

贾瀚文,裴佃飞,吴钦正,等. 阿尔哈达铅锌矿采空区群治理方案[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(3): 033529.

JIA Hanwen, PEI Dianfei, WU Qinzhen, et al. Treatment scheme of goaf group in Alhada Lead-zinc Mine[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(3): 033529.

阿尔哈达铅锌矿采空区群治理方案

贾瀚文^{1,2,3}, 裴佃飞², 吴钦正¹, 刘焕新¹, 尹延天¹, 董春蕾²

(1. 山东黄金集团有限公司 深井开采实验室, 山东 莱州 261442; 2. 山东黄金集团有限公司, 山东 济南 250101; 3. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对阿尔哈达铅锌矿历史遗留的采空区群治理问题, 基于三维激光扫描技术定性分析了采空区的稳定性, 定量计算了各采空区的体积, 并给出采空区充填顺序; 采用室内试验的方式进行了充填体力学性能和充填浆体物理参数试验, 试验结果表明: 配比为灰砂比1:6, 质量浓度75%的充填体可以用于冬季低温时人工假底充填; 配比为灰砂比1:8, 质量浓度75%的充填体可作为普通充填使用。采用液体静力水准仪对采空区群地表进行监测, 监测结果显示地表最大累计沉降值约为8.5 cm, 地表沉降趋于稳定, 验证了采空区群治理方案的合理性。研究成果可为类似金属矿山大规模采空区群治理提供参考。

关键词: 采空区; 三维激光扫描; 稳定性评价; 充填体; 沉降监测

中图分类号: TD853.391

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2021)03-3529-07

Treatment scheme of goaf group in Alhada Lead-zinc Mine

JIA Hanwen^{1,2,3}, PEI Dianfei², WU Qinzhen¹, LIU Huanxin¹, YIN Yantian¹, DONG Chunlei²

(1. Deep Mining Laboratory, Shandong Gold Group Co., Ltd., Laizhou 261442, China; 2. Shandong Gold Group Co., Ltd., Ji'nan 250101, China; 3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Aiming at the governance problem of the historical goaf group of Alhada Lead-zinc Mine, based on 3D laser scanning technology, the stability of goaf is analyzed qualitatively, the volume of each goaf is calculated quantitatively, and the filling sequence of goaf is given continuously. The mechanical and physical properties of the backfill were tested by laboratory tests. The results showed that the cement-sand ratio 1:6, and the solid content 75% of backfill can be used for artificial sill pillars in winter. The cement sand ratio 1:8, and the solid content 75% of backfill can be used as routine filling. Finally, a hydrostatic level system was used to monitor the surface of the empty area group. The monitoring results showed that the maximum accumulated settlement was about 8.5 cm, the surface settlement tended to be stable, and the rationality of the goaf treatment scheme is verified. The research results can provide a reference for the management of large-scale mined-out areas in similar metal mines.

Key words: goaf; 3D laser scanning technology; stability evaluation; backfill; settlement monitoring

由于历史和技术等原因我国金属矿山在开采初期通常采用空场法、浅孔留矿法等采矿方法, 因此形成了大量的采空区, 且分布广泛。采空区的存

在极易引发顶板冒落、地表沉降、片帮及突水等多种矿山灾害事故, 严重威胁着矿山的安全, 造成不可挽回的人员伤亡和财产损失^[1]。采空区安全治理

收稿日期: 2021-04-06

修回日期: 2021-05-06

责任编辑: 施红霞

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持资助项目(U1906208); 国家青年科学基金资助项目(51904055)

作者简介: 贾瀚文(1990—), 男, 山东烟台人, 博士后, 主要从事矿山动力灾害监测预警等相关领域的研究工作。E-mail: jiahanwen@sd-gold.com

的实质是转移应力集中部位,缓和岩体应力集中程度,使应力达到新的相对平衡,从而控制和管理地压,保证矿山安全生产^[2-3]。

采空区安全治理方法主要有崩落采空区^[4-6]、充填采空区^[7-9]及永久矿柱支撑采空区^[10-11]等方法。崩落围岩治理采空区对采空区周边环境及施工工艺要求较高,易发生采空区内大量岩石突然冒落而造成气浪伤害;依靠永久矿柱支撑采空区只能解决短期的稳定性问题,随着工程爆破扰动以及岩石的流变特性,采空区顶板仍存在失稳破坏的风险。因此,目前矿山多采用充填方法治理采空区。许多学者在充填治理采空区方面取得了相应的成果,白锦文^[12]等提出了关键柱旁充填岩层控制技术;代庆松^[13]等采用数值模拟与动力响应模型确定了某钨锡金属矿山采空区充填的强度匹配方案;曹建立^[14]等采用相似模拟试验分析了充填散体结拱及流动特性,确定了地表充填井合理尺寸及布置参数;刘学文^[15]采用局部充填法对沙坪煤矿采空区进行充填,有效保护了地表建筑物;周智勇^[16]等借助采空区群动力响应模型与类框架结构模型,对某金属矿山12个采空区进行了充填治理。

目前采空区充填治理技术多用于独立采场或某中段采空区群,对于因历史原因产生的大规模采空区群治理方法的研究较少。笔者以阿尔哈达铅锌矿多中段采空区群为工程背景,采用现场逐一踏勘与三维建模方式构建采空区群三维模型,借助CMS三维激光扫描技术定量分析采空区充填体积,

利用室内试验确定充填配比,继而制定采空区群治理方案,最后建立地表沉降监测系统,以确保矿山安全高效生产。

1 工程概况

阿尔哈达铅锌矿位于内蒙古高原,海拔高度为+922 ~ +1 045 m,工作区地表高度为+1 021 m。该矿为浅成—超浅成侵入岩与碳酸岩接触形成的铅锌银多金属矽卡岩型矿床,矿带走向长2 100 m,平均厚度1 ~ 10 m,矿带自西向东在3 ~ 7号勘探线和53 ~ 57号勘探线有2条较大破碎带F1和F3,43号勘探线以西矿体平均倾角45°,43号勘探线以东矿体平均倾角60°。2014年以前,采矿充填系统没有形成,采矿方法为单一的空场采矿法。采场结构参数为长50 m,段高40 m,其中浅孔留矿法留设的顶柱厚度为4 ~ 6 m,中深孔分段空场法留设的顶柱厚度为6 ~ 8 m,2种空场法留设的间柱均为8 m。最上部采矿为928 m中段,808 m中段以上采空区不充填。由于阿尔哈达铅锌矿前期为民采,768 m中段以上采场资料缺失严重,笔者通过实地采场逐一踏勘并结合工程地质报告,利用3DMine软件建立了768 m中段至928 m中段的三维模型,模型中以43号勘探线为界线,该勘探线以东简称东区,以西简称西区,如图1所示。从前期踏勘绘制的三维模型图可以看出,未完全塌陷的采场主要集中在东区以及768 m中段西区。以7231采场为例,本文中采场编号的命名方式为728 m中段31号勘探线处采场即为7231采场。

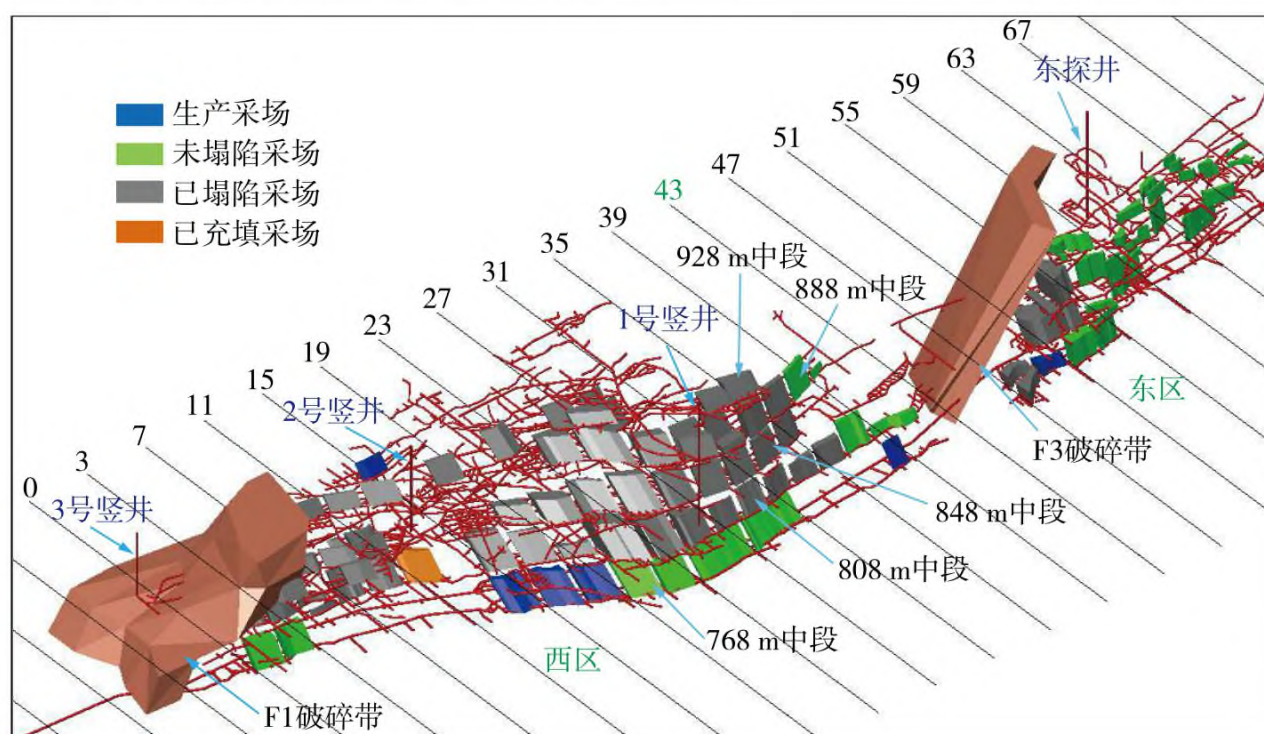


图1 阿尔哈达铅锌矿模型

Fig. 1 Overall layout of Alhada Lead-zinc Mine

2 采空区激光探测

2.1 基于CMS探测的采空区稳定性分析

采空区稳定性是一个极其复杂的问题,其不仅和开采矿体的埋深、倾角、厚度、上覆岩层的岩性等水文地质条件相关,同时也与开采面积、顶板管理方法、开采次数、开采方法等有密切联系。采空区是开采矿体后遗留的结构,因此与矿体有着相同的构造,相似的空间形态。同一矿脉开采后遗留的采空区在空间形态上保持着高度的自相似性^[17],由此可以根据已探测的采空区形态、冒落高度、稳定状态来定性分析同一矿脉其他采空区的稳定状况。

阿尔哈达铅锌矿前身为民营企业,采空区群均为该时期形成,相关资料缺失且采场已无法进入,本文基于CMS探测采空区顶板冒落情况定性分析其稳定性。由于遗留采空区坍塌严重,绝大部分天井已损坏,本次采空区探测受现场条件限制,分别选取矿区西区35号勘探线7635采场与东区61号勘探线7661采场作为区域的典型采空区以判别采空区群稳定性。7635采场跨度100 m,倾角42°;7661采场跨度63 m,倾角68°,两者分别为西区 and 东区跨度最大、倾角较缓的采场,具备作为稳定性参照采场的必要条件。7635采场与7661采场采空区冒落情况如图2,3所示。



图2 7635采场的冒落情况
Fig. 2 Results of roof caving in 7635 stope

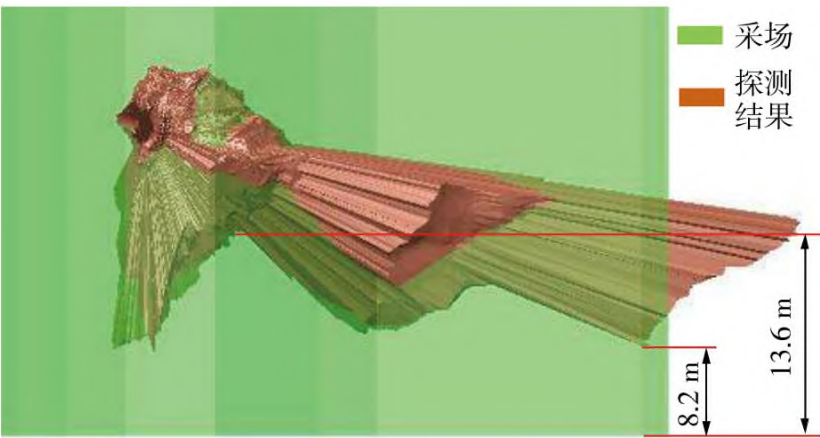


图3 7661采场的冒落情况
Fig. 3 Results of roof caving in 7661 stope

7635采场跨度较大,且CMS激光扫描仪存在扫

描盲区,因此扫描结果未能覆盖7635全部采场,由图2可知,其冒落高度为14 ~ 17.5 m,采空区顶板相对稳定。图3显示7661采场冒落高度为8.2 ~ 13.6 m,采空区顶板相对稳定。由此可以推断,西区采场跨度小于100 m,倾角大于42°的采场顶板稳定,冒落高度小于17.5 m;东区采场跨度小于63 m,倾角大于68°的采场顶板稳定,冒落高度小于13.6 m。笔者以768 m中段采空区为例,采空区稳定性定性分析结果见表1。由于采空区群已经存在多年,且离深部采场较远,又无爆破扰动的影响,因此,可以定性判断其不会继续出现大规模冒顶。

表 1 768 m 中段采空区稳定性定性分析结果

Table 1 Stability analysis results of 768 m goaf

采空区名称	采空区位置	采场跨度/m	采场倾角/(°)	冒落高度/m	顶板稳定性
768-1	3 ~ 5号勘探线	42	49	<17.5	稳定
768-2	5 ~ 7号勘探线	42	50	<17.5	稳定
768-3	23 ~ 25号勘探线	42	40	<17.5	稳定
768-4	25 ~ 27号勘探线	44	41	<17.5	稳定
768-5	27 ~ 31号勘探线	100	43	<17.5	稳定
768-6	31 ~ 35号勘探线	100	42	14 ~ 17.5	稳定
768-7	55 ~ 57号勘探线	42	70	<13.6	稳定
768-8	57 ~ 59号勘探线	36	70	<13.6	稳定
768-9	61 ~ 63号勘探线	63	68	8.2 ~ 13.6	稳定

2.2 基于CMS探测的采空区体积估算

通过现场对西区888 m中段至808 m中段实测调查,采场基本全部垮落。基于CMS激光探测可知,西区7635采场的垮落最终形态是由采场上盘失稳导致,采场顶板保存完好,由此可以推断西区888 m中段至808 m中段塌陷的57个采空区并未塌实,在顶板处可能留有三角采空区,如图4所示。

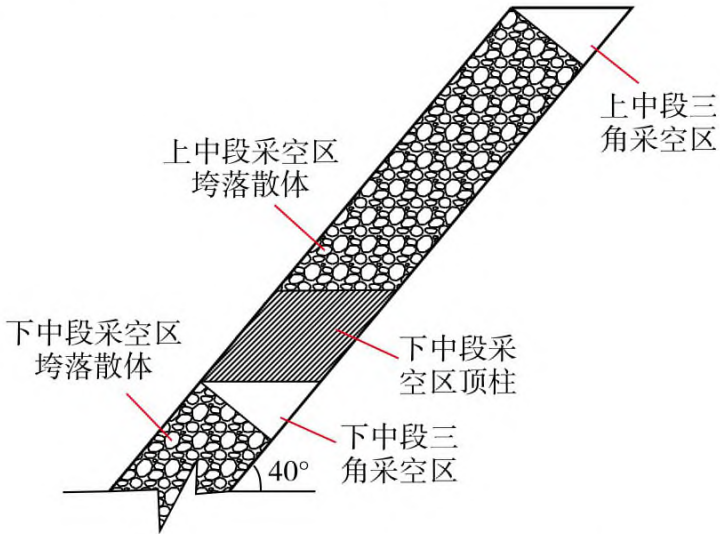


图4 888 m中段至808 m中段西区采空区最终存在形态
Fig. 4 Final shape of goaf in the west of 888 m middle section to 808 m middle section

该三角采空区的形态是由岩石的静态自然安息角确定,由《采矿设计手册》^[18]可知铅锌矿的静态自然安息角为40°,由此可以估算出西区塌陷的57个采场残留的采空区体积占采场体积的5.8%;由于808 m中段以下采用充填法开采,因此西区768 m中段采空区相对保存完好,由2.1节可知,7635采场垮落散体平均高度为15.75 m,由此可以推断768 m中段西区采场残留的采空区体积占采场体积的50.9%。

通过现场对东区888 m中段至768 m中段实测调查,除靠近43~51号勘探线破碎带处的7个采场塌陷,其余28个采场的采空区均保存相对完好。由CMS激光探测结果可知,7661采场垮落散体平均高度为10.9 m,由此可以推断东区采场残留的采空区体积占采场体积的65.9%。同理,东区塌陷的7个采场依然可能存在三角采空区,残留的采空区体积占采场体积的5.8%。采空区扫描结果为后续采空区治理的研究工作提供了数据基础。

3 采空区充填治理方案

3.1 整体规划

经过实地调查可知,目前已形成的采空区有101个,其中位于西区的采空区有68个,东区的采空区有33个。西区的采空区大多体积较大,顶板暴露面积大,稳定性较差,采空区的存在给安全生产造成了极大的隐患。结合阿尔哈达铅锌矿生产实际,根据采空区的分布特点,确定了采空区充填处理总体规划方案,充填治理的总体顺序为自下而上逐个中段治理,即先充填768 m中段随后依次充填808 m中段、848 m中段和888 m中段。由于27~33号勘探线矿体厚大,西区首先充填27~33号勘探线采空区,随后向两翼逐步充填残采;53~57号勘探线存在破碎带,东区首先充填破碎带下盘采空区,自破碎带向东逐步充填残采。768 m中段作为首充段,西区7631采场和东区7651采场作为第1充填区域,7631采场充填完毕后向两翼依次充填至7619采场和7637采场,7651采场充填完毕后向东依次充填至7663采场;808 m中段作为第2充填中段,西区8027采场和东区8055采场作为第2充填区域,8027采场充填完毕后向两翼依次充填至8009采场和8045采场,8055采场充填完毕后向东依次充填8057采场和8069采场;848 m中段作为第3充填中段,西区8429

采场和东区8459采场作为第3充填区域,8429采场充填完毕后向两翼依次充填至8407采场和8439采场,8459采场充填完毕后向东依次充填至8471采场;888 m中段作为第4充填中段,西区8827采场和东区8855采场作为第4充填区域,8827采场充填完毕后向两翼依次充填至8807采场和8837采场,8855采场充填完毕后向东依次充填至8869采场。

3.2 充填配比试验

根据阿尔哈达铅锌矿尾砂物理化学性质,选取分级尾砂(尾矿库取样)为充填骨料,在低温环境下制浆,浆体浇注至7.07 cm × 7.07 cm × 7.07 cm标准三联金属试模中,并放入养护箱中进行低温环境养护(养护温度7℃,湿度90%),试块到规定龄期后脱模,在专用压力机上进行单轴抗压强度测试。根据制定的试验方案,在室内制作试块并测定其相应龄期的单轴抗压强度值,充填配比试验结果见表2。

表 2 充填配比试验结果
Table 2 Test results of filling material ratio

编号	质量浓度/%	灰砂比	单轴抗压强度/MPa			
			7 d	14 d	28 d	60 d
A ₁	75	1 : 4	0.73	1.59	2.17	3.24
A ₂	75	1 : 6	0.65	0.80	1.64	2.50
A ₃	75	1 : 8	0.29	0.35	0.83	1.07
A ₄	75	1 : 10	0.22	0.30	0.48	0.62
B ₁	70	1 : 4	0.45	1.12	1.55	2.55
B ₂	70	1 : 6	0.43	0.55	1.28	1.50
B ₃	70	1 : 8	0.20	0.26	0.64	0.83
B ₄	70	1 : 10	0.13	0.23	0.34	0.45
C ₁	65	1 : 4	0.22	0.52	0.98	1.47
C ₂	65	1 : 6	0.25	0.34	0.63	1.00
C ₃	65	1 : 8	0.17	0.25	0.41	0.75
C ₄	65	1 : 10	0.12	0.17	0.23	0.30

由表2可知,随着水泥含量的减少,胶结体抗压强度明显降低,如A组灰砂比1 : 6试块的内部结构比较致密,其28 d抗压强度能够达到1.64 MPa左右,而灰砂比1 : 10试块的28 d抗压强度仅0.48 MPa,且有分层、离析现象。试块单轴抗压强度随养护时间的增加而增大,如各质量浓度28 d强度与7 d强度相比有较大幅度增加,且质量浓度越高,增加幅度越大,说明充填体中的水泥含量较大时其强度增加较为明显,且持续时间较长,对充填有利。

充填体的抗压强度与料浆的质量浓度有关,料浆的质量浓度越高,充填体抗压强度越大,试验结果显示:浆体质量浓度由65%提高至75%,28 d单轴抗压强度可提高2~3倍。但由于尾砂胶结充填体和易性强、黏性大,过高的质量浓度会使管道输送困难。试验结果表明,灰砂比小于1:6,即使质量浓度提高,各组充填体28 d强度均不能达到1 MPa,当灰砂比为1:8和1:10时,不能作为胶结层面,将影响机械和人在充填体上的作业。

3.3 工业试验

阿尔哈达铅锌矿首先对768 m中段采空区进行充填处理。对768 m中段25~35号勘探线采空区充填做准备工作,施工充填钻孔15处,架设板墙18处。充填管道自贯通地表的管缆井下延至808 m中段,管道下料口连接 $\phi 100$ mm充填钻孔,考虑到经济性,充填料浆灰砂比采用1:6和1:8及纯尾砂3种类别。采空区底层先采用灰砂比1:6的充填料浆进行充填,充填至1 m垂直高度,再采用分级尾砂充填2~3 m,之后全部采用灰砂比1:8的充填料浆。料浆质量浓度为65%~70%。充填过程中密切观察泄水板墙泄水情况,根据泄水速度调整下料点及充填量,采用“多点下料,次多量少”的充填方式。

充填挡墙及管路布置如图5所示。

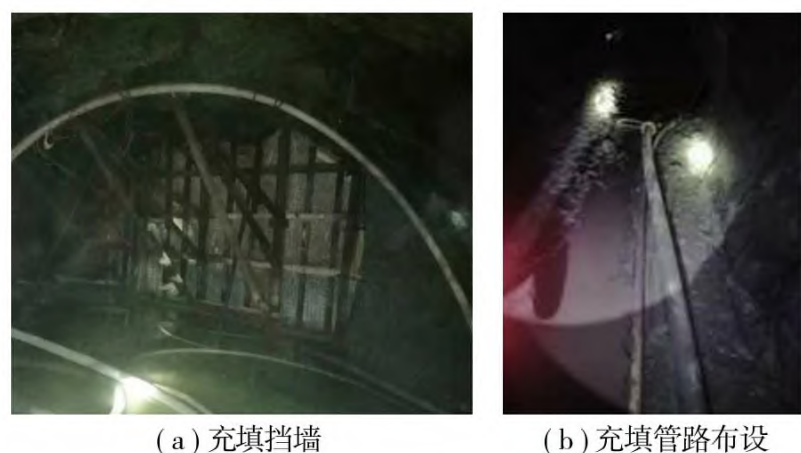


图5 工业试验
Fig. 5 Industrial test

经过工业试验,仅768 m中段25~35号勘探线采空区累计充填 2.25 m^3 ,完成了该区域采空区充填。单采空区单日最大充填量达到 $1\,240 \text{ m}^3$,平均每小时充填 $60 \sim 80 \text{ m}^3$,充填料堆积垂直高度35 m。充填过程中未出现堵管、板墙倒塌或漏浆等情况。根据808 m施工采空区联巷的揭露情况,充填料平整度好,密实度大,满足采空区治理及后期顶柱回收的施工要求。

4 地表沉降监测

4.1 监测方案

为了确保矿山的安全生产和充填治理的顺利进行,在地表布设了沉降监测系统。监测系统采用SD-226型液压式静力水准仪(图6),该液压式静力水准仪是由储液器、进口高精度芯体和特殊定制电路模块、保护罩等部件组成。采用四芯电缆将各静力水准仪并联,然后连接至数据采集终端,四芯电缆中两芯用于传感器供电,其余两芯用于数据传输;数据采集终端内置无线传输模块,通过GPRS网络将监测数据传输至云端数据服务中心;监测中心服务器通过HTTP传输协议访问云端数据服务中心,用户可以对项目进行查询、管理、维护等操作。



图6 静力水准仪布设
Fig. 6 Layout of static level

25号勘探线处塌陷坑直径约125 m,29号勘探线处塌陷坑直径约70 m。考虑地表移动带的范围,确定该区域监测范围自23~31号勘探线,沿矿体走向300 m(S1监测线)和倾向170 m(S2监测线)范围各布置10个测点,用于监测地表移动带的沉降规律,地表沉降监测测点布置如图7所示。

4.2 监测结果

地表液体静力水准监测系统于2018年4月27日安装,经调试于5月1日正式运行。S1测线内各测点的累计沉降值如图8所示,Q2~Q5测点的累计沉降值在0处波动,该监测区域内地表未发生沉降;Q10测点累计沉降值在2 cm处波动;Q7~Q9测点随时间

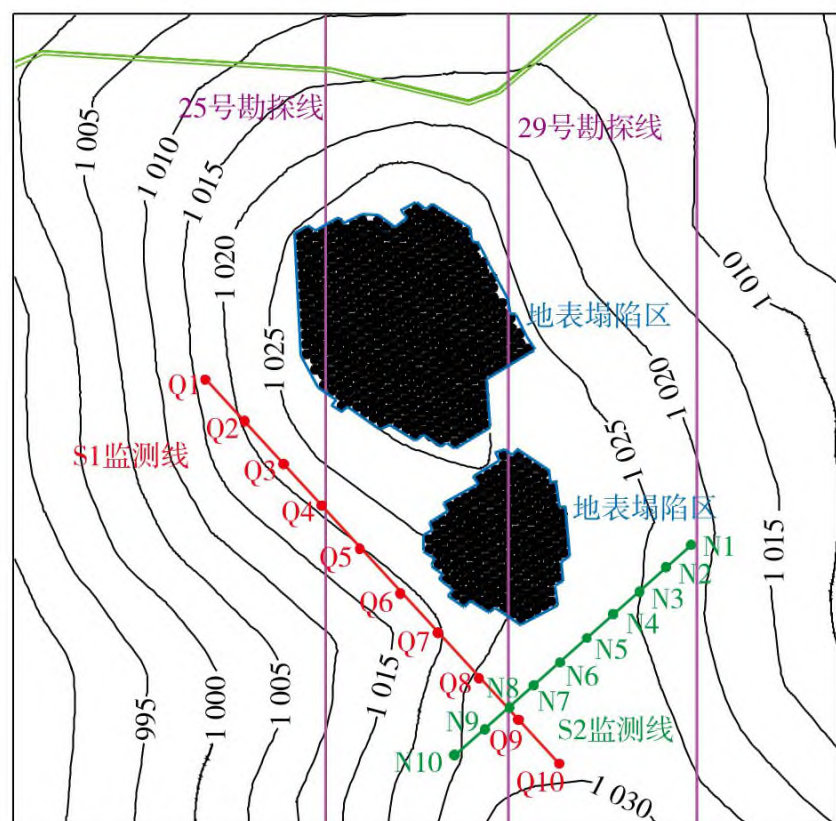


图7 地表沉降监测测点布置

Fig. 7 Location of surface subsidence monitoring points

的变化沉降值不断变大,于8月18日开始周期性波动,趋于稳定状态,Q7测点累计沉降值约为5.2 cm,Q8测点累计沉降值约为7.9 cm,Q9测点累计沉降值约为5.7 cm。

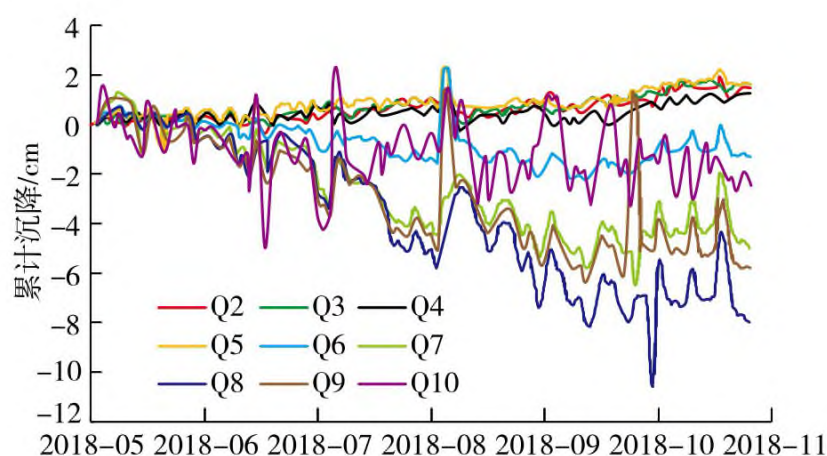


图8 S1监测线各测点累计沉降曲线

Fig. 8 Cumulative settlement curves of each measuring point on S1 monitoring line

S2测线内各测点的累计沉降值如图9所示。

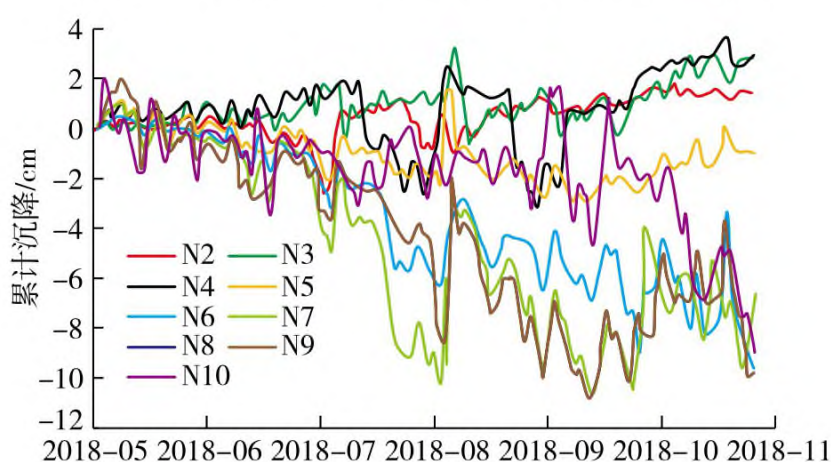


图9 S2监测线各测点累计沉降曲线

Fig. 9 Cumulative settlement curves of each measuring point on S2 monitoring line

N2 ~ N6测点的累计沉降值在0处波动,该监测区域内地表未发生沉降;N10测点于9月2日开始出现沉降,最大累计沉降值为8.5 cm;N7 ~ N9测点随时间的变化沉降值不断变大,于8月10日开始周期性波动,3个测点最终在沉降值8 cm处趋于稳定。截至2018年7月阿尔哈达铅锌矿已完成了部分中段的充填作业,S1测线和S2测线在2018年9月后地表累计沉降值不再增加,充填效果明显。

5 结 论

(1) 基于CMS激光探测与现场踏勘,得出西区采空区的垮落最终形态是由采场上盘失稳导致,西区采空区和东区破碎带影响下的采空区存在三角采空区,由铅锌矿的静态自然安息角确定三角采空区体积占采场体积的5.8%;由7635采场垮落散体平均高度推断,768 m中段西区采场残留的采空区体积占采场体积的50.9%;由7661采场垮落散体平均高度推断,东区破碎带影响范围外采场残留的采空区体积占采场体积的65.9%,由此得出采空区群中每个采空区的大致体积。

(2) 进行了充填体力学性能和充填浆体物理参数试验,确定了灰砂比为1:6,质量浓度为75%的充填体28 d强度为1.64 MPa,可以用于冬季低温时人工假底充填。灰砂比为1:8,质量浓度为75%的充填体28 d强度为0.83 MPa,可以将此配比作为普通充填使用。

(3) 考虑地表移动带的范围,确定该区域监测范围为23 ~ 31号勘探线,沿矿体走向300 m和倾向170 m范围各布置10个测点,并布设液体静力水准监测系统。监测结果表明,地表最大累计沉降值约为8.5 cm,最终地表垂直变形趋于稳定,验证了充填治理方案的合理性。

参考文献(References):

- [1] 贾海波,任凤玉,丁航行,等. 某银多金属矿采空区综合治理方法[J]. 金属矿山,2018,47(2):41-45.
JIA Haibo, REN Fengyu, DING Hangxing, et al. Comprehensive treatment of a mined-out area in a Ag-polymetallic deposit[J]. Metal Mine, 2018, 47(2): 41-45.
- [2] 闫保旭,朱万成,侯晨,等. 金属矿山充填体与围岩体相互作用研究综述[J]. 金属矿山,2020,49(1):7-25.
YAN Baoxu, ZHU Wancheng, HOU Chen, et al. Interaction between backfill and rock during metal mining: A review[J]. Metal Mine, 2020, 49(1): 7-25.

- [3] 王启明,徐必根,唐绍辉,等. 我国金属非金属矿山采空区现状与治理对策分析[J]. 矿业研究与开发,2009,29(4):63-68.
WANG Qiming,XU Bigen,TANG Shaohui,et al. The actual state of mined-out areas in metallic and nonmetallic mines and the countermeasures for the treatment of the mined-out areas in China[J]. Mining Research and Development,2009,29(4):63-68.
- [4] 吴启红. 矿山复杂多层采空区稳定性综合分析及安全治理研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
WU Qihong. Analyzing stability synthetically and researching treatment methods on the complicated multi-layer mine-out areas[D]. Changsha: Central South University,2010.
- [5] 何荣兴,韩智勇,任凤玉,等. 诱导冒落处理采空区技术适用条件分析[J]. 矿业研究与开发,2020,40(8):36-40.
HE Rongxing , HAN Zhiyong , REN Fengyu , et al. Analysis on application conditions for treatment of goaf with induced caving[J]. Mining Research and Development,2020,40(8):36-40.
- [6] 马姣阳,任凤玉,张庆嵩,等. 基于“崩、冒”耦合效应的近矿体小空区处理方法[J]. 金属矿山,2020,49(3):42-49.
MA Jiaoyang,REN Fengyu,ZHANG Qingsong,et al. Method of near orebody and small cavity treatment for coupling effects based on breaking and caving[J]. Metal Mine,2020,49(3):42-49.
- [7] 张武杰,郭毅. 山岭地区采空区注浆充填施工方法研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(S1):1182-1186.
ZHANG Wujie, GUO Yi. Study on grouting filling construction method of goaf in mountain area[J]. Modern Tunnel Technology,2020,57(S1):1182-1186.
- [8] 高玉倩,胡亚军,赵淑芳. 采空区不同充填接顶率的充填体稳定性研究[J]. 矿业研究与开发,2020,40(3):140-144.
GAO Yuqian,HU Yajun,ZHAO Shufang. Stability research of backfill with different roof-contacted filling rates in goaf[J]. Mining Research and Development,2020,40(3):140-144.
- [9] 李龙清,朱南京,崔锋,等. 老窑采空区注浆治理工程技术管理[J]. 煤矿开采,2015,20(2):102-105.
LI Longqing,ZHU Nanjing,CUI Feng,et al. Technical management of gob grouting engineering in waste mine[J]. Coal Mining Technology,2015,20(2):102-105.
- [10] 孙万明. 大理岩矿体房柱式采场稳定性分析[J]. 煤矿开采,2018,23(3):83-86.
SUN Wanming. Stability analysis of room and pillar stope of marble ore body[J]. Coal Mining Technology,2018,23(3):83-86.
- [11] 孙强,冯国瑞,郭军,等. 采空区边缘下方回撤通道护巷煤柱合理宽度研究[J]. 煤矿安全,2021,52(3):61-67.
SUN Qiang,FENG Guorui,GUO Jun,et al. Study on reasonable width of coal pillar in retracement channel under goal edge[J]. Safety in Coal Mines,2021,52(3):61-67.
- [12] 白锦文,崔博强,戚庭野,等. 关键柱柱旁充填岩层控制基础理论[J]. 煤炭学报,2021,46(2):424-438.
BAI Jinwen,CUI Boqiang,QI Tingye,et al. Fundamental theory for rock strata control of key pillar-side backfilling[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(2):424-438.
- [13] 代庆松,姜立春. 纵向充填采空区群人工充填体假顶稳定与强度匹配关系[J]. 矿业研究与开发,2020,40(3):119-124.
DAI Qingsong,JIANG Lichun. Matching relationship between stability and strength of artificial filling roof in longitudinal filling goaf group[J]. Mining Research and Development,2020,40(3):119-124.
- [14] 曹建立,任凤玉,张东杰,等. 某铁矿采空区治理技术研究[J]. 中国矿业,2019,28(2):86-90,96.
CAO Jianli,REN Fengyu,ZHANG Dongjie,et al. Study on control technology of goafs in a iron mine[J]. China Mining Magazine,2019,28(2):86-90,96.
- [15] 刘学文. 局部充填法控制顶板在沙坪煤矿综采工作面的应用[J]. 煤炭工程,2018,50(S1):64-67.
LIU Xuewen. Application of local filling method for roof control in fully mechanized working face of Shaping Coal Mine[J]. Coal Engineering,2018,50(S1):64-67.
- [16] 周智勇,姜立春,王国伟,等. 采空区群残采充填方案稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(10):2545-2552.
ZHOU Zhiyong , JIANG Lichun , WANG Guowei , et al. Stability analysis on backfilling schemes of goaf group under condition of residual mining[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2018,49(10):2545-2552.
- [17] 汪北方,梁冰,姜利国,等. 采空区垮落岩体空隙储水分形计算及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(7):1444-1451.
WANG Beifang,LIANG Bing,JIANG Liguó,et al. Fractal calculation and application of water storage in void of caving rock in the goaf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(7):1444-1451.
- [18] 张荣立,何国伟,李铎. 采矿工程设计手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.
ZHANG Rongli,HE Guowei,LI Duo. Manual of mining engineering design[M]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,2003.