

# 多断层影响下采场巷道围岩移动规律试验

赵沁彬<sup>1</sup>, 余伟健<sup>1,2\*</sup>, 郭涵潇<sup>1</sup>, 潘豹<sup>1</sup>, 齐耀斌<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为探究采场巷道在 2 条断层影响下的稳定性, 通过分析巷道顶板和两侧岩体的运动应力特性来进行研究. 结合实际工程地质资料, 设计并实施相似模拟试验, 建立力学简化模型, 对其进行理论分析. 结果表明: 巷道顶板的下沉量随着工作面的推进不断增大, 当工作面推进到 10~30 cm 阶段时, 顶板的下沉速率最快; 在受断层影响区域, 巷道顶板在竖直方向下沉不均匀, 采场巷道向工作面歪斜, 并且上顺槽顶板最大下沉量远大于下顺槽; 巷道围岩煤柱应力分布不对称, 巷道两帮变形不均匀, 护巷煤柱出现塑性破坏; 应力承载由采场岩体承载转变成断层外部应力支撑拱承载.

**关键词:** 煤矿; 巷道围岩; 围岩变形; 相似模拟

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)04-0018-08

## Experimental Study on the Movement Law of Surrounding Rock in Mining Roadways Under the Influence of Multiple Faults

ZHAO Qinbin<sup>1</sup>, YU Weijian<sup>1,2\*</sup>, GUO Hanxiao<sup>1</sup>, PAN Bao<sup>1</sup>, QI Yaobin<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Coal Resources Clean-Utilization and Mine Environment Protection,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to explore the stability of the mining roadway under the influence of two faults, the study is conducted by analyzing the dynamic stress characteristics of the roadway roof and the rock masses on both sides. It conducts similar simulation experiments based on actual engineering geological data and establishes a simplified mechanical model for theoretical analysis. When the mining roadway is arranged near a fault, the displacement of the roadway roof and the stress characteristics of the two sides of the roadway are monitored during the advancing process of the working face. Results show that the subsidence of the roadway roof continuously increases as the working face advances, and the subsidence rate of the roof is the fastest when the working face advances to 10 cm to 30 cm. In the area affected by faults, the roof of the roadway sinks unevenly in the vertical direction, and the roadway in the mining area tilts towards the working face. Additionally, the maximum subsidence of the roof in the upper groove is much greater than that in the lower groove. The stress distribution of the coal pillars in the surrounding rock of the tunnel is asymmetric, and the deformation of the two sides of the tunnel is uneven, resulting in plastic failure of the coal pillars for tunnel protection. The stress bearing is transformed from being carried by the rock mass in the mining area to being carried by the external stress support arch of the fault.

**Keywords:** coal mine; roadway surrounding rock; deformation of surrounding rock; similar simulations

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174076; 52474096); 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30261); 湖南省科技创新计划资助项目(2024RC1065)

\* 通信作者, E-mail: ywjlah@163.com

经济的发展伴随着煤炭等能源资源的需求量日益增加,扩大开采规模对于许多煤矿来说面临的是地质条件变得更加复杂,开采难度加大等问题,其中安全与环保问题尤为突出.煤炭开采工作不断由地表向深部推进,地压和复杂的地质构造使巷道围岩的稳定性问题显得尤为突出,再加上回采工作带来的叠加扰动,导致巷道掘进和工作面推进时的巷道围岩稳定性的控制更加困难,维护成本也在不断增加.近年来大家也发现这些问题阻碍着深部煤炭资源的开采工作,众多学者在这一领域做了许多相关研究,得出大量推动深部复杂构造条件下煤炭资源开采的成果.在研究裂隙的演化过程以及对于巷道围岩稳定性及控制方面,有部分研究者联系两者进行相关研究.刘锦荣等<sup>[1]</sup>在围岩稳定性控制方面提出巷道矿压全过程控制;陈绍杰等<sup>[2]</sup>运用数值模拟并结合实例发现地表移动变形和其附近松散层厚度密切相关,当松散层厚度增加,地表裂隙产生的位置会向采空区偏移再转向断层上盘;谢英亮等<sup>[3]</sup>通过现场监测巷道围岩,发现采场巷道围岩的松动区和塑性区为 2.5 m,由于采动所造成的煤壁支承压力会降低围岩的等级,对巷道围岩造成的变形可分为 3 个阶段,在 2 个月左右稳定;余伟健等<sup>[4]</sup>发现弱胶结粉砂岩巷道的失稳因素包括岩石成岩年代晚期、岩石力学强度、浇水对围岩性质的改变等.这些研究成果为巷道围岩稳定性与裂隙演化过程提供了研究基础,为工程实践提供了重要的理论依据.

复杂的地质构造问题随着开采的深部化逐渐成为煤炭开采工作中不得不面对的问题,其中断层对于煤层开采和巷道稳定性的影响尤为突出.余伟健等<sup>[5]</sup>通过试验研究和理论分析,研究断层对于周围岩体的影响程度和范围,发现在断层影响范围内越靠近断层的岩体受断层的影响越大;胡国栋<sup>[6]</sup>建立相关力学模型,推导与正断层相关的应力表达式,并对断层煤柱宽度以及断层附近巷道塑性区进行研究;黄辉等<sup>[7]</sup>运用数值模拟研究巷道在断层影响下的变形规律,发现巷道的掘进会使得原岩应力破坏导致断层发生错动,巷道近断层围岩塑性区增大;勾攀峰等<sup>[8]</sup>研究发现,断层附近的巷道顶板出现与断层倾向一致的垂直裂隙,且顶板不具有连续性;吴少康等<sup>[9]</sup>利用数值模拟研究发现副平硐在断层影响下顶底板出现拉伸破坏,两帮出现鼓出;孟召平等<sup>[10]</sup>利用力学试验和数值模拟分析正断层对于煤物理性质和矿压的影响,当煤岩越靠近断层,其力学强度越弱,且采动导致的活化会随着与断层距离的增大而减小;谢志红等<sup>[11]</sup>采用数值模拟研究,讨论回采巷道在采空区附近受到多重应力叠加影响下非对称稳定性规律;郭宇杰等<sup>[12]</sup>利用数值模拟发现在挤压应力作用下,顺槽围岩造成顶板出现垂直位移,底板出现不对称底鼓.

多数学者采用室内试验的方式,利用相似材料进行相似模拟试验研究断层下巷道围岩稳定性.杨田等<sup>[13]</sup>通过相似模拟试验发现工作面未进入断层影响范围时,上覆岩层垮落形态与无断层影响时基本相同;王楠等<sup>[14]</sup>以剪胀锚固理论为指导,对采场巷道的顶板预应力锚固系统进行分析,讨论锚杆的受力状态及其加固原理;谢小平等<sup>[15]</sup>采用试验测试结合数值模拟,分析研究断层附近巷道围岩的破裂区范围及其构造应力规律,发现断层构造应力以水平应力为主.

依托贵州某煤矿的工程地质背景进行相似模拟试验,探究在 12 号煤层工作面推进过程中采场巷道围岩的变形规律以及应力特性,为围岩稳定性研究提供科学依据,保障矿井安全生产.目前对于变形影响相关基础问题的研究主要集中在开采引起的围岩稳定性问题等方面,同时考虑在 2 条断层影响下回采巷道围岩变形的研究成果尚不多见.因此,基于相似模拟理论,观测在 2 条断层影响下,分段推进工作面过程中,采场巷道顶板的位移变化以及采场巷道两侧煤柱的应力特征,依据试验结果以及简化力学模型,分析在 2 条断层影响下采场巷道顶板的位移运动规律以及两帮煤柱的应力变化特征.

## 1 相似模拟试验

### 1.1 工程背景

该矿位于贵州省,回采工作面平均走向长度约 900 m,回采面积约 1.5 万  $\text{m}^2$ .12 号煤层平均厚度为 5.0 m,埋深 360 m,钻孔柱状图如图 1 所示,工作面平面布置如图 2 所示.12 号煤层中贯穿了 2 条断层(F1,F2),2 条断层倾角均为  $45^\circ$ ,落差均为 5 m,其中 F1 为逆断层,F2 为正断层,断层在 12 号煤层中相距 200 m.

编号	柱状图	岩性	厚度/m
1		粉砂岩	26
2		细砂岩	5
3		砂质泥岩	4
4		粉砂岩	22
5		砂质泥岩	6
6		细砂岩	6
7		粉砂岩	3
8		粉砂质泥岩	4
9		12号煤	5
10		粉砂质泥岩	5
11		细砂岩	7
12		13-2煤	5
13		砂质泥岩	20

图1 钻孔柱状图

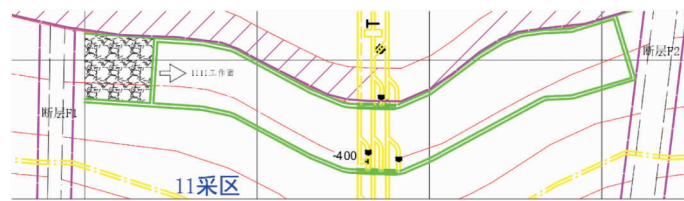


图2 工作面布置平面图

煤层顶板基本顶和直接顶分别由较硬的粉砂岩和粉砂质泥岩构成,底板的直接底和老底分别由粉砂质泥岩和细砂岩构成,工作面顶底板岩层力学参数见表1.

表1 工作面顶底板岩层力学参数

顶底板	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
基本顶	15.99	3.2	0.23	2 460
直接顶	14.04	0.7	0.21	1 980
12号煤	2.70	0.6	0.35	1 620
直接底	14.04	0.7	0.21	1 980
老底	16.35	2.2	0.25	2 660

### 1.2 物理模拟平台搭建

依照工程地质资料提供的地质条件,搭建模拟模型(长×高×宽)2 500 mm×1 200 mm×300 mm.相似模拟试验平台尺寸(长×高×宽)为4 300 mm×2 850 mm×600 mm,二维平面应力试验平台如图3所示.

考虑12号煤层埋深360 m,但试验中覆岩高度只模拟78 cm(对应原型值78 m,以下尺寸均为原型值),其上282 m岩层按照岩石模拟容重,采用配重模拟载荷.模型使用的主要材料有沙子、石灰、石膏、水、云母粉,为了能够较好地模拟实际岩层,在试验中选取的相似材料的组成方式和强度都与实际相差不大.在模型巷道两侧铺设汉中精测电阻应变式压



图3 二维平面应力试验平台

力传感器,在模型开采进行的同时记录位移测点的位移变化和巷道两侧应力传感器的数据变化。

参照各个实际岩层对应的物理力学性质参数,按照岩层的走向铺设试验模型.铺设模型时先称取各层铺设时需要的相似材料,之后加水进行混合搅拌,完全混合后使用分层铺设的方式对模型进行搭建.岩层厚度按实际模拟厚度铺设,层间用云母粉分层.在铺设过程中确定好断层位置和角度,按照原试验设计进行断层的铺设,断层使用云母粉分隔模拟。

根据现有的相似法则和煤岩厚度的实际情况,取几何相似常数  $C_L = 100$ 、容重相似常数  $C_\gamma = 1.5$ ;根据几何相似常数和容重相似常数计算出时间相似常数为  $C_t = 10$  和应力相似常数为  $C_\sigma = 150$ .模型尺寸和计算得出的模型相似常数见表2,模型模拟高度及材料配比见表3。

表2 试验模型相似常数

容重	时间	几何	泊松比	应力	强度
1.5	10	100	1	150	100

使用沙子作为模型搭建的骨料,选取石膏和大白粉作为胶结材料,利用云母粉的特性将其当作分层材料.铺设岩层所选择的配比号则是根据对应实际岩层的抗压强度选择,结合选取的几何相似常数和模型大小,分别计算出各层需要的材料分量。

各岩层中相似材料的总质量  $G$ :

$$G = \frac{lwh\nu_m \times 103}{g} \quad (1)$$

式中: $l$ 为模型长度,m; $w$ 为模型宽度,m; $h$ 为模型高度,m; $\nu_m$ 为模型材料的容重, $N/m^3$ ; $g$ 为重力加速度, $m/s^2$ 。

每层中需要某种材料的质量  $M_i$ ( $i$ 为层号):

$$M_i = GR_i \quad (2)$$

式中: $R_i$ 为某相似材料在  $i$ 层中的比例,通过配比号计算确定。

计算求得各分层材料用量结果见表3。

表3 模型模拟高度及材料配比

编号	岩性	高度/m	配比号	水/L	细砂/kg	石灰/kg	石膏/kg
1	粉砂岩	26	355	39.56	247.04	41.18	41.18
2	细砂岩	5	437	6.60	57.94	4.35	10.14
3	砂质泥岩	4	455	6.40	49.34	6.17	6.17
4	粉砂岩	22	355	33.47	209.03	34.84	34.84
5	砂质泥岩	6	455	9.60	74.01	9.26	9.26
6	细砂岩	8	437	10.56	92.70	6.96	16.22
7	粉砂岩	3	355	4.55	28.51	4.75	4.75
8	粉砂质泥岩	4	455	5.12	39.47	4.94	4.94
9	12号煤	5	637	5.00	50.22	2.50	5.86
10	粉砂质泥岩	5	455	6.40	49.34	6.17	6.17
11	细砂岩	7	437	9.24	81.11	6.09	14.19
12	13-2煤	5	637	5.00	50.22	2.50	5.86
13	砂质泥岩	20	455	25.60	197.35	24.70	24.70

考虑到煤柱边限定条件以及经济效益,模型左侧边界距离断层留30cm的边界煤柱,右侧边界距离断层留20cm的边界煤柱.上下顺槽与断层之间保留15cm断层保护煤柱,开切眼宽为1cm,开切眼与上顺槽之间保留10cm的护巷煤柱。

### 1.3 应力和位移监测点布置

整个应力检测装置由两个部分构成,第一部分是布置在采场巷道两侧的应力传感器,每间隔1cm布

置 1 个应力传感器,2 条采场巷道使用相同的应力传感器布置方式,在近工作面端布置 11 个,近断层端布置 14 个,共计 50 个;第二部分是外部连接的型号为 DH3816N 的电阻应变仪.整体的应力检测装置布置如图 4 所示.

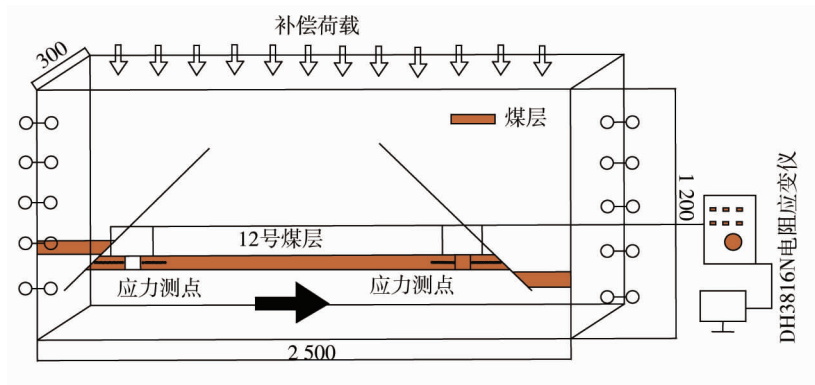


图 4 应力检测装置(单位:mm)

模型铺设完成并且风干之后,对模型进行位移测点的布置.在模型表面绘制水平和垂直的网格,得到  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  的正方形网格.网格测线从下至上以 A~H 进行编号,从左至右以 1~25 进行编号,依据纵横坐标进行编号(例如  $A_3, B_7, C_9$ ),2 条巷道正上方各额外布置 4 个测点,  $F_4$  和  $F_5$  间加设测点  $F_{45}$ ,  $F_4$  和  $G_4$  间加设测点  $FG_4$ ,  $F_5$  和  $G_5$  间加设测点  $FG_5$ ,  $FG_4$  和  $FG_5$  间加设测点  $FG_{45}$ ,  $F_{21}$  和  $F_{22}$  间加设测点  $F_{2122}$ ,  $F_{22}$  和  $G_{22}$  间加设测点  $FG_{22}$ ,  $F_{23}$  和  $G_{23}$  间加设测点  $FG_{23}$ ,  $F_{2122}$  和 G 间加设测点  $FG_{2122}$ , 共计 8 个位移测点.由于 G 观测线刚好在煤层上,故 G 观测线仅布置  $G_1, G_2, G_{24}, G_{25}$  这 4 个测点,共布置 187 个位移观测点,位移监测布置如图 5 所示.

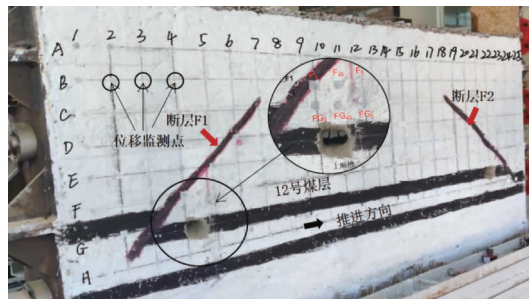


图 5 位移监测布置

位移变化测量选取的是徕卡 TC802 型光学全站仪.在模型位移监测点布置完成后,使用全站仪记录下各个测点的初始坐标,随着每个开采阶段的完成,任由其岩层运动直到稳定后,再记录当时测点的移动方向和距离.

## 2 试验过程及结果分析

### 2.1 试验过程

模型堆砌完成后,静置 30 d 待其自然风干,使得模型强度达到试验标准.在模型的顶部加  $8.46\text{ MPa}$  均匀载荷,根据试验方案留设的断层煤柱,在断层附近开采出宽度为  $5\text{ cm}$  的上下顺槽,然后对 12 号煤层进行回采工作.工作面每次推进  $20\sim 30\text{ cm}$ ,从而避免来压步距的偶然性,每个工作面推进阶段完成后,任由其上覆岩层垮落直至稳定,利用前期布置的应力检测装置观测采场巷道顶板的位移变化以及巷道两侧护巷煤柱在煤层回采过程中的应力变化特征.试验前后上下顺槽的现场试验情况如图 6 所示.

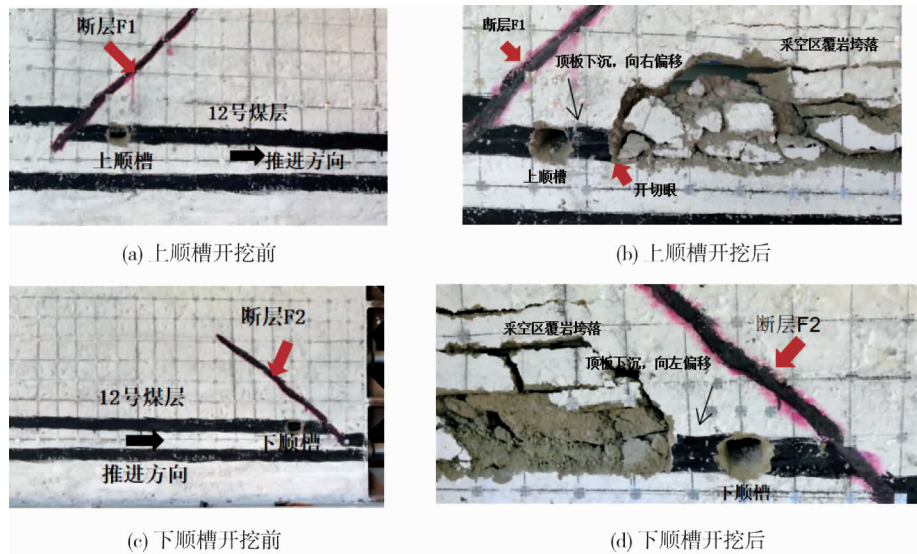


图 6 模型试验前后变形情况

## 2.2 结果分析

### 2.2.1 巷道顶板运动特点

上下顺槽位移测点垂直位移见图 7.图 7a 记录上顺槽顶板上方  $FG_4, F_4, FG_{45}, F_{45}, FG_5, F_5$  这 6 个位移测点随着工作面推进的位移变化;图 7b 记录下顺槽顶板上方  $FG_{23}, F_{23}, FG_{22}, F_{22}, FG_{2122}, F_{2122}$  这 6 个位移测点随着工作面推进测点的位移变化.

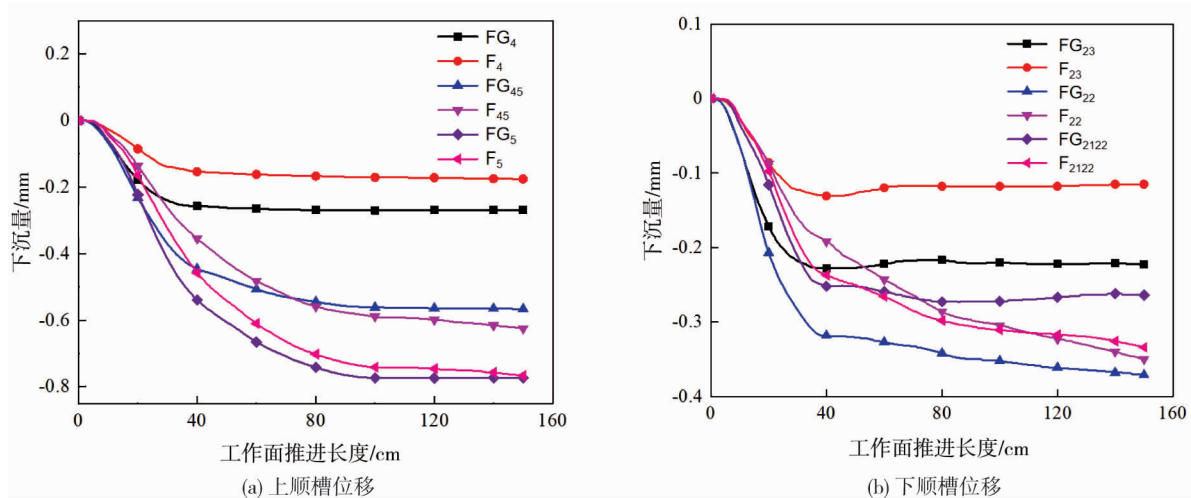


图 7 上下顺槽位移测点垂直位移

上、下顺槽巷道顶板在开挖过程中均出现垂直与水平方向运动,且以垂直方向为主;巷道顶板不同位置在垂直方向的位移不同,巷道远离断层侧顶板受采动影响较大.如图 7a 所示,靠近断层远离工作面的测点  $F_4$  在开挖完成后最大下沉量为 1.799 mm,而远离断层靠近工作面的测点  $F_5$  在开挖完成后最大下沉量为 7.767 mm,明显大于测点  $F_4$  的最大下沉量;在图 7b 中测点  $F_{23}$  在开挖完成后最大下沉量为 1.151 mm,  $F_{2122}$  在开挖完成后最大下沉量为 3.432 mm.

随着工作面的推进,巷道顶板的下沉量不断增大,位移变化速度呈现出先快后慢的特性.由图 7 可知:在工作面推进 10~30 cm 时,测点的位移变化曲线斜率增加,巷道顶板下沉速度变大;之后测点的位移变化曲线斜率开始减小,巷道顶板下沉速度变小.

上、下顺槽顶板最终位移量在远离断层端具有明显的差异性,从图 7a 中  $F_5$  的最终位移量和图 7b 中  $F_{2122}$  的最终位移量可以看出,  $F_5$  位移量远大于  $F_{2122}$  位移量.随着工作面从左至右推进,开采工作导致原岩应力遭

到破坏,采空区随着工作面推进逐渐接近下顺槽,所以上顺槽受到采动的影响相对于下顺槽更加明显.

### 2.2.2 巷道两侧煤柱应力特征

采场巷道在受到断层和回采影响后,两帮围岩应力、围岩变形会急剧增长.当工作面回采结束,观测巷道两侧煤柱布置的应力测点得到的应力数据如图 8 所示,图中测点编号按照从小到大的顺序,从巷道边缘开始布置.

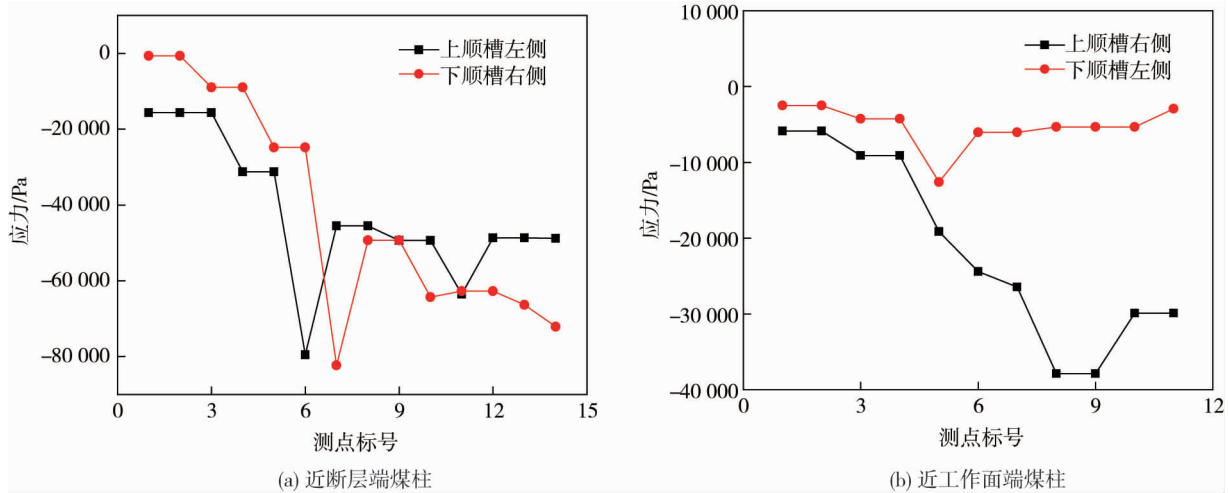


图 8 上下顺槽两端应力曲线

由图 8 应力曲线可知:随着测点远离巷道,垂直应力先增大至峰值后再逐步衰减.上顺槽左侧应力在距离巷道 6 cm 处到达峰值-79 532 Pa,右侧应力在距离巷道 8 cm 处到达峰值-37 870 Pa;下顺槽右侧应力在距离巷道 7 cm 处到达峰值-82 330 Pa,左侧应力在距离巷道 5 cm 处到达峰值-12 617 Pa.

对比图 8a 和图 8b 可知:巷道两侧围岩煤体的应力曲线有着明显的区别,靠近断层一侧煤柱应力峰值远大于靠近工作面一侧的应力峰值.这是因为巷道近工作面端煤柱较窄且一侧为采空区,出现破碎区,加上采动对于煤体的影响使其发生塑性破坏;其次在岩体开挖后,原岩的自然平衡状态受到影响,使得断层煤柱应力重新分布,加上断层存在的构造残余应力对于巷道的影响,巷道两侧煤柱的应力出现明显差异.

## 3 讨论

对于含有断层的模型,把模型看作是由断层分隔开的两个部分,对其力学模型进行简化(图 9).第一部分是 2 个断层形成的内部梯形区域,另一部分为断层外部的岩体,可以将外部岩体简化成图 9 中的应力支撑拱.图 9 中  $P$  为上部岩体竖向荷载, $P_1$  为断层 F1 外部岩体提供的荷载, $P_2$  为断层 F2 外部岩体提供的荷载.根据采场巷道顶板下沉速率将工作面推进分成两个阶段,工作面推进 10~30 cm 过程中采场巷道顶板下沉速率较快,将其划分为阶段一;工作面推进至 30 cm 处到工作面推进完成,采场巷道顶板下沉速率减缓,将其划分为阶段二.

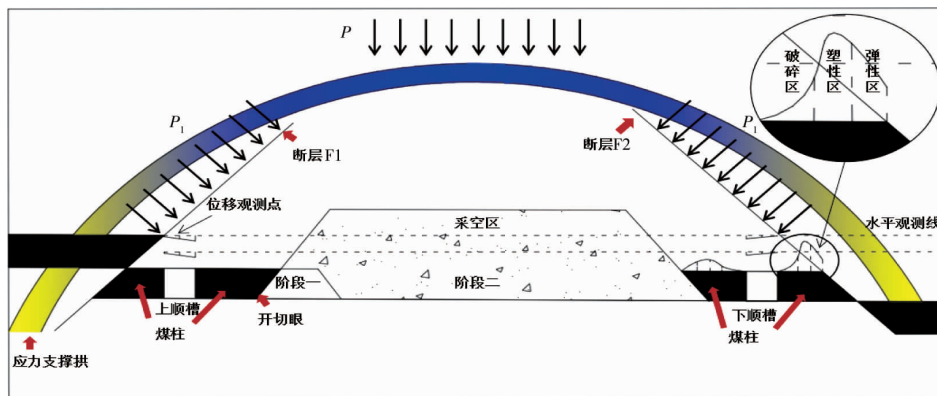


图 9 简化力学模型

当工作面处于掘进的第一阶段时断层内部梯形区域首次出现小范围采空区,在 $P, P_1, P_2$ 荷载的作用下,使得应力迅速重新分布,这一阶段采场岩体具有较强的应力承载能力,外部荷载被采场岩体大部分承载,使得巷道顶板下沉迅速并且向采空区倾斜;当工作面掘进到第二阶段,断层内部梯形部分采空区范围不断扩大,断层发生弯曲,采场岩体完整性遭到破坏,应力承载能力随着采空区的扩大开始减弱,断层外部岩体荷载逐步由外部形成的应力支撑拱承载,在应力支撑拱的作用下巷道顶板的位移速率逐渐减缓.荷载承载的转移与2.2节所述的巷道顶板向工作面倾斜并且下沉速率先快后慢,上顺槽顶板下沉量大于下顺槽顶板下沉量相吻合.

煤柱应力曲线可以划分成3个区域:破碎区、塑性区和弹性区.巷道近工作面侧护巷煤柱由于宽度较窄,采动引起的塑性破坏使得其应力峰值小于另一侧煤柱;荷载由采场岩体承载转移到断层外部应力支撑拱使得上下顺槽近工作面侧护巷煤柱应力出现图8b所示的差异性.

## 4 结论

1) 顶板随工作面推进持续下沉,初期(10~30 cm)下沉速率最快,之后减缓.巷道顶板垂直下沉不均匀,上顺槽下沉量大于下顺槽,顶板向工作面倾斜.两侧煤柱应力分布不对称,变形不均匀,靠近断层侧煤柱应力峰值较高,出现塑性破坏.工作面推进至30 cm左右时,应力承载由采场岩体转为断层外部应力支撑拱,顶板下沉减缓.

2) 文章揭示采场巷道顶板下沉特性、断层影响区域的行为、巷道围岩与煤柱应力分布以及应力承载转移等关键问题,为巷道支护设计和稳定性控制提供了重要参考.未来研究可进一步探讨断层对巷道稳定性影响的机制,以及开发更有效的支护技术和方法.

## 参考文献:

- [1] 刘锦荣,钱鸣高.采准巷道围岩稳定性及其控制[J].山西煤炭,1995(5):12-14.
- [2] 陈绍杰,刘瑞,徐贞社,等.不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表下沉规律[J].山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(1):38-48.
- [3] 谢英亮,沈平,姜永东,等.大倾角中厚煤层采区巷道围岩稳定性分析[J].煤炭技术,2022,41(5):53-57.
- [4] YU W J, LI K, LIU Z, et al. Mechanical characteristics and deformation control of surrounding rock in weakly cemented siltstone[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(9):337.
- [5] 余伟健,高谦.受断层构造影响的深部岩体现场调查及力学特征分析[J].地球物理学进展,2013,28(1):488-497.
- [6] 胡国栋.断层附近巷道围岩稳定性影响及控制技术[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [7] 黄辉,孙昊,陈小磊,等.近断层巷道非对称变形分析与控制对策[J].煤炭技术,2022,41(10):67-72.
- [8] 勾攀峰,胡有光.断层附近回采巷道顶板岩层运动特征研究[J].采矿与安全工程学报,2006(3):285-288.
- [9] 吴少康,郑伟,吴旭坤,等.断层影响下巷道应力演化规律及围岩控制研究[J].矿业研究与开发,2022,42(4):74-79.
- [10] 孟召平,彭苏萍,黎洪.正断层附近煤的物理力学性质变化及其对矿压分布的影响[J].煤炭学报,2001(6):561-566.
- [11] 谢志红,常庆粮,孙志猛.断层附近高应力巷道围岩变形机理及控制技术[J].煤矿安全,2022,53(4):121-128.
- [12] 郭宇杰,郑文翔,刘廷方.近断层巷道底鼓机理数值模拟分析[J].煤炭技术,2021,40(11):82-85.
- [13] 杨田,张登强,甯桃红,等.断层赋存条件下采场矿压显现规律研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(6):1654-1660.
- [14] 王楠,韩丰,贾喜荣.煤层巷道顶板岩层锚固机理模拟试验[J].煤矿安全,2013,44(6):45-47.
- [15] 谢小平,吴刚,尉瑞,等.断层附近软岩巷道围岩破坏机理及控制研究[J].煤炭科学技术,2020,48(9):195-202.