

DOI: 10.11779/CJGE20220375




深部不同断面巷道分区破裂形态与围岩结构控制

许磊^{1,2}, 郭帅¹, Davide Elmo^{*3}, 刘洪林⁴, 洪紫杰¹, 肖同强⁵

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南省地下工程与灾变防控重点实验室(河南理工大学), 河南 焦作 454000;

3. 英属哥伦比亚大学 NBK 矿业工程学院, 温哥华 V6T 1Z4; 4. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

5. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 采用理论分析、现场实测、模拟分析的方法, 研究了各向等压条件下等效开挖矩形、直墙半圆拱和圆形断面分区破裂形态及围岩稳定结构。结论: 3个断面分区破裂形态不同, 矩形断面分区破裂呈“”状分布, 直墙半圆拱断面分区破裂呈多层的“”状分布, 圆形断面分区破裂呈“花瓣”状分布; 三个断面位移特征相似, 位移等值线浅部呈正立的“鸡蛋壳”形, 深部呈“碗”形; 支承压力在主破裂面处降低, 在最外层主破裂面头部集中, 在破裂面之间完整岩层处升高, 呈分区集中, “波谷一波峰一波谷”震荡增高的特征向外传播; 理想正方形破裂面弦长有 $a_{n+1} = \sqrt{2}a_n$ ($n=1, 2, 3, 4$) 关系; 浅部围岩分区破裂形成后, 相当于深部围岩的伪开挖, 3个断面均存在多层“”形围岩承载结构。巷道稳定原理就是促进多层承载结构相互依存, 共同承载。具体措施: 加密、加粗、加长锚杆(索)支护结构, 建立浅部与深部多层承载结构相互联系, 在浅部形成稳定锚固体促进深部围岩稳定, 主破裂面精准注浆修复围岩破裂面和限制主破裂面滑移。

关键词: 分区破裂; 围岩结构; 深部巷道; 破裂形态

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)04-0720-10

作者简介: 许磊(1980—), 男, 河南焦作人, 研究方向: 巷道支护及绿色开采, 任教于河南理工大学。E-mail: 32246714@qq.com。

Patterns of zonal disintegration and structural control of surrounding rock of deep roadway with different sections




XU Lei^{1,2}, GUO Shuai¹, Davide Elmo³, LIU Honglin⁴, HONG Zijie¹, XIAO Tongqiang⁵

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Henan Key Laboratory of Underground

Engineering and Disaster Prevention (Henan Polytechnic University), Jiaozuo 454000, China; 3. The Norman B. Keevil Institute of Mining

Engineering, University of British Columbia, Vancouver V6T 1Z4, Canada; 4. College of Geology and Mines Engineering, Xinjiang

University, Urumqi 830046, China; 5. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The patterns of zonal disintegration and stability structures of surrounding rock of the equivalent excavation rectangular, straight wall semi-circle arch and circular sections under isotropic isostatic conditions are studied through the theoretical analysis, field measurement and simulation analysis. The conclusions are drawn as follows: the patterns of zonal disintegration of three sections are different. The zonal disintegration of rectangular section exhibits “” distribution; and the straight wall semicircle arch and circular section show “” and “petal” shaped distributions. The displacement characteristics of three sections are similar; the shallow part of the displacement isoline has an upright “egg shell” shape and the deep part has a “bowl” shape. The abutment pressure decreases at the main fracture surface, concentrates at the head of the main fracture surface in the outermost layer, and increases at the complete rock layer between fracture surfaces, showing a zoning concentration. The abutment pressure propagates outward with the characteristics of “wave trough-wave crest-wave trough” that gradually increases. The chord length of an ideal square fracture surface has a relationship of $a_{n+1} = \sqrt{2}a_n$ ($n=1, 2, 3, 4$). After the zonal disintegration of the shallow surrounding rock is formed, it is equivalent to the pseudo-excavation of deep surrounding rock. Three sections have the bearing structures of multi-layer “” shaped surrounding rock. The principle of roadway stability is to promote the interdependence and co-bearing of multi-layer bearing structures. The specific

基金项目: 国家自然科学基金项目(51964043, 52074101); 河南省地下工程与灾变防控重点实验室(河南理工大学)自主课题; 河南省教育厅 2023 国际合作培育项目

收稿日期: 2022-03-31

***通信作者** (E-mail: delmo@mining.ubc.ca)

measures include encrypted, thickened, lengthened bolt (cable)supporting structures. The relationship between shallow and deep multi-layer bearing structures is established. The stable anchor solid is formed in the shallow part to promote the stability of the surrounding rock in the deep part. The precise grouting should be employed to repair the main fracture surface of the surrounding rock and to limit the slip of the main fracture surface.

Key words: zonal disintegration; surrounding rock structure; deep roadway; fracture pattern

0 引 言

中国煤矿以 8~12 m/a 的速度向深部延伸, 东部矿区延伸速度为 10~25 m/a^[1]。深部开挖洞室或巷道后工作面两侧和前方产生了膨胀带和压缩带, 破裂区和未破裂区交替分布的全新结构性破坏现象——分区破裂 (zonal disintegration) ^[2-3], 典型特征是弹、塑性跳跃式分布。其产生条件、自组织过程、基本形态以及围岩结构仍处灰箱阶段。

20 世纪 70 年代, Adams 等^[4]在南非 Witwatersrand 金矿 2000~3000 m 深处, 用钻孔潜望镜观测到巷道顶板破裂的间隔分布。20 世纪 80 年代, 俄罗斯科学家 Shemyakin 等^[5]在深部矿山 Taimyrskii 采用电阻率仪探测到分区破裂, 如图 1。

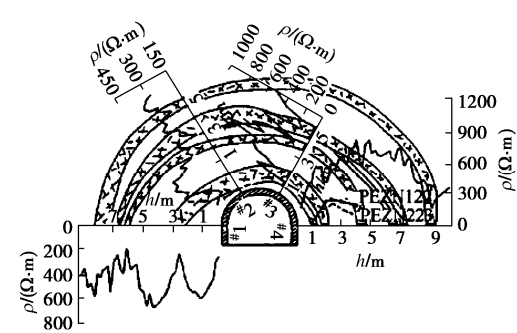


图 1 Taimyrskii 矿山分区破裂
Fig. 1 Zonal disintegration of Taimyrskii Mine

1979 年徐州权台煤矿巷道锚杆试验报告^[6]指出, 锚杆 (机械端锚) 不仅受拉应力作用, 同时还受压应力, 符合分区破裂拉压域交替的特征。1991 年, 淮北朱仙庄煤矿巷道围岩超声波速测试结果呈波峰与波谷间隔分布的形式^[7]。安瓦尔·恰夫晒夫^[8]根据平面变形状态方程, 代入 Tresca、Mises 准则以及 C-M 准则推导了分区破裂特征线, 见图 2, 塑性流动理论的特征线, 见图 3。

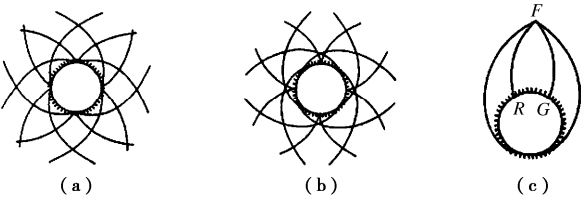


图 2 特征线
Fig. 2 Characteristic lines

李术才等^[9]在淮南矿区丁集煤矿-910 m 西部 11-2

采区南轨道大巷和采区内水仓, 通过钻孔窥测仪和电阻率仪实测得出: 大断面巷道的围岩分区破裂半径和厚度相差不大, 小断面巷道分区破裂半径和厚度相较于大断面巷道会减小, 如图 4, 各破裂分区的半径与巷道半径 r 有以下关系: $r_i = (\sqrt{2})^{i-1}r$ ($i=1, 2, 3, 4$)。

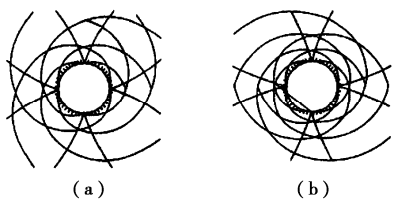


图 3 理想塑性流动理论的特征线
Fig. 3 Characteristic lines of ideal plastic flow theory

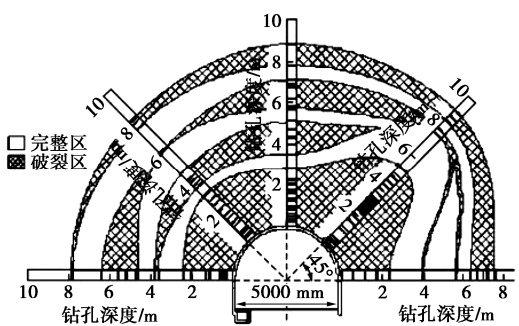


图 4 淮南矿区丁集煤矿巷道分区破裂
Fig. 4 Zonal disintegration of roadway of Dingji Coal Mine in Huainan mining area

张强勇等^[10]用数控真三维试验系统得出: 围岩分区破裂形状与洞形无关, 最外边界的形状均为近似圆形; 初始最大主应力大于 1.5 倍围岩抗压强度且平行于洞轴方向时产生分区破裂; 分区破裂围岩径向位移和径向应变呈波峰与波谷间隔分布且拉压交替。袁亮等^[11]用深部巷道模拟试验装置得出: 只有在最大压力平行于巷道轴线时, 洞周围岩体内才产生环形分层断裂, 与围岩应力施加顺序无关。陈建功等^[12]根据质点速度、间断面压力降, 由动量守恒定律推导了围岩分区破裂的冲击本构方程和破坏准则, 认为球形洞室及等应力条件下, 各破裂区半径取决于开挖面 (或伪开挖面) 的半径, 且成等比数列, 等比值为 $\sqrt{3}$ 。唐春安等^[13]认为: 当洞室轴向应力较小时, 洞壁附近以共轭滑移线破坏为主; 当轴向应力较大时, 裂纹向距洞壁较远处拓展, 形成螺旋状或环状间隔破裂。高富强等^[14]

采用 FLAC 中的 SU 模型得出: 初始应力越大, 破裂带数量越多, 向围岩深部延伸的幅度越大; 侧压系数越大, 破裂向巷道顶底板延伸幅度越大; 圆形巷道破裂区范围最小, 半圆拱次之, 矩形最大。

此外, 还有很多学者均有分区破裂的形成机理方面的成果, 如: 深部应力高, 开挖导致岩石卸荷速率快, 相当于动力过程; 以及岩石不同的峰后特性导致不同分区破裂等等。本文不一一列举。

1 深部巷道常见破坏特征及思考

可以在现场发现巷道的以下破坏特征: 如图 5, 唐口 2307 运输巷发生了顶角开裂和底角切断, 进而导致巷帮整体内移, 顶板也发生了褶皱变形。但通过这样的照片只能看到巷道表面的变形, 其内部滑移面是怎么分布的, 无从而知。

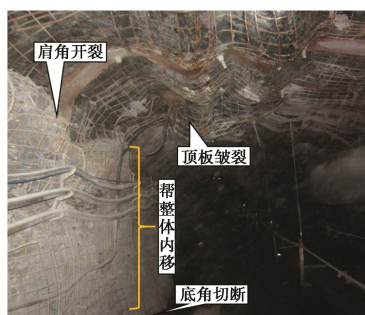


图 5 唐口煤矿 2307 运输巷

Fig. 5 Transportation roadway 2307 of Tangkou Coal Mine

如图 6, 朱集西煤矿 11502 工作面运输巷底鼓高度 1.5 m 左右, 经揭露发现底板岩层呈 45° 向巷内插入。目前的成果也只是认为距离巷道两帮一定距离范围内的围岩发生了下沉, 距离底板一定深度内的围岩发了上升, 然而底鼓变形导致的围岩破裂面和滑移面呈什么形态, 在哪个层位, 也没有明确答案。



图 6 朱集西煤矿 11502 工作面运输巷

Fig. 6 Transport roadway of 11502 working face of Zhuji West Mine

如图 7, 口孜东煤矿-967 m 西翼轨道大巷在修巷过程中, 发现围岩中存在不同程度和不同方向的剪切滑移, 顶板中部锚杆呈多段不同向变形。在锚杆头部有两处剪切变形且方向相反, 尾部有一处剪切变形, 锚杆中

部有大范围弯曲变形。从这样的图片中也只能看到局部滑移趋势, 巷道围岩整体滑移趋势依然无从得知。

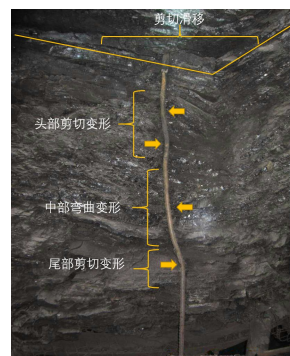


图 7 口孜东煤矿-967 m 西翼轨道大巷锚杆与围岩变形

Fig. 7 Deformations of anchor and surrounding rock in 967 m west wing track of Kouzi East Mine

2 分区破裂钻孔窥视及存在问题

采用钻孔窥视仪对围岩不连续滑移面进行观测, 地点选择在口孜东煤矿-967 m 西翼轨道大巷, 钻孔布置及结果如图 8。

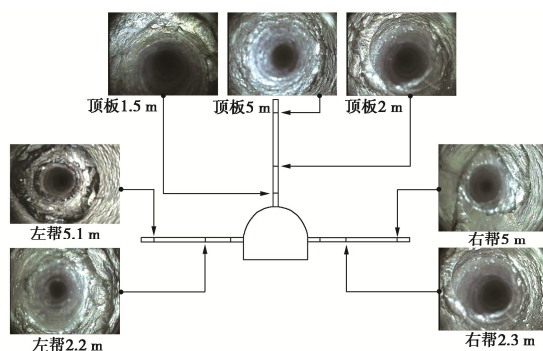


图 8 围岩分区破裂钻孔窥视

Fig. 8 Drilling peep of zonal disintegration in surrounding rock

在巷道左帮 2.2, 5.1 m, 右帮的 2.3, 5 m, 顶板 1.5, 2 和 5 m 处均观测到了孔壁的间隔破裂。这说明巷道围岩除了由浅入深的破裂区以外, 深部围岩还存在明显的分区破裂特征。

然而钻孔窥视也只能证明非连续破裂面的存在。多个问题依然无法解答。不同深度的破裂面究竟该如何连接? 当前的好多成果都把破裂面连成了个圈, 这些破裂面没有其他连接关系了吗? 底板是否存在破裂面? 如果存在其分布形态是什么样子? 底板破裂面与顶、帮破裂面的分布关系是什么? 围岩破坏和变形的特征有千万种, 然而这千万种的表象下必然存在某种普遍意义的破裂形态。这也是本文探究的普遍性问题。针对以上疑问, 本文以口孜东煤矿-967 m 西翼轨道巷(直墙半圆拱)和胶带运输巷(矩形)为工程背景, 研究了

不同断面分区破裂的异同, 并进行了工业性试验。

3 工程地质条件及数值模型构建

3.1 工程地质条件

-967 m 西翼轨道大巷和胶带运输大巷布置在煤层中, 埋深 1000 m 左右, 巷间煤柱 50 m, 两侧没有工作面采动影响。西翼轨道大巷为直墙半圆拱断面: 墙高 (c) 2.3 m, 拱半径 (r) 2.5 m, 宽 (a) 5 m; 西翼胶带运输大巷为矩形断面: 宽 (a) \times 高 (b) = 5 m \times 3.5 m。地应力实测垂直应力为 25.5 MPa, 最大和最小水平分别为 26.6 MPa 和 24.6 MPa, 各向应力比值接近 1。-967 m 西翼轨道大巷和胶带运输大巷原锚杆支护间、排距均为 0.8 m。锚杆为 $\phi 20 \times 2100$ mm 全螺纹锚杆, 锚索为 $\phi 17.8 \times 7300$ mm 七股钢绞线, 锚固方式均为树脂加长锚固。经 X 衍射试验测得顶、底板泥岩试样中主要矿物组成为石英含量 33.8%, 高岭石 18.7%, 八面沸石 20.5%, 伊利石 27.0%。可知该类型围岩胶结程度差, 在高应力作用下易产生流塑变形。

3.2 等效开挖理论与数值模型构建

根据轴变论, 开挖一个深埋椭圆巷道, 周围切向应力计算公式为^[15]

$$\delta_{\theta} = p_0 \frac{m^2 \sin^2 \theta + 2m \sin^2 \theta - \cos^2 \theta}{\cos^2 \theta + m^2 \sin^2 \theta} + \lambda p_0 \frac{\cos^2 \theta + 2m \cos^2 \theta - m^2 \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta + m^2 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

当巷道周围应力是均匀压应力时, 最有利于围岩稳定。此时椭圆巷道长轴与短轴之比为等应力轴比。又称为最优 (佳) 轴比。

可以通过求导:

$$d\delta_{\theta}/d\theta = 0 \quad , \quad (2)$$

得到 $m = 1/\lambda$ 。

将此 m 值代入式 (1) 得到

$$\delta_{\theta} = p_0 + \lambda p_0 \quad (3)$$

在式 (3) 中, δ_{θ} 只和 λ 有关。本研究中为各向等压情况, 此时 $\lambda = 1$, 则 $m = 1$, $a = b$, 最佳断面为圆形 (圆是椭圆在各向等压时的特例)。

根据等效开挖原理, 各向等压条件下, 开挖直墙半圆拱和矩形断面均相当于等效开挖其外接圆 (等应力轴比圆)。-967 m 西翼轨道大巷和胶带运输大巷断面宽度均为 5 m, 其等应力轴比圆 (外接圆) 半径 (R) 为 3.05 m, 见图 9。

3.3 围岩性能测试与单轴校核

采用 MTS 试验机对顶、底板和煤样进行了单轴测试, 试件直径 50 mm, 高度 100 mm, 等速位移 1 mm/min, 应力-应变关系见图 10。

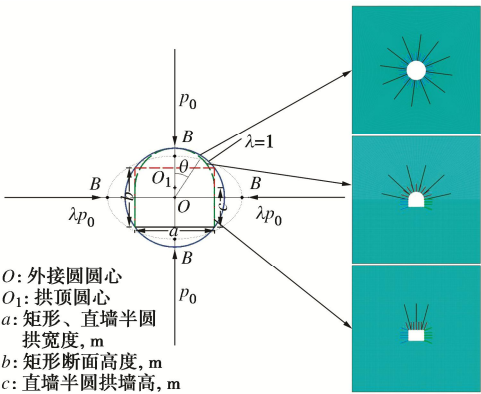


图 9 矩形、直墙半圆拱与等应力轴比圆

Fig. 9 Rectangular, straight wall semi-circle arch and equivalent stress axial ratio circle

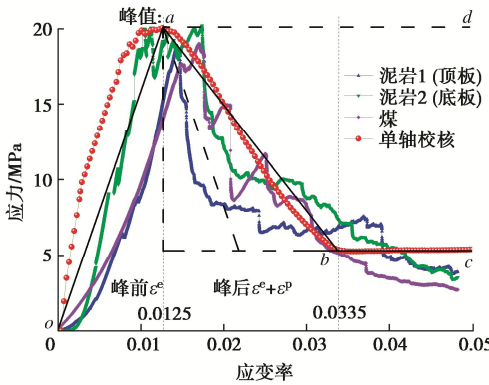


图 10 试样单轴试验与单轴校核典型应力-应变曲线

Fig. 10 Uniaxial tests and uniaxial check of typical stress-strain curves

并进行了 Flac^{3D}5.0 同比例单轴校核, 参数见表 1。本构关系采用 strain-softening 模型, 峰后软化方式采用分段线性软化, 软化路径见图 10, 应变率从 0.0125~0.0335 过程中, 塑性参数, 内摩擦角, 内聚力, 抗拉强度, 剪胀角分别线性弱化到原来的 25%, 应变率大于 0.0335 后各塑性参数保持不变。

表 1 数值模型基本力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model

密度/ (kg·m ⁻³)	弹性 模量/ GPa	泊松比 ν	内摩擦 角/(°)	内聚 力/ MPa	抗拉强 度/MPa	剪胀 角/ (°)
2650	8	0.25	35	3	2	2

把单轴测试和单轴校核结果绘制到图 10 中。单轴抗压应力-应变关系和单轴校核结果基本保持一致。顶、底板泥岩和煤样的单轴抗压强度在 20 MPa 左右 ($f \approx 2$), 峰值应变率在 0.0125, 应变率 0~0.0125 为峰前应变 ϵ^e (oa 段), 表现为弹性; 应变率大于 0.0125 为峰后应变 $\epsilon^e + \epsilon^p$ (ab 为线性软化段, bc 段为峰后应力保持段)。假如采用 Mohr-Coulomb 本构关系, 其峰后沿着 ad 段, 为理想弹塑性, 不符合真实的岩石的

应变软化关系，所以本模拟采用 strain-softening 本构关系。

3.4 不同断面分区破裂数值模型基本参数

分别建立 FLAC^{3D}5.0 数值模型，如图 9，3 个模型：长×宽×高=40 m×2 m×40 m，网格划分 0.05 m，模型前、后、左、右、下 5 个边界为位移边界条件，顶部为应力边界条件，按平均密度 2600 kg/m³ 换算成上覆岩层重量施加在模型顶部，煤层埋深与现场相同，垂直应力与两个水平应力按 1：1 配置。开挖边界处理：施加虚拟预应力内边界。支护参数及材料力学参数见表 2，3。

表 2 数值模型开挖及支护参数

Table 2 Parameters of excavation and supporting structures of numerical model		
矩形	直墙半圆拱	圆形（外接圆）
宽 5 m， 高 3.5 m	宽 5 m，墙高 2.3 m，拱半径 2.5 m	半径：3.05 m
锚杆：间排距：800 mm×800 mm， ϕ 20 m×2100 m，加长锚固		
锚索：间排距：1600 mm×800 mm， ϕ 17.8 m×7300 m，加长锚固		

表 3 FLAC^{3D} 中锚杆（索）参数

Table 3 Properties of supporting bolt (cable) in FLAC ^{3D}						
类型	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性 模量/ GPa	抗拉强 度/kN	黏结刚 度/ (N·m ⁻²)	黏结强 度/ (N·m ⁻¹)	预应 力/kN
锚杆	7500	200	120	2×10^6	4×10^5	60
锚索	7850	300	300	2×10^6	4×10^5	100

4 分区破裂形态及位移特征

开挖断面不同，如图 11，仍可以发现以下共同点：①各个层级的主破裂面呈弧形（螺旋状），越外层的破裂面弧度越大。②主破裂面边缘会衍生出次一级破裂面，越接近巷道表面，次一级破裂面越凌乱。破碎区之中也存在明显的主破裂面。③主破裂面使锚杆（索）平均至少发生两处明显的剪切变形。当主破裂面向深部拓展后，超过了锚（索）的锚固范围，见图 11，此

时有可能发生锚固区外整体滑移。

从理论上讲开挖矩形和直墙半圆拱断面以及其共同的外接圆（等应力轴比圆），相当于开挖同一个断面。然而其分区破裂形态却不一致，见图 11。

4.1 矩形断面分区破裂形态

如图 11（a），第一层主破裂面从肩角和底角位置呈与巷道中线和腰线约 45° 的方向延伸，交汇于中线和腰线深部，最终形成一个旋转 90° 的正方形。第二层主破裂面从第一层破裂面的交点向垂直方向和水平方向延伸，最终形成第二层主破裂面，呈正方形。此时，形成了形如“回”的分区破裂面。如此过程，当第四层主破裂面形成后，形成了形如“回”的分区破裂面。下一级主破裂面与上一级主破裂是外接关系。

4.2 直墙半圆拱断面分区破裂形态

如图 11（b），起裂位置集中在拱顶、拱肩和底角处。分区破裂在拱顶中部向两侧起裂，顺着拱顶弧度方向延伸，但破裂范围较小^[15]，拱肩和底角处破裂范围较大。第一层主破裂面起始于拱肩和底角处，交汇于巷道腰线和底板中部深处，继续延伸过了肩角位置后，沿着拱顶弧度方向延伸，大致呈“U”状。第二层主破裂面起始于第一层破裂面在底板的交汇点（底部第一交汇点），呈弧形向拱顶方向延伸。第三层主破裂面起始于第二层分区破裂面在底板的交汇点（底部第二交汇点），依然呈弧形向拱顶拓展。

4.3 圆形断面分区破裂形态

如图 11（c），圆形巷道主破裂面大致呈“花瓣”状分布，沿 45° 和 135° 对角线对称延伸。从底部向顶部延伸出的主破裂长度、宽度和趋势明显强于从顶部向底部延伸的破裂面。由底部向顶部延伸的几条优势破裂面构成了圆形巷道的主破裂面。本模拟中呈现 3 条主破裂面，两侧主破裂面合壁后呈“U”形，3 条主破裂面呈 3 个“U”相互叠加。

4.4 分区破裂围岩位移特征

如图 11，把 3 个断面的位移等值线与分区破裂面

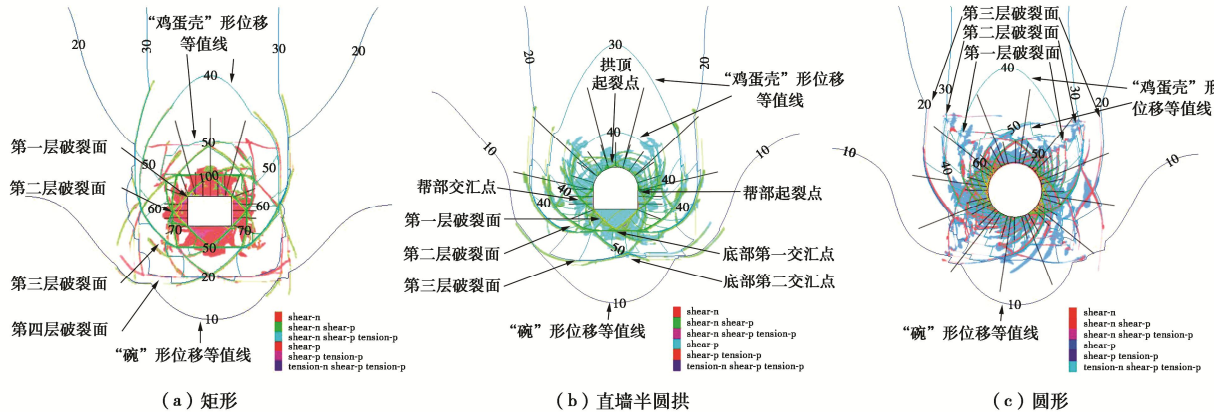


图 11 分区破裂基本形态及位移特征

Fig. 11 Basic patterns and displacement characteristics of zonal disintegration in surrounding rock

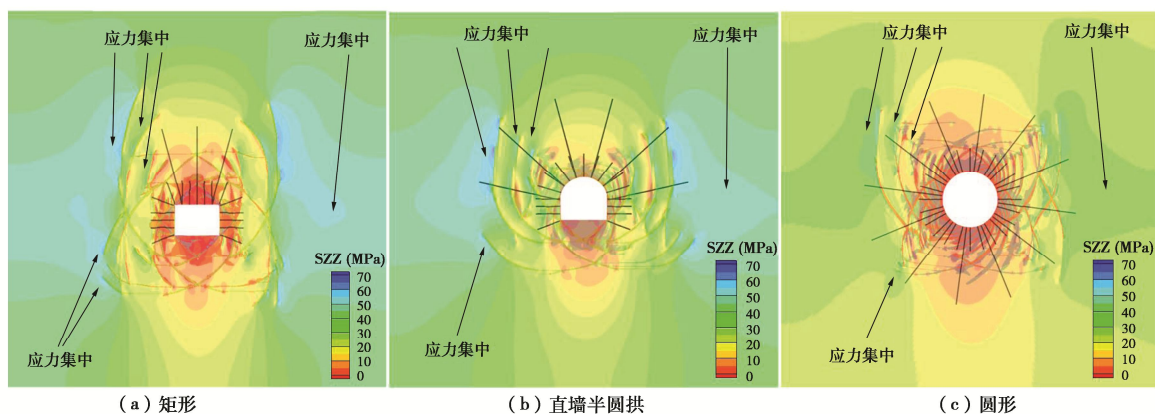


图12 分区破裂围岩支撑压力分布特征

Fig. 12 Distribution characteristics of supporting pressure of surrounding rock during zonal disintegration

重构后,发现以下共同点:位移等值线在巷道的浅部围岩呈杂乱状态,这和浅部围岩进入破碎状态有关,然而第二层,第三层主破裂面与位移等值线基本吻合。第二层和第三层主破裂面的等值线呈正立的“鸡蛋壳”形态,“鸡蛋壳”底部在底板破裂面处。“鸡蛋壳”等值线为封闭型等值线,说明封闭区域内呈整体向巷内挤入趋势。深部巷道围岩在主破裂面滑移的带动下,发生整体内缩。3个断面的最外层位移等值线呈“碗”形分布,为开放型,可见围岩深部的岩层在主破裂面的滑移下向“碗”内(底板)流动。

尽管3个断面导致分区破裂形态不同,主破裂面把围岩切割成的块体也不同,但各个块体相互协作,实现了围岩开挖的自组织过程,在这个混沌挤压过程中,实现了相似了位移特征——围岩浅部呈正立的“鸡蛋壳”形,深部呈“碗”形,这也是深部巷道围岩分区破裂位移的基本形态和范围。

5 分区破裂围岩支撑压力间隔分布

本文选取支撑压力的分布特征衡量深部巷道分区破裂的矿压演化规律。

如图12,矩形、直墙半圆拱和圆形巷道在左、右帮深部均存在支撑压力集中区,且支撑压力集中区的范围较大。应力集中最高的地方在巷道的肩角斜向上 45° 方向的最外层主破裂带的头部;同样,在巷道底角斜向下 45° 方向的最外层主破裂带的头部也存在一处应力集中;但肩角上部的应力集中程度要大于底角下部的。3个断面的支撑压力在各个破裂带处降低而在破裂带之间的完整岩体内增高。从巷道表面到围岩深部,支撑压力呈分区集中且“波谷一波峰一波谷”震荡升高的特征向外传播。从应力集中的程度来看,矩形比直墙半圆拱和圆形断面深部破裂面集中程度高。认为矩形、直墙半圆拱断面都有明显的肩角和底角,更容易引起应力集中,而圆形为理想断面应力集中不明显。

6 分区破裂与多层围岩承载结构

深部巷道分区破裂形式明显不同于浅埋深巷,也不可能无限制塌陷。分区破裂围岩必然存在某种自我稳定结构承担围岩自重和变形压力。无论破裂形态多么奇特,必然存在某种自然稳定的结构。本文采用普氏拱原理来说明分区破裂围岩的多层承载结构。

通过对矩形、直墙半圆拱和圆形巷道分区破裂分布形态和位移等值线的分布特征分析可以发现,其位移等值线具有相似性,浅部围岩为“鸡蛋壳”形,而深部位移等值线呈“碗”形。可以推断分区破裂围岩通过自组织过程,形成相似的承载结构。根据模拟和实测结果,分区破裂的各个破裂面不是在任何时候都均匀发育的。潜在破裂面用点线表示,承载拱形结构用分段线表示,绘出了理想状态下分区破裂形态及多层承载结构形成过程,如图13~15。

矩形巷道第一层主破裂面沿着巷道的顶角和底角呈 45° 呈弧形向两侧延伸,第一层主破裂面交汇时正好形成弦长为 a_1 的一个正方形,第一层主破裂面与巷道断面(宽度 a ,高度 b)为外接关系。

存在如下关系:

$$a_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}(a+b) \quad (4)$$

如图13(a),此时围岩形成了第一层应力拱;该应力拱底部为一直角三角形,表示破裂路径,顶部为一个圆弧(圆心在矩形巷道中心),该圆弧内的岩石和应力作用于下部岩体,促使巷道变形。如图13(b),分区破裂继续拓展,可形成正方形(弦长为 a_2)的第二层破裂面,此时相当于开挖了边长为 a_2 的一个正方形,进而形成边长为 a_3 的第三层破裂面,此时形成第二层应力拱。如此类推,会形成第四和第五层正方形分区破裂面,边长分别为 a_4 和 a_5 ,当第四层破裂面正方形(a_4)形成时,相当于开挖了正方形(a_4)的空间,此时潜在的第三层应力拱形成,如图13(c)。下一级主破裂面与上一级破裂面为外接关系。为此,不

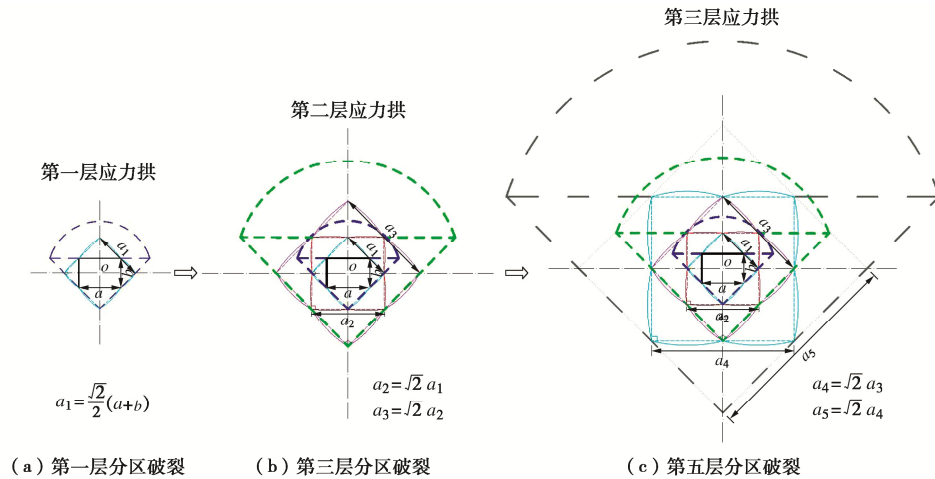


图 13 矩形巷道分区破裂理想形态及围岩承载结构

Fig. 13 Ideal patterns of zonal disintegration and supporting structures of surrounding rock of rectangular roadway

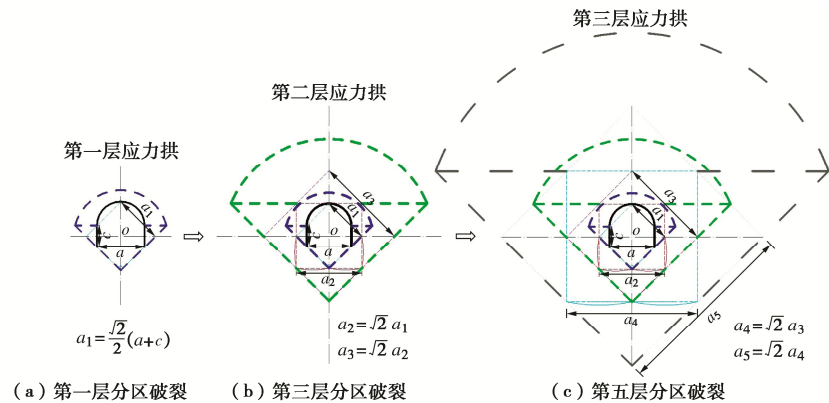


图 14 直墙半圆拱巷道分区破裂理想形态及围岩承载结构

Fig. 14 Ideal patterns of zonal disintegration and supporting structures of surrounding rock of straight wall semi-circle arch roadway

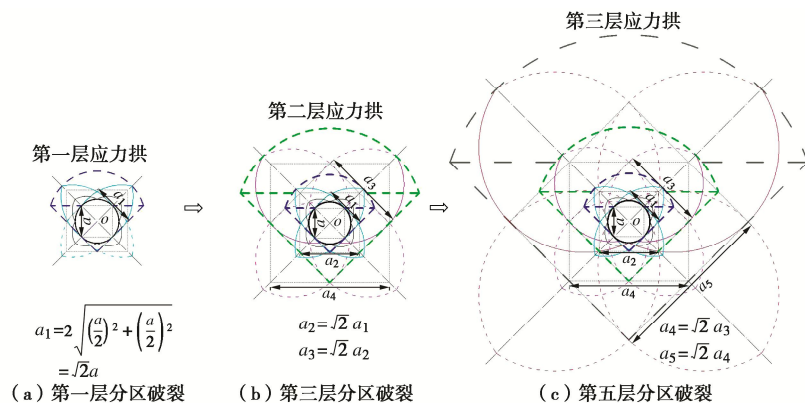


图 15 圆形巷道分区破裂理想形态及围岩承载结构

Fig. 15 Ideal patterns of zonal disintegration and supporting structures of surrounding rock of circular roadway

同层级分区破裂面的弦长存在以下关系：

$$a_{n+1} = \sqrt{2}a_n \quad (n=1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

如图 14，直墙半圆拱巷道主破裂面的起裂点位于拱肩（拱顶与直墙相切处）和底角处，第一层分区破裂为墙高（ c ）和巷宽（ a ）决定的正方形，有如下公式：

$$a_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}(a+c) \quad (6)$$

第二，第三，第四层分区破裂的正方形弦长有以下关系：

$$a_{n+1} = \sqrt{2}a_n \quad (n=1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

直墙半圆拱的应力拱形态与矩形巷道类似，不同的是肩部的起裂位置不同。

如图 15，圆形巷道的第一层主破裂带沿着其内接正方形（边长为 a ）的 4 个角点开始起裂，最终形成了沿着 45° 和 135° 对角线呈对称的螺旋状分布。如

图 15 (a), 圆形巷道的外切正方形 (旋转 90° 边长为 a_1), 第一层伪开挖空间就相当于开挖了该外切正方形。圆的内接正方形边长 a 和外切正方形边长 a_1 , 存在以下关系:

$$a_1 = 2\sqrt{(a/2)^2 + (a/2)^2} = \sqrt{2}a \quad (8)$$

第一层应力拱, 如图 15 (a), 由圆的外切正方形 a_1 (伪开挖) 形成, 其同时也是内接正方形 a 的应力拱。底部呈直角三角形与外接正方形 a_1 重合, 顶部弧形的弦与内接正方形 a 的上边长重合。同样的, 如图 15 (b), 当第三层伪开挖正方形 a_3 (或第二层伪开挖 a_2) 开挖后, 第二层应力拱形成, 第三层伪开挖正方形 a_3 下部与应力拱重合。第三层伪开挖正方形 a_3 与第二层伪开挖正方形 a_2 是外接关系。如图 15 (c), 当第五层伪开挖正方形 a_5 (或第四层伪开挖 a_4) 开挖后, 第三层应力拱形成, 第五层伪开挖正方形 a_5 下部与第三层应力拱重合。第五层伪开挖正方形 a_5 与第四层伪开挖正方形 a_4 是外接关系。伪开挖正方形的边长下一级与上一级是外接关系, 也存在以下关系:

$$a_{n+1} = \sqrt{2}a_n \quad (n=1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

通过以上分析可知, 矩形, 直墙半圆拱和圆形断面巷道分区破裂形态是完全不同的, 但围岩结构具有相似性。本文认为这种结构由多层应力拱组成, 当上一层分区破裂形成后, 破裂带内岩层相对完整, 仍具有部分承载力, 但处于不稳定状态, 这就相当于在原有开挖的断面之外, 又形成了新的开挖面 (分区破裂面), 而这个开挖面相当于不充分开挖 (伪开挖), 进而形成次一级应力拱。这样就形成了多层应力拱 “ \diamond ” 围岩结构, 其相互依存, 共同促进了围岩稳定。

7 工程意义及案例分析

7.1 工程意义

研究不同断面的分区破裂形态可以预测对应断面巷道分区破裂面的大概位置, 为修复注浆指明位置和范围, 也可为确定锚杆 (索) 长度提供参考。支护目的是限制分区破裂面的滑移, 减小破裂面围岩的松动, 促进各层级围岩结构共同承载, 实现围岩稳定。

7.2 工程案例一

口孜东煤矿-967 m 西翼轨道大巷属于深部直墙半圆拱断面: 墙高 (c) 2.3 m, 拱半径 (r) 2.5 m, 宽 (a) 5 m, 高应力作用下发生分区破裂滑移, 原支护采用 $\phi 20 \text{ mm} \times 2100 \text{ mm}$ 全螺纹锚杆, 间排距 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$, $\phi 17.8 \text{ mm} \times 7300 \text{ mm}$ 七股钢绞线, 间排距 $1600 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 。很显然锚杆 (索) 偏短、偏细无法穿越分区破裂面, 限制围岩滑移; 锚杆 (索) 密度偏低无法形成强有力的锚固体, 促进浅部围岩结

构的稳定; 支护的目标是建立与第二层甚至第三层承载结构之间的联系。

根据公式 $a_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}(a+c)$ 和 $a_{n+1} = \sqrt{2}a_n$ ($n=1, 2,$

3, 4) 可以算出各级分区破裂面长度分别为 5.16, 7.30, 10.32, 14.59 和 20.64 m。如图 16。

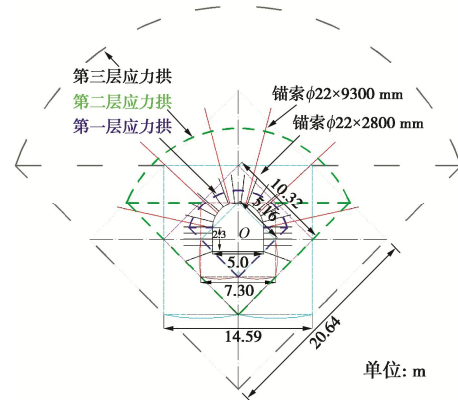


图 16 西翼轨道大巷修复控制图

Fig. 16 Repair and control plan of west wing track roadway

新支护采用 $\phi 22 \times 2800 \text{ mm}$ 高强螺纹钢锚杆, 锚杆密度 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 预紧力 80 kN, 加长锚固, 加固第一层分区破裂承载结构并建立与第二层承载结构的联系; 锚索选用 $\phi 22 \times 9300 \text{ mm}$ 19 丝钢绞线, 锚索密度 $1600 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$, 预紧力 100 kN 加长锚固, 建立第二层与第三层承载结构的联系。

针对围岩的分区滑移, 采用在各级主破裂面附近精准注浆的办法修复和限制其滑移。注浆材料选择超细早凝高强复合砂浆水泥基材料, 水灰比 0.4, 添加 0.7% 减水剂, 注浆压力不小于 2 MPa。表面铺钢筋网喷浆 200 mm。顶底相对移近量 103 mm, 两帮相对移近量 187 mm, 40 d 左右实现自稳。

7.3 工程案例二

口孜东煤矿-967 m 胶带运输大巷矩形断面: 宽 (a) \times 高 (b) $= 5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$; 原支护采用 $\phi 20 \times 2100 \text{ mm}$ 全螺纹锚杆, $\phi 17.8 \times 7300 \text{ mm}$ 7 股钢绞线。破坏原因也是由于支护体无法限制分区破裂滑移所致, 与案例一类似。

根据公式 $a_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}(a+b)$ 和 $a_{n+1} = \sqrt{2}a_n$ ($n=1, 2,$

3, 4) 可以算出各级分区破裂面长度分别为 6.01, 8.50, 12.02, 16.99 和 24.03 m, 见图 17。

同样采取了加密、加粗、加长支护体的办法, 限制破裂面滑移, 建立多层承载结构之间的联系。如图 17, 新支护采用 $\phi 22 \times 2800 \text{ mm}$ 高强螺纹钢锚杆, 锚杆密度 $700 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 预紧力 80 kN 加长锚固, 加固第一层分区破裂承载结构并建立与第二层承载结构的联系; 锚索选用 $\phi 22 \times 11300 \text{ mm}$ 19 丝钢绞线,

锚索密度 $1000\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$, 预紧力 100 kN 加长锚固, 建立第二层与第三层承载结构的联系。

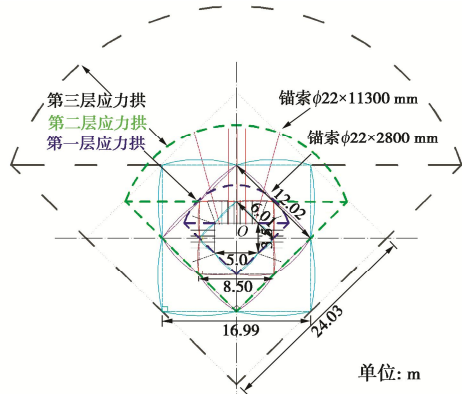


图 17 西翼胶带运输大巷修复控制图

Fig. 17 Repair and control plan of west wing belt roadway

同样采用在各级主破裂面附近精准注浆的办法修复和限制其滑移。注浆材料选择超细早凝高强复合砂浆水泥基材料, 水灰比 0.4 , 添加 0.7% 减水剂, 注浆压力不小于 2 MPa 。表面铺钢筋网喷浆 200 mm 。顶底相对移近量 183 mm , 两帮相对移近量 197 mm , 45 d 左右实现自稳。

8 不足之处及讨论

本文没有找到合适的圆形巷道实测和案例分析, 只做了对比分析。分区破裂形态还受众多因素影响, 比如: 开挖尺寸、支护方式、渗透压、地温和应力场类型等, 将继续深入研究。本案例中没有对底板进行处理, 当具体工程中有底鼓时, 可根据底板分区破裂分布形态及位置进行加固和注浆。

9 结 论

(1) 主破裂面不是单一存在, 其边缘会衍生出很多次一级破裂面, 越接近巷道表面, 围岩会被切割成破碎状态; 各级主破裂面均呈弧形且首位相通, 越外层的破裂面, 弧度越大。

(2) 矩形、直墙半圆拱和圆形在埋深千米三向等压等效开挖条件下, 分区破裂形态不同: 矩形断面分区破裂呈“⊗”状分布, 直墙半圆拱断面分区破裂呈多层的“∩”状分布, 圆形断面分区破裂呈“花瓣”状分布。

(3) 不同断面各个分区破裂的块体在自组织过程中位移趋势不一致, 但位移等值线相一致均呈浅部正立的“鸡蛋壳”形, 深部呈“碗”形。

(4) 支承压力在主破裂面处降低, 在最外层主破裂面头部集中, 在破裂面之间完整岩层处升高, 呈分区集中, “波谷一波峰一波谷”震荡增高的特征向外传播。

(5) 理想正方形破裂面弦长有 $a_{n+1} = \sqrt{2}a_n$ ($n=1, 2, 3, 4$) 关系。

(6) 浅部分区破裂形成后, 相当于深部围岩的伪开挖, 为此这 3 个断面均存在多层“∩”形围岩承载结构, 支护的目标是促进多层“∩”形围岩承载结构相互依存共同实现围岩自稳。

参考文献:

- [1] 黄炳香, 张 农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(3): 911-926. (HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(3): 911-926. (in Chinese))
- [2] 王明洋, 陈昊祥, 李 杰, 等. 深部巷道分区破裂化计算理论与实测对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(10): 2209-2218. (WANG Mingyang, CHEN Haoxiang, LI Jie, et al. Theoretical research on zonal disintegration of rock masses around deep tunnels and comparisons with *in situ* observations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(10): 2209-2218. (in Chinese))
- [3] 王 猛, 牛誉贺, 于永江, 等. 主应力演化影响下的深部巷道围岩变形破坏特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 237-244. (WANG Meng, NIU Yuhe, YU Yongjiang, et al. Experimental research on characteristics of deformation and failure of surrounding rock of roadway in deep mine under influence of principal stress evolution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 237-244. (in Chinese))
- [4] ADAMS A J, JAGER G R. Petroscopic observations of rock fracturing ahead of stope faces in deep-level gold mines[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1980, **80**(6): 204-209.
- [5] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V, et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings—Part II: rock fracture simulated in equivalent materials[J]. Soviet Mining, 1986, **22**(4): 223-232.
- [6] 李世平. 权台矿 3109 综采区煤巷锚杆试验观测报告: 兼论煤巷锚杆特点与锚杆参数选择的新观点[J]. 中国矿业学院学报, 1979, **8**(3): 22-61. (LI Shiping. Observation of coal roadway roof bolt tests at 3109 mechanized section at Quantai Mine: characteristics of coal roadway roof bolts and new viewpoints on the choice of roof bolt parameters[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1979,

- 8(3): 22-61. (in Chinese))
- [7] 贺永年. 软岩巷道围岩松动带及其状态分析[J]. 煤炭学报, 1991, 16(2): 63-70. (HE Yongnian. Analysis of loose zone around the roadway in soft rock[J]. Journl of China Coal Society, 1991, 16(2): 63-70. (in Chinese))
- [8] 安瓦尔·恰夫晒夫. 深部围岩的塑性变形及分区破裂化现象[Z]. 北京: 2008. (DR Aleksandr. Plastic deformation and zonal disintegration of deep surrounding rock[Z]. Beijing: 2008. (in Chinese))
- [9] 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1545-1553. (LI Shucal, WANG Hanpeng, QIAN Qihu, et al. In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1545-1553. (in Chinese))
- [10] 张强勇, 张绪涛, 向文, 等. 不同洞形与加载方式对深部岩体分区破裂影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1564-1571. (ZHANG Qiangyong, ZHANG Xutao, XIANG Wen, et al. Model test study of zonal disintegration in deep rock mass under different cavern shapes and loading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1564-1571. (in Chinese))
- [11] 袁亮, 顾金才, 薛俊华, 等. 深部围岩分区破裂化模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 987-993. (YUAN Liang, GU Jincai, XUE Junhua, et al. Model test research on the zonal disintegration in deep rock[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 987-993. (in Chinese))
- [12] 陈建功, 周陶陶, 张永兴. 深部洞室围岩分区破裂化的冲击破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2629-2634, 2644. (CHEN Jiangong, ZHOU Taotao, ZHANG Yongxing. Shock failure mechanism of zonal disintegration within surrounding rock in deep chamber[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2629-2634, 2644. (in Chinese))
- [13] 唐春安, 张永彬. 岩体间隔破裂机制及演化规律初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1362-1369. (TANG Chun'an, ZHANG Yongbin. Discussion on mechanism and evolution laws of fracture spacing in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1362-1369. (in Chinese))
- [14] 高富强, 康红普, 林健. 深部巷道围岩分区破裂化数值模拟[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 21-25. (GAO Fuqiang, KANG Hongpu, LIN Jian. Numerical simulation of zonal distrigation of surrounding rock mass in deep mine roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 21-25. (in Chinese))
- [15] 宫凤强, 罗勇, 刘冬桥. 深部直墙拱形隧洞围岩板裂破坏的模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1091-1100. (GONG Fengqiang, LUO Yong, LIU Dongqiao. Simulation tests on spalling failure in deep straight-wall-top-arch tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1091-1100. (in Chinese))

岩土工程西湖论坛（2023）一号通知

岩土工程西湖论坛（2023）拟定于2023年10月20—22日在杭州花家山庄召开。近年来，城市地下空间开发和利用在我国发展很快，许多岩土工程新理论、新技术和新方法在城市地下空间开发建设中得到应用和发展，也有不少技术难题尚待解决。为了加强技术交流，促进城市地下空间开发中岩土工程技术的进一步发展和提高，更好地为我国城市化建设服务，本

次会议主题设定为“城市地下空间开发中岩土工程新进展”。本次会议前，将围绕该主题组织有关专家学者编写岩土工程西湖论坛系列丛书第7册《城市地下空间开发中岩土工程新进展》，并在中国建筑工业出版社出版。热忱欢迎各位同行积极参与。联系人：宋秀英（0571-88208775, xysong2020@163.com）。了解更多信息请关注网站：www.geo-forum.cn。

（浙大滨海和城市岩土工程研究中心，岩土工程西湖论坛组委会）