

# 矿山充填开采富水巷道围岩稳定性影响因素试验研究

江 平

(湖北煤炭地质一八二队, 黄石 435000)

**摘 要:** 为系统分析富水环境下充填开采巷道围岩失稳机理, 以某矿山工程为背景, 采用物理模型试验方法, 研究了充填体强度、围岩含水率、支护强度及地下水压力四个关键因素对围岩稳定性的影响规律。试验通过伺服加载系统模拟地应力, 并利用高精度传感器监测围岩位移、应力及孔隙水压力的演变规律。研究结果表明: 充填体抗压强度存在最优阈值 (3.12 MPa), 过低或过高均不利于围岩稳定性控制; 围岩含水率超过 8% 后, 其强度劣化效应显著加剧, 位移量剧增; 支护强度提升能有效抑制塑性区扩展和孔隙水压力集聚, 支护密度由 0.5 根/ $\text{m}^2$  增至 1.3 根/ $\text{m}^2$  时, 顶板下沉量降低 64.58%; 地下水压力的增大线性加剧了围岩变形, 临界失稳水压为 2.2 MPa, 研究结果为富水巷道充填开采设计提供了重要的试验依据与数据支撑。

**关键词:** 矿山工程; 充填开采; 富水巷道; 围岩稳定性; 物理模型试验

**中图分类号:** TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0115-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.017

## Experimental Study on Factors Influencing the Stability of Surrounding Rock in Water-Rich Mine Tunnels with Backfill Mining

JIANG Ping

(Hubei Coal Geology 182 Team, Huangshi 435000, China)

**Abstract:** To systematically analyze the mechanism of surrounding rock instability in water-rich environments during backfill mining of roadways, a certain mine project was taken as the background. Using physical model testing methods, the study investigated the effects of four key factors—backfill strength, surrounding rock moisture content, support strength, and groundwater pressure—on surrounding rock stability. The tests simulated geostress through a servo loading system and used high-precision sensors to monitor the evolution of surrounding rock displacement, stress, and pore water pressure. The results indicate that there is an optimal threshold for the compressive strength of the backfill (3.12 MPa); both too low and too high values are unfavorable for controlling surrounding rock stability. When the moisture content of the surrounding rock exceeds 8%, its strength deterioration effect intensifies significantly, and displacement increases sharply. Increasing the support strength can effectively suppress the expansion of the plastic zone and the accumulation of pore water pressure. When the support density is increased from 0.5 rods/ $\text{m}^2$  to 1.3 rods/ $\text{m}^2$ , roof subsidence is reduced by 64.58%. Increasing groundwater pressure linearly aggravates surrounding rock deformation, with a critical instability water pressure of 2.2 MPa. The results provide important experimental basis and data support for the design of backfill mining in water-rich roadways.

**Key words:** mine engineering; backfill mining; water-rich roadway; surrounding rock stability; physical model experiment

项目来源: 矿山地质灾害防治安徽省高校重点实验室开放基金资助课题 (2022-MGDP-06)。

作者简介: 江 平 (1980—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地质灾害治理、矿山恢复治理及生态修复。

收稿日期: 2025-12-25

## 岩土力学

## 0 引言

在富水环境下,水-岩相互作用与渗流场-应力场耦合效应使得充填体-围岩复合结构的力学行为与失稳机制极为复杂,给巷道围岩稳定性控制带来了严峻挑战<sup>[1]</sup>。因此,开展富水巷道充填开采中围岩稳定性的影响因素,分析多因素耦合作用下围岩响应规律,具有重要的理论意义与工程价值<sup>[2]</sup>。

目前,国内学者围绕充填开采与巷道围岩稳定性开展了大量研究。在充填开采方面,研究多集中于充填材料的配比优化、强度增长规律及本构模型。高雁宁等<sup>[3]</sup>通过构建力学模型,研究了充填开采下坚硬顶板的沉降规律,发现充填能显著减小顶板挠度,抑制变形随充填体刚度增加而增强;常庆粮等<sup>[4]</sup>采用理论-模拟-实测手段,研究了深井厚煤层多分层充填开采中围岩与充填体的协同承载机理,发现分层充填能有效控制顶板变形与应力演变;何国志等<sup>[5]</sup>通过试验与工程验证,研究了钠盐改性铝基高固水材料在老巷充填治理中的应用,发现该材料能有效控制围岩变形与灾害;孙万明<sup>[6]</sup>采用数值模拟法,研究了深部多中段充填开采对浅部塌陷区稳定性的影响,发现该开采方式在维持充填效果的前提下不影响塌陷区整体稳定;王兆会等<sup>[7]</sup>通过理论与实践结合,研究了充填开采动应力分布规律与充实率反馈机制,得出提升充实率可显著降低冲击风险;魏艳君等<sup>[8]</sup>采用应变软化本构与势能原理,构建双夹层折叠突变模型并推得围岩失稳判据,辅以FLAC 3D模拟,发现剪切模量越小,夹层位移局部突增,围岩越易失稳;隗义美等<sup>[9]</sup>采用试验、数值模拟与现场监测,研究了深部充填开采矿压规律,发现提高充实率可有效降低覆岩应力与变形。在巷道围岩控制方面,研究聚焦于支护优化、变形破坏机理及稳定性评价方法。陈晓祥等<sup>[10]</sup>采用组合赋权与响应面法,研究了巷道钻孔卸压参数优化,发现最佳参数为孔径0.1 m、孔深4 m、间排距1 m×1 m;罗立超等<sup>[11]</sup>通过力学试验,研究了高地应力和动压扰动条件下钢纤维混凝土的支护效果,得出钢纤维混凝土支护可有效抑制巷道围岩变形,延长稳定期;王国强<sup>[12]</sup>通过数值模拟与现场监测,研究了注浆对穿越富水破碎带的隧道围岩变形控制效果,发现注

浆能显著减少围岩位移、有效提升稳定性;康超凡等<sup>[13]</sup>采用组合赋权-边界云模型,研究了深部多中段协同开采巷道稳定性,得出该评价方法结果可靠,能为支护决策提供依据;秦庆举等<sup>[14]</sup>通过理论与实践结合,研究了深井大变形巷道支护技术,发现大变形柔性锚索在提供高支护阻力的同时能主动适应围岩变形、控制围岩稳定性;于振建等<sup>[15]</sup>通过岩体质量评价与数值模拟,研究了深部复杂矿体巷道支护方案,发现锚喷支护能满足大部分区域支护要求,极破碎区需采用联合支护。尽管现有研究取得了丰硕成果,但多数研究侧重于单一充填体特性或围岩稳定性,缺乏针对“富水环境-充填体-巷道围岩”三者耦合作用下的系统性试验研究,缺少多因素对比下的定量化规律及综合影响效能与交互机制分析。

基于此,以某富水矿山巷道工程为依托,开展物理模型试验研究。采用单因素变量控制法,分析充填体抗压强度、围岩含水率、支护强度及地下水压力对巷道围岩位移场、应力场及孔隙水压力场的动态影响规律。通过高精度监测与对比分析,定量研究各因素对围岩稳定性的影响程度与机制,以期富水矿区充填开采巷道的科学设计与安全控制提供技术参考。

## 1 工程概况

某埋深约650 m的金属矿工程,该矿主要采用上向水平分层充填法开采,矿体平均厚度15 m,倾角55°。试验聚焦其主运输巷道,巷道断面为直墙半圆拱形,净宽4.5 m、净高3.8 m。巷道所处岩层主要为中风化花岗岩,岩体较为破碎,节理裂隙发育,RQD值为65%。区域水文地质条件复杂,巷道穿越一富水断层影响带,实测静水压力为1.2~1.8 MPa,围岩天然含水率约6.5%。在原支护方案下(锚杆间排距0.8 m×0.8 m,喷层厚100 mm),巷道变形较严重,顶底板最大收敛量达320 mm,两帮收敛量达280 mm,局部出现淋水、锚杆拉断等现象,需开展针对性研究以优化支护与充填参数。

## 2 试验材料

## 2.1 围岩相似材料

根据相似理论(几何相似比 $C_l=30$ ,容重相似

比  $C_\gamma = 1.5$ ，应力相似比  $C_\sigma = C_l \times C_\gamma = 45$ ），并参考原型岩体物理力学参数，选取河砂为骨料，石膏、膨润土为胶结料，水为调和剂进行围岩相似材料配制。通过大量配比试验，确定基本配比（质量比）为河砂：石膏：膨润土：水 = 18：3：2：2。通过调整水和膨润土比例模拟不同含水率状态。围岩相似材料基本力学参数见表 1。

表 1 围岩相似材料物理力学参数  
Table 1 Physical and mechanical parameters of similar surrounding rock materials

| 参数   | 单轴抗压<br>强度/MPa | 弹性模量<br>/GPa | 泊松比   | 内聚力<br>/MPa | 内摩擦角<br>/ (°) | 密度<br>/(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|----------------|--------------|-------|-------------|---------------|-----------------------------|
| 原型岩体 | 75.00          | 35.00        | 0.22  | 8.50        | 42.00         | 2 700.00                    |
| 相似材料 | 1.67           | 1.17         | 0.21  | 0.19        | 41.50         | 1 800.00                    |
| 相似常数 | 44.91          | 29.91        | ≈1.00 | 44.74       | ≈1.00         | 1.50                        |

2.2 充填体相似材料

采用 P·O 42.5 水泥、尾砂（粒度模数 2.1）、Ⅱ级粉煤灰和水配制。通过正交试验，设计了 6 种不同强度的充填体配比，其 28 d 龄期力学参数见表 2。

表 2 不同配比充填体相似材料力学参数  
Table 2 Mechanical parameters of similar materials with different filler ratios

| 编号 | 质量配比<br>(水泥：尾砂：粉煤灰：水) | 抗压强度<br>/MPa | 弹性模量<br>/GPa | 泊松比  |
|----|-----------------------|--------------|--------------|------|
| F1 | 1：8：2：1.8             | 1.05         | 0.35         | 0.26 |
| F2 | 1：6：1：1.5             | 1.98         | 0.68         | 0.25 |
| F3 | 1：4：1：1.2             | 3.12         | 1.02         | 0.24 |
| F4 | 1：3：0.5：1.0           | 4.08         | 1.35         | 0.23 |
| F5 | 1：2：0.5：0.9           | 5.01         | 1.65         | 0.22 |
| F6 | 1：1：0.3：0.7           | 6.20         | 2.05         | 0.21 |

2.3 支护模拟材料

采用  $\phi 3$  mm 的有机玻璃圆杆模拟螺纹钢锚杆，采用玻璃纤维布条模拟钢绞线锚索，喷射混凝土层采用石膏与水泥混合材料（质量比 3：1）模拟。支护参数根据相似原理换算，具体见表 3。

表 3 支护构件模拟参数  
Table 3 Simulated parameters of support components

| 构件类型 | 模拟材料     | 直径、厚度/mm | 抗拉强度、抗压强度/MPa | 模拟原型规格             |
|------|----------|----------|---------------|--------------------|
| 锚杆   | 有机玻璃杆    | 直径 3     | 抗拉强度 60       | $\phi 22$ mm 螺纹钢锚杆 |
| 锚索   | 玻璃纤维布    | 厚度 0.2   | 抗拉强度 350      | 钢绞线锚索              |
| 喷层   | 石膏-水泥混合料 | 厚度 5     | 抗压强度 8        | C20 喷射混凝土          |

3 试验方案

3.1 试验思路

采用单因素变量控制法，以基础工况（充填体强度 3.12 MPa、围岩含水率 6.5%、锚杆密度 0.8 根/m<sup>2</sup>、水压 1.2 MPa）为基准，依次单一改变充填体抗压强度（F1~F6）、围岩含水率  $w$ （3.0%、4.5%、6.0%、8.0%、10.0%、12.0%）、支护强度（锚杆密度  $S$  为 0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 根/m<sup>2</sup>）及地下水压力（0.2、0.7、1.2、1.7、2.2、2.7 MPa）四个因素。通过物理模型试验模拟巷道开挖、充填及后续应力调整全过程，利用监测系统采集围岩位移、应力及孔隙水压力数据，对比分析各因素对围岩稳定性的影响程度与变化规律。

3.2 试验设备

试验设备包括模型试验台、伺服加载系统、监测系统、数据采集系统及辅助设备。具体参数如下：

模型试验台：采用钢结构框架式试验台，内部尺寸（长×宽×高）为 2.0 m×0.5 m×1.5 m，正面为高强度钢化玻璃观测窗，背面预留加载和监测线孔。

伺服加载系统：采用 4 台 100 kN 电液伺服作动器，分别布置于模型顶部与两侧，实现力控或位移控的独立或联合加载，模拟非均匀应力场。

监测系统：位移监测通过 20 个量程 50 mm、精度 0.01 mm 的 LVDT 位移传感器进行，布设于巷道轮廓线及围岩深部。应力监测通过埋设 15 个量程 0~50 MPa、精度 0.1 MPa 的微型土压力盒进行，主要监测围岩关键点的主应力。孔隙水压力监测通过布设 10 个量程 0~5 MPa、精度 0.01 MPa 的渗压计进行，主要监测围岩不同深度孔隙水压力。

数据采集仪：采用多通道高速静态采集系统，最高采样频率 100 Hz，最小采样间隔 0.1 s，确保数据同步性与准确性。

辅助设备：包括混凝土搅拌机、分层压实装置、烘干箱、含水率快速测定仪及 200 kN 压力试验机等，用于材料制备与性能测试。

3.3 试验步骤

模型制备与传感器埋设：按设计含水率拌合围岩相似材料，采用“分层装填、均匀压实”法填筑

## 岩土力学

模型,同步埋入应力盒与渗压计。

**加载固结:**通过伺服系统施加等效上覆岩层自重应力(垂直压力 1.2 MPa,侧压系数 0.8),稳压 48 h 使模型固结稳定。

**巷道开挖与支护:**采用机械雕刻法精准开挖巷道,并安装模拟锚杆、锚索及喷射混凝土层。

**充填体浇筑与养护:**在巷道一侧(模拟采空区)浇筑设计强度的充填体相似材料,养护 7 d。

**水压施加与数据采集:**连接供水稳压系统至预设注水点,施加设计水压。启动所有传感器,在持续加载下采集围岩响应数据直至变形趋于稳定或发生破坏。

**模型拆卸与破坏形态记录:**试验结束后,逐层拆卸模型,详细记录围岩与充填体的最终破坏形态及裂隙分布。

### 3.4 试验监测

试验监测内容包含位移场、应力场、孔隙水压力场及破坏特征四个方面。位移场:重点监测巷道顶底板最大相对下沉量( $U_v\text{-max}$ )、两帮最大相对收敛量( $U_h\text{-max}$ ),以及围岩内部 1.0 m 深度处的最大位移,用以表征整体与局部变形。应力场:主要监测巷道周边关键点(顶板中部、两帮中部、角部)的最大主应力变化,并计算剪应力集中系数,以评估应力集中与转移情况。孔隙水压力场:监测分析围岩不同深度(0.3、0.6、1.0 m)处孔隙水压力的时空演化过程,记录其峰值及达到峰值的时间。破坏特征:通过剖切模型,观察并记录围岩塑性区范围、裂隙网络(长度、宽度、贯通性)及充填体的开裂、剥离等破坏形式。

## 4 试验结果

### 4.1 充填体强度影响分析

#### 4.1.1 对围岩位移的影响

由图 1 可知,充填体强度对围岩位移的控制存在明确的“最优区间”,当充填体强度从 1.05 MPa 升至 3.12 MPa 时,围岩各向位移显著下降,其中 1.0 m 深处的围岩位移降幅达 42.86%,表明此阶段提高充填体刚度能有效地向围岩深部传递支撑力,抑制塑性区生成与扩展。当强度大于 3.12 MPa 后,所有位移出现系统性反弹。强度增至 4.08 MPa 时,顶底板最

大相对下沉位移反弹 18.11%,1.0 m 深位移反弹幅度达 33.43%,表明此时充填体与围岩产生显著的刚度失配现象。过高的充填体刚度使得充填体与围岩在接触界面易产生显著的剪应力集中。应力集中直接破坏了围岩浅部完整性,引发新的剪切裂隙,改变围岩内部的应力路径,驱使应力向更脆弱的区域转移,从而扩大塑性区,最终表现为位移的增大。数据变化表明,充填体强度存在一个有效范围(试验中约为 2.0~3.5 MPa),超出该范围,不仅无法提升支护效果,反而可能导致工况恶化。

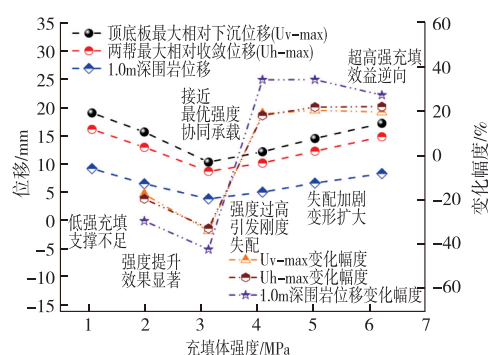


图 1 不同充填体强度下围岩关键位移变化曲线  
Fig. 1 Variation curves of key surrounding rock displacements under different backfill strengths

#### 4.1.2 对围岩应力的影响

由图 2 可知,充填体强度对围岩应力场的调控效果呈现先优化后劣化的非线性变化规律,其影响存在明确的最优强度点。当充填体强度从 1.05 MPa 升至 3.12 MPa,顶板最大主应力累计下降 25.41%,帮部剪应力集中系数累计下降 29.17%,验证了充填体刚度的增加能提升承载效能,有效吸纳并扩散上覆岩层传递的荷载,减少作用于巷道直接顶板和两帮的应力集中,促使围岩应力场向更均匀、更有利的状态转变。当强度大于 3.12 MPa 后,应力状态显著劣化;强度增至 6.20 MPa 时,两项指标相较于最优值(3.12 MPa)分别反弹了 48.55%、68.63%,表明此时出现刚度失配现象。过高的充填体刚度阻碍了应力的自然释放与重新分布,在充填体-围岩界面形成“应力屏障”,导致应力集中,加剧了帮部的剪切破坏风险。数据变化表明,充填体强度并非越高越好,其设计应与围岩刚度相匹配(试验中约为 3.12 MPa),以实现应力场的优化分布。

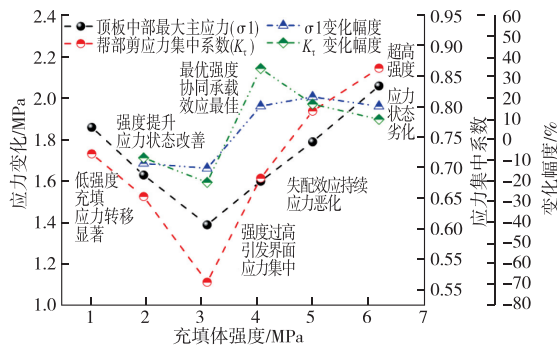


图2 不同充填体强度下围岩主应力变化曲线

Fig. 2 Variation curves of major stress in surrounding rock under different backfill strengths

## 4.2 围岩含水率影响分析

### 4.2.1 对围岩力学性能的影响

由图3可知,当含水率从3.0%增至12.0%时,围岩抗压强度与弹性模量分别从2.22 MPa、1.35 GPa衰减至0.53 MPa、0.45 GPa,降幅分别达76.13%、66.67%,且衰减过程符合指数型曲线变化规律。当含水率小于8.0%时,强度与模量的衰减相对平缓,平均衰减速率分别下降5.3%、3.0%;当含水率大于8.0%后,平均衰减速率分别下降13.7%、9.0%。相反,泊松比则从0.18增至0.31,增幅达72.22%,反映出岩体从脆性向塑性演变的过程。围岩力学性能的全面劣化,表明水分子侵入岩体矿物颗粒间及微裂隙中,削弱甚至溶解了颗粒间的胶结物质,降低了结构面的黏聚力。同时,水膜的形成起到了显著的润滑作用,大幅降低了岩块间的内摩擦角。两者共同作用下,岩体整体性和抗剪强度急剧下降。数据变化表明,在工程实践中,需高度重视临界含水率(试验中为8%)的监测与预警,当围岩含水率接近或超过此阈

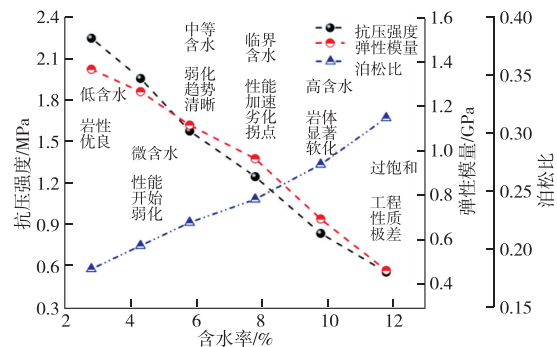


图3 不同含水率下围岩相似材料的力学参数变化曲线

Fig. 3 Variation curves of mechanical parameters of surrounding rock analogue materials under different water contents displacement angles

值,其力学性能将进入加速衰减阶段。

### 4.2.2 对围岩稳定性的影响

由图4可知,含水率对巷道围岩稳定性的影响与力学性能的劣化过程紧密耦合。当含水率小于等于6.0%时,巷道围岩变形( $U_v$ -max,  $U_h$ -max)与剪应力集中系数( $K_r$ )均呈现平缓增长趋势,此阶段围岩性能受损,但残余强度仍能维持基本的自稳与承载结构。当含水率从6%增至8%时, $U_v$ -max增幅达84.85%,同期 $U_h$ -max增幅达93.07%, $K_r$ 增幅达43.75%,表明围岩的承载机制从以结构面摩擦和胶结力为主的“刚性”承载,转变为以塑性流动和剪切滑移为主的“软弱”变形,稳定性发生质变。当含水率从8.0%增至12.0%时,围岩变形进入加速劣化阶段, $U_v$ -max最终达41.72 mm,增长147.74%。此外,帮部剪应力集中系数在含水率为12.0%时达1.05,超过理论屈服极限1.0,验证了此时围岩整体进入剪切塑性破坏状态,失去了有效的自承能力。数据变化表明,工程实践中需将关键区域围岩含水率控制在临界阈值(试验中为8%)以下,超过阈值,围岩稳定性将显著劣化。

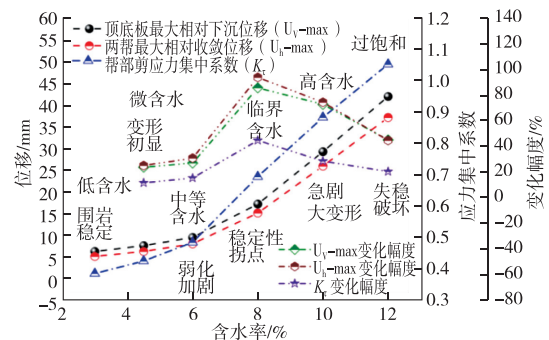


图4 不同含水率下围岩稳定性参数变化曲线

Fig. 4 Variation curves of surrounding rock stability parameters under different moisture contents

### 4.3 支护强度影响分析

由图5可知,提升支护强度对围岩稳定性改善显著,但存在边际递减效应。锚杆密度从0.5根/ $m^2$ 提升至1.3根/ $m^2$ 时, $U_v$ -max从16.43 mm降至5.82 mm,降幅达64.58%;塑性区面积从1.02  $m^2$ 减至0.28  $m^2$ ,累计缩小72.55%。当密度从0.5根/ $m^2$ 增至1.1根/ $m^2$ 时,位移与塑性区面积显著减小,分别降至6.33 mm、0.35  $m^2$ ,表明此时锚杆群形成有效承载拱,支护效果明显。同时,孔隙水压力峰值

岩土力学

从 1.05 MPa 降至 0.54 MPa, 降幅达 48.57%, 表明高密度锚杆通过增强围岩整体性与结构性刚度, 有效抑制了采动裂隙的张开、扩展与贯通, 改变了围岩渗流特性, 削弱了地下水压力的传递与积聚路径, 实现了力学加固与水力隔断的协同效应。此外, 当支护密度大于 1.1 根/m<sup>2</sup> 后, 各曲线的变化均趋于平缓, 表明支护效应接近饱和。数据变化表明, 在工程设计中, 不能无限制增加支护密度, 应明确支护强度上限 (试验中为 1.1 根/m<sup>2</sup>), 实现支护系统与围岩条件的最优匹配。

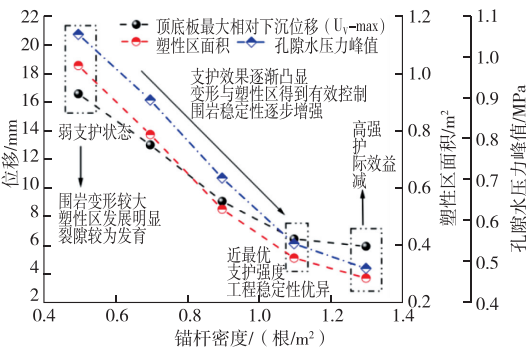


图 5 不同支护强度下围岩稳定性参数变化曲线

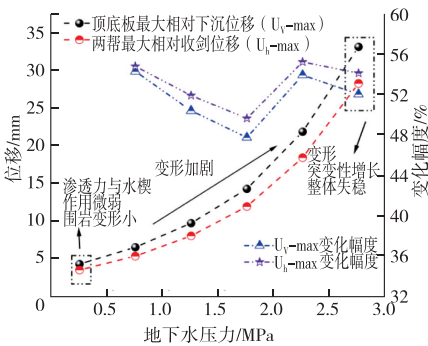
Fig. 5 Variation curves of surrounding rock stability parameters under different support strengths

4.4 地下水压力影响分析

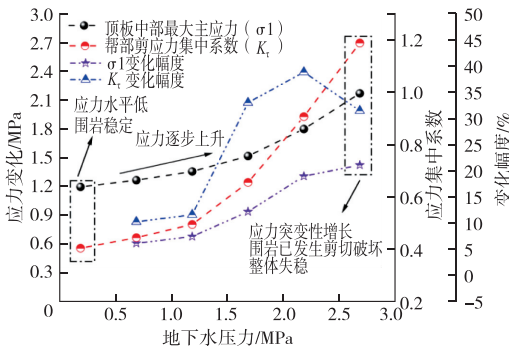
4.4.1 对围岩稳定性的影响

由图 6 可知, 当地下水压力从 0.2 MPa 增至 2.7 MPa 时, 水压作用主要表现为加剧围岩塑性流动, 此阶段围岩变形 ( $U_v-max$  与  $U_h-max$ ) 持续增长, 但增幅相对平缓。当地下水压力小于等于 1.7 MPa 时, 变形持续增大, 但增速相对可控; 当地下水压力增至 2.2 MPa 后, 变形显著上升,  $U_v-max$  与  $U_h-max$  增幅分别达 53.76%、55.06%, 表明围岩此时已进入变形敏感与加速阶段。同阶段, 帮部剪应力集中系数达 0.90, 非常接近理论屈服极限 1.0, 表明此时围岩抗剪承载力严重不足。当地下水压力升至 2.7 MPa 时, 顶板最大主应力较初始值增长了 82.20%, 帮部剪应力集中系数达 1.18, 表明围岩此

时已发生整体剪切破坏, 丧失承载能力。数据变化反映出地下水压力的双重破坏机制: 初始阶段, 渗透体积力主要推动既有结构变形; 随着压力升高, “水楔”效应对裂隙的劈裂、扩展和润滑作用凸显, 弱化了岩体结构面的力学性能, 最终导致应力超限和失稳突变。在实际工程中, 为防止围岩发生水力致灾突变失稳, 需将孔隙水压控制在临界阈值 (试验中为 2.2 MPa) 以下。



(a) 不同地下水压力下围岩关键位移变化曲线



(b) 不同地下水压力下围岩力学性能变化曲线

图 6 不同地下水压力下围岩响应情况

Fig. 6 Response of surrounding rock under different groundwater pressures

4.4.2 临界水压阈值分析

为综合考虑围岩状态与支护条件, 确定合理的安全水压阈值。试验中, 以巷道围岩关键位移速率 (大于 0.1 mm/min) 或监测的贯通裂隙作为失稳判据, 得到不同围岩条件下的临界失稳水压, 见表 4。

表 4 不同围岩条件下的临界失稳水压

Table 4 Critical water pressure for instability under different surrounding rock conditions

| 参数         | 基准工况<br>(F3, $w=6.0\%$ , $S=0.9$ ) | 充填体强化<br>(F6) | 围岩中含水<br>( $w=8.0\%$ ) | 围岩高含水<br>( $w=10.0\%$ ) | 支护弱化<br>( $S=0.7$ ) | 支护强化<br>( $S=1.3$ ) |
|------------|------------------------------------|---------------|------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| 临界失稳水压/MPa | 2.20                               | 2.05          | 1.50                   | 1.20                    | 1.75                | 2.65                |

## 5 结论

以某深部富水金属矿巷道工程为依托,通过开展系统的物理模型试验,研究了充填体强度、围岩含水率、支护强度及地下水压力四个关键因素对充填开采巷道围岩稳定性的影响规律,并进行了量化对比分析,得出以下主要结论:

(1) 充填体强度存在最优区间,当强度为 3.12 MPa 时,围岩变形最小(顶底板下沉 10.05 mm),应力分布较均匀,剪应力集中系数为 0.51。强度过低(1.05 MPa)或过高(6.20 MPa)均会导致围岩变形增加、应力集中加剧。在工程设计时,充填体强度应与围岩刚度相匹配,并非越高越好。

(2) 围岩含水率是影响稳定性的敏感因素,存在显著劣化阈值。当含水率大于 8% 后,围岩抗压强度与弹性模量急剧下降,巷道变形速率增大。当含水率从 8% 升至 12% 时,顶底板下沉量增长 147.74%,剪应力集中系数超过 1.0。为保障围岩稳定,工程中应将关键区域的围岩含水率控制在阈值以下。

(3) 提高支护强度可有效抑制变形与塑性区发展,并削弱水压影响。当锚杆密度从 0.5 根/ $\text{m}^2$  提高至 1.3 根/ $\text{m}^2$  时,顶板下沉量降低 64.58%,塑性区面积缩小 72.55%,同时孔隙水压力峰值降低 54.29%。支护密度超过 1.1 根/ $\text{m}^2$  后效益增长变缓,存在经济合理上限。

(4) 地下水压力加剧了围岩失稳风险,临界值受多因素耦合控制。巷道围岩变形随水压增大呈指数型增长。基准工况下临界失稳水压为 2.2 MPa。围岩高含水(含水率 10%)使临界水压降至 1.2 MPa,而强化支护(支护密度 1.3 根/ $\text{m}^2$ )可将其显著提升至 2.65 MPa。在防治水设计中,需综合考虑围岩状态与支护条件,确定合理的安全水压阈值。

## 参 考 文 献

- [1] 王东红. 松软多节理巷道变形破坏机制及联合支护技术 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (4): 97-101, 122.
- [2] 邵春瑞, 季廷秀, 孙建宁, 等. 残采厚煤层综放开采回采巷道围岩稳定性控制技术研究 [J]. 煤炭工程, 2025, 57 (9): 58-66.
- [3] 高雁宁, 王晓磊, 刘历波, 等. 煤矿充填开采下顶板沉降研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (2): 45-50.
- [4] 常庆粮, 高乐, 范建国, 等. 深井厚煤层多分层充填体-围岩协同承载机理 [J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42 (3): 510-520.
- [5] 何国志, 刘国磊, 马秋峰, 等. 钠盐改性铝基高固水材料在矿山老巷充填治理中的适应性研究 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 44 (10): 36-46.
- [6] 孙万明. 某金矿中段充填开采对地表塌陷区稳定性影响分析 [J]. 中国矿业, 2024, 33 (7): 216-225.
- [7] 王兆会, 陈明振, 李强, 等. 冲击地压矿井充填工作面超前采动应力对充填体充实率的反馈机制 [J]. 煤炭学报, 2024, 49 (4): 1804-1818.
- [8] 魏艳君, 李忠, 陈家征, 等. 基于折叠突变理论的双应变软化夹层隧道围岩稳定性分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 67-73.
- [9] 魏义美, 黄鹏, 任国辉, 等. 深部充填开采覆岩移动及应力转移规律研究 [J]. 煤矿安全, 2025, 56 (10): 136-145.
- [10] 陈晓祥, 任俊龙. 基于组合赋权法和响应面法的巷道围岩钻孔卸压参数优化研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2026, 45 (1): 60-69, 142.
- [11] 罗立超, 明建, 王文海, 等. 深部巷道纤维混凝土支护机理及围岩控制效应研究 [J]. 混凝土, 2026 (2): 187-192.
- [12] 王国强. 穿越富水破碎带隧道开挖变形监测及控制技术 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2024, 23 (3): 38-43.
- [13] 康超凡, 陈仲杰, 赵学科, 等. 金川二矿区深部三中段协同开采期巷道稳定性评价 [J]. 矿业研究与开发, 2025, 45 (9): 75-84.
- [14] 秦庆举, 张全治, 李英明, 等. 巷道大变形围岩柔性锚索支护技术研究 [J]. 煤矿安全, 2025, 56 (8): 143-151.
- [15] 于振建, 龚永超, 廖敦霞, 等. 深部大规模矿山岩体质量评价与巷道支护技术研究 [J]. 矿业研究与开发, 2025, 45 (6): 1-11.