

# 某矿山不同开采方案下的地表变形时空演化研究

翟建波<sup>1,2</sup>, 张少杰<sup>2</sup>, 洪伟<sup>2</sup>

(1. 中南大学 自动化学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 为研究某矿山地下开采过程对地表文物的影响,结合矿山的工程地质条件,提出考虑不同开采范围、开采顺序和矿柱留设情况的三种开采方案,利用 Flac<sup>3D</sup>数值模拟软件建立了矿山回采过程的三维数值模型,分析了不同开采方案下的地表倾斜、曲率和水平变形,揭示了不同开采方案下地表变形的时空演化特征,确定了矿山的最优开采方案。研究表明:与开采方案一和开采方案二相比,开采方案三能有效地减小地下开采引起的地表变形;开采方案三在矿体全部开采结束后,地表的变形值均小于《有色金属采矿设计规范》中建、构筑物保护等级为 I 级时的允许值。该研究结果可为矿山安全高效生产提供技术指导和决策依据,对地表文物的保护具有重要意义。

**[关键词]** 地下开采; 数值模拟; 文物保护; 地表变形

**[中图分类号]** TD862.1

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 2097-2423(2025)01-0065-06

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.01.011

## 0 引言

地下矿山的开采会打破原始应力场的分布情况,导致上覆岩体的变形,对地表的稳定性带来一定的影响,尤其是地表存在建(构)筑物需要保护时,更要针对矿山的开采技术条件和工程地质条件采取可靠的开采技术工艺,最大限度地减少开采造成的地表变形,从而实现地表建(构)筑物的保护。

目前,国内外许多矿山都面临此类问题,学者们也对此开展了大量研究<sup>[1-5]</sup>。何承尧等<sup>[6]</sup>利用数值模拟研究方法探究某铜矿地下开采对地表古铜矿遗址的安全影响,结果表明了选择上向水平分层胶结

充填法采矿工艺对地表建(构)筑物的影响会更小;任卫东等<sup>[7]</sup>通过分析不同开采顺序下的采场顶底板应力、位移及地表位移,得出了最优的回采顺序及开采方案,有效地减少了地表沉降;徐钊<sup>[8]</sup>以某地下开采矿山为研究对象,分析了不同开采方案对地表河流安全性的影响,得到不同赋存标高的矿体宜采用不同的采矿工艺的结论;王辉镜等<sup>[9]</sup>基于 Flac<sup>3D</sup>数值模拟软件,研究了相邻复杂矿体开采过程与地表稳定性的时空规律;胡崑等<sup>[10]</sup>根据矿山设计资料及开采现状,模拟计算出矿山开采结束后地表位移情况,为矿山后续安全开采提供一定的依据。

本文以某地下开采矿山为研究对象,依据矿山工程地质和开采技术条件,结合设计资料,基于有限差分数值模拟软件 Flac<sup>3D</sup>,构建了开采过程的数值计算模型,研究了不同地下开采方案对地表文物的时空影响,并将最优方案应用于设计中,为矿山安全高效开采和项目决策提供理论依据。

## 1 矿区概况

国外某铜矿地表存在多处需要保护的文物,主要有 3<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、13<sup>#</sup>、45<sup>#</sup>、57<sup>#</sup>、99<sup>#</sup>七个文物区及三个文物群(图 1),文物基本位于或接近矿体正上方,文物保护等级按 I 级考虑。矿区地形地貌简单,第三

**[收稿日期]** 2024-08-19

**[作者简介]** 翟建波(1986—),男,高级工程师,主要从事矿山数字化设计和智能矿山技术研究。

**[引用格式]** 翟建波,张少杰,洪伟. 某矿山不同开采方案下的地表变形时空演化研究[J]. 绿色矿冶,2025,41(1): 65-70.

ZHAI Jianbo, ZHANG Shaojie, HONG Wei. Study on the spatial-temporal evolution of surface deformation under different mining schemes of a mine[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(1): 65-70.

系已基本固化成岩,含矿岩系为元古代稳定坚硬岩石,矿层顶底板地层岩石为坚硬岩石,但晚第三纪上部的松散岩石稳定性较差,元古代稳定坚硬岩石中节理裂隙较发育。为了实现矿区地表文物的保护性开采,该铜矿设计采用地下开采方式,地下开拓采用胶带斜井-副井-辅助斜坡道联合开拓方案,采矿方法主要为上向分层点柱充填采矿法和分段空场嗣后充填采矿法。

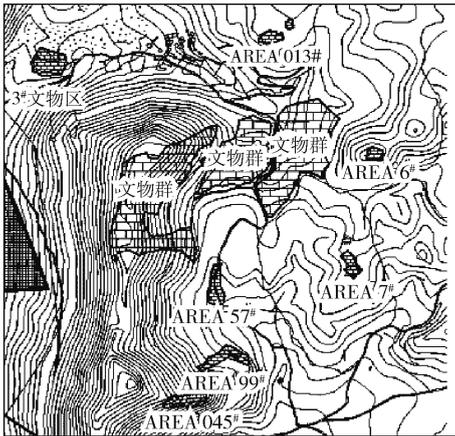


图1 矿区地表文物分布

## 2 数值模拟方案

### 2.1 开采模拟方案

矿山拟采用上向分层点柱充填采矿法进行开采,由于矿区地表有多处文物,随着地下开采活动的进行,围岩的完整性发生破坏和变化,对地表产生一定影响,这是否会影响文物的稳定是本文需要重点研究的内容。

根据《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012),地表影响范围确定应根据地表倾斜允许值及地表水平变形允许值等参数综合确定。地表倾斜为地表下沉盆地沿某一方向的坡度值,曲率则反映了观测线断面上的弯曲程度,地表水平变形为相邻两点的水平移动差与两点间水平距离的比值。建、构筑物保护等级为 I 级时,地表倾斜  $i$  的允许值为  $\pm 3 \text{ mm/m}$ ,曲率  $k$  的允许值为  $\pm 0.2 \times 10^{-3}/\text{m}$ ,水平变形  $\varepsilon$  的允许值为  $\pm 2 \text{ mm/m}$ 。

结合矿山设计资料,基于不同时期考虑的开采范围、开采顺序、矿柱留设的情况不同,依托上述因素提出三种具体开采方案(表 1)。其中,方案一和

表 1 三种不同开采方案

项目	方案一	方案二	方案三
开采范围	开采 1 860 ~ 2 280 m 的矿体	开采 1 980 ~ 2 280 m 的矿体(不含矿柱)	开采 1 795 ~ 2 320 m 的矿体(不含矿柱)
开采顺序	第 1 步开采 2 040 m 和 2 160 m 中段; 第 2 步开采 2 100 m 和 2 220 m 中段; 第 3 步开采 1 860 m、1 920 m 和 1 980 m 中段。中段高度 60 m	第 1 步开采 1 980 m 和 2 160 m 中段; 第 2 步开采 2 040 m 和 2 220 m 中段; 第 3 步开采 2 100 m 中段。中段高度 60 m	第 1 步开采 1 795 m 和 1 945 m 中段;第 2 步开采 1 870 m 和 2 020 m 中段;第 3 步开采 2 095 m 中段、2 170 m 中段和 2 245 m 中段。中段高度 75 m
矿柱	自 2 280 m 至地表	①自 2 280 m 至地表。②盘区长度 105 m,间柱 10 m,采场长 95 m,宽度为矿体厚度。点柱中心间距 15 m,点柱尺寸 5 m × 5 m	①自 2 320 m 至地表。②文物边界向外扩 20 m 范围下方的矿体留作矿柱。③第三系下方留设 15 m 厚的护顶矿柱。④盘区长度 65 m,间柱 10 m,采场长 55 m,宽度为矿体厚度。点柱中心间距 15 m,点柱尺寸 5 m × 5 m

方案二重点考虑相同中段高度下,留设不同矿柱的差异性;方案三在方案二的基础上,增加了中段高度,并考虑了更为可靠的矿柱留设方式。因此,基于三种方案探讨全生命周期内矿山开采活动对地表文物的时空影响情况具有重要意义。

### 2.2 数值模型的建立

根据矿山的工程地质条件(矿体模型、地表模型、第三系和硬岩接触面如图 2 所示)和开采设计,利用有限差分数值模拟软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立矿区三维数值模型(图 3(a))。三维模型 X 轴长 2 200 m, Y

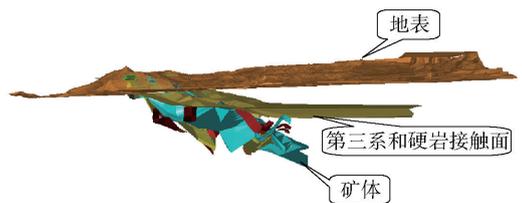


图 2 矿体模型、地表模型、第三系和硬岩接触面

轴长 2 600 m,模型 Z 轴长约 1 200 m(海拔标高为 1 500 ~ 2 700 m),模型坐标原点的海拔高度为 1 500 m。三维模型中的矿体如图 3(b)所示,图中矿体的

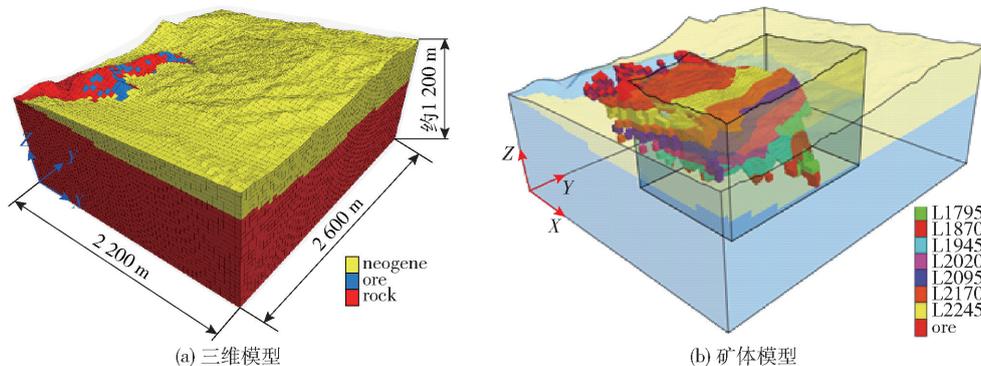


图3 矿区三维模型

不同颜色代表划分的不同中段。

### 2.3 岩体物理力学参数及边界条件

根据矿山设计中岩体质量评价和工程岩体力学参数等相关内容,本文模拟采用的岩体物理力学参数见表2。

表2 岩体物理力学参数

类别	密度 $\rho$ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	内聚力 $C/\text{MPa}$	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉强度 $\tau/\text{MPa}$
硬岩	2.87	16 000	0.26	1.18	27.4	0.6
第三系	2.30	3 370	0.32	0.30	26.0	0.1
充填体	1.61	200	0.40	0.38	22.3	0.2

材料的体积模量  $K$ 、剪切模量  $G$  可通过材料的弹性模量  $E$  以及泊松比  $\mu$  进行反演,公式<sup>[11]</sup>分别见式(1)~(2)。

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2)$$

垂直矿体走向的最大水平应力为垂直应力的1.2倍,沿矿体走向的最小水平应力为垂直应力的0.8倍。模型侧面限制水平移动,底面限制垂直移动。

## 3 结果分析

### 3.1 三种开采方案地表变形时空演化分析

开采范围、开采顺序以及矿柱留设的差异对地表文物的影响有所不同,根据项目的特点,通过分析三种不同开采方案的模拟结果,选择可有效地减小地表变形的开采方案,为地表文物保护和矿山安全高效开采提供理论指导依据。

#### 3.1.1 开采方案一模拟结果分析

矿体全部开采后地表的垂直位移最大值约为1.39 m,如图4所示。在经过地表垂直位移最大点

( $X=500, Y=140$ )且垂直于  $X$  轴的剖面上,地表倾斜  $i$  的最大值为  $-3.968 \text{ mm/m}$ ,并在  $Y$  轴  $-320 \sim -60$  区间内大于规范允许值;曲率  $k$  的最大值为  $0.076 \times 10^{-3}/\text{m}$ ,小于规范允许值;水平变形  $\varepsilon$  的最大值为  $-2.726 \text{ mm/m}$ ,在  $Y$  轴  $-80 \sim 80$  区间大于规范允许值。

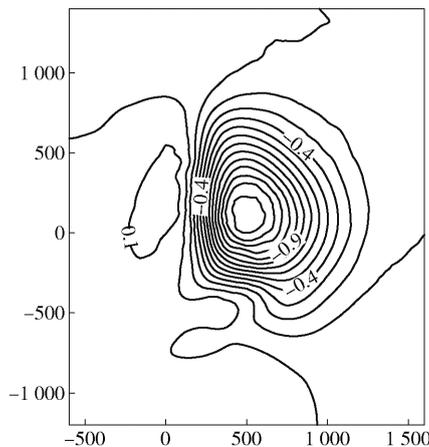


图4 方案一的地表垂直位移等值线图

在经过地表垂直位移最大点( $X=500, Y=140$ )且垂直于  $Y$  轴的剖面上,地表倾斜  $i$  的最大值为  $-5.632 \text{ mm/m}$ ,在  $X$  轴  $140 \sim 380$  区间大于规范允许值;曲率  $k$  的最大值为  $0.121 \times 10^{-3}/\text{m}$ ,小于规范允许值;水平变形  $\varepsilon$  的最大值为  $-4.328 \text{ mm/m}$ ,在  $X$  轴  $100 \sim 180, 320 \sim 440$  区间,水平变形  $\varepsilon$  大于规范允许值。

#### 3.1.2 开采方案二模拟结果分析

开采方案二矿柱的留设情况如图5所示。

矿体全部开采结束后地表的垂直位移最大值约为0.5 m,如图6所示。在经过地表垂直位移最大点( $X=400, Y=-40$ )且垂直于  $X$  轴的剖面上,倾斜  $i$  的最大值为  $-2.456 \text{ mm/m}$ ,小于规范允许值;曲率  $k$  的最大值为  $-0.112 \times 10^{-3}/\text{m}$ ,小于规范允许值;

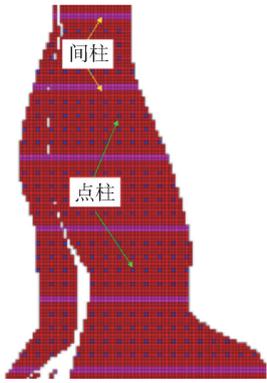


图5 某中段间柱和点柱布置

水平变形  $\varepsilon$  的最大值为 3.367 mm/m, 在 Y 轴 -445 ~ -430 区间大于规范允许值。

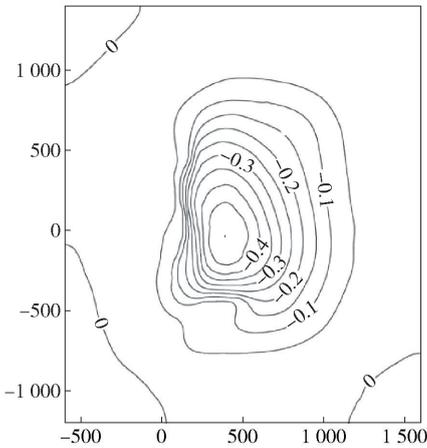


图6 方案二垂直位移等值线图

在经过地表垂直位移最大点 ( $X = 400, Y = -40$ ) 且垂直于 Y 轴的剖面上, 倾斜  $i$  的最大值为  $-3.047 \text{ mm/m}$ , 在  $X = 170$  处, 大于规范允许值; 曲率  $k$  的最大值为  $-0.321 \times 10^{-3} / \text{m}$ , 在  $X = 125$  处, 大于规范允许值; 水平变形  $\varepsilon$  的最大值为  $4.838 \text{ mm/m}$ , 在 X 轴 130 ~ 145 区间, 水平变形  $\varepsilon$  大于规范允许值。

### 3.1.3 开采方案三模拟结果分析

开采方案三的矿柱留设情况如图 7 所示。

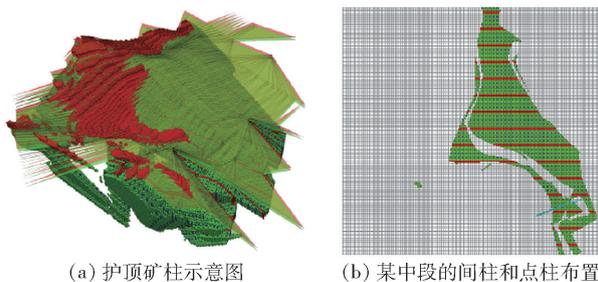


图7 开采方案三矿柱留设情况

矿体全部开采后地表的垂直位移最大值约为 0.36 m, 如图 8 所示。在经过地表垂直位移最大点 ( $X = 440, Y = 200$ ) 且垂直于 X 轴的剖面上, 倾斜  $i$  的最大值为  $-0.682 \text{ mm/m}$ , 小于规范允许值; 曲率  $k$  的最大值为  $0.027 \times 10^{-3} / \text{m}$ , 小于规范允许值; 水平变形  $\varepsilon$  的最大值为  $-0.404 \text{ mm/m}$ , 小于规范允许值。

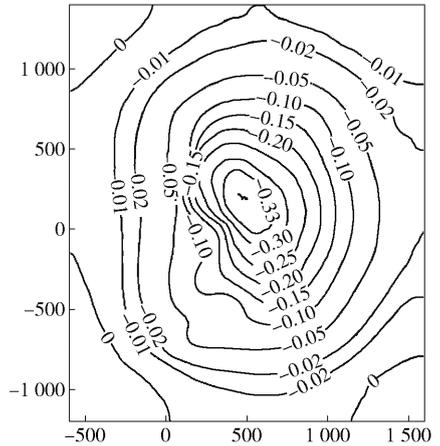


图8 方案三的垂直位移等值线图

在经过地表垂直位移最大点 ( $X = 440, Y = 200$ ) 且垂直于 Y 轴的剖面上, 倾斜  $i$  的最大值为  $-1.699 \text{ mm/m}$ , 小于规范允许值; 曲率  $k$  的最大值为  $-0.112 \times 10^{-3} / \text{m}$ , 小于规范允许值; 水平变形  $\varepsilon$  的最大值为  $1.941 \text{ mm/m}$ , 小于规范允许值。

### 3.2 不同开采方案地表变形对比分析

图 9 和图 10 分别为不同开采方案垂直于 X 轴和垂直于 Y 轴剖面的倾斜、曲率和水平变形。从图 9 和图 10 中可以看出, 在经过地表垂直位移最大点且垂直于 X 轴的剖面上, 开采方案一的倾斜和水平变形均超出了规范允许范围, 开采方案二仅水平变

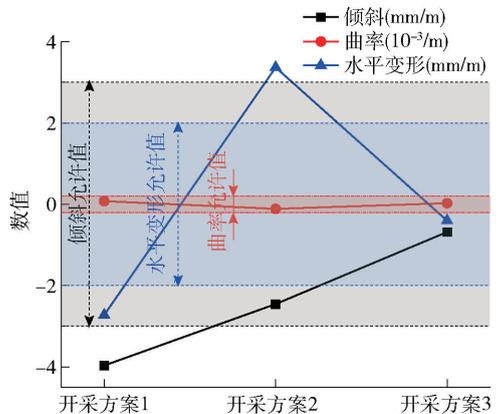


图9 不同开采方案垂直于 X 轴剖面的倾斜、曲率和水平变形

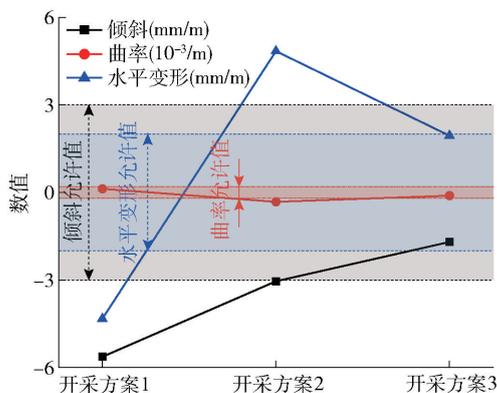


图10 不同开采方案垂直于Y轴剖面的倾斜、曲率和水平变形

形超出规范允许范围,而开采方案三的倾斜、曲率和水平变形均符合规范要求,且三者数值均较小;在经过地表垂直位移最大点且垂直于Y轴的剖面上,开采方案一的倾斜和水平变形同样超出规范允许范围,开采方案二的倾斜、曲率和水平变形均超出规范允许范围,而开采方案三倾斜、曲率和水平变形均符合规范要求。

综上所述,通过对比不同开采方案矿山全生命周期开采后的倾斜、曲率及水平变形发现,开采方案一、开采方案二倾斜、曲率和水平变形值均不能同时满足规范的要求,而开采方案三不仅满足规范要求,且其倾斜、曲率和水平变形值均较小,表明开采方案三能有效减小地下开采引起的地表变形,更有利于地表文物的保护,主要因为在开采方案三中,不仅将盘区长度缩小,同时留设文物边界向外扩20 m范围下方的矿体作为保安矿柱,起到了一定的支撑保护作用,大大减小了开采活动对地表文物的扰动。

## 4 结论

1) 根据矿山工程地质条件和开采设计,建立FLAC<sup>3D</sup>三维数值模型,针对三种不同的开采方案进行了模拟计算,计算结果表明:与开采方案一和开采方案二相比,开采方案三能有效地减小地下开采引起的地表变形。

2) 开采方案三在矿体全部开采结束后,地表的变形值均小于《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012)中建、构筑物保护等级为I级时的允许值。

3) 虽然地下开采对地表文物影响在规范允许范围内,但矿山资源量多、开采范围大,建议矿山基建或试产后,开展采矿方法试验研究,验证矿山地下开采对地表文物的影响,同时矿山在开采过程中,应加强地表岩移及文物稳定性的监测分析。

## [参考文献]

- [1] 刘彦超,陈轲,蔡嗣经,等. 白象山铁矿河床下开采地表沉降数值模拟分析[J]. 金属矿山,2014(11):54-57.
- [2] 张智博,高世坤,吴亚斌. 金属矿山地下开采对地表建筑物稳定性影响分析[J]. 中国矿业,2019,28(8):84-90.
- [3] 邹平,冯娟,李爱兵,等. 地下开采影响下的地表建筑稳定性分析[J]. 矿业研究与开发,2017,37(5):60-63.
- [4] 刘伟,熊贤亮,邵淑成,等. 某金属矿地下开采地表沉降对构筑物安全分析[J]. 世界有色金属,2022(21):37-39.
- [5] 刘伟明,刘瑞蒙,李天宏,等. 某矿山地下开采对地表建(构)筑物的安全影响[J]. 黄金,2024,45(3):15-19.
- [6] 何承尧,范庆,霍洪岩,等. 某铜矿地下开采对地表古铜矿遗址的安全影响[J]. 现代矿业,2018,34(11):76-79,83.
- [7] 任卫东,陈建宏. 开采顺序对采场稳定性及地表沉降影响的数值模拟研究[J]. 矿冶工程,2011,(6).21-24.
- [8] 徐钊. 某矿山地下开采对地表河流安全性影响的研究[J]. 黄金,2013,(3).20-25.
- [9] 王辉镜,许威. 相邻复杂矿体开采过程对地表稳定性的时空影响研究[J]. 金属矿山,2022,(12).233-237.
- [10] 胡崑,李同鹏,刘铭. 刘楼铜铁(金)矿地下开采对地表构筑物安全的影响研究[J]. 现代矿业,2022,(3):101-104,116.
- [11] 洪伟,孙光华,梁世波. 矿柱—充填体系统协同作用机制研究[J]. 金属矿山,2021(3):40-45.

## Study on the Spatial-temporal Evolution of Surface Deformation under Different Mining Schemes of a Mine

ZHAI Jianbo, ZHANG Shaojie, HONG Wei

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to study the impact of underground mining process on surface artifacts of a mine, combined with the engineering geological conditions of the mine, three mining schemes were proposed considering different mining ranges, mining sequences and pillar retention, and a three-dimensional numerical model of the mine back-mining process has been established by using Flac<sup>3D</sup> numerical simulation software, which analyzed the surface tilt, curvature and horizontal deformation of the mine under the different mining schemes, revealed the spatial and temporal evolution characteristics of surface deformation of the mine under the different mining schemes, and determines the optimal mining scheme for the mine. The study shows that: compared with mining scheme 1 and 2, mining scheme 3 can effectively reduce the surface deformation caused by underground mining; mining scheme 3, after all the ore bodies are mined, the deformation value of the surface is less than the permissible value of “Code for Design of Nonferrous Metal Mining”, when the protection level of the buildings and structures is class I. The results of this study can be used for the safety of mines and for the development of the mining industry. The results of this study can provide technical guidance and decision-making basis for the safe and efficient production of mines, and are of great significance for the protection of surface cultural relics.

**Key words:** underground mining; numerical simulation; cultural relics protection; surface deformation

(上接第 59 页)

## Discussion on Energy Saving and Quality Improvement of Polysilicon Reduction Production System

SHI Hewu, ZHANG Shengxue, YANG Yongliang

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** As the basic material of photovoltaic industry and semiconductor industry, polycrystalline silicon has developed rapidly in recent years. As the key link of polysilicon production, the equipment and technology level, the advanced process flow and the rationality of system heat energy utilization are the important factors related to the stable production of polysilicon. This paper introduced the development process of polysilicon reduction equipment, analyzed the selection of liquid phase feeding mode and gas phase feeding mode of reduction system, and focused on the waste heat recovery and utilization technology of reduction furnace bell water, reduction tail gas and chassis water in the reduction production process, so as to provide reference for the construction and operation of polysilicon production, in order to achieve the goal of high efficiency, energy saving and green environmental protection of polysilicon reduction production.

**Key words:** polycrystalline silicon; reduction furnace; vaporizer; waste heat recovery; feeding mode; energy-saving