缓倾厚大矿体深部开采垂直隔离间柱优化与应用*

王国禄[1],孙泽宁[2],张静[3],张勇[4],王怀佳[4],丛宇[1],王艳军[5],梁小明[5]

(1.青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛市 266520;
2.青岛理工大学理学院, 山东 青岛市 266520;
3.山东北方创信防水科技集团股份有限公司, 山东 滨州市 251900;
4.莱芜钢铁集团莱芜矿业有限公司, 山东 济南 250013;
5.北京城建北方集团有限公司, 北京 101301)

摘要:为探究垂直隔离间柱对缓倾厚大矿体深部开采过程中围岩稳定性的影响,针对山东某铁矿深部开采工程,采用数值模拟的方法对比分析了4组方案下围岩沉降、应力及塑性区变化,提出垂直隔离间柱单位体积优化比率,并据此对方案进行优选。结果表明:缓倾厚大矿体深部开采过程中垂直隔离间柱的留设体积和留设位置对其优化效果起着决定性影响;在产生沉降峰值的8#垂勘线留设宽度为20 m、厚度为41 m的垂直隔离间柱(方案4)产生的沉降峰值、应力峰值和塑性区单位体积优化比率最大,为最优方案;方案4较方案2可更有效地保障围岩的稳定性,较方案3可多开采出461 700 t铁矿石,多提取出272 403 t的铁矿石精粉,为企业增加约纯利润约5 448万元,提高约11.20%的纯利润收入。研究结果可为同类型矿山的垂直隔离间柱留设方案优化与应用提供一定借鉴。

关键词:缓倾厚大矿体;垂直隔离间柱;深部开采;单位体积优化比率;数值模拟

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)05-0017-10

Optimization and Application of Vertical Isolation Columns in the Deep Mining of Gently Inclined Thick Ore Bodies

WANG Guolu[1], *SUN Zening*[2], *ZHANG Jing*[3], *ZHANG Yong*[4], *WANG Huaijia*[4], *CONG Yu*[1], *WANG Yanjun*[5], *LIANG Xiaoming*[5]

(1.School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;
2.School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;
3.Shandong North Chuangxin Waterproof Technology Group Co., Ltd., Binzhou, Shandong 251900, China;
4.Laiwu Iron & Steel Group Laiwu Mining Co., Ltd., Jinan, Shandong 250013, China;
5.Beijing Urban Construction North Group Co., Ltd., Beijing 101301, China)

Abstract: To investigate the effect of vertical isolation columns on the stability of surrounding rock during the deep mining of gently inclined thick ore bodies, a numerical simulation method was used to compare and analyze the settlement, stress, and plastic zone changes of surrounding rocks under four different schemes for a deep mining project of an iron mine in Shandong. The optimization ratio of vertical isolation columns per unit volume was proposed, and the scheme was optimized on this basis. The results indicate that the volume and position of vertical isolation columns in the deep mining process of gently inclined thick ore bodies have a decisive impact on their optimization effect. The optimal scheme is to leave a vertical isolation column with a width of 20 m and a thickness of 41 m on the 8# vertical survey line where the settlement peak is generated (Scheme 4), which generates the maximum unit volume optimization ratio of settlement peak, stress peak, and plastic zone. Compared to Scheme 2, Scheme 4 can ensure the stability of the surrounding rocks more effectively. Compared to Scheme 3, Scheme 4 can extract an additional 461 700 tons of iron ore and 272 403 tons of refined iron ore powder, increasing the net profit of the enterprise by about 54.48 million yuan and increasing the net profit income by about 11.20%. The research results can provide some reference

* **收稿日期**:2024-06-14
基金项目:国家自然科学基金项目(52179104,42272334,42207201)
作者简介:王国禄(1999—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要研究金属矿山采矿方法优化及围岩稳定性分析。E-mail:wgljiayou2022@163.com
通信作者:孙泽宁(1996—),男,山东青岛人,博士研究生,主要研究岩石力学。E-mail:1131006340@qq.com

for the optimization and application of vertical isolation column retention schemes in similar mines.

Key words: Gently inclined thick ore body, Vertical isolation column, Deep mining, Unit volume optimization ratio, Numerical simulation

0 引言

随着地球浅部矿产资源逐渐枯竭,矿山资源开采逐渐走向深部[1-3]。而随着开采深度的增加,常伴随着冲击地压[4-6]、冒顶[7]、岩爆[8-10]等事故,会造成大量人员伤亡和经济损失。隔离间柱可有效阻止以上事故的发生,维护采空区围岩稳定,对矿产资源开发和矿山安全至关重要[11]。近年来,众多学者对隔离间柱进行了相关研究。吕冠颖等[12]采用数值模拟的方法,对某铁矿深部开采水平隔离间柱的留设厚度进行了优化,得到了符合稳定性要求的最小厚度为 20 m。王文军等[13]采用理论分析、数值模拟和相似材料物理仿真试验相结合的方法,对深部开采过程中隔离矿柱的承载机理和厚度进行了研究,结果表明,能够满足安全生产需求的原岩隔离矿柱厚度为 25 m。李夕兵等[14]对内蒙古某铅锌矿深部崩落转充填开采过程中的水平隔离矿柱稳定性进行了研究,为实现矿山的安全高效开采提供了理论依据。严振湘等[15]根据杏山铁矿的实际开采条件,对中段隔离矿柱厚度进行了研究,得出当隔离矿柱厚度为 20 m 时能够满足安全开采要求的结论。

上述研究主要通过不同的研究方法对水平隔离间柱的稳定性和留设厚度等方面进行了研究与优化,对垂直隔离间柱的相关研究与优化较少。本文以山东某铁矿深部开采为研究对象,在三维精细化地质模型的基础上,通过数值模拟的方法对比各方案下围岩沉降、应力及塑性区变化,分析了垂直隔离间柱对围岩稳定性的影响,提出了垂直隔离间柱单位体积优化比率,在保障安全经济开采的前提下,通过优化比率对方案进行优选。同时模型的精细程度保障了模拟结果的准确性和可靠度,为应用于实际生产过程打下了良好的基础,该研究对类似矿山垂直隔离间柱的优化与应用具有一定的借鉴意义。

1 模型建立及模拟方案

山东某铁矿矿体主要为磁铁矿,赋存于大理岩与闪长岩的接触带。矿体的长度约为 2 300 m,平均厚度为 14.96 m,最厚处达到 90.81 m。矿体的走向为 SE 至 NW,倾向为 NE,倾角为 30°～40°。矿体埋深在－56～－962 m,海拔标高在＋117.85～－790 m。矿体围岩主要由大理岩、蚀变闪长岩、矽卡岩化闪长岩以及矽卡岩组成。矿体顶板主要由大理岩组成,其厚度较大且呈块状结构。矿体底板主要是闪长岩,具有块状结构,致密且坚硬。

1.1 整体计算模型建立

根据矿区实际地质勘察资料,应用 SURPAC 软件构建各围岩及矿体的块体模型,将矿区块体模型数据转化为数值计算模型数据后,应用 FLAC3D 软件建立数值计算模型,再根据矿区各开挖水平实测 CAD 图纸,对计算模型开挖进路各水平进行细化,最终构建矿区三维精细化地质模型。所建模型尺寸(长×宽×高)为 520 m×460 m×305 m,深部开采区矿体蕴藏水平为－159～－200 m,开采矿体层厚为 4.5 m。所建模型真实还原了矿区深部开采实际布置情况,可准确反映出开采区域某个坐标点的沉降、应力和塑性区变化,确保了数值模拟结果的准确性和可靠度,整体计算模型如图 1 所示。

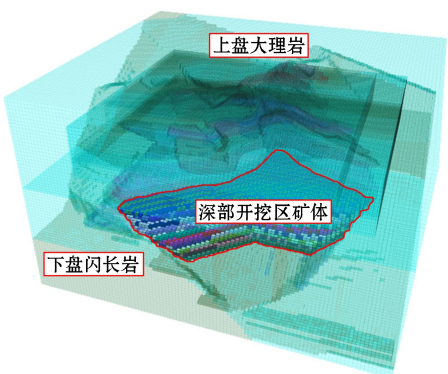


图 1 整体计算模型(透视图)

Fig.1 Overall calculation model (perspective view)

1.2 岩石力学模型与计算参数

垂直隔离间柱与矿体顶板和底板相连,将其视作上、下两端固定的等截面简支梁。其地质力学模型如图 2 所示。数值计算中,垂直隔离间柱岩体采用理想弹塑性模型,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则,屈服函数[16]如下:

$$f_s=\sigma_1-\sigma_3N_\varphi+2c\sqrt{N_\varphi} \tag{1}$$

$$f_t=\sigma_3-\sigma_t \tag{2}$$

式中:$N_\varphi=(1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$,其中 φ 为内摩擦

角；σ_1，σ_3 分别为最大和最小主应力；c 为黏聚力；σ_t 为岩石抗拉强度；f_s 为抗剪屈服函数；f_t 为抗拉屈服函数。当岩体内某一点应力满足 $f_s<0$ 时，发生剪切破坏；当岩体内某一点 $f_t>0$ 时，发生拉伸破坏。

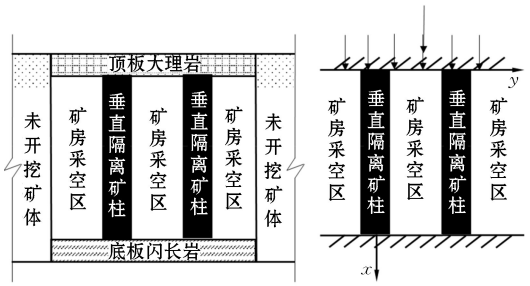


图 2　深部垂直隔离间柱地质和力学模型

Fig.2　Geological and mechanical model of deep artificial columns

各岩层及充填体的物理力学参数见表 1。

表 1　物理力学参数

Table 1　Physical-mechanical parameters

材料	弹性模量/GPa	泊松比	容重/(kN/m³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
铁矿石	9.90	0.22	35.4	27.1	0.11
大理岩	13.20	0.28	25.4	42.9	0.96
闪长岩	30.00	0.19	26.1	48.0	2.10
矽卡岩	2.10	0.30	26.3	33.0	1.50
充填体	0.91	0.28	16.2	16.0	0.28
垂直隔离间柱	9.90	0.22	35.4	27.1	0.11

1.3　数值模拟方案

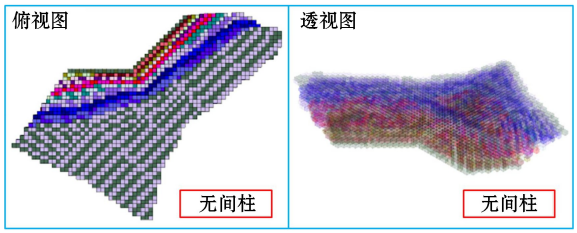
根据矿山工程实际共设置 4 组方案，方案 1 为无垂直隔离间柱开采，方案 2 延续矿区浅部开采(−50～−150 m 水平)时间柱留设方案，方案 3 和方案 4 在前两方案的基础上进行优化。各方案详细介绍见表 2。

表 2　垂直隔离间柱留设方案

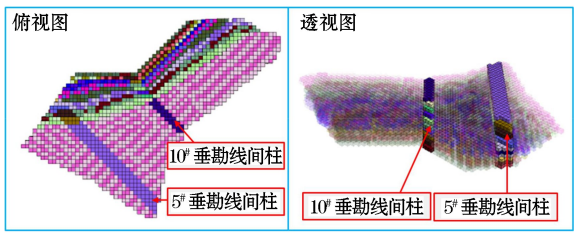
Table 2　Vertical separation column retention program

间柱方案	间柱位置	间柱宽度/m	间柱高度	间柱体积/m³
方案 1	—	—	—	—
方案 2	5#垂勘线	15	−159～−200 m 水平	116 550
	10#垂勘线	10	(共 41 m)	
方案 3	5#垂勘线	15	−159～−200 m 水平	209 025
	8#垂勘线	15	(共 41 m)	
	10#垂勘线	10		
方案 4	8#垂勘线	20	−159～−200 m 水平	116 550
			(共 41 m)	

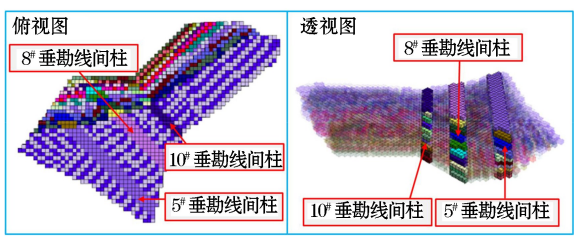
各方案开采区矿体模型间柱留设示意见图 3，其中 8# 垂勘线附近为产生沉降峰值位置。



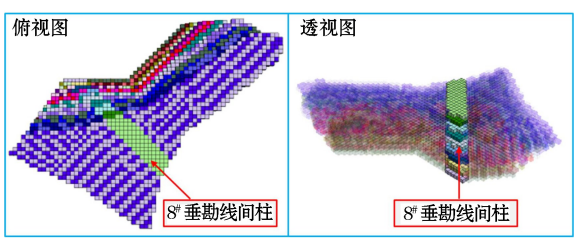
(a) 方案 1



(b) 方案 2



(c) 方案 3



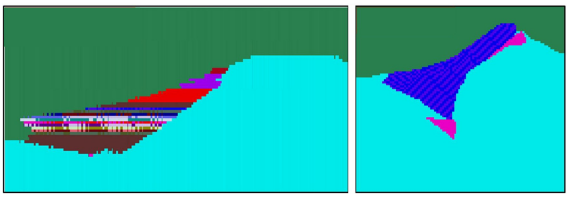
(d) 方案 4

图 3　各方案开采区矿体模型间柱留设示意

Fig.3　Column retention of the ore body model in the excavation area of each scheme

1.4　分析剖面的选取

为了从多角度、全方位地分析不同垂直隔离间柱留设方案对围岩稳定性的影响，选取两类剖面进行分析。其一为矿区标志性垂剖面，记作 A 剖面，见图 4(a)，该标志性剖面包含着该铁矿深部开采过程中切面面积最大且延伸长度最长的矿体，为矿区重点关注对象；其二为各水平分析剖面，记作 B 剖面，见图 4(b)，可全面地展示各开采水平矿体及围岩位移、应力及塑性区变化。由此，建立了多角度全方位的分析视角，对模拟结果进行全面覆盖、重点突出、层次分明的分析。



(a)标志性垂剖面 (b)水平剖面

图 4 模型分析剖面

Fig.4 Model profiles

1.5 开挖方式介绍

模型边界条件采用位移约束,模型四周及底端采用固定约束,模型顶部根据上部岩体自重等效施加 2.92 MPa 荷载,开挖区矿体共分为 9 层,每层厚 4.5 m,开采区矿房分层见图 5。



注:图中数字代表开挖矿体层数,即数字 2 代表第二层开挖矿体。

图 5 开采区矿房分层示意

Fig.5 Schematic diagram of the layering of the mine room in the excavation area

采用自上而下“隔一采一”的充填采矿法对 −159～−200 m 水平矿体进行开采,详细开采流程见表 3。

表 3 “隔一采一”开挖充填顺序

Table 3 Excavation and filling sequence for every other mining

步骤	开挖充填顺序
1	开挖第 1 层第 1 步矿房
2	回填第 1 层第 1 步矿房,开挖第 1 层第 2 步矿房
3	回填第 1 层第 2 步矿房,开挖第 2 层第 1 步矿房
4	回填第 2 层第 1 步矿房,开挖第 2 层第 2 步矿房
	……
17	回填第 8 层第 2 步矿房,开挖第 9 层第 1 步矿房
18	回填第 9 层第 1 步矿房,开挖第 9 层第 2 步矿房
19	回填第 9 层第 2 步矿房

2 数值模拟结果分析

2.1 围岩沉降

2.1.1 竖向沉降分析

本阶段矿体开挖完成后,围岩主要产生竖向位移。图 6 为 A 剖面竖向位移云图,B 剖面选取矿区整体模型产生竖向沉降峰值的水平剖面展开分析,见图 7。由图 6 可知,位于开采区矿体中部的矿体及上盘大理岩产生的沉降较大,A 剖面方案 1 至方案 4 产生的沉降峰值分别为:122.75 mm、106.51 mm、92.81 mm、100.82 mm,方案 1 沉降峰值最大,方案 2 次之,方案 3 最小。由图 7 可知,B 剖面方案 1 至方案 4 整体模型产生的沉降峰值分别为:160.40 mm、142.48 mm、100.56 mm、118.72 mm,沉降峰值大小关系同 A 剖面一致。可见垂直隔离间柱可减小沉降峰值及竖向沉降的范围。

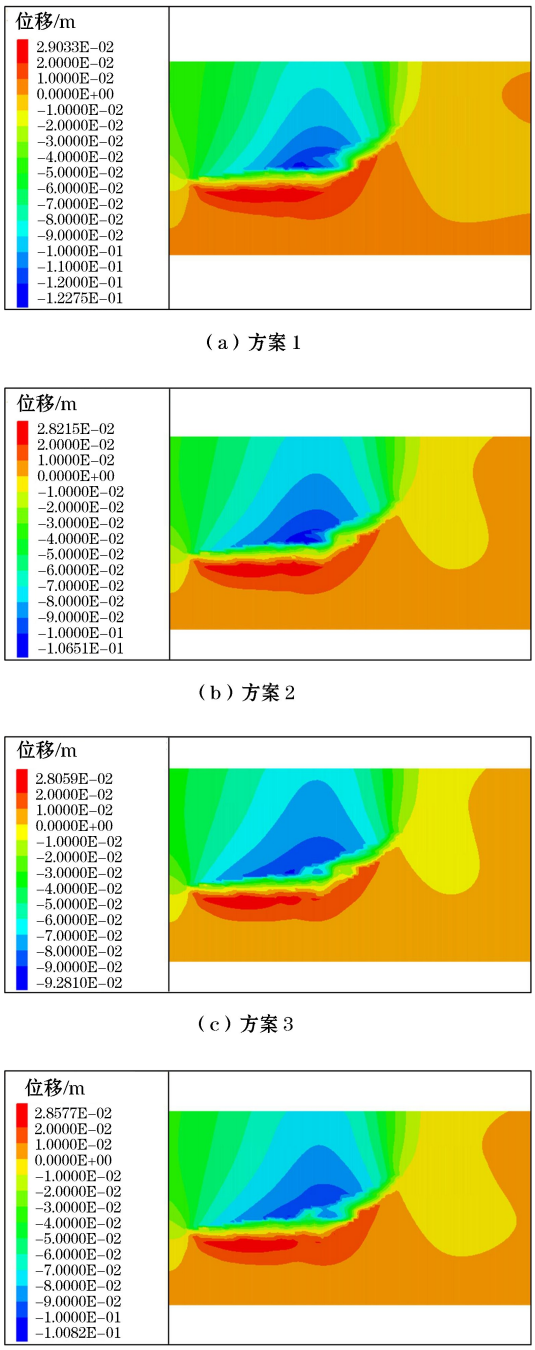
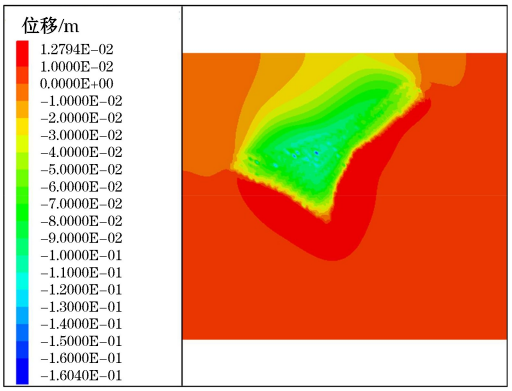
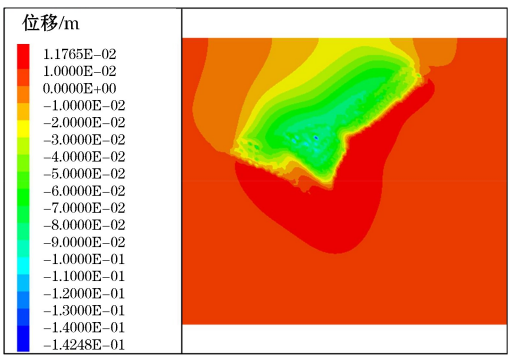


图 6 A 剖面位移模拟结果

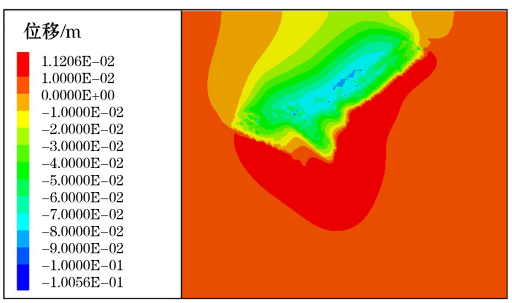
Fig.6 Displacement simulation results of profile A



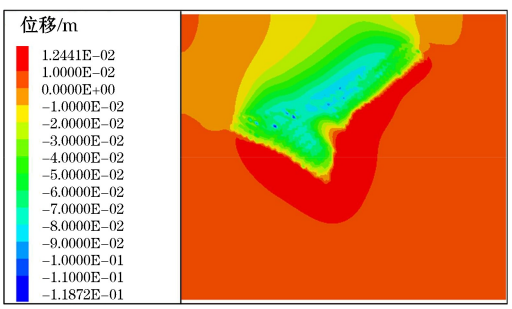
(a) 方案 1



(b) 方案 2



(c) 方案 3



(d) 方案 4

图 7 B 剖面位移模拟结果

Fig.7 Displacement simulation results of profile B

2.1.2 沉降峰值优化效果分析

4 组方案下产生的整体竖向沉降峰值中,未留设间柱的方案 1 沉降峰值最大;相比之下,方案 2 与方案 3 因间柱留设体积逐步增加,沉降峰值相应减小;对比方案 2 和方案 4,在相同间柱留设体积的情况下,方案 4 的沉降峰值更小。

方案 2、方案 3 及方案 4 沉降峰值较方案 1 沉降峰值优化比例如图 8 所示,方案 2 至方案 4 对于 A 剖面沉降峰值优化比例分别为 13.23%、24.39%、17.87%;对于 B 剖面沉降峰值优化比例分别为 11.17%、37.31%、25.99%。可见方案 3 及方案 4 优化比例均大于方案 2,为较优方案。

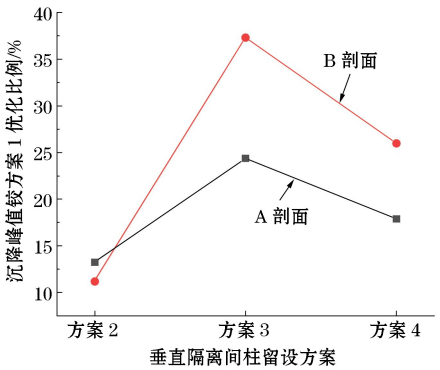


图 8 沉降峰值优化比例对比

Fig.8 Comparison of optimization ratios of peak settlement

为更准确地对比各方案垂直隔离间柱的优化效果,将每 1 000 m^3 的垂直隔离间柱产生的优化比例视作间柱单位体积优化比率,方案 2 至方案 4 沉降峰值较方案 1 的单位体积优化比率见表 4。由表 4 可知,对于 A 剖面及 B 剖面方案 4 的单位体积优化比率均最大,方案 3 次之,方案 2 最小。各方案单位体积优化比率表明垂直隔离间柱的留设位置是其对沉降峰值优化效果的决定性影响因素,在方案 1 无垂直隔离间柱开采工况下产生沉降峰值处留设合理体积、单一位置的垂直隔离间柱,可更有效地发挥间柱的作用,减小围岩沉降。

表 4 沉降峰值较方案 1 的单位体积优化比率

Table 4 Optimization ratio of per unit volume of peak settlement to scheme 1 %

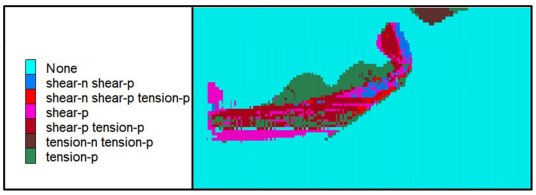
分析剖面	方案 2	方案 3	方案 4
A 剖面	11.35	11.67	15.33
B 剖面	9.59	17.85	22.30

2.2 塑性区

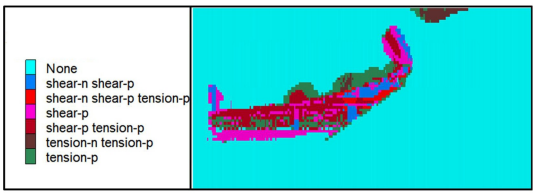
2.2.1 塑性区分析

深部矿体开挖后采场内的塑性区范围及体积可反映围岩内破坏程度,因此用其来表征围岩的稳定性。本阶段矿体开采完成后 A 剖面及 B 剖面塑性区分布如图 9、图 10 所示。由此可知,塑性区主要分布

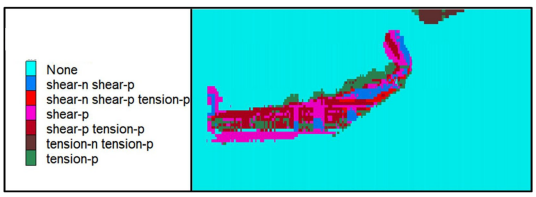
在开挖区矿体及上盘大理岩,矿体下盘闪长岩未出现明显的塑性区,塑性区主要向岩性较差的大理岩发展。矿体部分呈剪切-张拉破坏,间柱主要发生剪切破坏。垂直隔离间柱对开挖区矿体中部的塑性区发展影响较明显,有效抑制了塑性区向上盘大理岩发展。



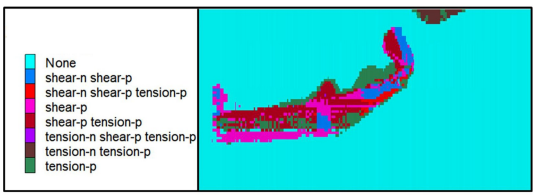
(a) 方案 1



(b) 方案 2



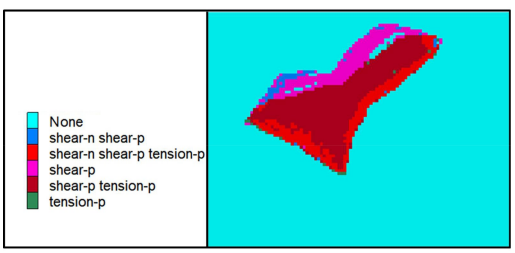
(c) 方案 3



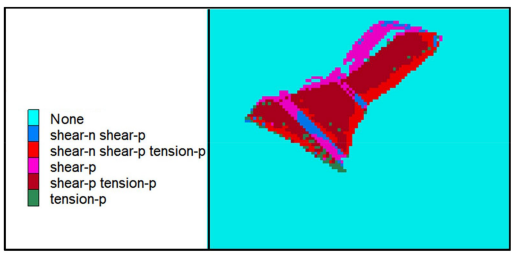
(d) 方案 4

图 9 A 剖面塑性区模拟结果

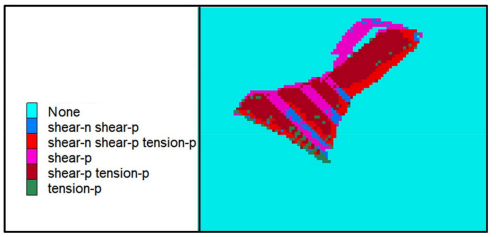
Fig.9 Simulation results of plastic zone in profile A



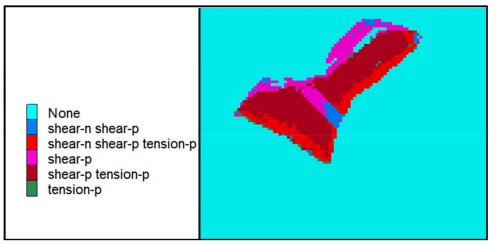
(a) 方案 1



(b) 方案 2



(c) 方案 3



(d) 方案 4

图 10 B 剖面塑性区模拟结果

Fig.10 Simulation results of plastic zone in profile B

2.2.2 塑性区体积优化效果分析

提取塑性区体积进行对比分析,各方案整体模型塑性区体积及其他 3 个方案较方案 1 优化比例见表 5。未留设间柱的方案 1 塑性区体积最大;相比之下,方案 2 与方案 3 因间柱留设体积逐步增加,塑性区体积相应减小;对比方案 2 及方案 4,在相同间柱留设体积的情况下,方案 4 产生的塑性区体积更小。

表 5 各方案塑性区体积及较方案 1 优化比例

Table 5 Plastic zone volume for each scheme and optimization ratio to scheme 1 %

方案	塑性区体积/m^3	较方案 1 优化比例/%
方案 1	6 126 620	—
方案 2	4 517 300	26.27
方案 3	4 000 990	34.69
方案 4	4 304 593	29.74

根据表 5 数据,将方案 2 至方案 4 塑性区体积较方案 1 优化比例汇总,结果见图 11。方案 2 至方案 4 对于矿区模型整体塑性区体积优化比例分别为:26.27%、34.69%、29.74%。可见方案 3 及方案 4 的优化比例均大于方案 2,为较优方案。

方案 2 至方案 4 矿区整体模型垂直隔离间柱对塑性区体积的单位体积优化比率见表 6。由表 6 可知,方案 4 的优化比率最大,方案 2 次之,方案 3 最小。各方案塑性区单位体积优化比率同样表明垂直隔离间柱的留设位置是其对塑性区体积优化效果的决定性影响因素,方案 4 垂直隔离间柱的留设方式,可更有效地发挥间柱抑制塑性区发展的作用,可更有效地维护围岩的稳定性。

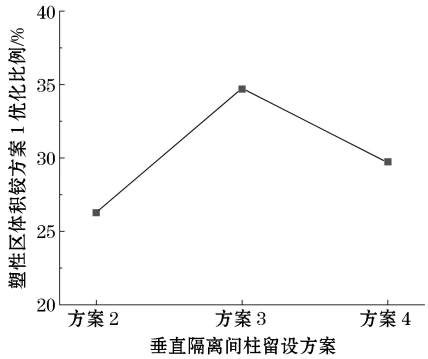


图 11 塑性区体积优化比例对比

Fig.11 Comparison of optimization ratios in the plastic zone volume

表 6 塑性区较方案 1 的单位体积优化比率

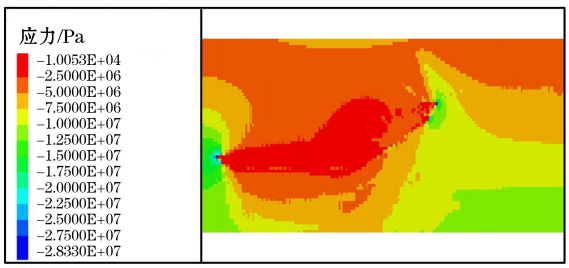
Table 6 Optimization ratio of per unit volume of plastic zone to scheme 1 %

方案 2	方案 3	方案 4
22.54	16.60	25.52

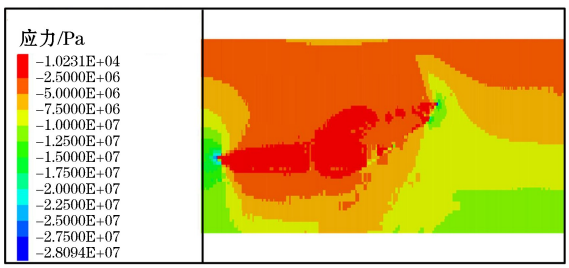
2.3 应力

2.3.1 应力分析

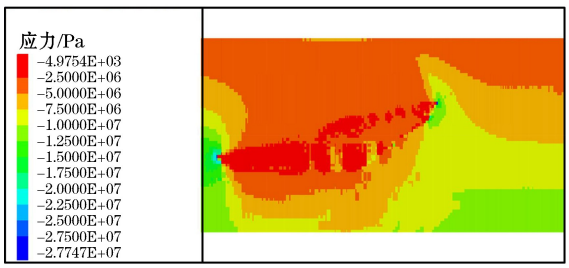
深部矿体开采后,应力的初始平衡状态被打破,应力重分布后达到新的平衡。图 12 和图 13 分别为本阶段矿体开采完成后 A 剖面和 B 剖面应力分布情况。对于 A 剖面而言,各方案应力峰值均位于开挖区矿体与上盘大理岩接触的左下角和右上角,这两处产生应力集中。方案 1 至方案 4 压应力峰值分别为:28.330 MPa、28.094 MPa、27.747 MPa、27.943 MPa。对于矿区整体模型 B 剖面而言,各方案压应力峰值均位于开挖区矿体与围岩接触处的左上方和右上方,产生应力集中现象。方案 1 至方案 4 压应力峰值分别为:32.333 MPa、32.330 MPa、32.075 MPa、31.405 MPa。对于 A 剖面,方案 1 压应力最大,方案 3 最小;对于 B 剖面,方案 1 压应力最大,方案 4 最小。



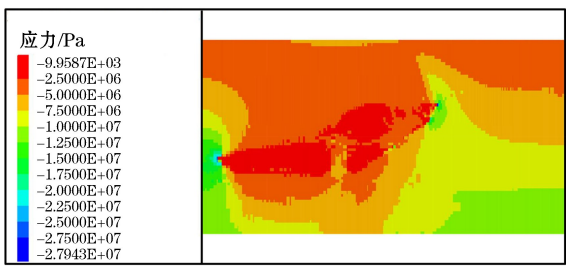
(a) 方案 1



(b) 方案 2



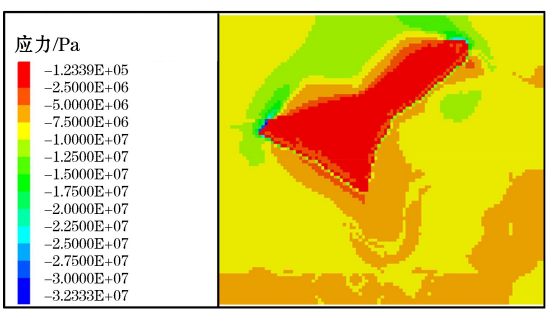
(c) 方案 3



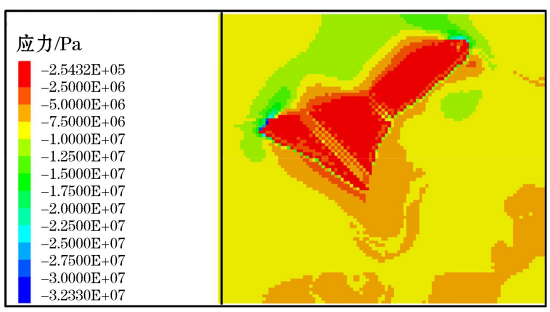
(d) 方案 4

图 12 A 剖面应力模拟结果

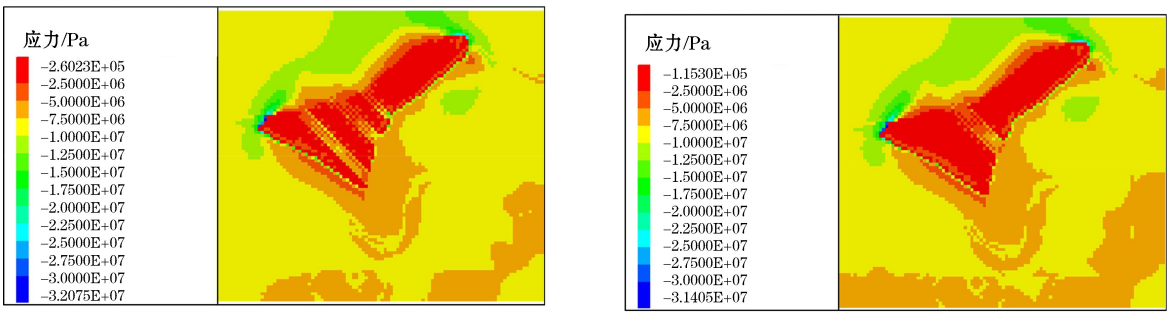
Fig.12 Stress simulation results of profile A



(a) 方案 1



(b) 方案 2



(c) 方案 3　　(d) 方案 4

图 13　B 剖面应力模拟结果

Fig.13　Stress simulation results of profile B

2.3.2　应力峰值优化效果分析

4 组方案下产生的应力峰值中,未留设间柱的方案 1 应力峰值最大;相比之下,方案 2 与方案 3 因间柱留设体积逐步增加,应力峰值相应减小;对比方案 2 和方案 4,相同间柱留设体积的情况下,方案 4 产生了更小的压应力峰值。

方案 2 至方案 4 应力峰值较方案 1 应力峰值优化比例,如图 14 所示。对于 A 剖面而言,方案 2 至方案 4 应力峰值优化比例分别为:0.83%、2.06%、1.37%。对于 B 剖面而言,方案 2 至方案 4 优化比例分别为:0.01%、0.8%、2.87%。可见方案 3 及方案 4 的优化比例均大于方案 2,为较优方案。

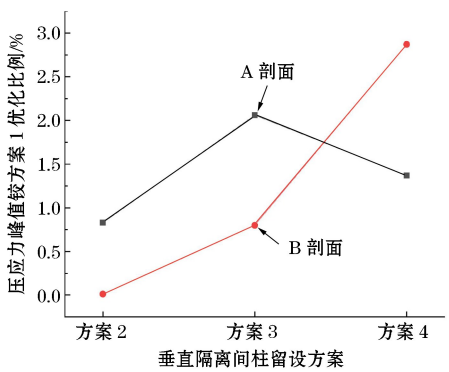


图 14　应力峰值优化比例对比

Fig.14　Comparison of optimization rotios of peak stress

方案 2 至方案 4 应力峰值较方案 1 的单位体积优化比率见表 7。由表 7 可知,方案 4 均产生了最大的单位体积优化比率,方案 3 次之,方案 2 最小。同样表明垂直隔离间柱的留设位置是其对压应力峰值优化效果的决定性因素,在方案 1 无垂直隔离间柱留设方案下产生沉降峰值处留设合理体积、单一位置的垂直隔离间柱,可减小开挖过程中最大压应力值,缓解应力集中现象。

表 7　应力峰值较方案 1 的单位体积优化比率

Table 7　Optimized ratio of per unit volume of peak stress to scheme 1

分析剖面	方案 2	方案 3	方案 4
A 剖面	7.14×10^{-3}	9.85×10^{-3}	1.17×10^{-2}
B 剖面	7.96×10^{-5}	3.82×10^{-3}	2.46×10^{-2}

3　工业应用情况

3.1　矿山应用情况

通过“现场地质勘察调研+数值模拟研究优化+工程实际应用”的模式,研究结果已成功应用于本矿山-50～-150 m 水平的矿产资源开采中,垂直隔离间柱留设同方案 4,间柱有效维护了围岩的稳定性,取得了良好的工程实际应用效果,图 15 为矿区浅部开采垂直隔离间柱留设示意。

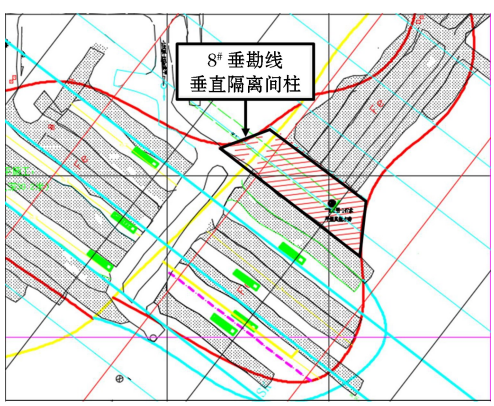


图 15　矿区深部开采垂直隔离间柱留设示意

Fig.15　Schematic diagram of vertical isolation artificial pillar arrangement in deep mining areas

3.2　经济技术指标

本矿山的主要产品为铁矿石经过破碎、磨碎、选矿等加工处理成的铁矿石精粉。各方案主要技术经

济指标见表 8,由表 8 可知,本阶段深部开采所蕴藏的铁矿石约为 5 217 480 t,方案 1 不满足安全开采的要求,方案 3 可采出铁矿石 4 123 980 t,矿石回采率为 79.04%,最终可提取出约 2 433 148.2 t 的铁矿石精粉。方案 2 和方案 4 均可采出 4 585 680 t 的铁矿石,矿石回采率为 87.89%,最终可提取出约 2 705 551.2 t的铁矿石精粉。在相同的铁矿石精粉提取量的情况下,方案 4 可更好地保障深部开采过程中围岩稳定性,为最优方案,较方案 3 可多提取出 272 403 t 的铁矿石精粉。按照矿山实际生产经营情况,铁矿石精粉平均售价约为 1 000 元/t,每吨精粉生产成本约为 800 元。计算可得,方案 4 较方案 3 可为本矿山多带来纯利润约 5 448 万元,在保障安全经济开采的同时,提高了约 11.20% 的纯利润收入。

表 8 各方案技术经济指标

Table 8 Technical and economic indicators for each program

间柱方案	铁矿石总蕴藏量/t	可采出矿石量/t	回采率/%	铁矿石精粉产量/t	铁矿粉提取率/%
方案 1	5 217 480	—	—	—	—
方案 2	5 217 480	4 585 680	87.89	2 705 551.2	59.00
方案 3	5 217 480	4 123 980	79.04	2 433 148.2	59.00
方案 4	5 217 480	4 585 680	87.89	2 705 551.2	59.00

4 结论

通过数值模拟的方法,对 4 组方案进行优选,依据垂直隔离间柱产生的单位体积优化比率确定最优方案。同时介绍了矿山垂直隔离间柱应用情况,以及数值模拟研究分析可为矿山带来的技术经济指标,得出以下主要结论。

(1) 4 组方案中,方案 1 产生的沉降峰值、应力峰值及塑性区体积均最大,难以满足矿区安全开采的要求;方案 3 间柱留设位置过多、留设体积过大,铁矿石的回采率较低,难以满足矿山经济开采的要求;方案 4 与方案 2 在间柱留设体积相同的情况下,留设单一位置的垂直隔离间柱产生的沉降峰值、应力峰值及塑性区体积更小,更有利于铁矿石的回采,更有利于维护围岩稳定性,同时满足了安全开采和经济开采的要求。

(2) 提出缓倾厚大矿体深部开采垂直隔离间柱单位体积优化比率,在对数值模拟结果分析的基础上,根据优化比率定量分析间柱的优化效果并确定最优方案。对于整体模型而言,方案 4 产生的沉降峰值、应力峰值以及塑性区体积的单位体积优化比率均最大,分别为 22.30%、2.46×10^{-2}、25.52%。结果表明:方案 4 在 8# 垂勘线留设宽度为 20 m、厚度为 41 m 的垂直隔离间柱为本矿山的最优留设方案。

(3) 垂直隔离间柱在本矿山浅部开采过程中取得了良好的实际工程应用效果。对于深部开采,方案 4 在满足安全经济开采的同时,可为矿山带来更好的经济技术指标。方案 4 较方案 2 可更有效地保障围岩的稳定性;较方案 3 可多开采出 461 700 t 铁矿石,多提取出 272 403 t 的铁矿石精粉,可为企业增加纯利润约 5 448 万元,提高约 11.20% 的纯利润收入。对于同类型矿山的垂直隔离间柱留设方案优选与应用具有一定的推广及借鉴意义。

参考文献(References):

[1] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Progress of research on deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(5):1283-1305.

[2] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
CAI Meifeng, XUE Dinglong, REN Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(4):417-426.

[3] 袁亮.深部采动响应与灾害防控研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):716-725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society,46(3):716-725.

[4] 白宗荣.复杂地质条件下巨厚煤层冲击地压诱因分析及防治[J].采矿技术,2023,23(1):94-97.
BAI Zongrong. Analysis and prevention of rock burst in very thick coal seam under complex geological conditions[J]. Mining Technology,2023,23(1):94-97.

[5] 孙朝燚,陈从新,夏开宗,等.金属矿山复杂采空区围岩破坏及岩层移动机制研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(3):670-682.
SUN Zhaoyi, CHEN Congxin, XIA Kaizong, et al. Mechanism of surrounding rock failure and strata movement in complex goaf of metal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(3):670-682.

[6] 余昕,熊朝辉,宋卫东,等.高阶段嗣后胶结充填法矿柱与充填体动态稳定性研究[J].矿业研究与开发,2022,42(4):26-31.
YU Xin, XIONG Zhaohui, SONG Weidong, et al. Study on dynamic stability of mine pilar and filling body in high-stage subsequent cemented filling method[J]. Mining Research and Development,2022,42(4):26-31.

[7] 贾后省,李国盛,王路瑶,等.采动巷道应力场环境特征与冒顶机理研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(4):707-714.

JIA Housheng, LI Guosheng, WANG Luyao, et al. Characteristics of stress-field environment and roof falling mechanism of mining influenced roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(4):707-714.

[8] 夏元友,张宏伟,吝曼卿,等.基于数据预处理技术并考虑围岩应力梯度影响的隧洞岩爆预测[J].岩土工程学报,2023,45(10):1987-1994.
XIA Yuanyou, ZHANG Hongwei, LIN Manqing, et al. Prediction of tunnel rockbursts based on data preprocessing technology considering influences of stress gradient of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(10):1987-1994.

[9] 吝曼卿,胡会平,梁潇,等.大尺寸试件在梯度应力作用下的岩爆孕育声发射特性[J].金属矿山,2022(3):71-77.
LIN Manqing, HU Huiping, LIANG Xiao, et al. Acoustic emission characteristics of rockburst inoculation of large-size specimen under gradient stress[J]. Metal Mine,2022(3):71-77.

[10] 赵红亮,仇岩,梁海安,等.地应力环境对深埋硐室岩爆特性影响的数值模拟研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(6):53-62.
ZHAO Hongliang, QIU Yan, LIANG Haian, et al. Numerical study on the influence of in-situ stress environment on rock-burst characteristics in deep-buried chambers[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2023,5(6):53-62.

[11] 赵兴东,周鑫,赵一凡,等.深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2522-2538.
ZHAO Xingdong, ZHOU Xin, ZHAO Yifan, et al. Research status and progress of prevention and control of mining disasters in deep metal mines[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(8):2522-2538.

[12] 吕冠颖,王阡,王翔,等.某铁矿深部开采水平隔离矿柱厚度优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):13-18.
LYU Guanying, WANG Qian, WANG Xiang, et al. Study on thickness optimization of horizontal isolating pillar in deep mining of an iron mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(8):13-18.

[13] 王文军,李家树,徐帅,等.深部开采过程中隔离矿柱承载机理及厚度优化[J].金属矿山,2020(8):38-43.
WANG Wenjun, LI Jiashu, XU Shuai, et al. Working mechanism and thickness optimization of the original rock isolating pillars in deep mining[J]. Metal Mine,2020(8):38-43.

[14] 李夕兵,彭定潇,冯帆,等.基于中厚板理论的深部崩落转充填隔离矿柱稳定性分析[J].中国矿业大学学报,2019,48(3):484-494.
LI Xibing, PENG Dingxiao, FENG Fan, et al. Stability analysis of horizontal insulating pillar in deep mining from caving to filling method on the basis of refined plate theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2019,48(3):484-494.

[15] 严振湘,张文东.基于FLAC3D数值模拟方法的杏山铁矿中段隔离矿柱稳定性分析[J].现代矿业,2021,37(2):206-209.
YAN Zhenxiang, ZHANG Wendong. Stability analysis of isolated pillar in the middle section of Xingshan Iron Mine based on FLAC3D numerical simulation method[J]. Modern Mining,2021,37(2):206-209.

[16] 李夕兵,李地元,郭雷,等.动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J].岩石力学与工程学报,2007(5):922-928.
LI Xibing, LI Diyuan, GUO Lei, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007(5):922-928.