

瓦厂坪铝土矿综采工作面围岩变形与采动应力分布规律研究

雷显权^{1,2,3}, 刘福春^{1,2}, 熊有为^{1,2}, 刘恩彦^{1,2}, 朱国辉^{1,2}

(1. 长沙有色冶金设计研究院有限公司, 长沙 410019;

2. 深井矿山安全高效开采技术湖南省工程研究中心, 长沙 410019;

3. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 瓦厂坪铝土矿是国内首个采用综合机械化开采工艺的有色金属地下矿山。采用三维弹塑性有限元数值模型对综采工作面回采过程进行了计算模拟, 揭示了工作面顶、底板围岩的变形特征和采动应力的空间分布特征与演化规律。结果表明: (1)工作面矿层采出后, 采空区顶板发生沉降变形, 底板发生鼓起变形; 变形量在工作面中部最大, 往两端逐渐减小; 工作面长度越长, 顶、底板变形越大。(2)采动应力在工作面两端和前后方产生应力集中, 形成高支承压力区; 采空区顶板大范围应力降低, 最小主应力为近竖直向拉应力。(3)工作面前方应力集中区随工作面推进向前转移, 采动应力峰值随之逐渐增大; 采空区顶板采动应力在工作面推进过程中保持相对稳定。研究结果对合理确定工作面长度、工作面顶板精准支护、应力集中区稳定性控制和采空区顶板安全管理等工作具有重要指导作用。

关键词: 瓦厂坪铝土矿; 综合机械化开采; 回采工作面; 围岩变形; 采动应力

文章编号: **中图分类号:** TD862 **文献标志码:** A

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801606); 长沙有色冶金设计研究院有限公司科研业务建设项目(2020-15)

收稿日期: 2021-03-18; **修订日期:** 2021-08-05

通信作者: 刘福春, 研究员级高工, 学士; 电话: 0731-84397210; E-mail: lfc2210@sina.com

铝土矿是一种重要的战略性矿产, 铝土矿资源的持续稳定供给对于保障我国铝产业可持续、高质量发展具有重要意义^[1-2]。虽然我国铝土矿资源总量比较丰富, 但由于氧化铝产能扩张迅速, 对铝矿石的消耗量极大, 铝土矿资源自我供给和自我保障能力严重不足^[3-4]。导致这一问题的重要原因之一就是我国铝土矿地

下开采难度大、成本高、规模小、产能低。目前，国内地下开采铝土矿山通常采用的采矿方法有壁式崩落法、房柱法、分段空场法和分层充填法等^[5-6]。但是，受矿体产状、矿岩性质和开采技术条件等因素的限制，上述方法在铝土矿实际开采过程中存在较多问题和难点，例如：1）矿体连续性、完整性较差，难以大规模回采，开采效率低；2）矿石贫化率、损失率高，综合回收率仅 30%~50%，资源浪费严重；3）矿石有粘结性，易结块成拱，放矿困难；4）顶板多为软弱岩体，强度较低，易垮塌、片帮、冒顶，安全风险高，地压管理难度大；5）开采工艺复杂，劳动强度大，生产效率低，采矿成本高；等等。因此，为解决以上难题，亟需研发新的地下铝土矿采矿方法，以提高综合开采绩效。

作为一种安全、高效、先进的采矿技术，综合机械化开采工艺以往主要为煤矿所采用。考虑到铝土矿与煤矿矿岩性质和开采技术条件的相似性，近年来一些学者尝试将煤矿综采工艺应用到铝土矿地下开采^[7-10]。与铝土矿山传统的开采工艺相比，综采工艺具有机械化程度高、可连续开采、生产效率及资源回收率高、安全保障条件好、井巷工程量及人员配置少、综合成本较低等优势。国家电投集团贵州遵义产业发展有限公司在国内首次将综采工艺应用在瓦厂坪铝土矿，根据矿床开采技术条件提出了走向长壁式综合机械化采矿方法，对综采工艺的技术可行性、三机配套选型、工艺运用问题和成本可行性进行了详细分析研究^[11-14]，并建设综采试验区进行试采，取得了良好效果。

在综采理论与技术研究方面，工作面围岩的应力分布规律和变形破坏特征一直以来是国内外学者研究的重点。谢和平等^[15]通过理论分析和力学实验，研究了不同开采条件下工作面支承压力的分布规律，揭示了工作面前方煤体的采动力学特征。康红普等^[16]采用 FLAC3D 软件模拟研究了掘进工作面周围应力、位移和破坏区的分布特征及变化规律。王金安等^[17]通过数值模拟分析，研究了综放工作面开采速率对围岩应力重分布和变形破坏特征的影响。刘杰等^[18]采用实时应力监测系统，研究了平煤二矿深部工作面沿走向和倾向的应力分布及变化规律。王家臣等^[19]采用理论分析、数值模拟和现场实测等综合手段，研究了口孜东矿西翼采区千米深井超长工作面采动应力的旋转特征及其对围岩稳定性的影响。程利兴等^[20]以口孜东矿 121302 工作面为研究对象，通过现场矿压动态监测，研究了深井孤岛工作面回采过程中的应力动态演化规律及围岩变形破坏演化特征。此

外，耿宏波等^[21]、郝学等^[22]和邢东升等^[23]也分别采用理论分析、相似模拟试验和现场观测等手段对工作面围岩的应力（矿压）分布规律及变形破坏特征进行了研究。由于综采工艺在铝土矿等有色金属矿山的应用刚起步不久，目前尚缺乏对铝土矿综采工作面围岩变形特征和应力分布规律的系统性研究。

本文以瓦厂坪铝土矿综采试验区为研究对象，根据首采矿块的地质特征、矿岩条件、赋存环境和工作面参数，建立了综采试验区三维数值计算模型，采用弹性有限元数值分析方法对工作面回采过程进行了计算模拟，揭示了工作面顶、底板围岩的变形特征和采动应力的空间分布特征与演化规律，为合理确定工作面长度、工作面精准支护、围岩稳定性控制和顶板安全管理提供理论依据。

1 工程概况

瓦厂坪铝土矿位于贵州省务川县浞水镇北部，直线距离约 5km，矿区面积 10.13km²，地表标高+1158~+1631m。矿床类型属一水硬铝石沉积型铝土矿。矿体呈层状产于二叠系中统梁山组中部，赋存较稳定。矿体走向长约 3300m，最大宽度 2850m，往南西逐渐变窄。矿体铅垂厚度平均 2.55m，厚度变化呈渐变过渡特征。矿层产状与围岩地层一致，倾角变化总体较平缓。累计探获铝土矿石各级资源储量约 3890 万吨，为一大型地下铝土矿床^[24-25]。

矿山采用平硐、上山开拓方式，走向长壁后退式采矿方法，综合机械化开采工艺，设计生产能力 100 万 t/a。全矿分东、西两翼开采，其中东翼一采区 1102 采场作为首采区进行综采试验，见图 1。该矿块位于矿区 3~15 号勘探线之间，标高+1240~+1301m，平均埋深 300m，走向长 600m，倾向投影宽 120m，运输巷道长 770m，回风巷道长 783m，设计可采储量约 43 万吨^[8,12]。

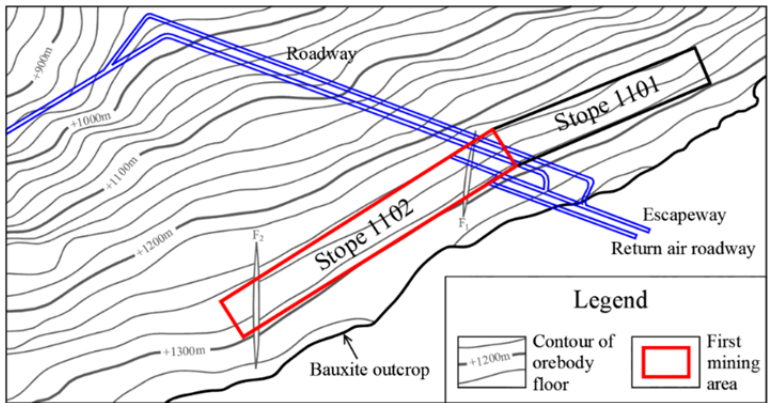


图 1 综采试验区布置图

Fig. 1 Layout plan of the fully mechanized mining test area

1102 采场位于区域一级褶皱鹿池向斜东翼，地层倾角较小，未发现明显二级褶皱。从地质勘探及运输、回风巷道的实际揭露情况来看，该采场范围内断层数量较少，规模较小，构造总体较为简单。采场范围内矿体呈单一层状产出，厚度较稳定，真厚度一般 2.0m 左右，最小 0.5m（铅垂厚 0.54m），最大超过 3.0m，平均 1.97m（铅垂厚 2.16m）。矿层倾角多在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间，局部超过 30° ，平均 21° ，变化较缓^[24]。根据矿体发育和赋存特征，对比煤矿综采技术经验，该采场适宜采用综采工艺。综采适应性研究预选采矿机截割高度 1.5~2.6m、液压支架高度 1.2~2.8m。综合考虑矿体厚度变化、采矿贫化损失和采出矿石品位要求等多种因素，确定工作面采高 2.0m^[8,12]。

矿石结构主要呈土状~半土状、碎屑状、豆鲕状和致密块状，品质优良。矿石密度 $2.60\sim 2.83\text{t/m}^3$ ，平均 2.76t/m^3 ；单轴抗压强度 2.6~7.8MPa，平均 4.71MPa；松散系数 1.56。1102 采场范围内矿石的普氏硬度系数多在 0.47~1.8 之间，大部分矿石在硬度上满足采矿机要求。少量硬度较大的致密状矿石由于分布零散、集中度不高，对综采工艺影响不大^[8,12]。

矿岩层地质结构如图 2 所示。矿体间接顶板为二叠系中统栖霞组下部的细晶灰岩、泥质灰岩，强度较大，稳定性好。直接顶板为梁山组白云质灰岩、泥灰岩、炭质泥岩，单轴抗压强度 0.46~24.4MPa，一般 12~14MPa，属软质岩石，遇水即松散解体，稳定性差，矿石采出后易垮落。直接底板为梁山组铝土岩、铝质泥岩，单轴抗压强度 8.9~30.1MPa，普氏硬度系数 0.89~3.01，属较坚硬岩石，稳固性较好，能够承受综采机械设备的支撑力^[8,12]。

矿区位于黔北喀斯特岩溶地区，铝土矿层之上是巨厚的碳酸盐岩含水层，可直接向矿层充水，增加了矿床开采的难度。而且，该含水层的水主要以岩溶管道（即暗河）形式存在^[26]，更增加了矿区水文地质条件的复杂性，开采时需加强水文监测和防治水措施，防止井下突泥涌水。

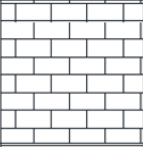
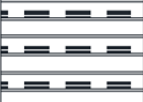
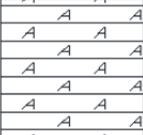
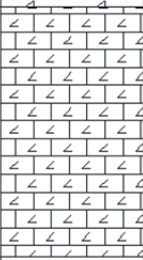
Stratum	Column	Thickness /m	Code	Lithology
Indirect roof		>140	P ₂ q	Fine grained limestone, argillaceous limestone, with bioclastic marl.
Immediate roof		3.2	P ₂ l	Dolomitic limestone, marl, carbonaceous mudstone.
Ore bed		2.2	P ₂ l	Bauxite.
Immediate floor		4.0	P ₂ l	Bauxitic rock, aluminous mudstone.
Indirect floor (upper)		7.0	C ₂ h	Medium - Coarse grained dolomitic limestone.
Indirect floor (lower)		>400	S ₁₋₂ hj	Shale, silty shale.

图 2 矿岩层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the rock strata and ore bed

2 综采过程数值模拟计算

2.1 数值计算模型的建立

根据瓦厂坪铝土矿 1102 采场的地质特征和工作面布置参数，建立了综采试验区的数值计算概念模型。模型长 300m、宽 200m、高 150m，工作面沿矿块倾向投影长度 120m，沿矿块走向回采长度 200m，倾角 21°，与矿层倾角一致。根据矿岩层地质结构，模型在竖直向上分为 6 层，各层铅垂厚度分别为：铝土矿层 2.2m、直接顶板 3.2m、间接顶板 43.2~119.9m、直接底板 4.0m、上层间接底板 7.0m、下层间接底板 13.6~90.4m。采用 8 节点 6 面体单元对三维实体模型进行网格剖分。为了提高工作面附近网格的计算精度以及整体模型的求解效率，矿层和直接顶、底板网格划分较为精细，间接顶、底板网格划分略为稀疏。网格剖分完成后的模型共有 155280 个单元和 161772 个节点，如图 3 所示。

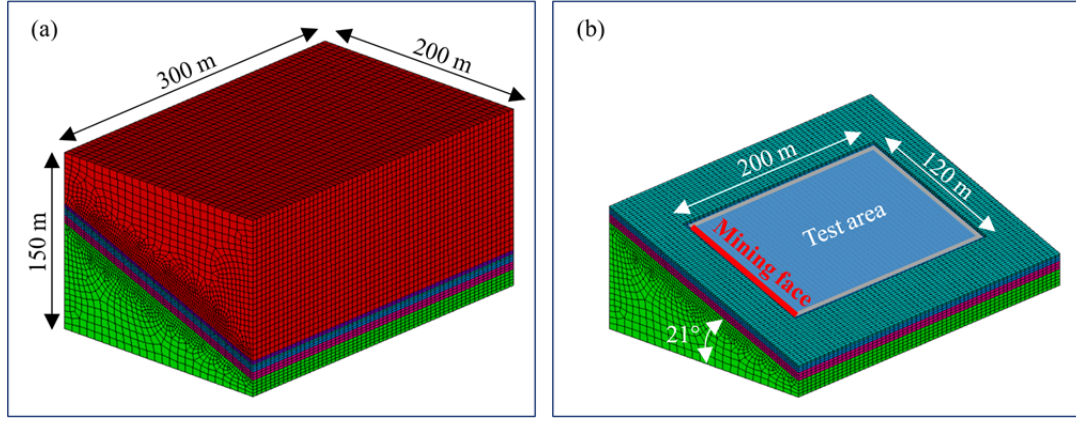


图3 三维数值计算模型

(a)整体模型；(b)工作面局部模型。不同颜色代表不同矿岩层。

Fig. 3 3D numerical calculation model

(a)Whole model; (b)Local model of the mining face. Different colors represent different layers of the rock strata and ore bed.

2.2 本构模型及物理力学参数

采用弹塑性本构模型来描述矿岩层的受力变形行为，采用 Drucker-Prager 准则联合 Rankine 准则来判定矿岩层的压剪屈服和拉伸破坏。Drucker-Prager 准则是 Mohr-Coulomb 准则的扩展，既能够反映体积应力、剪应力和中间主应力对岩体强度的影响，还考虑了静水压力的作用，能够较好地解释岩石材料在静水压力下的压剪屈服和破坏现象，被广泛应用于隧洞、巷道、边坡和采矿等^[27-32]岩土工程相关力学问题的理论研究和数值分析。Rankine 准则即最大拉应力准则，当最大拉应力达到岩体抗拉强度，岩体发生拉伸破坏。

Drucker-Prager 准则的数学表达式为：

$$F_{DP} = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (1)$$

式中： F_{DP} 为 Drucker-Prager 屈服函数； $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 为应力张量第一不变量； $J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ 为应力偏张量第二不变量； α 和

k 为与岩石粘聚力 c 和内摩擦角 φ 有关的实验常数，其中： $\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$ ，

$$k = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}。$$

Rankine 准则的数学表达式为：

$$F_R = I_1 + 2\sqrt{3J_2} \cos \theta - 3\sigma_t = 0 \quad (2)$$

式中： F_R 为 Rankine 屈服函数； θ 为应力 Lode 角； σ_t 为抗拉强度； I_1 和 J_2 分别为应力张量第一不变量和应力偏张量第二不变量。

模型各层物理力学参数取瓦厂坪铝土矿矿体及顶、底板围岩力学测试结果的平均值^[10,24]，详见表 1。

表 1 模型物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the model

Stratum	Density ρ / (g•cm ⁻³)	Young's modulus E / GPa	Poisson's ratio ν	Cohesion c / MPa	Internal friction angle φ / °	Uniaxial compressive strength σ_c / MPa	Tensile strength σ_t / MPa
Indirect roof	2.68	56.3	0.28	4.59	37.21	46.27	3.82
Immediate roof	2.73	12.4	0.21	1.61	34.63	25.85	1.35
Ore bed	2.66	10.9	0.22	0.53	26.79	4.71	0.32
Immediate floor	2.71	23.6	0.38	1.57	34.38	19.58	1.34
Indirect floor (upper)	2.78	44.3	0.32	2.38	34.78	41.65	3.46
Indirect floor (lower)	2.75	30.5	0.26	5.62	27.40	10.84	4.89

2.3 初始应力场与边界条件

矿区位于黔东南大娄山东支高原山地区，现今区域构造应力场以近东西向挤压为主。由于矿区没有地应力实测资料，因此结合区域应力场特征和矿区地形特征，并参考 GB/T 50218《工程岩体分级标准》规范对岩体初始应力场评估的要求，推定矿区初始应力场处于静水应力状态，应力大小等于上覆岩层重量。模型底部和四周边界的法向位移被约束，未约束方向上可自由滑移。模型竖直方向上施加 9.8m/s² 的重力加速度。模型顶部边界施加上覆岩层自重压力，根据上覆岩层厚度和平均体重估算其值为 4MPa。

2.4 综采过程模拟计算步骤

采用三维弹塑性有限元分析软件进行数值模拟计算。首先按照上述模型力学参数和边界条件，计算获得符合初始应力场条件的回采前初始模型。然后根据走向长壁式综采工艺，沿采场走向进行回采，计算回采过程中模型的位移、应力和应变。工作面共向前回采 200m，分 10 步进行，每步向前推进 20m。为了探讨工作面长度对采场围岩变形及其稳定性的影响，进一步采用二维剖面模型分别模拟了 60m、90m 和 120m 等 3 种不同工作面长度的工况。

3 数值模拟结果

3.1 采场顶、底板变形特征与规律

图 4 显示了回采工作面推进 200m 时三维模型的竖向位移特征。从图 4 可以看出，当矿层采出后，整个采空区的顶、底板都发生了不同程度的挠曲变形。其中，顶板发生沉降变形，底板发生鼓起变形。铝土矿综采工作面采空区顶、底板的这种变形特征与煤矿综采工作面相似，都是因为矿体采出，顶、底板失去原有支承力后在采动应力作用下协调变形的结果。

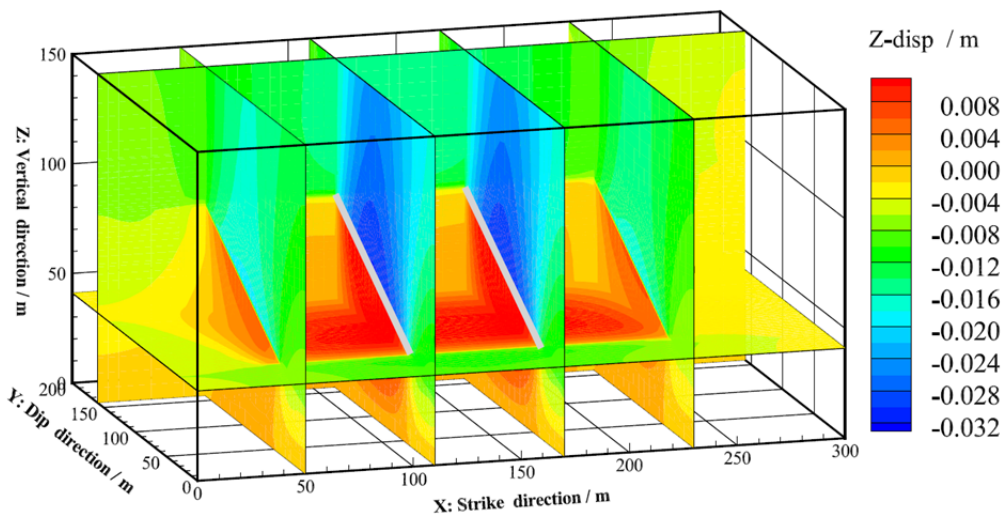


图 4 三维模型竖向位移云图（回采 200m 时）

Fig.4 Contour of the vertical displacement of the 3D model (when stoping 200m)

图 5 显示了工作面长度分别为 60m、90m 和 120m 的 3 个二维剖面模型（沿工作面倾向建模）的竖向位移特征。从图 5 可以看出，3 个模型的采空区顶、底板总体变形特征基本相似，但变形量存在明显差异。图 6 进一步定量对比了 3 个模型的顶、底板变形的差异性。从图 6 可以看出，工作面长度越长，顶板沉降

量和底板鼓起量越大。沉降变形和鼓起变形的最大部位都位于采空区中部，变形量由中部往两侧呈抛物线式逐渐减小。由于矿层存在一定的倾斜，采空区顶板沉降变形和底板鼓起变形在工作面倾向上并不完全对称。

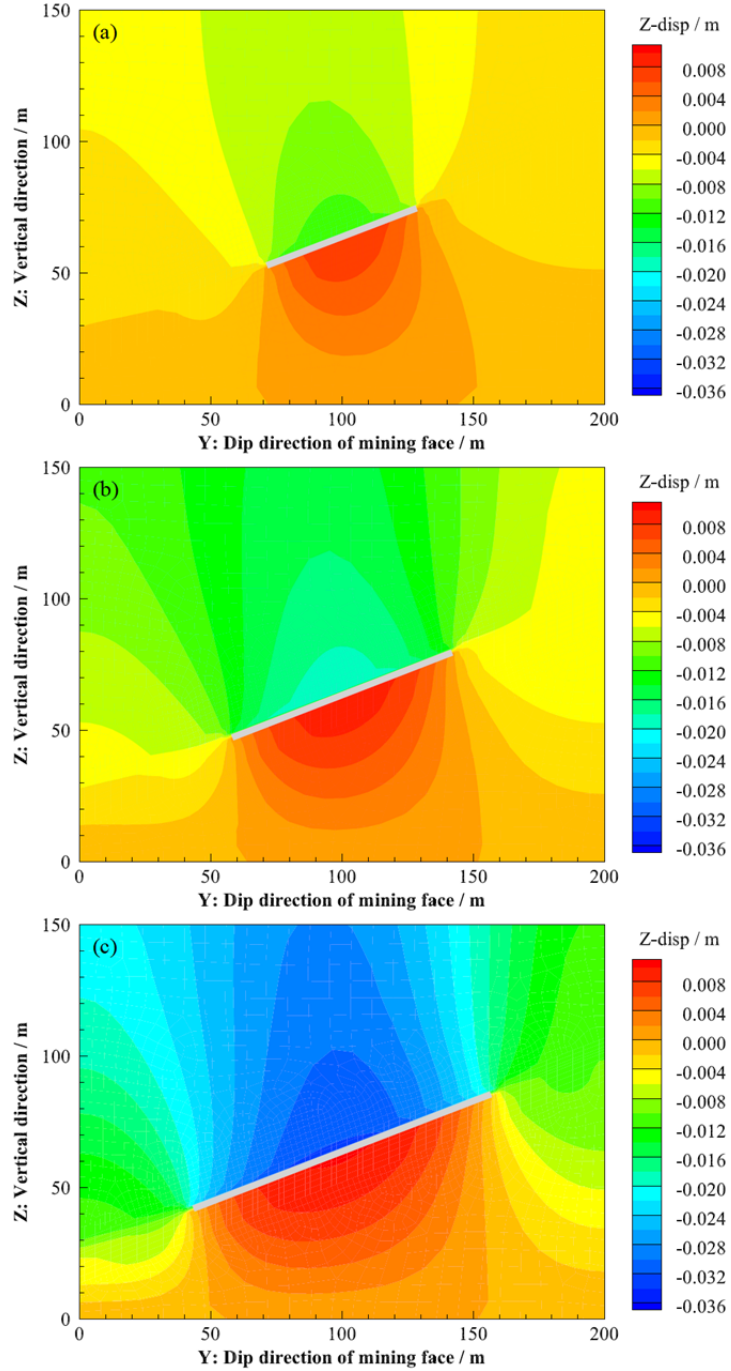


图 5 不同工作面长度模型竖向位移云图

(a)L=60m; (b)L=90m; (c)L=120m. L 为工作面长度.

Fig.5 Contour of the vertical displacement of models with different length of mining face

(a)L=60m; (b)L=90m; (c)L=120m. L is the length of mining face.

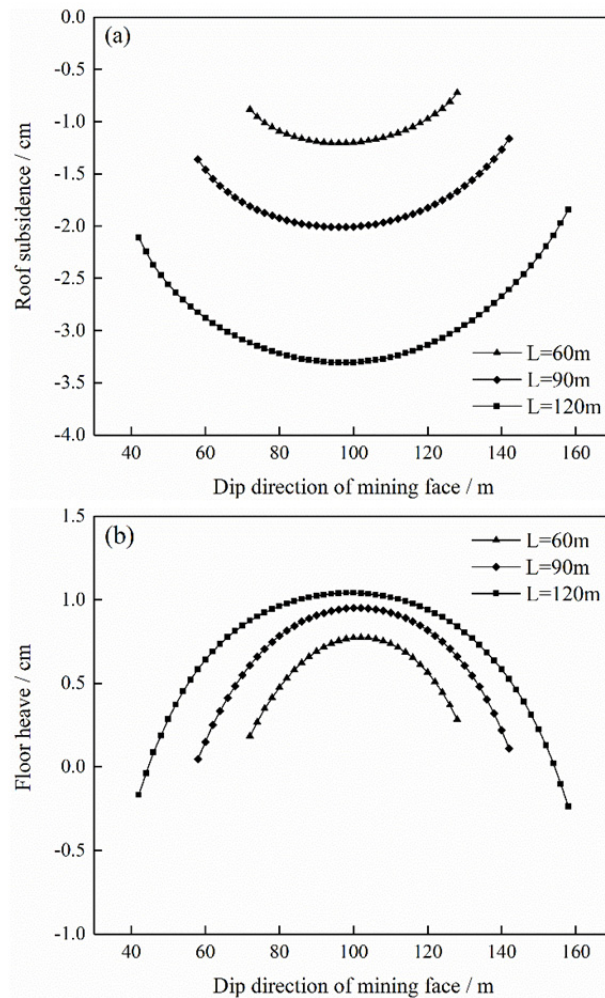


图 6 不同工作面长度模型顶、底板变形特征

(a)顶板沉降变形; (b)底板鼓起变形. L 为工作面长度.

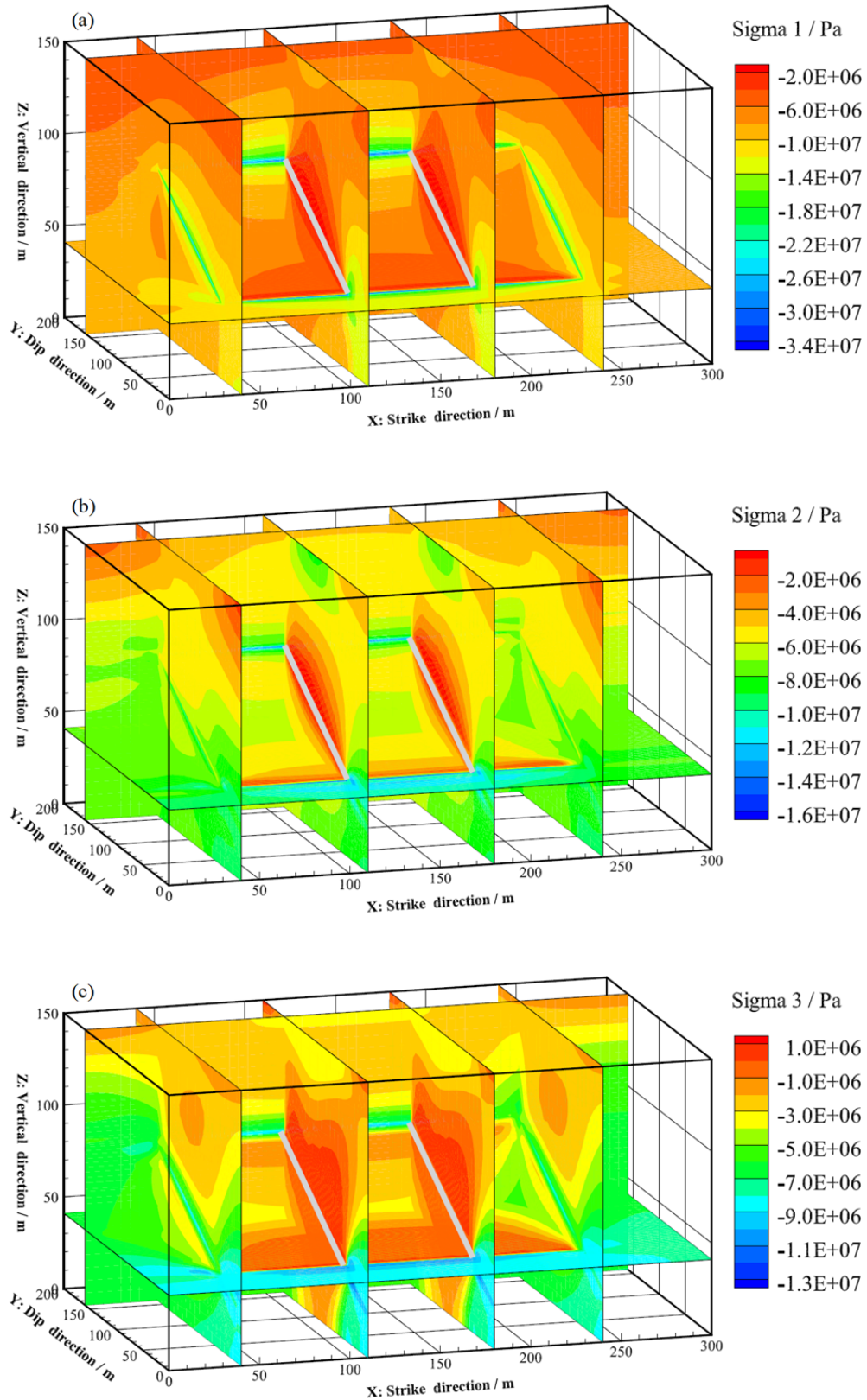
Fig.6 Deformation characteristics of the model roof and floor with different lengths of mining face

(a)Roof subsidence deformation; (b)Floor heave deformation. L is the length of mining face.

3.2 采动应力分布特征及演化规律

图 7 显示了回采工作面推进 200m 时三维模型的应力分布特征。图 8 进一步从二维剖面模型（沿工作面倾向建模）的角度显示了应力分布特征。参考材料力学对应力正负号的规定，本文统一约定压应力为负、拉应力为正。从图 7 和图 8 可以看出，当矿层采出后，采动应力在采空区四周边缘也就是工作面的两端和前后方局部地带产生应力集中，形成高支承压力区。在应力性质上，三个主应力在应力集中区均为压应力；在应力量级上，最大主应力和最大剪应力分别可高达

-44MPa 和 16MPa。由于矿体采出，原有支承力消失，采空区顶、底板尤其是顶板大范围应力降低。值得注意的是，顶板竖直方向应力为拉应力，变形以近竖直向张应变为特征，反映了采空区顶板在竖向上的拉张应力状态和变形特征。



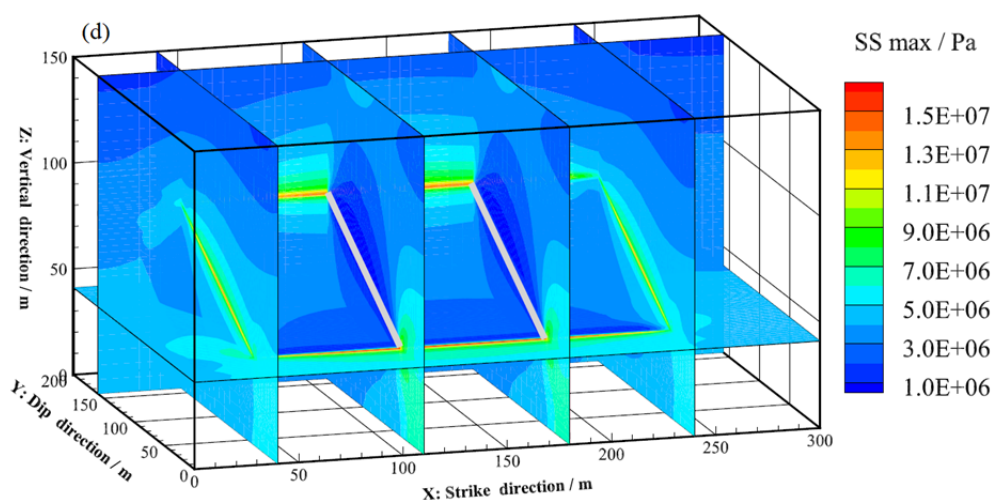


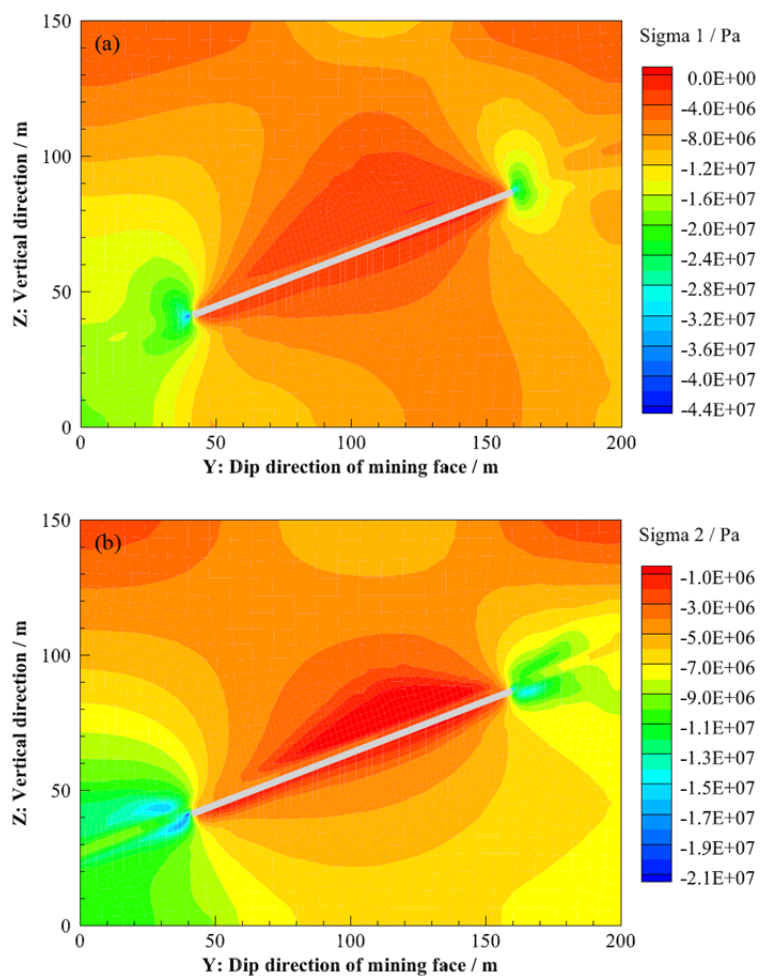
图 7 三维模型应力云图 (回采 200m 时)

(a)最大主应力; (b)中间主应力; (c)最小主应力; (d)最大剪应力.

Fig.7 Stress contour maps of the 3D model (when stoping 200m)

(a) Maximum principal stress; (b) Intermediate principal stress; (c) Minimum principal stress; (d)

Maximum shear stress.



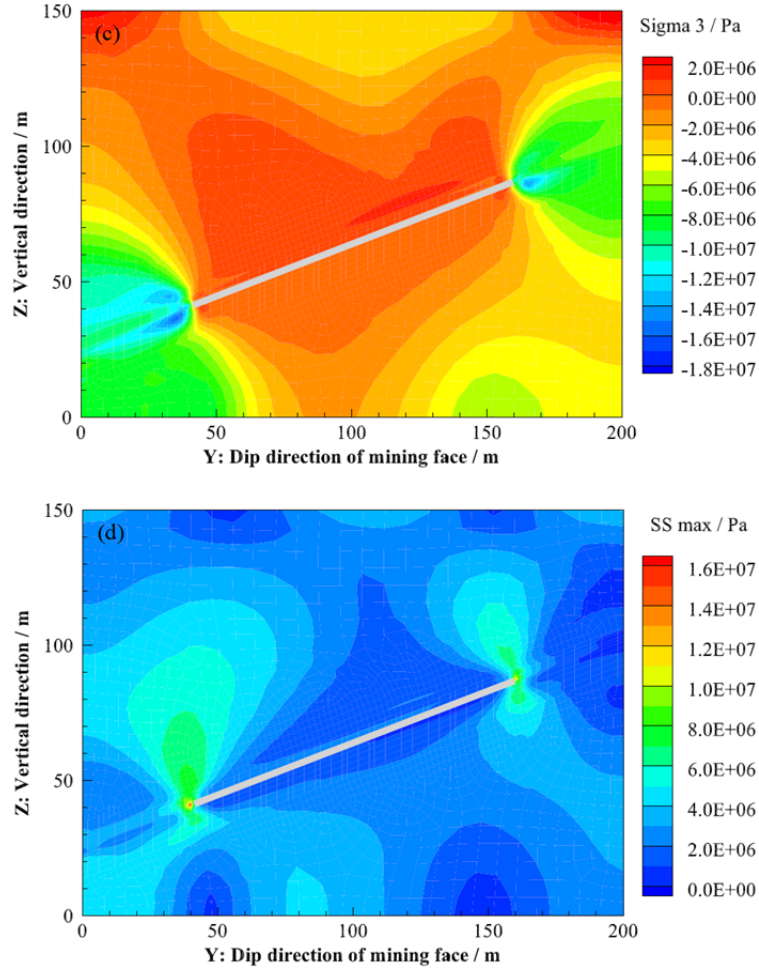


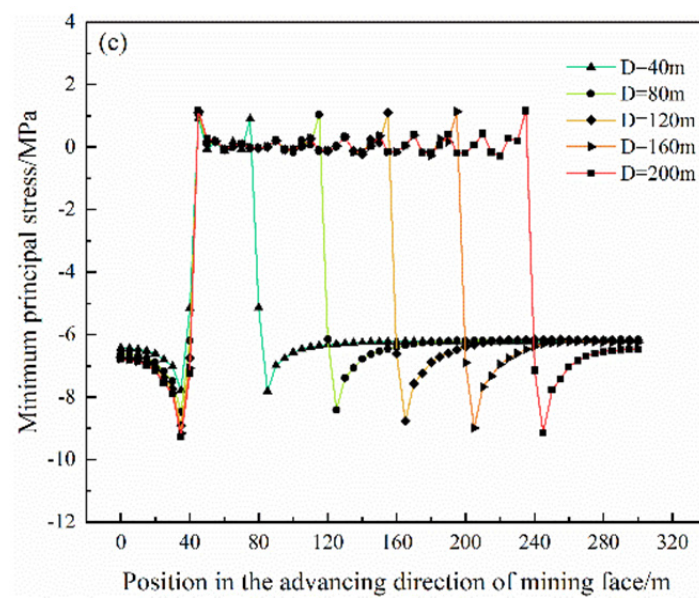
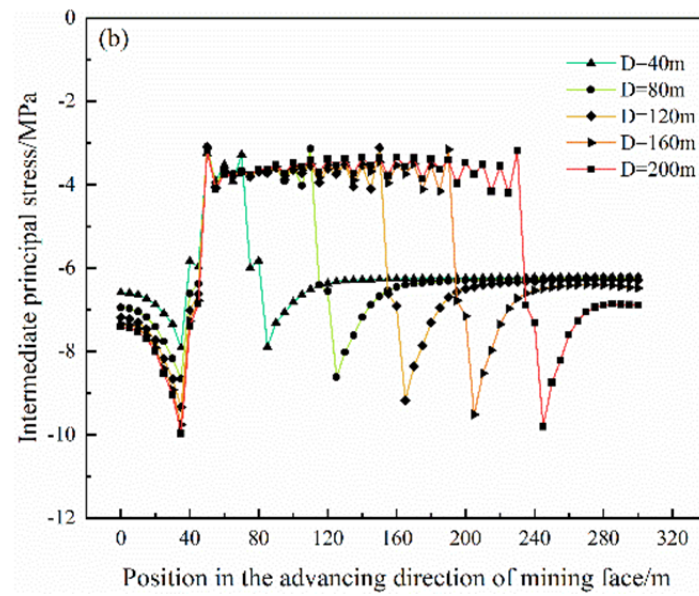
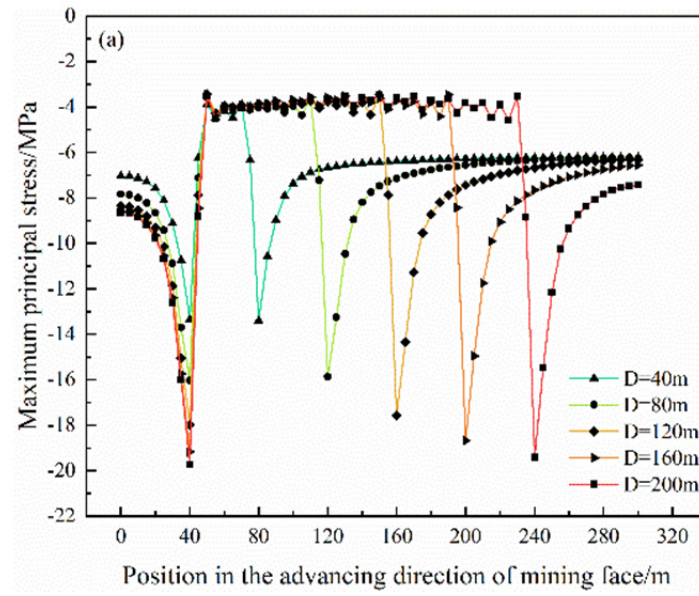
图 8 二维剖面模型应力云图

(a)最大主应力; (b)中间主应力; (c)最小主应力; (d)最大剪应力.

Fig.8 Stress contour maps of the 2D sectional model

(a) Maximum principal stress; (b) Intermediate principal stress; (c) Minimum principal stress; (d) Maximum shear stress.

图 9 显示了回采工作面推进过程中模型顶板中线节点（在工作面推进方向上布置的应力监测点）的采动应力演化特征。从图 9 可以看出，在空间上，采空区边缘即回采工作面的前后方局部地带是应力集中区，并随工作面的持续推进而向前转移；采空区顶板是应力降低区；从采空区边缘往未开采区域远处，采动应力逐渐减小并趋于初始应力。在时间上，随着回采工作面的向前推进，应力集中区的最大、中间、最小主应力和最大剪应力均逐渐增大，而采空区顶板和未开采区域的采动应力则相对较为稳定。



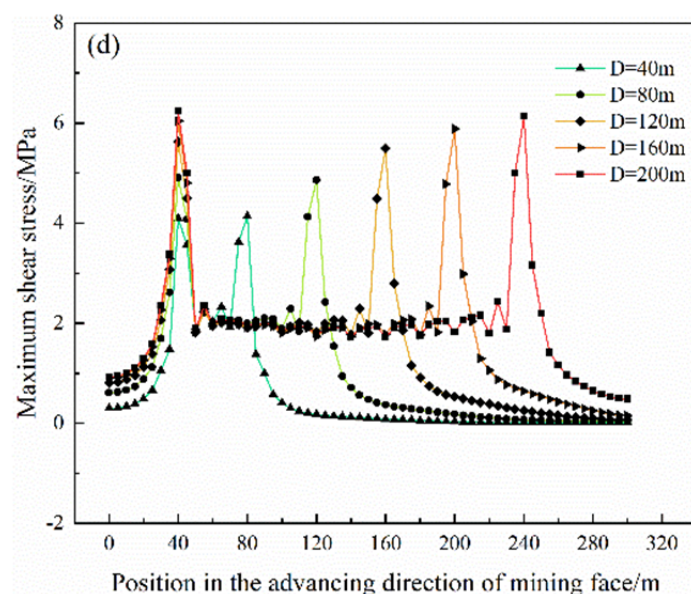


图 9 回采过程中模型顶板应力演化曲线图 (D 为工作面推进距离)

(a)最大主应力; (b)中间主应力; (c)最小主应力; (d)最大剪应力.

Fig.9 Stress evolution curves of the model roof during the stoping process (D is the advancing distance of mining face)

(a) Maximum principal stress; (b) Intermediate principal stress; (c) Minimum principal stress; (d) Maximum shear stress.

4 讨 论

本文采用数值模拟方法研究了瓦厂坪铝土矿综采工作面回采过程中顶、底板围岩的变形特征、采动应力分布特征及其演化规律,数值模拟结果与煤矿类似问题的理论分析^[21]、相似模拟试验^[22]和现场观测^[23]结果相吻合,对工作面长度确定、工作面顶板支护、围岩稳定性控制和顶板安全管理具有重要指导意义。

1) 为合理确定工作面长度提供方法和依据。瓦厂坪铝土矿首次将煤矿综采工艺应用到有色金属矿山,回采工作面的长度如何确定缺少理论依据,只能参考煤矿综采经验取值,但铝土矿的地质特征、矿岩条件和赋存环境与煤矿毕竟存在较大差异。从理论上讲,增加工作面长度有利于提高矿石采出率和机械化开采效率,但工作面越长,顶板暴露面积和采动地压越大,失稳风险也越高。因此,合理的工作面长度应从开采的经济性和安全性两方面统筹考虑确定。模拟结果显示,工作面长度为 60m 和 90m 时,顶板沉降变形较小,安全冗余度过大;工作面长

度为 120m 时，顶板沉降量和采动应力都在可接受范围内。结合煤矿工作面长度普通机采 120~150m、综采 150m 以上的经验取值，为安全起见，将瓦厂坪铝土矿综采试验工作面长度确定为 120m 是较为合理的。

2) 为工作面顶板差异化精准支护提供指导。瓦厂坪铝土矿综采工作面采用两柱掩护式液压支架进行支护，支护强度通过岩重法或传递岩梁法计算取值，并在整个工作面采用同一强度。但该方法确定的支护强度较为保守，局部地段存在较大冗余，造成支架支护能力浪费。模拟结果显示，工作面采空区顶板沉降变形并不均一，中部沉降量最大，往两侧逐渐减小，表明工作面顶板覆岩压力存在由中部往两端逐渐减小的变化规律。基于此规律，对于工作面不同位置，可以考虑采用差异化的支护强度并根据所需强度有针对性地选择支架，以实现工作面顶板精准支护和支架支护能力的高效利用。

3) 为围岩稳定性控制和顶板管理提供指导。模拟结果显示，回采工作面两端和前后方是应力集中区，支承压力大，应力灾害风险高，为了保证工作面前后方矿帮和回风、运输巷道围岩稳定，确保回采作业和采矿设备安全，应加强上述应力集中区的支护控制和安全防护。随着回采工作面的向前推进，采空区顶板暴露面积越来越大，垮落冒顶的风险也随之增大。对于综采工艺而言，为了避免工作面矿压过大，采空区顶板垮落是重要且必须的步骤。当采空区暴露面积较大但顶板尚未垮落时，应当加强工作面采矿作业安全管理并考虑采用人工干预方式主动落顶。模拟结果显示，采空区顶板处于拉张应力环境，这一方面有利于顶板自然垮落或人工切顶诱导垮落，另一方面也预示着存在较大的偶然垮落风险，因此应加强对采空区顶板的安全管理。

受限于所采用的基于连续介质力学理论的数值分析方法，本文数值计算模型难以直接模拟工作面推进过程中采空区顶板的垮落行为，这对进一步深入揭示工作面地压显现规律存在一定的不足，将在后续研究中解决。

5 结 论

1) 建立了瓦厂坪铝土矿综采试验区的三维数值计算模型，采用弹塑性有限元分析方法对综采工作面回采过程进行了计算模拟，揭示了工作面顶、底板围岩的变形特征和采动应力的空间分布特征与演化规律。

2) 工作面矿层采出后，采空区顶板发生沉降变形，底板发生鼓起变形，变

形量在工作面中部最大，往两端呈抛物线式逐渐减小。工作面长度越长，采空区顶板沉降量和底板鼓起量越大。

3) 采动应力在采空区四周边缘即工作面两端和前后方局部地带产生应力集中，形成高支承压力区。采空区顶板大范围应力降低，竖向应力为拉应力，竖向变形以张应变为特征。

4) 随着回采工作面向前推进，工作面前方应力集中区即支承压力区逐渐向前转移，采动应力峰值也随之逐渐增大。采空区顶板的采动应力在工作面推进过程中保持相对稳定。

致谢

感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

REFERENCES

- [1] 刘祥民. 中国铝土矿资源可持续发展战略研究[J]. 中国金属通报, 2005(14): 9-11.
LIU Xiang-min. Study on sustainable development strategy of bauxite resources in China[J]. China Metal Bulletin, 2005(14): 9-11.
- [2] 余欣未, 蒋显全, 谭小东, 等. 中国铝产业的发展现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(4): 709-718.
SHE Xin-wei, JIANG Xian-quan, TAN Xiao-dong, et al. Status and prospect for aluminum industrial development in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(4): 709-718.
- [3] 孙 莉, 肖克炎, 娄德波. 中国铝土矿资源潜力预测评价[J]. 地学前缘, 2018, 25(3): 82-94.
SUN Li, XIAO Ke-yan, LOU De-bo. Mineral prospectivity of bauxite resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 25(3): 82-94.
- [4] 雷显权, 潘晓林, 莫晓东, 等. 富云母高岭石铝土矿拜耳法溶出性能研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(2): 60-66.
LEI Xian-quan, PAN Xiao-lin, MO Xiao-dong, et al. Digestion performance of mica-and-kaolinite-rich bauxite by Bayer process[J], Nonferrous Metals (Extractive

Metallurgy), 2021(2): 60-66.

- [5] 陈述云. 铝土矿地下开采采矿方法模糊数学优选[J]. 有色金属(矿山部分), 2012, 64(6): 12-16.

CHEN Shu-yun. Optimization of underground bauxite mining method by fuzzy mathematics method[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2012,64(6): 12-16.

- [6] 罗淦华, 吴爱祥. 铝土矿地下开采方法及开采难点[J]. 现代矿业, 2016, 32(8): 7-9.

LUO Gan-hua, WU Ai-xiang. Underground aluminum deposit mining methods and mining difficulties[J]. Modern Mining, 2016, 32(8): 7-9.

- [7] 于 伟. 贺家圪台铝土矿长壁松动爆破综合机械化开采技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013: 1-144.

YU Wei. Research on the loosening blasting fully mechanized long wall mining technology in Hejiagetai bauxite[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013: 1-144.

- [8] 徐晓乾, 向 龙, 邵国君, 等. 瓦厂坪铝土矿 1102 工作面综采试验相关影响参数的分析与探讨[J]. 金属矿山, 2014(8): 37-40.

XU Xiao-qian, XIANG Long, SHAO Guo-jun, et al. Analysis and exploration on related influence parameters of 1102 fully-mechanized mining work face trial of Wachangping bauxite[J]. Metal Mine, 2014(8): 37-40.

- [9] 高士友, 王智强, 张荣亮. 缓倾斜铝土矿开采技术研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2016, 68(5): 14-16.

GAO Shi-you, WANG Zhi-qiang, ZHANG Rong-liang. Mining technical research of the gently-inclined bauxite in China[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2016, 68(5): 14-16.

- [10] 邱占伟. 瓦厂坪铝土矿边角矿体短壁开采方法设计研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017: 1-74.

QIU Zhan-wei. Research on mining the boundary orebody with short wall mining method in Wachangping bauxite[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017: 1-74.

- [11] 吴延平. 铝土矿上应用综合机械化开采工艺的可行性初探[J]. 世界有色金属, 2019(12): 33-34.

WU Yan-ping. Preliminary study on the feasibility of fully mechanized mining technology in bauxite mine[J]. World Nonferrous Metals, 2019(12): 33-34.

- [12] 陈 戈. 瓦厂坪铝土矿综采液压支架选型研究[J]. 煤矿机械, 2019, 40(5): 133-135.

CHEN Ge. Study on selection of fully mechanized hydraulic support in Wachangping bauxite mine[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(5): 133-135.

- [13] 石笑天. 综采工艺在铝土矿开采中的应用浅谈[J]. 世界有色金属, 2020(1): 52-53.

SHI Xiao-tian. Discussion on the application of fully mechanized mining technology in bauxite mining[J]. World Nonferrous Metals, 2020(1): 52-53.

- [14] 张成洋. 综采工艺在铝土矿使用及成本可行性分析[J]. 中国金属通报, 2020(11): 240-241.

ZHANG Cheng-yang. Application and cost feasibility analysis of fully mechanized mining technology in bauxite mine[J]. China Metal Bulletin, 2020(11): 240-241.

- [15] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1067-1074.

XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, LIU Jian-feng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067-1074.

- [16] 康红普, 王金华, 高富强. 掘进工作面围岩应力分布特征及其与支护的关系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1585-1584.

KANG Hong-pu, WANG Jin-hua, GAO Fu-qiang. Stress distribution characteristics in rock surrounding heading face and its relationship with supporting[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1585-1584.

- [17] 王金安, 焦申华, 谢广祥. 综放工作面开采速率对围岩应力环境影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1118-1124.

WANG Jin-an, JIAO Shen-hua, XIE Guang-xiang. Study on influence of mining rate on stress environment in surrounding rock of mechanized top caving mining face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1118-1124.

- [18] 刘 杰, 王恩元, 赵恩来, 等. 深部工作面采动应力场分布变化规律实测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 60-65.

LIU Jie, WANG En-yuan, ZHAO En-lai, et al. Distribution and variation of mining-induced stress field in deep workface[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 60-65.

- [19] 王家臣, 王兆会, 杨 杰, 等. 千米深井超长工作面采动应力旋转特征及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 876-888.

WANG Jia-chen, WANG Zhao-hui, YANG Jie, et al. Mining-induced stress rotation and its application in longwall face with large length in kilometer deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 876-888.

- [20] 程利兴, 姜鹏飞, 杨建威, 等. 深井孤岛工作面巷道围岩采动应力分区演化特征[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4078-4086.

CHENG Li-xing, JIANG Peng-fei, YANG Jian-wei, et al. Partition evolution characteristics of mining-induced stress of roadway surrounding rock in deep island coal face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 4078-4086.

- [21] 耿宏波, 叶义成, 罗斌玉. 深部采场工作面围岩应力分布规律及围岩破坏范围研究[J]. 金属矿山, 2018(6): 11-19.

GENG Hong-bo, YE Yi-cheng, LUO Bin-yu. Study on rule of stress distribution and range of damage of surrounding rock in deep stoping[J]. Metal Mine, 2018(6): 11-19.

- [22] 郝 学, 胡祖祥, 邢立奋, 等. 综采工作面顶板围岩应力特征相似模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(4): 29-33.

HAO Xue, HU Zu-xiang, XING Li-fen, et al. Simulation study on stress characteristics of roof surrounding rock in fully mechanized working face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(4): 29-33.

- [23] 邢东升, 王李管, 刘晓明. 大采高仰斜综采工作面矿压显现规律研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(5): 16-19.

XING Dong-sheng, WANG Li-guan, LIU Xiao-ming. Mine pressure behavior of fully mechanized mining face with large mining height for steeply dipping coal seam[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(5): 16-19.

- [24] 周 启, 喻万松. 贵州省务川县瓦厂坪铝土矿浅部矿体地质特征[J]. 地质与资源, 2016, 25(4): 351-355.

ZHOU Qi, YU Wan-song. Geological characteristics of the shallow orebody in the Wachangping bauxite deposit in Guizhou Province[J]. Geology and Resources, 2016, 25(4): 351-355.

- [25] 刘辰生, 金中国, 郭建华. 海平面变化对沉积型铝土矿富集成矿的影响——以黔北铝土矿为例[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 985-993.

LIU Chen-sheng, JIN Zhong-guo, GUO Jian-hua. Effect of sea level change on enrichment

and mineralization of bauxite - Taking Qianbei bauxite of example[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(5): 985-993.

- [26] 潘庆英, 游桂芝. 贵州省务川县瓦厂坪铝土矿区水文地质特征分析[J]. 西部探矿工程, 2014(7): 127-131.

PAN Qing-ying, YOU Gui-zhi. Hydrogeological characteristics of Wachagning bauxite mining area in Wuchuan, Guizhou[J]. Western Exploration Engineering, 2014(7): 127-131.

- [27] 邓楚键, 何国杰, 郑颖人. 基于 M-C 准则的 D-P 系列准则在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 735-739.

DENG Chu-jian, HE Guo-jie, ZHENG Yin-ren. Studies on Drucker-Prager yield criterions based on M-C yield criterion and application in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 735-739.

- [28] Liu K, Chen S L, Gu X Q. Analytical and numerical analyses of tunnel excavation problem using an extended Drucker-Prager model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 1777-1790.

- [29] 陈 梁, 茅献彪, 李明, 等. 基于 Drucker-Prager 准则的深部巷道破裂围岩弹塑性分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 484-491.

CHEN Liang, MAO Xian-biao, LI Ming, et al. Elastoplastic analysis of cracked surrounding rock in deep roadway based Drucker-Prager criterion[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 484-491.

- [30] 赵尚毅, 郑颖人, 刘明维, 等. 基于 Drucker-Prager 准则的边坡安全系数定义及其转换[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2730-2734.

ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, LIU Ming-wei, et al. Definition and transformation of slope safety factor based on Drucker-Prager criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2730-2734.

- [31] 罗 佳, 柳小胜, 黄 敏. 高阶崩落法采场地压规律数值模拟分析[J]. 矿冶工程, 2019, 39(6): 20-24.

LUO Jia, LIU Xiao-sheng, HUANG Min. Numerical simulation analysis for ground pressure law of high-stage caving mining method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(6): 20-24.

- [32] 郭 阳, 李夕兵, 马春德, 等. 不同应力状态下采场稳定性的数值模拟分析[J]. 矿冶工

程, 2015, 35(2): 38-41.

GUO Yang, LI Xi-bing, MA Chun-de, et al. Numerical simulation for stability of stope under different stress conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2015, 35(2): 38-41.

Research on deformation and mining-induced stress distribution in surrounding rock of fully mechanized mining face in Wachangping bauxite mine

LEI Xian-quan^{1,2,3}, LIU Fu-chun^{1,2}, XIONG You-wei^{1,2}, LIU En-yan^{1,2}, ZHU Guo-hui^{1,2}

(1. CINF Engineering CO., Ltd, Changsha, 410019, China;

2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Safe and Efficient Mining Technology of Deep Mines, Changsha, 410019, China;

3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, 410083, China)

Abstract: The Wachangping bauxite mine is the first underground non-ferrous metal mine in China that adopts the fully mechanized mining technology. A 3D elastoplastic finite element model is used to simulate the stoping process of the fully mechanized mining face, and the deformation of the roof and floor of mining face as well as the spatial distribution and evolution of the mining-induced stress are revealed. The results show that: (1) When the mining face is mined, the roof of mined-out area is subsided and the floor is heaved; the deformation is the largest in the middle of mining face and gradually decreases towards both ends; the longer the length of mining face, the greater the deformation of the roof and floor. (2) The mining-induced stress produces stress concentration at both ends and the front and rear of mining face, forming high supporting pressure areas; at a large range of the roof of mined-out area, the mining-induced stress is reduced and the minimum principal stress is tensile stress nearly vertical. (3) The stress concentration area in front of mining face shifts forward

with the advancing of mining face, and the peak value of mining-induced stress gradually increases accordingly; the mining-induced stress of the roof of mined-out area remains relatively stable in the advancing process of mining face. The research results have important guiding roles in the reasonable determination of the length of mining face, the precise support of the mining face roof, the stability control of the stress concentration area, and the safety management of the roof of mined-out area.

Key words: Wachangping bauxite mine; Fully mechanized mining; Mining face; Surrounding rock deformation; Mining-induced stress

Foundation item: Project(2016YFC0801606) supported by the State Key Research Development Program of China; Project(2020-15) supported by the Scientific Research and Business Construction Project Funded by CINF Engineering CO., Ltd, China.

Received data: 2021-03-18; **Accepted data:** 2021-07-19

Corresponding author: LIU Fu-chun; Tel: +86-0731-84397210 ; E-mail: lfc2210@sina.com