

Study on deformation characteristics of ground subsidence areas formed by metal mining and suggestions for ecological restoration under the perspective of building a beautiful China —— Taking Huashugou Mining Area of Jingtishan Mine in Sunan County as an example

Xingping Zhao

Third Geological and Mineral Exploration Institute, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou, Gansu, 730050, China

Abstract

Gansu Province, renowned as the “Hometown of Nonferrous Metals” in China, is endowed with abundant nonferrous metal resources. The complex mechanisms and significant challenges of ground subsidence caused by metal mining have become a major constraint on sustainable development in mining areas. Using Huashugou Mine Area of Jingtie Mountain, the largest iron mine in northwestern Gansu, this study employs regional numerical models and finite element analysis based on Mohr-Coulomb constitutive models to investigate deformation characteristics, formation mechanisms, and rock mass movement patterns in subsidence zones, while assessing subsidence extent. The findings indicate that subsidence primarily manifests as surface fractures and mountain slope subsidence, which are closely related to geological mining conditions and micro-morphology. Mining activities lead to increased subsidence and horizontal displacement values along both the surface and ore-bearing rock masses with accelerating rates at greater depths. Within the context of Beautiful China Initiative, four ecological restoration strategies are proposed: phased management of mining subsidence zones, establishment of monitoring information systems, integration of natural ecosystems, and green development approaches.

Keywords

Numerical models; Ground subsidence; Deformation characteristics; Remediation recommendations

美丽中国建设视域下金属矿开采形成地面塌陷区变形特征研究及生态修复对策建议——以肃南县镜铁山矿桦树沟矿区为例

赵星平

甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院，中国·甘肃 兰州 730050

摘 要

甘肃有色和贵金属资源丰富集中，是全国闻名的“有色金属之乡”。金属矿开采引发的地面塌陷形成机理复杂、治理难度大，现已为矿区持续发展的主要制约因素之一。笔者以甘肃西北最大铁矿镜铁山矿桦树沟矿区为例，采用区域数值计算模型和Mohr-Coulomb本构模型有限元分析法，分析了矿区地面塌陷区的变形特征、形成机理，计算围岩移动特征并评估塌陷范围。研究表明，地面塌陷区破坏主要为地表裂缝和沿山体侧沉陷，与地质采矿条件和微地貌有关；受开采影响，地表和矿体围岩的下沉与水平位移值及增长速度随开采深度增加而增加。在美丽中国建设视域下，笔者针对矿山地面塌陷区提出分阶段治理、构建监测信息体系、融合自然生态环境、绿色发展4种生态修复建议。

关键词

数值计算模型；地面塌陷；变形特征；对策建议

1 引言

2023 年 12 月 27 日，中共中央、国务院印发的《关于

全面推进美丽中国建设的意见》指出建设美丽中国是全面建设社会主义现代化国家的重要目标，是实现中华民族伟大复兴的重要内容，加快推进人与自然和谐共生现代化新格局，筑牢生态根基是区域经济高质量发展乃至中华民族伟大复兴的有效抓手 [1]。甘肃是矿产资源大省，矿产种类比较齐全，有色和贵金属资源优势明显，是全国闻名的“有色

【作者简介】赵星平（1990-），男，中国甘肃庆阳人，本科，高级工程师，从事国土空间生态修复研究。

金属之乡”。有色金属矿产资源的开发利用有力支持了以矿产资源为支柱产业的甘肃经济发展,为全省国民经济社会发展起到了重要的支撑作用。甘肃省作为国家西部生态安全屏障的重要组成部分,在矿业开发过程中,遵循绿色发展理念,加强矿山生态修复治理,防范开发触发次生灾害及其对生态环境的破坏,筑牢生态发展根基,是保证甘肃省矿业健康发展的必要途径[2]。但矿业开发中一些与经济社会发展不相适应的矛盾和问题还很突出,目前金属矿开采引发地面塌陷生态环境问题,因其诱发因素综合多样、形成机理分析不系统,地面塌陷范围难以评估等问题现已成为矿区持续发展、健康发展的主要制约因素之一。因此,对金属矿开采形成地面塌陷的变形特征和新的生态修复模式的分析研究是开展生态修复基础保障。

镜铁山矿桦树沟矿区是甘肃西北部最大的铁矿,是酒钢公司钢铁生产最主要的铁矿石原料供应基地,是省内最早一批国家级绿色矿山。其矿山开采造成的地面塌陷问题为目前大部分金属矿开采面临的共性难题,因塌陷面积大,诱发因素多样,开采方式典型,极具代表性。本文从全面推进美丽中国建设新的视角下,以该矿山为例,对其地面塌陷的变形特征和形成机理进行分析,并提出生态修复的对策建议。

2 矿山基本概况

镜铁山矿桦树沟矿区位于甘肃省嘉峪关市西南,行政区划隶属于甘肃省张掖市肃南县祁青工业集中区。发现于

1955年,1970年建设生产,是一座生产50多年的高海拔大型地下开采矿山。矿区面积 4.2455km^2 ,地质储量3.98亿t,生产能力为500万t/a,服务年限60a,开采方式以地下开采,采用无底柱分段崩落法放矿,主要开采矿种为铁、铜矿体。开采区域主要为区内2至23勘探线、2460m水平以上6条铁矿体(Fe I~Fe VI)。

矿区地处祁连山高寒半干旱区气候,为祁连山自然保护区外围保护地带。降雨量和蒸发量极不平衡,年平均降雨量205.3mm,蒸发量2371.5mm,相差11.5倍。区内山峦重叠,山峻谷深,沟壑纵横,谷道狭窄。地貌类型以构造侵蚀中高山地貌为主,土壤以高山寒漠土为主,岩体多呈裸露状态,植被覆盖率不足10%。矿区新构造运动活动强烈,主要有褶曲、隆起、断层错动和地震等,断裂主要为F18、F12,区内除断裂、破碎带外,无其它软弱夹层或错动层。围岩岩体为炭质千枚岩[1]。

3 地面塌陷特征

根据调查,地面塌陷区位于桦树沟矿区中部,沿自东南向西北沿山体走向呈“哑铃状”分布,高程位于3596m~2784m之间,长为1943m,宽为326~921m,山体受到无底柱分段崩落法影响,经过数年的塌陷崩落,现已连片为1处,面积为 120.1hm^2 。地面塌陷区根据塌陷程度,可分为东西两区,其中东区位于17~23勘探线之间,西区位于2~16勘探线之间(详见图1、表1)。

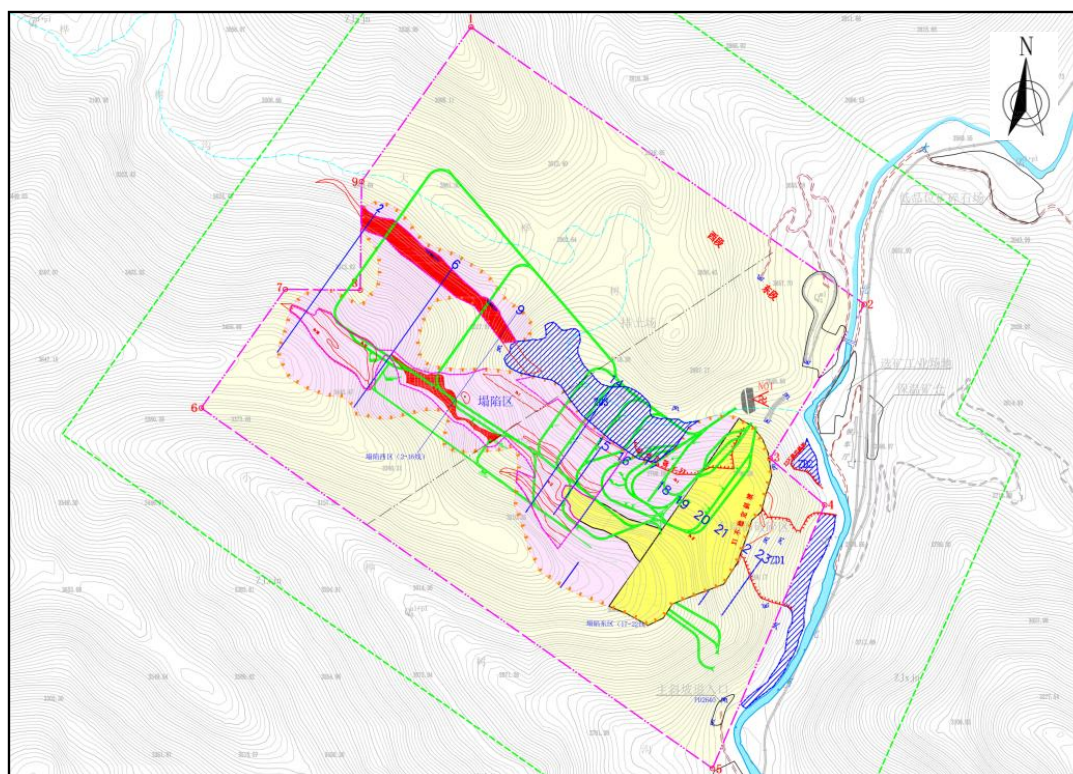


图1 镜铁山桦树沟矿区范围及勘探线分布图

表 1 镜铁山桦树沟矿区地面塌陷区特征一览表

区域	开采矿体	塌陷区特征	变形现状
塌陷东区	Fe I、Fe II	面积 56.12hm ² 长 612m, 宽 917m 深 35~150m	塌陷区自西向东沿山体坡面塌陷崩落, 沿坡处坡度 35~50°, 局部大于 75°; 四周可见塌陷裂缝长 3~6m, 宽 5~15cm; 东侧 19~21 线区域呈现采坑状, 17~19 线处山体坡面塌陷受沉降时变形应力不均匀影响, 呈现出“台阶状”, 且坡面呈现出“犬牙状”。
塌陷西区	FeII 中、西、 FeI 中、FeV	面积 63.98hm ² 长 1514m, 宽 321~751m 深 15~120m	山体自西向东沿山体坡面方向层层塌陷崩落, 沿坡处坡度 35~70°; 塌陷区四周可见塌陷裂缝长 3~6m, 宽 5~15cm; 东侧坡面受塌陷影响, 坡面破碎强烈、塌陷崩落物质堆积, 坡顶塌陷形成的掌子面, 平面呈“簸箕”状, 剖面呈“直线”形。

4 塌陷区地表变形特征及塌陷范围分析

4.1 研究分析方法

本文在传统概率积分法的基础上, 通过建立区域区数数值计算模型, 采用有限元分析法, 对围岩弹塑性变形等进行分析, 该方法对地面塌陷变形机理和范围评估更加科学直观, 具有模型丰富、结果认可度与可靠性高的特点。数值模拟采用 PLAXISD 构建, 有限元基本分析采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 分析计算过程分为四个步骤, 一是将区内求解域离散为有限单元; 二是根据弹塑性力学的基本方程

和变分原理, 构建单元有限元方程; 三是计入边界条件, 求解有限元方程; 四是数据模型后处理计算, 计算相关变形量, 分析塌陷区围岩变形特征及影响范围。

4.2 计算参数选择

该矿山区区域区数数值计算模型建立及参数确定, 参考矿山提供的地表地形图、井上下对照图以及 2~23 地质勘探线等基础资料。Mohr-Coulomb 本构模型数据分析计算时边界约束条件为: 模型四周约束水平位移, 模型底部约束垂直位移, 上部地表为自由表面。模型主要考虑矿体及围岩(板岩)数值模拟计算参数和矿体开采地质参数见表 2、表 3。

表 2 数值模拟计算围岩基础参数

岩体	容重 KN/m ³	杨氏模量 GPa	泊松比	粘聚力 MPa	内摩擦角 (°)	抗拉强度 MPa
矿体	30	2.1	0.23	0.33	39.5	0.82
围岩	27	5.7	0.31	0.53	32.1	1.23

表 3 开采矿体地质参数表

区域	东区			西区		
矿体编号	Fe I、Fe II		Fe III	Fe II (西 II)、Fe V		Fe VII
矿体产状	南西倾 ∠ 40° ~60°	南西倾或倒转 80° ~90°	南西倾 ∠ 25° ~45°	北倾或倒转 ∠ 80° ~85°	南倾 ∠ 65° ~85°	南西倾 ∠ 70° ~80°
厚度 (m)	60~150	50~70	15~45	16~104	11~101	25~45
延深 (m)	400~500		100~150	400~980		100
走向	303°		320°	315°		318°
出露标高	3075~2500		3210~2990	3190~2200	3000~2400	3429~3251

4.3 区域区数数值计算模型构建

区域区数数值计算模型建模时, 山体及矿体均采用采用摩尔-库仑本构模型。模型采用三维数字建模, 模型边界条件采用 PLAXIS 默认的边界条件, 模型底部完全约束, 模型两侧法向约束, 模型顶部自由。本文对塌陷区的研究, 选取矿区东西侧最具代表性的 16、9 勘探线进行模型构建模拟分析。模拟分析时首先计算初始应力平衡, 之后分别模拟各中段只开采 Fe I、Fe II 矿体矿时的围岩应力变化情况和地面塌陷模拟情况, 再数据处理分析矿区 Fe I 矿体、Fe II 矿主矿体以及其他矿体开采后的塌陷区的影响范围 [2][3]。

4.4 塌陷区内岩层地表移动变形特征及稳定性分析

在对计算模型进行的每一步开采后, 模型地表及矿体上下盘围岩产生了垂直及水平方向的移动, 为直观了解开采

过程中围岩的移动特征, 依据下沉盆地的位置及方位, 选取该矿的 16、9 地质勘探线剖面及塌陷变形走向方向进行分析。分析计算时以每垂高 60m 作为一个分析阶段进行, 计算不同开采阶段结束时的位移及应力变化趋势。其中 16 剖面计算从 2460m 高程开始, 9 号剖面计算从 2375m 标高开始。

4.4.1 位移及应力分析

(1) 16 地质勘探线剖面。16 探勘线剖面代表 14~23 勘探线区间东侧 Fe I、Fe II 矿体目前开采深度为 400~450m, 处于回采阶段。该区域在矿体开采至 300m~350m 深度时, 模型最大竖直向变形约 200mm, 最大水平向变形约 40mm, 开采期间围岩相比地表位移增长速度较快, 并且变形位移最大, 在上部和下部其他深度中以及中段开采时围岩移动范围数值测算较小, 且在后期回采阶段引起的变

形对地表影响较小。由数值模拟计算矿体不同开采阶段结束时的各方向位移及应力变化趋势如图 3 ~ 4 所示。

(2) 9 地质勘探线剖面。9 勘探线剖面代表的 2~13 勘探线区间 FeII 西侧、中矿体、FeI 中矿体、FeV 矿体，地下标高 2745m，开采深度为 255m，仍有 345m 继续开采深度。该区域在开采至 120m 深度（2850m 水平）时，模型最大竖向变形约 300mm，最大水平向变形约 55mm，塌陷区变形最为明显和强烈，在采至 200m 后变形量将趋于稳定，但

整体变形量较小。由数值模拟计算矿体不同开采阶段结束时的各方向位移及应力变化趋势如图 5 ~ 6 所示。

4.4.2 塌陷区变形特征分析

根据对 16、9 号剖面区域的地表（Surface）及围岩（Wall Rock）在矿山开采不同阶段形成的最大位移数值对比分析（图 7 ~ 8），明显看出无论是地表还是矿体围岩，在矿山开采过程中下沉与水平位移值均伴随着开采深度增加而增加，地表及围岩的下沉位移增长速度基本相同，具体如下：

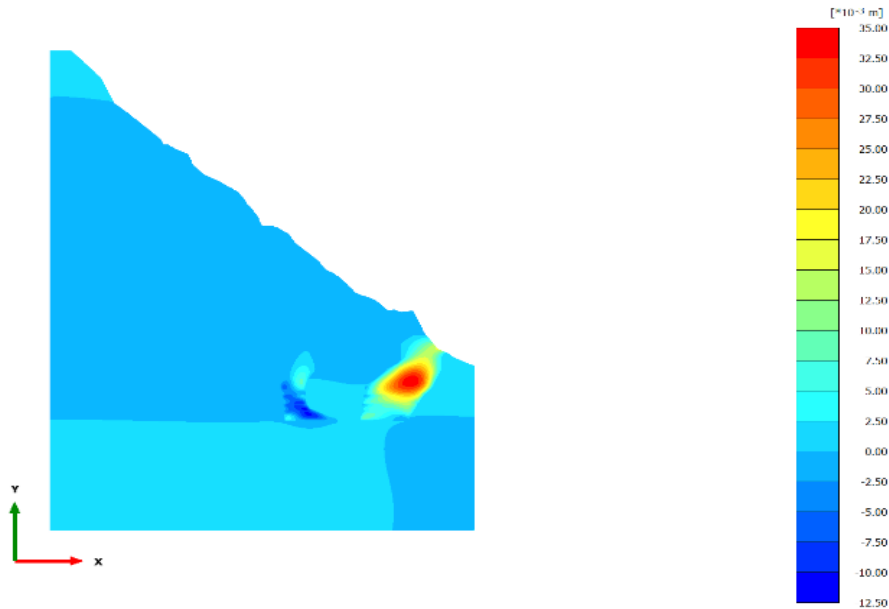


图 3 开采 1-5 中段引起的模型竖直变形



图 4 开采 1-5 中段引起模型竖直变形

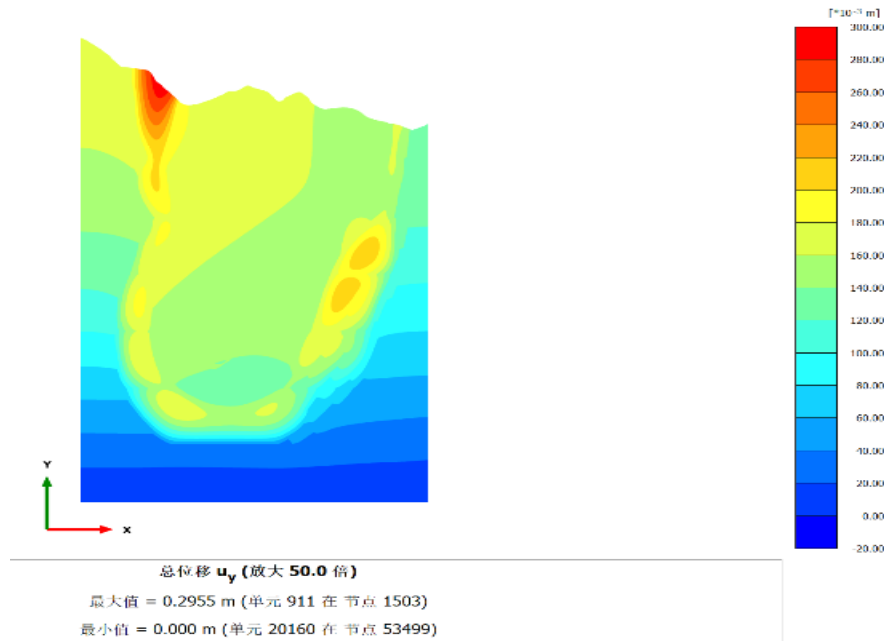


图 5 开采 1-5 中段引起的模型竖直变形

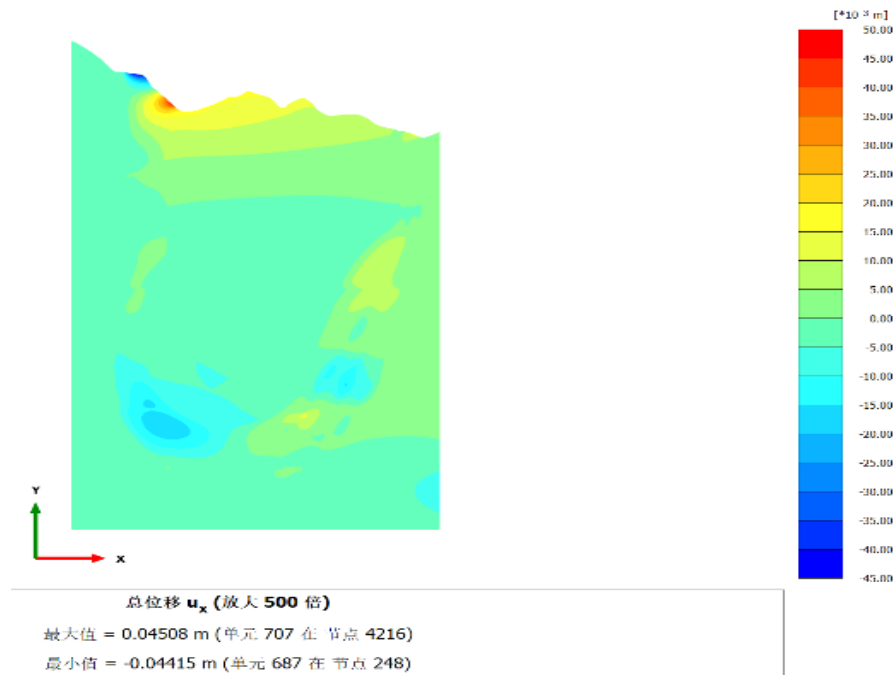


图 6 开采 1-5 中段引起模型竖直变形

(1) 16 探勘线代表 14~23 勘探线区间,在矿体开采至 500m~550m 深度时,开采期间围岩相比地表位移增长速度较快,且变形位移最大,在上部和下部其他深度中以及中段开采时围岩移动范围数值测算较小,在后期回采阶段,开采引起的变形对地表的影响较小,局部存在浅层沉降和坡面垮塌(图 7)。(2) 9 探勘线代表 2~13 勘探线区间,该区在开采至 120m 深度(2850m 水平)时,塌陷区变形最为明显

和强烈,在 200m 之后至变形量将趋于稳定,但整体变形量较小(图 8),在开采过程中将会引起地表裂缝和东侧山体滑塌崩落现象。(3) 该矿开采后,引起地表最大沉陷量为 0.08 ~ 44.63m,最大影响半径 73.83 ~ 332.21m,最大倾斜值为 0.003 ~ 0.2442 mm/m,最大曲率为 0.01 ~ 52.29 × 10⁻⁴mm/m²,最大水平位移为 0.01 ~ 13.38mm,最大水平变形为 0.1mm/m,深厚比 5.09-588.1,塌陷区内发生大面积塌陷

的可能性较小，局部发生滑塌的可能性较大。其中 14~23 勘探线区间处于基本稳定阶段，进一步外扩的可能性较小；

2~13 勘探线区间受开采影响，地表局部塌陷的可能性较大，整体评价为欠稳定~不稳定阶段（表 4）。

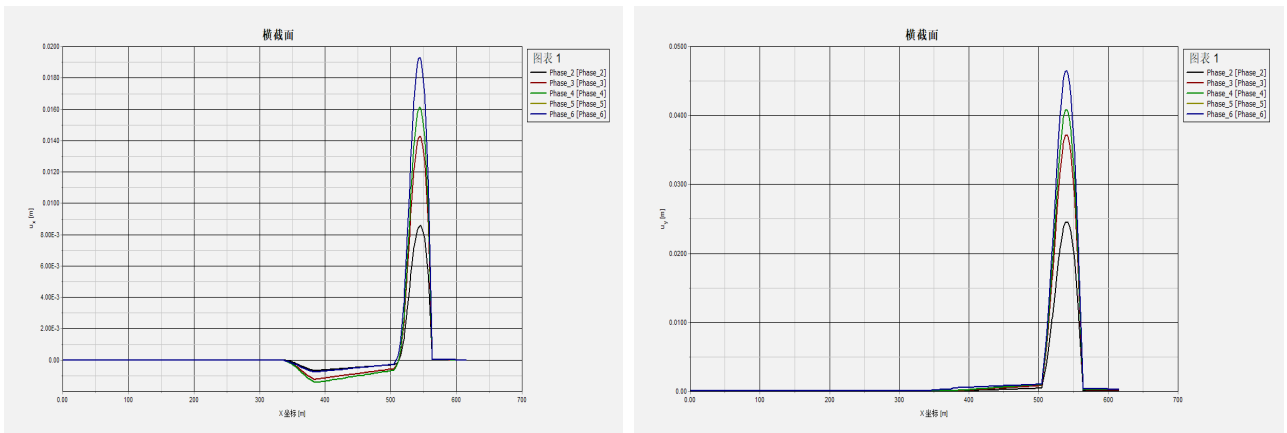


图 7 开采各阶段 16 号勘探线处围岩水平及垂直变形位移对比图

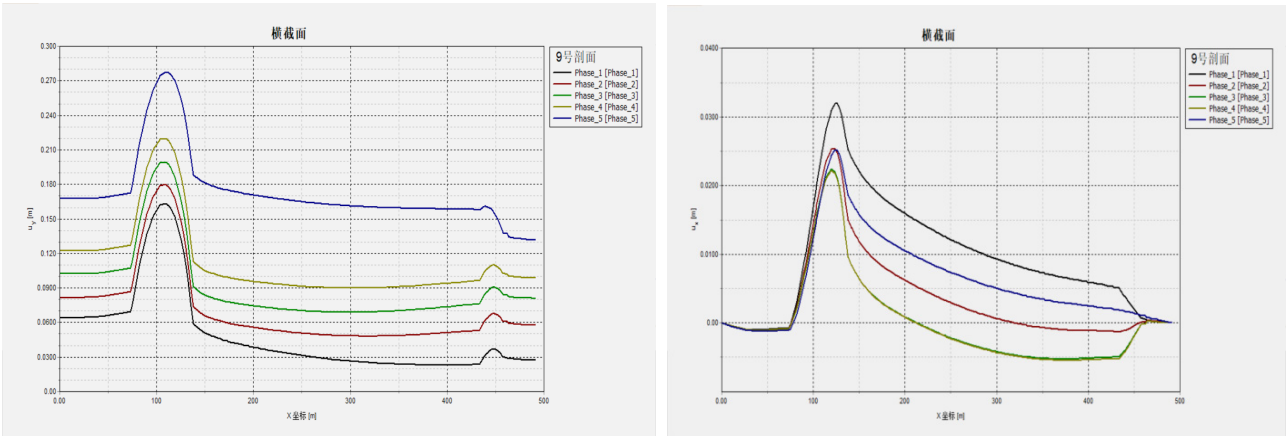


图 8 开采各阶段 9 号勘探线处围岩水平及垂直变形位移对比图

表 4 采矿影响程度、稳定性按采矿地表移动变形值特征表

位置	矿体编号	地表变形指标值（最大值）			采矿影响程度	场地稳定性
		水平变形 ε （mm/m）	斜率 i （mm/m）	曲率 k （ $10^{-3}/m$ ）		
东区	Fe I	0.1055	0.2313	1.8219	较强烈	基本稳定
	Fe II	0.0000	0.0000	0.0000	不强烈	稳定
	Fe III	0.1114	0.2442	5.0287	强烈	不稳定
	Fe IV	0.0000	0.0000	0.0000	不强烈	稳定
西区	Fe II	0.0061	0.0134	0.0612	不强烈	稳定
	Fe V	0.0094	0.0206	0.1556	不强烈	不稳定
	Fe VI	0.0198	0.0434	1.1039	强烈	不稳定
	Fe VII	0.0394	0.0865	2.2003	强烈	不稳定

4.4.3 地面塌陷的破坏形式和范围

（1）地面塌陷的破坏形式

镜铁山矿开采后将形成充分采动的塌陷盆地，其破坏主要方式为地表裂缝和地表沿山体侧沉陷，并与地质采矿条件和微地貌形态有关。开采引起的地表永久性静态裂缝主要分布在地表变形水平拉伸变形区。平缓地形区裂缝发生时，动态拉伸区的裂缝可能在开采沉陷稳定后自行闭合；山体地

形区裂缝发生时，由于附加水平拉伸的影响，位于凸形地貌和凸形边坡部位的动态裂缝不但不能闭合，相反其宽度、密度和落差可能会变的更大 [4]。

（2）地面塌陷范围评估

根据模型数据分析，镜铁山矿闭矿后至塌陷沉稳期，地面塌陷面积 131.74hm²，地面塌陷规模为大型。其中永久裂缝充分发育区域（动态裂缝区）面积为 65.89hm²，占总

面积的48.90%；永久裂缝发育区（永久裂缝区），面积为65.85hm²，占总面积的51.10%。矿区各个矿体开采对地表的影响半径为73.83~332.21m，地表最大水平拉伸变形距拐

点水平距离23.89~132.89m，开采深度178~990m，拐点偏距为6.09~52.06m，矿区矿地表永久裂缝充分发育区域距开采边界中点距离为15.23~130.14m（表5）。

表5 各矿体最大水平拉伸变形距开采边界外侧的水平距离预测一览表

位置	矿体编号	影响半径（m）	开采深度（m）	距拐点水平距离（m）	拐点偏距（m）	距开采边界外侧的水平距离（m）	水平宽度（m）
东段	Fe I	192.95	575	77.18	57.50	19.68	49.20
	Fe II	192.95	575	77.18	57.50	19.68	49.20
	Fe III	73.83	220	29.53	22.00	7.53	18.83
	Fe IV	73.83	220	29.53	22.00	7.53	18.83
西段	Fe II	332.21	990	132.88	99.00	33.88	84.71
	Fe V	201.34	600	80.54	60.00	20.54	51.34
	Fe VI	59.73	178	23.89	17.80	6.09	15.23
	Fe VII	59.73	178	23.89	17.80	6.09	15.23

5 生态修复对策建议

矿山生态修复工作是一个综合性、渐进性和长期性的过程，其平稳推进与高效运行涉及多要素、多主体和多资源。尤其是在美丽中国建设要求下，其多元属性更为复杂，镜铁山矿在新的背景发展需求下，已不能采用单一工程模式进行生态修复，协同融合发展是矿山生态修复的高级阶段与必然需求。该区矿山生态修复方式可从分阶段治理、监测信息体系构建、自然生态环境融合、绿色发展等4个方面相结合去探索实施。

（1）分阶段治理。镜铁山矿地面塌陷区在生态修复时，要遵守地质环境变形机理，根据地面稳定情况，按轻重缓解，分阶段逐步实施。对东侧塌陷区稳定~基本稳定区域，采用地裂缝回填、采空区充填和危岩、浮石清理、被动防护网、削坡减载、锚杆框架支护的防治措施消除地质灾害影响，保障矿山正常生产。对西侧塌陷区欠稳定~不稳定区域内地面塌陷区，建议以监测为主，待塌陷区沉稳后进行治理修复。

（2）监测信息体系构建。该矿区地面塌陷区受开采和地质环境条件影响，具有动态性、复杂性与不确定性。矿山在治理时以监测监控为主，树立动态管理理念，遵循适应性管理模式，开展实时长效监管。首先采用布设微变监测雷达监测、地表沉降监测、应力变化监测、视频监控和动态管护等监测手段，为矿山生态修复全过程变化并修正提供相应数据。其次，应建立矿山生态空间和属性数据库，将矿山资源、生态、空间背景和监测数据进行有效关联，以便基于遥感信息、虚拟现实（VR）、参数反演等技术构建虚拟矿山生态系统，为矿区安全生产和塌陷区生态修复决策提供基础参考[5]。

（3）工程修复与自然环境的融合。遵循因地制宜原则

是工程修复与自然环境融合的内在要求，是矿山生态修复成效评价的重要内容。地面塌陷区生态修复中，应考虑当地生态环境脆弱现状和塌陷区变形机理，不以单纯的封堵、回填、削坡整理和植草绿化工程措施作为主要修复模式，需采用自然恢复为主、人工修复为辅，突出生态韧性建设和人与自然和谐共生融合，结合矿山地质遗迹建设等特色修复思路，以最小程度匹配人工修复措施，达到促进生态链的完善和自我循环，形成“点—线—面”系统控制的全过程矿山生态修复模式。

（4）矿山生态修复与绿色发展融合。矿山生态修复应在明确不同主导生态功能修复目标基础上，依托生态资源、土地资源、固废资源、空间资源等，以矿区生态修复推进矿山绿色长久发展为目标，积极探索“生态+”的产业发展模式，利用地质遗迹营造、产业链延伸、废弃矿渣再利用、防治技术创新和生态环境正导向的开发模式，带动矿区高质量、绿色、可持续发展，并通过生态产品附加值实现经济反哺。

参考文献

[1] 中共中央国务院.《中共中央国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》[J],2023-12-27.

[2] 深入践行习近平生态文明思想坚决筑牢国家西部生态安全屏障[J].环境与可持续发展,2023-4,编号:1673—288X(2023)04—0035—06.

[3] 李海东,胡国长,燕守广.矿区生态修复目标与模式研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(8):963-97.

[4] 雷少刚,卞正富,杨永均.论引导型矿山生态修复[J].煤炭学报,2022,47(2):915-921.

[5] 贾梦旋,王金满,李禹凝等.基于NbS的矿山生态修复研究进展[J/OL].煤炭科学技术:1-13 [2024-02-08].