC 等计算软件已经被普遍应用于工程设计来研究各种岩体力学问题。喻志发等<sup>[23]</sup>针对传统的断裂准则难以模拟混合型多裂纹扩展问题, 在已有数值流形法程序基础上, 对已有的裂纹扩展准则进行改进使数值流形法能够适应于多种类型裂纹扩展模拟, 然后采用 C 语言开发相应的计算程序计算了半圆盘拉伸试验和四点双边剪切试验, 数值模拟的裂隙扩展路径与实验结果一致。周洋等<sup>[24]</sup>采用离散元颗粒流软件模拟了在三轴加卸载作用下含不同预制倾角的双裂隙岩石试件的裂纹的扩展与破坏特征(图 4)。郑安兴<sup>[25]</sup>应用最大周向应力理论得到压剪复合裂纹的断裂角, 基于此, 结合修正的 Griffith 强度理论建立了岩石压剪断裂判据, 将扩展有限元法应用在裂隙岩体的扩展模拟中并取得了较好的计算结果。宋文超<sup>[26]</sup>利用 PFC<sup>2D</sup> 软件模拟了单轴及三轴压缩试验, 结合应力-应变曲线研究了隧道围岩裂隙岩体的力学特性并获取了相关力学参数, 从微观和宏观方面分析了裂隙岩体的损伤演化破裂机理(图 5)。章统<sup>[27]</sup>利用 PFC 颗粒流方法结合岩石相似材料物理实验的方法研究了动载荷、静载荷下含预制断续裂隙岩体的破坏问题(图 6)。丁秀丽<sup>[28]</sup>针对岩体工程的时效变形行为, 基于蠕变实验结果探讨了岩体流变本构模型与参数辨识的方法。候召松<sup>[29]</sup>通过两组不同倾角节理化顶板冒落过程的数值模型, 计算了不同工况下节理化顶板的临界冒落跨度和冒落高度。杨文东等<sup>[30]</sup>、蓝航等<sup>[31]</sup>、何利军等<sup>[32]</sup>基于 FLAC<sup>3D</sup> 软件的二次开发对本构模型进行改进, 得出了更适用于裂隙岩体的损伤模型和强度理论。王琪<sup>[33]</sup>提出了张拉裂纹扩展和剪切裂纹扩展的

综合断裂判据, 并利用 ANSYS 有限元软件进行 APDL 二次开发, 模拟了闭合裂纹在受压状态下起裂、扩展和贯通, 发现在较高的压缩应力作用下, 随着摩擦系数的增大, 张拉型裂纹的起裂角会相应地减小, 摩擦系数越大, 张拉型裂纹的起裂和扩展越难, 试样的破坏由剪切裂纹主导。谢天铨<sup>[34]</sup>利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件模拟研究裂隙形状为弧形裂隙、弯折裂隙及不等长裂隙对岩体力学特性的影响。

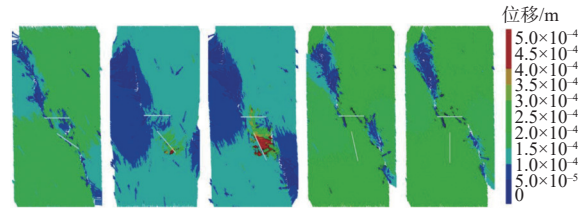


图 4 围压为 10 MPa 时的位移情况

Fig. 4 Displacement under confining pressure of 10 MPa

(资料来源: 文献 [24])

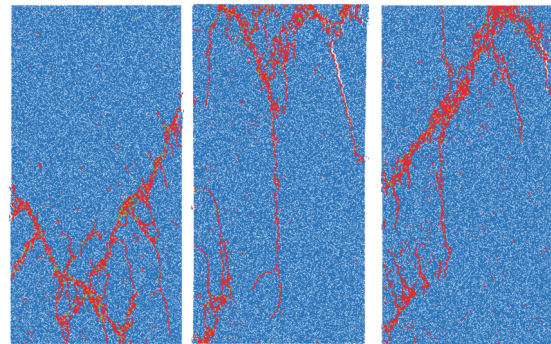


图 5 PFC<sup>2D</sup> 模拟不同风化程度花岗岩破坏模式

Fig. 5 Failure modes of granite with different weathering degrees simulated by PFC<sup>2D</sup>

(资料来源: 文献 [26])

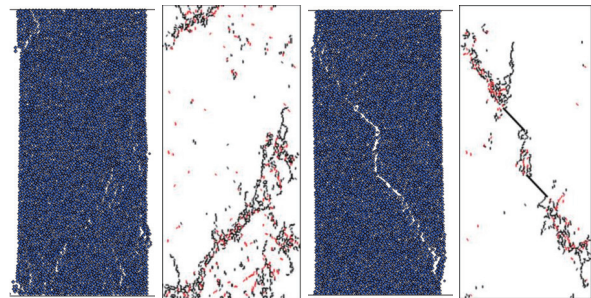


图 6 PFC 模拟有无裂隙试样破坏模式

Fig. 6 Failure modes of specimens with or without cracks simulated by PFC

(资料来源: 文献 [27])

### 1.3 力学理论研究

裂隙岩体是一种广泛存在的地质结构, 其力学性质与完整的岩体相比具有显著的差异。裂隙岩体

的力学理论研究能够为实际工程提供理论支持和实践指导。在工程实践中,岩体的裂隙分布、发育程度和扩展规律等因素对工程的安全性和稳定性具有重要的影响。通过理论研究,可以深入地了解裂隙岩体的应力分布、变形特性、强度准则等方面的规律,从而为工程设计和施工提供科学的依据。裂隙岩体的力学理论是岩石力学领域的重要研究方向之一。通过深入研究裂隙岩体的力学特性,可以不断丰富和完善岩石力学的理论体系,推动学科的发展和革新。

学者针对不同的情况构建不同的岩体本构模型,李茂桐<sup>[35]</sup>将考虑塑性变形的 Lade 准则引入到 Burgers 模型中,同时,引入含有损伤变量  $D$  的黏性元件和开关元件  $\sigma_s$ , 构建可以描述裂隙岩石瞬时弹性应变、黏弹性应变、黏性应变和非线性黏塑性应变的损伤蠕变模型(NVPDM),力学模型如图 7 和图 8 所示,在采用不同产状裂隙岩石三轴卸荷蠕变试验数据对非线性损伤蠕变模型的适用性进行验证后,发现 NVPDM 模型优于改进的 Burgers 模型和改进的西原模型,所建立的 NVPDM 模型更加适合描述裂隙岩体卸荷状态下的蠕变变形特征。邓正定等<sup>[36]</sup>将裂隙岩体动态破坏过程视为具有复合损伤、静态弹性特性、动态黏滞特性的非均质点组成。对黏弹性响应的 Maxwell 体进行改进,根据应变等价原理将细观损伤体  $D_1$  与裂隙宏观损伤体  $D_2$  并联,组成宏观复合损伤体  $D_{12}$ ,再并联 Maxwell 体构造一个非贯通裂隙岩体动态损伤模型,如图 9 所示。为了验证模型的合理性,采用相似材料制备岩石试样进行单轴压缩试验,将岩石力学参数代入本构模型得到应力应变曲线,曲线较好地反映了岩石变形的全过程,计算结果与实验结

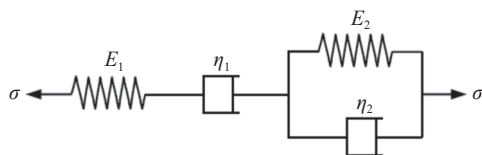


图 7 Burgers 蠕变模型

Fig. 7 Burgers creep model

(资料来源:文献 [35])

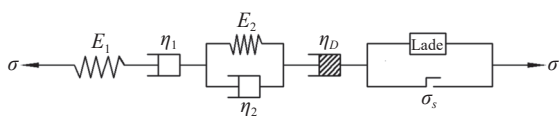


图 8 裂隙岩体非线性损伤蠕变模型

Fig. 8 Nonlinear damage creep model of fractured rock mass

(资料来源:文献 [35])

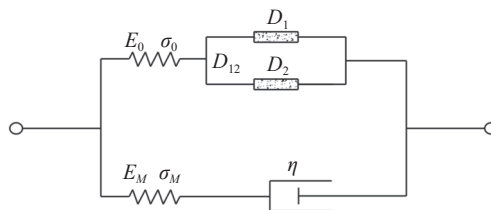


图 9 黏弹性复合损伤动态模型

Fig. 9 Dynamic model of viscoelastic composite damage

(资料来源:文献 [36])

果的吻合程度较好。谢璨<sup>[37]</sup>从裂隙岩体的断裂机理,以及裂隙岩体的本构模型出发,探究了裂尖应力强度因子的计算方法。夏超<sup>[38]</sup>从微观角度和宏观角度对岩体损伤进行了度量,建立了任意多裂隙岩体的损伤模型。苏致立<sup>[39]</sup>从宏细观角度研究了不同损伤煤体三轴和真三轴裂隙演化规律,以及破裂机制,建立了不同损伤煤体真三轴应力应变本构模型。

目前,裂隙岩体损伤力学的研究多侧重于岩体损伤力学模型的研究,通过推导节理裂隙岩体的本构关系和损伤演化方程估算岩体强度,评价该种岩体的稳定性和变形行为,为岩体工程的稳定性提供理论依据。

## 2 裂隙岩体研究中存在的问题

许多地下岩体工程是经过长时间诱导作用下才发生失稳破坏,该过程不仅是一个岩体流变的过程,也是岩体中裂隙扩展、贯通的过程。此外,自然崩落法的主要机理是通过空间的扩展,诱导岩体中裂隙扩展、贯通,最终达到一定的块度发生冒落(图 10),因此,需要研究裂隙在岩体中随着时间和空间的演化过程和致冒机理,从而解决预测地下工程岩体长期稳定性和冒落的调控问题。从这些工程需求和裂

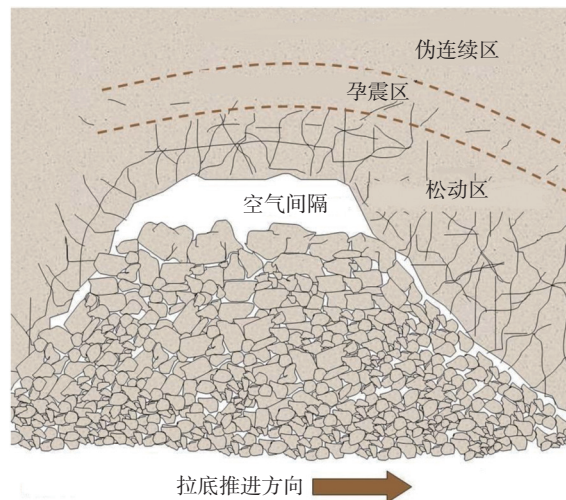


图 10 自然崩落法机理

Fig. 10 Mechanism of natural caving method

(资料来源:文献 [40])

隙岩体的研究现状可知岩体裂隙扩展规律的研究存在如下问题。

1) 在现有的研究中, 裂隙的几何要素和空间分布等参数对裂隙的扩展和演化, 以及对岩体最终的破坏形态和损伤范围的影响缺乏定量研究。

2) 裂隙岩体在开挖后, 受到外荷载发生变化, 而在地下工程中, 岩体的变形、破坏、冒落, 甚至最后发生灾变, 都是开挖后形成空区的覆岩或者位于临空部位的岩体发生破坏演化而成的, 该区域的岩体多是处在“诱导”作用派生的拉、剪应力区, 但目前裂隙岩体蠕变试验的加载路径大都为多为单轴、三轴压缩条件而对不同产状裂隙岩体的拉、剪作用下的蠕变力学特性研究较少。

3) 目前的研究工作和研究成果, 多局限于小尺度的试件, 模拟地下工程应力边界的大尺度模型, 基于大尺度模型临空面“诱导”作用下的裂隙扩展蠕变规律, 以及裂隙扩展后对后续冒落范围和冒落块度的影响分析较少。

4) 目前的研究对于原生裂隙的表征主要采用在试件上切缝或是以 PLA 为材料的 3D 打印预制方法 (图 11), 相关研究表明, 打印材料与天然岩石试件的力学性能相差较大, 也导致最终的裂隙扩展破裂模式和实际岩体中的扩展规律的失真, 如何制作并模拟天然状态下岩体中的裂隙是亟待解决的关键问题。

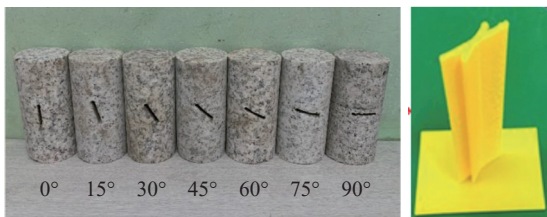


图 11 裂隙表征方法

Fig. 11 Methods of fracture characterization

5) 在裂隙扩展的识别方法中, CT 扫描和离散元的重构模拟主要针对小试件, 对于较大规模的试验或者原岩体中裂隙的空间扩展识别主要采用声发射技术, 如何将声发射采集参数与裂隙扩展空间精准定位建立联系, 目前研究还不够深入, 也是岩体裂隙扩展研究中亟需解决的另一个关键问题。

### 3 研究对策和思路

室内实验方法和数值模拟方法是研究岩体裂隙扩展规律的最主要方法, 如果能够还原地下开采后, 顶板覆岩的诱导作用的边界条件, 常规的基于小试件的压缩试验难以达到研究目的, 如果以矿山中原

岩体作为直接研究对象, 其内部裂隙赋存的复杂性又很难获得规律性。因此, 选择稍大尺寸的相似材料试验结合 3D 打印技术的方法开展研究是较为理想的研究方法。在以往研究中, 通常采用切缝、以聚乙烯等材料的 3D 打印预制裂隙, 而忽略了裂隙本身的强度, 以及新生裂隙贯穿原生裂隙的可能, 所以, 首先要解决裂隙材料的选择和相似性问题; 其次, 以往的研究表明, 声发射可以通过采集岩体中微裂隙衍生过程中释放的能量, 从而进行裂隙的定位和识别。然而, 既能确保相似材料在有限开挖空间的诱导作用下产生裂隙扩展、变形冒落, 又能够释放足够的能量被声发射传感器采集到, 实现变形破坏进程中的新生裂隙萌生、扩展定位, 是本次研究需要解决的关键问题。

综上所述, 结合目前研究中存在的问题, 以及工程中所需要解决的关键科学问题, 从以下几方面入手, 以寻求解决关键问题的方案, 主要技术思路如图 12 所示。

1) 开展相似材料配比和声发射试验, 研究不同配比条件下相似材料的破裂特征和声发射能量、波速的分布特征, 综合分析不同配比参数对破坏模式差异性的影响规律, 确定合理相似材料配比范围, 并选择合理的声发射探头。根据合作矿山的岩体及节理面强度参数和相似比, 分别确定用来模拟岩体和节理裂隙的相似材料配比。

2) 采用 3D 打印的方法制作成交叉裂隙的拉、剪实验试件并开展拉、剪蠕变试验, 研究裂隙扩展致裂规律, 裂隙岩体拉、剪蠕变声发射特征及破坏的前兆特征, 分析岩体强度随蠕变时间的变化规律, 建立强度随裂隙参数、时间等因素的预测模型。

3) 利用 3D 打印技术建立相似材料裂隙岩体的预制模型, 在相似材料试验台开展诱导作用下岩体裂隙扩展时空演化试验, 研究不同开挖空间条件下的岩体内部裂隙扩展演化特征和裂隙岩体冒落触发时间, 建立岩体冒落触发时间与裂隙参数和开挖空间的关系模型, 研究不同工况条件下的裂隙扩展时空演化规律和声发射特征, 分析这些参数对裂隙扩展程度、扩展速度、冒落触发时间的影响规律和敏感性程度。

4) 基于不同开挖空间条件下的裂隙扩展范围, 裂隙扩展贯通程度, 以及岩体实际冒落的时间、范围等参数, 分析岩体致冒条件和冒落演化机制, 建立岩体冒落的预测模型, 为自然崩塌法及大跨度条件下的地下工程参数设计提供理论依据。为地下工程的

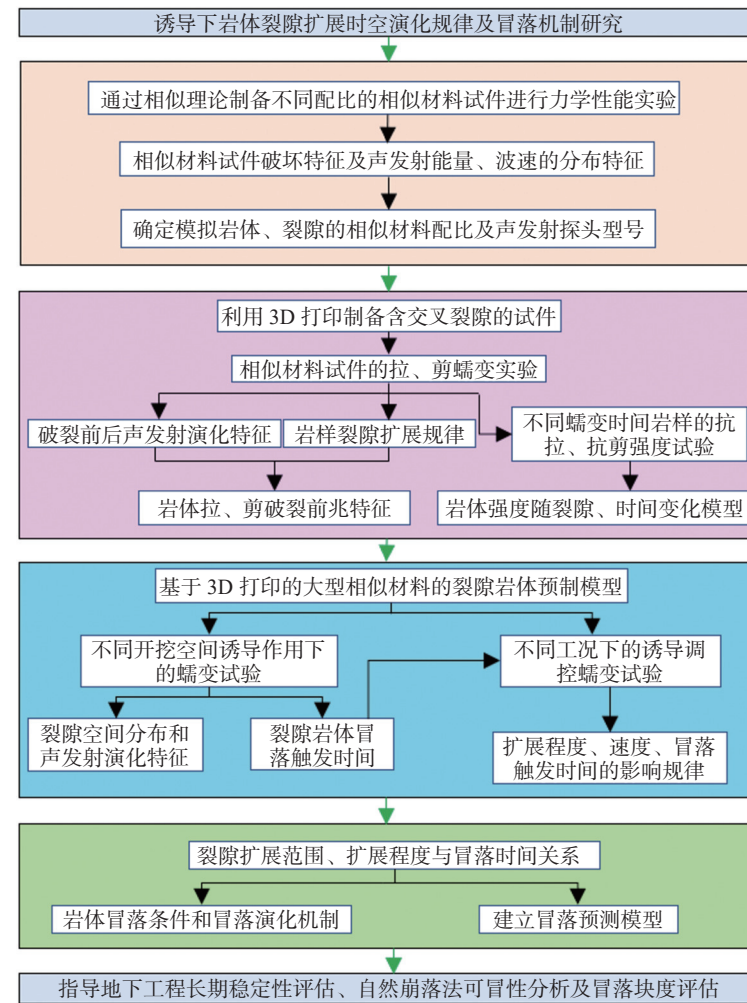


图 12 研究技术思路

Fig. 12 Research technical ideas

长期稳定性评估设计和自然崩落法冒落块度预测提供理论依据。

#### 4 结 语

岩体中的裂隙在工程开挖后的诱导作用下, 扩展、贯通最终导致岩体工程失稳破坏, 裂隙的扩展演化在很大程度上控制着岩体破坏形态和特征。目前, 对裂隙扩展的研究主要以岩石试样为对象, 通过切缝、3D 打印预制的方法模拟裂隙, 开展压缩实验研究裂隙扩展规律, 再利用数值模拟反演, 模拟一些工程问题。针对目前研究中存在的问题, 以及工程需求, 提出了解决工程需求关键科学问题的研究思路: 拟采用相似材料、3D 打印和声发射技术为手段, 确定适用于声发射技术监测的相似材料成分及配比范围, 建立强度随裂隙参数、时间等因素的预测模型和岩体冒落触发时间与裂隙参数、开挖空间的关系模型, 揭示裂隙岩体冒落演化机制, 预测岩体冒落时间和范围, 为地下工程长期稳定性和岩体冒落调控提供理论支撑。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 徐东晶. 采动条件下拱形裂隙类岩体破坏机理及模型研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
- [ 2 ] 李硕, 宁宝宽, 于群. 次裂纹几何分布对裂纹岩体破坏机制影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 87-96.  
LI Shuo, NING Baokuan, YU Qun. Study on the influence of crack geometry distribution on the failure mechanism of crack rock mass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 87-96.
- [ 3 ] 徐军. 非穿透裂纹诱导的岩石破裂过程及失效判据研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [ 4 ] 裴志茹. 基于 CT 扫描及 3D 打印技术裂隙岩体试样力学特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [ 5 ] 郭树海. 锚固岩体裂隙演化和力学机制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [ 6 ] 曹澈. 多条平行裂隙类岩体强度特性试验及损伤变量计算方法研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.
- [ 7 ] 王志国. 深部开采上覆岩层中采动裂隙网络演化规律研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2011.
- [ 8 ] 滑笑笑. 岩石三维内置裂隙扩展机制的物理试验与数值模拟

- 研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [ 9 ] 金爱兵, 王树亮, 王本鑫, 等. 基于 DIC 技术的 3D 打印节理试件破裂机制研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3214-3224.  
JIN Aibing, WANG Shuliang, WANG Benxin, et al. Study on the fracture mechanism of 3D-printed-joint specimens based on DIC technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3214-3224.
- [ 10 ] 王本鑫, 金爱兵, 王树亮, 等. 3D 打印交叉节理试件力学破裂特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 39-49, 58.  
WANG Benxin, JIN Aibing, WANG Shuliang, et al. Mechanical characteristics and fracture mechanism of 3D printed rock samples with cross joints[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(1): 39-49, 58.
- [ 11 ] 金爱兵, 孙浩, 孟新秋, 等. 非贯通节理岩体等效强度及破坏特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(9): 3169-3176.  
JIN Aibing, SUN Hao, MENG Xinqiu, et al. Equivalent strength and failure behavior of intermittent jointed rock mass[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(9): 3169-3176.
- [ 12 ] 金爱兵, 王树亮, 王本鑫, 等. 基于 DIC 的 3D 打印交叉节理试件破裂机制研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3862-3872.  
JIN Aibing, WANG Shuliang, WANG Benxin, et al. Fracture mechanism of specimens with 3D printing cross joint based on DIC technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 3862-3872.
- [ 13 ] 王本鑫, 金爱兵, 孙浩, 等. 基于 DIC 的含不同角度 3D 打印粗糙交叉节理试样破裂机制研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 439-450, 461.  
WANG Benxin, JIN Aibing, SUN Hao, et al. Study on fracture mechanism of specimens with 3D printed rough cross joints at different angles based on DIC[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 439-450, 461.
- [ 14 ] 金爱兵, 刘刚, 杨振伟. 基于颗粒流程序的仿真节理岩体模型及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(3): 540-546.  
JIN Aibing, LIU Gang, YANG Zhenwei. Numerical model for jointed rock mass in particle flow code and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(3): 540-546.
- [ 15 ] 金爱兵, 刘佳伟, 赵怡晴, 等. 卸荷条件下花岗岩力学特性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 459-467.  
JIN Aibing, LIU Jiawei, ZHAO Yiqing, et al. Mechanical characteristics analysis of granite under unloading conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(S1): 459-467.
- [ 16 ] 王本鑫, 金爱兵, 赵怡晴, 等. 卸围压条件下花岗岩强度特性及三维裂隙演化规律[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(11): 137-146.  
WANG Benxin, JIN Aibing, ZHAO Yiqing, et al. Strength characteristics and 3D fracture evolution law of granite under unloading confining pressure[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(11): 137-146.
- [ 17 ] 李春廷. 不同种类岩石的裂隙扩展差异试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [ 18 ] 邓帅, 朱哲明, 王磊, 等. 原岩应力对裂纹动态断裂行为的影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 1989-1999.  
DENG Shuai, ZHU Zheming, WANG Lei, et al. Study on the influence of in-situ stresses on dynamic fracture behaviors of cracks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(10): 1989-1999.
- [ 19 ] 方林东. 加锚对断续裂隙岩体蠕变特性的影响研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- [ 20 ] 王鑫. 深部裂隙岩体卸荷蠕变试验研究及其工程应用[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [ 21 ] 赵娜, 孟利新, 张怡斌. 含单裂隙岩体蠕变破裂裂纹扩展演化规律研究[J]. *应用力学学报*, 2023, 40(5): 1106-1116.  
ZHAO Na, MENG Lixin, ZHANG Yibin. Study on the meso-crack propagation and evolution law of creep fracture in rock mass with single fissure[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2023, 40(5): 1106-1116.
- [ 22 ] 邓广哲, 朱维申. 蠕变裂隙扩展与岩石长时强度效应实验研究[J]. *实验力学*, 2002(2): 177-183.  
DENG Guangzhe, ZHU Weishen. An experiment research on the crack propagation in rock mass[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002(2): 177-183.
- [ 23 ] 喻志发, 于长一, 刘丰, 等. 数值流形法在裂纹扩展中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(4): 751-757.  
YU Zhifa, YU Changyi, LIU Feng, et al. Application of numerical manifold method in crack propagation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(4): 751-757.
- [ 24 ] 周详, 李江腾. 循环加卸载条件下脆性岩体裂纹演化规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(3): 724-731.  
ZHOU Xiang, LI Jiangteng. Crack propagation law of brittle rock mass under cyclic loading and unloading[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(3): 724-731.
- [ 25 ] 郑安兴. 扩展有限元法及其在岩体裂隙扩展模拟中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [ 26 ] 宋文超. 裂隙岩体力学特性及损伤演化颗粒流模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [ 27 ] 章统. 岩石断续裂隙扩展行为及煤层覆岩渐序破坏模式研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [ 28 ] 丁秀丽. 岩体流变特性的试验研究及模型参数辨识[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2005.
- [ 29 ] 候召松. 不同埋深下节理化岩体顶板冒落规律的数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [ 30 ] 杨文东, 张强勇, 张建国, 等. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的改进 Burgers 蠕变损伤模型的二次开发研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(6): 1956-1964.  
YANG Wendong, ZHANG Qiangyong, ZHANG Jianguo, et al. Second development of improved Burgers creep damage constitutive model of rock based on FLAC<sup>3D</sup>[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(6): 1956-1964.
- [ 31 ] 蓝航, 姚建国, 张华兴, 等. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的节理岩体采动损伤本构模型的开发及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 572-579.  
LAN Hang, YAO Jianguo, ZHANG Huaxing, et al. Development and application of constitutive model of jointed rock mass damage due to mining based on FLAC<sup>3D</sup>[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and*

- Engineering*, 2008, 27(3): 572-579.
- [ 32 ] 何利军, 吴文军, 孔令伟. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 含 SMP 强度准则黏弹塑性模型的二次开发[J]. *岩土力学*, 2012, 33(5): 1549-1556.  
HE Lijun, WU Wenjun, KONG Lingwei. Secondary development of viscoelasto-plastic model with SMP strength criterion in FLAC<sup>3D</sup>[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(5): 1549-1556.
- [ 33 ] 王琪. 岩石闭合裂纹扩展机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [ 34 ] 谢天铎. 压缩荷载下复杂岩体裂隙起裂及扩展机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [ 35 ] 李茂桐. 不同产状裂隙岩体卸荷蠕变本构模型及破坏前兆研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [ 36 ] 邓正定, 向帅, 周尖荣, 等. 非贯通裂隙岩体损伤演化率相关性及变形特征[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 118-129.  
DENG Zhengding, XIANG Shuai, ZHOU Jianrong, et al. Rate correlation and deformation of damage evolution of non-penetrating fractured rock masses[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 118-129.
- [ 37 ] 谢臻. 裂隙岩体宏—细观损伤破坏特性及数值方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [ 38 ] 夏超. 任意多裂隙岩体损伤模型研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [ 39 ] 苏致立. 损伤煤岩破裂机理及裂隙演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [ 40 ] BROWN E T. Block caving geomechanics[M]. Brisbane: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2007: 15-16.