

双断层影响下采场顶板变形特征及 应力传递规律数值模拟

齐耀斌¹, 余伟健^{1,2*}, 郭涵潇¹, 潘豹¹

(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:以贵州某矿地质资料为背景,建立被双断层影响的工作面模型,根据波面动量守恒得到断层带岩体密度越低、孔隙度越高,应力波通过断层后的透射应力就越小,断层对应力传递的阻隔作用就越明显.通过 UDEC 数值模拟得到断层倾角和宽度变化时,工作面顶板岩层运移特征和垂直应力分布规律.结果表明:断层 F2 的出现不仅加剧了顶板岩层的运移,而且剧烈的围岩变形也会对 F2 产生扰动.随着断层 F2 倾角 α_2 的增加,采动对断层的扰动影响会减弱,但断层对应力传递的阻隔作用会增加,导致顶板岩层处应力积聚,工作面上覆岩层变形加剧.当 α_1 (断层 F1 倾角), α_2 固定不变时,断层对应力的阻隔作用也会随着断层宽度 d 的增加而增大,导致顶板岩层处应力积聚,应力峰值不断增加并向断层靠近,最终加剧了工作面上覆岩层空间结构变形.

关键词:数值模拟;断层倾角;断层宽度;垂直应力

中图分类号:TD323

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2024)04-0049-09

Numerical Simulation of Roof Deformation Characteristics and Stress Transfer Law of Stope Under the Influence of Double Faults

QI Yaobin¹, YU Weijian^{1,2}, GUO Hanxiao¹, PAN Bao¹

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

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

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

Abstract: A working face model affected by double faults is established based on the geological data of a particular mine in Guizhou. According to the conservation of wave surface momentum, it is found that the lower the density and the higher the porosity of the rock mass in the fault zone, the smaller the transmitted stress of stress waves after passing through the fault, and the more pronounced the blocking effect of the fault on stress transmission. Through UDEC numerical simulation, it is obtained that when the dip angle and width of the fault change, the migration characteristics and vertical stress distribution law of the top plate rock layer in the working face is regular. The results indicate that the appearance of F2 not only intensifies the migration of the roof rock layer, but also causes disturbance to F2 due to severe deformation of the surrounding rock. Along with the increase of α_2 will weaken the disturbance effect of mining on faults, but the blocking effect of faults on stress transmission will increase, leading to stress accumulation at the roof rock layer and intensified deformation of the overlying rock layer on the working face. When α_1 , α_2 is fixed and unchanged, the blocking effect of the fault on the stress will also increase with the increase of d , leading to stress accumulation at the roof rock layer, increasing the peak stress and approaching the fault, and ultimately exacerbating the spatial structural

deformation of the overlying rock layer.

Keywords: numerical simulation; fault dip angle; fault width; vertical stress

断层是一种常见的复杂地质构造,存在于我国大多数矿井之中.断层会破坏地层的完整性,给巷道的掘进与采场围岩变形带来不稳定因素^[1-4],尤其是工作面存在断层时,严重影响安全生产的进行,断层附近岩体比较破碎,容易受到采动影响而活化,使其周围覆岩空间结构回转^[5-6],诱发一系列灾害.断层还具有阻隔性,影响顶板支承压力的传递并在顶底板、煤柱处产生较高的应力集中,为煤层开采带来一系列的难题^[7-9].

许多学者对断层进行研究,发现断层的一些特征(诸如倾角、落差宽度、产状等)以及开采顺序对顶板运移和采场应力的影响很大.甄亚彬等^[10]认为断层上下底宽度和裂隙带宽度的增加都会使采场垂直应力增加,应力集中程度增高,并且集中位置逐渐靠近工作面;张臣等^[11]认为断层上盘应力相对下盘应力更加集中,断层宽度越大对应力传递的阻隔效应越明显,垂直应力峰值也随断层宽度的增大而增大;陈绍杰等^[12]认为地表移动变形范围与松散层厚度密切相关,地表下沉盆地在断层一侧的移动变形范围随着松散层厚度的增加先减小后扩大再减小,最终与无断层一侧相同;石佳林等^[13]通过数值模拟得到断层在倾角较小时会发生滑动破坏,但随着断层倾角的增大,断层的破坏形式逐渐变为剪切破坏,从而导致应力增高区从下盘煤层区域向下盘顶、底板区域转移;田焱等^[14]认为下保护层采动容易引起顶板断层附近煤岩体破碎,形成断层带,覆岩裂隙在顶板断层带内显著增加,覆岩运移具有时空效应,即同一层位覆岩随工作面推进发生位移下沉;焦振华等^[15]对不同开采条件下断层损伤变量进行回归分析,确定水平应力、断层内摩擦角、工作面距断层距离为采动诱发断层滑移的主控因素;梁晓敏等^[16]通过理论计算、现场实测及数值模拟得到工作面过断层期间,周期来压步距及强度会减小,且工作面位于断层下盘时的工作阻力小于工作面位于上盘时的工作阻力.

目前对于多断层影响下的开采研究较少,多条断层的存在不仅使岩层更加破碎,加剧顶板的移动,而且它们之间还会相互影响,使采场应力的传递规律变得更加复杂.本文利用数值模拟方法研究在 2 条断层下盘处开采时,断层倾角和宽度对工作面上覆岩层运移以及支承压力的传递的影响,得到工作面顶板岩层移动特征和支承压力的传递规律,为采场顶板支护和冲击地压的防治提供一定的参考依据.

1 工程概况

以贵州省六盘水市盘州市某矿地质条件为背景,所选工作面位于 21 采区西翼,东起 212,213 运输石门,西到切眼,附近没有其他采掘工作进行,而且预计在回采过程中,其他位置的采掘工作不会影响该回采工作面.地表没有建筑和其他影响回采的工程.主采煤层为 12[#]煤层,平均埋深 360 m,煤层平均厚度为 5 m,煤层平均倾角为 5°,属于近水平厚煤层.煤层赋存稳定,结构简单,层状~块状构造,煤层为灰黑色、半亮型,性脆且下部疏松易碎.12[#]煤层回采工作面被 2 条距离较近的断层所贯穿,这 2 条断层分别为倾角 45°、落差 5 m 的逆断层 F1 和倾角 45°、落差 5 m 的正断层 F2.2 条断层在 12[#]煤层层位处相距 210 m.煤层地质钻孔柱状图见图 1.

2 断层对应力阻隔作用分析

断层是沿破裂面两侧岩块发生显著相对位移的断裂构造,通常情况下断层带岩体较正常岩体更加破碎.而工作面回采时会产生应力波,应力波穿过断层破碎带岩体结构面会发生透射.根据波面动量守恒公式可以得出应力波通过断层带岩体某一结构面单元后的透射应力大小^[17]为

$$\sigma_1 = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \sigma_r \quad (1)$$

式中: σ_1 为应力波穿过断层后的透射应力; σ_r 为应力波穿过断层前的入射应力; ρ_1 为完整岩体密度; c_1 为完整岩体中应力波传播速度; ρ_2 为断层带岩体密度; c_2 为断层带岩体中应力波传播速度.

柱状	岩性	厚度/m	岩性描述
	粉砂岩	26	细粒结构,岩石致密,坚硬
	细砂岩	5	泥质胶结,局部夹薄层状深灰色粉砂岩,致密坚硬,中上部有暗色条带泥质粉砂岩及煤线.底部以泥质粉砂岩为主
	砂质泥岩	4	深灰色,中厚层状、薄层状,上部为砂质泥岩,性脆,松散,含砂量较高.中部有少量粉砂岩,下部较破碎
	粉砂岩	22	细粒结构,岩石致密,坚硬
	砂质泥岩	6	深灰色,中厚层状、薄层状,上部为砂质泥岩,性脆,松散,含砂量较高.中部有少量粉砂岩,下部较破碎
	细砂岩	8	含菱铁质结核,薄~中厚层状,局部与浅灰色细砂岩互层,致密坚硬
	粉砂岩	3	细粒结构,岩石致密,坚硬
	粉砂质泥岩	4	深灰色~灰色砂质泥岩,致密性脆,薄~中厚层状,含砂量较高,往下部砂质增高
	12#煤	5	灰黑色,半亮型,层状~块状构造,性脆,下部疏松,易碎
	粉砂质泥岩	5	深灰色~灰色砂质泥岩,致密性脆,薄~中厚层状,含砂量较高,往下部砂质增高
	细砂岩	7	泥质胶结,局部夹薄层状深灰色粉砂岩,致密坚硬,中上部有暗色条带泥质粉砂岩及煤线.底部以泥质粉砂岩为主
	13-2#煤	5	灰黑色,半暗型,线理状结构,具炭质泥岩伪顶,煤层中上部有两层夹矸
	砂质泥岩	20	深灰色,中厚层状、薄层状,上部为砂质泥岩,性脆,松散,含砂量较高.中部有少量粉砂岩,下部较破碎

图1 综合地质柱状图

由式(1)可知透射应力的的大小取决于断层带岩体的密度及应力波在其中的传播速度.将式(1)变形为

$$\sigma_1 = \frac{2}{\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} + 1} \sigma_r \quad (2)$$

由式(2)可以看出透射应力的的大小与断层带岩体密度及应力波在其中的传播速度成正比,由于断层带岩体破碎、孔隙发育,水和气体充斥其中,所以断层带岩体密度小于正常岩体密度,即 $\rho_1/\rho_2 > 1$.而应力波在岩体中的传播速度^[18]又满足式(3).

$$\frac{1}{c} = \frac{1-\varphi}{c_M} + \frac{\varphi}{c_L} \quad (3)$$

式中: c 为应力波在岩石中的传播速度; c_M 为应力波在岩石骨架中的传播速度; c_L 为应力波在孔隙充填物中的传播速度; φ 为岩石孔隙度.

岩石骨架为固体,岩石孔隙充填物多为水和空气,应力波在固体中的传播速度大于其在液体、气体中的传播速度,则可知 $c \in [c_L, c_M]$, $\varphi \in [0, 1]$.结合式(3)可知 φ 与 c 成反比,而断层带岩体破碎,孔隙度较正常岩体更大,所以应力波在断层带岩体的传播速度低于其在完整岩体中的传播速度,所以 $c_1/c_2 > 1$.

根据上述分析可推导出式(2)中 σ_r 的系数小于1,说明应力波在穿过断层岩体某一单元结构面后会有损耗,也就是透射应力小于穿过断层前的入射应力,即 $\sigma_1 < \sigma_r$, $\sum \sigma_1 \ll \sum \sigma_r$.由此可以推断出,断层对工作面采动应力传递具有明显的阻隔作用,这也导致工作面从断层下盘向断层推进时,断层上下两盘应力分布差异较大.接下来利用离散元软件 UDEC 对不同断层倾角和宽度下的工作面上覆岩层应力分布特征进行研究,得到断层倾角和宽度对断层阻隔作用的影响程度.

3 数值模型

UDEC 是一款处理不连续介质的二维离散元程序,采用显式时间步直接进行运动方程的求解.可以直观地观测垮落带变形垮落和上覆岩层中裂隙生成的过程,满足研究的实际需求.

为满足研究需要,将模型尺寸设为长 \times 高=250 m \times 100 m,模型包含1条逆断层和1条正断层,为方便论述,逆断层记为F1,正断层记为F2,相应的断层倾角记为 α_1 和 α_2 ,回采工作面设置在F1和F2的下盘处.模拟开采的12[#]煤层为近水平煤层,埋深 H 为360 m,原岩应力为8.4 MPa,侧压系数取1.2,在模型水平方向施加10 MPa的均布载荷.在12[#]煤层开挖2条回采巷道,并留设断层保护煤柱与巷道保护煤柱,长度分别为15,10 m.断层以1 m宽断裂带表示,落差为5 m,2条断层切割煤层顶板及部分底板,数值模型见图2.

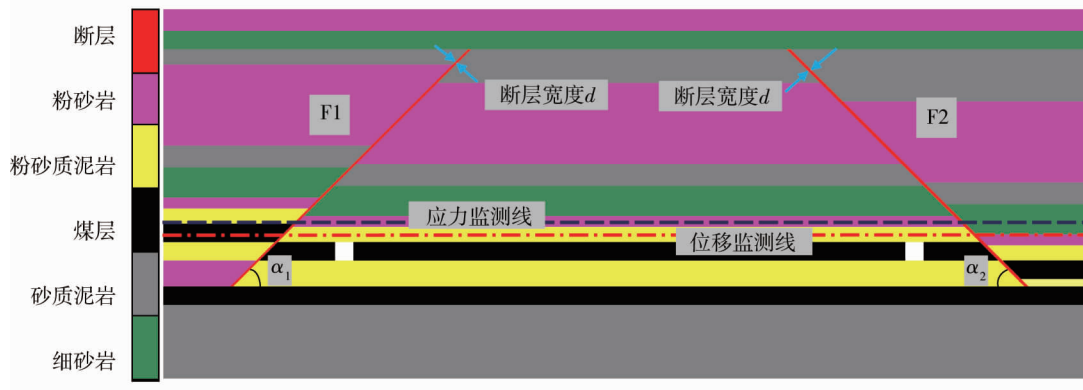


图2 数值计算模型

在以上基础上施加模型边界条件:上部边界条件为应力条件,在模型上部施加未模拟岩层的原岩应力大小为 $q=\gamma H_1$ (γ 为上方岩层平均容重, H_1 为模型上部到地表的高度);下部边界条件为位移条件,可以水平运动不可以垂直运动;两侧边界条件为速度条件,可以垂直运动,不可水平运动.模拟选取莫尔-库仑本构模型和面接触的库仑滑移模型.根据矿山地质资料所得的岩石力学参数见表1,接触面节理力学参数借鉴文献[10],具体数值见表2.

表1 矿山岩层岩石力学参数

岩性	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
粉砂岩	2 460	15.99	2.40	40.2	3.2	30	0.23
细砂岩	2 660	22.75	2.00	43.0	2.2	32	0.25
粉砂质泥岩	1 980	14.04	1.70	30.5	0.7	26	0.21
12 [#] 煤	1 620	3.29	0.20	22.0	0.6	22	0.37
砂质泥岩	1 980	14.04	1.70	30.5	0.7	26	0.21
13-2 [#] 煤	1 620	2.70	0.23	18.0	0.6	22	0.35

表2 岩层接触面节理力学参数

岩层	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	16.0	9.5	3.2	28
细砂岩	16.0	9.5	3.2	28
砂质泥岩	9.0	6.0	1.7	25
粉砂质泥岩	9.0	6.0	1.7	20
煤层	6.0	4.7	0.7	20
断层	0.2	0.1	0.9	25

4 不同倾角断层影响下的顶板变形与支承应力传递规律

4.1 顶板运移

为了研究 α_2 的变化对F1,F2下盘岩层变形和垂直应力分布的影响,将 α_1 固定设为45°, α_2 依次设为45°,60°,75°,并增加工作面只存在F1时这一情况,将其与工作面同时存在F1,F2时的情况作为对比,突

出 F2 对工作面顶板岩层运移与应力分布的影响.煤层埋深 360 m,采高 5 m,工作面长度为 150 m,设置循环步数以考虑围岩变形的时间效应.在煤层上方 2 m 处布置测线来记录直接顶位移变化情况,测线长 250 m,每 5 m 布置一个,共 50 个位移监测点.将所监测到的数据导出得到直接顶位移云图(图 3)和位移曲线(图 4).

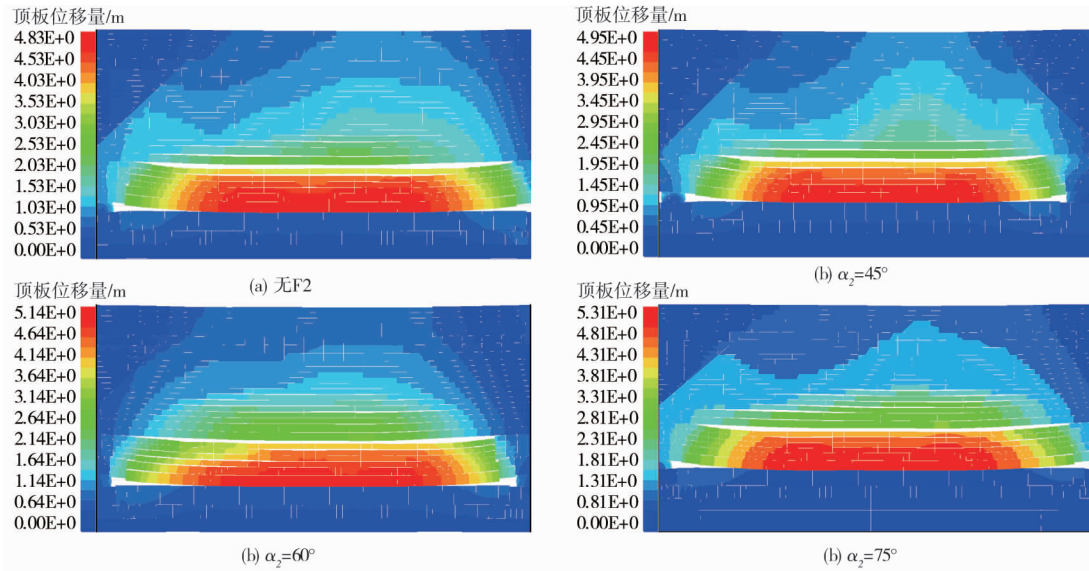


图3 不同断层倾角影响下顶板位移云图

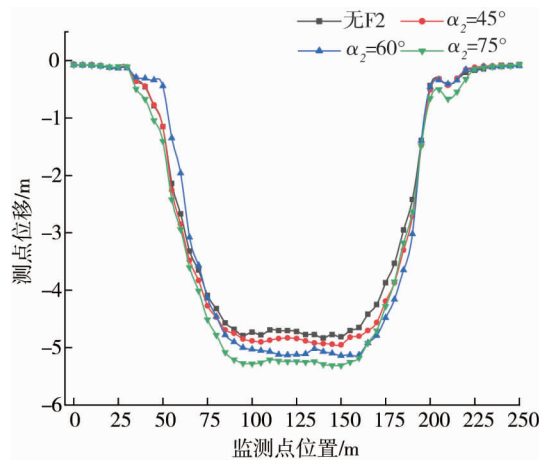


图4 不同断层倾角影响下直接顶位移变化曲线

由图 3 和图 4 可以看出,当工作面无 F2,只存在 F1 时,最大垮落出现在开切眼(断层 F1 右侧 30 m 处)右侧 39~94 m,位移峰值为 4.83 m,垮落带上覆岩层产生横向裂隙并在煤层上方 18 m 处出现离层现象,靠近 F1 侧.说明工作面只存在 F1 时,覆岩变形受到采动和 F1 的叠加影响,且靠近断层侧覆岩的变形程度要比无断层侧覆岩的变形程度更大.

当工作面同时存在 F1, F2, 且 $\alpha_2 = 45^\circ$ 时,最大垮落在开切眼右侧 39~94 m,位移峰值为 4.95 m,垮落带上方覆岩运动加剧,并且煤层上方 15~21 m 处出现离层现象, F2 侧部分围岩也受到采动影响出现较小位移.可以看出 F2 的存在加剧了工作面覆岩的变形.

$\alpha_2 = 60^\circ$ 时, F2 对工作面覆岩的影响范围开始缩小,但上覆岩层运动加剧,垮落带上方覆岩大面积沉降,产生较大的横向裂隙,离层现象也在向上发展出现在煤层上方 25~27 m 处.垮落带最大垮落在开切眼右侧 39~104 m,位移峰值为 5.14 m.

α_2 增加到 75° 后,覆岩中出现大量离层(煤层上方 21~29 m),垮落带最大垮落出现在 34~104 m,位移

峰值为 5.31 m.

综上所述,断层会影响工作面上覆岩层的变形,靠近断层侧的覆岩变形程度大.F2 的出现不仅加剧了顶板岩层的运移,而且剧烈的围岩变形也会对 F2 产生扰动,使 F2 周围岩体受到影响产生位移.随着 α_2 的不断增大,F2 与受采动影响而发生变形的围岩之间的距离增大,F2 受到的扰动影响逐渐减弱,F2 变得更加稳定.但是 α_2 的增大会使断层的阻隔作用越来越明显,导致顶板处应力积聚,顶板变形量增加,垮落带上方覆岩中的离层现象向上方岩层发展,垮落带的最大垮落范围和位移峰值也不断扩大.

4.2 顶板支承应力传递规律

煤层上方直接顶为粉砂质泥岩,由地质钻孔资料可知,此类岩石致密性脆,属于软弱岩层,应力在该岩层中的传递不太稳定.模拟过程中,在粉砂质泥岩内布置测点,但应力变化波动较大且规律不明显.而煤层上方 5 m 处岩层为粉砂岩,岩石致密坚硬,应力在此类岩石中的传递比较稳定,而且在模拟过程中,该岩层中的应力变化具有明显的规律性,所以最终在煤层上方 5 m 处的粉砂岩中布置一条长 250 m 的测线,每 2.5 m 布置一个测点,共布置 100 个,将所得数据导出得到顶板垂直应力变化曲线见图 5.

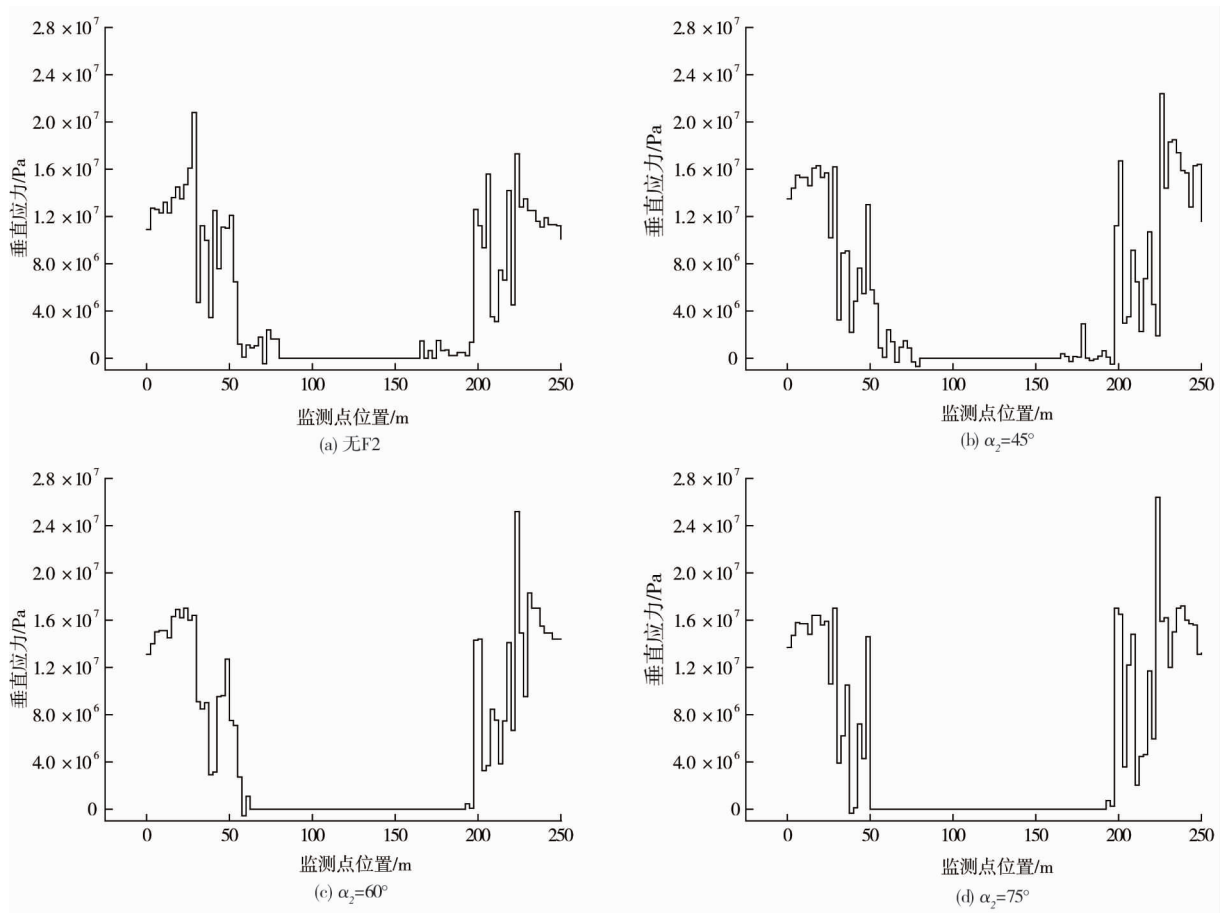


图 5 不同断层倾角影响下垂直应力变化曲线

如图 5 所示,工作面仅存在 F1 而无 F2 力时,其顶板两侧均显现出显著的应力集中效应.具体而言,左侧顶板应力峰值高达 20.8 MPa,相应的应力集中系数为 2.48;右侧顶板应力峰值则为 17.3 MPa,应力集中系数为 2.06.这一现象主要归因于断层的阻隔作用,使得靠近断层的顶板区域应力集中更为剧烈,从而增加了冲击危险.

当工作面同时受到 F1, F2 影响时,两侧顶板仍然出现应力集中,但是 F2 侧的应力集中程度远高于 F1 侧.随着 α_2 的增大, F1 右侧垂直应力峰值依次为 16.2, 16.4, 17.0 MPa, 应力集中系数为 1.93, 1.95, 2.02, 应力集中在 F1 右侧 2 m 处; F2 左侧垂直应力峰值依次为 22.4, 25.2, 26.4 MPa, 应力集中系数为 2.67, 3.0, 3.14. 监测过程中,中间部分顶板垮落发生塑性破坏,垂直应力为 0.

综上所述,F2的存在会使F1侧顶板岩层的应力集中程度降低,F2侧顶板岩层的应力集中程度增高,并使其远高于F1侧.随着 α_2 的增大,断层的阻隔性越来越明显,F1,F2侧顶板岩层处的垂直应力峰值不断增大,但F1侧垂直应力的增长幅度小于F2侧,两侧应力集中区域和峰值位置逐渐向F1和F2靠近.

5 不同宽度断层影响下的顶板变形与支承应力传递规律

5.1 顶板运移

在研究不同宽度断层对顶板位移和支承压力传递的影响时,将 F_1, F_2 的角度设置为 45° ,埋深360 m,采高5 m,设置4种不同的断层宽度 $d(0.5, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ m})$,并以1 m宽裂隙带为基础进行研究.煤层上方2 m的直接顶岩层内布置一条长250 m的位移测线,每隔5 m一个监测点,共布置50个监测点.将所得数据导出得到顶板位移云图和变化曲线图,如图6和图7所示.

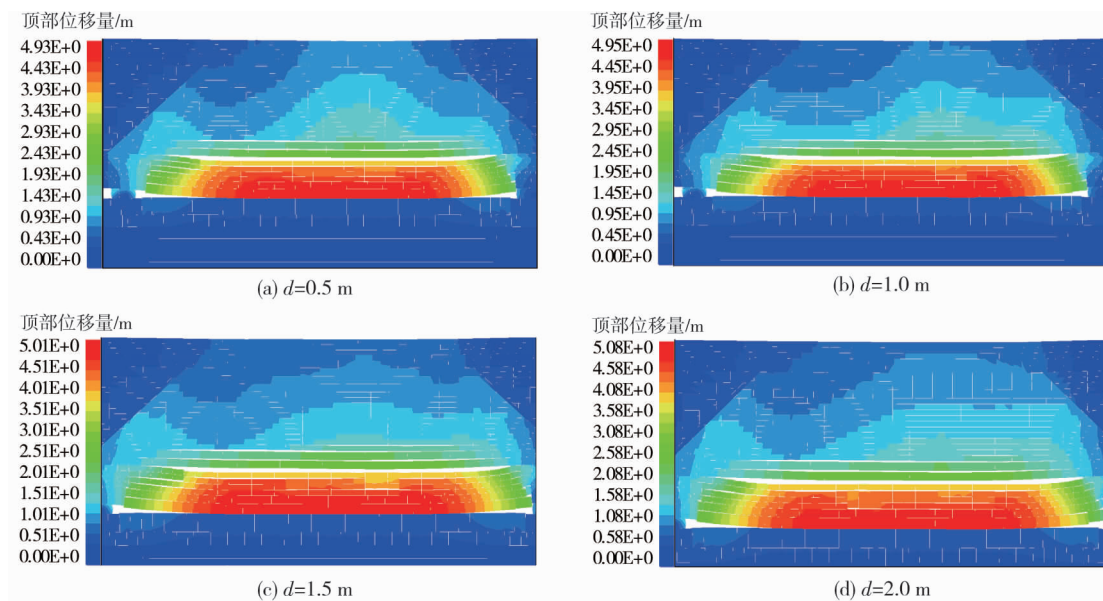


图6 不同断层宽度影响下顶板位移云图

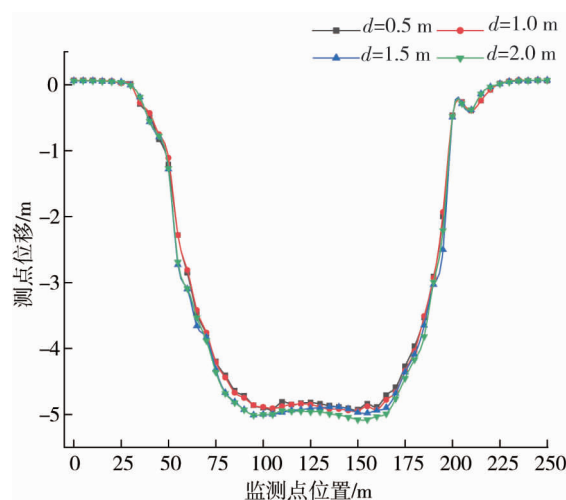


图7 不同断层宽度影响下直接顶位移变化曲线

由图6和图7可以看出,断层宽度为0.5 m时,最大垮落在开切眼右侧34~99 m,峰值位移为4.93 m.煤层上方18~21 m处的覆岩出现较大离层,贯穿两断层之间的顶板;断层宽度增加到1 m,垮落带高度、最大垮落范围与离层高度未发生变化,直接顶位移峰值增加到4.95 m,增长幅度较小;当断层宽度增加到1.5 m后,上覆岩层的变形明显加剧,最大垮落范围扩大至开切眼右侧29~104 m,位移峰值增加到5.01 m,

垮落带上方岩层中的横向裂隙增多,离层现象也在向上方岩层发展并靠近 F2 侧;断层宽度为 2 m 时位移峰值增加至 5.08 m,峰值位置向 F2 靠近,上覆岩层中的裂隙数量增加并且靠近 F2 侧出现很多较大的横向裂隙。

综上所述,随着断层宽度的增加,断层对应力传递的阻隔作用越来越大,使得应力积聚在工作面顶板岩层中,最终导致顶板位移量和裂隙数量不断增加,上覆岩层空间结构变形加剧。

5.2 顶板支承应力传递规律

同上,在煤层上方 5 m 处岩层中布置一条长 250 m 的垂直应力检测线,每 2.5 m 一个测点,共 100 个测点,将所得数据导出得到断层不同宽度条件下的垂直应力变化曲线如图 8 所示。由图 8 可以看到,随着工作面的推进,顶板垂直应力向两侧煤(岩)体传递,并在靠近断层处的岩体中产生不同程度的应力集中。左侧顶板应力不断增加,并在断层煤柱和巷道煤柱上方的顶板岩层中积聚,随着断层宽度的增加,峰值应力在不断增加,分别为 15.9, 17.0, 22.0, 23.2 MPa, 应力峰值位置都在 F1 附近;带宽为 1.5 m 时, F1 侧顶板 43#~45# 测点处垂直应力突然增加至 21.8 MPa, 相较于其他 3 种情况, 应力集中程度过高, 应预防冲击地压的发生。右侧保护煤柱上方顶板处应力同样积聚, 而且越靠近 F2 的位置应力集中程度越大, 随着断层宽度的增加, 右侧峰值应力也在不断增加(分别为 21.1, 22.4, 23.6, 25.0 MPa), 峰值位置逐渐靠近 F2。

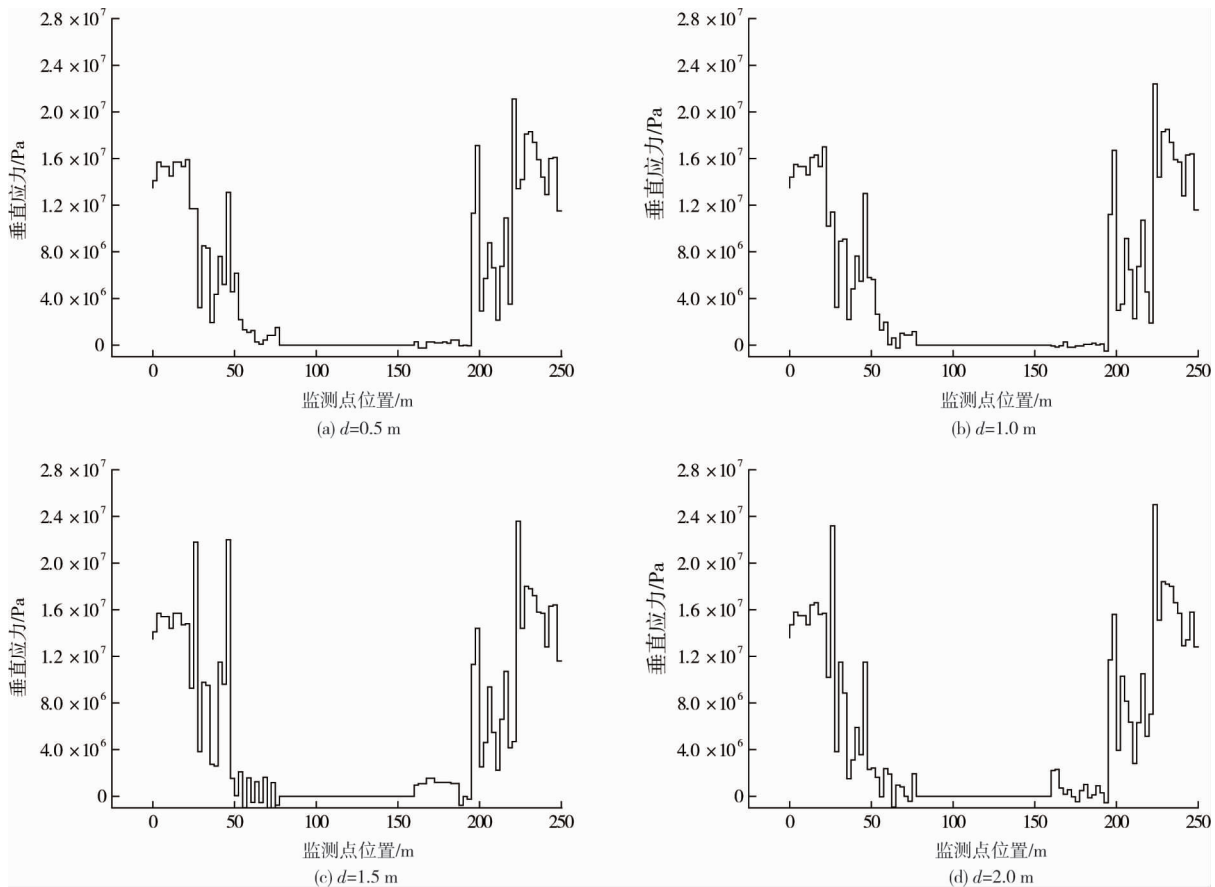


图 8 不同断层宽度影响下的垂直应力变化曲线

综上所述,由于断层带岩体比较破碎,对应力的传递具有阻隔作用,所以在工作面两侧未垮落的顶板处产生应力集中,而且随着断层宽度的增加,这种阻隔作用越来越明显,应力集中程度不断增高,应力峰值位置逐渐向断层靠近.并且随着断层附近应力峰值不断增大,导致 F2 受到的影响越来越明显,增加了其活化的可能性。

6 结论

1) 断层带岩体密度越低、孔隙度越高,应力波通过断层后的透射应力就越小,断层对应力传递的阻隔

作用就越明显。

2) 断层会影响工作面上覆岩层的变形,靠近断层侧的覆岩变形程度比无断层侧要大。 F_2 的出现不仅加剧了顶板岩层的运移,而且剧烈的围岩变形也会对 F_2 产生扰动。随着 α_2 的增大, F_2 受到的扰动影响逐渐减弱, F_2 变得更加稳定,但是断层对应力的阻隔作用愈发明显,导致工作面顶板处应力积聚,采场上覆岩层空间结构变形加剧。

3) 当 α_1 和 α_2 固定不变时,断层对应力的阻隔作用也会随着 d 的增大而增大,使得顶板岩层处应力积聚,最终导致顶板位移量增大,工作面上覆岩层空间结构变形加剧。

4) F_2 的存在会使工作面左侧覆岩处的应力峰值减小,右侧覆岩处的应力峰值增大,最终导致 F_2 侧顶板岩层的应力集中程度远高于 F_1 侧。并且随着 α_2 和 d 的增大,断层对应力的阻隔作用越来越明显,两侧顶板岩层处垂直应力峰值不断增加,应力集中区域和峰值位置逐渐向断层靠近。

参考文献:

- [1] 王宏伟,田政,王晴,等.采动诱发断层覆岩耦合失稳的突变效应[J].煤炭学报,2023,48(8):2961-2975.
- [2] 张学博,王豪,沈帅帅.小断层活化对采空区上覆岩层破坏及渗透性影响[J].煤炭科学技术,2022,50(2):75-85.
- [3] 石佳林,胡千庭,罗永江,等.不同断层倾角下煤系断层应力场演化规律研究[J].矿业安全与环保,2023,50(1):1-8.
- [4] 余伟健,李可,张靖,等.采动影响下深埋软岩巷道变形特征与控制因素分析[J].煤炭科学技术,2020,48(1):125-135.
- [5] 王爱文,潘一山,李忠华,等.断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研究[J].岩土力学,2014,35(9):2486-2492.
- [6] 王同旭,曹明辉.采动影响下断层渐进破坏过程及能量释放规律研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(5):992-1001.
- [7] 王同旭,曹明辉,江东海.采动影响下断层活化失稳及能量释放规律研究[J].煤炭科学技术,2022,50(7):75-83.
- [8] 李鹏,卢佳欣,台连海,等.正断层下盘工作面覆岩运移及应力演化特征研究[J].煤炭技术,2023,42(2):29-33.
- [9] 朱敬忠,刘启蒙,刘瑜,等.断层活化特征及阻隔水煤柱合理化留设研究[J].煤炭科学技术,2022,50(8):166-171.
- [10] 甄亚彬,赵玉成,王子波.断层影响下采场顶板的破断规律研究[J].煤炭工程,2013,45(9):71-74.
- [11] 张臣,柳研青,束佳明,等.不同断层的宽度对围岩应力演化规律的影响[J].煤炭技术,2018,37(7):61-63.
- [12] 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.
- [13] 石佳林,胡千庭,罗永江,等.不同断层倾角下煤系断层应力场演化规律研究[J].矿业安全与环保,2023,50(1):1-8.
- [14] 田焱,刘勇,康向涛,等.下保护层工作面过断层区覆岩裂隙-应力演化规律研究[J].中国矿业,2018,27(9):136-140.
- [15] 焦振华,姜耀东,赵毅鑫,等.工作面过断层动态力学响应特征研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(1):54-63.
- [16] 梁晓敏,郝兵元,王东亮.综放工作面过斜交逆断层矿压规律研究[J].矿业研究与开发,2021,41(3):63-69.
- [17] 龙军,于秋鸽.基于应力波理论的断层对覆岩移动变形和应力传递阻隔效应研究[J].煤炭工程,2022,54(3):105-111.
- [18] 王斐笠,王述红,修占国.应力波扰动下结构面的应力量化及强度表征[J].岩土力学,2018,39(8):2844-2850.