

深部岩体结构面动力特性与致灾效应研究进展*

单仁亮¹, 柏皓博¹, 孙鹏¹, 李泳臻¹, 吴浩田¹, 肖圣超¹, 窦浩宇¹

(1.中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 随着全球资源需求的持续上升, 深部地下工程的开发规模不断扩大, 面临日益复杂的地质条件和高地应力环境。这种转变使得深部含结构面岩体的动力特性研究成为近年来的研究热点与难点问题。因此, 对结构面的动剪切和动拉压特性进行了系统性总结, 并深入分析了多种因素对结构面动力行为的影响。此外, 探讨了结构面效应对岩体动力特性的影响, 特别是对岩体动强度和动变形的作用。针对常见的深部动力灾害, 如岩爆、大变形和冲击地压, 梳理了其触发机制与防治技术, 强调了建立有效理论和技术体系的重要性。最后, 对未来深部岩体结构面动力特性及动力灾害防控技术的研究方向进行了前瞻性展望, 呼吁结合新兴技术与理论方法, 以提升研究的深度与广度, 从而推动工程实践中的安全性和有效性。

关键词: 深地工程; 结构面; 动力特性; 致灾效应; 防控技术

中图分类号: 国标学科代码: 文献标识码: A

Research progress on the dynamic characteristics of structural planes in deep rock mass and associated disaster-inducing effects

SHAN Renliang¹, BAI Haobo¹, SUN Peng¹, LI Yongzhen¹, WU Haotian¹, XIAO Shengchao¹, DOU Haoyu¹

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

Abstract: As the global demand for resources continues to rise, the scale of deep underground engineering development expands, facing increasingly complex geological conditions and high-stress environments. This shift has made the study of the dynamic characteristics of deep rock masses with structural planes a hot and challenging research topic in recent years. A systematic summary of the dynamic shear and tensile characteristics of structural planes was conducted, along with an in-depth analysis of the impact of various factors on their dynamic behavior. Additionally, the effect of structural plane effects on the dynamic properties of rock masses was explored, particularly regarding dynamic strength and deformation. Common deep dynamic disasters, such as rock bursts, large deformations, and dynamic pressure, have had their triggering mechanisms and prevention technologies reviewed, emphasizing the importance of establishing an effective theoretical and technical system. Finally, a forward-looking perspective on future research directions for the dynamic characteristics of deep rock masses with structural planes and disaster prevention technologies is offered, calling for the integration of emerging technologies and theoretical methods to enhance the depth and breadth of research, thereby promoting safety and effectiveness in engineering practice.

Keywords: deep earth engineering; structural surface; dynamic characteristics; disaster effect; prevention and control technology

在深部资源开发的过程中, 岩体结构面的广泛分布及其复杂的动力学特性成为亟待解决的科学难题。结构面是深部岩体中的天然弱面, 其几何特征、物理力学性质以及分布规律对岩体的整体稳定性具有深远影响。在深部复杂应力环境下, 结构面动力学行为及其与周围岩体的耦合作用可能引发一系

*收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2024-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(52274148);

第一作者: 单仁亮(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: srl@cumtb.edu.cn;

通信作者: 柏皓博(1996-), 男, 博士研究生. E-mail: 915624065@qq.com.

列动力灾害,如岩爆、冲击地压等。这不仅威胁工程安全,也增加了风险控制的难度。因此,研究深部含结构面岩体的动力学特性,揭示其在动态荷载作用下的失稳机理,进而提出有效的灾害防控措施,是深部工程领域的核心科学问题^[1]。

深部岩体的力学特性和稳定性往往受岩体结构面性质影响较大,结构面会使其物理力学性能表现为各向异性,而深部岩体的结构面的力学特性会受到地应力与开采扰动的耦合作用,易出现冲击地压等巷道动力灾害^[2,3],如甘肃省金川二矿(1000-2000 m)在开采深部矿体的过程中,由于埋藏深度增加,地应力逐渐增大,导致巷道变形加剧,岩爆频发,特别是在断层和节理发育的区域,围岩强烈破坏;黑龙江双鸭山煤矿在深部开采过程中(1600 m),巷道内多次发生岩爆,导致支护系统的局部损坏和工作面的坍塌。深部岩体复杂的应力环境对煤矿安全开采提出了更高的要求。

综上,针对深部含结构面岩体的动力学特性问题,将其分为三部分进行归纳,总结了深部含结构面岩体在复杂应力环境中的动力学特性,阐述了深部含结构面岩体动力灾害的诱发机制及防治手段。

1 岩体结构面动力特性研究进展

结构面的动力特性直接影响岩体在动力荷载下的响应行为。力学响应是一个综合的表征,涉及材料或结构在外力作用下的全部反应,包括变形、应力和破坏等方面。已有研究主要集中在结构面的剪切滑移、动态摩擦特性及其在地震、爆破等动力荷载作用下的力学响应。结构面的动力行为与其静力特性有显著不同,特别是在高应力环境下,结构面表现出显著的非线性和速率效应。

1.1 结构面的动剪切特性

在动态荷载(如地震、爆破、冲击等)的作用下,结构面的剪切滑移行为直接影响岩体的动力响应。与静态条件下不同,动态荷载引起的剪切滑移不仅依赖于结构面的初始摩擦特性,还受控于加载速率、荷载幅值、频率等动态参数。研究表明,随着加载速率的增加,结构面的剪切强度通常会提高,这种现象称为速率效应。如周子龙等^[4]对不同剪切速率下结构面的力学行为进行实验研究,发现随着剪切加载速率的增加,峰值位移展现出线性上升的趋势;而加载速率的变化显著影响峰值后的应变软化阶段,随着加载速率的增大,应变软化阶段应力下降速率先增大后减小。Shu等^[5]通过分离式霍普金森压杆(SHPB)试验,研究了完整岩石样本和包含单个光滑节理样本在不同加载速率下的动态峰值应力和破坏模式,实验发现加载速率与峰值应力线性相关。动态荷载的荷载幅值和频率对滑移行为有着复杂的影响。高荷载幅值的荷载往往会产生更大的剪切应力,增加滑移的可能性,而高频率的荷载可能导致结构面处的应力不断积累并频繁滑移。研究表明,高频动态荷载容易诱发细小的滑移,而低频、大荷载幅值的荷载更容易导致显著的滑移和失稳。法向应力的大小直接影响结构面的摩擦强度和滑移难度。较高的法向应力会增加结构面的闭合程度,提升摩擦强度,从而抑制滑移行为^[6]。

在结构面动力学特性研究中,动态摩擦特性是一个关键问题。动态摩擦是指在动荷载或滑移过程中,接触面上的摩擦阻力随滑移速度、接触压力、材料属性等因素变化的特性。结构面的摩擦行为不仅与其材料性质、表面粗糙度相关,还受到动态加载条件的显著影响^[7]。在动态加载下,摩擦系数往往表现出显著的速率效应,通常摩擦系数会随滑移速率的增大而减小。粗糙度会显著改变结构面的动摩擦系数,粗糙的结构面在动态荷载下会表现出更高的动态摩擦阻力,从而延缓滑移的发生,提高岩体的稳定性。张磊等^[8]通过分离式霍普金森杆(SHPB)试验对冲击荷载作用下岩体粗糙结构面动摩擦特性进行研究,建立岩石界面粗糙形态动力学演化的描述方法。但在动态荷载下,高粗糙度会导致局部应力集中^[9],可能出现更突然的滑移现象,从而增加结构面破坏的可能性。

Zhang等^[10]通过施加不同法向应力,观测了结构面的动态摩擦响应。结果表明,黏滑振动的幅值和频率与摩擦系数和法向力的变化有关,而摩擦系数和法向力的变化受接触面粗糙度的影响,这种行为可以用黏滑效应解释。黏滑效应是指结构面在持续剪切过程中表现出的周期性滑移和停滞,这种现象在地震断层滑移和岩体动力失稳中尤为常见,对于黏滑效应的研究不仅有助于理解受动态荷载影响

下断层的滑动行为, 还对预防深部岩体动力灾害具有重要意义。崔国建等^[11]总结了典型动力扰动剪切试验装置主要技术参数, 自主研发了动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置, 并进行平直花岗岩应力跃迁试验, 发现各级法向应力下剪应力曲线展现出应变硬化-黏滑特征, 且当法向应力大于 5 MPa 时, 只发生黏滑滑动, 且黏滑效应与法向应力具有明显的相关性(如图 1 所示)。

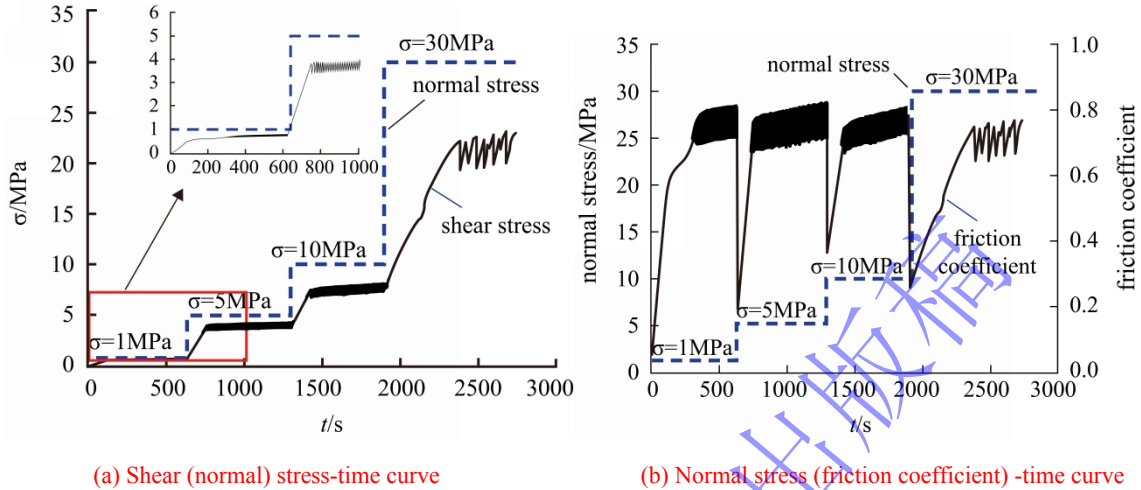


图 1 应力阶跃试验结果^[11]

Fig.1 Results of stress step test^[11]

黏滑效应基本过程可以分为三个阶段^[12]。黏附阶段: 接触面由于摩擦力的作用维持相对静止, 内部应力逐渐积累。随着荷载增加或应力集中, 局部材料可能发生弹性形变, 直至摩擦力无法继续阻止滑移; 滑移阶段: 当应力超过界面摩擦力的承受能力时, 结构面突然滑移, 伴随能量的释放。滑移速率可能瞬间变大, 引起应力的突发变化; 滑移后应力积累阶段: 滑移后应力重新积累, 形成黏滑循环。这种循环可以导致结构面在长时间作用下出现破坏或不稳定。黏滑效应的影响因素如表 1 所示。

表 1 黏滑效应影响因素^[10,12]

Table 1 Influencing factors of stick-slip effect^[10,12]

影响因素	影响机理
法向应力	较高的法向应力往往会增加摩擦阻力, 从而延缓滑移的发生
接触面粗糙度	高粗糙度表面更容易触发黏滑效应
加载速率	较高的加载速率可能使滑移阶段更具破坏性
材料属性	材料的黏弹性、塑性等特性影响黏滑效应的发生频率和强度

为便于后文阐述起伏角角度 α 与结构面角度 β 对结构面力学特性的影响, 将其总结如图 2 所示。同时在实际工程中, 由于围岩的约束, 岩体无法进行自由的剪切膨胀, 因此施加在岩体上的法向载荷将不断增加。这种情况下, 结构面更易受到剪切破坏, 表现为常法向刚度边界条件。焦峰等^[13]为了重点探讨起伏角与法向刚度在结构面剪切力学特性中的作用, 使用自主研发的煤岩剪切试验系统, 在恒定法向刚度条件下进行了人工结构面的直剪试验, 发现当起伏角为 15° 和 30° 时, 曲线呈现周期性震荡衰减; 起伏角为 45° 时, 剪切应力在达到峰值后迅速降低(如图 3 所示)。而随着法向刚度的增加, 结构面的破坏程度逐渐增加。

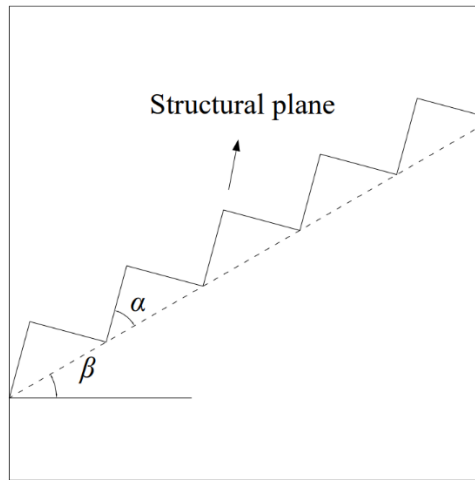


图2 结构面角度与起伏角

Fig.2 Structural plane Angle and relief Angle

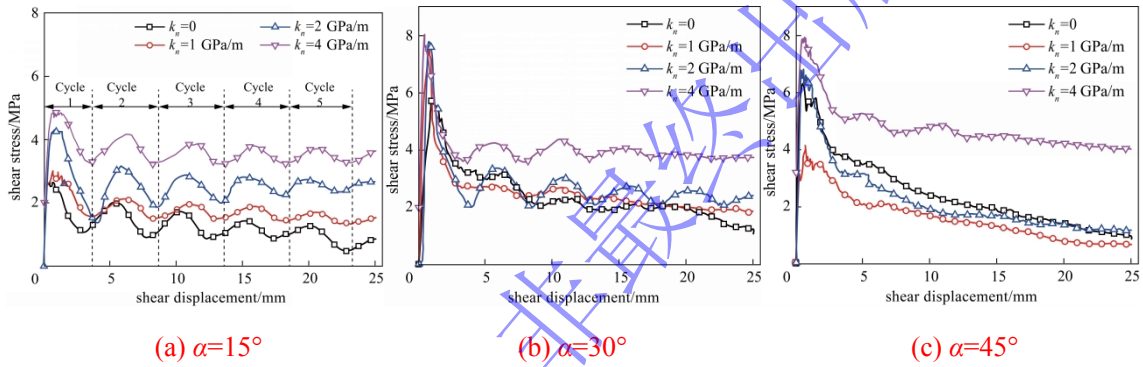


图3 剪切应力-剪切位移曲线^[13]

Fig.3 Shear stress vs shear displacement curves^[13]

1.2 结构面的动拉压特性

1.2.1 结构面的动压缩特性

与静态荷载相比,动态荷载条件下,结构面的压缩力学性能表现出显著的非线性特征和复杂的破坏机制,同时随着压应力的增加,结构面不规则表面的峰谷会逐渐接触并闭合,此时抗压刚度迅速增大。刘峰^[14]对不同倾角结构面岩体试块进行了单轴压缩实验,将岩体的塑性变形分为了三个阶段,即空隙压密阶段-微破裂稳定发展阶段-裂隙贯通阶段,其中空隙压密阶段即岩石内部微裂纹的闭合。孙广忠^[15]提出了在单轴压缩载荷条件下,针对节理闭合应变的计算公式,在此基础上,刘红岩等^[16]采用组合模型法,将四个基本变形元件(细观岩块变形元件、节理面剪切变形元件、节理面闭合变形元件,以及用于反映应变率效应的黏性元件)进行串并联(如图4所示),构建出可以反应含结构面岩体的动态单轴压缩损伤本构模型(式1)。

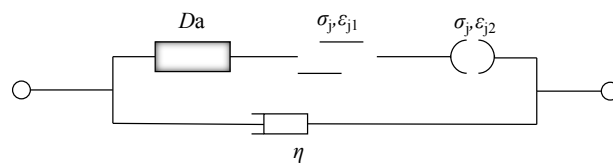


图4 动态本构力学模型^[16]

Fig.4 Dynamic constitutive mechanics model^[16]

$$\sigma - \eta \dot{\varepsilon} = E_r \left\{ \varepsilon - \frac{(\sigma - \eta \dot{\varepsilon}) \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha}{k_s \cdot L} - \varepsilon_{j0} \left[1 - \exp \left(- \frac{(\sigma - \eta \dot{\varepsilon}) \cos^2 \alpha}{E_j \varepsilon_{j0}} \right) \right] \cos \alpha \right\} \cdot \exp \left[\left(\frac{\varepsilon - \frac{(\sigma - \eta \dot{\varepsilon}) \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha}{k_s \cdot L} - \varepsilon_{j0} \left[1 - \exp \left(- \frac{(\sigma - \eta \dot{\varepsilon}) \cos^2 \alpha}{E_j \varepsilon_{j0}} \right) \right] \cos \alpha}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: E_r , E_j , ε_{j0} , η , k_s , α , L , m , ε_0 分别为岩块弹性模量、节理面闭合模量、节理面最大闭合应变、黏滞系数、节理面剪切刚度、节理倾角、试件在荷载作用方向上的长度和岩石微元服从 Weibull 分布时的统计分布参数等材料的力学或几何常数。

李夕兵等^[17]进行不同频率荷载下的动态压缩试验, 获得加载频率对结构面变形性质的影响规律(如图 5 所示), 建立了考虑频率效应的节理本构模型。实验发现, 平均应变率与加载频率之间存在线性关系, 并且随着载荷频率的增加, 平均应变率也呈现出线性上升的趋势。

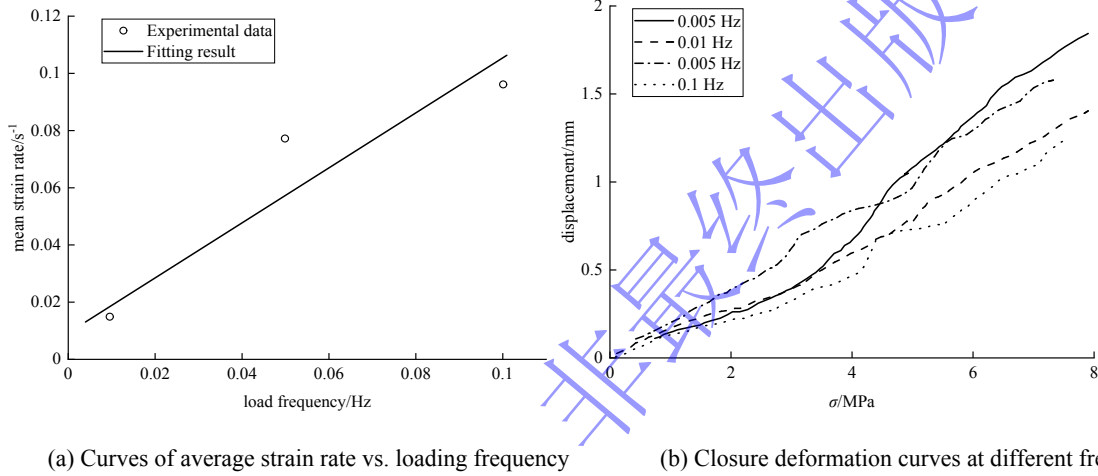


图 5 试验结果^[17]

Fig.5 Results of test^[17]

1.2.2 结构面的动拉伸特性

结构面的力学行为除了沿切向的剪切滑移, 沿法向的拉裂分离也同样不可忽视。邓建等^[18]基于结构面的基本损伤机制, 构建了一种依托能量原理的岩体结构面拉伸损伤本构模型, 该模型能够有效体现岩体结构面在非线性弹性、塑性强化及疲劳损伤等方面的特性。结构面拉损伤演化方程为:

$$d^+ = g^+(Y^+, Y_0^+) = 1 - \sqrt{\frac{Y_0^+}{Y^+}} \exp \left(D^+ \left(1 - \sqrt{\frac{Y^+}{Y_0^+}} \right) \right) \quad (2)$$

在考虑塑性及损伤的情况下, 推导出岩体结构面应力与变形之间的关系表达式:

$$\sigma = (I - d) : \bar{\sigma} = (I - d) : D^e : (g - g^p) \quad (3)$$

式中: + 分别表示受拉, Y 表示损伤能释放率, D^+ 为无量纲常数, 可以根据岩体结构面单向受拉试验获得。

1.3 结构面动力特性理论研究模型

(1) 黏弹性模型

黏弹性模型可以描述结构面在动力载荷下的变形行为。它结合了黏性和弹性两种性质, 描述了结构面既能储存能量, 又能耗散能量的特性。黏弹性模型能够较好地描述结构面在低频或长期载荷下的动力特性。例如, 在深部隧道或矿井中, 结构面在高地应力作用下, 可能发生缓慢的变形, 这种行为

可以通过黏弹性模型来捕捉。此外，黏弹性模型还适合描述结构面的应力松弛和蠕变特性，这对于长期稳定性分析非常重要，目前开展的研究都是基于 Kelvin 模型和 Maxwell 模型(如图 6 所示)展开 [19,20]。



图 6 黏弹性模型
Fig.6 Viscoelastic model

(2) 动摩擦模型

动摩擦模型专门用来描述结构面在剪切作用下的滑移行为，特别是在动态载荷作用下结构面的滑移和摩擦阻力变化。常见的动摩擦模型为 Rate-and-State 摩擦模型^[21]。该模型通过引入反映直接速率效应的本构参数 a 与能反映剪应力变化的状态变量 θ ，精确描述摩擦力随滑动速率和滑移过程的变化(式 4)。

$$\mu = \mu_* + a\sigma \ln(V/V_*) + b \ln(\theta/\theta_*) \quad (4)$$

式中： μ_* 和 θ_* 为参照速率 V_* 的摩擦系数稳态值与对应稳态值， b 为表示过渡过程强弱的本构参数， V 为滑动速率。

黏弹性模型适用于描述结构面在长期载荷下的渐进变形和能量耗散，主要用于分析长期稳定性问题。而动摩擦模型主要用于分析高应力和快速滑移过程，如地震断层滑移、爆破产生的动态破坏、结构面错动引发的冲击地压等。

2 岩体动力特性的结构面效应

上文主要对结构面的力学特性进行了系统总结与分析，旨在为理解结构面对岩体力学行为的影响提供理论基础。在此基础上，接下来将进一步探讨含结构面岩体的动强度及其动变形特性，重点分析结构面对岩体在动态载荷作用下的响应特征，包括在动力荷载作用下岩体的强度变化、变形特性，旨在揭示结构面在深部岩体中的影响机制。

2.1 结构面对岩体动强度影响

结构面的存在对岩体强度有着显著的影响^[22-25]。结构面作为岩体中的弱面，在动态荷载作用下通常会导致应力集中。这种应力集中使得裂纹更容易在结构面附近萌生和扩展，从而降低了岩体的整体强度。此外，结构面的几何特征对岩体在动态条件下的强度特性变化至关重要。

2.1.1 含结构面岩体动剪切强度特性

在动态载荷作用下，含结构面岩体的剪切强度表现出不同于静态加载条件下的行为。动态加载可能导致裂纹的快速扩展和滑移，进而降低其剪切强度。Meng 等^[26]研究了剪切速率对抗剪强度的影响，发现在 3~40 MPa 的正应力范围内，花岗岩的峰值抗剪强度和残余抗剪强度均随剪切速率的增大而减小，发生黏滑过程中的应力降幅大小随剪切位移和法向应力的增大而增大。Wang 等^[27]研制冲击剪切测试系统(如图 7 所示)，对冲击荷载下进行剪切试验，建立了剪切损伤的统计本构模型：

$$\tau_d = k_s u \exp \left\{ - \left[\frac{k_s u - k_s u (\sigma_n / \tau) \tan(\text{JRC} \lg(\text{JCS} \cdot \tau / k_s u \sigma_n) + \varphi_d) - \alpha \dot{\tau} - c_0}{F_0} \right]^m \right\} \quad (5)$$

式中： τ_d 为剪切强度， k_s 为剪切刚度， u 为剪切位移， σ_n 为正应力， τ 为施加到结构面的剪应力， φ_d 为动摩擦角， α 为速率系数， c_0 为初始凝聚力， m 和 F_0 为 Weibull 分布模型的参数。

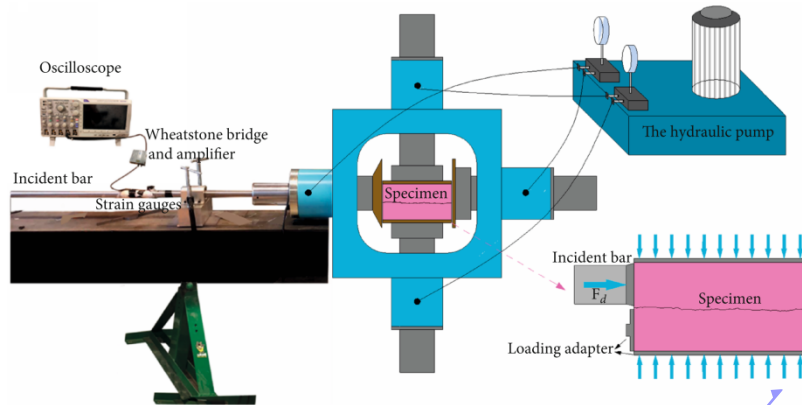


图 7 岩石结构面冲击剪切试验装置^[27]

Fig.7 Experimental apparatus used in the impact shear tests of rock discontinuity^[27]

Jafari 等^[28]对岩石节理在循环荷载作用下抗剪强度的变化进行了研究，建立了用于评估循环荷载条件下抗剪强度的数学模型：

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \frac{a(NC_s)^m (\dot{\omega}_n A_n)^n}{1 + a(NC_s)^m (\dot{\omega}_n A_n)^n} \quad (6)$$

式中： τ 为剪切强度， σ_n 为法向应力， NC_s 为应力循环次数， $\dot{\omega}_n$ 为归一化剪切速度， A_n 为归一化应力幅。

Zhou 等^[29]依次改变剪切加载速率和法向应力，在三种粗糙度条件下对小尺寸花岗岩试样进行了直接剪切试验，发现剪切加载速率是黏滑效应的主要控制参数，两者之间的相关性可以用幂函数表示。剪切应力降幅随循环时间的延长呈对数增长。王斐笠等^[30]对含结构面花岗岩进行不同应力路径和速率路径下的直剪试验，结果如图 8 所示，当法向荷载沿路径 1 增加时，剪切应力显著增大，且出现明显阶跃现象，法向荷载越高，应力强化越显著。相反，法向荷载沿路径 2 减小时，剪切应力下降，尤其在最后的剪切阶段出现应力弱化。在相同法向荷载下，不同路径表现出不同的剪切应力：在 5 MPa 法向荷载下，路径 1 的剪切应力远高于路径 2；3 MPa 时差距缩小；1 MPa 时，两路径的剪切应力接近。

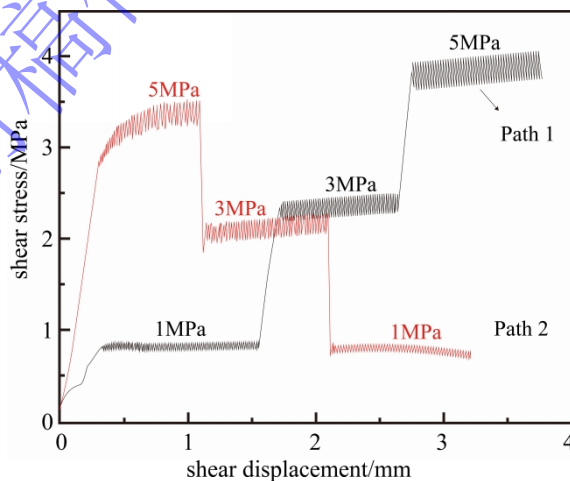


图 8 不同应力路径下剪切应力-位移曲线^[30]

Fig.8 Shear stress-displacement curves under different stress paths^[30]

2.1.2 含结构面岩体动拉压强度特性

含结构面岩体动拉压强度在高应力和动态环境下均呈现出显著的不同。Zhou 等^[31]对含结构面岩

体在静-动耦合重复冲击下的力学特性和断裂行为进行了研究, 结果表明, 随着结构面长度的增加以及重复冲击次数的增多, 结构面岩体的动态强度逐渐减弱。Xiao 等^[32]采用 SHPB 实验装置和二维数字图像相关(DIC)方法, 对完整花岗岩试件和不同结构面倾角的花岗岩试件进行了冲击试验, 发现试件的峰值应变和动强度均随轴向静压力的增大而减小, 且结构面倾角为 45°和 0°时, 峰值应变、动强度和综合强度的降低显著。Qiu 等^[33]通过冲击试验与数值模拟结合的手段, 发现在结构面倾角为 0~90°时, 拉应力是岩石基体损伤的主要原因。

能量的耗散主要发生在裂纹扩展和破坏过程中。结构面处的摩擦和滑移会导致能量耗散, 使岩体的动强度降低, 而岩体动强度的降低往往伴随着裂纹的进一步扩展和更多的能量耗散。李业学^[34]对应力波穿越岩石节理时能量耗散进行了实验研究, 将粗糙结构面转换为对应分形维数, 发现能耗的增大幅度随维数的增大而增大, 且维数与能量耗散之间的关系可以由三次函数表示(如图 9 所示)。

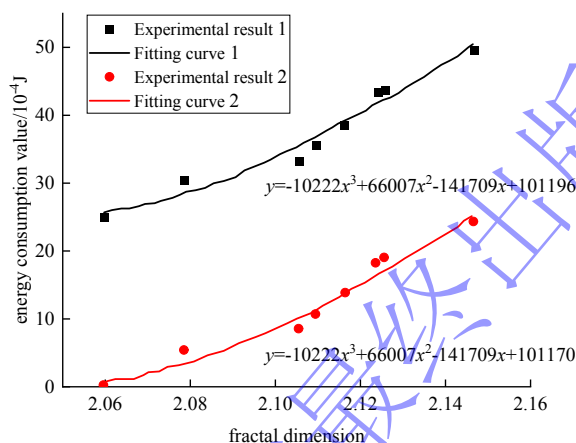


图 9 大理岩能耗维数关系曲线^[34]

Fig.9 Curve of relation between energy dissipation and dimension in marble^[34]

2.2 结构面对岩体动变形影响

变形行为直接反映了材料或结构在受力条件下的适应能力及其力学特性(如弹性、塑性等)的表现。结构面的存在会使岩体的动态刚度降低, 导致岩体变形呈现出明显的各向异性和非线性特征, 最终导致裂纹扩展和破坏模式的复杂化。唐红梅^[35]通过剪切试验, 利用西原模型分阶段分析了在相同正压力条件下结构面的剪切模量与损伤量。结果表明, 随着剪应力的增加, 初始剪切模量也增大, 但其随时间的降低速度加快, 且在稳定蠕变阶段的降低幅度更为显著。张为芳^[36]通过对含有倾斜结构面的砂岩进行单轴压缩和蠕变试验, 发现软弱结构面导致岩体的单轴抗压强度、泊松比和弹性模量降低, 同时增强了岩体的塑性特性, 并削弱了其脆性特性。张占荣^[37]基于含规则结构面岩体的变形模量理论公式, 考虑结构面参数的概率分布特征, 推导出含随机结构面岩体变形模量的计算公式:

$$\frac{1}{E_0} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma} = \frac{1}{E} + \sum_{i=1}^n w_{i,j} \frac{\cos^2 \theta_i}{S_i} \left[\frac{\cos^2 \theta_i}{k_{ni}(\sigma)} + \frac{\sin^2 \theta_i}{k_{si}(\sigma)} \right] \quad (7)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 应变增量, $\Delta \sigma$ 为应力增量, E 为岩石弹性模量, θ 为结构面与法向应力夹角, k_n 与 k_s 分别为结构面的法向刚度与切向刚度, $w_{i,j}$ 为统计学参数, $n=L/S_i$ 代表第 i 组结构的条数, L 为构建模型的边长。

Wang 等^[38]对含粗糙结构面岩体进行了动态直剪试验。采用 DIC 技术分析了剪切速度和正应力对粗糙岩体结构面滑移位移的影响, 计算了破坏点处的应变作为剪切速度和法向应力的函数, 研究了滑移破坏中剪切带的微观结构特征, 了解了滑移破坏模式。邓树新等^[39]发现冲击扰动应力在岩体中传播会引发超低摩擦现象, 若结构面摩擦力减小到小于结构面剪切力时, 则开始滑移, 同时释放大量能

量。在水平拉力保持不变的情况下，随着冲击能量的增大，岩体所产生的残余水平位移量逐渐增加(如图 10 所示)。

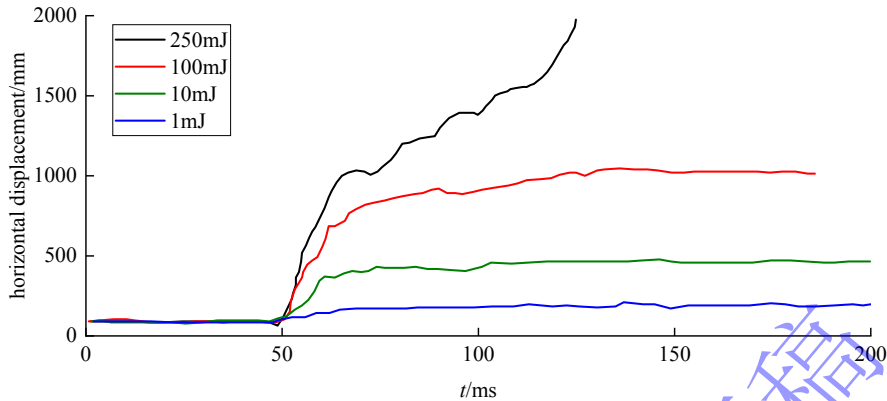


图 10 水平位移时程曲线^[39]

Fig.10 Horizontal displacement time history curve^[39]

由于动态加载条件的复杂性与多样性，岩体动力学特性的结构面效应往往呈现出显著的非线性特征^[40-42]。这种非线性特征主要源于不同的加载路径、频率、幅度以及加载速率对岩体内部应力分布、裂隙扩展等的综合影响。岩体动力学特性受结构面效应影响会表现出应力集中、滑移、裂隙萌生和扩展等复杂现象，导致破坏过程难以预测，破坏模式多样化^[43,44]，破坏模式如表 2 所示。

表 2 动态加载模式与破坏模式

Table 2 Dynamic loading mode and destruction mode

加载模式		破坏模式
加载路径	单向加载	滑移破坏，可能伴随局部破裂，导致岩体沿滑动方向错位
	多向加载	在多向加载下，破坏模式包括剪切滑移、裂隙扩展和张拉破裂等。局部破裂与滑移相结合，破坏形式更加复杂
	循环加载	随着循环次数的增加，滑移幅度逐渐增大，裂隙扩展贯通。局部应力集中区域易发生疲劳破坏，导致局部或整体失稳
加载频率	低频	滑移行为明显，破坏模式主要为沿着弱面发生剪切滑移
	高频	局部应力集中加剧，滑移伴随裂隙扩展，最终可能导致大规模的结构面失稳
加载幅度	小幅度	局部滑移和微裂纹扩展，但整体保持相对稳定，破坏较为分散且不剧烈
	大幅度	滑移与局部破裂剧烈发生，最终导致整体失稳或坍塌
加载速率	低速率	滑移行为较为温和，局部破裂扩展缓慢，整体破坏模式较为可预测
	高速率	破坏过程迅速，滑移和裂隙扩展同时发生，甚至可能形成贯通性裂隙，导致整体坍塌或大规模失稳

由上可将含结构面岩体的破坏模式主要包括以下四类：

- (1) 滑移破坏：在剪切力主导的情况下，结构面沿着弱面滑移，可能伴随摩擦能量的耗散。
- (2) 局部破裂：由于应力集中，发生局部破裂，裂隙逐步扩展至相邻结构面。
- (3) 裂隙贯通：局部裂隙扩展并最终贯通，形成大规模的贯通破裂带。
- (4) 整体失稳：由于多次滑移和局部破裂的累积，最终导致整体失稳或坍塌。

3 深部岩体结构面动力特性

3.1 深部岩体结构面与浅部岩体动力特性对比

深部环境中的高地应力状态对岩体的动力学特性具有重要影响。在高应力条件下，岩体中的结构

面更容易产生应力集中和局部破坏，导致其动力学特性更加复杂。

深部岩体具有高地应力的特性，通常表现为高法向应力、复杂的三维应力状态与高应力集中现象。深部岩体各方向应力的大小和作用方式不同，使得结构面的动力学特性更具不确定性；高应力集中会导致结构面出现局部应力集中现象，可能引发滑移失稳或动力灾害。

在深部工程中，人工开挖扰动会对岩体产生显著影响，主要体现在以下两个方面：首先是应力梯度问题，在仅考虑同一方向卸载时，由于高地应力环境的特点，卸载过程较快，导致应力梯度较大，影响范围广泛，在这种情况下，岩体容易沿结构面发生滑移，从而引发失稳破坏。其次是差应力问题，当考虑两个方向的应力变化时，特别是在巷道径向卸载与切向加载的情况下，应力集中现象明显，造成较大的差应力，会增加岩体破坏的风险。因此，深部工程中应特别关注这两种应力变化模式对岩体稳定性的影响。

在深部高应力条件下，岩体动力学特性的结构面效应与浅部岩体明显不同，主要体现在以下几个方面：

(1) 应力状态

在深部岩体中，岩体承受着更高的地应力和复杂的应力场^[45]。随着埋深的增加，深部岩体的应力状态趋向于高压和非均匀应力分布，这使得结构面在深部岩体中的作用更加突出。相比之下，浅部岩体通常承受较低的地应力和较为简单的应力状态，结构面的影响相对较小。

(2) 破坏模式

由于深部岩体承受的地应力较大，结构面在动态荷载作用下容易诱发大规模的滑移、裂纹扩展和局部破坏，甚至可能导致岩体整体失稳^[46]。而浅部岩体的结构面主要表现为小规模的滑移或微裂纹扩展，破坏模式较为局限。深部岩体中的动力灾害（如岩爆、冲击地压等）往往由于结构面滑移和破裂的累积效应引发，破坏过程更为复杂且不可预测^[47]。

(3) 变形与能量耗散

在深部岩体中，结构面的变形和能量耗散过程与浅部岩体有显著差异。深部岩体由于受围岩约束，变形通常较为局限，但随着荷载的增加，结构面可能会经历显著的滑移和裂纹扩展，导致局部区域应力的急剧释放和能量的迅速耗散^[48,49]。浅部岩体的变形过程相对较为温和，能量的耗散主要体现在小范围的裂纹扩展和微观滑移中。

3.2 深部岩体结构面动力特性试验研究

3.2.1 动静组合加载试验研究

为了模拟深部高应力环境下的结构面动力学行为，学者们开发了真三轴试验系统装置^[50](如图 11 所示)，通过施加高法向应力和剪切应力，研究深部岩体的动力学特性。由于深部岩体自身的高应力状态，在对其进行分析时需考虑“动静组合加载”^[51]。

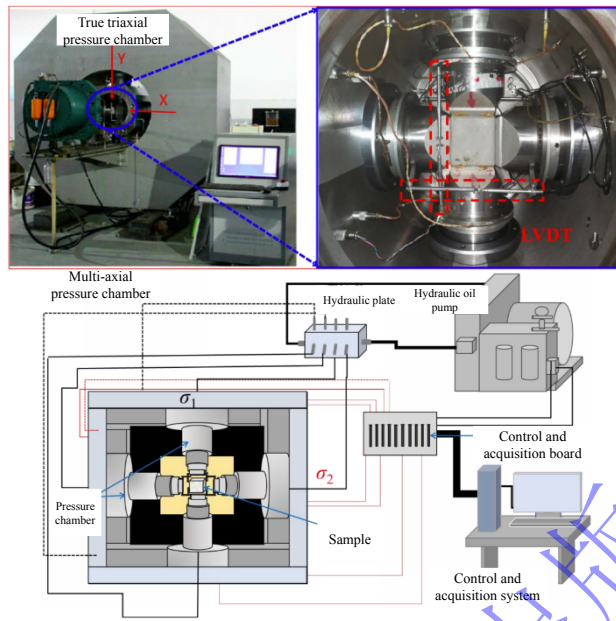


图 11 多功能真三轴流固耦合试验系统^[50]

Fig.11 Multifunctional true triaxial fluid-solid interaction test system^[50]

李夕兵等^[52]归纳总结了深部岩体中存在的 3 种扰动类型及其对应的应力路径, 并对其进行试验分析。杨嘉楠等^[53]对其进行整理, 得出深部岩体动静组合加载问题研究思路, 如图 12 所示。

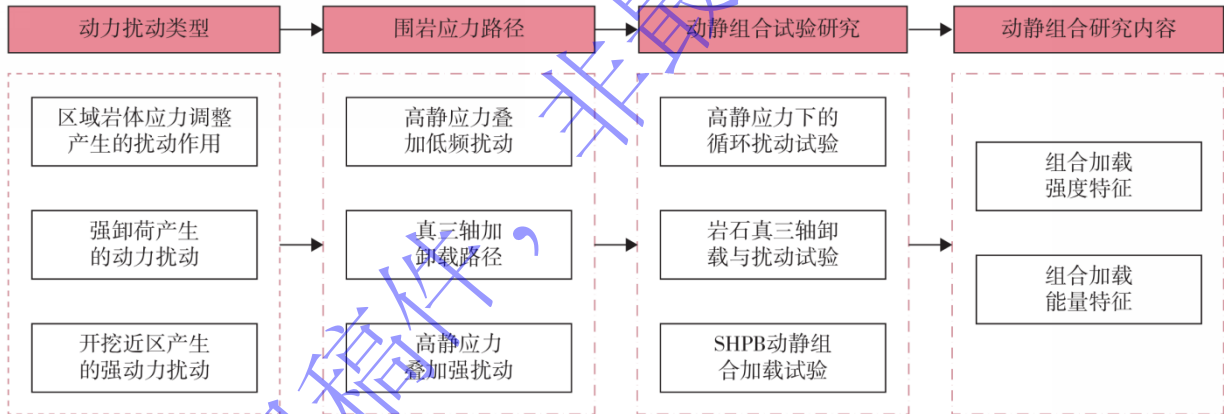


图 12 深部岩体动静组合加载问题研究思路^[53]

Fig.12 Research thinking of deep rock mass dynamic and dynamic combined loading problem^[53]

3.2.2 不同形态结构面动力特性研究

岩体内形态各异的结构面会显著劣化岩石的动力学性质, 使破坏更容易发生, 因此含结构面岩体的动静组合加载问题应当着重考虑。根据结构面类型的不同, 总结具有代表性的组合加载试验及结果如下。

(1) 无倾角平直贯通结构面

李杰等^[54]利用自行研制的块系岩体动态力学性能测试试验系统(图 13), 进行不同初始应力条件下冲击扰动(2~300 MJ)诱发岩块滑移的物理模拟试验, 发现初始静应力越接近最大静摩擦力, 冲击能量越大, 岩块不可逆位移越大, 失稳也越容易发生。

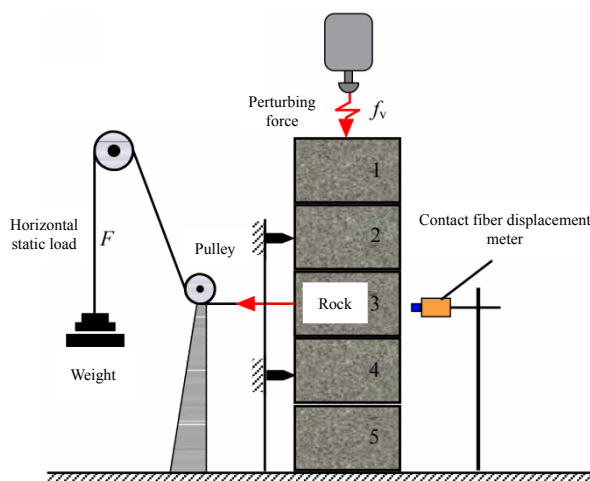


图 13 块系岩体动态力学性能测试试验系统^[54]

Fig.16 Test system for dynamic mechanical properties of block rock mass^[54]

(2) 有倾角平直贯通结构面

于永江等^[55]对含倾角结构面试块施加频率为 2 Hz, 扰动幅值为 4~8 MPa 的正弦扰动, 发现在循环加卸载时, 扰动应力幅值与结构面倾角越大, 岩石强度随之降低, 岩石越容易发生失稳破坏。

(3) 预制裂隙

Feng 等^[56]对预制裂隙试件在动静组合加载作用下的力学特性进行试验研究, 试样制备如图 14 所示。结果表明, 动静组合加载作用下含裂隙试件的强度和弹性模量均高于单独静、动荷载作用下的强度和弹性模量, 同时发现具有明显的速率效应。

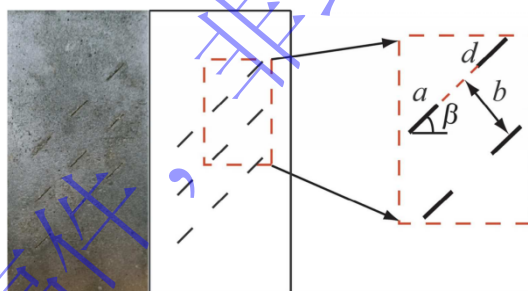


图 14 裂隙试样几何结构示意图^[56]

Fig.14 Schematic of the geometric configurations of the fissured specimen^[56]

4 动力灾害及防控技术

在深部地下工程中, 结构面不仅直接影响岩体的稳定性, 还在动力灾害的触发过程中扮演着关键角色。结构面在动态荷载作用下的响应行为, 尤其是在地震、爆破等外部扰动下, 可能引发一系列严重的动力灾害, 如岩爆、大变形和冲击地压等。这些灾害各自具有不同的触发机制和破坏模式, 其破坏特性与结构面的几何特征、摩擦特性及其与周围岩体的相互作用密切相关。因此, 深入研究结构面的动力学特性, 对于理解和预防深部工程中的动力灾害至关重要^[57]。

4.1 岩爆及防控技术

岩爆是一种典型的深部动力灾害, 通常发生在地应力条件下^[58-60], 其触发机制与岩体中的高应力集中密切相关, 尤其是在结构面或节理发育的区域。在应力集中和局部破坏的共同作用下, 当局部应力超过岩石的抗拉或抗剪强度时, 岩体将发生脆性破坏, 产生剧烈的能量释放, 导致岩块飞出。动态荷载下, 岩体的脆性破坏更容易发生, 尤其是在已有应力集中区域, 会进一步加剧岩爆的风险。

冯夏庭等^[61]根据岩爆的孕育机制,将其分类为应变型、应变—结构面滑移型和断裂滑移型,受结构面影响主要发生后两种类型岩爆。结构面的剪切滑移是岩爆的重要触发因素。滑移失稳主要受到动态荷载、法向应力和结构面摩擦特性的影响。当外部动力荷载对结构面施加剪切应力时,若剪应力超过结构面的抗剪强度,结构面将发生滑移。在动态加载条件下,滑移可能是突发的,随着滑移的进行,摩擦力的变化可能引发能量的瞬时释放,导致结构面失稳。刘岩鑫等^[62]针对动力扰动下岩爆发生机理进行研究,发现高应力下开始施加的扰动对能量释放起到了激发和放大的作用,低应力下开始施加的扰动对能量释放仅起到激发的作用。刘啸等^[63]依托莫尔—库仑强度准则,推导了结构面发生剪切滑移的能量与应力判据,探讨了结构面剪切失稳的发生与应力波入射角、结构面内摩擦角、黏聚力及爆源与结构面距离等因素之间的关系(如图 15 所示)。

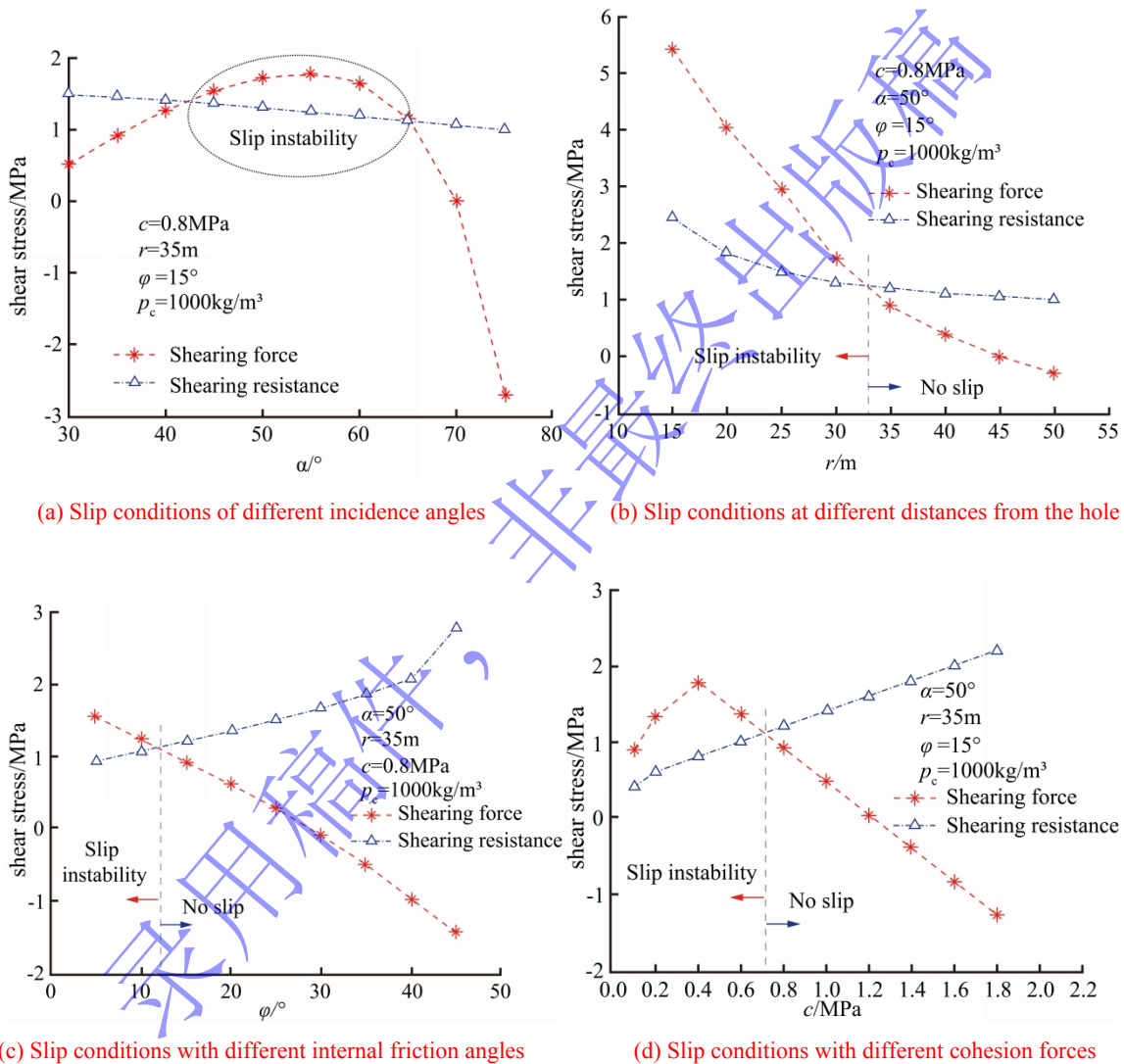


图 15 不同参数下结构面的滑移条件^[63]

Fig.15 Slip conditions of structural plane under different parameters^[63]

对于岩爆灾害的防治,主要有以下几个手段:

(1) 通过对岩体结构的详细勘察和分析,合理规划工程开挖路线和施工方法,避免应力集中区域的过度扰动。特别是在隧道和矿井等深部开挖工程中,尽量避开不利结构面的主应力作用区,减小潜在的滑移和破坏风险。

(2) 通过在结构面附近进行有控制的爆破操作,释放积累的应力,形成应力释放带,进而降低岩体内部的整体应力水平。在进行预裂爆破时,应通过逐层爆破的方式,释放岩体内部的应力积累,并

减小对邻近岩体的扰动。同时通过精确控制爆破能量和时间，可以避免对结构面的过度破坏，同时释放局部应力。也可以通过在巷道周边的高应力区布置深钻孔，逐步释放岩体中的应力。

(3) 通过通过喷锚网、拱架等多种支护方式的协同应用，形成相互连接的整体防护体系，以应对岩爆。同时，优化支护系统设计，以尽量吸收岩体破裂释放的能量，并减缓其释放速度，从而实现有效的防控。

4.2 深部岩体大变形及防控技术

在深部高应力环境下，结构面可能成为应力集中区域，导致滑移、开裂等现象，从而引发围岩的大变形。随着巷道开挖引发的应力重分布，结构面处的力学特性不可忽视，如剪切滑移、张开或闭合等，进一步削弱围岩的承载能力，导致整体稳定性下降。深部含结构面岩体的大变形主要受以下几个因素的影响：

(1) 高地应力：在深部地下工程中，岩体处于高地应力环境。开挖过程中，原先的应力状态被扰动，引发应力重新分布。在应力集中区，岩体容易出现显著变形，尤其是软岩或弱结构面发育的区域。

(2) 结构面特征：结构面是岩体中的弱面，如节理、断层、层理等。结构面破坏会显著改变岩体的力学性质，使岩体表现出显著的各向异性。结构面之间的滑移、错动等变形行为，会导致岩体整体出现大范围的位移或失稳。

(3) 岩体性质：含结构面的岩体通常力学性质较弱，且结构面的非均质性、节理的发育程度、结构面的方位与主应力方向等因素都会影响岩体的稳定性。软岩类岩体在高应力下容易发生塑性变形，而硬岩中结构面滑移可能会引发局部大变形。

(4) 开挖扰动：深部开挖对围岩产生强烈的扰动，破坏了原本的应力平衡。结构面发育的区域，受到开挖引发的应力集中和卸载作用，容易产生变形，甚至发生大规模的失稳和塌陷。

针对含结构面岩体大变形问题，可以通过在岩体内布置锚杆或锚索来提高结构面的抗剪强度和整体稳定性^[64-66]。何满潮院士团队研发了具备均匀大变形、颈缩消失及屈服平台消失等实验特征的负泊松比(NPR)锚杆材料，并基于此开发了刚柔结合的大变形控制支护技术，用于深部工程中的岩体支护^[67,68]，其结构原理如图 16 所示。

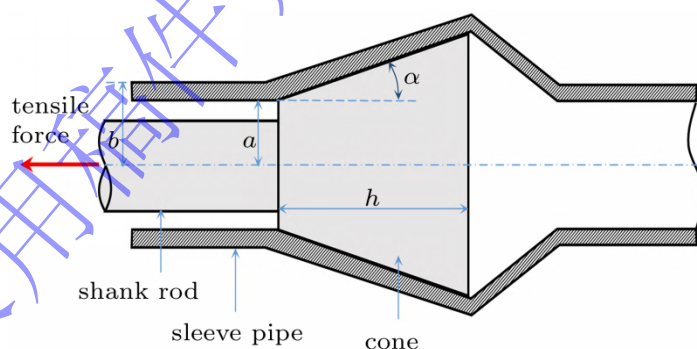


图 16 NPR 锚杆结构原理^[69]

Fig.16 NPR anchor structure principle^[69]

图中： α 为锥体斜面倾角， h 为锥体长度， a 和 b 分别为锥体小端、大端直径。

NPR 锚杆的支护原理为：在支护过程中，当围岩压力低于恒定阻力值时，围岩保持稳定，锚索杆体仅会发生微小的弹性变形；一旦围岩压力超过该阻值，恒阻装置则通过结构滑移变形来抵抗围岩的破坏。随着围岩应力的释放，恒阻装置停止位移，围岩与支护系统重新达到稳定状态^[70]。

考虑到锚索支护机理，沿结构面的剪切变形会使锚索承受相应的剪切力，同时由于端锚锚索的锚固形式，在锚尾与锚固段之间存在很长的自由段，无法对岩层的横向作用起到良好的抑制，从而可能会导致锚索承受更高的拉力而被剪断。因此，单仁亮等提出抗剪锚管索(Anchor Cable with C-shaped

tube, ACC)支护技术^[71,72](如图 17 所示),可以提高锚索的横向抗剪性能,防止锚索剪切破断,并增强巷道围岩的抗剪切能力,阻止岩体大变形。

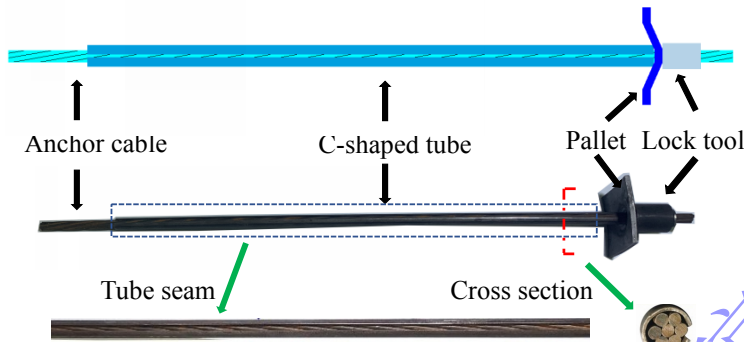


图 17 管索组合结构示意图^[72]

Fig.17 Schematic illustration of the anchor cable with C-shaped tube^[72]

抗剪锚管索 (ACC) 是一种组合支护系统,其特点是在距巷道表面一定深度内,预应力锚索的自由段外侧安装纵向开缝钢管。通过锚索的高预紧力,提供巷道径向压应力,有效抑制围岩的离层、滑动、裂隙扩展及新裂纹的产生,防止围岩的扩容变形。同时,外部开缝钢管与包裹索体共同形成的抗剪强度,可以抵挡结构面滑移,从而更为有效地抵抗围岩发生剪切破坏^[73-75]。

4.3 冲击地压及防控技术

冲击地压是指在地下矿山工程作业中,由于岩体内积聚的高应力突然释放,导致岩石或煤体发生急剧的破坏和变形,产生剧烈的应力释放。目前普遍将冲击地压分为煤体压缩型、顶板断裂型和断层滑移型 3 种类型^[76],而深部岩体中存在的结构面主要会导致断层滑移型冲击地压的发生。冲击地压的机理可归结为能量积累与释放过程。当深部岩体处于高地应力环境中时,岩体内部会逐渐积累大量的弹性能量。随着工程开挖的进行,岩体内部的应力重新分布,部分区域会产生应力集中现象,形成应力集中区。当应力超过岩体的强度极限时,岩体发生脆性破坏,储存的能量瞬间释放,导致围岩失稳并产生剧烈的冲击效应。

冲击地压的发生源于深部地下工程中复杂的应力环境,主要由以下三个因素共同作用引发:

(1) 高地应力环境:深部岩体处于高地应力状态,随着地下开挖工程的进行,原始应力状态被破坏,形成应力集中区。当局部应力达到或超过岩体的承载极限时,岩体会突然失稳,引发冲击地压。

(2) 岩体的脆性特征:深部岩体的脆性特征使其在高应力环境下,容易积累能量并突然释放。特别是坚硬且完整的岩体,具备较高的储能能力,当开挖扰动引发应力释放时,岩体会瞬间发生脆性破坏,导致剧烈的动力变形。

(3) 结构面效应:岩体中的结构面,如断层、节理等,影响岩体的整体力学性能。结构面的存在会诱发局部应力集中,结构面滑移或错动可能触发冲击地压。此外,结构面可能成为应力传导的通道,进一步加剧围岩的破坏。

潘一山等^[77]对断层滑移型冲击地压发生机理进行实验研究,发现煤层开采后,当正应力较小时,剪切位移较为稳定,当正应力较大时,即深部岩体受高应力作用时,会引发突然的剪切滑移,导致冲击地压的发生。冲击地压爆发性强,破坏范围广,故支护对策尤为重要。目前支护手段可以分为以下几种:

(1) 液压吸能支架支护

目前在冲击地压矿井的支护中,采用较多的为液压支架加强支护,但其仅仅能满足基本的支护要求,对于冲击地压的防治并不妥善。针对冲击地压的影响范围巨大的特点,应进行全巷液压吸能支架支护,根据“一巷一设计”原则,对液压支架的长度与强度进行合理计算选择。

(2) 留设窄煤柱

留设窄煤柱，能够使高应力区转移至实体煤，王国法等^[78]总结了不同煤柱宽度的垂直应力(如图18所示)，确定最优窄煤柱宽度为5~8 m。

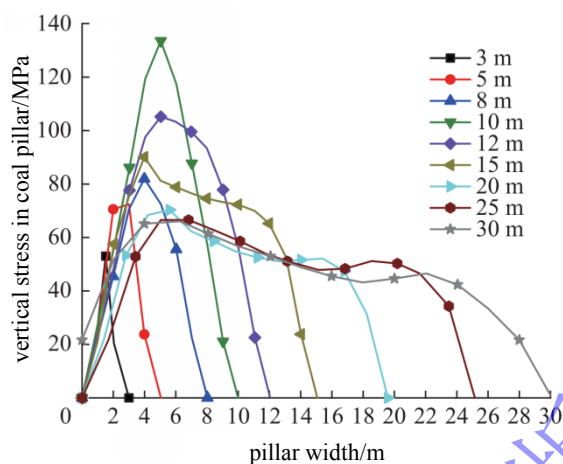


图 18 不同煤柱宽度下的垂直应力^[78]

Fig.18 Vertical stress under different pillar widths^[78]

(3) 围岩卸压技术

通过在岩体中打设深孔，将高应力区域内的应力逐步转移至更远处或释放至地表，减少岩体中应力集中带来的潜在风险^[79]。合理设计深孔的布局和间距，确保能够最大限度释放应力，同时避免对结构面造成过度扰动。夏永学等^[80]在孟村煤矿进行长水平孔压裂卸压，并对压裂前后的微震能量与频次进行监测分析，发现卸压后可以有效降低应力集中程度与冲击危险。

对于冲击地压矿井理论研究所缺乏的临界计算公式，潘一山等^[81]提出“防冲安全系数 N_s ”以及“止冲安全系数 N_e ”，将冲击地压的危险性评价转变为安全性设计，假设巷道承受地应力为 P ，冲击地压发生的临界应力为 P_{cr} ，冲击地压矿井释放最大能量为 E_{max} ，支护结构吸收能量为 E_{sup} ，则“双系数”定义为：

$$\begin{cases} N_s = \frac{P_{cr}}{P} \\ N_e = \frac{E_{sup}}{E_{max}} \end{cases} \quad (8)$$

5 总结与展望

(1) 结构面的动力特性主要包括在地震、爆破等动力荷载条件下的动剪切和动拉压特性。实验与理论研究表明，研究表明，深部岩体的结构面在高应力、强卸荷等复杂环境条件下，动剪切和动拉压特性显著不同于浅部岩体。结构面的动剪切特性表现出明显的速率效应、非线性和高法向应力敏感性。

(2) 针对动力荷载作用下含结构面岩体的动强度与动变形特性，研究表明，结构面显著降低了岩体的整体动强度，且在动态加载下，结构面的几何特性对岩体的动强度和变形行为产生重要影响。尤其深部高应力条件下，深部岩体结构面不仅能显著降低岩体的抗压、抗拉强度，还能引起岩体变形强烈的各向异性和非线性特征。

(3) 在微震、爆破等动力扰动作用下，结构面易成为岩体破坏的薄弱环节，进而引发岩爆、冲击地压与大变形等灾害。加强结构面稳定性、改善岩体力学性能和优化支护设计等是主要防控技术。此外，现代的监测与预警技术在预测动力灾害的发生、评估灾害风险方面也取得了显著进展。

(4) 深部岩体结构面动力特性及致灾效应研究仍面临诸多挑战, 今后研究将聚焦于以下几方面: 进一步推进滑块模型, 着重考虑正应力的加卸载, 构建高应力梯度下深部含结构面岩体破坏理论模型, 研究差应力对含结构面岩体破坏的影响机制; 补充完善不同应变范围的结构面动剪切仪, 特别是中高应变率的剪切仪。此外, 开发更为精确的动力灾害预测模型和大尺度数值模拟方法, 着重研究触发深部岩体结构面滑动的预警阈, 将灾害模型与工程实践深度结合, 提高灾害预警的时效性和准确性, 关注灾害模型与工程实践的深度融合。

参考文献

- [1] 陈毅. 深埋硬岩隧道结构面对岩破坏特征的影响研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(07): 105-108+72. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20231195.
CHEN Y. Spatial Distribution Characteristics of Serious Saltwater Intrusion of Yangtze River Estuary in Post-flood Season of 2022[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(07): 105-108+72. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20231195.
- [2] 李育宗, 袁亮, 张庆贺, 等. 含结构面岩体岩爆特征真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(01): 120-132. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0133.
LI Y Z, YUAN L, ZHANG Q H, et al. True-triaxial experimental study on the rockburst characteristics of rock mass with a structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(01): 120-132. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0133.
- [3] 朱金养, 郭浩森, 罗文俊. 深埋硬岩隧洞岩爆风险与结构面倾角关系探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(01): 60-69. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20201208003.
ZHU J Y, GUO H S, LUO W J. Discussion on Relationship between Rockburst Risk and Structural Plane Inclination of Deep Hard Rock Tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(01): 60-69. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20201208003.
- [4] 周子龙, 卢双全, 唐雯钰. 不同剪切速率下软弱结构面抗剪特性分析[J]. 有色金属工程, 2019, 9(04): 79-85.
ZHOU Z L, LU S Q, TANG W Y. Analysis of shear properties of soft structure plane with different shear rates[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(04): 79-85.
- [5] SHU P Y, LI H H, WANG T T, et al. Dynamic strength of rock with single planar joint under various loading rates at various angles of loads applied [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 545-554. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.01.005.
- [6] Zhang X B, Yi B, Jiang Q H, et al. Evaluation Models for the Peak Shear-Strength and Shear-Resistance Components of Rough Rock Joints[J]. Journal of testing and evaluation, 2017; 45(6): 2128-2138.
- [7] ZOU J P, HU X Y, JIAO Y Y, et al. Dynamic Mechanical Behaviors of Rock's Joints Quantified by Repeated Impact Loading Experiments with Digital Imagery[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55: 7035-7048.
- [8] 张磊, 王文帅, 苗春贺, 等. 花岗岩粗糙表面动摩擦形态演化[J]. 高压物理学报, 2021, 35(03): 25-35.
ZHANG L, WANG W S, MIAO C H, et al. Rough surface morphology of granite subjected to dynamic friction[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(03): 25-35.
- [9] 程正坤, 廖日东, 李玉婷, 等. 表面形貌对应力集中系数的影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(03): 231-236. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.03.003.
CHENG Z K, LIAO R D, LI Y T, et al. Effect of surface Topography on stress concentration factor[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(03): 231-236. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.03.003.
- [10] ZHANG Q X, MO J L, XIANG Z Y, et al. The influence of interfacial wear characteristics on stick-slip vibration[J]. Tribology International, 2023, 185: 108535.
- [11] 崔国建, 张传庆, 周辉, 等. 动力扰动作用下多功能岩石结构面剪切试验装置研制与应用研究[J]. 岩土力学,

- 2022,43(06):1727-1737. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1592.
- CUI G J, ZHANG C Q, ZHOU H, et al. Development and application of multifunctional shear test apparatus for rock discontinuity under dynamic disturbance loading[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(06):1727-1737. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1592.
- [12] 宋保江,阎绍泽.界面黏滑摩擦现象的研究进展[J].中国机械工程,2017,28(13):1513-1522.
- SONG B J, YAN S Z. Research progresses on interfacial stick-slip frictions[J]. China Mechanical Engineering,2017,28(13):1513-1522.
- [13] 焦峰,许江,彭守建,等.常法向刚度条件下人工结构面剪切力学特性及损伤演化规律试验研究[J].煤炭学报,2023,48(11):4065-4077. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1819.
- JIAO F, XU J, PENG S J, et al. Experimental study on shear mechanical properties and damage evolution of artificial structural plane under constant normal stiffness[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(11):4065-4077. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1819.
- [14] 刘峰.动力扰动下岩体结构面力学特性及在露井联采工程中应用研究[D].辽宁工程技术大学,2019. DOI: 10.27210/d.cnki.glnju.2019.000529.
- LIU F. Mechanical Characteristics of Rock Mass Discontinuities under Dynamic Disturbance and Application in Open-underground Combined Mining[D]. Liaoning Technical University,2019. DOI: 10.27210/d.cnki.glnju.2019.000529.
- [15] 孙广忠.岩体结构力学[M].北京:科学出版社,1988:124-127.
- SUN G Z. Structural mechanics of rock mass[M]. Beijing: Science Press,1988:124-127.
- [16] 刘红岩,吕淑然,张力民.基于组合模型法的贯通节理岩体动态损伤本构模型[J].岩土工程学报,2014,36(10):1814-1821.
- LIU H Y, LV S R, ZHANG L M. Dynamic damage constitutive model for persistent jointed rock mass based on combination model method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(10):1814-1821.
- [17] 李夕兵,王卫华,马春德.不同频率载荷作用下的岩石节理本构模型[J].岩石力学与工程学报,2007,(02):247-253.
- LI X B, WANG W H, MA C D. Constitutive model of rock joints under compression loads with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,(02):247-253.
- [18] 邓建,肖明,谢冰冰,等.循环荷载下岩体结构面本构关系与积分算法研究[J].岩土工程学报,2017,39(06):1048-1057.
- DENG J, XIAO M, XIE B B, et al. Constitutive relation and integration algorithm for rock discontinuities under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(06):1048-1057.
- [19] 夏才初,金磊,郭锐.参数非线性理论流变力学模型研究进展及存在的问题[J].岩石力学与工程学报,2011,30(03):454-463.
- XIA C C, JIN L, GUO R. Nonlinear theoretical rheological model for rock: a review and some problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(03):454-463.
- [20] 虎积元,盛冬发,陈泰聪,等.岩石三维非线性黏弹塑性损伤蠕变模型研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2024,41(02):36-42.
- HU J Y, SHENG D F, CHEN T C, et al. Study on 3D Nonlinear viscoelastic-plastic damage creep model of rock[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2024,41(02):36-42.
- [21] 钱帅帅.基于速率-状态依赖摩擦定律的断层亚失稳过程的连续-非连续方法模拟[D].辽宁工程技术大学,2021. DOI: 10.27210/d.cnki.glnju.2021.000146.
- QIAN S S. Numerical simulation of the meta-instability stage of the fault based on the rate and state dependent friction law by use of the continuum discontinuum Method[D]. Liaoning Technical University,2021. DOI: 10.27210/d.cnki.glnju.2021.000146.
- [22] 侯红娟,许强,吴金辉.岩质斜坡动力响应特性的结构面效应研究[J].世界地震工程,2015,31(01):224-231.
- HOU H J, XU Q, WU J H. Study on structural surface effect of dynamic response characteristics of rock slopes[J]. World

- Earthquake Engineering, 2015, 31(01): 224-231.
- [23] 郎颖娟,梁正召,钱希坤,等.岩体结构面对应力波传播及动态破坏影响研究[J].地下空间与工程学报, 2023,19(06):1896-1906.
LANG Y X, LIANG Z Z, QIAN X K, et al. Study on the influence of rock mass structural plane on stress wave propagation and dynamic failure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(06): 1896-1906.
- [24] 丁黄平.节理裂隙岩体隧道爆破成型效果研究[D].吉林大学,2009.
DING H P. Study on the blasting shaping effect of jointed fractured rock mass tunnels[D]. Jilin University, 2009.
- [25] 窦林名,何江,曹安业,等.动载诱发冲击机理及其控制对策探讨[C]//中国煤炭学会.中国煤炭学会成立五十周年高层学术论坛论文集.中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室矿业工程学院,2012:6.
DOU L M, HE J, CAO A Y, et al. Discussion on the mechanism of dynamic load-induced impact and its control countermeasures[C]//Chinese Society for Coal. Proceedings of the High-Level Academic Forum for the 50th Anniversary of the Chinese Society for Coal. School of Mining Engineering, National Key Laboratory for Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, 2012: 6.
- [26] MENG F Z, WONG Y, ZHOU H, et al. Shear Rate Effects on the Post-peak Shear Behaviour and Acoustic Emission Characteristics of Artificially Split Granite Joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2019,52:2155-2174.
- [27] Wang F L, WU B B, WANG S H, et al. Shear response of rough rock discontinuities subjected to impact loading: experimental study and theoretical modelling[J]. Lithosphere,2022,11:1-10.
- [28] M K JAFARI, K AMINI HOSSEINI, F PELLET, et al. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2003,23:619-630.
- [29] ZHOU X P, HE Y, SHOU Y D. Experimental investigation of the effects of loading rate, contact roughness, and normal stress on the stick-slip behavior of faults[J]. Tectonophysics, 2021, 816: 1-14.
- [30] 王斐笠,郑鸿康,王述红,等.不同剪切历史下结构面的剪切特性和滑移特征[J/OL].金属矿山,1-12[2024-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20240408.0959.002.html>.
WANG F L, ZHENG H K, WANG S H, et al. Shear Behaviors and Slip Characteristics of Rock fractures under Different Shear Histories[J/OL]. Metal Mine,1-12[2024-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20240408.0959.002.html>.
- [31] ZHOU T, HAN Z, LI D, et al. Experimental study of the mechanical and fracture behavior of flawed sandstone subjected to coupled static-repetitive impact loading[J].Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2022,117:103161.
- [32] XIAO P, LI D, ZHAO G, et al. Mechanical properties and failure behavior of rock with different flaw inclinations under coupled static and dynamic loads[J]. Journal of Central South University, 2020,27(10):2945-2958.
- [33] QIU J, LI D, LI X, et al. Dynamic Fracturing Behavior of Layered Rock with Different Inclination Angles in SHPB Tests[J]. Shock and Vibration, 2017,2017:7687802.
- [34] 李业学,刘建锋,秦丽.应力波穿越岩石节理时能量耗散规律的实验研究[J].实验力学,2011,26(01):85-90.
LI Y X, LIU J F, QIN L. Experimental study on the energy dissipation law of stress waves crossing rock joints[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(01): 85-90.
- [35] 唐红梅,陈涛,鲜学福.岩体结构面蠕变损伤机理研究[J].工程地质学报,2009,17(3): 357-362.
TANG H M, CHEN T, XIAN X F. Mechanism of creep damage on structure plane in rock mass[J]. Journal of Engineering Geology,2009,17(3): 357-362.
- [36] 张为芳.含倾斜软弱结构面砂岩流变特性研究[D].湖南科技大学,2018. DOI: 10.27738/d.cnki.ghnkd.2018.000175.
ZHANG W F. Study on the rheological properties of sandstone with slanted weak structural surface[D]. Hunan University of Science and Technology,2018. DOI: 10.27738/d.cnki.ghnkd.2018.000175.
- [37] 张占荣.裂隙岩体变形特性研究[D].中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2010.
ZHANG Z R. Study on deformation properties of fractured rock mass[D]. Graduate School of Chinese Academy of

- Sciences (Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics) ,2010.
- [38] Wang F L, XIA K W, YAO W, et al. Slip behavior of rough rock discontinuity under high velocity impact: Experiments and models[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,2021,144:104831.
- [39] 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):2215-2221.
DENG S X, WANG M Y, LI J, et al. Simulation tests and mechanism discussion of slip-type rockburst under impact disturbance[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(12): 2215-2221.
- [40] 申辉,刘亚群,刘博,等.岩石节理剪切力学特性的非线性理论模型研究[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(12):2421-2433. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0661.
SHEN H, LIU Y Q, LIU B, et al. Study on the nonlinear theoretical model of shear mechanical characteristics of rock joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(12): 2421-2433. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0661.
- [41] 王明洋,李杰,李凯锐.深部岩体非线性力学能量作用原理与应用[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(4):659-667. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.04.002.
WANG M Y, LI J, LI K R. A nonlinear mechanical energy theory in deep rock mass engineering and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 659-667.(in Chinese). DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.04.002.
- [42] 李杰,王明洋,蒋海明等.爆炸与冲击中的非线性岩石力学问题(I):一维块系岩体波动特性的试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2018,37(1):38-50. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0490.
LI J, WANG M Y, JIANG H M, et al. Nonlinear mechanics problems in rock explosion and shock. Part I: Experimental research on the propagation properties of one dimensional block rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2018,37(1):38-50. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0490.
- [43] 王明洋,戚承志,钱七虎.深部岩体块系介质变形与运动特征研究[J].*岩石力学与工程学报*,2005,24(16):2825-2830.
WANG M Y, QI C Z, QIAN Q H. Study on deformation and motion characteristics of blocks in deep rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2005,24(16):2825-2830.
- [44] 王明洋,周泽平,钱七虎.深部岩体的构造和变形与破坏问题[J].*岩石力学与工程学报*,2006,25(3):448-455.
WANG M Y, ZHOU Z P, QIAN Q H. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2006,25(3):448-455.
- [45] 陶明.高应力岩体的动态加卸载扰动特征与动力学机理研究[D].中南大学,2013.
TAO M. Study on dynamic loading and unloading disturbance characteristics and dynamic mechanism of high-stress rock mass[D]. Central South University, 2013.
- [46] 冯帆,赵兴东,陈绍杰,等.结构面位置对于深部高应力采动硬岩巷道破坏的影响[J].*中南大学学报(自然科学版)*,2021,52(08):2588-2600.
FENG F, ZHAO X D, CHEN S J, et al. Influence of structural surface position on the failure of deep high-stress hard rock roadways under mining-induced stress[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(08): 2588-2600.
- [47] 周辉,孟凡震,张传庆,等.深埋硬岩隧洞岩爆的结构面作用机制分析[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(04):720-727. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.04.008.
ZHOU H, MENG F Z, ZHANG C Q, et al. Analysis of the structural surface mechanism in deep-buried hard rock tunnel rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(04): 720-727. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.04.008.
- [48] FENG F, LI X B, JAMAL R, et al. Modeling hard rock failure induced by structural planes around deep circular tunnels[J]. *Engineering Fracture Mechanics*,2018,205:152-174. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.10.010.
- [49] 赵光明,许文松,孟祥瑞,等.扰动诱发高应力岩体开挖卸荷岩失稳机制[J].*煤炭学报*,2020,45(03):936-948. DOI:

- 10.13225/j.cnki.jccs.SJ20.0133.
ZHAO G M, XU W S, MENG X R, et al. Instability mechanism of surrounding rock in high-stress rock mass under excavation unloading induced by disturbance[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(03): 936-948. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.SJ20.0133.
- [50] 鲁俊.深部煤岩真三轴力学响应特性及复合动力灾害研究[D].重庆大学,2020. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.000490.
LU J. Study on mechanical response characteristics of deep coal-rock under true triaxial stress and composite dynamic disasters[D]. Chongqing University, 2020. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.000490.
- [51] 任建喜,云梦晨,张琨,等.静动组合三轴加载煤岩强度劣化试验研究[J].煤炭科学技术,2021,49(11):105-111. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021.11.014.
REN J X, YUN M C, ZHANG K, et al. Experimental study on strength degradation of coal-rock under static and dynamic combined triaxial loading[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 105-111. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021.11.014.
- [52] 李夕兵,宫凤强.基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J].煤炭学报,2021,46(03):846-866. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YT21.0176.
LI X B, GONG F Q. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(03):846-866. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YT21.0176.
- [53] 杨嘉楠,范鹏贤,王德荣.深埋岩体结构面受扰破坏失稳研究进展[J].防护工程,2022,44(05):68-78.
YANG J N, FAN P X, WANG D R. Review on dynamic disturbance induced failure and instability of deep-buried rock mass discontinuity[J]. Protective Engineering,2022,44(05):68-78.
- [54] 李杰,蒋海明,王明洋,等.爆炸与冲击中的非线性岩石力学问题(II):冲击扰动诱发岩块滑移的物理模拟试验[J].岩石力学与工程学报,2018,37(02):291-301. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0684.
LI J, JIANG H M, WANG M Y, et al. Nonlinear mechanical problems in rock explosion and shock. Part II: Physical model test on sliding of rock blocks triggered by external disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(02):291-301. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0684.
- [55] 于永江,刘峰,岳宏亮,等.不同倾角岩体结构面在循环动力扰动下的力学特性[J].煤炭学报,2020,45(11):3748-3758. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1344.
YU Y J, LIU F, YUE H L, et al. Mechanical properties of discontinuity in rock mass with different inclination angles under cyclic dynamic disturbance[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(11):3748-3758. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1344.
- [56] Feng P, Dai F, Liu Y, et al. Effects of coupled static and dynamic strain rates on mechanical behaviors of rock-like specimens containing pre-existing fissures under uniaxial compression [J]. Canadian Geotechnical Journal,2018, 55 (5): 640-652.
- [57] 崔峰,来兴平,曹建涛,等.矿山动力灾害发生机理与防治策略[J].煤矿安全,2017,48(01):191-194+198. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2017.01.052
CUI F, LAI X P, CAO J T, et al. Mechanism and Prevention Strategies of Mine Dynamic Disasters[J]. Coal Mine Safety, 2017, 48(01): 191-194+198. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2017.01.052.
- [58] 赵康,赵红宇,贾群燕.岩爆岩石断裂的微观结构形貌分析及岩爆机理[J].爆炸与冲击,2015,35(06):913-918.
ZHAO K, ZHAO H Y, JIA Q Y. An analysis of rockburst fracture micromorphology and study of its mechanism[J]. Explosion and Shock Waves,2015,35(06):913-918.
- [59] 苏国韶,刘鑫锦,闫召富,等.岩爆预警与烈度评价的声音信号分析[J].爆炸与冲击,2018,38(04):716-724.
SU G S, LIU X J, YAN Z F, et al. Sound signal analysis for warning and intensity evaluation of rockburst[J]. Explosion and Shock Waves,2018,38(04):716-724.
- [60] HE M C, REN F Q, LIU D Q. Rockburst mechanism research and its control[J]. International Journal of Mining Science

- and Technology, 2018,28(5), 829-837.
- [61] 冯夏庭,肖亚勋,丰光亮,等.岩爆孕育过程研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(04):649-673. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0103.
FENG X T, XIAO Y X, FENG G L, et al. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(04):649-673. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0103.
- [62] 刘岩鑫,蒋剑青,苏国韶,等.弱动力扰动对花岗岩圆形隧洞岩爆影响的试验研究[J].爆炸与冲击,2020,40(09):88-99. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0003.
LIU Y X, JIANG J Q, SU G S, et al. Experimental study on influence of weak dynamic disturbance on rockburst of granite in a circular tunnel[J]. Explosion and Shock Waves,2020,40(09):88-99. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0003.
- [63] 刘啸,华心祝,黄志国,等.应力波作用下含大型结构面岩体垮塌动力失稳机制[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):2003-2014. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0395.
LIU X, HUA X Z, HUANG Z G, et al. Dynamic collapse mechanisms of rock mass with large structural planes under stress waves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(10):2003-2014. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0395.
- [64] 康红普,杨景贺.锚杆组合构件力学性能实验室试验及分析[J].煤矿开采,2016,21(03):1-6. DOI: 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2016.03.001.
KANG H P, YANG J H. Laboratory Experiment and Analysis on Mechanical Performances of Rock Bolt Components[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering,2016,21(03):1-6. DOI: 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2016.03.001.
- [65] 李建忠,康红普,高富强,等.原岩应力场作用下的锚杆支护应力场及作用分析[J].煤炭学报,2020,45(S1):99-109. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1410.
LI J Z, KANG H P, GAO F Q, et al. Analysis of bolt support stress field and bolt support effect under in-situ stress field[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(S1):99-109. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1410.
- [66] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J].岩石力学与工程学报,2021,40(01):1-30. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0072.
KANG H P. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(01):1-30. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0072.
- [67] 陶志刚,林伟军,李勇,等.NPR 锚索对跨断层软岩大变形隧道控制技术研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(S1):113-123.
TAO Z G, LIN W J, LI Y, et al. Control Technology of Negative Poisson's Ratio Anchor Cable for Large Deformation Tunnel Across Faulted Soft Rocks[J]. Tunnel Construction,2024,44(S1):113-123.
- [68] 陶志刚,韩惠,明伟,等.新型 NPR 锚杆支护系统抗动力冲击试验研究[J].煤炭学报,2023,48(05):2008-2021. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0239.
TAO Z G, HAN H, MING W, et al. Experimental study on dynamic impact resistance of new NPR bolt support[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(05):2008-2021. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0239.
- [69] HE M C, GONG W L, WANG J, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67: 29-42.
- [70] 何满潮,杜帅,宫伟力,等.负泊松比锚杆/索力学特性及其工程应用[J].力学与实践,2022,44(01):75-87.
HE M C, DU S, GONG W L, et al. Mechanical characteristics and engineering applications of bolt/cable with negative poisson's ratio[J]. Mechanics in Engineering,2022,44(01):75-87.
- [71] 单仁亮,全潇,黄鹏程,等.管索组合结构及其力学性能研究[J].岩土力学,2022,43(03):602-614. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0764.
SHAN R L, TONG X, HUANG P C, et al. Research on the anchor cable combined with the c-shaped tube and the mechanical properties[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(03):602-614. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0764.

- [72] SHAN R L, XIAO S C, LI Y Z, et al. Study on numerical simulation and mechanical properties of anchor cable with C-shaped tube subjected to shearing[J]. Scientific Reports,2024,14,7425
- [73] 单仁亮,宋威,张书鹏,等.巷道支护管索组合结构剪切力学响应精细有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2024,43(07):1561-1579. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0835.
SHAN R L, SONG W, ZHANG S P, et al. Precise finite element analysis of shear mechanical responses of anchor cables with C-shaped tube in roadway support[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(07):1561-1579. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0835.
- [74] 单仁亮,全潇,代卫林,等.管索组合结构支护新技术及其在深部大变形巷道应用研究[J].矿业科学学报,2023,8(01):39-49. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2023.01.004.
SHAN R L, TONG X, DAI W L, et al. Research on the new technology of anchor cable with C-shaped tube support and its application in deep large deformation roadway[J]. Journal of Mining Science and Technology,2023,8(01):39-49. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2023.01.004.
- [75] SHAN R L, XIAO S C, LIANG J Q, et al. Study on the double-sided shear test and three-dimensional numerical simulation of anchor cable with C-shaped tube[J]. Structures,2024,61:106065.
- [76] 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,(11):1844-1851.
PAN Y S, LI Z H, ZHANG M T. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,(11):1844-1851.
- [77] 潘一山,宋义敏,刘军.我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J].岩石力学与工程学报,2023,42(09):2081-2095. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.1048.
PAN Y S, SONG Y M, LIU J. Pattern, change and new situation of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(09):2081-2095. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.1048.
- [78] 王国法,潘一山,赵善坤,等.冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采[J].煤炭科学技术,2024,52(1):1-14.
WANG G F, PAN Y S, ZHAO S K, et al. How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam[J]. Coal Science and Technology,2024,52(1):1-14.
- [79] KANG H P, JIANG P F, FENG Y J, et al. Application of large-scale hydraulic fracturing for reducing mining-induced stress and microseismic events: a comprehensive case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2023,56(2):1399-1413.
- [80] 夏永学,潘俊锋,谢非,等.特厚煤层大巷复合构造区重复冲击致灾机制及控制技术[J].岩石力学与工程学报,2022,41(11):2199-2209. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0045.
XIA Y X, PAN J F, XIE F, et al. Disaster mechanism and control technology of large roadway group with repeated impact in extra-thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(11):2199-2209. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0045.
- [81] 潘一山,肖永惠,罗浩,等.冲击地压矿井安全性研究[J].煤炭学报,2023,48(5):1846-1860.
PAN Y S, XIAO Y H, LUO H, et al. Study on safety of rock burst mine[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(5):1846-1860.