

大倾角煤层长壁开采顶板应力传递路径倾角效应

罗生虎^{1,2}, 王 同^{2,3}, 田程阳¹, 高喜才^{2,3}, 郎 丁^{2,3}, 王红伟^{2,3}

(1.西安科技大学 理学院,陕西 西安 710054;2.西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部实验室,陕西 西安 710054;3.西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054)

摘 要:大倾角煤层安全高效开采的关键是对围岩的有效控制,而发现并揭示围岩采动应力的时空演化特征及其倾角效应是围岩稳定性控制的基础。以新疆某矿 25221 工作面为工程背景,采用现场实测、理论分析与数值计算相结合的研究方法,在综合厘定与分析工作面矿压显现一般规律及其成因的基础上,研究顶板采动应力传递路径的时空演化特征及其倾角效应。结果显示:在大倾角煤层开采中,顶板采动应力随工作面推进的动态演化过程先后经历了增长期和稳定期,其对应支承压力峰值的演化呈现为先增大后趋于稳定的特征。受煤层倾角影响,顶板采动应力的三维传递演化沿走向对称、沿倾向非对称。在倾向剖面内,顶板应力的传递路径呈非对称拱形形态,且沿顶板自上而下,应力偏转位置由工作面倾向中轴线左侧逐渐向其右侧迁移,上覆岩层载荷以应力偏转界线为界,分别向倾向上、下侧煤体传递,造成倾向上侧支承压力集中系数大于下侧。在工作面走向剖面内,围岩应力的传递路径呈扁平拱形态,扁平拱两侧半拱形区域上覆岩层载荷除了向工作面走向两侧煤体传递外,亦向工作面倾向上、下侧煤体传递,而扁平拱中间直线段区域上覆岩层载荷主要向倾向上、下侧煤体传递。随着煤层倾角的增大,围岩应力传递演化的非对称特性显著增大,应力偏转界线与工作面倾向中轴线间的距离逐渐增大,2 者交点的高度呈现为增—减—增的演化趋势;受此影响,工作面走向和倾向上侧支承压力集中系数亦呈现出增—减—增的演化趋势。顶板应力的非对称时空演化特征,造成采场空间不同区域顶板的力学性状与行为存在显著差异,这种差异性导致倾向不同区域支架的受载与失稳特征亦存在显著差异,且这一现象会随着煤层倾角的增大而愈发明显。

关键词:大倾角煤层;采动应力;传递路径;倾角效应;偏转界线

中图分类号:TD323

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2022)02-0623-11

Angle effect of the roof stress transmission path in longwall mining of steeply dipping coal seam

LUO Shenghu^{1,2}, WANG Tong^{2,3}, TIAN Chengyang¹, GAO Xicai^{2,3}, LANG Ding^{2,3}, WANG Hongwei^{2,3}

(1.College of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2.Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention under Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3.School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The key to safe and efficient mining of steeply dipping coal seam is an effective control of surrounding rock. Discovering and revealing the spatial-time evolution characteristics of mining stress and the angle effect are the basis for the stability control of surrounding rock. Taking No.25221 working face of a mine in Xinjiang, China as engineering background, this paper adopted the comprehensive research methods of field monitoring, theoretical analysis, and nu-

收稿日期:2021-10-21 修回日期:2021-12-14 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.XR21.1610

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974227,51634007,51904226)

作者简介:罗生虎(1983—),男,新疆哈密人,副教授,博士。Tel: 029-85583136, E-mail: luoshh06@qq.com

引用格式:罗生虎,王同,田程阳,等.大倾角煤层长壁开采顶板应力传递路径倾角效应[J].煤炭学报,2022,47(2):623-633.

LUO Shenghu, WANG Tong, TIAN Chengyang, et al. Angle effect of the roof stress transmission path in longwall mining of steeply dipping coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 623-633.



移动阅读

merical simulation. On the basis of comprehensively analyzing the general laws of abutment pressure and its causes, the spatial-time evolution characteristics of the mining stress transmission path of roof and the angle effect were studied. The results show that during the mining of steeply dipping coal seams, the dynamic evolution process of roof stress and the abutment peak pressure has experienced a growth period and a stable period with the advancement of the working face. Affected by the angle of coal seam, the roof stress presents the characteristics of three-dimensional transmission and evolution that are symmetrical along the strike and asymmetrical along the inclination. In the inclined section, the transmission path of the roof stress is an asymmetrical arch shape. From top to bottom, the stress deflection position gradually shifts from the left side to the right side of the working face. The load of overburden strata is transferred to the upper and lower coal seams with the stress deflection boundary as the boundary, which causes the concentration coefficient of the upper to be larger than that of the lower. In the strike section, the stress transfer path of the surrounding rock is a flat arch shape. The load of overburden strata in the semi-arch area of the flat arch is not only transferred to the coal bodies on both sides along strike, but also to the upper and lower coal bodies along inclined direction. The load of overburden strata in the middle straight area of the flat arch is mainly transferred to the upper and lower coal bodies along inclined direction. As the angle of coal seam increases, the asymmetric characteristics of the stress transfer and evolution of surrounding rocks increase significantly. The distance between the stress deflection boundary and the central axis of the working face gradually increases, and the height of the intersection of the two shows an evolution trend of increasing-decreasing-increasing. Affected by this, the concentration coefficient of abutment pressure of strike and the upper along inclined direction show an evolution trend of increasing-decreasing-increasing. The asymmetrical spatial-time evolution of the roof stress causes significant differences in the mechanical properties and behavior of the roof in different areas of the stope space. This difference leads to significant differences in the loading and instability characteristics of the supports in different areas, and this phenomenon will become more obvious with the increase of angle.

Key words: steeply dipping coal seam; mining stress; transmission path; angle effect; deflection boundary

大倾角煤层是指埋藏倾角为 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的煤层, 广泛赋存于我国各大矿区, 其储量为 1 800 亿 ~ 3 600 亿 t, 产量为 1.5 亿 ~ 3.0 亿 t, 分别占全国煤炭储量和产量的 10% ~ 20% 和 5% ~ 8%, 且 50% 以上的大倾角煤层为优质的焦煤和无烟煤^[1]。大倾角煤层走向长壁工作面安全高效开采的关键是对“支架-围岩”系统的稳定性控制^[2], 而顶板作为工作面该系统的构成元素和施载体, 是保证系统稳定的基础。

大倾角煤层成煤环境复杂, 安全高效开采难度极大。近年来, 众多矿业高等院校、科研院所和煤炭企业的专家、学者和工程技术人员从不同角度对大倾角中厚煤层长壁综采、厚煤层长壁综放开采、煤层群联合开采等不同开采方式下的矿压显现规律^[3-4]、围岩应力的分布特征与空间展布形态^[5-6]、顶底板岩层的变形破坏运动规律与岩体结构形态^[7-8]、煤层开采后引起的地表沉陷^[9]、顶底板岩层交互影响下“支架-围岩”系统的耦合作用机理与稳定性控制^[10-11]、支架与设备下滑倾倒机理及可能引发的围岩灾害^[12-13]等方面展开了研究与探索, 推动了大倾角煤层开采理论与技术的不断进步, 并成功实现了该类煤层在特定条件下由非机械化开采向走向长壁综采(综放)技术的

变革, 较大地改善了大倾角煤层开采安全性差的情况。但顶板稳定性控制难度大、支架与设备易下滑倾倒、底板破坏滑移等安全问题仍是制约该项技术广泛应用与推广的难题。

煤层倾角是导致大倾角煤层开采围岩采动力学行为复杂的根源。一些学者在试件尺度上对不同倾角条件下煤岩组合体的应力-应变关系、强度准则等问题展开了研究, 揭示了煤层倾角对煤岩组合体力学行为的影响^[14-17]。但在大倾角煤层开采中, 受煤层倾角影响, 围岩应力的传递演化特征远较一般倾角煤层开采复杂时, 采场空间不同区域围岩所处的应力环境与受载历程存在显著差异, 导致采场空间不同区域围岩的损伤变形与破坏运动等亦存在显著差异, 造成在大倾角煤层开采中对围岩的稳定性控制异常复杂, 而目前鲜见针对大倾角煤层长壁开采围岩应力传递路径时空演化特征及其倾角效应等宏观力学行为方面的量化研究。

据此, 笔者在已有研究工作基础上, 以新疆某矿 25221 工作面为工程背景, 采用现场实测、数值计算和理论分析相结合的研究方法, 在综合厘定与分析工作面矿压显现一般规律及其成因的基础之上, 对大倾

角煤层长壁开采顶板应力传递路径的非对称时空演化特征及其倾角效应展开系统性研究,研究结果对大倾角煤层长壁开采围岩失稳致灾机理与防控技术等领域的研究具有一定的理论参考价值。

1 工程背景

新疆某矿 25221 工作面位于二采区 5 号煤层,工作面开采标高为 +2 047 ~ +2 120 m,走向长度 2 098 m,倾向长度 100 m。煤层倾角 $36^{\circ} \sim 46^{\circ}$,平均 45° ,煤密度 1.35 t/m^3 。煤层厚度 $3.58 \sim 9.77 \text{ m}$,采高 4.5 m ,煤坚固性系数 $0.3 \sim 0.5$,煤层综合柱状图如图 1 所示。25221 工作面采用综合机械化大采高开采工艺,采用下行割煤→上行清浮煤→移架→推移输送机的工艺流程。根据工作面特殊的地质条件,工作面支架额定工作阻力最终确定为 6 500 kN,选用了 60 个 ZZ6500/22/48 四柱液压支撑掩护式支架和 3 个 ZZG6500/22/48 过渡支架。

分组	柱状	厚度/m	名称	描述
八道湾组		16.59	基本顶	中砂岩,灰白色,以石英为主,抗风化能力强,层面发育
				
				
	•••••	2.32	直接顶	灰白色含砾粗砂岩
		3.58~9.77 4.5	煤层	含3层夹矸,厚度0.4~0.5 m,底部含0.6 m煤泥
	-----	17.06	直接底	灰黑色,以石英为主,矿质胶结

	-----	9	基本底	节理发育,风化易碎

图1 煤层综合柱状

Fig.1 Geological column of coal seam

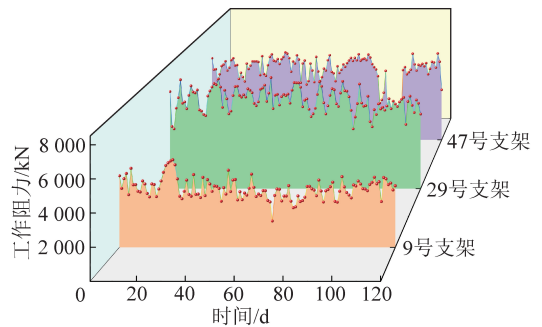
2 支架工作阻力分区特征

为掌握工作面回采过程中矿压显现一般规律,为后续工作面安全、高效生产奠定基础,在工作面倾向上、中、下部选取 47 号、29 号和 9 号支架,采用 KJ377 型矿压动态检测仪,对支架工作阻力开展了为期近 4 个月现场监测^[18],如图 2 所示。现场监测结果显示:

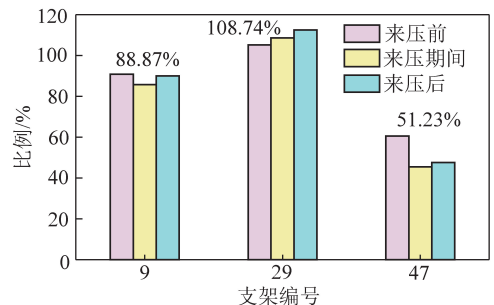
(1)工作面倾向下部区域 9 号支架的平均工作阻力为 3 505 kN,来压期间的最大工作阻力为 5 400 kN,标准差为 767.12 kN。工作面倾向中部区域 29 号支架的平均工作阻力为 6 422 kN,来压期间的最大工作阻力为 9 390 kN,标准差为 1 358.17 kN。工作面倾向上部区域 47 号支架的平均工作阻力为

4 985 kN,来压期间的最大工作阻力为 6 481 kN,标准差为 1 088.07 kN。

(2)工作面倾向下部区域支架的后柱载荷略小于前柱,后柱与前柱的载荷比在来压前、中、后期分别为 90.9%,85.71%,90.00%,平均为 88.87%。工作面倾向中部区域支架的后柱载荷略大于前柱,后柱与前柱的载荷比在来压前、中、后期分别为 105.15%,108.57%,112.50%,平均为 108.74%。工作面倾向上部区域支架的后柱载荷远小于前柱,后柱与前柱的载荷比在来压前、中、后期分别为 60.61%,45.45%,47.62%,平均为 51.23%。



(a) 支架工作阻力



(b) 支架前、后柱载荷比

图2 支架工作阻力现场实测

Fig.2 Field monitoring results of support resistance

可以看出,在大倾角煤层开采中,受煤层倾角影响,支架的受载特征复杂,区域性特征明显。尤其是在工作面倾向中上部区域,支架非均衡受载特征显著,偏载现象频发,稳定性控制难度大。究其原因,除了受采空区矸石非均匀充填、底板滑移、支承压力非对称分布等因素影响外,煤层倾角影响下工作面顶板的非规则破坏运动是造成该现象的关键因素。

顶板作为工作面“支架-围岩”系统的构成元素和施载体,是保证系统稳定的基础。工作面顶板在其自重和上覆岩层载荷作用下的运动是必然和主动的,而支架和底板的受载与行为响应则是被动的,当顶板的运动状态发生改变,顶板与支架以及支架与底板间的相互作用关系亦随之改变^[19]。受煤层倾角影响,采场空间不同区域顶板所处的应力环境与受载历程存在显著差异,这种差异性导致采场空间不同区域顶

板的变形破坏运动特征与顶板岩体结构的力学性状与行为等亦存在显著差异,如图 3 所示(其中, α 为煤层倾角),致使倾向不同区域支架受载与失稳的区域特征明显,且这一现象会随着煤层倾角的增大而愈发明显。因此,明确顶板采动应力传递路径的时空演化特征及其倾角效应,可为揭示该类煤层开采顶板的非对称变形破坏演化和工作面“支架-围岩”系统的稳定性机理等奠定基础。

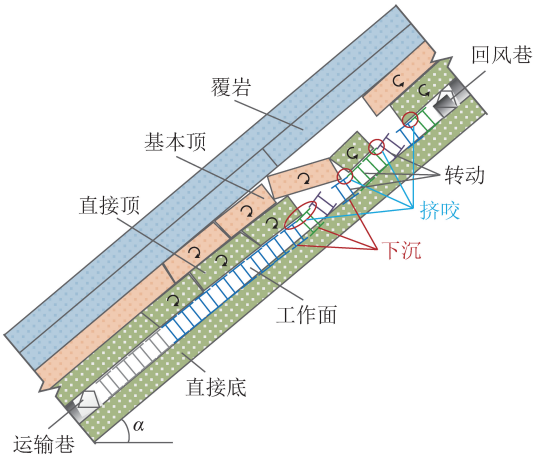


图 3 顶板与支架相互作用关系

Fig.3 Interaction between roof and support in longwall mining of steeply dipping seam

3 采动应力传递路径及其倾角效应

3.1 数值计算模型

鉴于数值计算具有可重复性,以下通过 FLAC 3D 有限差分数值计算软件,构建不同煤层倾角的计算模型,如图 4 所示。并利用 Fish 语言对数值计算模型进行二次开发,在模型中布置测点、测线和测面,提取不同煤层倾角和推进距离条件下的计算结果,并结合弹塑性理论对计算结果进行后处理,分析顶板采动应力传递路径的时空演化特征及其倾角效应。

模型采用四边形网格,宽 270 m(x 方向)、长 1 000 m(y 方向)、高 325 m(z 方向),工作面长度 100 m,采高 4.5 m,推进步距 5 m/步,推进距离 500 m。模型以实际工程地质为依据,物理力学参数见表 1。在模型底部施加垂直位移约束,在模型前、后、左、右面施加水平位移约束。模型顶部施加 2 MPa 垂直载荷,模拟地层深度 80 m。采用 Mohr - Coulomb 本构模型、大应变变形模式。对于不同煤层倾角的数值计算模型,以模型几何中心为基准点改变煤层倾角。除此之外,模型的采高、工作面长度、岩层厚度、岩层物理力学性质、边界条件等均保持不变,模型信息见表 2。

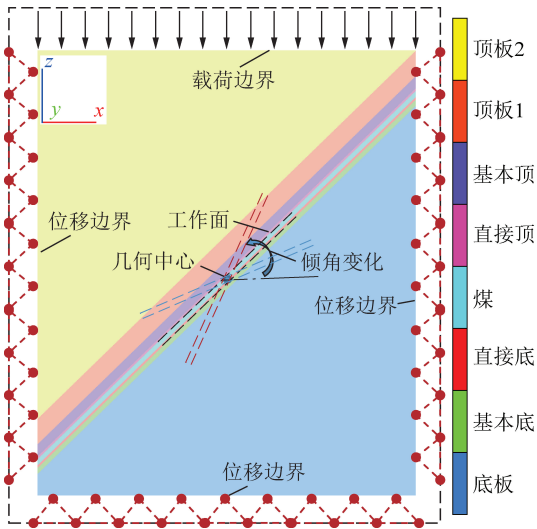


图 4 数值模型示意

Fig.4 Schematic of numerical model

表 1 煤岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal and rock

岩石名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量/MPa	剪切模 量/MPa	抗拉强 度/MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
底板	2 420	4 167	2 869	1.8	3.5	37.0
直接底	2 550	3 435	3 876	1.9	3.9	37.5
煤层	1 350	2 381	1 163	0.6	1.3	32.9
直接顶	2 530	3 372	3 816	1.7	4.5	20.4
基本顶	2 640	9 302	9 137	2.1	4.2	28.0
覆岩	2 530	3 372	3 816	1.7	4.5	20.4

表 2 模型信息

Table 2 Model information

煤层倾角/($^{\circ}$)	宽×长×高/ ($\text{m} \times \text{m} \times \text{m}$)	节点数	单元数
35	270×1 000×325	2 890 300	2 700 000
40	270×1 000×325	2 890 800	2 700 400
45	270×1 000×325	3 050 481	2 947 500
50	270×1 000×325	2 702 192	2 545 000
55	270×1 000×325	2 731 893	2 618 000

3.2 支承压力演化特征

支承压力指煤层采出后,在围岩应力重新分布范围内,垂直作用在煤层、岩层和矸石上的压力^[20],是围岩应力传递演化结果的量化表征。据此,以工作面前方支承压力峰值为特征量,分析不同煤层倾角条件下顶板应力随工作面推进的动态演化规律。在近水平煤层开采中,支承压力为 z 方向的应力 σ_z 。但在大倾角煤层开采中, z 方向的应力 σ_z 与煤层间的夹角为 $\pi/2-\alpha$ 。因此,在表征大倾角煤层开采中的支承压力时,需结合弹性理论对计算结果进行后处理。

由弹性理论^[21]可得,垂直作用于煤层平面上的正应力 σ_n 、沿煤层倾向的切应力 τ_{nx} 和沿煤层走向的切应力 τ_{ny} 依次为

$$\begin{cases} \sigma_n = p_x \sin \alpha + p_z \cos \alpha \\ \tau_{nx} = p_x \cos \alpha - p_z \sin \alpha \\ \tau_{ny} = p_y \end{cases} \quad (1)$$

式中, p_x, p_y, p_z 为单元体斜截面上全应力 p 在坐标轴方向的分量, N/m^2 , 可依次表示为

$$\begin{cases} p_x = l\sigma_x + m\tau_{xy} + n\tau_{xz} \\ p_y = m\sigma_y + l\tau_{xy} + n\tau_{yz} \\ p_z = n\sigma_z + l\tau_{xz} + m\tau_{yz} \end{cases} \quad (2)$$

式中, l, m, n 分别为斜面的外法线方向与 x, y, z 轴正方向夹角的余弦值; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ 为单元体的 6 个应力分量, N/m^2 。

在模型倾向中部沿走向布置测线 ($x = 134.5$ m, $y = 0 \sim 1\ 000$ m, $z = 159$ m), 提取不同煤层倾角和推进距离条件下的计算结果, 由式 (1) 对数值计算结果进行后处理, 可得不同煤层倾角条件下工作面前方支承压力峰值随工作面推进的演化规律如图 5 所示, 图 5 中, y 为工作面推进距离, l_0 为工作面倾向长度。

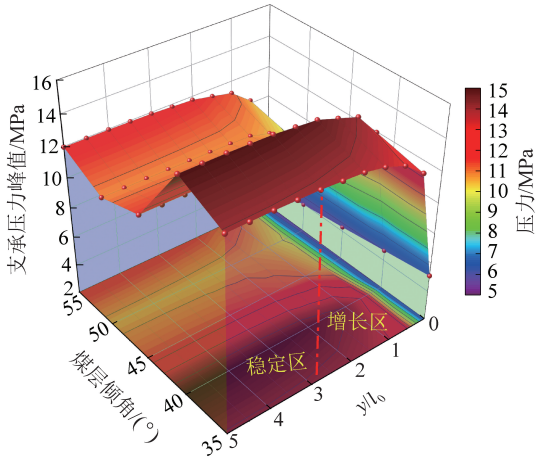


图5 不同煤层倾角条件下支承压力峰值演化特征

Fig.5 Evolution characteristics of peak abutment pressure in different coal seam dip angle

由图 5 可以看出, 在不同煤层倾角条件下, 工作面前方支承压力峰值随着工作面推进的演化规律基本一致, 均呈现为先增大后保持稳定的演化趋势。当推进距离介于 $0 \sim 300$ m ($y/l_0 < 3$) 时, 工作面前方支承压力峰值随着工作面推进距离的增大而增大, 但其增长幅度在逐渐减小。而当工作面推进距离大于 300 m ($y/l_0 > 3$) 后, 工作面前方支承压力峰值基本保持不变。以煤层倾角 45° 为例, 当工作面推进距离达到 300 m 时, 支承压力峰值增至 11.5 MPa, 集中系数为 2.66 , 此后保持不变。

可以看出, 在不同煤层倾角条件下, 围岩应力随工作面推进的动态演化过程基本一致, 先后经历了增长期和稳定期, 其对应支承压力峰值的演化呈现为先增大后趋于稳定的特征。围岩应力随工作面推进的动态演化规律主要受采空区的几何形状控制。当 y/l_0

$l_0 < 3$ 时, 随着工作面推进距离的增大, 顶板暴露面积逐步增大, 覆岩空间结构的几何尺度逐渐增大, 造成采空区上覆岩层向采空区四周煤体上传递的载荷随之增大, 导致采动影响范围、支承压力等均随着工作面推进距离的增大而增大。而 $y/l_0 > 3$ 时, 覆岩空间结构成了“走向巷道”的情形^[20, 22-23], 围岩采动应力的传递演化特征趋于稳定, 其对应工作面前方支承压力峰值和超前采动影响范围等均保持不变。

3.3 采动应力倾向传递路径及其倾角效应

同时, 由图 5 可以看出, 在任意回采阶段, 不同煤层倾角条件下的支承压力峰值亦存在明显差异, 其反映了煤层倾角对围岩应力传递路径的影响。以下基于不同煤层倾角条件下的数值计算结果, 结合弹塑性理论, 以主应力为特征量, 在围岩应力演化的稳定区分析顶板采动应力的传递演化特征及其倾角效应。

由弹性理论^[21, 24]可知, 煤岩体内任意一点的应力状态特征方程为

$$\sigma_i^3 - f_1\sigma_i^2 + f_2\sigma_i - f_3 = 0 \quad (3)$$

式中, σ_i 为主应力, N/m^2 , $i = 1, 2, 3$; f_1, f_2 和 f_3 为应力函数, 可表示为

$$f_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$f_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2$$

$$f_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2 + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{xz} \quad (4)$$

联立式 (3), (4) 可求解出 σ_i 的 3 个实根, 其对应煤岩体的 3 个主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 即

$$\sigma_i = \frac{f_1}{3} + \sqrt{\frac{-4}{3}\left(f_2 - \frac{1}{3}f_1^2\right)} \cos\left(\frac{\varphi + 2k\pi}{3}\right), k = 1, 2, 3 \quad (5)$$

$$\varphi = \arccos\left\{\frac{f_3 + 2\left(\frac{f_1}{3}\right)^2 - \frac{f_1f_2}{3}}{2\sqrt{-\left[\left(f_2 - \frac{1}{3}f_1^2\right)/3\right]^3}}\right\} \quad (6)$$

对应主应力 σ_i 的方向余弦 l_i, m_i, n_i 可表示为

$$l_i = \frac{\tau_{xz}(\sigma_y - \sigma_i) - \tau_{xy}\tau_{yz}}{\tau_{xy}^2 - \sigma_{ni}}n_i$$

$$m_i = \frac{(\sigma_x - \sigma_i)\tau_{yz} - \tau_{xz}\tau_{xy}}{\tau_{xy}^2 - \sigma_{ni}}n_i$$

$$n_i = \left\{(\tau_{xy}^2 - \sigma_{ni})^2 / \{[\tau_{xz}(\sigma_y - \sigma_i) - \tau_{xy}\tau_{yz}]^2 + [\tau_{yz}(\sigma_x - \sigma_i) - \tau_{xz}\tau_{xy}]^2 + (\tau_{xy}^2 - \sigma_{ni})^2\}\right\}^{1/2} \quad (7)$$

式中, σ_{ni} 为应力函数, 可表示为

$$\sigma_{ni} = (\sigma_x - \sigma_i)(\sigma_y - \sigma_i) \quad (8)$$

当工作面推进距离为 400 m 时,在采空区走向中部沿工作面倾向布置测面,提取不同煤层倾角条件下的计算结果,由式(5),(7)对数值计算结果进行后处

理,可得不同煤层倾角条件下采空区中部倾向剖面内顶板采动应力的传递演化特征如图 6 所示。由图 6 可以看出:

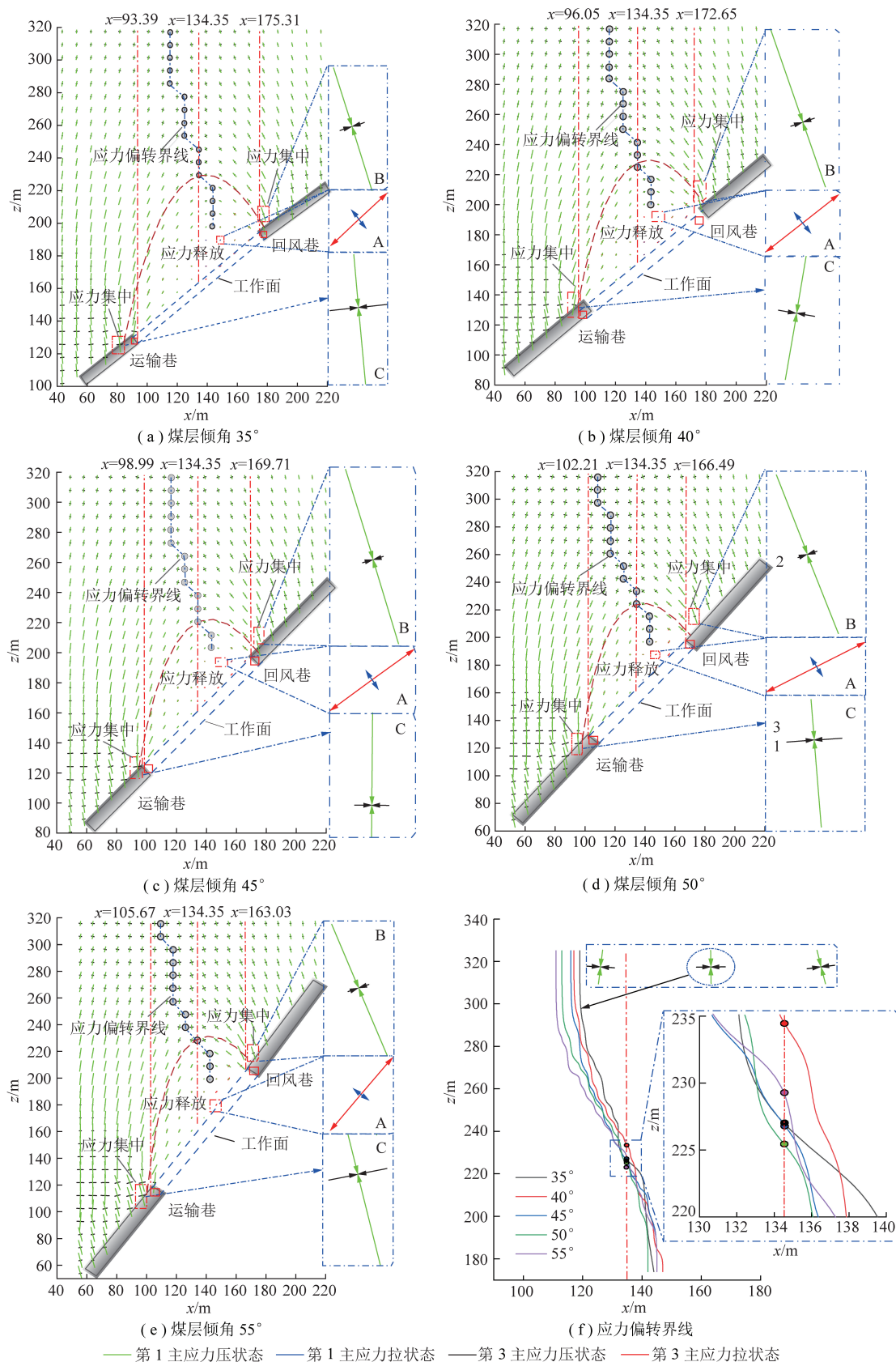


图 6 不同煤层倾角条件下倾向剖面顶板应力传递演化特征

Fig.6 Evolution characteristics of stress state in inclined section of different coal seam dip angle

(1) 受煤层倾角影响,顶板应力的传递路径存在较明显的非对称偏转特征,如图 6(a)~(e)所示。应力偏转界线(指主应力方向未发生偏转的临界位置曲线)左侧的上覆岩层载荷向工作面倾向下侧煤体传递,右侧的上覆岩层载荷向工作面倾向上侧煤体传递。沿顶板自上而下,应力偏转位置由工作面倾向中轴线($x=134.5$ m)左侧逐渐向其右侧迁移。以煤层倾角 45° 为例,在顶板高位岩层中($z=325$ m),应力偏转位置在中轴线左侧,与中轴线的距离为 15 m;在顶板低位岩层中($z=200$ m),应力偏转位置在中轴线右侧,与中轴线的距离为 8 m,如图 6(c)所示。

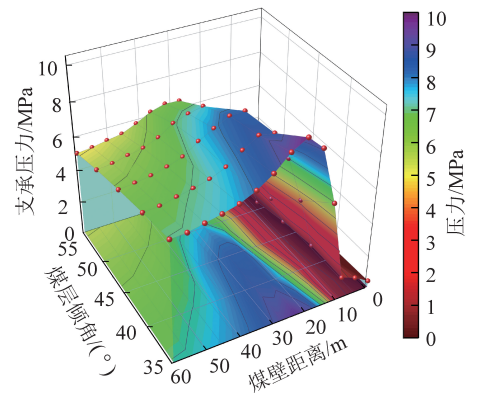
(2) 随着煤层倾角的增大,围岩应力传递的非对称特性增强,应力偏转界线向工作面倾向中轴线左侧的偏移量逐渐增大;当煤层倾角为 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$ 时,模型顶部岩层的应力偏转位置在工作面倾向中轴线左侧,且 2 者间的距离依次为 11, 14, 15, 17, 19 m。应力偏转界线与工作面倾向中轴线交点的高度(z 方向坐标)呈现为增—减—增的演化趋势;当煤层倾角为 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$ 时,交点位置处 z 方向的坐标值分别为 227, 234, 227, 225, 229 m, 如图 6(f)所示。

(3) 受煤层倾角影响,顶板岩层的倾向剖面内形成了较明显的非对称拱形应力传递包络特征。应力拱的拱脚在工作面倾向上、下侧煤体中,拱顶位置可近似通过应力偏转界线与工作面倾向中轴线的交点位置确定。在应力拱外部,顶板应力的传递呈现为上覆岩层载荷向工作面倾向上、下侧煤体上的传递,主应力值明显增大,方向向应力偏转界线两侧旋转。在应力拱内部,形成较明显的应力释放区,主应力值明显减小,方向亦发生明显变化。尤其是在工作面倾向中上部区域的低位顶板岩层中,顶板的受力状态由双向受压演变为单向受拉,部分区域甚至演变为双向受拉,如图 6(a)~(e)中区域 A 所示。

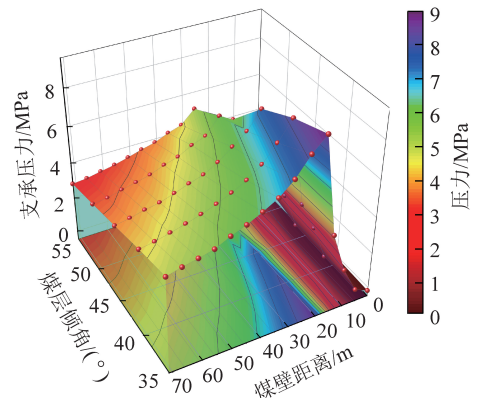
(4) 随着煤层倾角的增大,顶板倾向应力拱的非对称特性愈发明显。顶板非对称拱形应力释放区范围明显减小,拱顶位置向工作面倾向上侧迁移,拱高呈现先增大后减小的演化趋势。当煤层倾角分别为 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$ 时,拱顶在垂直煤层方向的投影位置与工作面倾向上侧煤体的距离分别为 12.7, 3.7, 4.0, 1.7 和 -4.8 m(负值表示拱顶投影位置位于工作面倾向上侧煤体上),拱高分别为 53.2, 55.1, 45.9, 40.5 和 38.4 m,如图 6(a)~(e)所示。

顶板采动应力沿工作面倾向的非对称传递演化特性,决定了倾向上、下侧煤体的受载特征。在采空区走向中部沿工作面倾向布置测线,可得不同煤层倾

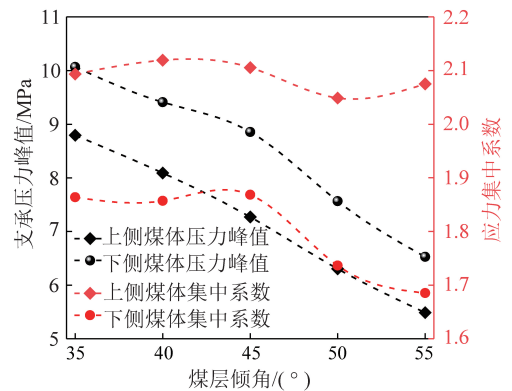
角条件下采空区中部工作面倾向上、下侧支承压力演化特征如图 7 所示。由图 7 可以看出:



(a) 倾向下侧煤体支承压力



(b) 倾向上侧煤体支承压力



(c) 支承压力峰值与应力集中系数

图7 不同煤层倾角条件下工作面倾向上、下侧支承压力演化特征

Fig.7 Evolution characteristics of abutment pressure along inclined in different coal seam dip angle

(1) 受煤层倾角影响,工作面倾向下侧煤体的埋深大于上侧,导致倾向下侧煤体的支承压力亦大于上侧。且随着煤层倾角的增大,围岩自重的倾向分量增大、垂向分量减小,造成工作面倾向上、下侧支承压力均随着煤层倾角的增大而减小。当煤层倾角分别为 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$ 时,倾向上侧支承压力峰值分别为 8.79, 8.09, 7.27, 6.31, 5.49 MPa, 倾向下侧支承压力峰值分别为 10.07, 9.44, 8.85, 7.57, 6.53 MPa。

(2) 受顶板采动应力沿工作面倾向的非对称传递演化特征影响(应力拱外侧的应力偏转界线位于工作面倾向中轴线左侧),倾向上侧支承压力集中系数大于下侧;且随着煤层倾角的增大,倾向上侧支承压力集中系数呈现出增—减—增的演化趋势(与应力拱拱顶 z 方向坐标分量的演化规律一致),而倾向下侧支承压力集中系数则呈现出减—增—减的演化趋势。当煤层倾角分别为 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$ 时,倾向上侧支承压力集中系数分别为2.09, 2.12, 2.11, 2.05, 2.07, 而倾向下侧支承压力集中系数分别为1.860, 1.856, 1.870, 1.740, 1.680。

(3) 受工作面倾向下侧支承压力大于倾向上侧的影响,倾向下侧支承压力峰值位置和采动影响范围均大于上侧;且随着煤层倾角的增大,倾向上、下侧采动

影响范围呈现出增—减—增与减—增—减的演化趋势(与倾向上、下侧支承压力集中系数的演化规律相反)。当煤层倾角分别为 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$ 时,倾向上侧支承压力峰值位置距离煤壁分别为0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1.9 m,采动影响范围分别为42, 44, 37, 44, 44 m;倾向下侧支承压力峰值位置距离煤壁分别为12, 14, 15, 17, 17 m,采动影响范围分别为51, 50, 54, 53, 53 m。

3.4 采动应力走向传递路径及其倾角效应

同理,当工作面推进距离为400 m时,在工作面倾向中部沿走向布置测面,可得不同煤层倾角条件下工作面倾向中部走向剖面内顶板采动应力的传递演化特征,如图8所示。由于走向剖面内顶板应力沿采空区中部对称,因此在图8只显示了由采空区中部至工作面前方50 m范围内的计算结果。由图8可以看出:

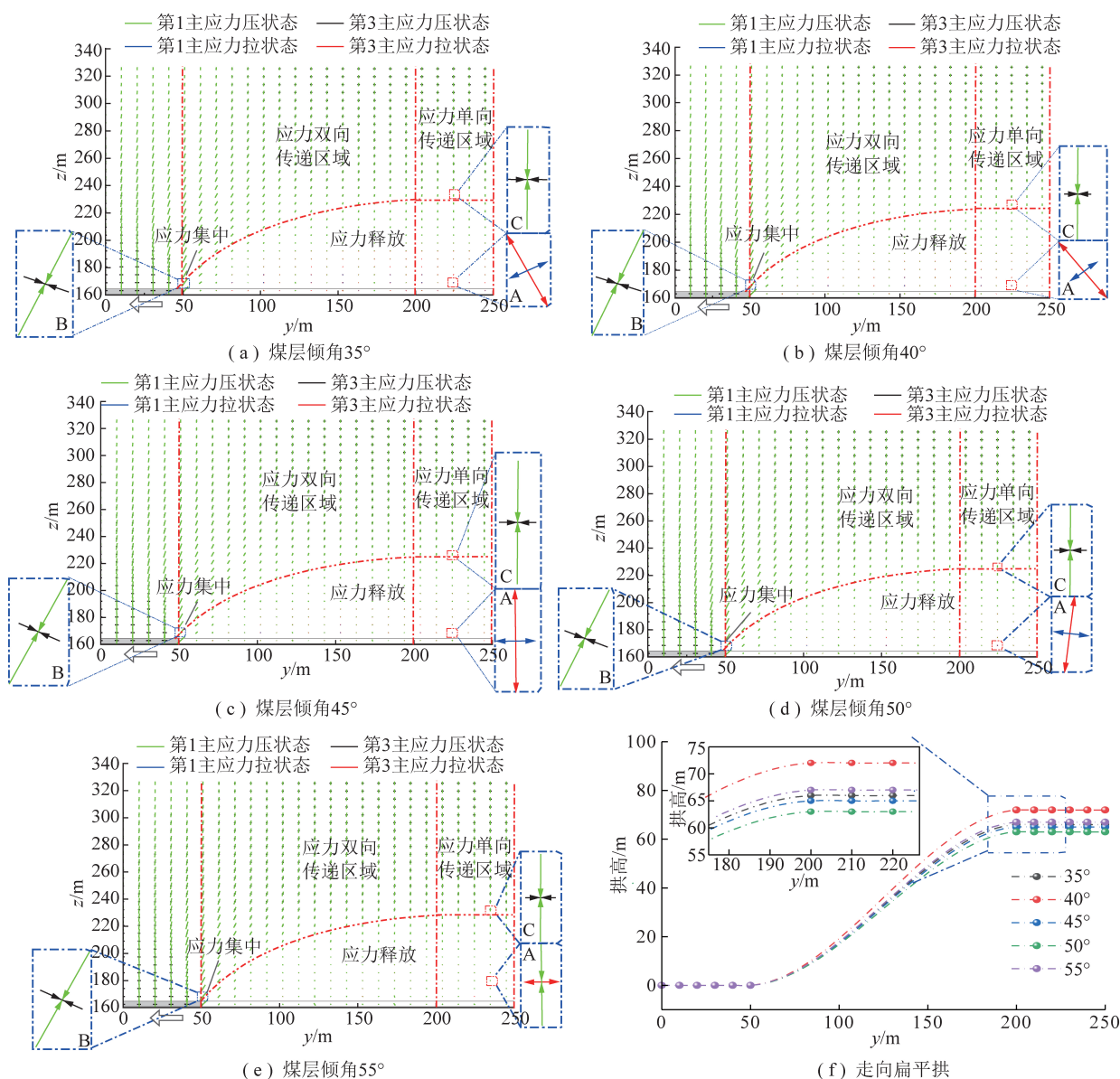


图8 不同煤层倾角条件下走向剖面顶板应力传递演化特征

Fig.8 Evolution characteristics of stress state in strike section of different coal seam dip angle

(1)不同煤层倾角条件下,顶板采动应力沿走向的传递演化特征基本一致,顶板岩层内形成了较明显的扁平拱(当工作面推进距离与工作面长度之比小于3时为对称拱)形应力传递包络特征。扁平拱的前、后拱脚分别位于采空区走向两侧煤体上,拱高可由图6中的倾向拱确定(即,随着煤层倾角的增大,走向拱的拱高亦呈现出先增大后减小的演化趋势,拱顶 z 方向的坐标亦呈现为增—减—增的演化趋势)。应力拱内部形成应力释放区,主应力值显著减小,方向发生明显变化,如图8(a)~(e)中区域A所示。

(2)在距离工作面 $1.5l_0$ (图8中 x 坐标介于50~200 m)范围的顶板应力双向传递区内,上覆岩层载荷沿走向的传递路径呈现出半拱形包络特征。该区域应力拱外侧的上覆岩层载荷除了向工作面前方煤体传递外,亦向工作面倾向上、下侧煤体传递,且离工作面越近,其对应上覆岩层载荷向工作面前方煤体传递的越多,而向倾向两侧煤体传递的越少。即,离工作面越近,第1主应力的大小增幅和方向偏转角度越大,如图8(a)~(e)中区域B所示。

(3)在距离工作面 $1.5l_0$ 以外(图8中 x 坐标介于200~250 m的区域)深部采空区的顶板应力单向传递区内,应力拱外侧的上覆岩层主应力方向未发生偏转,如图8(a)~(e)中区域C所示,未出现沿走向的应力传递现象。结合图5中工作面前方支承压力峰值随工作面推进的演化特征,以及图6,7关于顶板采动应力的倾向传递演化特征可知,该区域倾向拱的拱高保持不变,且应力拱外侧的上覆岩层载荷主要向工作面倾向上、下侧煤体传递。

顶板采动应力沿工作面走向的传递演化规律,决定了采空区走向两侧煤体的受载特征。在工作面倾向中部沿走向布置测线,可得不同煤层倾角条件下工作面前方支承压力演化特征如图9所示。由图9可以看出:

(1)在原岩应力状态下,随着煤层倾角的增大,围岩自重的垂向分量减小,支承压力亦逐渐减小。但在工作面回采过程中,受顶板应力传递的非对称演化特征影响,随着煤层倾角的增大,支承压力峰值和集中系数均呈现为增—减—增的演化趋势(与拱顶 z 方向坐标的演化规律一致),而支承压力峰值位置和超前采动影响范围的变化不明显。

(2)当煤层倾角分别为 $35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$ 时,工作面前方支承压力峰值分别为 14.5, 15.7, 11.5, 10.6, 11.9 MPa, 支承压力集中系数分别为 2.84, 3.34, 2.66, 2.69, 3.44, 峰值位置位于煤壁前方 2.5, 2, 3, 3, 3 m, 采动影响范围 41, 42, 43, 44, 42 m。

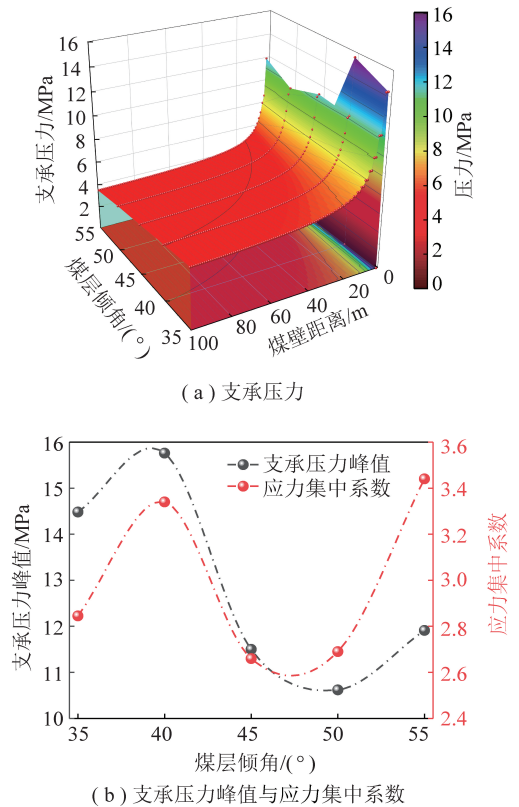


图9 不同煤层倾角条件下工作面走向支承压力演化特征

Fig.9 Evolution characteristics of abutment pressure along strike in different coal seam dip angle

综合上述分析可以看出,在大倾角煤层开采中,围岩应力的传递演化特征远较一般倾角煤层开采时复杂。受煤层倾角影响,围岩应力的三维传递演化特征沿走向对称、沿倾向非对称,其随工作面推进的演化特征与覆岩空间结构的演化规律一致^[20]。当工作面推进距离与工作面长度之比 $y/l_0 < 3$ 时,围岩应力处于增长阶段,采空区周围煤体上的支承压力随着工作面推进距离的增大而增大,但其增长幅度逐渐减小;而当 $y/l_0 > 3$ 时,围岩应力演化趋于稳定,支承压力保持不变。在工作面倾向剖面内,围岩应力的传递路径呈非对称拱形形态,采空区上覆岩层载荷以应力偏转界线为界分别向倾向上、下侧煤体中传递。在工作面走向剖面内,围岩应力的传递路径呈扁平拱(当 $y/l_0 < 3$ 时为对称拱)形态,扁平拱两侧半拱形区域上覆岩层载荷分别向工作面走向两侧煤体以及倾向上、下侧煤体传递,而扁平拱中间直线段区域上覆岩层载荷则向倾向上、下侧煤体传递。同时,需要说明的是,本文仅是对一般条件下大倾角煤层单一工作面开采时的顶板应力传递演化特征及其倾角效应进行了研究,未考虑诸如开采方式、工作面布置、关键层、断层、褶曲等因素对围岩采动应力演化的影响,这需要在后续研究中结合具体工程背景分析。

4 结 论

(1) 围岩采动应力的非对称时空演化特征造成工作面不同区域顶板所处的应力环境与受载历程等存在差异,这种差异性使得顶板的破坏运动与结构研究等存在较明显的区域特征,导致工作面倾向不同区域支架的受载与失稳特征存在显著差异,且这一现象会随着煤层倾角的增大而愈发严重。

(2) 围岩应力的传递演化特征与覆岩空间结构的演化规律一致。当工作面推进距离与工作面长度之比 $y/l_0 < 3$ 时,围岩应力处于增长期,采动影响范围、支承压力等均随着工作面推进距离的增大而增大;而当 $y/l_0 > 3$ 时,围岩应力演化处于稳定期,支承压力等均保持不变。

(3) 在工作面倾向方向,围岩应力的传递路径呈非对称拱形形态,沿顶板自上而下,应力偏转位置由工作面倾向中轴线左侧逐渐向其右侧迁移。上覆岩层载荷以应力偏转界线为界分别向倾向上、下侧煤体传递,导致工作面倾向上侧支承压力集中系数大于下侧。

(4) 在工作面走向方向,顶板应力的传递路径呈扁平拱形形态,扁平拱直线段区域上覆岩层载荷向工作面倾向上、下侧煤体传递,而扁平拱两侧半拱形区域上覆岩层载荷除了向工作面走向两侧煤体传递外,亦向工作面倾向上、下侧煤体传递。

(5) 随着煤层倾角的增大,顶板应力传递演化的非对称特性愈发明显,应力偏转界线与工作面倾向中轴线间的距离逐步增大。受此影响,工作面走向和倾向上侧支承压力峰值系数随煤层倾角增大呈现出增—减—增的演化趋势,而倾向下侧支承压力峰值系数则呈现为减—增—减的演化趋势。

参考文献 (References):

- [1] 伍永平, 负东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 伍永平, 负东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采: 进展—实践—科学问题 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 24–34.
WU Yongping, YUN Dongfeng, XIE Panshi, et al. Progress, practice and scientific issues in steeply dipping coal seams fully mechanized mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 24–34.
- [3] 黄建功, 平寿康. 大倾角煤层采面顶板岩层运动研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19(2): 19–21, 110.
HUANG Jiangong, PING Shoukang. Research on roof rock movement in steeply dipping seam mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2002, 19(2): 19–21, 110.
- [4] 赵元放, 张向阳, 涂敏. 大倾角煤层开采顶板垮落特征及矿压显

- 现规律 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 4(2): 231–234.
ZHAO Yuanfang, ZHANG Xiangyang, TU Min. Roof caving characteristic and strata behavior in exploiting steep coal seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 4(2): 231–234.
- [5] 戴华阳, 易四海, 鞠文君, 等. 急倾斜煤层水平分层综放开采岩层移动规律 [J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(5): 409–412, 467.
DAI Huayang, YI Sihai, JU Wenjun, et al. Rock movement law of horizontal stratification in fully mechanized caving mining of steeply inclined coal seam [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 18(5): 409–412, 467.
- [6] 伍永平, 王红伟, 解盘石. 大倾角煤层长壁开采围岩宏观应力拱壳分析 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 559–564.
WU Yongping, WANG Hongwei, XIE Panshi. Analysis of surrounding rock macro stress arch-shell of longwall face in steeply dipping seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 559–564.
- [7] 罗生虎, 田程阳, 伍永平, 等. 大倾角煤层长壁开采顶板受载与变形破坏倾角效应 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(6): 1041–1050.
LUO Shenghu, TIAN Chengyang, WU Yongping, et al. Obliquity effect of asymmetric deformation and failure of roof in longwall mining of steeply inclined seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(6): 1041–1050.
- [8] 王红伟, 伍永平, 解盘石, 等. 大倾角煤层开采“关键域”岩体结构稳定性分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 287–294.
WANG Hongwei, WU Yongping, XIE Panshi, et al. Analysis of rock structure stability in mining at the critical zone of the steeply dipping seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2): 287–294.
- [9] 尹光志, 鲜学福, 代高飞, 等. 大倾角煤层开采岩移基本规律的研究 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 450–453.
YIN Guangzhi, XIAN Xuefu, DAI Gaofer, et al. Basic behaviour of strata movement in seam with deep dip angle [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 450–453.
- [10] 王家臣, 魏炜杰, 张锦旺, 等. 急倾斜厚煤层走向长壁综放开采支架稳定性分析 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2783–2791.
WANG Jiachen, WEI Weijie, ZHANG Jinwang, et al. Stability analysis of support around the longwall top-coal caving mining in steeply thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2783–2791.
- [11] 何富连, 杨伯达, 田春阳, 等. 大倾角综放工作面支架稳定性及其控制技术研究 [J]. 中国矿业, 2012, 21(6): 97–100.
HE Fulian, YANG Boda, TIAN Chunyang, et al. Stability and control technology of powered support in deep inclined fully mechanized top-coal caving face [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(6): 97–100.
- [12] 袁永, 屠世浩, 窦凤金, 等. 大倾角综放面支架失稳机理及控制 [J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 430–434.
YUAN Yong, TU Shihao, DOU Fengjin, et al. Support instability mechanism of fully mechanized top coal caving face with

- steep coal seams and its control [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 430-434.
- [13] 解盘石, 伍永平, 王红伟, 等. 大倾角煤层大采高综采围岩运移与支架相互作用规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 14-19.
- XIE Panshi, WU Yongping, WANG Hongwei, et al. Interaction characteristics between strata movement and support system around large mining height fully-mechanized face in steeply inclined seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 14-19.
- [14] 刘明星, 廖孟柯, 刘恩龙, 等. 不同结构面倾角节理岩体三轴试验力学特性[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(3): 336-343.
- LIU Mingxing, LIAO Mengke, LIU Enlong, et al. Experimental research on mechanical properties of jointed rock mass with different angles of inclination [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(3): 336-343.
- [15] 张伟, 周国庆, 张海波, 等. 倾角对裂隙岩体力学特性影响试验模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 30-33.
- ZHANG Wei, ZHOU Guoqing, ZHANG Haibo, et al. Experimental research on the influence of obliquity on the mechanical characteristics of a fractured rock mass [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(1): 30-33.
- [16] 李树忱, 汪雷, 李术才, 等. 不同倾角贯穿节理类岩石试件峰后变形破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3391-3395.
- LI Shuchen, WANG Lei, LI Shucui, et al. Post-peak deformation and failure experimental study of rock-like specimens with different inclination angles persistent joints [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3391-3395.
- [17] 王兵武, 李银平, 杨春和, 等. 界面倾角对复合层状物理模型材料力学特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 139-147.
- WANG Bingwu, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Influences of interface inclination on mechanical properties of composite bedded physical model material [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 139-147.
- [18] 伍永平, 李方立, 解盘石, 等. 大倾角煤层走向长壁大采高开采研究报告[R]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [19] 罗生虎, 伍永平, 解盘石, 等. 大倾角煤层走向长壁开采支架稳定性力学分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2664-2672.
- LUO Shenghu, WU Yongping, XIE Panshi, et al. Mechanical analysis of support stability in longwall mining of steeply dipping seam [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2664-2672.
- [20] 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.
- [21] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [22] 张艳丽, 伍永平, 罗生虎, 等. 覆岩宏观支撑结构演化过程与特征[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 280-288.
- ZHANG Yanli, WU Yongping, LUO Shenghu, et al. Evolution process and characteristics of overlying strata macro support structure [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 280-288.
- [23] 罗生虎, 王同, 伍永平, 等. 大倾角煤层长壁开采围岩应力传递路径时空演化特征[J/OL]. 煤炭学报: 1-11 [2022-02-15]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2021.1134>.
- LUO Shenghu, WANG Tong, WU Yongping, et al. Space-time evolution characteristics of stress transfer path of surrounding rock in longwall mining of steeply dipping seam [J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-11 [2022-02-15]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2021.1134>.
- [24] 鲜学福, 谭学术. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.