

非均厚多层砂岩复合顶板结构特征及采动效应研究

翟晓荣^{1,2},朱成鑫^{1*},王康健³,张磊³,黄德国⁴

(1.安徽理工大学 地球与环境学院,安徽 淮南 232001;

2.煤炭行业矿井水害探查与预警工程研究中心,安徽 淮南 232001;

3.淮南矿业(集团)有限责任公司张集煤矿,安徽 淮南 232001;

4.安徽省地质矿产勘查局 313地质队,安徽 六安 237000)

摘要:煤层上覆坚硬厚层顶板是造成工作面回采期间顶板管理难度增大及诱发冲击地压的重要因素。由于沉积环境及沉积相的改变,常导致矿井主采煤层顶板发育多层非均厚砂岩层,给工作面安全高效回采带来一定风险。为了准确掌握工作面顶板覆岩结构及砂岩层展布规律,揭示非均厚多层砂岩复合顶板条件下工作面回采围岩采动效应特征,以淮南矿区张集煤矿11139工作面为例,采用井下工作面顶板钻探,对工作面顶板50 m范围内砂岩层厚度、岩性变化及展布规律进行了系统探查,利用Rhino软件建立了符合实际地质条件的非均质模型,并导入FLAC3D软件开展了工作面采动效应研究。研究结果表明:工作面顶板探查范围内分布有3层砂岩,砂岩直覆于主采煤层之上,岩性由下至上为中细砂岩、细砂岩及粉砂岩,顶板沉积结构在垂向上表现为正粒序结构,其中直接顶砂岩展布形态近似“透镜”状,顶板结构为典型的非均厚多层砂体。非均厚砂岩顶板模型与均厚模型相比,非均厚模型煤壁最大支承应力较均厚模型增大35.92%,揭示出由于砂岩厚度变化而导致应力集中程度显著提升。同时,采场围岩应力分布也由均厚模型中的近似对称转变为非对称。此外,非均厚工作面回采后顶板“两带”发育最大高度及顶板下沉量较均厚模型增大。上述研究结果为类似条件下顶板采动效应研究及坚硬顶板治理提供了一定参考。

关键词:非均厚砂岩;地质模型;FLAC3D数值模拟;采动效应

中图分类号:TD12 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-055X(2026)01-0001-15

收稿日期:2025-02-21

基金项目:矿井水害综合防治煤炭行业工程研究中心开放基金课题“基于老空区压实特性的闭坑矿井矿界防隔水煤(岩)柱失稳机理研究”(2022-CIERC-05);国家自然科学基金面上项目“淮南闭坑矿区地下水水质演化机理及预测研究”(42272281)。

作者简介:翟晓荣,男,山西阳泉人,工学博士,副教授,主要从事煤矿工程地质与水文地质研究;朱成鑫,男,安徽淮北人,硕士研究生,主要从事工程地质研究;王康健,男,安徽芜湖人,高级工程师,主要从事煤矿工程地质研究;张磊,男,安徽淮南人,高级工程师,主要从事煤矿地质技术管理研究;黄德国,男,安徽寿县人,高级工程师,主要从事地质灾害防治、矿山水文地质和工程地质研究。

***通信作者:**朱成鑫

我国多个矿区煤系地层中普遍赋存巨厚砂岩,其破裂运移易导致采场大能量矿震、冲击矿压、采场压架与瓦斯突出等动力灾害的发生^[1-2]。此外,巨厚砂岩层的存在还可能产生导水裂隙带发育高度异常、地表沉陷异常及顶板离层区突水等现象,严重威胁煤矿安全生产^[3-6]。近年来,顶板灾害发生起数和人员伤亡率均居我国煤矿各类灾害首位,尤其是开采煤层上方赋存坚硬巨厚顶板时,情况更为严重^[7-8]。非均厚砂岩岩层厚度沿着工作面走向发生变化,且具有垮落步距大和长期稳定的特点,其弯曲破断引起的应力扰动更易诱导冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害,给矿井安全高效生产带来挑战,并对井下设备和人员安全形成较大威胁^[9-10]。

针对煤系厚层坚硬岩层稳定性与孕灾防治问题,相关学者开展了大量研究。如:刘晓刚等^[11]对工作面厚硬覆岩破断运动及来压规律进行了分析研究,提出了针对厚层砂岩顶板破断的技术思路,进行强矿压防治,达到了较好效果;张玉军等^[12]采用相似模拟与离散元数值模拟方法,分析了厚硬基本顶采动破坏结构演化和堆积特征对覆岩下沉破坏的影响,验证了压裂弱化厚硬岩层对降低上覆岩层下沉的有效性;郑凯歌等^[13]对复合关键层厚硬顶板诱冲机制与防治技术模式进行了研究,建立了复合关键层厚硬顶板中性轴位置定量判识方法,揭示了复合关键层厚硬顶板周期来压特征,并提出了相应的顶板弱化治理模式;宁杉^[14]对非均厚“弓形”巨厚关键层破裂演化及孕灾机理进行了研究,查明了巨厚关键层微裂隙演化规律、弯拉破裂特征及破裂裂隙分布形态;王克军等^[15]研究了俄霍布拉克煤矿某工作面走向不同阶段覆岩赋存特点及应力分布特征,分析了厚层顶板破断能量聚散规律及工作面矿压显现机制,提出了针对性的防治技术参数;朱卫兵等^[16]为揭示深部特厚煤层开采顶板大能量事件发生机理,采用数值模拟、物理模拟等综合方法,得到了高位组合悬臂板破断结构运动引发采场强矿压显现的致灾机制;苏士杰等^[17]针对坚硬顶板压裂防冲裂隙演化规律研究不足造成压裂效果难以评价的难题,以及高位厚硬砂岩顶板长孔水力压裂问题,研究了坚硬顶板压裂前、后不同层位岩层裂隙钻孔漏失率与电阻率的时空演化规律,获得了坚硬顶板弱化前、后覆岩裂隙发育规律及扩展范围;郭伟^[18]通过分析厚硬顶板对大采高工作面煤壁稳定性的影响,提出了厚硬砂岩顶板超前预裂方案,实现了对顶板断裂距离的有效管理,增强了煤壁结构的稳定性;张宏伟等^[19]针对大采高工作面覆岩顶板运移规律及工作面矿压显现强烈的问题,采用数值模拟方法分析了6.0 m大采高厚硬顶板工作面推进过程中煤层顶板覆岩破断形式、垂直应力分布特征及变化规律,得到了大采高综采工作面煤壁支撑影响区、顶板离层区、后方压实区的范围。

综上所述,目前对于煤系地层厚硬岩层的相关研究主要包括覆岩破断运动、来压规律与特征、覆岩下沉破坏特征及顶板诱冲机制等方面,研究过程中将顶板厚层坚硬岩层等效为均厚岩层,未考虑实际地质条件造成的岩层厚度差异,对于非均厚覆岩模型构建及其采动效应研究较少。为此,以淮南矿区张集煤矿11139工作面为研究对象,分析其顶板结构特征并建立地质模型,运用FLAC3D软件对工作面回采过程中采场围岩破坏特征、应力场及位移场演化规律进行分析,为类似条件下顶板采动效应研究及坚硬顶板治理提供一定参考。

1 研究区概况

张集煤矿位于安徽省淮南矿区,为典型的华北型地层,主要含煤段为二叠系山西组及上下石盒子组。其中11129、11139工作面位于矿井东一(1)采区,如图1所示。

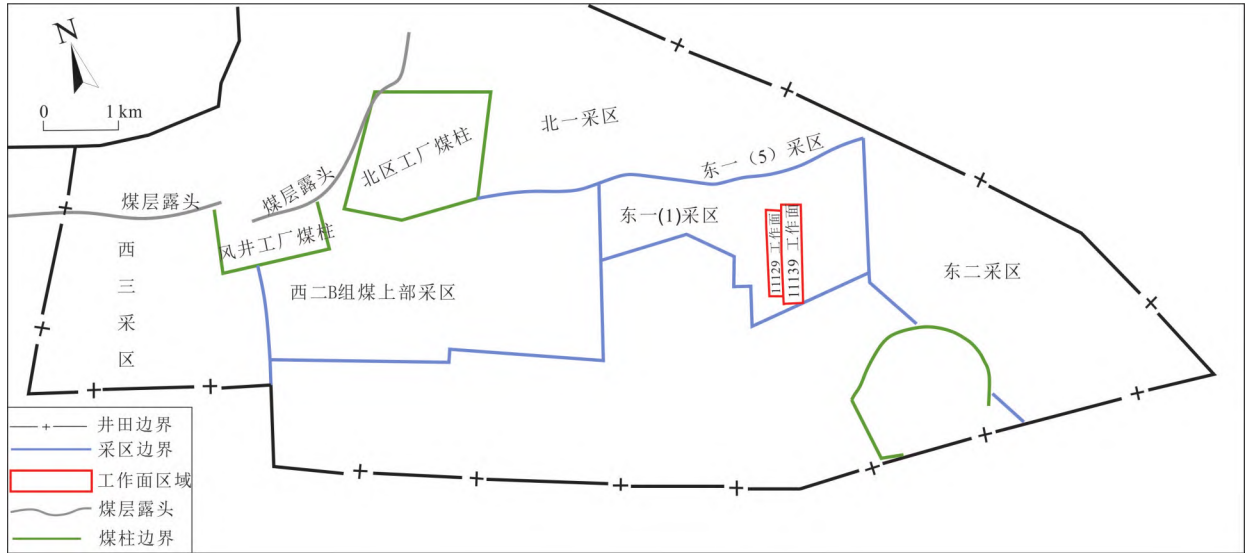


图1 张集煤矿 11139工作面位置示意图

从图1可知,11139工作面的西部为已回采的11129工作面,北以 F_5 为界,南部为东一采区系统巷道,东为9-1煤未采区,工作面上覆11-2煤已回采,下伏8煤未采。工作面标高 $-672.3 \sim -702.0$ m,工作面走向长平均为1 150 m,倾斜宽平均为220 m,斜面积约254 000 m^2 。工作面对应地面标高 $+18.2 \sim +20.0$ m,工作面为一单斜构造,局部发育次一级褶皱。煤层的形态总体上西高东低,煤岩层产状变化大,倾向 $30^\circ \sim 150^\circ$,整体向东倾斜,倾角 $2^\circ \sim 8^\circ$,平均 5° ,工作面煤厚1.3~2.9 m,平均为1.90 m,煤层稳定,结构简单,以块状结构为主。

2 工作面顶板覆岩结构特征

2.1 顶板探查设计

为确定工作面顶板巨厚砂岩层分布特征、岩性变化、厚度变化、岩石力学参数等,利用井下钻探对煤层顶板岩性组合及砂岩发育情况进行探查,在11139工作面轨道顺槽(简称“轨顺”)设计施工4个钻孔,如图2所示。

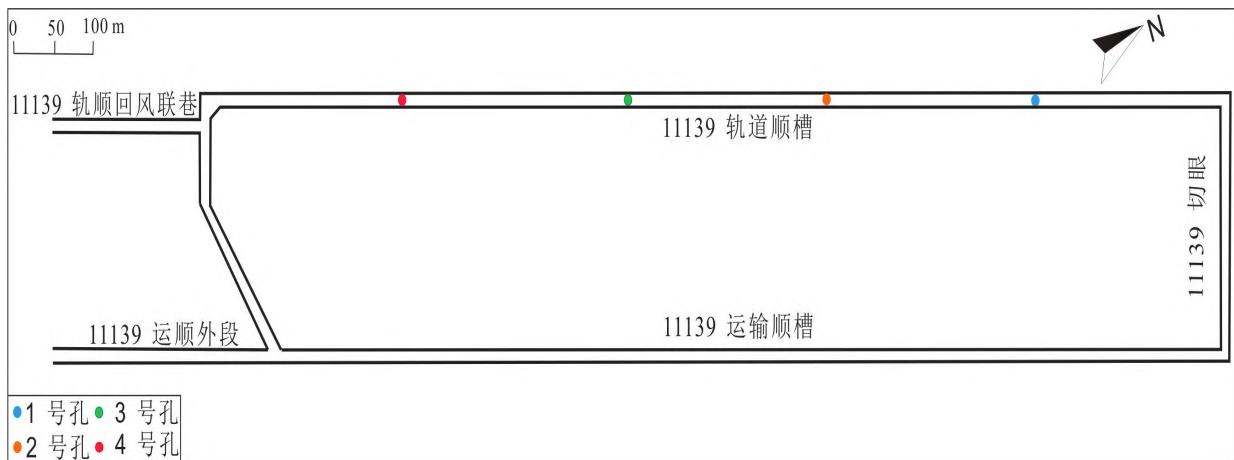


图2 11139工作面顶板探查钻孔平面示意图

顶板探查钻孔施工过程中,具体操作为钻孔仰角80°施工,设计孔深51 m,如图3所示。

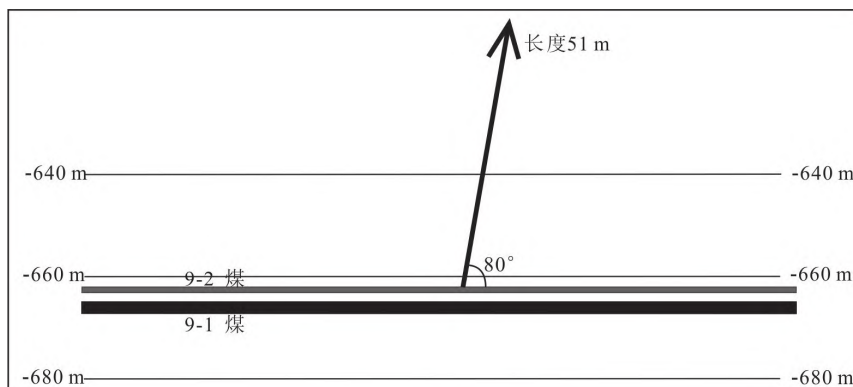


图3 11139工作面顶板探查钻孔剖面示意图

2.2 顶板探查结果

钻孔发现工作面顶板发育大量厚硬岩层,如中细砂岩、细砂岩及粉砂岩,厚度均大于6.0 m,其中粉砂岩在各个钻孔内厚度均达到最大,平均厚度为22.0 m;中细砂岩厚度在各个钻孔之间差异较大,在2号孔达到16.7 m,沿工作面走向方向厚度逐渐减小为0 m;细砂岩厚度呈现为先减小后增大的趋势,在4号孔达到最大为19.0 m。此外,还发育砂质泥岩与少量泥岩。顶板岩性及厚度变化如表1所示。

表1 11139工作面轨顺顶板岩性及厚度变化情况

孔号	岩性	厚度/m	顶板方向
1	中细砂岩	9.8	↓
	细砂岩	10.5	
	粉砂岩	26.8	
	泥岩	2.9	
2	中细砂岩	16.7	
	细砂岩	7.6	
	粉砂岩	22.0	
	泥岩	3.7	
3	中细砂岩	11.8	
	细砂岩	7.4	
	粉砂岩	16.3	
	砂质泥岩	10.8	
	泥岩	3.7	
4	细砂岩	19.0	
	粉砂岩	23.0	
	砂质泥岩	3.2	
	泥岩	4.8	

2.3 顶板覆岩结构特征

根据轨顺顶板钻孔数据绘制出岩性分布剖面,如图4所示。

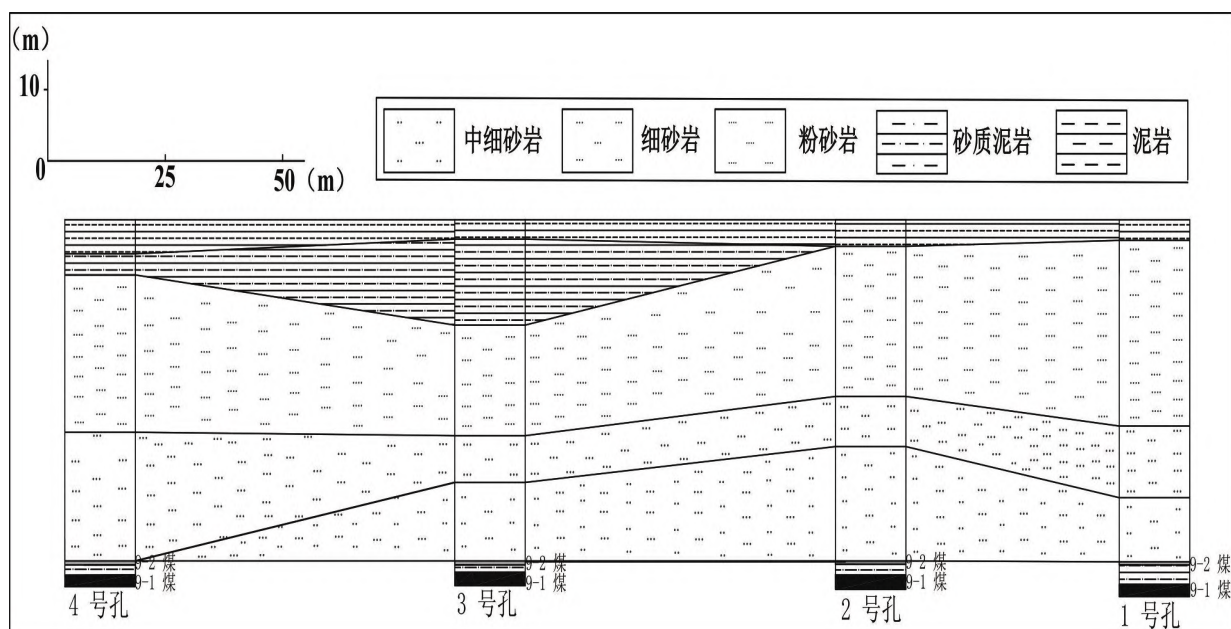


图4 11139工作面轨顺顶板岩性分布剖面图

图4显示,顶板存在稳定的砂岩分布,其中1~4号孔范围内为砂岩直覆,且1~3号孔9-2煤直接顶板为中细砂岩,之上为细砂岩及粉砂岩,中细砂岩厚度为9.8~16.7 m,平均厚度13.28 m;2~4号孔顶板砂岩整体厚度大致由46.0 m减小到35.0 m又增大到42.0 m,起伏较大;在3~4号孔砂岩层上方发育有稳定的砂质泥岩层,其中3号孔厚度最大,依次向两侧递减,侧向沉积连续性较好。此外,工作面1~3号孔直接顶砂岩展布形态呈“透镜”状分布,其中2号孔厚度最大,可达16.7 m,厚度依次向两侧递减,平均厚度约12.0 m,由此可见该工作面顶板为典型非均厚多层砂岩复合顶板。

根据上述工作面顶板沉积结构及沉积分布规律,该顶板类型属于“下硬上软型——向上变细沉积层序”,是在以河流作用为主的三角洲平原环境下形成的沉积层序,岩石粒度由底向上表现为由粗到细,顶板沉积结构在垂向上表现为正粒序结构。此外,顶板岩体力学强度由下往上迅速降低,由于直接顶砂岩体在横向上多呈透镜状,随砂岩的变薄、尖灭导致中间存在明显的沉积弱面,在岩性分界面常见在成岩作用过程中产生差异压实作用,进而产生滑面和纵向节理等软弱结构面,采动后会出现应力集中现象。

3 非均厚多层砂体采动效应特征

3.1 模型尺寸及边界条件

根据张集煤矿11139工作面实际开采条件,建立了研究区三维模型,如图5所示。

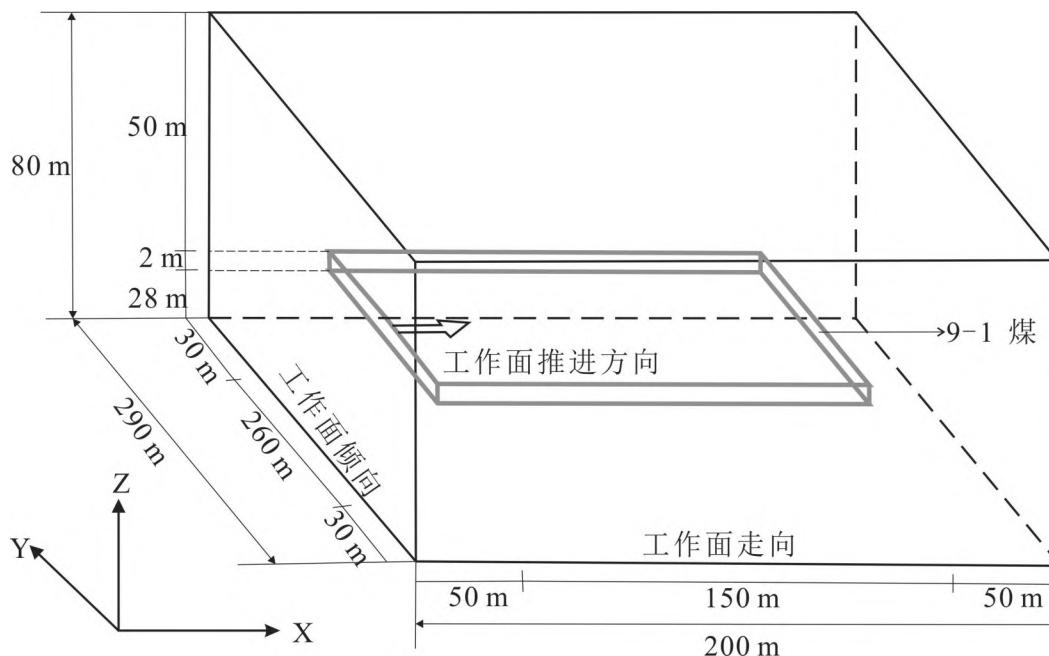


图5 11139工作面推进三维数值计算模型

由图5可以看出,9-1煤层的埋深为670.0 m,煤层厚度约2.0 m,工作面推进三维数值计算模型的长宽高为200.0 m×290.0 m×80 m,边界条件确定为:模型前后、左右4个侧面固定水平方向的位移,模型底面固定垂直和水平方向的位移,上表面为自由面。FLAC3D数值模拟煤层开采的过程实行分步开挖,沿走向推进40.0 m,设计9-1煤层每次开挖20.0 m,为消除边界效应对煤层开采的影响,开挖空间前后、左右分别留设50.0 m和30.0 m的边界保护煤柱。

3.2 地质模型的建立

3.2.1 均厚模型的建立

均厚模型是根据实际地层条件,层厚取钻孔中每一层厚度的平均值,编写命令导入FLAC3D软件中,模型共由580 000个单元组成,如图6所示。

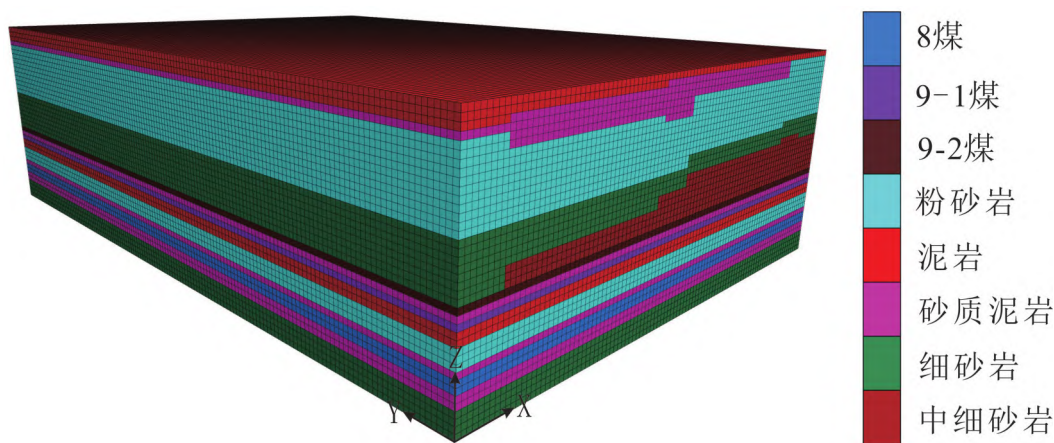


图6 均厚地层模型

3.2.2 非均厚模型建立

非均厚模型是根据实际地层条件,模拟出每层地层的走向趋势,即地层由低到高或消失。建立此类模型需使用FLAC3D模型中的楔形体。该楔形体所建立起的模型网格分布极其不规则且混乱,无法使模型中的初始应力达到平衡,所以,此次研究使用了Rhino软件进行过渡,建模过程如图7所示。

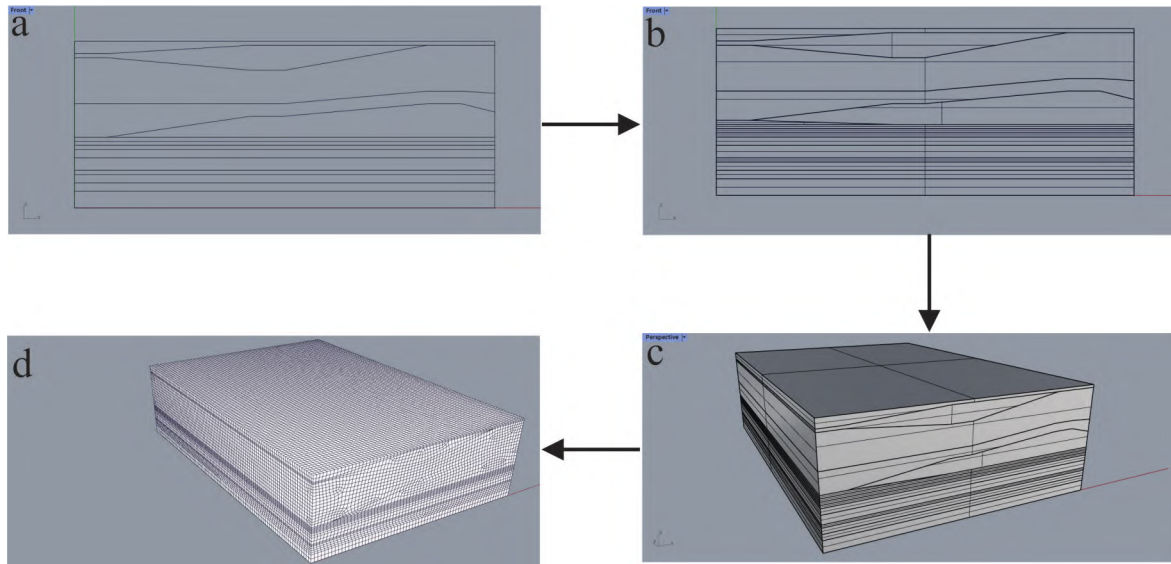


图7 Rhino建模过程

图7中,a为根据实际岩层厚度画出模型每层岩层的轮廓,构成模型的直视面;b是以平面曲线建立的曲面;c是通过拉伸平面使其成为实体;d是使用Rhino中的网格插件将建立完毕的实体模型进行网格剖分。

最后导出Rhino实体模型,并导入FLAC3D软件中,对各个地层进行命名,所构建的非均厚地层模型如图8所示。

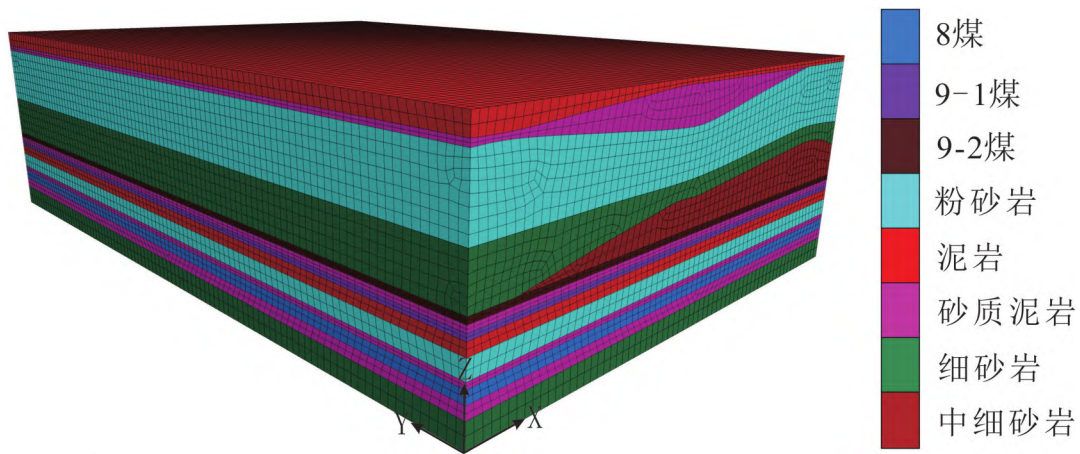


图8 非均厚地层模型

3.3 本构模型选择及力学参数

合理的岩土本构模型能够反映岩土的主要变形特性。在地下煤层开挖过程中,覆岩变形破坏主要由剪应力与拉应力引起,FLAC3D软件中摩尔-库伦屈服准则既考虑了剪切屈服,又考虑了拉伸截断,能较好地反映岩体的剪切及拉张破坏特性^[20]。因此,研究数值计算采用摩尔-库伦本构模型,模型地层力学参数如表2所示。

表2 11139工作面模型力学参数

岩性	密度/(g/cm ³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
泥岩	2.00	8.70	4.70	3.40	30	3.45
砂质泥岩	2.30	10.00	6.00	3.60	36	3.60
8煤	1.60	2.80	1.20	1.60	38	1.00
9-1煤	1.60	2.80	1.20	1.60	38	1.00
9-2煤	1.60	2.80	1.20	1.60	38	1.00
中细砂岩	2.52	11.50	8.30	3.70	35	2.20
细砂岩	2.54	13.40	10.50	7.00	38	3.00
粉砂岩	2.65	11.00	7.30	4.48	32	3.80

3.4 模拟结果分析

3.4.1 围岩变形破坏特征

工作面回采结束后,采场围岩塑性破坏特征如图9所示。

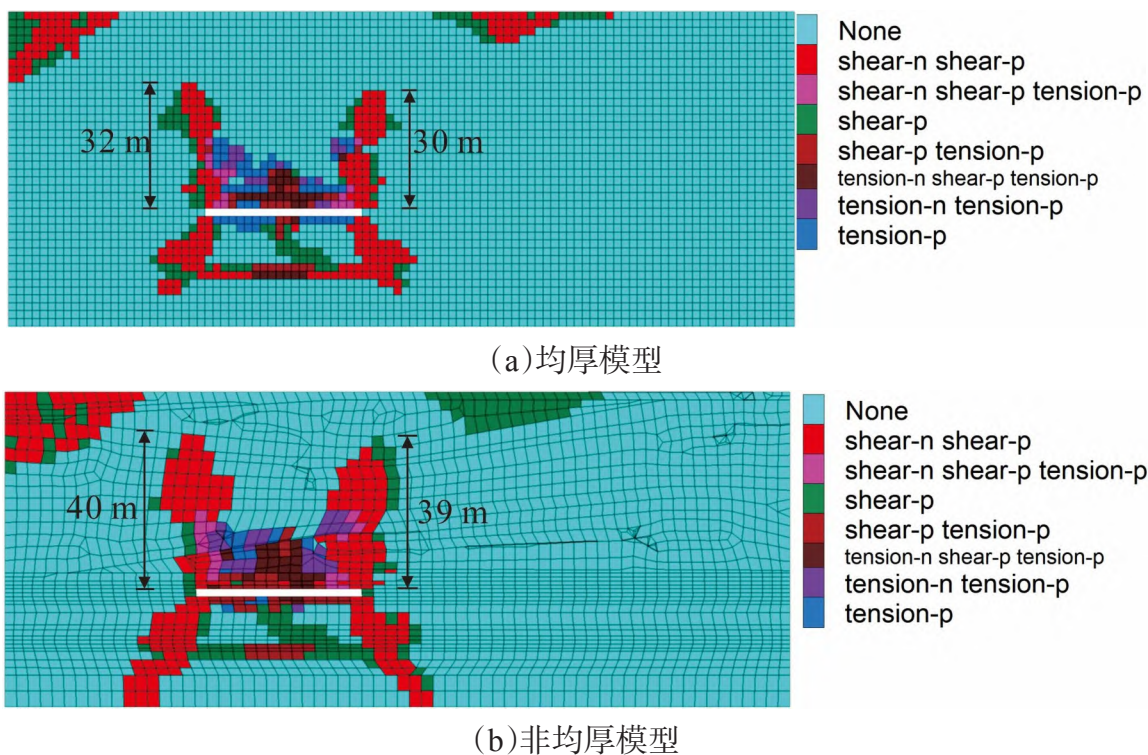
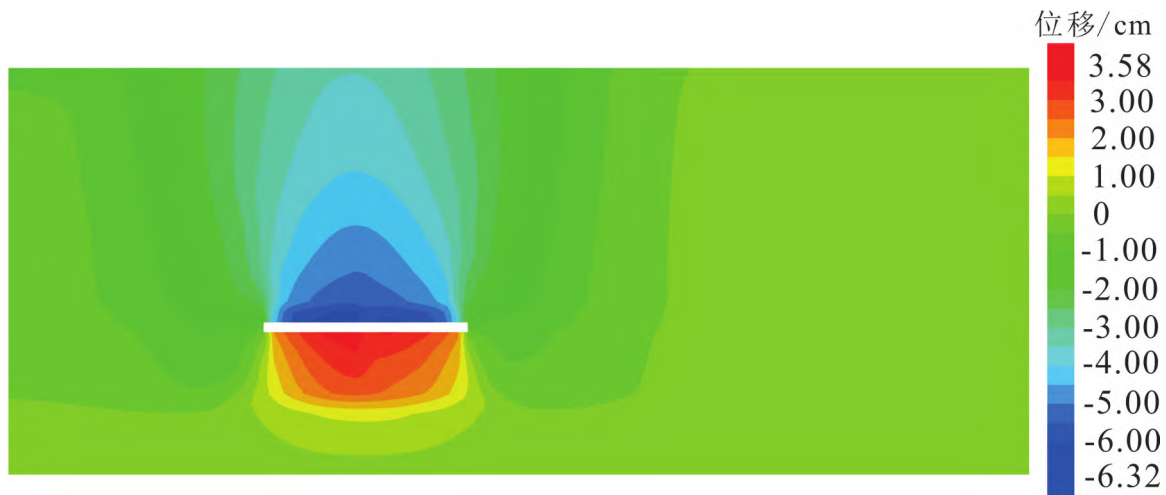


图9 11139工作面回采塑性破坏特征

在图9中,工作面在相同回采距离条件下,均厚与非均厚模型覆岩破坏范围形态均近似于“马鞍”形,非均厚模型顶板采动破坏高度与均厚模型相比有明显增大趋势。从破坏形式看出,两种模型垮落带均以拉伸破坏为主,裂隙带破坏形式为拉伸—剪切复合破坏。随着工作面向前推进,顶板破坏高度增大,均厚模型顶板最大裂隙带高度为32.0 m,垮落带发育高度约为12.0 m,非均厚模型顶板垮落带发育高度为15.0 m左右,裂隙带高度达到40.0 m,处于采空区上覆砂质泥岩与粉砂岩分界位置,显示出顶板破坏特征受覆岩厚度及结构控制。

3.4.2 顶板位移特征

煤层开采过程中,顶板会产生较为复杂的移动与变形,FLAC3D数值模拟结果中的垂向位移变化准确反映了覆岩移动情况。工作面回采结束后,采场围岩垂直位移云图如图10所示。



(a) 均厚模型



(b) 非均厚模型

图10 11139工作面回采顶板垂直位移云图

图10表示工作面向前推进40.0 m时,均厚与非均厚模型的上覆岩层位移云图均呈“火炬”状,工作面采空区中部覆岩位移量明显大于采空区两侧处,均厚模型顶板最大下沉量为6.32 cm,而非均厚模型顶板最大下沉量为9.67 cm。这种现象是由于非均厚模型X方向上50~90 m煤层上覆粉砂岩逐渐变薄且砂质泥岩厚度逐渐增大,使得顶板整体力学强度降低,导致顶板产生离层、断裂及周期性垮落,进而使上覆岩层的移动变形逐渐向地表传递,采动影响范围不断扩大。

为了研究两种模型在顶板不同位置垂向位移的变化规律,根据已建立的数值模型,在模型工作面回采40.0 m。模型开挖前在9-1煤层顶板10.0 m处布置1条长140.0 m的测线,开挖过程中对其应力与应变进行全程监测。模型测线布置如图11所示。

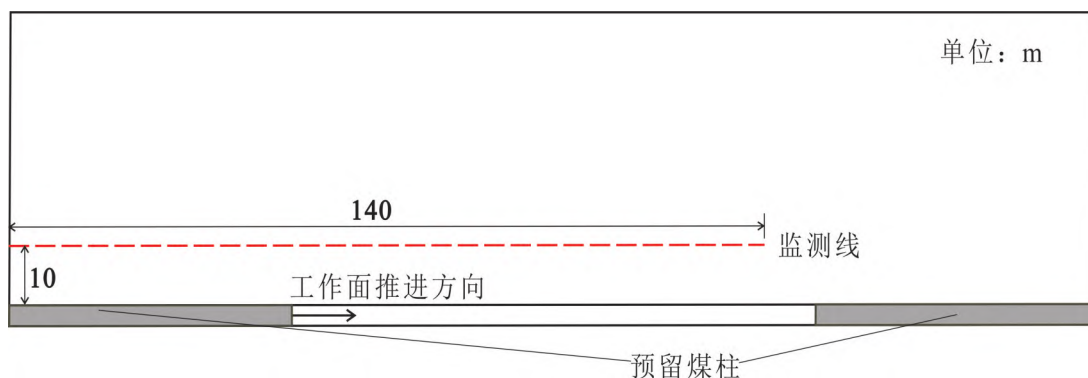


图11 11139工作面监测线布置

监测顶板垂向位移变化曲线如图12所示。

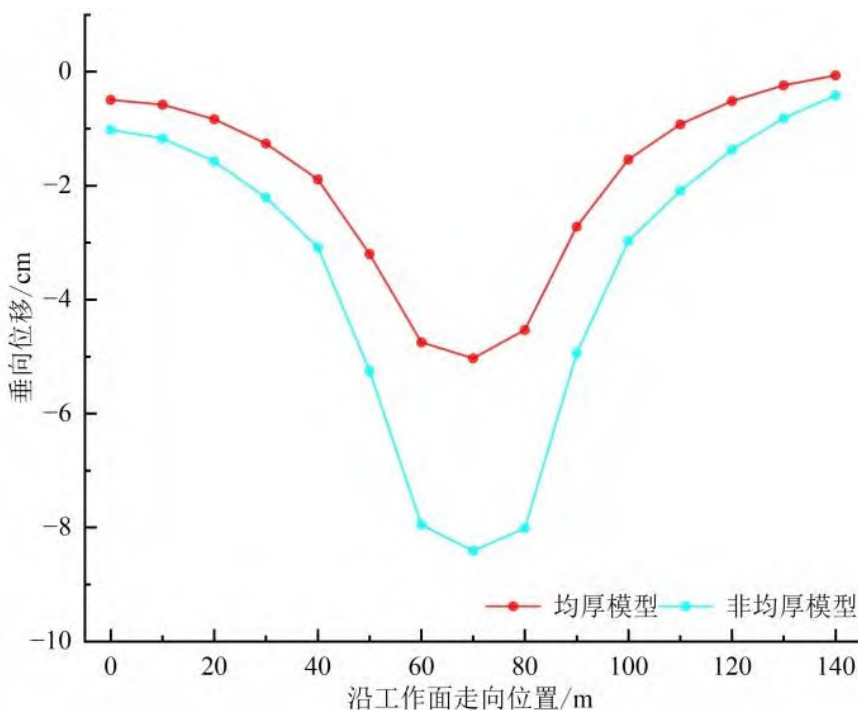


图12 顶板垂向位移监测曲线

从图12可以看出,两种模型的曲线形态变化基本一致,均呈“U”型。随着工作面推进,工作面顶板岩体出现了明显的下沉,且沉降值不断增大,且非均厚模型顶板下沉量整体比均厚模型大,在 $X=70\text{ m}$ 处非均厚模型顶板下沉量最大为 8.41 cm ,均厚模型仅为 5.03 cm 。这是由于工作面推进过程中,采空区上覆多层砂岩厚度逐渐减小,采空区顶板变形量不断增加,非均厚模型在采空区正上方 $X=70\text{ m}$ 处的多层砂岩厚度最小(小于均厚模型多层砂岩厚度均值),顶板岩石力学强度随之降低,在模拟采动过程中顶板更容易遭到破坏,因此,顶板下沉量更大。

3.4.3 采场采动应力特征

工作面在开挖前,煤岩体处于相对平衡状态,开挖后破坏了原有的受力平衡状态,导致围岩应力发生调整,应力重分布在采空区顶板和底板一定范围内,由于煤层采出而产生卸压,在采空区煤壁四周由于顶板支承应力而产生应力集中现象。工作面回采结束后,采场围岩垂向应力变化云图如图13所示。

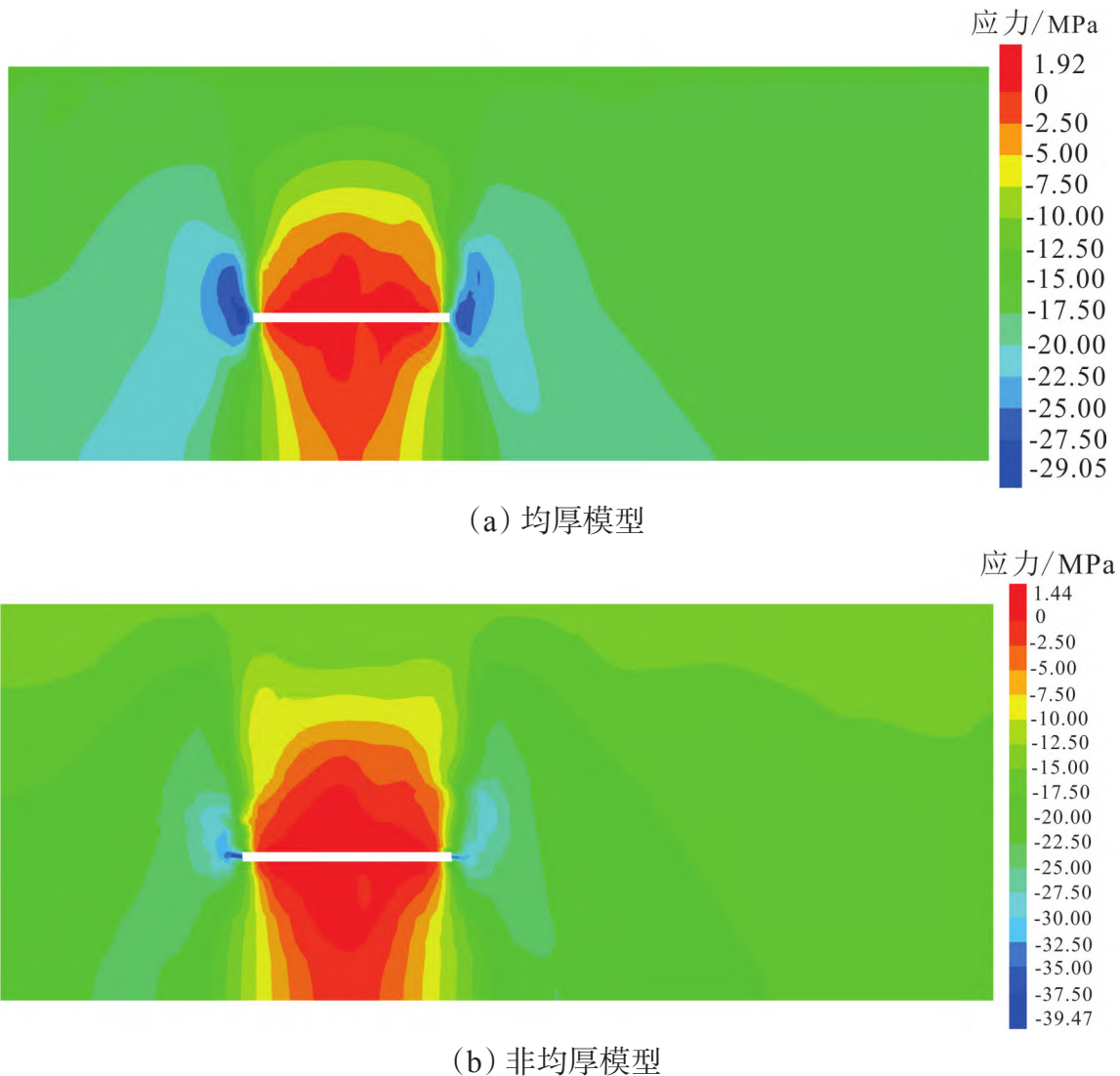


图13 11139工作面采动应力场位移云图

通过图13对比均厚与非均厚模型采场垂向应力分布特征得知,均厚模型中煤壁最大集中应力为29.05 MPa,非均厚模型中煤壁最大集中应力为39.47 MPa,较均厚模型最大集中应力显著提升。此外,非均厚模型采空区顶板卸压区形态表现为“锯齿形”,而均厚模型近似表现为“圆弧形”,主要由于非均厚模型中顶板砂岩层厚度在采空区不同位置出现了明显变化,导致顶板中应力出现不均匀传递效应,尤其位于煤层直接顶板处中细砂岩呈“透镜状”分布,在其尖灭点易产生应力集中,从而导致回采后煤壁处应力集中异常增大,这也是导致非均厚模型回采后顶板“两带”高度增大的主要原因。

为了研究两种模型在顶板不同位置垂直应力的变化规律,利用图11的监测线布置,对两种模型的顶板垂直应力进行了监测,结果如图14所示。

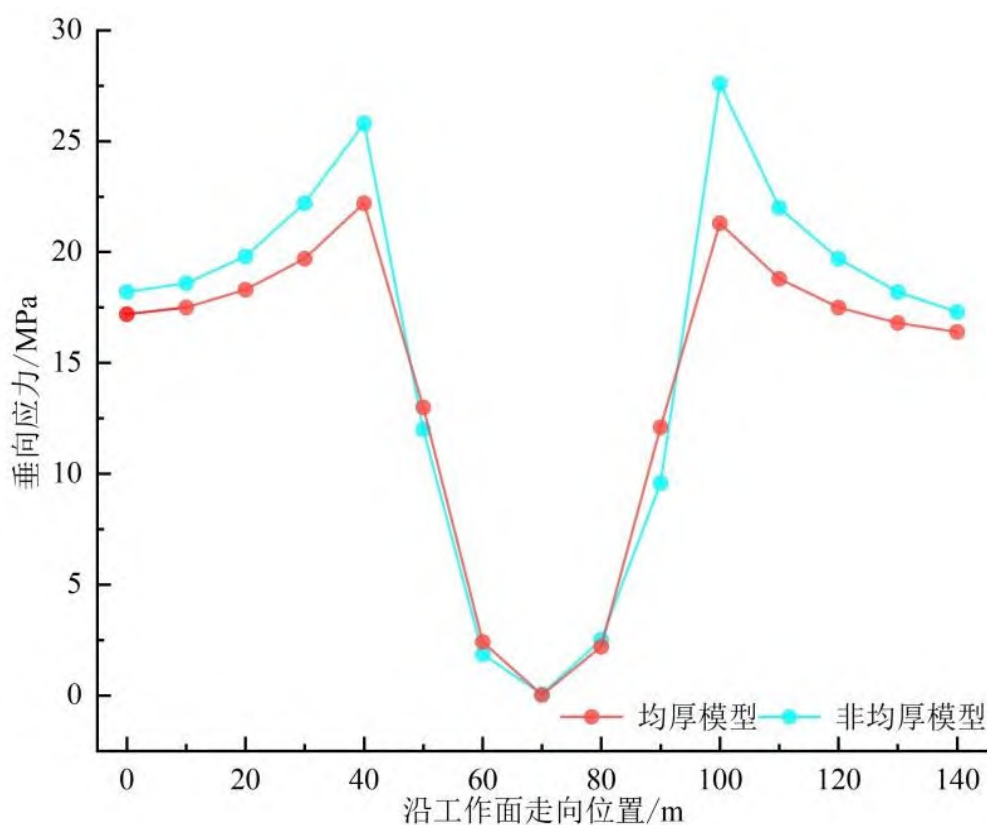


图14 顶板垂向应力监测结果

从图14可以看出,非均厚模型煤壁两端的支承应力均大于均厚模型,表明出由于砂岩厚度变化而导致应力集中程度显著提升。由于采空区右侧上覆砂岩厚度小于左侧,导致非均厚模型监测点 $X=100\text{ m}$ 处的垂向应力27.6 MPa大于 $X=40\text{ m}$ 处的垂向应力25.8 MPa,而均厚模型采空区两侧上覆岩层厚度取均厚则差距甚微。

3.4.4 模拟小结

运用FLAC3D数值模拟软件对比分析了均厚模型与非均厚模型下顶板采动效应差

异。模拟结果表明,非均厚模型相较于均厚模型顶板,其采空区上覆岩层的塑性破坏高度、顶板下沉量、垂向应力存在显著差异,主要表现为回采结束后,非均厚模型顶板最大破坏高度达到40.0 m,比均厚模型增加了25%;非均厚模型顶板最大下沉量达到9.67 cm,较均厚模型增加了53.01%;非均厚模型煤壁最大支承应力达到39.47 MPa,与均厚模型相比增加了35.92%;同时,采场顶板卸压区形态也表现出一定差异。顶板非均厚砂岩层的存在导致工作面回采过程中采场条件复杂化,会给工作面顶板管理、巷道变形及水害防控等方面增加难度。

4 研究结论

以淮南矿区张集煤矿11139工作面为研究对象,利用井下钻探查明了顶板岩层沉积组合结构,采用数值模拟方法建立了非均厚复合顶板模型,并对其采动效应进行了研究,得到主要结论如下:

第一,采用井下钻探方法对研究区工作面顶板进行了探查,查明了顶板覆岩结构及沉积组合特征,顶板发育有3层砂体,3层砂体厚度在工作面走向方向变化明显。岩性由下至上为中细砂岩、细砂岩及粉砂岩,顶板沉积结构在垂向上表现为正粒序结构,煤层直接顶中细砂岩层展布形态近似“透镜”状,顶板结构为典型的非均厚多层砂岩复合顶板。

第二,针对非均厚多层砂岩复合顶板,为建立符合实际地质条件的数值模型,运用Rhino软件建立非均厚模型和网格剖分,消除了FLAC3D软件中楔形体对模型建立的影响,建立了非均厚复合顶板数值模型,并与均厚模型模拟结果进行了对比。结果表明:由于顶板砂岩层厚度不规律变化,使得工作面回采过程中顶板“两带”高度、煤壁应力集中程度及顶板下沉量均较均厚顶板模型增大,给工作面回采带来了不利影响。

第三,顶板砂岩层厚度的差异化分布,导致在砂岩变薄区、增厚区及尖灭点等特殊部位在工作面开采扰动下,会产生采场围岩应力传递的不均匀性,这种不均匀性导致局部位产生高度应力集中现象,从而导致顶板“两带”高度增大、巷道局部变形加剧及顶板管理难度提升。

5 参考文献

- [1] 朱卫兵,宁杉,曹安业,等.非均厚“弓形”巨厚关键层动静载作用机制[J].煤炭学报,2024,49(10):4311-4324.
- [2] 曹安业,朱亮亮,李付臣,等.厚硬岩层下孤岛工作面开采“T”型覆岩结构与动压演化特征[J].煤炭学报,2014,39(2):328-335.
- [3] 成云海,姜福兴,张兴民,等.微震监测揭示的C型采场空间结构及应力场[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):102-107.

- [4] 蒋金泉,张开智. 综放开采矿震的成因及防治对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3276-3282.
- [5] 张明,成云海,王磊,等. 浅埋复采工作面厚硬岩层:煤柱结构模型及其稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 87-100.
- [6] Xia Binwei, Jia Jinlong, Yu Bin, et al. Coupling effects of coal pillars of thick coal seams in large-space stopes and hard stratum on mine pressure[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(6): 965-972.
- [7] 康红普,张镇,黄志增. 我国煤矿顶板灾害的特点及防控技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 24-33.
- [8] 徐刚,黄志增,范志忠,等. 工作面顶板灾害类型、监测与防治技术体系[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 1-11.
- [9] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等. 我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 1-40.
- [10] 黄炳香,赵兴龙,陈树亮,等. 坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2954-2970.
- [11] 刘晓刚,刘江斌,张震,等. 厚硬顶板高强度开采覆岩破断及来压规律研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50(10): 16-26.
- [12] 张玉军,肖杰,李嘉伟,等. 厚硬岩层结构调控低损开采方法及机理研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(3): 34-46.
- [13] 郑凯歌,袁亮,张平松,等. 复合关键层厚硬顶板诱冲机制与防治技术模式[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 14-24.
- [14] 宁杉. 非均厚“弓形”巨厚关键层破裂演化及孕灾机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023: 31-32.
- [15] 王克军,位玉红,李慧. 多层厚砂岩顶板综采面矿压显现机制及防控技术[J]. 江西煤炭科技, 2024, 46(4): 1-6.
- [16] 朱卫兵,郭春雷,罗讯,等. 非均厚特厚煤层开采高位组合悬臂板结构运动致灾机制[J]. 工矿自动化, 2024, 50(12): 1-10.
- [17] 苏士杰,孙如达,赵乾,等. 窄煤柱厚硬砂岩顶板防冲弱化裂隙发育规律[J]. 煤炭工程, 2024, 56(6): 135-143.
- [18] 郭伟. 大采高工作面厚硬顶板预裂技术研究[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(1): 113-115.
- [19] 张宏伟,赵世帆,管隆刚,等. 6.0 m大采高厚硬顶板工作面强矿压特征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(5): 37-46.
- [20] 师修昌. 煤炭开采上覆岩层变形破坏及其渗透性评价研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2016: 76-77.

Research on the Structural Characteristics and Mining-induced Effects of Non-uniform Multi-layer Sandstone Composite Roof

Zhai Xiaorong^{1,2}, Zhu Chengxin^{*}, Wang Kangjian³, Zhang Lei³, Huang Deguo⁴

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Coal Industry Engineering Research Center for Exploration and Early Warning of Mine Water Disaster, Huainan 232001, China;

3. Zhangji Coal Mine, Huainan Coal Mining Group Co., Ltd., Huainan 232001, China;

4. No.313 Team of Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, Lu'an 237000, China)

Abstract: A significant factor contributing to the increased difficulty in roof management and the inducement of rockbursts during the mining process is the presence of a thick, hard overlying roof above the coal seam. The main coal seams in the mine are often overlain by multiple layers of sandstone with non-uniform thickness due to changes in the depositional environments and sedimentary facies, posing certain risks to the safe and efficient mining of the working face. A case study was conducted on the 11 139 working face in Zhangji coal mine, Huainan mining area to accurately understand the overlying rock structure and the distribution pattern of sandstone layers in the working face roof, and to reveal the characteristics of the mining-induced effects under the condition of a non-uniform multi-layer sandstone composite roof. Drilling was performed on the working face roof to systematically investigate the thickness, lithological changes, and distribution patterns of the sandstone layers within a 50-meter range of the working face roof. A heterogeneous model that conforms to the actual geological conditions was established using Rhino software and imported into FLAC3D software to conduct a study on the mining-induced effects of the working face. In line with the study results, three sandstone layers were found to be distributed within the surveyed range of the working face roof. The sandstones were directly overlying the main coal seam, with the lithology from bottom to top being medium-fine sandstone, fine sandstone, and siltstone. The roof sedimentary structure exhibited a positive grain size sequence in the vertical direction, with the direct roof sandstone having a distribution pattern resembling a “lens” shape. The roof structure was a typical multi-layered sandstone body with non-uniform thickness. In contrast with the uniform thickness model, the non-uniform thickness model was found to show a 35.92% increase in the maximum supporting stress at the coal wall, revealing that the stress concentration was significantly enhanced due to the variation in sandstone thickness. Additionally, the stress distribution in the surrounding rock of the mining area changed from an approximately symmetric distribution in the uniform thickness model to an asymmetric distribution. Furthermore, the maximum development height of the “two zones” and the roof subsidence after mining in the non-uniform thickness model were greater than those in the uniform thickness model. The findings provide a reference for studying mining-induced effects and managing hard roofs under similar conditions.

Keywords: Non-uniform thickness sandstone; Geological model; FLAC3D numerical simulation; Mining-induced effects

[责任编辑:杨 洪 江 伟]