

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.016

# 复杂地质条件下巷道有效支护机理研究

黄松涛, 袁海平, 夏子晋, 于旭阳

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章以华南某大型铁矿工程为例,通过FLAC3D软件自主编程模拟分析正交穿越断层破碎带巷道,基于模拟分析结果提出支护方案,多角度分析各支护方案围岩破损演化规律,横向对比方案优劣,同时提出不同工况条件下适宜的支护形式。研究表明:破坏接近度(failure approach index, FAI)指标分区可确定围岩损伤程度,界定围岩破损区域;受现场围岩岩性和断层地质构造影响,该工程断层上下盘临近区域为巷道支护关注重点;围岩影响率可综合评估支护设计方案优劣,便于选择适宜支护形式。该研究成果为特殊地段巷道有针对性和目的性支护提供了一种有效方法,可为实际工程设计和安全施工提供借鉴。

**关键词:**断层破碎带;围岩稳定性;支护形式;破坏接近度(FAI);围岩影响率

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)11-1542-08

## Study on effective support mechanism of tunnels under complex geological conditions

HUANG Songtao, YUAN Haiping, XIA Zijin, YU Xuyang

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This paper takes a large-scale iron mine project in South China as an example, and uses FLAC3D software to independently program and simulate tunnels crossing fault fracture zone orthogonally. Based on the simulation analysis results, support schemes are proposed. The evolution law of surrounding rock damage in each support scheme is analyzed from multiple perspectives, and the advantages and disadvantages of the schemes are compared horizontally. At the same time, suitable support forms under different working conditions are proposed. Research has shown that the failure approach index (FAI) zoning can determine the degree of surrounding rock damage and define the area of surrounding rock damage; given the influence of surrounding rock lithology and fault geological structure, the areas near the hanging wall and footwall of the fault are identified as the key focus for tunnel support in this project; the impact rate of surrounding rock can comprehensively evaluate the pros and cons of support design schemes, thus facilitating the selection of suitable support forms. The research results provide an effective method for targeted and purposeful support of tunnels in special areas, which can provide reference for practical engineering design and safe construction.

**Key words:** fault fracture zone; stability of surrounding rock; support form; failure approach index (FAI); impact rate of surrounding rock

作为地下工程中常见不良地质现象之一,断层及其破碎带会弱化岩体强度参数,造成临近巷道围岩失稳破坏<sup>[1]</sup>。受地壳运动作用的影响,断

层破碎带岩层出现不连续性和非完整性,导致其存在强度低、变形大、透水性大的特性<sup>[2]</sup>。在穿越断层破碎带过程中,由于工程地质条件复杂突变,

收稿日期:2023-06-25;修回日期:2023-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874112);安徽高校协同创新资助项目(GXXT-2020-055)

作者简介:黄松涛(1999—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

袁海平(1976—),男,江西九江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: seapie@hfut.edu.cn.

围岩变形程度较常规区段大大增加,支护结构因无法阻挡围岩变形而导致冒顶、片帮等地质灾害<sup>[3]</sup>。目前常规解决方法就是提升区域支护强度,但这也意味着工程成本的增加<sup>[4]</sup>,如何平衡好这两者关系是行业亟待解决问题之一。

破坏接近度(failure approach index, FAI)是以屈服接近度为基础,结合材料塑性剪应变与极限塑性剪应变概念,从而定量评估岩土体损伤程度,分析开挖扰动效应对围岩稳定性影响。目前许多学者针对破坏接近度的概念及应用展开了研究。文献[5]通过破坏接近度和强度折减法综合评价边坡稳定性,定量描述岩体稳定程度的演化发展规律,对类似工程具有指导意义;文献[6]建立相应的智能反演分析方法,较好地模拟围岩开挖损伤区的时效性演化特征;文献[7]将在隧道工程中引入岩体破坏接近度指标,提出一种围岩最优支护时机确定方法;文献[8]推导出基于 M-C 准则的屈服接近度和破坏接近度函数,通过 FLAC3D 与 MATLAB 软件后期开发三维重构程序,用以三维展示岩石内部裂隙形态。上述研究成果主要针对破坏接近度理论进行了改进和一般工程应用,特殊地段及复杂地质条件下围岩稳定性相关研究较少,在工程应用方面稍有欠缺。

本文基于 Mohr-Coulomb 强度准则的破坏接近度理论,以华南某大型铁矿为案例,研究断层破碎带区段围岩与支护结构相互作用机理,利用 FLAC3D 计算软件与破坏接近度指标分区甄别

$$I_{YAI} = \begin{cases} \frac{I_1 \sin \varphi / 3 + (\cos \theta_\sigma - \sin \theta \sin \varphi / \sqrt{3}) \sqrt{J_2 - c \cos \varphi}}{I_1 \sin \varphi / 3 - c \cos \varphi}, & \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \leq \sigma_R; \\ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{c \cos \varphi - \sigma_1 \sin \varphi}, & \frac{c \cos \varphi}{\sin \varphi} > \sigma_1, \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} > \sigma_R \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $I_1$  为应力张量第一不变量;  $J_2$  为偏应力张量第二不变量;  $\theta_\sigma$  为应力洛德角;  $\varphi$  为内摩擦角;  $c$  为黏聚力;  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\sigma_3$  为最小主应力;  $\sigma_R$  为岩土材料同时处于拉伸状态与压剪状态时的应力莫尔圆圆心横坐标,当  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2 \leq \sigma_R$  时材料处于压剪状态,当  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2 > \sigma_R$  时材料处于拉伸状态。

破坏接近度综合考虑了破坏度和屈服接近度,可以用来描述单元应力状态与破坏应力状态的接近程度。当 FD 为 1 时岩土体塑性剪应变达到极限值,岩土材料处于临界破坏状态,因而破坏接近度可按  $[0, 1)$ 、 $[1, 2)$ 、 $[2, +\infty)$  将岩体分别划分为弹性、塑性和破坏 3 个阶段<sup>[11]</sup>。FAI 计算公式为:

界定巷道支护薄弱区域,改善并优化支护形式,进一步探究破坏接近度理论的工程应用效果,以期类似工程支护设计提供一定借鉴指导。

## 1 破坏接近度理论及其指标分区

岩体变形破坏大体上可分为裂隙压密、弹性变形、塑性变形和宏观破坏这 4 个阶段<sup>[9]</sup>,准确描述某一应力状态下岩土体的力学状态,是综合评判围岩危险性程度的重要指标。从弹性阶段到破坏阶段,岩土体会经历塑性区不断积累直至完全破坏的过程,即岩体损伤演化过程。塑性力学中存在塑性剪应变这一概念,用以描述塑性变形阶段中岩土体的损伤程度,其量值体现了岩土体的损伤度<sup>[10]</sup>。极限塑性剪应变则可以作为判断岩土体是否破坏的判据,根据塑性剪应变与极限塑性剪应变的比值可以确定岩土体破坏度(failure degree, FD):

$$D_{FD} = \frac{\gamma}{\gamma_p} \quad (1)$$

其中:  $D_{FD}$  为岩土体破坏度;  $\gamma$  为塑性剪应变;  $\gamma_p$  为材料极限塑性剪应变。

空间应力状态下的一点沿最不利应力路径到屈服面的距离与相应的最稳定参考点在相同罗德角方向上沿最不利应力路径到屈服面的距离之比称为屈服接近度(yielding approach index, YAI),表示该点应力状态与屈服点的接近程度。屈服接近度公式为:

$$I_{FAI} = \begin{cases} \omega, & 0 \leq \omega < 1; \\ 1 + D_{FD}, & \omega = 1, D_{FD} \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $I_{FAI}$  为破坏接近度;  $\omega$  为屈服接近度相补函数,  $\omega = 1 - I_{YAI}$ 。

隧道围岩经开挖扰动后初始应力平衡状态被打破,围岩发生应力释放、次生应力场重分布并局部产生应力集中现象,当应力集中值超过围岩峰值强度时,临近隧道的岩体开始破坏,并向围岩深部延伸扩展,直至围岩应力再次达到平衡状态<sup>[12]</sup>。根据受扰动程度的不同,围岩可划分为多个区域,文献[13-15]对围岩松动圈及其状态分布图均有一定研究;文献[16]将围岩稳定性以破坏接近度为指标分为 4 个区域:当  $0 \leq I_{FAI} < 0.8$  时为低应力区;当  $0.8 \leq I_{FAI} < 1.0$  为开挖扰动区;当

$1.0 \leq I_{FAI} < 2.0$  为开挖损伤区;当  $I_{FAI} \geq 2.0$  为破坏区。具体分区如图 1 所示。

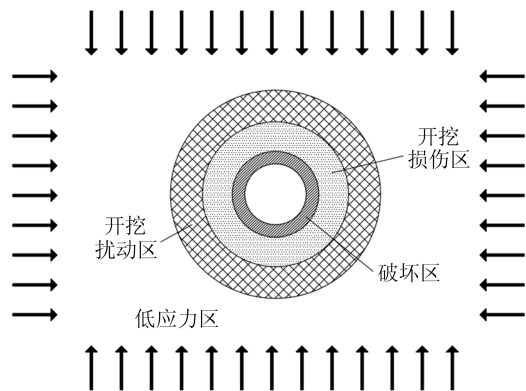


图 1 隧道围岩稳定性分区

## 2 巷道围岩与支护结构作用规律

### 2.1 工程概况

华南某大型铁矿断裂构造十分发育,矿区内主要断层有 F2、F10、F11 和 F20,其中 F2 断层产于背斜与向斜转折部位,倾向北西,倾角  $80^\circ \sim 85^\circ$ 。该断层为高角度逆断层,具有张性结构特征,其宽度为 2.17~42.27 m,断层附近上盘和下盘岩性破碎,岩溶化强烈发育。在靠近西矿段矿体下盘就是 F2 大断层,岩性为泥岩与粉砂岩互层,断层胶结岩充填,整体稳定性极差。矿区充水类型为孔隙水,未发现老空积水,受采掘破坏或影响的孔隙、裂隙、岩溶含水层补水条件差,水文地

质条件简单。

研究工作面埋深约 500 m,现场西矿区运输穿脉巷道需要多次穿越 F2 大断层,现场工程位置如图 2 所示。

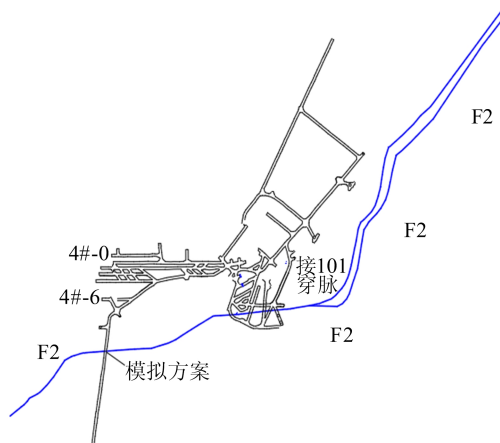


图 2 现场工程位置

### 2.2 计算方案

巷道位于模型正中部,埋深为 500 m,上部岩层平均容重取  $26 \text{ kN/m}^3$ ,模型尺寸为  $40 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ ,四周及底部位移约束,顶部按埋深换算上覆岩体应力后施加应力边界条件。断层倾角设置为  $80^\circ$ ,宽度为 2 m,巷道正交穿越断层破碎带,断面形式为三心拱,直墙高 3.0 m、拱高 1.3 m、宽度 4.0 m。在巷道直墙、斜拱和拱顶临近围岩布设位移监测点,监测点布置点位与模型设置如图 3 所示。

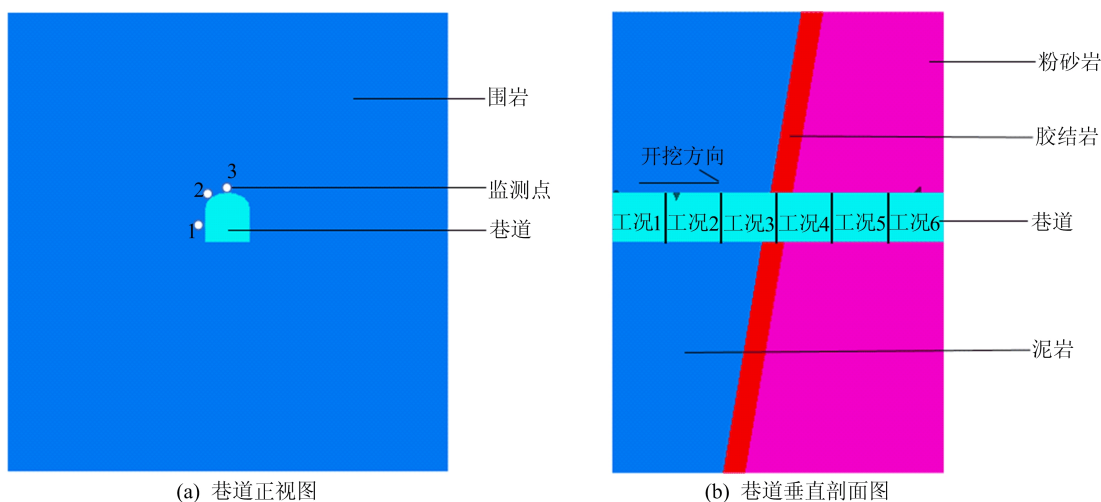


图 3 计算模型

模拟支护方案共有 4 种方案,分别为未支护、素喷、素喷锚网和组合型钢,采取分步开挖及时支

护形式,即每开挖 5 m 为 1 种工况,总计 6 种工况,前期方案试算确定巷道薄弱区,采用适宜的支

护形式加固各工况段,具体支护方案见表 1 所列。

表 1 6 种工况下支护方案

支护方案	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
未支护	无	无	无	无	无	无
素喷	素喷	素喷	素喷	素喷	素喷	素喷
素喷锚网	锚网	锚网	锚网	锚网	素喷	素喷
组合型钢	锚网	锚网	型钢	锚网	素喷	素喷

表 2 岩体力学参数

围岩	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	黏聚力 残余值/MPa	内摩擦 角/(°)	内摩擦角 残余值/(°)
泥岩	2 140	1.0	4.6	0.25	1.8	0.5	33	28
粉砂岩	2 300	0.8	10.4	0.27	3.2	1.6	37	33
胶结岩	1 800	0.5	1.0	0.30	1.0	0.5	26	22

现场支护形式主要为素喷、锚网、型钢 3 种,选用支护材料分别为标准 C30 素混凝土、普通中空注浆锚杆和 1 500 mm×1 500 mm 钢筋网片、300 mm×126 mm×9 mm 的 30 A 工字钢,根据现场施工情况和《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[17]</sup>选取支护参数见表 3 所列。计算模型中在巷道表面建立壳型单元,赋予对应支护参数分别模拟素喷与型钢支护结构。现场锚网采用预先焊接钢筋网再打锚杆的施工方式,同理在巷道表面利用土工格栅单元模拟焊接金属网,锚杆单元则按金属网尺寸布设在网中心处和边角。

由于断层破碎带软弱岩体的存在,加上地质构造条件和水文条件影响,将导致上下盘围岩发生力学性能劣化效应,但 Mohr-Coulomb 本构模型无法体现这一复杂效果。

为体现断层对临近围岩的软化作用,模拟工况所涉及的 3 种围岩全部采用应变软化模型,结合现场地质资料与室内实验确定巷道围岩弱化前后力学参数,具体岩体参数见表 2 所列。

以组合型钢方案为例,根据各工况段所选取的支护形式,在数值模型内部分别设置素喷、锚网、型钢 3 种支护方式,整体模型及内部支护展示效果如图 4 所示。

表 3 支护参数

支护形式	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/cm
素喷混凝土	2 200	30	0.20	2.0
锚杆	7 800	210	0.32	
金属网	7 850	200	0.26	0.4
型钢	7 850	206	0.30	30.0

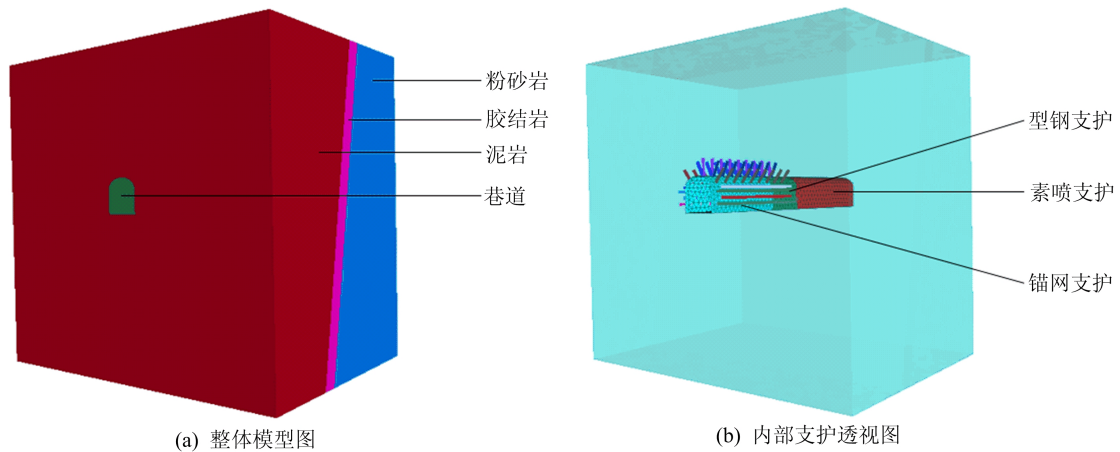


图 4 模型及内部支护图

### 2.3 结果分析

调取直墙、斜拱和拱顶的监测点空间位移数据,按“直墙—斜拱—拱顶”对应“1—2—3”顺序绘制三点线段形式的不同支护方案各工况的围岩位移特征如图 5 所示。从图 5 可以看出:工况 1~

工况 3 整体位移量为工况 4~工况 6 的 180%~220%,显然工况 1~工况 3 为重点支护区域,其中直墙、斜拱、拱顶位移量呈递增趋势,最大位移位于拱顶处;采取素喷和素喷锚网方案后,工况 1~工况 3 空间位移均出现明显下降,下降幅度约

为 20%和 30%，而工况 3 在采取组合型钢方案后，位移量进一步下降，较未支护、素喷和素喷锚网方案分别减少约 70%、60%和 50%，支护效果明显；工况 4~工况 6 这 4 种方案区分程度不大，3 处位移量趋于一致，分析其主要原因为下盘围岩质量整体优于上盘，下盘区域采取素喷支护预防表层岩石剥落即可。

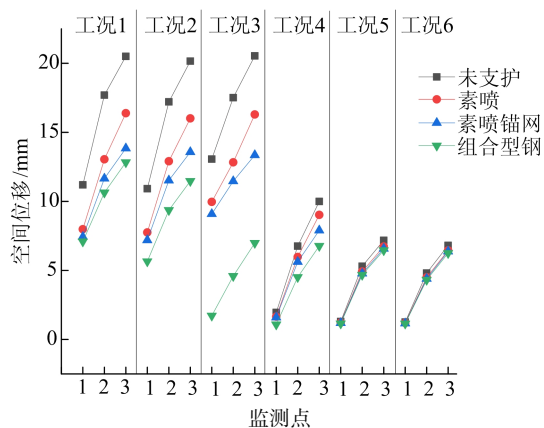
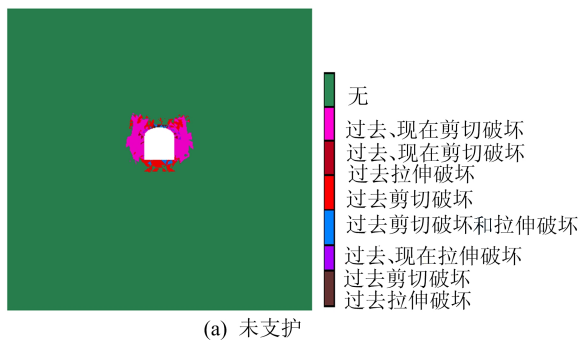


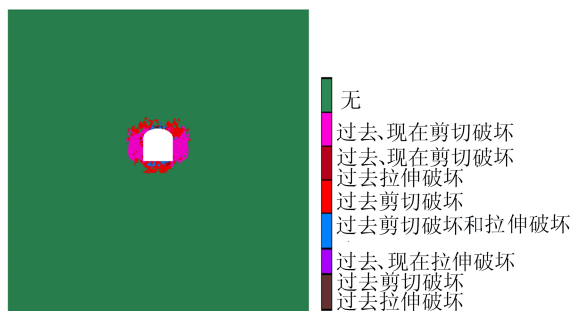
图 5 围岩位移特征曲线

由于断层破碎带位于工况 3、工况 4 区域交界处，加之断层前后围岩强度存在差异性，因而断层岩体扰动劣化导致的巷道失稳区域主要位于工况 3。调取工况 3 开挖进深  $y=14\text{ m}$  处巷道断面塑性区分布图如图 6 所示，横向对比 4 种方案断层处巷道围岩塑性区分布情况，未支护方案塑性区以剪切塑性区为主，分布于左右两侧围岩与斜拱处围岩，两者塑性区发育形成塑性贯通，巷道呈现“蝶状破坏”趋势。

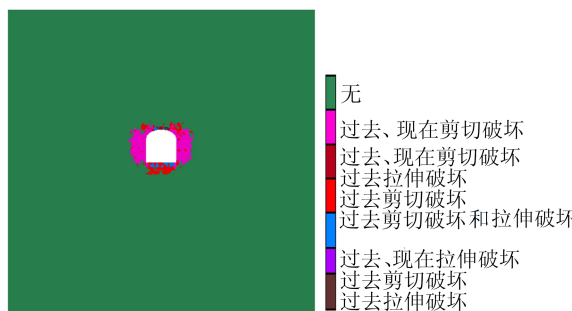
素喷和素喷锚网方案虽明显抑制了斜拱处塑性区发育范围，但侧帮临近围岩塑性贯通破坏现象仍旧存在，巷道失稳问题未得到根本性改善。而在采取组合型钢方案后，围岩内部塑性区基本消失，仅表层存在少量岩体剪切剥落，巷道整体稳定安全。



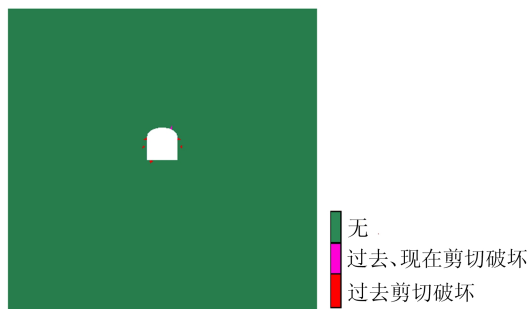
(a) 未支护



(b) 素喷



(c) 素喷锚网



(d) 组合型钢

图 6 巷道断面塑性区分布

### 3 巷道围岩有效支护形式选择

虽然通过塑性区可确定围岩破损区域，但是塑性区只能显示进入塑性状态的围岩区域，无法定量描述围岩应力状态与破损程度。为解决这一问题，本研究利用破坏接近度公式自主编写 FLAC3D 软件 FISH 语言，利用线性插值方法对模型单元赋予对应破坏接近度数值，通过破坏接近度指标分区界定损伤区和破坏区，并通过数据统计损伤及破坏区体积、分布情况重新评估支护方案。

#### 3.1 方案对比

未支护方案工况 1~工况 4 多处出现破坏区，斜拱和直墙临近围岩局部先产生破坏区，再向深部发展逐渐发展至贯通破坏，最后覆盖周边围岩导致巷道失稳破坏，如图 7 所示。素喷方案工况 1、工况 2 存在少量破坏区，已形成明显弧形破坏，个别甚至贯通连接，工况 3、工况 4 临近围岩

大范围破坏断裂,集中于断层前后 4 m 区域。素喷锚网方案工况 1、工况 2 较素喷支护有所改善,局部存在少量破坏区,工况 4 破坏量有所减少,但工况 3 仍存在围岩整体损伤破坏现象,支护改善效果较差。组合型钢方案的工况 3 支护效果改善明显,破坏区基本消失,其余支护段与素喷锚网方案效果接近,破坏区零星存在,整体无不良隐患。

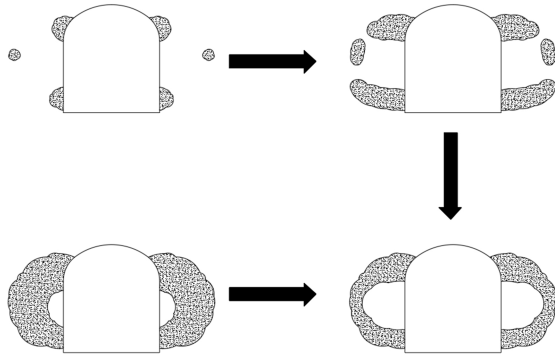


图 7 巷道断面塑性区分布图

在界定破损区域的基础上,按照破坏接近度  $1.0 \leq I_{FAI} < 2.0$ 、 $I_{FAI} \geq 2.0$  遍历模型单元提取开挖损伤区及破坏区体积,整理 4 种方案各工况段损伤区及破坏区数据,得到损伤区及破坏区体积统计情况如图 8 所示。

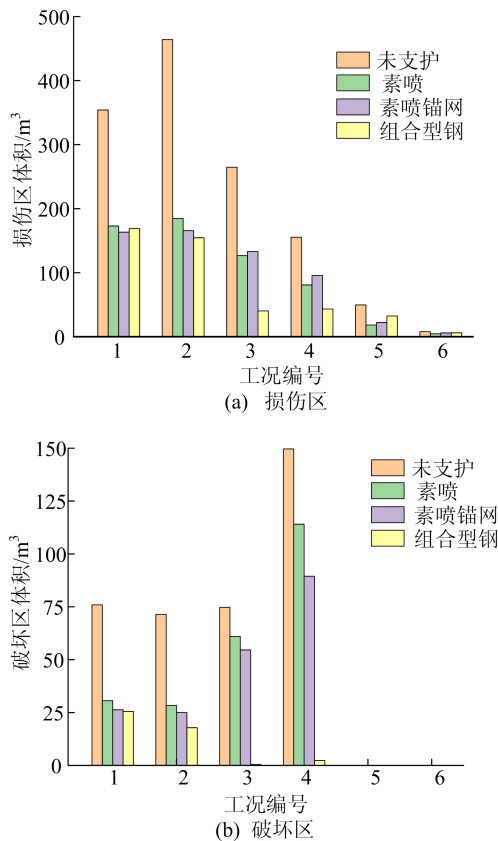


图 8 损伤区及破坏区体积统计

由图 8 可知,损伤区与破坏区体积主要分布在工况 1~工况 4,工况 5、工况 6 仅存在少量损伤区,在采用支护手段后工况 1、工况 2 损伤区与破坏区体积大幅下降,平均降幅达 55%,工况 3、工况 4 损伤区体积虽然有所减少,但破坏区变化并不明显,根据损伤区及破坏区分布情况可将区域划分为次重点支护区域(工况 1、工况 2)、重点支护区域(工况 3、工况 4)和普通支护区域(工况 5、工况 6)。

### 3.2 支护形式选择

隧巷道周边一定范围内,对洞身稳定性有影响的岩土体称为围岩,一般认为垂直应力大于  $1.05\gamma H$  的岩体属于围岩范畴<sup>[18]</sup>。本研究提出围岩影响率这一概念,即损伤区及破坏区体积与围岩体积比值,利用围岩影响率提出针对性的施工建议,快速选择适宜支护形式,改善支护效果。围岩影响率公式为:

$$P = \frac{V_D}{V_T} \quad (4)$$

其中: $P$  为围岩影响率; $V_D$  为损伤区与破坏区体积; $V_T$  为围岩体积。

当影响率达到 1 时,围岩全部损伤或破坏,巷道达到临界破坏状态,为确保巷道整体稳定,应预留一定安全储备。参考《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)<sup>[19]</sup>永久荷载和偶然荷载作用下隧道安全系数取 1.5,由于矿山巷道使用寿命平均仅为 3~5 a<sup>[20]</sup>,加之围岩损伤并未完全丧失强度,矿山巷道安全系数可取 1.25。在安全系数取 1.25 的基础上,本文选取 0.8 作为围岩影响率阈值。

4 种支护方案各工况段损伤区及破坏区体积数据由图 7 获取,同理可利用 FISH 语言获取不同模型围岩体积数据,见表 4 所列。

表 4 6 种工况下围岩体积 单位:m³

支护方案	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
未支护	281.8	787.4	1 327.7	1 473.1	529.3	565.4
素喷	243.3	455.3	671.4	730.8	754.5	770.1
素喷锚网	282.2	602.2	672.3	714.4	731.3	743.2
组合型钢	282.2	602.2	651.6	694.1	714.8	730.3

经计算,4 种支护方案各工况段围岩影响率见表 5 所列。横向对比 4 种支护方案的围岩影响率,该工程的重点支护区域、次重点支护区域和普通支护区域应采取的支护形式分别为型钢或锚

网、锚网和素喷,组合型钢方案为最优选择。当工况段围岩影响率超过 0.8 或破坏区分布存在贯通连接破坏时,应对该工况段内支护形式进行加强处理。

表 5 6 种工况下围岩影响率

支护方案	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
未支护	1.53	1.23	0.98	1.09	1.09	1.07
素喷	0.84	0.91	0.85	1.04	1.04	1.02
素喷锚网	0.67	0.63	0.81	1.02	1.03	1.02
组合型钢	0.69	0.61	0.63	0.65	0.68	0.67

### 3.3 现场监测比对

现场在断层前后 3 m 处采用型钢支护,断层上、下盘分别采用锚网和素喷支护,与组合型钢方案接近。为验证模拟方案的可靠性,以断层为 0 m 处,上、下盘分别为负、正向,每间隔 2 m 现场布点记录巷道掘进后拱顶、斜拱和直墙的空间位移,与模拟位移结果进行对比,如图 9 所示。

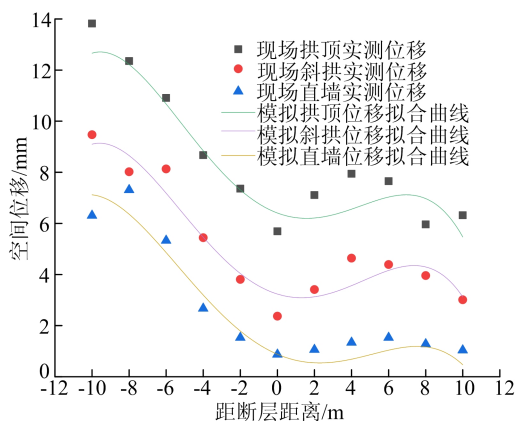


图 9 实测与模拟空间位移对比

现场实测数据错落分布于拟合曲线两侧,受计算简化和现场不确定因素影响,现场实测与模拟方案存在一定误差,但两者偏差保持在 0~25%,属于正常范围。两者 3 处监测点位移变化趋势一致,均呈现“减—增—减”趋势,说明模拟方案与现场实际较为符合,可以为施工设计提供参考。

## 4 结 论

1) 塑性区只能显示进入塑性状态的围岩区域,但无法定量描述围岩应力状态与破损程度。本文引入破坏接近度理论,利用结合单元线性插值方法的 FISH 程序定量界定围岩破损区域。

2) 根据损伤区及破坏区分布情况,将其划分为次重点支护区域(工况 1、工况 2)、重点支护区域(工况 3、工况 4)和普通支护区域(工况 5、工况 6)。其中,临近断层巷道围岩主要呈现“蝶状”破坏形态,素喷及锚网支护在一定程度上抑制巷道围岩变形破坏,但不及型钢支护效果。

3) 基于隧巷道围岩的定义,本文提出围岩影响率的概念,通过分析 4 种方案各工况的损伤区及破坏区体积分布情况和围岩影响率,给出有针对性的适宜支护形式选择,并通过现场监测对比验证计算结果合理性。

4) 断层破碎带的工程地质条件具有特殊性和复杂性,受巷道穿越形式、断层倾角、水文条件和围岩物理力学性质等其他多方面因素影响,本文所提出的分区影响率量化方法仅针对该工程进行了分析,其工程适用性有待改进、完善。

### [参 考 文 献]

- [1] 刘泉声,张伟,卢兴利,等. 断层破碎带大断面巷道的安全监控与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1954-1962.
- [2] 孟庆彬,韩立军,齐彪,等. 复杂地质条件下巷道过断层关键技术及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 199-207.
- [3] 陈晓祥,吴俊鹏. 断层破碎带中巷道围岩大变形机理及控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 885-892.
- [4] XIA Z, YUAN H, LI H, et al. Energy transfer and damage evolution process research of ore rock-filling body under the blasting load[J]. Minerals, 2022, 12(11): 1362.
- [5] 杨文东,张强勇,宋萌勃,等. 基于破坏接近度和强度折减法的边坡稳定性评价[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(6): 82-87.
- [6] 杨艳霜,周辉,梅松华,等. 高地应力硬脆性围岩开挖损伤区时效性扩展案例分析:特征与机制[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1357-1365.
- [7] 梁鹏,高永涛,周喻,等. 隧道初支合理支护时机确定方法及其工程应用[J]. 工程科学学报, 2022, 44(2): 265-276.
- [8] 王峰. 基于破坏接近度的围岩稳定性分析及三维重构研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
- [9] 李建林. 岩石力学[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2014: 17.
- [10] 张振华,钱明明,位伟. 基于改进破坏接近度的千将坪岸坡失稳机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1371-1384.
- [11] 袁海平,王文辉,叶晨旭. 含瓦斯煤岩体破坏接近度分析及三维重构研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(6): 63-68.
- [12] 潘锐,杜文正,程桦,等. 隧道下穿采空区初期支护围岩变形及受力研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(5): 901-910, 920.

(下转第 1555 页)

压缩模量、液塑限等工程指标出现明显下降,内摩擦角基本不变,自由膨胀率及渗透系数得到提高。

2) 老黏土内部矿物与酸溶液发生化学反应,胶结物质不断流失,微观表面变得破碎杂乱,叠聚体数量上升,比表面积增加,孔隙率持续上升。

3) 建立了老黏土抗剪强度、压缩模量、渗透系数、自由膨胀率的工程特性指标变化率随浸泡溶液 pH 值变化的数理模型,可供设计参考。

4) 对酸溶液作用下老黏土污染程度进行评价时,应首选黏聚力、压缩模量、渗透系数作为评价指标,不宜用自由膨胀率、内摩擦角进行评价。

### 【参 考 文 献】

- [1] 郭杨,杨成斌. 硬黏土地基与地下工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [2] 刘汉龙,朱春鹏,张晓璐. 酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(8):1213-1217.
- [3] 朱春鹏,刘汉龙,沈扬. 酸碱污染软黏土变形性质的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(10):1559-1563.
- [4] 朱春鹏,刘汉龙,沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(7):1146-1152.
- [5] 牟春梅,韦瑜玺. 桂林地区酸、碱污染红黏土力学效应弱化试验研究[J]. 重庆大学学报,2019,42(6):109-118.
- [6] 潘泰,赵贵涛,黄英. pH 值对云南红黏土力学特性及微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报,2021,40(10):3427-3434,3441.
- [7] 陈筠,王麒,于明圆,等. 碱污染红黏土抗剪强度及破裂面微观结构特征研究[J]. 工程地质学报,2018,26(5):1300-1310.
- [8] WANG Q, CHEN J, LIU J, et al. Relationships between shear strength parameters and microstructure of alkaline-contaminated red clay[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(27):33848-33862.
- [9] 杨秀娟,汪源,樊恒辉,等. 孔隙溶液酸碱度对重塑黄土工程性质的影响研究[J]. 长江科学院院报,2018,35(9):92-97.
- [10] 杨秀娟,武雷杰,刘惹梅,等. 酸性溶液对重塑黄土工程性质的影响研究[J]. 人民黄河,2020,42(7):122-125,135.
- [11] 刘华,胡文乐,胡鹏飞,等. 酸污染黄土强度指标及电阻率评价研究[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(2):662-672.
- [12] 刘华,何江涛,赵茜,等. 酸污染原状黄土渗透微观特征演变规律试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(3):765-772.
- [13] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸雨湿干循环作用下百色膨胀土裂隙发育规律及其微观机制[J]. 中国公路学报,2021,34(1):47-56.
- [14] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸性环境对百色膨胀土胀缩性能的影响及其微观解释[J]. 交通运输工程学报,2019,19(1):24-32.
- [15] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸雨入渗膨胀土的水土化学试验与作用机理分析[J]. 岩土工程学报,2022,44(8):1483-1492.
- [16] 刘宽,叶万军,高海军,等. 酸碱污染黄土抗剪强度演化规律及微观机制[J]. 岩土力学,2022,43(增刊1):1-12.
- [17] 王绪民,陈善雄,程昌炳. 酸性溶液浸泡下原状黄土物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(9):1619-1626.
- [18] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸性环境干湿循环条件下膨胀土的膨胀特性及微观作用分析[J]. 中国公路学报,2019,32(3):34-43.
- [19] 刘宽叶,万军,高海军,等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(10):2148-2159.
- [20] 邓华锋,原先凡,李建林,等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):4065-4072.
- [21] 谌文武,刘宏伟,张起勇. SH 加固酸碱污染黄土的抗压强度特性试验研究[J]. 桂林理工大学学报,2017,37(3):422-428.
- [22] WANG Y H, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characterizations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(6):587-600.
- [23] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.
- [24] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:1-88.

(责任编辑 吴 亮)

### (上接第 1548 页)

- [13] 朱俊福,尹乾,张京民,等. 深部缓倾软弱夹层巷道围岩变形演化与非对称支护[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2022,4(5):47-61.
- [14] 左建平,魏旭,王军,等. 深部巷道围岩梯度破坏机理及模型研究[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(3):478-485.
- [15] 刘允秋,肖益盖,李同鹏,等. 深井高应力破碎岩体支护技术研究与应用[J]. 金属矿山,2022(6):29-34.
- [16] 张传庆,周辉,冯夏庭. 基于破坏接近度的岩土工程稳定性评价[J]. 岩土力学,2007,28(5):888-894.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017:28.
- [18] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010:42.
- [19] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路隧道设计规范:JTG 3370. 1—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018:50.
- [20] 袁海平,叶晨旭,王文辉. 不同等级岩巷力学参数赋值与素喷支护效果评价[J]. 金属矿山,2022(3):51-56.

(责任编辑 吴 亮)