



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

李青海,张存智,李开鑫,等.巨厚松散层下开采地表下沉的影响因素分析[J].煤炭科学技术,2021,49(11): 191-199. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.11.025

LI Qinghai,ZHANG Cunzhi,LI Kaixin,*et al.* Analysis of influence of different parameters of mining under super-thick loose layer on surface subsidence[J].Coal Science and Technology,2021,49(11): 191-199. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.11.025

巨厚松散层下开采地表下沉的影响因素分析

李青海¹,张存智¹,李开鑫²,于胜文²,曹有勋³,杨涛³

(1.山东科技大学 能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590;2.山东科技大学 测绘科学与工程学院,山东 青岛 266590;

3.鄂托克前旗长城六号矿业有限公司,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:巨厚松散层下煤层开采地表下沉较大,对生态环境的影响较大。为揭示不同参数对地表下沉的影响规律,采用数值模拟的方法分析松散层厚度与基岩厚度比、煤层埋深与煤层厚度比 2 个尺寸参数,以及基岩抗拉强度、黏聚力、内摩擦角 3 个力学参数在地表下沉中的作用。模拟分析表明:下沉系数呈现随着松散层厚度与基岩厚度比的增加迅速增大并逐渐趋于稳定的趋势,下沉系数呈现随着煤层埋深与煤层厚度比的增大线性降低的趋势,下沉系数呈现随着抗拉强度的增大逐渐降低的趋势;基岩厚度一定时,存在临界黏聚力数值和临界内摩擦角数值,在小于临界值的范围内提高黏聚力或内摩擦角,下沉系数逐渐降低,当超过该临界值时进一步提高黏聚力或内摩擦角,下沉系数基本无变化。

关键词:巨厚松散层;地表下沉;下沉系数;裂隙扩展

中图分类号:P618

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)11-0191-09

Analysis of influence of different parameters of mining under super-thick loose layer on surface subsidence

LI Qinghai¹,ZHANG Cunzhi¹,LI Kaixin²,YU Shengwen², CAO Youxun³,YANG Tao³

(1.College of Energy and Mining Engineering,Shandong University of Science and Technology,Qingdao 266590,China;

2.School of Surveying and Mapping Science and Engineering,Shandong University of Science and Technology,Qingdao 266590,China;

3.Ertuoke Qianqi Great Wall No. 6 Mining Co.,Ltd.,Ordos 017000,China)

Abstract:Based on the theoretical research and field practice of rock burst,this paper puts forward the stress control theory of rock burst, which is centered on stress control and characterized by unit stress gradient,the induction mechanism of rock burst caused by original rock stress,tectonic stress and mining stress is analyzed by similar simulation and numerical simulation,and the field practice of rock burst prevention and control is carried out from the point of view of stress control.The results show that the tectonic stress of the fault is the main cause of the rock burst,and the mining stress will also induce the rock burst of the driving roadway due to the influence of the residual stress in the adjacent mining area.The advanced deep-hole roof pre-splitting blasting and open-hole penetration dynamic stress control technology are applied to the anti-scour practice to verify the effectiveness of the stress control theory.

Key words:super-thick loose layer;surface subsidence;subsidence coefficient;fracture propagation

0 引言

当煤炭资源被采出后,上覆岩体所处的三向应力状态被打破,引起围岩应力重新分布,导致上覆岩层自下而上逐渐运动,依次形成垮落带、断裂带、弯曲下沉带。当弯曲下沉带扩展至地表时,将会引起

地表沉陷。地表沉陷过程中有时伴随地下水位下降和水资源流失等水文地质破坏,不可避免对矿区生态环境造成影响,这与国家“绿色”发展理念相违背。推进煤炭安全绿色开采,最大限度减轻煤炭开采对生态环境的影响,实现与生态环境和谐发展是煤炭工业发展的方向。

收稿日期:2021-01-21;责任编辑:郭鑫

基金项目:山东省自然科学基金重点资助项目(ZR2020KE030);山东省高等学校科技计划资助项目(J18KA185)

作者简介:李青海(1984—),男,山东肥城人,副教授,硕士生导师,博士。Tel:0532-86057045,E-mail:liqinghai@sdust.edu.cn

通讯作者:于胜文(1966—),男,山东牟平人,教授,博士生导师,博士。Tel:0532-86057276,E-mail:sdksdwyu@126.com

开采区域内,上覆松散层厚度超过 50 m 的表土层称作厚松散层,厚度超过 100 m 的表土层称作巨厚松散层^[1]。在松散层厚度不超过 50 m 的条件下,地表下沉系数(最大下沉量与煤层厚度的比值)基本为 0.7~0.8^[2],而在松散层超过 50 m 的条件下,地表下沉系数较大,在松散层厚度超过 100 m 时,下沉系数接近于 1.0,甚至出现大于 1.0 的情况^[3]。专家学者对厚松散层开采覆岩运动规律进行了大量研究,其中,方新秋等^[4]建立了薄基岩工作面结构力学模型;杨永康等^[5]建立了综放开采的“拱—台阶”岩梁组合模型,揭示了综放的覆岩移动规律及破煤机制;鞠金峰等^[6]基于特大采高工作面关键层“悬臂梁”运动对直接顶的作用,阐述了端面漏冒的发生机理;陈忠辉等^[7]根据特厚煤层综放开采采高大、采空区矸石垮落不充分、不能有效支撑基本顶岩梁的特点,建立了基本顶断裂力学模型;杨治林等^[8]应用初始后屈曲理论和尖点突变模型探讨了顶板岩层分岔失稳机理及屈曲后的不稳定性,建立了顶板破断后台阶下沉的判据;刘学生等^[9]建立了煤层顶板破断力学模型,采用塑性极限分析定理推导了关键层的断裂步距;徐平等^[10]建立了单层薄基岩 Winkler 弹性地基连续梁力学模型;杜锋等^[11-12]建立了厚黏土层薄基岩综放采场基本顶周期来压岩层破断的力学模型。同时,基于覆岩力学特性建立了多种形式的地表沉陷预测模型,具体有 SINGH 等^[13-14]基于弹塑性理论和现场观测数据,建立了地表沉陷预测模型。高超等^[15]基于层状弹性梁板岩层沉陷控制理论和随机介质理论,建立了适合近浅埋深特厚煤层综放开采地表沉陷预测模型。杨建立等^[16]基于不连续变形数值分析方法建立了地表沉陷预测模型。彭林军等^[17]基于深部开采结构力学模型,提出了盆地水平煤层地表沉陷预测模型。于秋鸽等^[18]将工作面上覆岩层分为关键层下部软弱岩层、关键层、松散层 3 部分,根据关键层理论建立了地表偏态下沉预测模型。

鉴于不同参数对地表下沉的影响较大,国内外专家学者针对不同参数对地表下沉的影响规律进行了大量研究,具体有谭志祥等^[19]基于实测资料获得下沉系数与采宽比和基岩厚度的关系。张文泉等^[20]模拟分析了厚松散层薄基岩条带开采中采出率、采宽、基岩厚度、松散层厚度及采高对地表下沉的影响规律。张立亚等^[21]系统研究了多煤层条带开采中不同采深、不同采宽、不同层间距和上下煤柱的空间位置关系对地表下沉和水平移动的影响规律。郭振华等^[22]分析了分步开挖、分步充填、膏体强度逐步增强

的开采、充填过程对地表下沉的影响规律。

现有研究中对多种尺寸参数对地表下沉的影响规律进行了研究,但对厚松散层作用下不同尺寸参数比值、不同力学参数对地表下沉的影响规律研究相对较少。因此,主要分析不同尺寸参数和不同力学参数对巨厚松散层下开采地表下沉的影响规律。在尺寸参数方面,考虑到松散层厚度、基岩厚度、煤层采高、煤层埋深等参数不同时,将会对地表下沉产生不同影响,为提高研究规律的通用性,在此选择松散层厚度与基岩厚度比,煤层埋深与煤层厚度比 2 个尺寸参数进行分析。在力学参数方面,在此主要考虑基岩力学参数对地表下沉的影响,选择基岩的抗拉强度、黏聚力、内摩擦角 3 个力学参数进行分析,以期为现场地表沉陷控制提供依据。

1 研究背景

巨野煤田内的郭屯煤矿上覆新近系和第四系黏土层平均达到 590 m,属典型的巨厚松散层下开采矿井,选取该矿井 1305 工作面为工程背景。1305 工作面煤层平均厚度 4.04 m,煤层埋深约 850 m,其中松散层厚约 724.7 m,基岩厚约 126.25 m。基岩各岩层力学参数见表 1。

2 模型参数的确定

2.1 数值模型的建立

综合考虑模拟效果及模型运算速度等因素,采用 PFC 二维软件建立模型进行分析。参考 1305 工作面煤层赋存条件,煤层下方岩层厚度取 14.71 m,煤层厚度取 4.04 m,煤层上覆岩层厚度取 126.25 m(受粒子数的影响,模型高度方向尺寸较小),其中,煤层上覆岩层包含 1 层厚 25.25 m 薄基岩和 1 层 101 m 巨厚松散层,则模型高度为 145 m。模型长度取 500 m,建立模型如图 1 所示。模型中共 59 708 个粒子,粒子之间采用 Flatjoint 接触,在模型范围内施加 2×10^4 N 的模拟应力梯度。模型中假设薄基岩均为泥岩,当基岩包含多层不同岩性岩层时,其对地表下沉的影响规律将在后续研究。

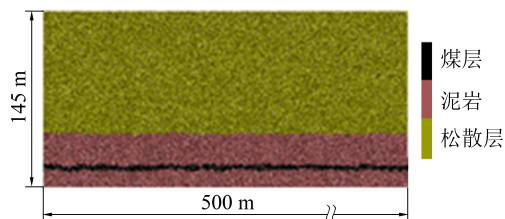


图 1 1305 工作面数值计算模型

Fig.1 Numerical calculation model of No.1305 working face

表 1 岩层力学参数
Table 1 Rock mechanics parameters

岩层	岩层厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
细砂岩	1.60	2 340	76.8	6.9	19.60	19.28	36	0.26
泥岩	75.09	2 470	40.8	5.7	6.56	11.36	30	0.32
细砂岩	3.87	2 340	76.8	6.9	19.60	19.28	36	0.26
泥岩	5.98	2 470	40.8	5.7	6.56	11.36	30	0.32
细砂岩	15.15	2 340	76.8	6.9	19.60	19.28	36	0.26
泥岩	8.15	2 470	40.8	5.7	6.56	11.36	30	0.32
细砂岩	16.18	2 340	76.8	6.9	19.60	19.28	36	0.26
煤 3	4.04	1 350	15.8	1.8	3.52	4.82	28	0.33
泥岩	4.01	2 470	40.8	5.7	6.56	11.36	30	0.32
细砂岩	10.70	2 340	76.8	6.9	19.60	19.28	36	0.26

2.2 岩体参数校核

依据参考文献[23]可知,PFC 软件中输入的力学参数与数值计算获得的力学参数存在一定差异,因此,首先对岩层力学参数进行校核。在现场地质条件中由于裂隙、断层等构造的存在,现场节理岩体强度较试块强度有所弱化,而当岩体尺寸足够大、其中的块体尺寸相对较小时,岩体强度将达到稳定值。由于涉及的采场范围达到 500 m,岩层高度达到 145 m,其中包含的块体尺寸相对较小,因此,基于弱化后的现场节理岩体强度进行模拟分析。在此,首先基于表 1 提供的完整试块强度计算现场节理岩体的强度,然后通过反复调试确定数值计算中获得对应岩体强度时所需输入的相关参数。

鉴于 Hoek-Brown 强度准则在描述节理岩体中的优势,在此首先根据 Hoek-Brown 强度准则计算现场节理岩体强度数值^[24]。Hoek-Brown 强度准则计算公式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \tag{1}$$

其中: σ_3 为岩体的围压; σ_1 为岩体在对应围压下破坏时的应力; σ_c 为完整试块的单轴抗压强度; m_b,s,a 分别为岩体参数。在节理岩体中,CAI 等^[25]将地质强度指标(GSI)引入具体参数计算,各参数计算公式为

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \tag{2}$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \tag{3}$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \tag{4}$$

式中: m_i 为 Hoek-Brown 常数; D 为应力扰动因子

(现场无爆破等大范围扰动时可取 0)。

在岩体强度弱化的同时,岩体弹性模量弱化公式^[25]为

$$E = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{\frac{GSI - 10}{40}} \tag{5}$$

根据现场地质资料,参考文献[24]确定细砂岩 GSI 取 50, m_i 取 12,泥岩 GSI 取 40, m_i 取 10,煤层 GSI 取 30, m_i 取 8。依据 Hoek-Brown 强度准则,获得现场各类岩体的弹性模量和不同围压下岩体强度参数见表 2。

表 2 现场岩体 Hoek-Brown 强度参数
Table 2 Field rock mass Hoek-Brown strength parameters

岩层	弹性模量/ GPa	不同围压下 σ_1 /MPa				
		0	5	10	15	20
泥岩	3.59	1.35	20.20	31.62	41.58	50.78
煤层	1.26	0.272	11.96	19.99	27.35	—

由表 2 知,依据 Hoek-Brown 准则计算获得泥岩和煤层的单轴抗压强度分别为 1.350 和 0.272 MPa,与现场岩体单轴抗压强度存在一定差距。基于岩层不同围压下的应力数值,拟合获得节理岩体莫尔-库伦强度准则为

泥岩: $\sigma_1 = 2.03\sigma_3 + 10.62$

煤层: $\sigma_1 = 1.54\sigma_3 + 4.38$

依据节理岩体的莫尔-库伦强度准则确定弱化后的泥岩和煤层的单轴抗压强度分别为 10.28、4.34 MPa,这与现场较接近。两岩层完整试块单轴抗压强度分别为 40.8、15.8 MPa,对比发现各岩体强度基本弱化为完整试块强度的 0.25 倍。同样基于 0.25 倍的弱化标准确定岩体的抗拉强度。泥岩、煤层完整试块抗拉强度分别为 5.7、1.8 MPa,确定弱化后的抗拉强度分别为 1.43、0.45 MPa。通过反复调试获得各岩层在数值计算中的输入参数见表 3。由

于松散层参数较小,依据前述的弱化准则进行弱化时发现结果离散性较大,在此,松散层参数参考土力学相关资料选取^[26],由表 3 可知,松散层的弹性模

量、抗拉强度、黏聚力等数值均比泥岩对应参数小的多,这与现场实际相一致。基于该参数获得各岩层计算结果见表 4。

表 3 输入岩层力学参数

Table 3 Rock mechanics parameters in simulation

岩层	单层厚度/ m	密度/ (kg·m ⁻³)	孔隙度	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	摩擦 因数	法向刚度/ 切向刚度
松散层(无芯岩层)	101	2 200	0.05	0.17	0.105	0.505	3	0.052	1.0
泥岩	25.25	2 470	0.05	2.5	1.65	5.05	5	0.087	1.0
煤 3	4.04	1 350	0.05	0.9	0.51	2.45	3	0.052	1.0
泥岩	14.71	2 470	0.05	2.5	1.65	5.05	5	0.087	1.0

表 4 基于输入参数的数值计算结果

Table 4 Numerical simulation results based on input parameters

岩层	弹性模量/GPa	抗拉强度/GPa	单轴抗压强度/GPa
泥岩	3.50	1.43	10.28
煤层	1.25	0.44	4.34

2.3 开挖尺寸的确定

在数值模型中,当开挖尺寸不同时对地表下沉的影响程度不同,鉴于此,基于建立数值模型,依次计算分析在模型中间位置分别开挖 120、140、160、180、200 m 时地表下沉规律的差异,模拟获得 120~200 m 开挖尺寸模型如图 2 所示,地表下沉和裂隙演化与开采长度的关系如图 3 所示。

由图 2 可知,当开挖长度分别为 120、140、160、180、200 m 时,模型内产生的裂隙数量分别为 13 005、14 116、18 275、19 444、20 104 条,地表最大下沉量分别为 2.479、2.712、2.813、2.916、2.926 m。随着开挖长度的增大模型内部裂隙近于线性增加,每一次裂隙的增加表明垮落范围的进一步扩大,这与现场随着开挖长度的增加基本顶岩梁周期性断裂、工作面周期来压相一致。当开挖长度自 120 m 增大到 180 m 时,模型顶部下沉量基本呈现线性增加,而自 180 m 增大至 200 m 时最大下沉量基本无变化,则可以认为在模型走向长度为 500 m 时,在模型中间开挖 180 m 时地表最大下沉量趋于稳定,进一步增大开挖长度对最大下沉量影响不大。鉴于此,在后续分析中选择 180 m 开挖长度计算分析各因素对下沉系数的影响规律。

3 尺寸参数对地表下沉的影响规律分析

3.1 松散层厚度与基岩厚度比对地表下沉的影响规律

煤层埋深不变,模型高度不变,改变松散层厚度和基岩厚度,建立煤层上方松散层厚度与基岩厚度比分别为 0.4、0.6、0.8、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0 的数值模型,模拟分析不同松散层厚度与基岩厚度比下沉系数演化规律。在后续分析中将松散层厚度与基岩厚度比为 0.4 的模型简称为 0.4 : 1.0 模型,类似地,其他模型相应简称比为 0.6 : 1.0 模型、0.8 : 1.0 模型、1 : 1 模型、2 : 1 模型等模型。模拟获得不同模型最大下沉量统计和下沉系数统计见表 5。部分松散层厚度与基岩厚度比裂隙扩展规律如图 4 所示。定义松散层厚度与基岩厚度比为 r ,则 r 与下沉系数 q 的关系如图 5 所示,由图 5 可知,在 $r < 2$ 时,随着 r 的增大下沉系数迅速增大,而当 $r \geq 2$ 时下沉系数基本趋于稳定,不再随 r 的增大而增大。通过拟合获得下沉系数 q 与 r 的演化关系为:

$$q = -1.719\exp(-r/0.316) + 0.701, R^2 = 0.974 \quad (7)$$

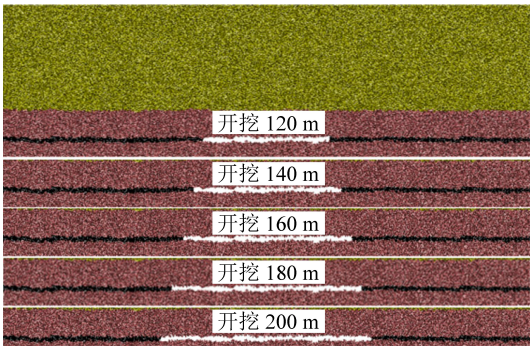


图 2 120~200 m 开挖尺寸模型

Fig.2 Diagram of models excavated from 120 m to 200 m

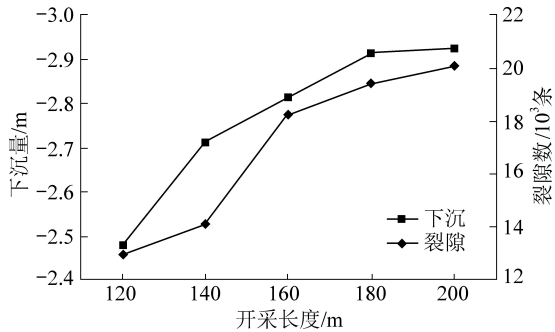


图 3 地表下沉和裂隙演化与开采长度的关系

Fig.3 Relationships between surface subsidence, fracture evolution and mining lengths

表 5 不同松散层厚度/基岩厚度下沉量和下沉系数
Table 5 Subsidence amounts and subsidence coefficients of models with different ratios of loose layer thickness to bedrock thickness

松散层厚度/ 基岩厚度	下沉量/m	下沉系数
0.4	0.845	0.209
0.6	1.873	0.464
0.8	2.342	0.580
1.0	2.392	0.592
2.0	2.960	0.733
3.0	2.833	0.701
4.0	2.916	0.722
5.0	2.903	0.719
6.0	2.708	0.670
7.0	2.807	0.695
8.0	2.790	0.691
9.0	2.862	0.708
10.0	2.797	0.692

后续分析中选择松散层厚度与基岩厚度比为 0.5、1.0、2.0、4.0,即 0.5 : 1 模型、1 : 1 模型、2 : 1 模型、4 : 1 模型对比分析不同参数的影响规律。

3.2 埋深与煤厚比对地表下沉的影响规律

模型高度不变,煤层埋深 126.25 m 不变,煤层厚度 M 取 2.04、2.54、3.04、4.04、5.04、6.04、7.04 m,分别建立松散层厚度与基岩厚度比为 0.5 : 1、1 : 1、2 : 1、4 : 1 四类模型,模拟分析不同埋深/煤厚对地表下沉的影响规律(在此假设煤层一次全部采出)。模拟获得各模型最大下沉量及下沉系数见表 6。后续分析中定义埋深与煤厚比为系数 P ,对应获得下沉系数 q 和 P 的演化关系如图 6 所示。

表 6 不同埋深与煤厚比下沉量和下沉系数统计

Table 6 Subsidence amounts and subsidence coefficients of modes with different ratios of buried depth to coal thickness									
煤层厚度/m	埋深/煤厚	不同模型下沉量/m			不同模型下沉系数				
		4 : 1	2 : 1	1 : 1	0.5 : 1.0	4 : 1	2 : 1	1 : 1	0.5 : 1.0
2.04	61.89	0.707	0.721	0.812	0.655	0.347	0.353	0.398	0.321
2.54	49.70	1.265	1.298	0.968	0.817	0.498	0.511	0.381	0.322
3.04	41.53	1.842	2.120	1.528	1.292	0.606	0.697	0.503	0.425
4.04	31.25	2.916	2.960	2.392	1.999	0.722	0.733	0.592	0.495
5.04	25.05	4.065	4.019	3.517	2.977	0.807	0.797	0.698	0.591
6.04	20.90	4.935	5.075	4.110	3.264	0.817	0.840	0.680	0.540
7.04	17.93	6.398	6.164	4.634	3.843	0.909	0.840	0.658	0.546

由表 4 和图 6 可知,在不同模型中,下沉系数基本呈现随 P 的增大线性降低趋势,其中,4 : 1 模型和 2 : 1 模型中,随 P 的增大下沉系数演化规律较接

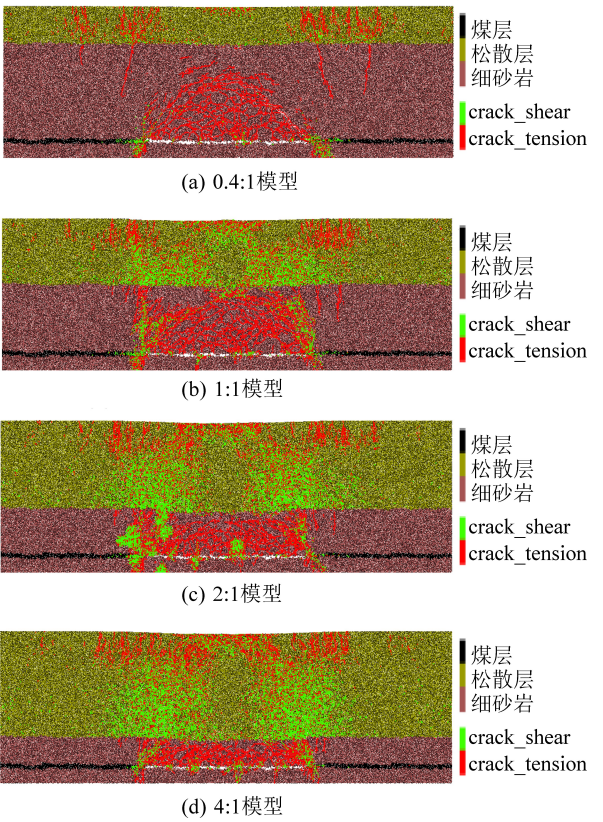


图 4 不同松散层厚度与基岩厚度比的裂隙扩展规律

Fig.4 Fracture expansion law of models with different ratios of loose layer thickness to bedrock thickness

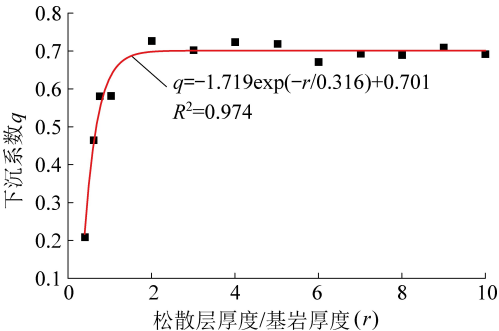


图 5 下沉系数与松散层厚度/基岩厚度拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of subsidence coefficients and ratios of loose layer thickness to bedrock thickness

近且下沉系数降低速率较大,而在 1 : 1 模型中,随 P 的增大下沉系数降低速率较 2 : 1 模型减小,在 0.5 : 1 模型中,下沉系数降低速率较 1 : 1 模型更

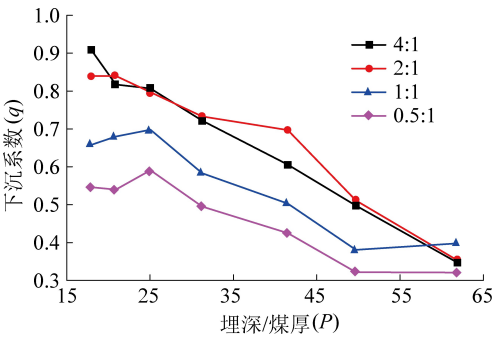


图 6 下沉系数和埋深/煤厚演化关系

Fig.6 Relationships between subsidence coefficients and ratios of buried depth to coal thickness

小,则当基岩厚度较大时(例如 1 : 1 模型),埋深与煤厚比对地表下沉系数的敏感性较小,而当基岩较薄时(例如 4 : 1 模型),埋深与煤厚比对下沉系数的敏感性较大。对比发现,当 P 达到 61.89 时,在 4 : 1 模型、2 : 1 模型、1 : 1 模型、0.5 : 1 模型中地表下沉系数分别为 0.347、0.353、0.398、0.321,各模型下沉系数相差不大,即当 P 增大到一定程度,下沉系数受松散层厚度/基岩厚度的影响较小。

4 力学参数对地表下沉的影响规律分析

4.1 基岩抗拉强度对地表下沉的影响规律

模型高度不变,煤层厚度 4.04 m,煤层埋深 126.25 m,煤层下方岩层厚 14.71 m,建立松散层厚度与基岩厚度比分别为 4 : 1、2 : 1、1 : 1、0.5 : 1.0 模型,在此基础上依次改变抗拉强度数值(受计算过程影响,各模型抗拉强度数值选取并非完全相同),统计获得不同模型最大下沉量及对应的下沉系数见表 7,下沉系数与基岩抗拉强度演化关系如图 7 所示。

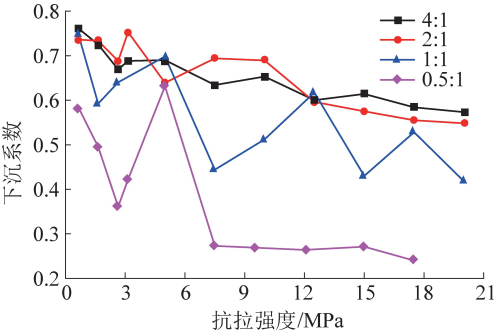


图 7 下沉系数与基岩抗拉强度演化关系

Fig.7 Relationships between subsidence coefficients and bedrock tensile strengths

由图 7 可以看出,在 4 : 1 模型、2 : 1 模型中,抗拉强度对下沉系数的影响规律基本一致,均呈现随抗拉强度的增大逐渐降低的趋势,同时可以看出,相同抗拉强度时两模型的下沉系数较接近。

表 7 不同基岩抗拉强度时下沉量和下沉系数

Table 7 Subsidence amounts and subsidence coefficients of models with different tensile strengths in bedrock

模型	抗拉强度/MPa	下沉量/m	下沉系数
4 : 1 模型	0.65	3.076	0.761
	1.65	2.916	0.722
	2.65	2.702	0.669
	3.15	2.78	0.688
	5.0	2.789	0.690
	7.5	2.560	0.634
	10.0	2.637	0.653
	12.5	2.426	0.600
	15.0	2.481	0.614
	17.5	2.358	0.584
2 : 1 模型	20.0	2.316	0.573
	0.65	2.974	0.736
	1.65	2.960	0.733
	2.65	2.779	0.688
	3.15	3.041	0.753
	5.0	2.580	0.639
	7.5	2.804	0.694
	10.0	2.782	0.689
	12.5	2.409	0.596
	15.0	2.323	0.575
1 : 1 模型	17.5	2.244	0.555
	20.0	2.213	0.548
	0.65	3.023	0.748
	1.65	2.392	0.592
	2.65	2.586	0.640
	5.0	2.819	0.698
	7.5	1.794	0.444
	10.0	2.068	0.512
	12.5	2.493	0.617
	15.0	1.739	0.430
0.5 : 1.0 模型	17.5	2.135	0.528
	20.0	1.689	0.418
	0.65	2.361	0.584
	1.65	1.999	0.495
	2.65	1.457	0.361
	3.15	1.707	0.422
	5.0	2.549	0.631
	7.5	1.101	0.273
	9.5	1.086	0.269
	12.0	1.065	0.264
	15.0	1.094	0.271
	17.5	0.970	0.240
	20.0	1.031	0.255

在 1 : 1 模型中,随着抗拉强度的变化下沉系数波动较大,整体呈现随抗拉强度的增加逐渐降低的趋势。在 0.5 : 1.0 模型中,抗拉强度为 3~7 MPa 时下沉系数呈现明显的离散性,忽略该离散数值的影响,下沉系数基本呈现随抗拉强度增大逐渐降低的趋势。

4.2 基岩黏聚力对地表下沉的影响规律

模型高度不变,煤层厚度 4.04 m,煤层埋深 126.25 m,煤层下方岩层厚 14.71 m,建立松散层厚

度与基岩厚度比分别为 4 : 1、2 : 1、1 : 1、0.5 : 1 模型,在此基础上依次改变黏聚力(受计算过程影响,各模型黏聚力选取并非完全相同),统计获得不同模型最大下沉量及对应下沉系数见表 8。不同下沉系数对比如图 8 所示。可以看出,在不同模型中,下沉系数演化趋势基本一致,均是随黏聚力的增加下沉系数逐渐降低并趋于稳定。在 3.05 MPa 的低黏聚力状态下,4 : 1 模型、2 : 1 模型、1 : 1 模型、0.5 : 1 模型中的下沉系数分别为 0.740、0.759、0.731、0.708,各模型中下沉系数均较大且数值较接近,在此黏聚力数值时下沉系数基本不随松散层厚度/基岩厚度比例的改变而改变。

当黏聚力自 3.05 MPa 提高至 10.10 MPa 时,0.5 : 1 模型中下沉系数降低幅度最大,自 0.708 降低至 0.265,1 : 1 模型降低幅度次之,自 0.731 降低至 0.367,2 : 1 模型降低幅度较小,自 0.759 降低至 0.560,4 : 1 模型降低幅度最小,自 0.740 降低至 0.728,则从上述分析可知,基岩厚度越厚,一定范围内提高黏聚力数值下沉系数降低越大。同时可以看出,同一岩层厚度下,随着黏聚力的增大下沉系数并非一直降低,而是存在一个临界黏聚力数值,当大于该临界值时进一步提高黏聚力时下沉系数基本无变化。对比发现,在 0.5 : 1、1 : 1、2 : 1 和 4 : 1 模型中该临界黏聚力分别是 7.05、10.10、15.15 和 20.2 MPa,该临界值呈现随着基岩厚度降低逐渐增大的趋势。

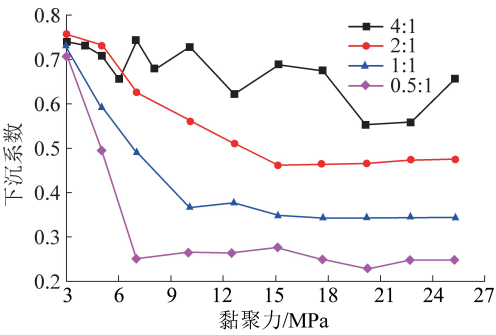


图 8 下沉系数与基岩黏聚力演化关系
Fig.8 Relationships between subsidence coefficients and bedrock cohesion

4.3 基岩内摩擦角对地表下沉的影响规律

模型高度不变,煤层厚度 4.04 m,煤层埋深 126.25 m,煤层下方岩层厚度 14.71 m,建立松散层厚度/基岩厚度分别为 4 : 1、2 : 1、1 : 1、0.5 : 1.0 模型,在此基础上依次改变内摩擦角(受计算过程影响,各模型内摩擦角选取并非完全相同),统计获得不同模型最大下沉量及对应下沉系数见表 9。不同下沉系数对比如图 9 所示。从图 9 可以看出,在不同模型中,下沉系数演化趋势基本一致,均是随内摩

表 8 不同基岩黏聚力、下沉量和下沉系数

Table 8 Statistical of subsidence values and subsidence coefficients with different cohesions in bedrock

模型	黏聚力/MPa	下沉量/m	下沉系数
4 : 1 模型	3.05	2.990	0.740
	4.05	2.963	0.733
	5.05	2.916	0.722
	6.05	2.655	0.657
	7.05	3.005	0.744
	8.05	2.739	0.678
	10.10	2.941	0.728
	12.625	2.515	0.623
	15.15	2.784	0.689
	17.675	2.727	0.675
	20.20	2.239	0.554
	22.725	2.264	0.560
2 : 1 模型	25.25	2.645	0.655
	3.05	3.067	0.759
	5.05	2.960	0.732
	7.05	2.528	0.626
	10.10	2.264	0.560
	12.625	2.061	0.510
	15.15	1.864	0.461
	17.675	1.876	0.464
	20.20	1.877	0.465
	22.725	1.921	0.475
	25.25	1.921	0.475
1 : 1 模型	3.05	2.955	0.731
	5.05	2.392	0.592
	7.05	1.985	0.491
	10.10	1.483	0.367
	12.625	1.524	0.377
	15.15	1.407	0.348
	17.675	1.391	0.344
	20.20	1.391	0.344
	22.725	1.391	0.344
	25.25	1.391	0.344
0.5 : 1.0 模型	3.05	2.862	0.708
	5.05	1.999	0.495
	7.05	1.022	0.253
	10.10	1.070	0.265
	12.5	1.069	0.265
	15.15	1.122	0.278
	17.675	1.006	0.249
	20.2	1.008	0.230
	22.725	1.002	0.248
	25.25	1.004	0.249
	7.05	1.022	0.253

擦角的增加下沉系数逐渐降低并趋于稳定。当内摩擦角自 5°提高至 15°时,0.5 : 1.0 模型下沉系数降低幅度最大,下沉系数自 0.495 降至 0.252,降幅达到 0.243,1 : 1 模型、2 : 1 模型和 4 : 1 模型降低幅度基本相同,1 : 1 模型中下沉系数自 0.592 降至 0.463,降幅为 0.129,2 : 1 模型和 4 : 1 模型中下沉系数基本自 0.722 降至 0.601,降幅为 0.121。

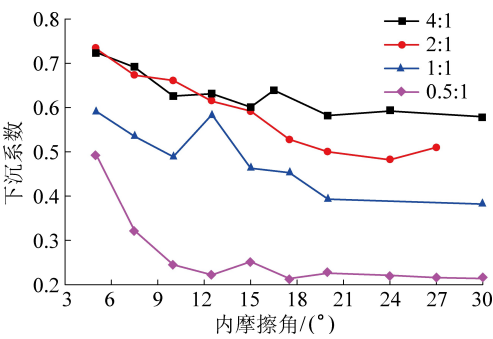


图 9 下沉系数与基岩内摩擦角演化关系

Fig.9 Relationships between subsidence coefficients and bedrock internal friction angles

表 9 不同基岩内摩擦角、下沉量和下沉系数

Table 9 Subsidence values and subsidence coefficients of models with different internal friction angles in bedrock

模型	内摩擦角/(°)	下沉量/m	下沉系数
4 : 1 模型	5	2.916	0.722
	7.5	2.792	0.691
	10	2.529	0.626
	12.5	2.549	0.631
	15	2.428	0.601
	16.5	2.581	0.639
	20	2.351	0.582
	24	2.392	0.592
	30	2.339	0.579
2 : 1 模型	5	2.960	0.733
	7.5	2.718	0.673
	10	2.671	0.661
	12.5	2.482	0.614
	15	2.391	0.592
	17.5	2.133	0.528
	20	2.018	0.500
	24	1.947	0.482
	27	2.060	0.510
1 : 1 模型	5	2.392	0.592
	7.5	2.163	0.535
	10	1.975	0.489
	12.5	2.359	0.584
	15	1.870	0.463
	17.5	1.831	0.453
	20	1.589	0.393
	30	1.542	0.382
2 : 1 模型	5	1.999	0.495
	7.5	1.300	0.322
	10	0.989	0.245
	12.5	0.895	0.222
	15	1.018	0.252
	17.5	0.866	0.214
	20	0.914	0.226
	24	0.893	0.221
	27	0.872	0.216
	30	0.864	0.214

同时可以看出,基岩厚度一定时存在一个临界内摩擦角,在小于临界值范围内改变内摩擦角值下

198

沉系数变化较大,而当大于该临界值时进一步提高内摩擦角值下沉系数基本无变化。对比发现,在 0.5 : 1 模型中该临界内摩擦角约是 12.5°,在 1 : 1、2 : 1 和 4 : 1 模型中该临界内摩擦角约是 20°。同时,虽然 1 : 1、2 : 1 和 4 : 1 模型临界内摩擦角数值一致,但是由于各模型基岩厚度的差异,在达到临界内摩擦角时,对应的下沉系数差异明显,1 : 1 模型下沉系数最小,其值为 0.393,2 : 1 模型次之,其值为 0.50,4 : 1 模型最大,其值为 0.582。达到临界内摩擦角后,地表下沉系数基本呈现基岩厚度越大,下沉系数越小,基岩厚度越小,下沉系数越大的反比关系。

5 结 论

- 1) 下沉系数基本呈现当松散层厚度与基岩厚度比 $r < 2$ 时,随着 r 的增大下沉系数迅速增大,而当 $r \geq 2$ 时下沉系数基本趋于稳定,不再随 r 的增大而增大。
- 2) 下沉系数基本随着埋深与煤厚比 P 的增大呈现线性降低趋势。当基岩厚度较大时(例如 1 : 1 模型),地表下沉系数对埋深与煤厚比的敏感性较低,当基岩较薄时(例如 4 : 1 模型),地表下沉系数对埋深与煤厚比的敏感性较高。
- 3) 下沉系数基本呈现随着抗拉强度的增大逐渐降低的趋势。基岩厚度一定时,存在临界黏聚力,在小于临界值的范围内提高黏聚力下沉系数逐渐降低,当超过该临界值时进一步提高黏聚力下沉系数基本无变化;同样地,存在临界内摩擦角,在小于临界值的范围内提高内摩擦角下沉系数逐渐降低,而当大于该临界值时进一步提高内摩擦角值下沉系数基本无变化。

参考文献(References):

[1] 李德海,陈祥恩,李东升. 厚松散层下开采地表移动预计及岩移参数分析[J]. 矿山压力与顶板管理,2002(1):90-92,109.
LI Dehai, CHEN Xiangen, LI Dongsheng. Estimate of surface movement and rock movement parameter analysis under thick soil layer mining[J]. Mine Pressure and Roof Management,2002(1):90-92,109.

[2] 王金庄,李永树,周 雄,等. 巨厚松散层下采煤地表移动规律的研究[J]. 煤炭学报,1997,22(1):18-21.
WANG Jinzhuang, LI Yongshu, ZHOU Xiong, et al. Ground movement caused by mining under thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 1997,22(1):18-21.

[3] CHANG Z Q, WANG J Z, CHEN M, et al. A novel ground surface subsidence prediction model for sub - critical mining in the geological condition of a thick alluvium layer [J]. Frontiers of Earth Science, 2014,9(2):330-341.

[4] 方新秋,黄汉富,金 桃,等. 厚表土薄基岩煤层开采覆岩运动规律[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S1):2700-2706.
FANG Xinqiu, HUANG Hanfu, JIN Tao, et al. Movement rules of

- overlying strata around longwall mining in thin bedrock with thick surface soil [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S1): 2700–2706.
- [5] 杨永康, 康天合, 兰毅, 等. 浅埋综放L工作面开采方法及其矿压实测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 244–253.
YANG Yongkang, KANG Tianhe, LAN Yi, *et al.* Study of mining method of L-shaped working face by fully-mechanized sublevel caving mining in shallow-buried thick coal seam and its underground pressure field observation [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 244–253.
 - [6] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵. 浅埋特大采高综采工作面关键层“悬臂梁”结构运动对端面漏冒的影响[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(7): 1197–1204.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Influence of key strata cantilever structure motion on end-face fall in fully-mechanized face with super great mining height [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(7): 1197–1204.
 - [7] 陈忠辉, 冯竞竞, 肖彩彩, 等. 浅埋深厚煤层综放开采顶板断裂力学模型[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(5): 449–452.
CHEN Zhonghui, FENG Jingjing, XIAO Caicai, *et al.* Fracture mechanical model of key roof for fully-mechanized top-coal caving in shallow thick coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(5): 449–452.
 - [8] 杨治林, 余学义, 郭何明, 等. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(12): 1763–1766.
YANG Zhilin, YU Xueyi, GUO Heming, *et al.* Study of controlling catastrophe for roof strata in shallow seam longwall mining [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(12): 1763–1766.
 - [9] 刘学生, 宁建国, 谭云亮. 近浅埋煤层顶板破断力学模型研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(2): 214–219.
LIU Xuesheng, NING Jianguo, TAN Yunliang. Study on roof breaking model of near shallow seam [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2014, 31(2): 214–219.
 - [10] 徐平, 周跃进, 张敏霞, 等. 厚松散层薄基岩充填开采覆岩裂隙发育分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(4): 617–622.
XU Ping, ZHOU Yuejin, ZHANG Minxia, *et al.* Fracture development of overlying strata by backfill mining under thick alluvium and thin bedrock [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2015, 32(4): 617–622.
 - [11] 杜锋, 白海波, 黄汉富, 等. 薄基岩综放采场基本顶周期来压力学分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(3): 362–369.
DU Feng, BAI Haibo, HUANG Hanfu, *et al.* Mechanical analysis of periodic weighting of main roof in longwall top coal caving face with thin bedrock roof [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2013, 42(3): 362–369.
 - [12] 杜锋, 白海波. 厚松散层薄基岩综放开采覆岩破断机理研究[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(7): 1105–1110.
DU Feng, BAI Haibo. Mechanism research of overlying strata activity with fully mechanized caving in thin bedrock with thick alluvium [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(7): 1105–1110.
 - [13] SINGH R P, YADAV R N. Prediction of subsidence due to coal mining in Raniganj coalfield, West Bengal, India [J]. *Engineering Geology*, 1995, 39(1/2): 103–111.
 - [14] SINGH R, SINGH T N. Investigation into the behaviour of a support system and roof strata during sublevel caving of a thick coal seam [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1999, 17(1): 21–35.
 - [15] 高超, 徐乃忠, 刘贵. 特厚煤层综放开采地表沉陷预计模型算法改进[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 939–944.
GAO Chao, XU Naizhong, LIU Gui. Improvement on prediction model algorithm for surface subsidence of extra thick seam using fully-mechanized top coal caving method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 939–944.
 - [16] 杨建立, 左建平, 孙凯, 等. 大采高多断层工作面综放诱发地表沉陷观测及数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1216–1224.
YANG Jianli, ZUO Jianping, SUN Kai, *et al.* In-situ observation and numerical analysis of surface subsidence of high working face with multi-fault induced by full-mechanized mining activity [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1216–1224.
 - [17] 彭林军, 赵晓东, 李术才. 深部开采地表沉陷规律模拟研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(6): 1910–1914.
PENG Linjun, ZHAO Xiaodong, LI Shucai. Simulating research on rules of surface subsidence due to deep mining [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2011, 32(6): 1910–1914.
 - [18] 于秋鸽, 张华兴, 邓伟男, 等. 基于关键层理论的地表偏态下沉影响因素分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1322–1327.
YU Qiuge, ZHANG Huaxing, DENG Weinan, *et al.* Analysis of influencing factors of surface skewed subsidence based on key strata theory [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 132–1327.
 - [19] 谭志祥, 邓喀中. 综放面地表变形预计参数综合分析及应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 1041–1047.
TAN Zhixiang, DENG Kazhong. Comprehensive analysis and application study on ground deformation prediction parameters of fully-mechanized mining with sublevel caving [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 1041–1047.
 - [20] 张文泉, 刘海林, 赵凯. 厚松散层薄基岩条带开采地表沉陷影响因素研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(6): 1065–1071.
ZHANG Wenquan, LIU Hailin, ZHAO Kai. Influential factors on surface subsidence in stripe mining under thick unconsolidated layers and thin bedrock [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2016, 33(6): 1065–1071.
 - [21] 张立亚, 邓喀中. 多煤层条带开采地表移动规律[J]. *煤炭学报*, 2008, (1): 28–32.
ZHANG Liya, DENG Kazhong. The law of surface movement for multi-coal seam strip mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, (1): 28–32.
 - [22] 郭振华, 周华强, 武龙飞, 等. 膏体充填工作面顶板及地表沉陷过程数值模拟[J]. *采矿与安全工程学报*, 2008, (2): 172–175.
GUO Zhenhua, ZHOU Huaqiang, WU Longfei, *et al.* Numerical simulation for roof and surface subsidence process caused by paste filling [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2008, (2): 172–175.
 - [23] 吴昊燕. Escabrosa 石灰岩断裂特性及其岩芯饼化机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
 - [24] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1165–1186.
 - [25] CAI M, KAISER PK, UNO H, *et al.* Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41: 3–19.
 - [26] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.