# 瓮福磷矿多薄层互层巷道支护效果对比与数值模拟研究*

王鸿[1]，钟阳[1]，杨光海[1]，万文[2]

（1.瓮福(集团)有限责任公司， 贵州 贵阳 550002；
2.湖南科技大学 土木工程学院， 湖南 湘潭市 411201）

**摘要**：针对瓮福磷矿某工作面含软弱夹层巷道冒顶、片帮等围岩失稳现象频发的难题，通过现场调查与FLAC3D数值模拟，系统对比了常规锚网喷支护与“锚网喷＋钢拱架＋超前支护”复合支护技术的围岩控制效果。研究结果表明：软弱夹层含3.9%高岭石，遇水膨胀软化是围岩劣化的主因；复合支护技术使巷道竖向位移由－8.33 mm降至－6.67 mm，降幅达19.93%，$X$、$Y$方向的水平位移由2.61 mm、－1.64 mm分别降至1.27 mm、－0.58 mm，降幅分别达51.34%、64.63%，应力集中显著缓解，总破坏单元降低13.82%。现场应用表明，月均事故率由0.6次降至0.27次，降幅达55.0%。复合支护技术有效控制了多薄层互层条件下的围岩大变形，为含密集软弱夹层巷道的安全掘进提供了理论依据与关键技术范式。

**关键词**：多薄层互层；软弱夹层；巷道支护；围岩稳定性；数值模拟

**中图分类号**：TD353 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)06-0112-08

**Support Effect Comparison and Numerical Simulation of Multi-Thin Interbeds Roadways in Wengfu Phosphate Mine**

*Wang Hong*[1], *Zhong Yang*[1], *Yang Guanghai*[1], *Wan Wen*[2]

(1.Wengfu (Group) Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550002, China;
2.School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

**Abstract**: To address the frequent occurrence of surrounding rock instability such as roof fall and rib spalling in roadways with weak interlayers at a working face of Wengfu Phosphate Mine, field investigations and FLAC3D numerical simulations were conducted, and the surrounding rock control effects of conventional bolt-mesh-shotcrete support and the composite support technology of “bolt-mesh-shotcrete＋steel arch＋advanced support” were systematically compared. The research results show that the weak interlayer contains 3.9% kaolinite, and expansion and softening after water immersion are the main causes of surrounding rock deterioration. The vertical displacement of the roadway is reduced from －8.33 mm to －6.67 mm by the composite support technology, with a decrease of 19.93%. The horizontal displacements in $X$ and $Y$ directions are decreased from 2.61 mm and －1.64 mm to 1.27 mm and －0.58 mm, with reductions of 51.34% and 64.63% respectively. The stress concentration is remarkably alleviated, and the total number of failure units is lowered by 13.82%. It is shown by field application that the average monthly accident rate is reduced from 0.6 times to 0.27 times, with a decrease of 55.0%. The large deformation of surrounding rock under multi-thin interbed conditions is effectively controlled by the composite support technology. A theoretical basis and key technical paradigm are provided for the safe excavation of roadways containing dense weak interlayers.

**Key words**: Multi-thin interbeds, Weak interlayer, Roadway support, Surrounding rock stability, Numerical simulation

## 0 引言

软弱夹层（如泥化夹层、破碎带、薄层炭质页岩等）具有强度低、易风化、遇水软化等特性，其厚度与赋存状态（连续性与倾角）直接影响巷道围岩的整体承载能力和变形破坏模式[1-2]。软弱夹层作为岩体中的薄弱带，其强度低、遇水易软化膨胀的特性，直接导致巷道围岩稳定性骤降[3-4]。因此，开展含软弱夹层巷道掘进支护技术研究，对保障矿山安全生产、提高工程效率具有重要理论与实践意义。

* **收稿日期**：2025-07-16
**基金项目**：国家自然科学基金项目(52274194)
**作者简介**：王鸿(1980—)，女，重庆南川人，硕士，高级工程师，主要从事磷矿山采矿技术工作。E-mail:546797674@qq.com

在软弱夹层巷道围岩稳定性研究中,国内外学者已从力学特性、支护技术及数值模拟等多维度取得显著进展[5-6]。学者们深入探讨了软弱夹层位置、厚度及水理性质对围岩稳定性的控制作用,研究背景多聚焦于深部或复杂条件矿山巷道[7-8]。申付新等[9]针对深部巷道顶板软弱夹层问题,采用数值模拟手段开展研究,发现夹层临近临空面时塑性区扩大,导致失稳风险骤增;任家苇等[10]基于某矿巷道研究,揭示了软弱夹层厚度超过 0.3 m 是围岩稳定性陡降的关键阈值;而 Tang 等[11]通过断裂力学试验,证实了含水软弱夹层使硬岩抗剪强度显著弱化。在支护技术领域,Wang 等[12]使用针对夹层滑移失稳开发的"锚索+W 钢带+喷层"体系后,现场冒顶事故降低 76%; Frenelus 等[13]研究了深埋软岩隧道在渗流条件下的稳定性,分析了渗流对隧道围岩应力、位移和塑性区半径的影响,提出了高阻力支护方案以减小塑性区和切向应力;常丽燕等[14]分析了不同工况下穿越含软弱夹层地层的隧道围岩变形特性,发现夹层倾角>30°时,围岩剪切滑移风险剧增。

综上,现有研究多聚焦单一软弱夹层或均质条件,而针对瓮福磷矿磨坊矿典型的多薄层互层结构及其复合致灾机制的系统研究仍较匮乏。为此,本研究通过精细化数值模拟,重点量化分析多软弱夹层互层条件下,常规锚网喷支护与"锚网喷+钢拱架+超前支护"复合技术对围岩稳定性的控制效果差异。旨在提出适应多薄层互层地质特征的差异化支护方案,优化高应力-强扰动环境中的巷道稳定性控制技术,以弥补当前该类复杂工况系统性研究的不足。

## 1 工程背景与试验基础

### 1.1 工程背景

瓮福(集团)有限责任公司是国家重要的磷肥生产基地,其中磨坊矿 150 万 t/a 的地下采矿项目是保障磷资源稳定供应的关键工程。该项目井巷工程自 2021 年开工以来,受复杂巷道围岩工程地质及水文地质条件制约,面临着以下安全开采难点。

(1) 地质条件复杂。矿区地处高坪背斜北段,共发育 33 条断层,节理裂隙发育。围岩以半坚硬-软弱岩组为主,关键工程区域(二采区辅助斜坡道、主胶带斜井)广泛分布软弱夹层,其中含主斜井 9 处,辅助斜坡道 11 处(含 1 断层带)。夹层岩性主要为薄层含砂质板岩及泥质板岩,厚度为 0.1~1.0 m,裂隙发育程度不一,从弱发育至极发育均有分布。含软弱夹层掌子面断面如图 1 所示。

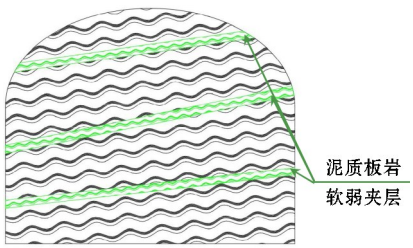



**图 1 含软弱夹层掌子面断面**

**Fig.1 Cross-sectional of the tunnel face with weak interlayer**

(2) 工程灾害易发。现场工程实践表明,软弱夹层及断层破碎带等不良地质构造对围岩稳定性具有显著的控制作用。现有的支护方案对复杂地质条件下围岩完整性及软弱结构面的影响机制认识不足,导致局部区域支护效能偏低,影响了施工安全与进度控制。现场冒顶事故如图 2 所示。



**图 2 现场冒顶事故**

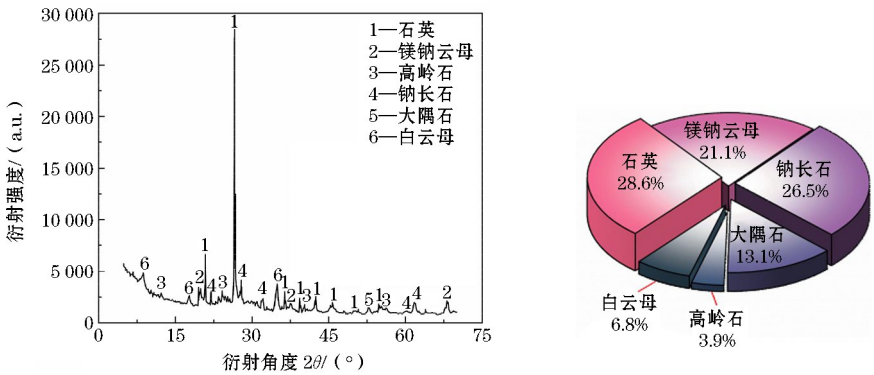
**Fig.2 Roofing accident at the scene**

上述问题凸显了软弱夹层对巷道围岩稳定性的劣化作用,而其核心机制与围岩及软弱夹层的物理力学特性密切相关。为此,需明确巷道围岩及软弱夹层的基础力学参数,为支护方案优化及施工安全提供数据支撑。

### 1.2 软弱夹层成分分析

经现场调研取样与地质调查,测得围岩的物理力学参数如下:单轴抗压强度为 36.26 MPa、弹性模量为 21.34 GPa、泊松比为 0.25、内摩擦角为 31.1°、黏聚力为 6.79 MPa。

在现场调研的基础上,对软弱夹层取样并进行 XRD 衍射试验,矿物成分分析结果如图 3 所示。




(a) 矿物成分分析　　(b) 矿物成分占比

**图 3　软弱夹层矿物成分分析**

**Fig.3　Mineral composition analysis of weak interlayer**

从图 3 可以看出,软弱夹层矿物成分以石英、钠长石、镁钠云母等为主,其中含量占 3.9%的高岭石是导致夹层劣化的关键因子。高岭石属层状硅酸盐矿物,其晶体结构由硅氧四面体与铝氧八面体有序堆叠而成。这种层间弱结合力遇水时极易被破坏:水分子渗入后,层间距增大导致吸水膨胀[15-16],反应式为:

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4+nH_2O_{(g)}\rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_{4(s)}\cdot nH_2O_{(s)} \quad (1)$$

虽然软弱夹层中的石英化学性质相对稳定,但在长期水化作用下,石英会与水发生微弱的水解反应,见式(2),生成的原硅酸($H_4SiO_4$)会弱化石英颗粒表面的硅氧键,降低其力学强度。

$$SiO_2+2H_2O\rightarrow H_4SiO_4 \quad (2)$$

另外,软弱夹层内的云母矿物在酸性地下水的侵蚀下会发生溶解反应,见式(3),释放出 $K^+$ 等离子,导致晶体结构解体并逐步转化为高岭石等次生黏土矿物。该转化过程显著增大了矿物的比表面积和亲水性,伴随体积变化,引发夹层内部微裂隙萌生与扩展;同时,这一转化形成的含水环境也为高岭石的后续膨胀提供了条件。多重作用协同加速了软弱夹层的力学劣化与结构破坏,大幅削弱了其支护承载能力,成为诱发巷道冒顶、坍塌等灾害的重要内在机制。

$$2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2+2H^++3H_2O\rightarrow 2K^++3Al_2Si_2O_5(OH)_4 \quad (3)$$

## 2　巷道支护

### 2.1　支护方案设计

支护方案设计是矿山安全的核心,需系统分析围岩完整性、软弱夹层的厚度、产状与力学性质、地下水活动性、地应力状态及巷道断面尺寸与埋深等关键因素,要严格遵循“因地制宜、分级适配、动态调整”的原则[17-19]。

本研究重点围绕磨坊矿巷道穿越 3 条软弱夹层(实测厚度 0.8～1.0 m)的高风险工况展开。结合地质力学分析与工程实践经验,此类工况具有以下显著特征与风险。

(1) 围岩坚固性系数($f$)。实测 $f$ 值普遍小于 4,表明围岩自稳能力极差。具体影响包括:开挖后暴露面快速失稳,松弛圈发展快且范围大,常规锚杆锚固力难以有效发挥,需超强及时支护,抑制挤出变形与坍塌风险。

(2) 软弱夹层特征。3 条软弱夹层均为厚层(厚度大于 0.8 m),构成显著的软弱结构体。具体影响包括:应力扰动下夹层塑性流动变形,顶板冒落高度和范围剧增,两帮收敛变形量大且难以控制。

(3) 主要风险。常规支护体系难以适应复合劣化机制,存在大规模冒顶和帮部挤出变形等风险。

(4) 地下水影响。地下水会显著降低软弱夹层的强度和摩擦角,增大围岩压力,并加速支护构件腐蚀。

针对此高风险工况,本研究将量化对比以下两种支护方案的实际控制效果。

(1) 常规锚网喷支护方案:适用于巷道穿越 3 条软弱夹层,且单条夹层厚度为 0.8～1.0 m、围岩坚固性系数 $f<4$(单轴抗压强度<40 MPa)的工况。

(2) “锚网喷+钢拱架+超前支护”复合技术方案:在常规锚网喷基础上,针对上述高风险穿夹层工

况的强化支护措施。

### 2.2 支护参数设定及施工工艺要点

#### 2.2.1 锚网喷支护技术

锚网喷支护作为巷道支护的基础形式,通过喷射混凝土的封闭作用、锚杆的锚固作用及钢筋网的整体性约束,形成“喷层-锚杆-围岩”的协同承载体系[20]。

锚网喷支护组成由喷射混凝土、树脂锚杆及钢筋网组成。具体参数:喷射混凝土初期支护厚度为50～60 mm,强度等级为C25;锚杆为直径20 mm、长度2 000 mm的HRB400螺纹钢,间排距为900 mm×1 000 mm;钢筋网由直径6.5 mm的钢筋焊接而成,网格尺寸为150 mm×150 mm。锚网喷典型支护断面如图4所示。

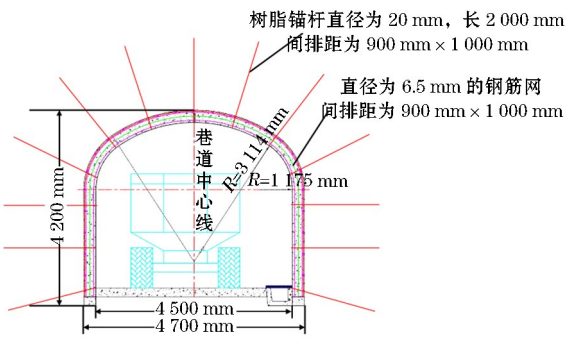



**图4 锚网喷典型支护断面**

**Fig.4 Typical support section of anchor net spray**

#### 2.2.2 “锚网喷+钢拱架+超前支护”复合支护技术

当巷道需穿越厚度大于0.8 m的软弱夹层或断层破碎带时,围岩自稳能力极差,易发生突发性失稳。针对此类极高风险工况,本研究结合现场条件,基于锚网喷支护技术提出了优化后的“锚网喷+钢拱架+超前支护”复合支护技术体系[21]。

根据软弱夹层的厚度与渗透性,“锚网喷+钢拱架+超前支护”复合支护以超前管棚形式为主,具体参数如下。

初期支护采用强度等级为C30的喷射混凝土,厚度为80～120 mm;钢拱架选用高度为180 mm的标准工字钢(I18),间距0.3～0.5 m;钢筋网片由直径6.5 mm钢筋构成,网格尺寸150 mm×150 mm;锚杆采用直径20 mm、长度2 000 mm的树脂锚杆,间排距900 mm×1 000 mm。

在穿越厚夹层或断层带时,超前管棚采用内径42 mm、壁厚4 mm的热轧无缝钢管进行支护,长度6 m,环向间距400 mm,外插角1°～3°。管棚前端封闭,尾部焊接法兰盘,通过导向墙内的导向架控制方向(导向墙采用C30喷射混凝土浇筑,厚50 cm)。相邻管棚搭接长度不小于1.0 m,形成连续的超前防护壳。复合支护典型支护断面如图5所示。

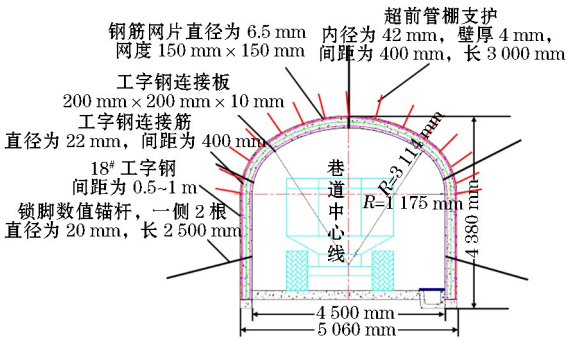



**图5 复合支护典型支护断面**

**Fig.5 Typical support section of composite support**

## 3 数值模拟

### 3.1 模型建立与参数设置

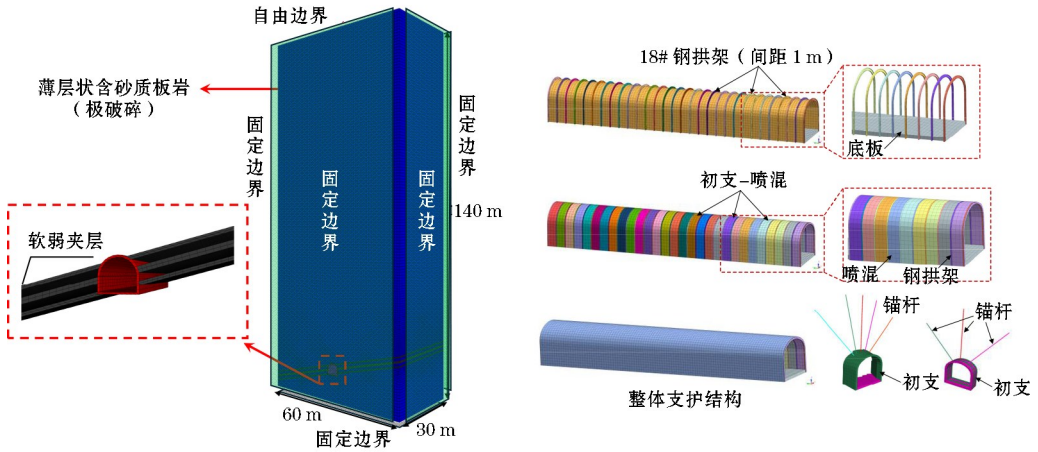
为研究巷道支护结构与围岩力学特性,采用FLAC3D有限差分数值模拟软件进行模拟分析。FLAC3D程序基于快速拉格朗日算法,采用显式有限差分法模拟岩土工程问题[14]。

根据现场调查,选取该矿辅助斜坡道含软弱夹层段的典型工况建立数值模型,如图6所示。为确保模拟结果的可靠性,依据圣维南原理并考虑巷道开挖影响范围及现场围岩水文地质条件,消除边界效应影响,建立尺寸为60 m×30 m×140 m(长×宽×高)的长方体模型。模型共包含约79 000个六面体网格单元及79 827个节点。边界约束设置为:模型四周及底面施加法向位移约束,顶面为自由边界。模拟中采用实体单元模拟地层、衬砌、钢架,采用Cable单元模拟锚杆。模拟方案为:工况一,常规锚网喷支护;工况二,“锚网喷+钢拱架+超前支护”复合支护。

### 3.2 模拟结果分析

#### 3.2.1 位移分析

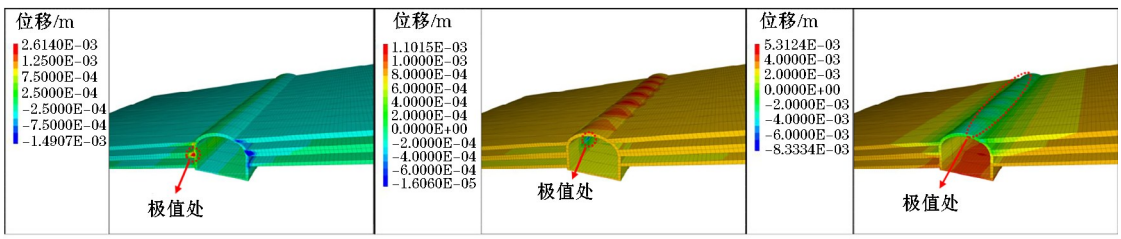
基于数值模拟结果,绘制两种工况轴向及水平方向位移云图,如图7所示。



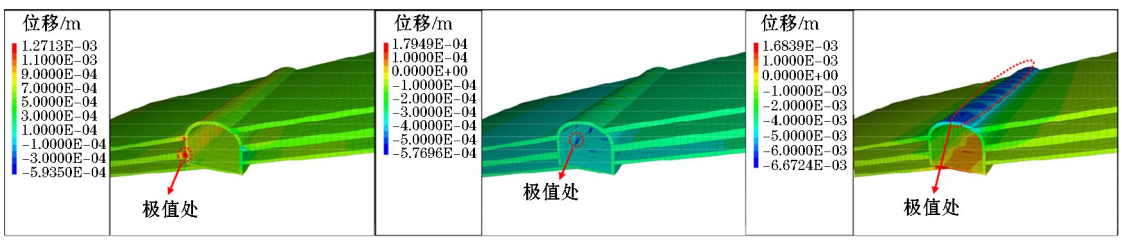

（a）巷道模型　　（b）支护模型

图 6　典型工况数值模型

Fig.6　Numerical models of typical working conditions




（a）工况一




（b）工况二

图 7　各工况巷道位移云图

Fig.7　Displacement cloud maps of roadway under various working conditions

基于巷道位移云图，统计出了两种工况位移量最大值，见表 1。

表 1　两种工况下位移量最大值

Table 1　The maximum displacement under two working conditions

| 工况 | $X$ 方向最大位移/mm | $Y$ 方向最大位移/mm | $Z$ 方向最大位移/mm |
|---|---|---|---|
| 工况一 | 2.61 | −1.64 | −8.33 |
| 工况二 | 1.27 | −0.58 | −6.67 |

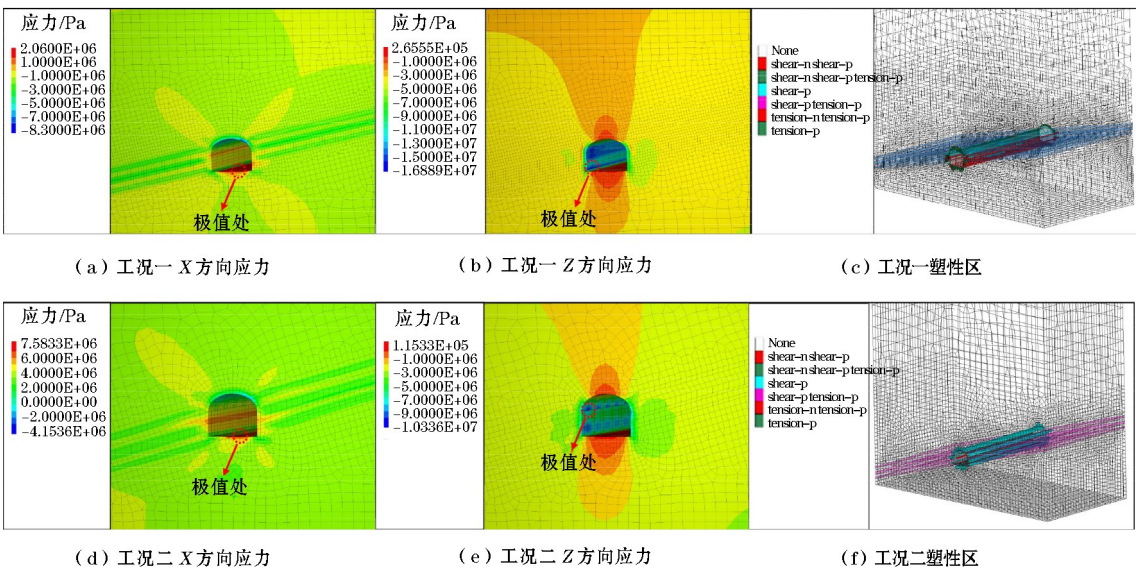
由图 7 和表 1 可知，工况一中 $X$ 方向最大位移为 2.61 mm；$Y$ 方向最大位移为 −1.64 mm；$Z$ 方向最大位移为 −8.33 mm。$X$、$Y$ 方向位移量值较大，$Z$ 方向发生位移显著，易导致局部破坏甚至冒顶，巷道开挖后整体位移量较大。工况二中 $X$ 方向最大位移为 1.27 mm；$Y$ 方向最大位移为 −0.58 mm；$Z$ 方向最大位移为 −6.67 mm（拱顶处）。$X$、$Y$ 方向位移较小，$Z$ 方向位移量可控，未引发破坏或冒顶。对比工况一结果，当存在较厚软弱夹层（0.8～1.0 m）且围岩极破碎时，“锚网喷＋钢拱架＋超前支护”形式可有效控制围岩变形、改善受力状态，显著提高巷道整体稳定性。

此外，拱顶始终为竖向位移的敏感区，而软弱夹层交界处主导水平位移发展。两种支护工况下巷道稳定性表现迥异：工况一的三个方向位移量

均较大,尤其是 $Z$ 方向竖向沉降高达 −8.33 mm。结合工程安全标准,该工况下位移值显著超限,表明巷道处于失稳风险状态;工况二的三个方向位移量得到有效控制,相较于工况一,$X$、$Y$、$Z$ 三个方向位移降幅分别为 51.34%、64.63%、19.93%。显著的位移降幅印证了复合支护方案对围岩变形的强约束能力,能有效控制关键区域位移,显著提升巷道整体稳定性,解决了工况一存在的失稳问题。

3.2.2 应力及塑性区分布

基于数值模拟结果,绘制两种工况轴向、水平方向应力及塑性区云图,如图 8 所示。




(a) 工况一 $X$ 方向应力 (b) 工况一 $Z$ 方向应力 (c) 工况一塑性区

(d) 工况二 $X$ 方向应力 (e) 工况二 $Z$ 方向应力 (f) 工况二塑性区

**图 8 两种工况应力及塑性区分布**

**Fig.8 Stress and plastic zone distribution under two working conditions**

基于应力、塑性区分布特征,统计两种工况应力最大值及开挖拉伸破坏单元,结果见表 2。

**表 2 应力最大值及开挖拉伸破坏单元统计**

**Table 2 Statistical of maximum stress and excavation tensile failure unit**

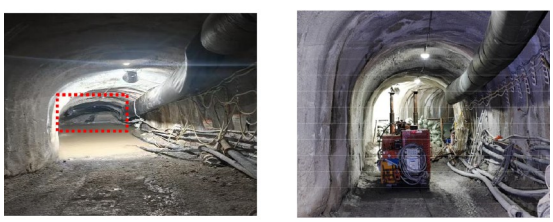
| 工况 | $X$ 方向应力/MPa | $Z$ 方向应力/MPa | 总破坏单元/个 | 支护前破坏单元/个 | 支护后破坏单元/个 |
|---|---|---|---|---|---|
| 工况一 | −8.30 | −16.9 | 492 | 409 | 83 |
| 工况二 | −4.15 | −10.3 | 424 | 409 | 15 |

由图 8 和表 3 可知,工况一中,水平方向应力主要集中于顶底板区域。支护前应力集中程度较高,垂直方向最大压应力为 −16.9 MPa。支护前破坏单元约 409 个,支护后破坏单元降至 83 个,降幅约 79.7%。工况二中,水平方向应力主要集中于顶底板区域。采用“锚网喷+钢拱架+超前支护”后,应力集中程度较低,垂直方向最大压应力为 −10.3 MPa。塑性区主要分布于顶板附近,呈近似垂直对称分布。支护前破坏单元约 409 个,支护后拉伸破坏单元降至 15 个,降幅约 96.3%。

综上,工况一因支护强度不足,$X$、$Z$ 方向最大应力分别高达 −8.30 MPa、−16.9 MPa,支护后仍有 83 个破坏单元,总破坏单元达 492 个,存在显著失稳风险;工况二通过复合支护,$X$、$Z$ 方向应力显著降低至 −4.15 MPa、−10.3 MPa,支护后破坏单元仅 15 个,总破坏单元控制在 424 个,塑性区削减幅度超过 95%,有效维持了拱腰应力集中区的稳定。这表明“锚网喷+钢拱架+超前支护”体系可动态优化支护参数,为复杂地质巷道提供兼顾应力调控与破坏抑制的稳定解决方案。

### 3.3 现场应用

将“锚网喷+钢拱架+超前支护”复合支护技术方案应用于现场,巷道支护前后情况如图 9 所示。



(a) 支护前掌子面冒顶涌水 (b) 支护后恢复施工

**图 9 巷道支护前后情况**

**Fig.9 The situation before and after roadway support**

该矿自2024年1月起应用本文提出的复合支护方案,截至2024年11月,共记录冒顶、涌水事件3次。对比2022年5月至2023年12月事故数据可知,事故频率由0.6次/月降至0.27次/月,降幅达55.0%,验证了"锚网喷+钢拱架+超前支护"复合支护方案的有效性。复合支护前后事故逐月累计发生次数如图10所示。

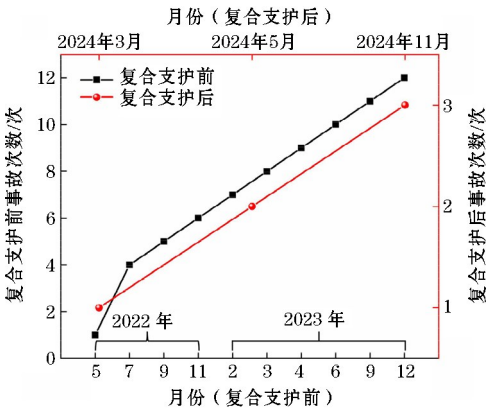



**图10 复合支护前后事故累计发生次数**

**Fig.10 Cumulative number of accidents before and after composite support**

## 4 结论

本研究针对瓮福磷矿磨坊矿软弱夹层巷道灾害,通过现场调查、矿物分析及FLAC3D模拟,揭示围岩力学行为与夹层致害机制,并提出对复杂地况进行针对性支护,主要结论如下。

(1)根据现场调查情况以及室内试验结果可知,围岩抗压强度为36.26 MPa,弹性模量为21.34 GPa。软弱夹层为泥质板岩,数量为3条,每条厚度可达0.8~1.0 m,含3.9%高岭石,遇水膨胀可导致强度劣化,地下水化学软化为顶板失稳主因。

(2)针对含3条厚软弱夹层的高风险工况,数值模拟验证表明:采用"锚网喷+钢拱架+超前支护"复合支护技术,在超前管棚协同作用下,$Z$方向位移可控制在-6.67 mm以内(较单一锚网喷支护降低19.93%),塑性区削减率达96.3%,显著提升了巷道稳定性。

(3)依据FLAC3D模拟结果可知,在两种工况中,拱顶为竖向位移敏感区,最大可达-8.33 mm,边墙脚-夹层交界主导水平位移,最大可达2.61 mm;压应力最大值达-16.9 MPa;复合支护技术使塑性单元削减率超95%(工况二),有效抑制了开挖扰动引发的连锁破坏。

**参考文献(References):**

[1] 罗俊峰,鲜绍军,宋小军,等.多项式趋势面分析在贵州瓮福磷矿田勘探中的应用:以高坪矿区B矿层为例[J].矿物学报,2025,45(3):387-399.
Luo Junfeng, Xian Shaojun, Song Xiaojun, et al. Application of the polynomial trend surface analysis in the exploration of concealed orebodies within the Wengfu phosphorus orefield: a case study of the Orelayer B in the Gaoping mining district[J]. Acta Mineralogica Sinica,2025,45(3):387-399.

[2] 常聚才,郭钇君,吴博文,等.深部沿空掘巷含软弱夹层顶板离层破坏特征及控制研究[J].煤炭科学技术,2024,52(9):88-102.
Chang Jucai, Guo Yijun, Wu Bowen, et al. Study on failure characteristics and control of roof separation with weak interlayer of deep gob-side entry driving[J]. Coal Science and Technology,2024,52(9):88-102.

[3] 刘洁波,杨正坤,向明坤,等.贵州省瓮福地区磨坊磷矿段构造特征及其分布规律[J].西部探矿工程,2021,33(6):186-190.
Liu Jiebo, Yang Zhengkun, Xiang Mingkun, et al. Structural characteristics and distribution law of Mofang phosphate ore section in Wengfu area, Guizhou Province[J]. West-China Exploration Engineering,2021,33(6):186-190.

[4] 高小峰,裴越.含泥岩夹层复合顶板巷道变形机理及支护优化研究[J].能源技术与管理,2024,49(6):97-100.
Gao Xiaofeng, Pei Yue. Research on deformation mechanism and support optimization of roadway with composite roof containing mudstone interlayer[J]. Energy Technology and Management,2024,49(6):97-100.

[5] 惠凡光,潘兴松,孔祥玉,等.含软弱夹层综放工作面煤帮大变形机理及其控制[J].煤矿安全,2023,54(9):137-146.
Hui Fanguang, Pan Xingsong, Kong Xiangyu, et al. Mechanism and control of large deformation of coal wall in fully mechanizedtop-coal caving face with weak interlayer [J]. Safety in Coal Mines,2023,54(9):137-146.

[6] 唐礼忠,高龙华,王春,等.动力扰动下含软弱夹层巷道围岩稳定性数值分析[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):63-69.
Tang Lizhong, Gao Longhua, Wang Chun, et al. Numerical analysis of stability of roadway surrounding rock with weak interlayer under dynamic disturbance [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(1):63-69.

[7] Sarkar C, Som A, Kanchuboyina G D. Incorporation of surrounding rock layer presence in the design of underground cut and cover box structure [C]// Mmuthukkumaran K, Umashankar B, Pitchumani N K, et al. Earth retaining structures and stability analysis. Singapore: Springer,2023.

[8] Pathan S M, Pathan A G, Irfan F, et al. Open pit slope stability analysis in soft rock formations at thar coalfield pakistan[J]. Archives of Mining Sciences, 2022, 67(3): 437-454.

[9] 申付新,宋彦琦,裴添翼,等.深部巷道顶板软弱夹层对围岩稳定性的影响研究[J].矿业研究与开发,2023,43(2):102-107.
Shen Fuxin, Song Yanqi, Pei Tianyi, et al. Study on the influence of weak interlayer on the stability of surrounding rock in deep roadway roof [J]. Mining Research and Development,2023,43(2):102-107.

[10] 任家苇,左宇军,林健云,等.软弱夹层对金矿深部巷道围岩稳定性影响研究[J].矿业研究与开发,2023,43(9):127-33.
Ren Jiawei, Zuo Yujun, Lin Jianyun, et al. Study on the influence of weak interlayer on the stability of surrounding rock in deep roadway of gold mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(9):127-133.

[11] Tang Xiaoyu, Wan Wen, Lu Zhenxing, et al. Study on composite fracture characteristics and hydraulic fracturing behavior of hard rock[J]. Applied Sciences,2024,14(6):2585.

[12] Wang Jiyu, Zheng Xigui, Liu Cancan, et al. The roof-fall mechanism and support-while-drilling technology of the rectangular roadway with layered roofs and weak interlayers [J]. Processes,2023,11(4):1198.

[13] Frenelus W, Peng Hui, Zhang Jingyu. Seepage actions and their consequences on the support scheme of deep-buried tunnels constructed in soft rock strata[J]. Infrastructures, 2024,9(1):9010013.

[14] 常丽燕,张钊.软弱夹层条件下隧道围岩变形特性及稳定性研究[J].西部交通科技,2024(12):175-178.
Chang Liyan, Zhang Zhao. Study on deformation characteristics and stability of tunnel surrounding rock under condition of weak interlayer [J]. Western China Communications Science & Technology,2024(12):175-178.

[15] 陈伟,万文,冯涛,等.瓮福磷矿穿岩洞矿区矽卡岩不同湿度和应力状态下的力学特征[J].岩石力学与工程学报,2021,40(12):2510-2525.
Chen Wei, Wan Wen, Feng Tao, et al. Mechanical characteristics of skarns from Chuanyandong orefield of Wengfu phosphate mine under various humidity ratios and stress states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(12):2510-2525.

[16] 陈伟,万文,赵延林,等.高湿环境平行双裂隙砂岩单轴压缩破坏及裂纹扩展特性[J].岩土工程学报,2021,43(11):2094-2104.
Chen Wei, Wan Wen, Zhao Yanlin, et al. Uniaxial compression damage and crack propagation features of parallel double-fissure sandstones under high-humidity environments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(11):2094-2104.

[17] 陈建河.隧道工程中超前支护施工技术研究[J].交通科技与管理,2025,6(12):48-50.
Chen Jianhe. Research on advanced support construction technology in tunnel engineering [J]. Transportation Technology and Management,2025,6(12):48-50.

[18] 曾艳华,汪波,封坤,等.地下结构设计原理与方法[M].成都:西南交通大学出版社,2022:346.
Zeng Yanhua, Wang Bo, Feng Kun, et al. Principles and methods of underground structure design[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press,2022:346.

[19] 吴世静.水工隧洞工程地质勘测中坚固系数 $f$ 与弹性抗力系数 $K$ 值的确定方法[J].水文地质工程地质,1958(1):30-35.
Wu Shijing. Determination method of firmness coefficient $f$ and elastic resistance coefficient $K$ in engineering geological survey of hydraulic tunnels [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,1958(1):30-35.

[20] 刘常伟.煤矿延伸段深部高应力软岩巷道锚网喷注浆加固技术研究[J].新疆钢铁,2025(2):77-79.
Liu Changwei. Research on shotcrete-grouting reinforcement technology for deep high-stress soft rock roadway in mine extension section[J]. Xinjiang Iron and Steel, 2025(2): 77-79.

[21] 高懿伟,任旭华,张继勋,等.水工隧洞围岩-钢拱架体系协同承载性能研究[J].水电能源科学,2025,43(6):88-91+152.
Gao Yiwei, Ren Xuhua, Zhang Jixun, et al. Study on synergistic bearing performance of surrounding rock-steel arch support system in hydraulic tunnel [J]. Water Resources and Power,2025,43(6):88-91+152.