锡铁山多中段回采变形行为及规律研究*

高天宇[1],张海云[2,3],蔡泽山[1],李正明[1],张忠传[2,3]

(1.西部矿业股份有限公司锡铁山分公司, 青海 海西蒙古族藏族自治州 816203;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对深部矿山多中段联合采动诱发动力灾害显现的问题,对多中段回采区域应力演化规律及围岩变形行为特征进行了研究,通过地质调查、理论分析、数值模拟等方法对锡铁山铅锌矿2 402～2 522 m东部03～011线多中段回采区域的稳定性进行了分析,对开采过程中的围岩及矿体变形破坏行为进行了论证。结果表明,锡铁山多中段回采区域变形破坏主要发生于个别矿体厚大采场以及区域回采中部位置。开采现状的中段顶柱位置最大沉降接近4 cm,暂无较大风险。后续开采2 462 m中段中,14003-3采场位移最大,沉降值超出6 cm,两侧多个采场位移约为5 cm,可能存在部分采场的垮冒。结合多中段回采变形破坏时空演化特征,针对开采过程中潜在的地压问题,对开采设计进行了回采规划优化。研究可为后续矿山区域内多中段安全高效开采提供理论支撑。

关键词:多中段回采;稳定性分析;变形破坏;锚索支护
中图分类号:TD853.391;TD353 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0143-09

Research on Deformation Behavior and Laws of Multi-Level Mining in Xitieshan Lead-Zinc Mine

GAO Tianyu[1], *ZHANG Haiyun*[2,3], *CAI Zeshan*[1], *LI Zhengming*[1], *ZHANG Zhongchuan*[2,3]

(1.Xitieshan Branch of Western Mining Co., Ltd., Haixi Mongolian and Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai 816203, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Chagnsha, Hunan 410012, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Aiming at the problem of dynamic disaster induced by multi-level combined mining in deep mines, the stress evolution law and deformation behavior characteristics of surrounding rock in multi-level mining area were studied. By means of geological survey, theoretical analysis and numerical simulation, the stability of the multi-level mining area of 03-011 line in the eastern part of 2 402-2 522 meter of Xitieshan Lead-Zinc Mine was analyzed, and the deformation and failure behaviors of surrounding rock and ore body in the mining process was demonstrated. The results show that the deformation and failure of the multi-level mining area in this mine mainly occur in the thick and large stope of individual ore bodies and the middle part of the regional mining. The maximum settlement of the top pillar position in the level of the mining status is close to 4 cm, and there is no greater risk. In the subsequent mining of 2 462 m level, the displacement of 14003-3 stope is the largest, and the settlement value exceeds 6 cm. The displacement of multiple stopes on both sides is about 5 cm, and there may be some stope collapse. Combined with the spatial and temporal evolution characteristics of deformation and failure in multi-level mining, aiming at the potential ground pressure in the mining process, the mining planning optimization has been carried out for the mining design, which can provide a theoretical support for the safe and efficient mining of multi-level in the subsequent mining area.

Key words: Multi-level mining, Stability analysis, Deformation and failure, Anchor cable support

0 引言

随着近几十年来我国矿产资源开采强度的增加,浅部优质资源消耗殆尽以及逐年对产能需求的提升,开采模式已发生了巨大改变[1-3]。当前,多中段回采是一种高效经济的开采模式,合理的多中段联合回采方式不仅能够有效降低矿山管理难度,而且对扩大生产规模,降低采矿成本意义重大[4-5]。然

* **收稿日期**:2024-07-31
作者简介:高天宇(1993—),男,辽宁葫芦岛人,工程师,主要从事高效采矿技术研究。E-mail:570254450@qq.com
通信作者:张海云(1992—),男,湖南怀化人,硕士,工程师,主要从事金属矿床开采技术研究。E-mail:51021377@qq.com

而,上下中段联合回采过程中,多中段联合开采扰动叠加、地压控制难度大、潜在破坏失稳风险提升限制了该模式的推广[6-9]。

针对多中段开采下出现的一系列变形扰动问题,专家学者开展了大量的研究工作。侯国权等[10]提出并验证了双中段区域整体崩落回采顶底柱和间柱的残矿回采方案是切实可行的,从而降低了矿体的损失率。黄德镛等[11]从 14 种多中段回采方案中择优选择了"中段间采取自下而上-中段内采取隔一采一-由中间向两翼回采"的回采方案,最大限度地保障了多中段回采安全。孙万明[12]验证了深部多中段充填开采可较大程度地减小围岩变形且不会影响地表塌陷区的稳定性,为多中段充填开采提供了宝贵的借鉴价值。胡亚桥等[13]根据风险等级选择了不同的综合治理方案,解决了多中段复杂采空区治理难题,提高了后续残留矿柱回采的安全性。孟庆彬等[14]研究发现各中段联合开采扰动下,残留矿柱削减了相邻中段间的开采扰动,减弱了上覆岩层的变形破坏,对维持采场围岩的稳定性有一定的积极作用。盛佳等[15]采用回采嗣后崩落法进行现场工业试验,实现了下缓倾斜厚大矿体在多中段群空区下的高效开采,为类似多中段群矿山提供了有力的技术支撑。郁标等[16]研究了井下 3 个中段协同开采巷道变形破坏特征,表明协同开采扰动、矿岩原始状态及地应力是 3 个中段协同开采巷道变形破坏的主要原因。可见,由于矿山地下的复杂性、独特性及不确定性,多中段联合开采的围岩控制理论仍不清晰,巷道控制方案仍需完善[17-18]。

金属矿山在多中段联合开采时,各中段的采动交互影响作用逐渐显现,采动引起的叠加扰动也随之逐渐剧烈,各中段的变形破坏愈加严重[19-20]。因此,本文以锡铁山典型铅锌矿为例,针对深部矿山多中段回采诱发动力灾害显现这一问题,研究多中段回采围岩变形破坏特征,通过地质调查、数值计算、理论分析及工程实践等方法,对锡铁山多中段回采过程中应力演化规律、围岩运移情况及联动塑性破坏特征进行分析,从而总结多中段开采区域的变形行为诱因,并提出相应的控制方案,以期为多中段联合开采围岩控制及灾害防治提供一定的参考。

1 工程背景

锡铁山铅锌矿 2 402～2 522 m 东部 03～011 线区域分为 2 402 m 和 2 462 m 两个中段,60 m 一个中段,2 402～2 416 m 为 2 402 m 中段底柱,2 450～2 462 m 为 2 402 m 中段顶柱;2 462～2474 m 为2 462 m 中段底柱,2 506～2 522 m 为 2 462 m 中段顶柱。

该区域采用两个中段同时回采,中段内矿房采用两步骤小分段空场充填采矿法,一步骤回采结束后待充填体达到养护强度后进行二步骤矿房回采。当前区域内主要回采一步骤采场,实际生产过程中出现局部采场顶板及侧帮的破坏现象,对矿区正常生产造成了一定影响。

同时由于上下中段联合回采方式下应力叠加导致的应力高度集中与能量释放规律不明,顶底柱潜在断裂破坏风险时刻影响矿山生产,因此亟需对矿山多中段回采过程进行应力-应变分布演化规律进行研究,论证区域多中段开采稳定性,对后续采场的回采进行合理规划,保障矿山回采的安全性。

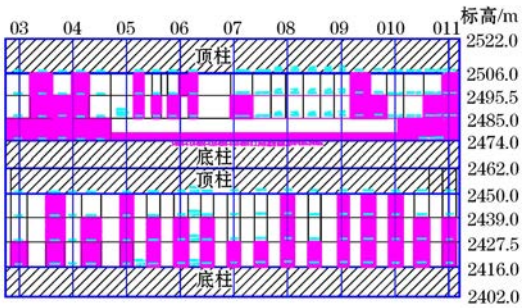


图 1 2 402～2 522 m 东部 03～011 线开采现状

Fig.1 Mining status of 2 402-2 522 meter east 03-011 line

2 工程地质条件

2.1 室内试验参数

采集锡铁山铅锌矿 2 402～2 522 m 东部 03～011 线区域内典型矿体、上下盘围岩岩样,试验在长沙矿山研究院有限责任公司岩石力学实验室完成,具体试验结果见表 1。

表 1 典型矿体、围岩的物理力学参数

Table 1 Petrophysical and mechanical parameters of typical ore body and surrounding rock

类别	块体密度/(g/cm³)	抗拉强度/MPa	单轴抗压强度/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
大理岩(天然)	2.702	2.25	31.16	0.242	40.80～59.91	4.19～8.77
矿体(天然)	3.971	2.94	44.04	0.290	50.49～61.02	5.68～10.48
片岩(天然)	3.346	3.16	75.95	0.217	48.25～66.94	7.75～13.57
片岩(饱水)	3.516	—	46.52	0.324	60.78	6.06

2.2　工程地质调查

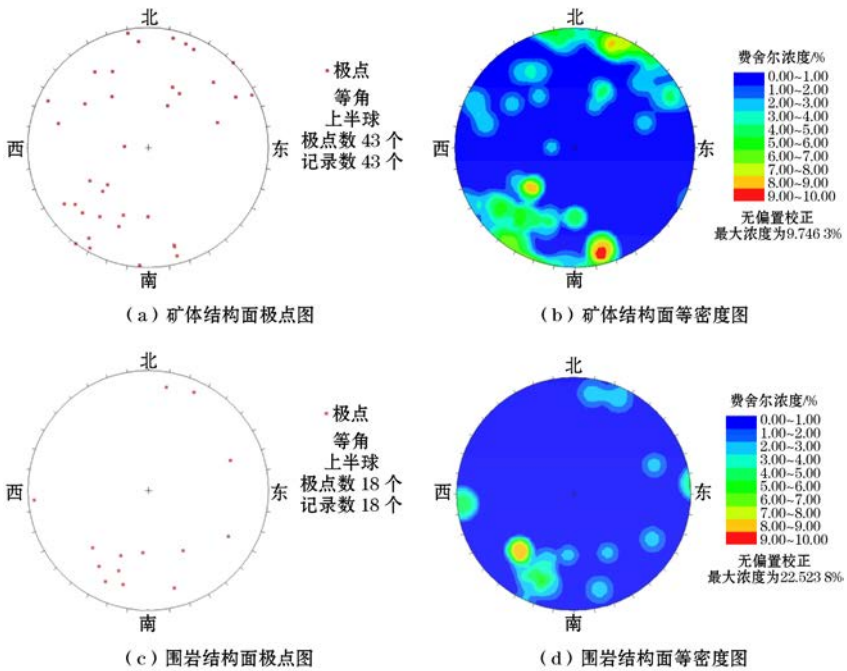
采用详细线观测法对锡铁山铅锌矿 2 402～2 522 m 东部 03～011 线区域内典型结构面的发育情况进行详细调查，调查结果见表 2。

现场测量结果如图 2 所示。根据现场调查结果可知，东区矿体优势结构面有三组，第一组 165°∠85°，第二组 228°∠51°，第三组 18°∠84°；东区围岩优势结构面有两组，第一组 223°∠67°；第二组 265°∠87°。

表 2　典型结构面调查结果

Table 2　Survey results of typical structural plane

调查位置	矿岩节理条数/条	平均间距/(m/条)
2 416 m 分段 15005 穿脉	22(矿体)	3.4
2 416 m 分段 15005-02 穿脉	20(矿体)	3.4
2 416 m 分段 15005 穿脉	13(围岩)	5.5
2 416 m 分段 15005-02 穿脉	5(围岩)	5.5



(a) 矿体结构面极点图　(b) 矿体结构面等密度图

(c) 围岩结构面极点图　(d) 围岩结构面等密度图

图 2　现场测量结果

Fig.2　On-site measurements

2.3　岩体质量评价

岩石物理力学参数可作为判别岩性力学类别的量化依据，而岩体参数需通过多因素耦合分析确定。单纯以岩石强度数值评判岩体质量参数更为符合岩土工程环境，参数的优劣直接关系地下工程的稳定性。运用 RQD 值分级法、RMR 分级法、Q 系统分级法与 GSI 分类法对区域工程岩体进行分级。综合评价锡铁山东部矿区岩体属中等质量，需在实际生产过程中视工程揭露情况进行加固强化处理。

表 3　工程地质岩体质量评价结果

Table 3　Evaluation results of engineering geological rock mass quality

类别	RQD 值分级法		RMR 分级法		Q 系统分级法		GSI 分类法	
	级别	评级	级别	评级	级别	评级	*GSI* 值	评级
矿体	Ⅲ	较好	Ⅲ	中等	Ⅲ	中	55	好
围岩	Ⅲ	较好	Ⅲ	中等	Ⅳ	差	46	较好

3　多中段回采模拟研究

3.1　模型构建

为研究区内多中段回采规律，忽略其他因素的影响，对模拟对象进行简化与假设，主要包括忽略地下工程如巷道、溜井对采场稳定性影响，简化应力场影响因素构成，仅考虑矿岩体自重作用，忽略构造应力、地震波、爆破瞬时振动等因素影响。

根据矿区矿体地质平面图构建矿体模型，结合上下盘围岩情况构建模型，如图 3 所示。具体过程为绘制锡铁山铅锌矿 2 402～2 522 m 东部 03～011 线区域矿体分布纵投影图、中(分)段平面图，删除多余线段，并对奇点、尖锐点进行圆滑处理，闭合构建矿体三维模型。根据矿山实际回采参数切分三维模型，划分计算采场结构。围岩根据上下盘情况由矿体向外扩展形成 3～5 倍范围的围岩。整体模型 *X*

方向长 804 m,Y 方向长 470 m,Z 方向长 300 m,模型单元总数约为 77.9 万个,节点总数约为 13.7 万个。

模型除上表面为自由面外,其余表面均采用固定位移约束,忽略区域构造应力,只考虑重力作用。同时由于是截取区段进行模拟分析,上表面根据区域平均赋存深度 700 m,即上覆岩层产生的均布载荷数值为 22.9 MPa。



(a) 2427.5 m 分段平面图 (b) 2427.5~2439.0 m 分段矿体模型 (c) 矿体模型

图 3 矿区建模情况

Fig.3 Modeling of mining area

基于霍克-布朗破坏准则,结合地质调查结果,对矿体围岩力学参数进行折减,得出模拟计算力学参数,见表 4。

表 4 矿体、围岩的模拟计算力学参数

Table 4 Simulation calculation mechanical parameters of ore body and surrounding rock

类别	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(g/cm³)	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
矿体	6.5	0.62	5 412.68	0.28	3.97	22.48	1.56	28.0
围岩	5.4	0.54	5 287.53	0.21	3.35	18.19	1.48	27.6

3.2 多中段回采开采顺序

不同开采顺序导致的区域内围岩应力重分布及围岩变形破坏分布情况差异巨大,因此多中段回采稳定性的分析工作需结合矿体原中段回采具体情况,具体分析回采过程中应力-应变分布情况及演化规律,进而探索下步回采过程中区域范围内的岩体变形破坏行为。表 5 为 2019—2023 年 2 462 m 中段和 2 402 m 中段的矿房回采情况统计,根据历年回采情况,合理规划回采步骤,使得回采过程更为贴合实际。回采过程中矿体垂直剖面最小主应力分布情况如图 5 所示。

表 5 矿区 2 402 m 中段与 2 462 m 中段部分采场回采情况

Table 5 Mining situation of some stopes in the level of 2 402 m and 2 462 m in the mining area

采场编号	分段/m	回采结束时间	分段/m	回采结束时间	采场编号	分段/m	回采结束时间	分段/m	回采结束时间
14001-1-1	2474.5	2021 年 8 月	2 485	—	15 001	2 416	2023 年 9 月	2 439	—
14001-1	2 474.5	2019 年 3 月	2 485	2022 年 3 月	15 002	2 416	2023 年 2 月	2 439	—
14001-2	2 474.5	2021 年 11 月	2 485	—	15 003	2 416	2023 年 3 月	2 439	—
14001-3	2474.5	2020 年 4 月	2 485	2023 年 11 月	15001-1	2 416	2022 年 5 月	2 439	—
14003-1	2 474.5	2019 年 12 月	2 485	—	15001/15002-2	2 416	2022 年 6 月	2 439	—
14003-2	2 474.5	2023 年 6 月	2 485	—	15002-2	2 416	2022 年 5 月	2 439	—
14003-3	2 474.5	2019 年 12 月	2 485	2020 年 6 月	15002-3	2 416	2022 年 7 月	2 439	—
14004-1	2 474.5	2022 年 5 月	2 485	2023 年 3 月	15003-2	2 416	2022 年 1 月	2 439	2023 年 2 月
14004-2	2 474.5	2020 年 3 月	2 485	2020 年 12 月	15004-2	2 416	2020 年 8 月	2 439	—
14005-1	2 474.5	2019 年 3 月	2 485	—	15005	2 416	2020 年 7 月	2 439	2023 年 1 月
14005-2	2 474.5	2019 年 1 月	2 485	2019 年 10 月	15005-2	2 416	2020 年 8 月	2 439	2022 年 9 月
14005-3	2 474.5	2019 年 3 月	2 485	—	15 006	2 416	2020 年 8 月	2 439	2023 年 4 月
14005-4	2 474.5	2019 年 5 月	2 485	2019 年 11 月	15006-2	2 416	2020 年 7 月	2 439	2022 年 11 月
14005-6	2 474.5	2020 年 4 月	2 485	—	15 007	2 416	2020 年 8 月	2 439	—
14 006	2 474.5	2019 年 4 月	2 485	—	15007-2	2 416	2020 年 8 月	2 439	—
14006-2	2 474.5	2020 年 2 月	2 485	2020 年 7 月	15 008	2 416	2020 年 6 月	2 439	—
14007-1	2 474.5	2023 年 6 月	2 485	—	15008-2	2 416	2020 年 6 月	2 439	—
14007-2	2 474.5	2019 年 10 月	2 485	2020 年 7 月	15 009	2 416	2021 年 4 月	2 439	2022 年 11 月
14007-3	2 474.5	2019 年 1 月	2 485	—	15009-2	2 416	2020 年 5 月	2 439	2021 年 8 月

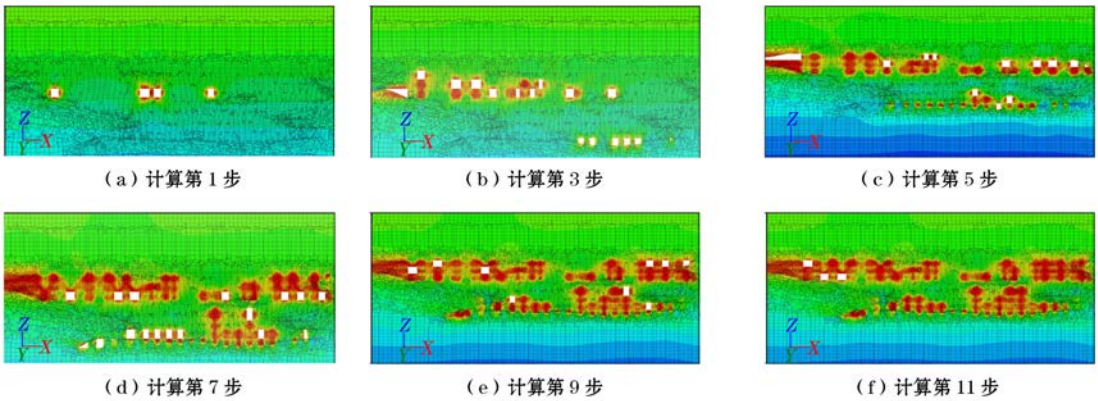


图 4　回采过程中矿体垂直剖面最小主应力分布情况

Fig.4　Distribution of minimum principal stress in vertical profile of ore body during mining process

3.3　回采现状分析

顶柱回采过程中最小主应力、最大主应力、位移和塑性区分布见图 5 和表 6。

(1) 最小主应力分析：受岩体开挖影响，采场的顶板、底板以及侧帮形成开挖临空面，失去矿岩支撑，进而在应力作用下往采空区内部方向发生拉伸变形。由于矿岩稳固性较好，拉应力主要分布在采场采空区周围矿岩内，当采空区靠近顶柱附近或已开采并充填后，顶柱才会出现拉应力，其他时间顶柱主要呈现压应力状态。从数值上来看，整个历史回采过程中，采空区底板拉应力极值为 0.36 MPa，小于矿体的张拉屈服强度，但由于云图无法将所有采场矿岩的最小主应力充分展现，单纯从图上拉应力分布规律来看，采场开采后，采场临空位置的矿岩可能存在拉伸破坏，需补充监测点数据进一步分析。

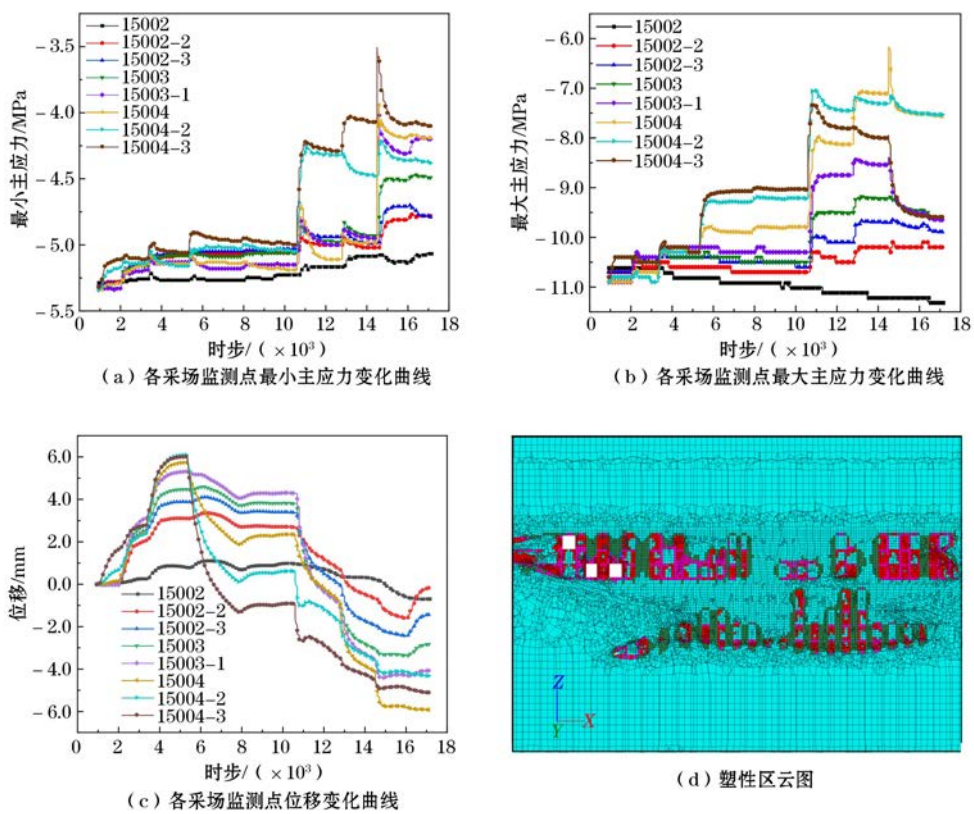


图 5　采场顶板主应力、位移与塑性区分布情况

Fig.5　Distribution of principal stress, displacement and plastic zone of stope roof

表 6 顶柱回采过程中各采场最大主应力范围

Table 6 The maximum principal stress range of each stope in the process of top pillar mining

采场编号	最大主应力范围/MPa	采场编号	最大主应力范围/MPa	采场编号	最大主应力范围/MPa	采场编号	最大主应力范围/MPa
15002	−5.068 8～−3.418 7	15004-2	−5.177 0～−3.265 5	15009	−5.101 9～−2.698 2	15010-2	−5.100 4～−2.211 0
15002-2	−5.091 3～−3.419 9	15004-3	−5.062 5～−2.283 3	15009-1	−5.301 4～−2.385 4	15010-3	−5.099 3～−2.672 2
15002-3	−5.102 4～−3.180 3	15005	−5.103 5～−3.421 5	15009-2	−5.344 4～−0.5282 3	15011	−5.061 2～−2.765 7
15003	−5.107 5～−3.440 5	15005-1	−5.085 6～−2.791 7	15009-3	−5.098 7～−1.082 2	15011-1	−5.229 6～−3.721 3
15003-1	−5.151 7～−3.889 0	15005-2	−5.105 6～−3.673 2	150 010	−5.097 5～0.614 46e	15011-2	−5.118 3～−3.852 9
15003-2	−5.085 6～−2.791 7	15005-3	−5.069 3～−3.411 5	15010-1	−5.098 5～−1.286 5	15011-3	−5.136 7～−3.727 2
15 006	−5.104 3～−4.210 7	15007-2	−5.064 6～−4.142 9	150012	−5.151 7～−3.889 0	150 013	−5.072 9～−3.512 9
15006-1	−5.119 0～−4.175 8	15007-3	−5.096 6～−3.319 9	150012-1	−5.100 5～−3.675 5	150013-1	−5.081 6～−4.062 8
15006-2	−5.069 0～−4.121 6	15008	−5.092 9～0.457 25e	150012-2	−5.138 7～−3.703 1	150013-2	−5.083 5～−4.587 0
15006-3	−5.066 5～−4.178 5	15008-1	−5.060 8～−2.859 8	150012-3	−5.094 6～−3.345 4	150014-2	−5.065 1～−4.777 7
150 07	−5.069 8～−3.960 2	15008-2	−5.057 5～−2.990 4	15007-1	−5.097 6～−3.676 7	15008-3	−5.088 6～−2.721 5

(2) 最大主应力分析:受采场回采影响,原岩应力二次分布,采空区顶底板区域岩体应力有一定程度释放,二步骤位置则相对出现了不同程度的应力集中现象,应力集中程度因采空区体积、所处中段位置、距离矿脉中部远近以及二步骤采场自身尺寸而存在差异,这部分区域容易发生剪切破坏。顶柱区域的压应力值在 2～4 MPa 之间,部分区域由于矿体形态尖锐,如采场顶底板与两帮相交位置,出现了应力集中现象,最大压应力值达到 27.8 MPa,因而局部区域容易因应力超出强度极限而被破坏。

(3) 位移分析:采场开挖后,其周边岩体向采空区内部产生变形,因采空区体积、所处中段位置等不同,不同采空区的顶底板沉降或底鼓位移也有所差异,整体表现为采空区体积越大、越靠近矿脉中部,采空区顶柱对应的垂直变形量越大,其中 2 462 m 中段顶柱主要表现为沉降,2 402 m 中段顶柱主要表现为向上隆起。由采空区的顶柱位移分析可知,2 462 m 中段顶柱沉降最大部分主要分布在 14003-3、14003-2 和 14003-1 等采场附近,其中 14003-3 采场顶柱位置沉降接近 4 cm,在未来开采过程中,可能有增大趋势;2 402 m 中段 15004-2、15004-3 等采场顶柱附近主要表现为向上隆起,最大隆起值约为 3 cm。根据容许极限位移量判据可知,采场顶板的最大下沉或隆起量为 5～10 cm,岩体存在潜在稳定性问题,可知开采至今,两中段顶柱暂时未出现较大风险。

顶底柱回采后,采场顶板中心监测点的最小主应力由初始平衡状态下的负值逐渐转变为正值,即实现了由压应力向拉应力的转变。从监测点的最大主应力数值大小来看,除 150010、140011、140011-2、140013 采场顶柱位置的拉应力值整体较大,最大拉应力值接近矿体的极限抗拉强度 0.62 MPa,采场顶柱位置可能发生拉伸破坏,其他大多数采场未回采至最上分段靠近顶柱位置,因此应力主要以压应力为主,拉伸破坏的区域范围需结合塑性区部分进行分析。

(4) 塑性区分析:整个历史回采过程中,处于当前状态下的塑性破坏类型主要为剪切破坏,主要分布在采场的二步骤采空区周围(一步骤充填体内),结合前文应力分析可知,这部分区域应力集中现象显著,最大剪切应力超过充填体的抗剪强度,进而导致二步骤采场发生剪切破坏,顶柱位置出现塑性区的范围基本在 1 m 以内,未出现塑性区大面积贯通的现象。

4 后续开采稳定性分析

4.1 后续回采规划

根据开采现状分析可知,当前锡铁山 2 402～2 522 m 东部 03～011 线区域多中段回采过程中,局部区域会出现一定破坏,但并不会出现范围性矿柱破坏。后续矿体还存在一定矿量并未开采,结合矿区未来整体回采计划,进行回采步骤编录,进行回采模拟,详见表 7。

表 7　模型计算采场回采工程

Table 7　The model calculates the stope mining project

计算步骤	计算内容	备注
1	2439-15004-2、2439-15006、2439-15006-2、2427.5-15007、2427.5-15007-2、2439-15008-2、2439-15009、2495.5-14005-2、2439-15010-2、2439-15011、2439-15011-2、2439-15012、2439-15013-2、2495.5-14004-1、2495.5-14009-4、2495.5-14005-4、2427.5-15002-2、2427.5-15003	开挖充填
2	2439-15007、2439-15007-2、2474.5-14004-3、2439-15002-2、2439-15003	开挖充填
3	2416-15004、2416-15004-3、2416-15005-1、2416-15005-3、2416-15013-1、2416-15012-3、2416-15012-1、2416-15011-3、2416-15011-1、2474.5-14001-1-2、2474.5-14001-1-2、2474.5-14001-1-4、2474.5-14003-2、2474.5-140012、2474.5-140010、2485-14004-3	开挖充填
……	……	……
11	2427.5-15006-3、2427.5-15007-3、2427.5-15008-3、2427.5-15009-3、2427.5-15010-3、2485-14006-4、2495.5-14007-2、2427.5-15014-2、2485-14009-6、2474.5-14008-3	开挖计算
12	2439-15006-3、2439-15007-3、2439-15008-3、2439-15009-3、2439-15010-3、2495.5-14006-4、2439-15014-2、2495.5-14009-6、2485-14007-3、2485-14008-3	开挖计算
13	2495.5-14007-3、2495.5-14008-3	开挖计算

4.2　区域分析

（1）主应力分析：研究区域内采空区底板拉应力极值为 0.45 MPa，采场临空位置的矿岩可能存在拉伸破坏。

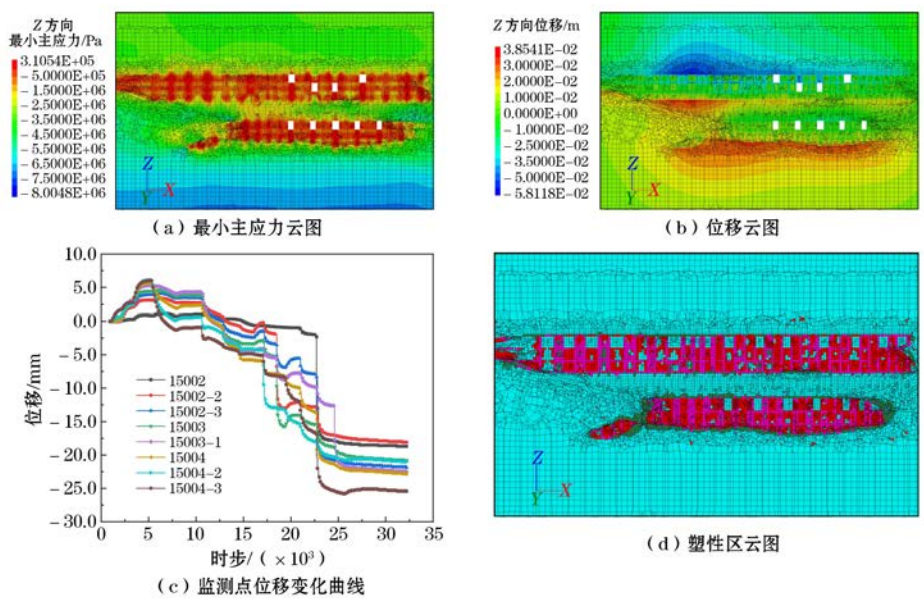
（2）位移分析：2 462 m、2 402 m 中段顶柱主要表现为向下沉降，沉降最大部分主要分布在 03～04 线 14003-3 采场附近，沉降值接近 5 cm，存在顶板局部垮塌的可能；2 402 m 中段顶柱由原先的向上隆起转变为向下沉降，但沉降值相对偏小，主要在 2～3 cm 范围内。

（3）中段分析：以“14”开头的采场顶柱，即 2 462 m 中段采场顶柱主要以向下沉降为主，相对于历史回采过程分析沉降更明显，“15”开头的采场顶柱，即 2 402 m 中段采场顶柱由向上隆起转变为向下沉降，位移值主要分布在 3 cm 范围以内。从监测点的位移数值大小来看，2 462 m 中段 14003-3 采场位移最大，沉降值超出 5 cm，两侧 14001-1-2、14004-1、14003-2、14001-1-3、14001-1-2、14004-3、14005-1、14005-2 等采场位移接近 5 cm，可能存在部分采场的垮冒。

（4）塑性区分析：06～010 线二步骤采场或一步骤充填体发生剪切破坏。研究区域内采场顶柱位置的塑性区范围较小，且上下中段间塑性区未贯通，顶柱整体较稳定。

综上所述，2 402 m 中段需关注 06～010 线矿体的二步骤采场，该部分采场一步骤充填体容易发生剪切破坏，导致采空区上部的顶柱产生剪切变形；2 462 m 中段主要需关注 03～04 线的采场，该处采场位移较大。

采场顶板最小主应力、位移与塑性区分布情况如图 6 所示。



（a）最小主应力云图　（b）位移云图

（c）监测点位移变化曲线　（d）塑性区云图

图 6　采场顶板最小主应力、位移与塑性区分布情况

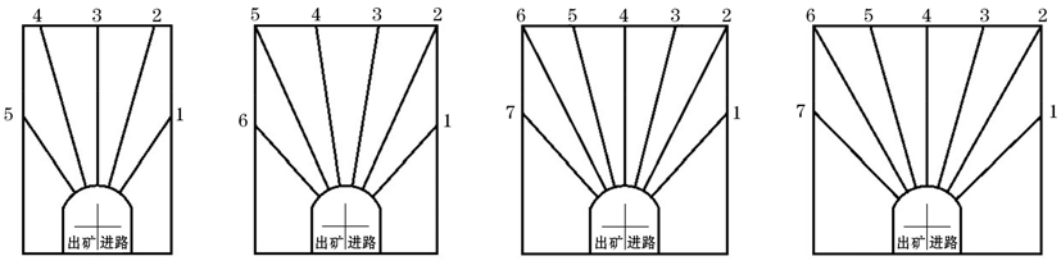
Fig.6　Distribution of minimum principal stress, displacement and plastic zone of stope roof

4.3 采场措施规划

根据对锡铁山多中段回采变形行为及规律研究,确定两个中段重点变形破坏潜在区域,并事先制定对应措施防止后期出现大的地压活动现象。

(1) 2 402 m 中段的剪切破坏区域面积远大于 2 462 m 中段,主要分布在 15006-2、15007、15007-2、15008、15008-2、15009、15009-2 等充填体内,且与采空区贯通,15006-3、15007-1、15007-3、15008-1、15008-3、15009-1 紧靠以上充填体,其顶柱需要防止发生剪切破坏。但是从整体破坏区域来看,上下中段间矿柱未发生塑性区贯通现象,顶板冒落仅为小部分区域,对顶底柱的整体稳定性影响有限,当顶板围岩较破碎时,可视情况可在采场顶部增加锚索等支护,如图 7 所示,锚索排距为 5 000 mm、孔底距为 2 400～2 700 mm。

(2) 2 462 m 中段 14003-2 采场位移最大,沉降值超出 6 cm,两侧 14001-1-4、14003-1、14003-3、14004-1、14004-3、14005-1、14005-2、14005-3 等采场位移在超出或接近 5 cm 范围,岩体存在潜在稳定性问题,但顶板塑性区依然较小,可能存在小范围冒落,对整体稳定性影响较小,当顶板围岩较破碎时,可视情况可在采场顶部增加锚索等支护。



(a) 6.5 m 采幅破碎带刷扩断面图　(b) 8.0 m 采幅破碎带刷扩断面图　(c) 9.0 m 采幅破碎带刷扩断面图　(d) 10.0 m 采幅破碎带刷扩断面图

图 7 锚索支护形式

Fig.7 Support forms of anchor cable

5 结论

(1) 通过室内试验、现场工程地质调查及岩体质量评价确定了矿山基本数据,确定了锡铁山东部矿区岩体质量属中等质量,局部区域需视现场情况进行加固强化处理。

(2) 构建了矿区多中段开采数值分析模型,结合矿区开采历史过程及现状,对矿山开采过程中应力、位移及塑性区分布规律进行了研究。分析表明,2 402 m 中段 15004-2、15004-3 等采场顶柱附近最大隆起值约 3 cm,2 462 m 中段 14003-3 采场顶柱位置沉降接近 4 cm,均未达到 5～10 cm 的极限位移值。多中段回采过程中,采场局部因应力超出强度极限而破坏,需在回采过程中增加采场顶部锚索进行维护。

(3) 整个回采过程中,采空区底板拉应力极值为 0.45 MPa,小于矿体的张拉屈服强度,上下中段间矿柱未发生大的塑性区贯通现象,主要表现为小区域贯穿,对顶底柱的整体稳定性影响有限,根据变形破坏特征,2 462 m 中段 14003-3 采场位移最大,沉降值超出 6 cm,两侧 14001-1-2、14004-1、14003-2、14001-1-3、14001-1-2、14004-3、14005-1、14005-2 等采场位移约 5 cm,可能存在部分采场的垮冒。因此,预先分不同区域进行支护加固处理,能够有效控制围岩变形,确保后续开采过程的安全稳定。

参考文献(References):

[1] 李广,史志远,余洪伟.金属矿山深井大规模提升关键技术装备进展与发展趋势[J].矿业研究与开发,2024,44(9):1-8.
LI Guang, SHI Zhiyuan, YU Hongwei. Progress and development trend of key technology and equipment for large-scale hoisting of deep wells in metal mines[J]. Mining Research and Development,2024,44(9):1-8.

[2] 王勇,吴爱祥,杨军,等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报,2023,45(8):1281-1292.
WANG Yong, WU Aixiang, YANG Jun, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8): 1281-1292.

[3] 郭奇峰,蔡美峰,吴星辉,等.面向 2035 年的金属矿深部多场智能开采发展战略[J].工程科学学报,2022,44(4):476-486.
GUO Qifeng, CAI Meifeng, WU Xinghui, et al. Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035.[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(4):476-486.

[4] 原绅师,聂兴信,远洋,等.赋存于软弱围岩下残矿回采方案优选[J].金属矿山,2024(8):10-18.
YUAN Shenshi, NIE Xingxin, YUAN Yang, et al. Optimization of residual ore mining scheme under weak surrounding rock[J]. Metal Mine,2024(8):10-18.

[5] 李聪.多中段联合开采水平矿柱临界厚度研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
LI Cong. Study on the critical thickness of horizontal pillar in multi-middle section joint mining[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2023.

[6] 李兴权.白象山铁矿多中段联合开采围岩扰动效应研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
LI Xingquan. Study on disturbance effect of surrounding rock in multi-middle section of Baixiangshan iron ore mine[D].Xuzhou: China University of Mining and Technology,2019.

[7] 王昊,胡东涛,陈思,等.某磷矿既有采空区对 Ph_3 矿层回采稳定性研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2023,45(3):364-370.
WANG Hao, HU Dongtao, CHEN Si, et al. Study on stability of Ph_3 ore seam mining in existing goaf of phosphate mine[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering),2023,45(3):364-370.

[8] 赵杨,李向东,朱远乐,等.基于 FLAC3D 金川二矿区双中段充填法开采回采顺序研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2022,56(2):270-279.
ZHAO Yang, LI Xiangdong, ZHU Yuanle, et al. Mining sequence research of backfill mining in double middle sections of Jinchuan No.2 mining area based on FLAC3D[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition),2022,56(2):270-279.

[9] 王雨萌,关凯,朱万成,等.基于现场监测与数值模拟结合的采动诱发围岩失稳与地表沉降研究[J].东北大学学报(自然科学版),2024,45(2):234-243.
WANG Yumeng, GUAN Kai, ZHU Wancheng, et al. Mining-induced surrounding rock instability and surface subsidence based on combination of in-situ monitoring and numerical modelling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2024,45(2):234-243.

[10] 侯国权,郭利杰,许文远.多中段复杂残留矿柱回采方案数值模拟分析[J].中国矿业,2023,32(增刊 1):337-343.
HOU Guoquan, GUO Lijie, XU Wenyuan. Numerical simulation analysis of mining schemes for complex residual pillars in multiple intermediate sections[J]. China Mining Magazine,2023,32(Suppl.1):337-343.

[11] 黄德镛,高聪,贾子月,等.多中段空区稳定性分析及间柱回采顺序优选[J].有色金属工程,2023,13(6):105-114.
HUANG Deyong, GAO Cong, JIA Ziyue, et al. Stability analysis of multi-middle section empty area and optimization of inter-column mining sequence[J]. Nonferrous Metal Engineering,2023,13(6):105-114.

[12] 孙万明.某金矿多中段充填开采对地表塌陷区稳定性影响分析[J].中国矿业,2024,33(7):216-225.
SUN Wanming. Stability analysis of surface subsidence area caused by multi-level filling mining in a gold mine[J]. China Mining Magazine,2024,33(7):216-225.

[13] 胡亚桥,韦章能,覃星朗,等.多中段复杂大面积采空区综合治理方案研究[J].采矿技术,2021,21(3):117-119.
HU Yaqiao, WEI Zhangneng, QIN Xinglang, et al. Research on comprehensive treatment scheme of complex and large-area goaf in multi-middle section[J]. Mining Technology,2021,21(3):117-119.

[14] 孟庆彬,王锐,韩立军,等.多中段联合开采围岩扰动效应及采矿进路支护技术[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(3):930-943.
MENG Qingbin, WANG Rui, HAN Lijun, et al. Surrounding rock disturbance effect of multi-middle section combined mining in stopes and support technology of mining roadway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(3):930-943.

[15] 盛佳,陈蓓,李向东,等.多中段群空区下缓倾斜厚大矿体分区高效回采实践[J].金属矿山,2015(12):29-32.
SHENG Jia, CHEN Bei, LI Xiangdong, et al. High-efficient zoned mining practice of slowly inclined large and thick orebody under the condition of multi-level and goaf groups[J]. Metal Mine,2015(12):29-32.

[16] 郁标,杨金维,寇永渊,等.金川二矿区 3 个中段协同开采巷道变形破坏特征研究[J].金属矿山,2024(6):23-30.
YU Biao, YANG Jinwei, KOU Yongyuan, et al. Study on the deformation and damage characteristics of the three middle sections of coordinated mining roadway in Jinchuan No.2 mining area[J].Metal Mine,2024(6):23-30.

[17] 陈绍民,黄敏,严鹏,等.基于 Geomagic-Midas-FLAC3D 的采空区稳定性分析[J].采矿技术,2023,23(2):43-47.
CHEN Shaomin, HUANG Min, YAN Peng, et al. Stability analysis of goaf based on Geomagic-Midas-FLAC3D[J]. Mining Technology,2023,23(2):43-47.

[18] 胡高建,杨天鸿,张飞,等.红岭铅锌矿多中段回采围岩破坏机理研究[J].金属矿山,2017(9):20-24.
HU Gaojian, YANG Tianhong, ZHANG Fei, et al. Study on the surrounding rock failure mechanism in muti-level stoping in Hongling Pb-Zn mine[J]. Metal Mine,2017(9): 20-24.

[19] 张东杰,刘泽宇,段晓博,等.复合采空区覆岩冒落机理及其协同治理方法研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):91-96.
ZHANG Dongjie, LIU Zeyu, DUAN Xiaobo, et al. Research on the mechanism of overlying rock caving in composite goaf and its collaborative governance methods.[J]. Mining Research and Development,2024,44(4):91-96.

[20] 吴昊燕,刘育明,马黎明,等.复杂条件超大规模连续盘区多中段开采应力扰动规律研究[J].中国矿山工程,2024,53(1):1-6.
WU Haoyan, LIU Yuming, MA Liming, et al. Research on the stress perturbation laws of complex super-large-scale continuous panel multi-level mining[J]. China Mine Engineering,2024,53(1):1-6.