

隧道围岩结构面倾角对诱发岩爆的影响研究

周雄¹, 孟凡震¹, 修占国¹, 岳祝凤², 王玮², 崔广昊², 王在泉¹

(1. 青岛理工大学理学院, 山东青岛 266000;

2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东青岛 266000)

摘要: 为了解结构面倾角对诱发岩爆动力失稳行为的影响, 通过采用 GDEM 数值模拟软件, 开展了含不同角度闭合多节理的直墙拱形隧道在全断面开挖卸荷作用后对诱发结构面型岩爆的数值模拟研究, 分析了隧道在开挖卸荷下围岩的裂纹扩展行为、应力变化、碎块体的体积与块体的弹射速度等力学特征。研究表明, 由于围岩内节理倾角空间位置的不同, 导致在隧道开挖卸荷后, 容易在节理尖端围岩处形成应力集中, 造成不同程度的应力重分布, 改变了围岩裂纹的扩展行为和承载能力。且围岩破坏模式受结构面倾角的影响明显, 缓倾角强化了结构面的抗剪切作用, 不易形成岩爆。陡倾角易诱发压剪滑移破坏, 诱发岩爆。研究结果对含节理隧道的开挖设计与灾害防治有重要的工程意义和学术价值。

关键词: 直墙拱形隧道; 岩爆; 开挖卸荷; 结构面倾角; 连续与非连续的数值方法 (CDEM)

中图分类号: U455; TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)04-0094-07

Influence of Structural Plane Inclination Angle on Induced Rock Burst in Deep Tunnels

ZHOU Xiong¹, MENG Fanzhen¹, XIU Zhanguo¹, YUE Zhufeng², WANG Wei²,
CUI Guanghao², WANG Zaiquan¹

(1. College of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266000, China;

2. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: In order to understand the influence of structural plane dip Angle on the dynamic instability behavior of induced rock burst, a straight wall arch tunnel with multiple joints closed at different angles was carried out by using GDEM numerical simulation software. After full section excavation and unloading, the induced rock burst of structural plane was numerically simulated. The mechanical characteristics of surrounding rock such as crack propagation behavior, stress variation, volume and ejection velocity of the block under tunnel excavation and unloading are analyzed. The results show that the different degrees of stress concentration can be easily produced at the tip of the joint after the tunnel excavation, due to the difference in the spatial position of the structural plane. As a result, the difficulty of the crack generation in the surrounding rocks is varying, which changes the crack propagation behavior and bearing capacity of the surrounding rocks. The failure modes of the surrounding rock are obviously affected by the structural plane inclination angle. The gentle inclination angle strengthens the anti-shear behavior of the structural plane, resulting in no or slight rock burst. A steep inclination angle can easily induce rock burst due to the compression-shear slip failure of structural planes. The research results have great engineering and academic values for the excavation design and disaster prevention of the jointed tunnel.

Keywords: straight wall arch tunnel; rock burst; excavation unloading; structural plane inclination; continuous-based discrete element method (CDEM)

收稿日期: 2023-03-21

修稿日期: 2023-04-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51879135; 42272334); 山东省泰山学者青年专家项目, 山东省青创团队 (2019KJG002)

作者简介: 周雄 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩石力学与地下工程。E-mail: 2511684319@qq.com

通讯作者: 孟凡震 (1988—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的研究工作。E-mail: xuelianmfzh@163.com

经过漫长的地质构造运动,工程岩体内广泛存在裂纹、节理和断层等不同尺度的结构面^[1],随着地下工程埋深的增加,富含结构面的围岩体将处于高应力的环境中^[2],结构面的存在对深部围岩的整体性、变形与强度等特征均产生较大的影响。随着工程的开挖卸荷扰动,极易造成围岩失稳破坏,诱发严重的动力地质灾害现象——岩爆^[3]。隧道开挖卸荷打破了围岩初始应力的平衡状态,围岩应力重新分布,导致隧道边墙所存储的弹性能被剧烈释放,引起碎块体的爆裂剥落弹射或抛掷等现象^[4-5]。在西部大开发、一带一路等众多国家战略深部地下工程施工中,不难发现岩体结构面的存在对一些岩爆灾害的诱发起着关键性作用,甚至引发极强的岩爆现象^[6-7]。岩爆灾害会导致工程延期、设备损坏以及造成大量直接或间接的经济损失,严重时造成重大的人员伤亡。在深部工程中,高强度硬岩在高地应力环境下储存了大量的能量,为岩爆的诱发提供了必要的基础条件,而结构面的弱化作用增大了诱发岩爆的可能性。

基于数值仿真技术,在结构面对岩爆孕育演化的研究方面已取得了丰富的研究成果^[8]。朱帝杰等^[9]基于 RFPA2D 软件,以单裂隙岩体为研究对象,探讨了卸荷条件下裂隙几何参数及卸荷速率对裂隙扩展、岩样破坏及应变型岩爆的影响。李守国等^[10]基于摩尔-库伦准则构建了含逆断层隧洞的应变软化数值计算模型,以此探究断层倾角对诱发岩爆的影响。袁彬等^[11]通过 UDEC 离散元软件研究了结构面的位置分布(间距和倾角)对隧道围岩稳定性与结构面剪切滑移破坏特征的影响,认为围岩变形的裂化损伤受结构面倾角的影响很显著。李地元^[12]通过 FLAC3D 三维数值计算,从时间和空间的角度探究了高地应力条件下秦岭终南山隧道应变型岩爆的发展过程及发生机理,且利用最大切应力判据预测了岩爆的发生及岩爆强度。

上述研究主要是基于连续的有限元数值方法或非连续的离散元数值方法,以此来探究含不同产状的单组结构面的隧洞,在开挖作用下对圆形隧(巷)道围岩的破坏和岩爆的影响,而缺乏对含多组不同产状结构面组合的硬岩直墙拱形隧道在开挖卸荷作用下对围岩破裂和岩爆诱发的影响研究。岩体破坏是连续到非连续离散耦合的渐进过程^[13],为了解多组结构面空间位置的分布对岩爆诱发的演化过程与破碎围岩体力学运动特征的影响,本文采用基于连续与非连续的数值方法为理论基础的数值模拟仿真软件 GDEM 中的 Block dyna 模块,构建边墙含不同角

度的多组结构面的直墙拱形的二维隧道,模拟研究隧道在全断面开挖卸荷作用下对诱发岩爆的影响。

1 GDEM 数值模拟方案

1.1 GDEM 软件的数值方法

GDEM 是一款可显式计算模拟的大型数值软件,该软件是以 CDEM (continuum-discontinuum element method, CDEM) 数值理论的计算方法为基础,同时采用 GPU 进行加速计算。而 CDEM 的核心算法是源于拉格朗日方程的连续-非连续单元的数值方法,由此能实现介质材料从连续大变形到非连续离散破裂变形演化全过程的动态模拟^[14]。

图 1 为 CDEM 的数值计算模型,其数值模型主要由块体与块体间的接触界面组成。其中块体的构成可以由任意个有限元单元组成,通过有限元的迭代计算,用以表征介质材料的大变形、塑性损伤等连续特性。而块体间的界面接触是通过在单元节点上虚设(法向和切向)弹簧单元,块体之间因弹簧单元的存在进行力学信息的传递作用,由离散元数值计算,通过弹簧的断裂来表征材料的裂化损伤、块体间的碰撞以及动力失稳滑移等非连续特征。而在 GDEM 数值软件中,其界面的设置主要包含两种,真实界面和虚拟界面,真实界面就是实际天然岩体中富含的节理、裂隙等不连续的结构面,虚拟界面就是块体间虚设的 6 个弹簧单元。块体单元内部的迭代计算与界面间弹簧单元断裂机制的相互作用,可以实现介质材料逐渐断裂破碎演化过程中一系列力学运动的非线性特征。

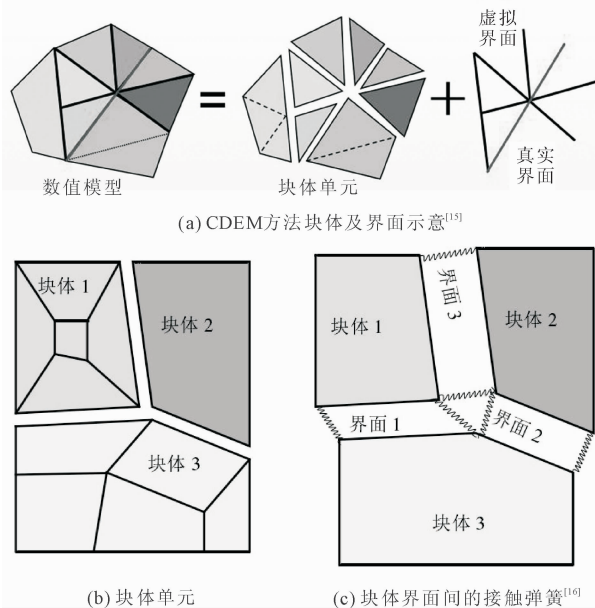


图 1 CDEM 数值方法计算原理

1.2 数值模拟流程

岩爆的孕育是一个动态演化的过程,数值模拟的具体流程主要包括:几何模型的创建、模型块体单元和界面本构的选取、单元参数的设置、模型边界(位移、应力)条件的施加、计算求解、数据结果分析等。

模型选取的计算尺寸为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$,隧道尺寸为拱形半径为 4 m 、洞壁直边墙为 6 m 。数值模拟需同时考虑固体单元与虚拟界面的本构模型,岩体单元采用线弹性本构模型,单元间的接触面采用 Mohr-Coulomb 断裂能本构模型。模型的基本参数设置如表 1 所示^[17-18]。其中,黏聚力为正态分布,以此表征岩体的非均质性。模型边界采用均布荷载力施加,其加载形式与信息监测点设置如图 2(a)、图 2(b)所示。

表 1 岩体力学参数^[17-18]

密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	摩擦角 /($^{\circ}$)	剪胀角 /($^{\circ}$)
2800	35	0.25	18	7	45	15

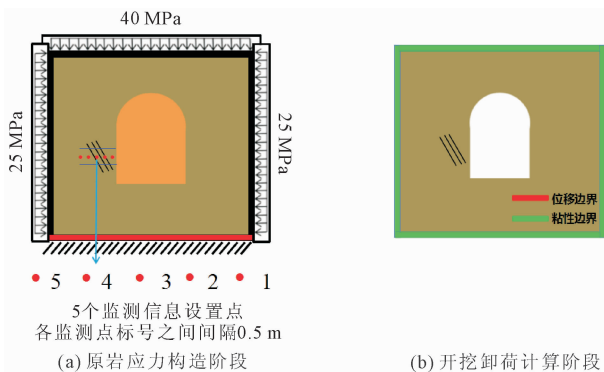


图 2 模拟流程图及计算示意图

数值模拟的计算过程分为以下三个步骤:

(1) 构造初始应力阶段:通过对模型边界条件的施加,开始弹塑性阶段的平衡计算,计算直到收敛稳定,以此构造原岩应力状态。

(2) 动力计算前边界条件设置:对模型计算稳定收敛时单元的位移清零,同时将边界的约束限制条件更改设置为黏性边界条件。其作用是为了在进行动力计算时,能将传递到边界处的应力波进行吸收,避免应力波虚假反射,防止计算出现不准确性。

(3) 开挖卸荷动力计算阶段:几何模型创建时,对模型的块体进行不同的组号设定。开挖卸荷计算时,只要将需要开挖部分的块体组号设置为空单元,由此模拟隧道开挖卸荷扰动阶段的计算。

模型计算的整个过程中,可清晰呈现出围岩的破

坏起裂、延伸、弹射飞溅的过程。碎块体的抛掷飞溅来源于虚拟界面所设置的弹簧单元,当达到弹簧单元的断裂强度时,弹簧发生断裂围岩裂化,造成岩体剥离母岩,弹射飞出。

1.3 具体的数值模拟方案

本文通过在围岩内设置不同角度 (30° 、 60° 、 90° ,倾角为结构面与水平方向的夹角)的多组闭合结构面,以此探讨隧道开挖卸荷后,结构面倾角对岩爆演化过程的影响,数值模拟方案如图 3 所示。

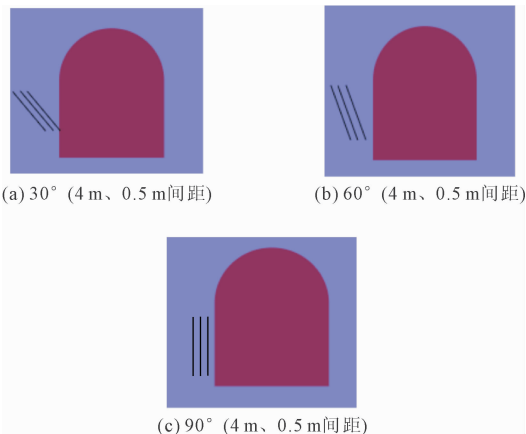


图 3 数值模拟方案

2 模拟结果与分析

2.1 节理角度对直墙拱型隧道破坏特性的影响

当结构面角度为 30° 分布时,可见第一条结构面呈已揭露状态(见图 4(a)画实线箭头),且第一条结构面尖端下侧(见图 4(a)画虚线箭头)由于与临空面洞壁相交,易于裂纹的起裂演化而扩展贯通。由图 4(a)所示,开挖卸荷后,三条节理下侧尖端的翼裂纹同时萌生,裂纹沿着洞壁延伸扩展,致使临空洞壁围岩体发生局部剥落;且随着计算时步的增加(见图 4(b),图 4(c)),围岩内相对深部的裂纹逐渐穿切结构面并持续向竖向加载方向扩展,且洞壁的竖向裂纹逐渐向边墙的拱顶和底角处持续延伸发展,并与临空面贯通,造成围岩更大范围内的裂化剥落现象(图 4(b))。随着计算进一步的进行,由于外侧围岩的破坏失稳,围岩中的应力不断向深部转移,裂纹相互联结分割岩体,致使各岩体相互剪切破裂并贯通临空面,最终诱发大片状块体的滑落(图 5(a)中数字 2、3 黄红部分较多——图 5 为隧道断面最终的破坏模式云图,图中 0 代表未破坏、1 代表拉破坏、2 代表剪破坏、3 代表拉剪破坏),且伴随着岩

体小碎块的飞溅,无明显岩爆现象的产生,围岩的裂化主要为静态的脆性破坏。

图 4(d)—图 4(f) 显示的是结构面角度为 60° 分布时,结构面均未揭露,第一条节理下侧尖端距离左边墙拱脚处较近(图 4(d)画实线箭头),但与 30° 时的同条节理相比较,其距离临空面较远,裂纹不易扩展。洞壁径向应力卸除后,裂纹始于第一个(图 4(d)画虚线箭头)倾斜结构面下尖端上盘部分,与预制节理方向成 45° 演化扩展(即近似平行于竖直边墙),之后逐渐沿竖向加载方向持续延伸,最终转向与预制节理呈接近 135° 方向继续扩展,并与隧道临空面贯通,裂纹的扩展路径展现出倒 Z 型演化,其演化过程中形成了第一个剪切区域(图 4(f)中上侧椭圆虚线区域)。与此同时,第一条结构面下侧尖端的岩体部分,其衍生的次生裂纹的扩展演化过程滞后于结构面上盘,渐进向拱脚延伸扩展,其余两条

节理下侧尖端处围岩的裂纹逐渐沿着预制节理面方位延伸扩展,损伤逐渐加剧,致使节理上部围岩剪切滑移与节理下部围岩体形成挤压,导致倾斜节理上下围岩体间相互压剪作用,逐渐被切割成不同产状大小的片状块体,其该演化过程中形成了第二个剪切区域(图 4(f)中下侧椭圆虚线区域),即节理围岩区域内,岩体沿节理面加剧了块体之间因相互错动的的作用,从而诱发了强烈的剪切破裂型岩爆,并形成了 1.5 m 深度的 V 型爆坑,爆裂体喷发弹射而出,产生了大量薄板状或片帮块体以及少量岩体碎块。另外在靠近边墙处第一条结构面与边墙围岩之间的岩石出现劈裂破坏,形成了具有一定厚度的新岩板,最终诱发岩板屈曲失稳折断弹射。因此对于含 60° 结构面的围岩,既有剪切滑移破坏(内部围岩),也有劈裂张拉屈曲破坏发生(表层围岩),具体见图 5(b)所示。



图 4 含不同倾角节理围岩破坏的演化进程 Y 方向应力云图

而当结构面角度为 90° 分布时, 结构面也未揭露, 由图 4(g)、图 4(h) 可知, 裂纹同样从节理两翼尖端萌生, 并向节理面之间的岩板内持续扩展延伸, 并且结构面与临空面之间未裂化的岩体其储能不断积累加剧, 应力云图 4(g)、图 4(h) 显示中间节理岩板未裂化岩体的应力范围由 $20 \text{ MPa} \sim 30 \text{ MPa}$ 增大到 $30 \text{ MPa} \sim 50 \text{ MPa}$, 随着破碎带不断扩大, 从而在靠近隧洞边缘的第一块岩板承载的上下端部发生剪断失稳破坏, 第二、三块节理岩板(第二三条节理间的围岩体)被压致劈裂而逐渐板裂化, 进一步形成了新的岩板, 弯曲鼓裂, 最终诱发岩板的屈曲失稳而折断弹射, 向外膨胀, 形成大片状岩块弹射和岩板端部小片帮岩块脱落, 诱发了强烈岩爆并形成约 1.2 m 深度的爆坑, 围岩最终破坏的断面形貌特征呈现为平底锅状的爆坑, 围岩整体破坏呈现出典型的张拉-屈曲-剪切复合型破坏, 见图 5(c) 所示。

综上, 结构面角度的不同, 致使裂纹演化的难易程度与力学机制不同。 30° 已揭露结构面上下侧岩体间裂纹扩展的难易程度近似, 裂纹同时起裂延伸, 均匀分布于节理围岩之间, 造成岩体被分割, 主要呈现为岩体间的相互剪切贯通而竖向剥离滑落, 发生典型的张拉-剪切复合型脱落破坏。 60° 未揭露结构面远离临空面, 导致节理上下围岩体裂纹的孕育

起裂存在先后, 容易引起结构面上覆围岩与下部的围岩形成挤压, 沿着预制结构面发生剪切滑移, 整体呈现出张拉-压剪滑移破坏的特征, 以及边墙表层围岩劈裂形成新岩板的屈曲失稳, 最终诱发强烈的剪切破裂型岩爆, 并形成了较深的破碎带且其爆坑深度受硬性结构面控制。可见 30° 与 60° 在节理面上盘围岩的破坏相似, 其两者破坏的区别主要呈现为节理下部围岩破坏演化发展的不同。而 90° 节理围岩的破坏主要呈现为深部岩板劈裂板裂化, 屈曲失稳而折断弹射, 导致临空岩板端部失稳剪断抛掷的现象。随着角度的变化 ($30^\circ \sim 60^\circ \sim 90^\circ$), 隧道破坏模式也由张拉剪切脱落型、剪切破裂型(压剪破坏)、屈曲失稳型(劈裂板裂化)逐步演化过渡。含未揭露结构面围岩的破坏剧烈程度高于已揭露结构面(结构面揭露, 易于裂纹的扩展, 不易形成岩体的挤压破坏, 破坏强度相对较低), 且未揭露结构面 (60° 、 90°) 距离临空面边界越近, 附近围岩应力调整越剧烈, 更易诱发高强度岩爆。岩爆强度等级关系为: $60^\circ > 90^\circ > 30^\circ$ 。缓倾角结构面 (30°) 不易形成滑移, 诱发岩爆, 为静态的脆性破坏, 而陡倾角结构面 (60° 、 90°) 极易诱发结构型岩爆, 且 (60° 倾角结构面) 更易沿结构面方向发生剪切滑移。

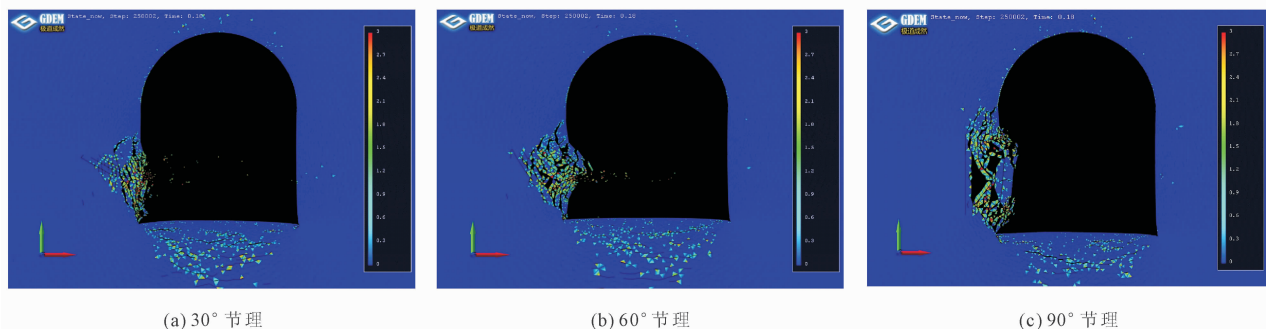


图 5 含不同倾角节理围岩最终破坏云图

2.2 岩体监测点力学运动特征的影响分析

当节理角度为 30° 分布时, 壁面应力解除后, 岩板上方裂化分割的块体较大, 破裂并不严重, 岩体承载强度较高。由图 6(a) 知, 其岩体监测点的裂化强度最大为 75 MPa , 围岩最大应力稳定为 40 MPa , 应力的调整并不剧烈; 节理倾角为 60° 分布时, 开挖卸荷后, 岩板上方裂化严重, 承载变小, 破碎带范围较大, 从图 6(b) 曲线中可知, 裂化带的节点应力降为 0 MPa (1、2 号节点), 3 号节点应力调整剧烈, 裂化强度最大为 68 MPa , 其未破裂围岩(4、5 号节点)的应力逐渐增大后趋于稳定, 稳定的最大应力为 60 MPa 。 30° 、 60° 节理区域内 1、2、3 号节点的应力变

化幅度剧烈, 应力调整主要集中于节理上部围岩, 围岩裂化时其承载强度呈现出 60° 小于 30° 节理, 而稳定后 30° 节理围岩中靠近 4、5 号节点的岩体应力比 60° 低。且从 30° 、 60° 节理围岩处的节点应力在弹塑性阶段的演化过程中可以看出, 随着倾斜角度的增大, 应力的分布差异较大, 且不均匀。而节理角度为 90° 分布时, 由图 6(c) 的弹塑性阶段可知, 节理岩体间的应力分布差异较小, 较均匀, 并且与无节理处完整围岩的应力差异也较小。开挖卸荷后, 围岩板逐渐裂化破坏, 岩板中 2 号节点 Y 方向应力的裂化强度急剧上升至 118 MPa , 当围岩发生宏观破坏时其监测设置点处的裂化岩板体逐渐剥离脱离母岩, 应

力松弛释放为 0 MPa。最终,卸荷调整稳定后,围岩的最大应力增长稳定至 58 MPa。

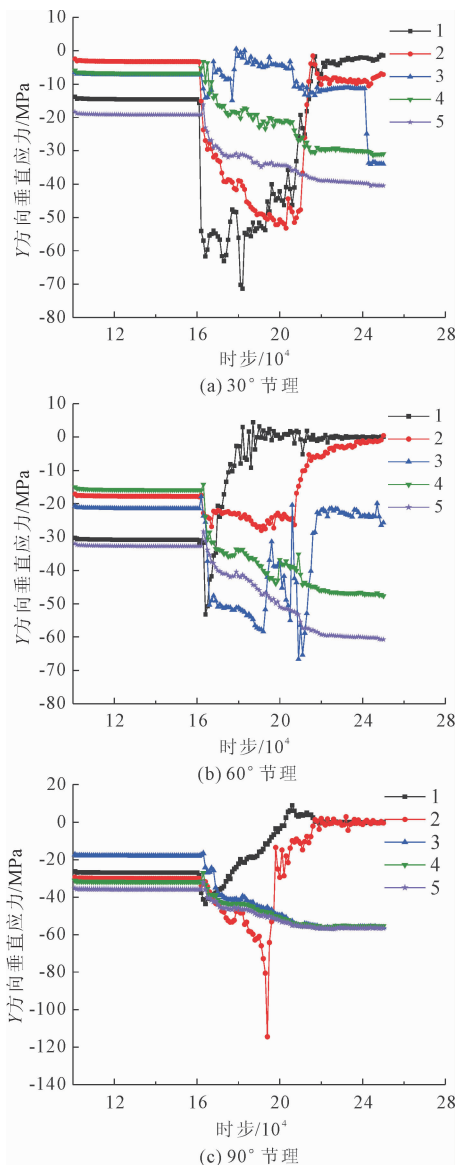


图 6 监测数据点应力变化曲线

综上,在一定范围内(30°~60°),节理角度越大,对围岩破碎带区域的影响也越大,局部围岩的承载能力下降,而稳定后围岩应力的调整强度就越高;90°大倾角节理围岩板的裂化承载强度高达 118 MPa,其围岩开挖卸荷稳定后的应力值较高的节点数目比 30°与 60°节理倾角时更多。由此看出 90°节理竖直岩板的承载强度高于倾斜节理围岩的承载能力,这也从侧面显现出岩体的抗压能力强于抗剪能力。由于节理角度的变化,其围岩的整体承载强度关系为:90°>30°>60°,且随节理角度的增大,围岩破坏弹射碎块体的时空演化差异会更加明显,围岩裂化破坏过程的剧烈性会更强。

图 7 为围岩体裂化块体的信息统计,由图 7(a)、图 7(b)可知,随着节理角度的增大,块体的水平弹射速度的范围呈现出先增大后减小,而裂化块体的体积大小关系呈现出随节理角度的增大,先减小后增大,但可以明显看出 30°节理围岩破坏时的块体除了一个未完全剥离母岩的长大块体体积较大外,其余整体上剥离母岩的块体体积相对小于 60°节理围岩裂化剥离母岩的块体体积,可见当除去 30°节理围岩中未剥离母岩的块体,其弹射的块体体积随着节理角度(30°~60°~90°)的增大而增大,且对比围岩破坏的特征可以看出,图中弹射速度较高的块体,主要为裂化严重的小碎块体和岩体颗粒的飞溅,弹射块体的体积较小,其危害一般较小;而 90°节理块体的弹射速度虽然不大,但弹射的部分块体体积相对很大,对工程安全的危害大。因此,除去小碎块体水平弹射速度中较大的值,从数据文件中选取体积最大块体的弹射速度进行统计见表 2 所示,可见较大块体的弹射速度分别为 0 m/s(30°);8 m/s(60°);4.8 m/s(90°),较大块体的最大弹射速度也呈现出随着节理角度的增大而先增大后减小,与 2.1 节中分析的节理倾向角对隧道围岩诱发岩爆孕育的演化特征一致。

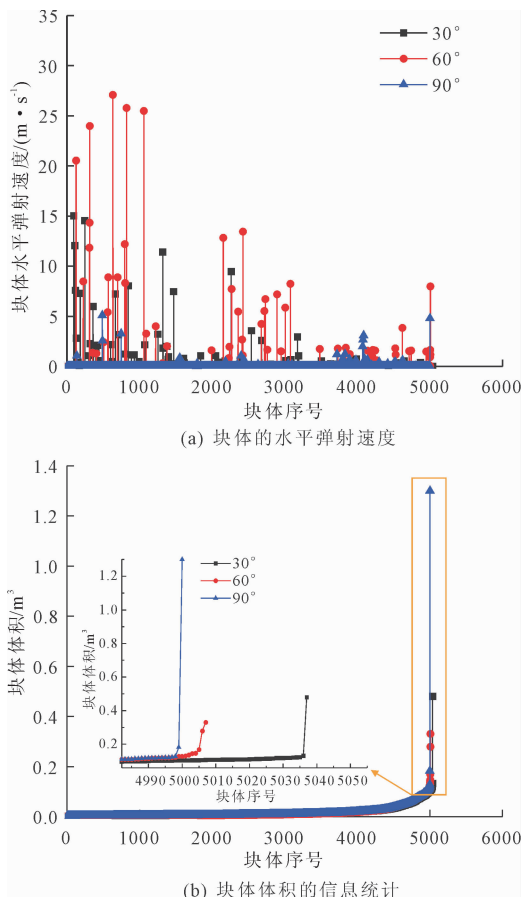


图 7 块体的信息统计

由以上可见,节理角度对围岩碎块体速度与体积的影响比较明显,也能从侧面再次反映出围岩破碎带的裂化程度关系为: $60^\circ > 90^\circ > 30^\circ$,即适当角度的减小强化了结构面的抗剪切作用,即增大了结构面上的(覆土重量)有效法向应力,由此阻碍了结构面的活化,不易诱发滑移面的剪切滑移破坏,降低了围岩的裂化程度。

表 2 最大碎块体的弹射速度

节理角度/ $^\circ$	30	60	90
块体最大体积/ m^3	0.48	0.33	1.3
弹射速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.0	8.0	4.8

3 结 论

(1) 节理角度空间位置的不同分布,造成围岩裂纹孕育的难易程度与力学机制不同,由此改变了围岩裂纹的扩展行为和承载能力。 30° 已揭露结构面上下侧岩体间的裂纹扩展难易程度近似,裂纹易同时萌生起裂延伸,分割岩体,造成岩体间的相互剪切贯通而竖向滑落; 60° 未揭露结构面远离临空面,受边墙围岩的影响,造成结构面上下侧围岩体裂纹的起裂存在先后差异,容易造成结构面上覆围岩与下部的围岩形成挤压,引发沿结构面方向的压剪滑移破坏与边墙表层围岩劈裂破坏形成新岩板的屈曲失稳; 90° 未揭露结构面围岩的破坏呈现为深部岩板逐渐劈裂板裂化,屈曲失稳而折断弹射,导致临空岩板端部失稳剪断破坏。

(2) 缓倾角度强化了结构面的抗剪切作用,不易形成滑移,为静态脆性破坏,陡倾角度更易沿结构面发生剪切滑移破坏而诱发岩爆,且未揭露结构面的破坏程度高于已揭露结构面。节理角度的变化($30^\circ \sim 60^\circ \sim 90^\circ$)导致破坏模式也由张拉剪切脱落型、剪切破裂型(压剪)、屈曲失稳(劈裂板裂化)型逐渐过渡。 60° 节理围岩诱发的剪切破裂型岩爆,产生了较深的 V 型爆坑,而 90° 节理围岩破坏的爆坑形貌特征为平底锅状。

(3) 结构面倾角对隧道岩爆的强度影响呈现为 $60^\circ > 90^\circ > 30^\circ$,围岩承载强度的影响关系为: $90^\circ > 30^\circ > 60^\circ$,以及对隧道围岩裂化片状块体的速度和破碎带区域范围的力学特征的影响也十分明显,影响程度关系呈现出: $60^\circ > 90^\circ > 30^\circ$,弹射的块体体积大小关系呈现为: $90^\circ > 60^\circ > 30^\circ$ 。

参考文献:

[1] 朱 栋,靖洪文,尹 乾,等.含弧形预制裂隙砂岩力学特征试验研究[J].煤炭学报,2019,44(9):2721-

2732.

- [2] 何满潮.深部开采工程岩石力学现状及展望[C]//中国岩石力学与工程学会.第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集.北京:科学出版社,2004:99-105.
- [3] 苏方声,潘鹏志,高要辉,等.含天然硬性结构面大理岩破裂过程与机制研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(3):611-620.
- [4] 田四明,赵 勇,石少帅,等.中国铁路隧道建设期典型灾害防控方法现状、问题与对策[J].隧道与地下工程灾害防治,2019,1(2):24-48.
- [5] 何满潮,苗金丽,李德建,等.深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):865-876.
- [6] 吴文平,冯夏庭,张传庆,等.深埋硬岩隧洞围岩的破坏模式分类与调控策略[J].岩石力学与工程学报,2011,30(9):1782-1802.
- [7] 陈国庆,冯夏庭,周 辉,等.锦屏二级水电站引水隧洞长期稳定性数值分析[J].岩土力学,2007,28(S1):417-422.
- [8] Hoek E, Bieniawski Z T. Brittle fracture propagation in rock under compression [J]. International Journal of Fracture, 1984, 26(4):276-294.
- [9] 朱帝杰,陈忠辉,席婧仪,等.卸荷条件下岩石单裂隙扩展演化规律的数值模拟[C]//中国岩石力学与工程学会岩石破碎工程专业委员会.第十二届全国岩石破碎工程学术大会论文集.2014:208-211,215.
- [10] 李守国,吕进国,姜耀东,等.逆断层不同倾角对采场冲击地压的诱导分析[J].采矿与安全工程学报,2014,31(6):869-875.
- [11] 袁 彬,徐凡献,廖 欢,等.控制型结构面几何参数对隧道围岩稳定性的控制效应——以郑万高铁向家湾隧道为例[J].长江科学院院报,2020,37(4):115-121.
- [12] 李地元.高应力硬岩脆性板裂破坏和应变型岩爆机理研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [13] 王 杰,李世海,周 东,等.模拟岩石破裂过程的块体单元离散弹簧模型[J].岩土力学,2013,34(8):2355-2362.
- [14] 马春驰,陈柯竹,李天斌,等.基于 GDEM 的应力-结构型岩爆数值模拟研究[J].隧道与地下工程灾害防治,2020,2(3):85-94.
- [15] 李 涛,张 丽,蒋 庆,等.基于 GDEM 的隐伏岩溶隧道隔水岩体水压致裂安全厚度及破裂演化规律分析[J].隧道建设(中英文),2021,41(1):67-76.
- [16] 李栋梁.基于 CDEM 土石混合体填筑地基承载力和岸坡稳定性分析[D].重庆:重庆大学,2016.
- [17] 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(8):2588-2600.
- [18] 陈柯竹,李天斌,马春驰,等.基于 CDEM 的隧道卸压爆破及岩爆抑制效应模拟[J].工程地质学报,2020,28(3):667-676.