

刘欣欣, 齐学元, 耿俊俊. 浅埋房柱式采空区煤柱稳定性及控制研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2): 023537.

LIU Xinxin, QI Xueyuan, GENG Junjun. Stability and control of room-and-pillar mined-out area in shallow coal seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): 023537.

浅埋房柱式采空区煤柱稳定性及控制研究

刘欣欣^{1,2}, 齐学元^{1,2}, 耿俊俊^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学 地质技术与岩土工程内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 老采空区受矿区早期采煤方法的限制, 具有较强的隐匿性, 很难得到有效治理, 为其地表构筑物建设带来巨大挑战。以昌盛煤矿房柱式老采空区治理为工程背景, 采用理论分析、钻孔勘探、数值模拟以及现场瞬变电磁勘查等方法, 分析了房柱式采空区覆岩裂隙特征; 判别了房柱式采空区上地表的稳定性, 数值模拟进一步分析得出, 在新的单位载荷作用下, 采场中央遗留煤柱将发生活化失稳, 引起采场所有煤柱发生多米诺骨牌式破坏, 进而导致房柱式采空区地表发生失稳。基于对房柱式采空区稳定特征及浆液在房柱式采空区流动的特性提出了散点式注浆充填方案, 给出了浆液配比及注浆工艺。现场瞬变电磁勘查结果表明, 散点式注浆充填法能有效实现老采空区的充分均匀充填, 注浆效果整体良好, 同时该方法可为对类似老采空区地表治理提供参考。

关键词: 房柱式采空区; 地表沉降; 数值模拟; 注浆充填法

中图分类号: TD325.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2024)02-3537-10

Stability and control of room-and-pillar mined-out area in shallow coal seam

LIU Xinxin^{1,2}, QI Xueyuan^{1,2}, GENG Junjun^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia Engineering Research Center of Geological Technology and Geotechnical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: The concealment of old mine goafs, stemming from the limitations of early coal mining methods, poses significant challenges to the effective management and construction of surface structures in these areas. This study, set against the engineering backdrop of managing the old room-pillar goaf in Changsheng Coal Mine, employed theoretical analysis, drilling exploration, numerical simulation, and on-site transient electromagnetic surveys to examine the characteristics of overburden rock fractures within room-pillar goafs. It assessed the stability of the surface over the room-and-pillar goaf, with numerical simulations indicating that under new unit loads, the coal pillars left in the center of the stope became activated and destabilized. This led to a domino-like failure of all pillars in the mining site, resulting in the surface instability of the room-and-pillar goaf. Drawing on the identified stability characteristics of the room-and-pillar goaf and the flow properties of slurry within such goafs, the study proposed a dispersed point grouting filling strategy, detailing the slurry mixture and grouting techniques. Results from field transient electromagnetic surveys demonstrated the effectiveness of the dispersed point grouting meth-

收稿日期: 2023-10-11

修回日期: 2023-12-21

责任编辑: 许书阁

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2021MS04010); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费资助项目(JY20220169)

作者简介: 刘欣欣(2003—), 女, 内蒙古赤峰人。E-mail: 18747144802@163.com

通信作者: 齐学元(1984—), 男, 河北唐山人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: qxuyan1020@imut.edu.cn

od in achieving comprehensive and uniform filling of the old mine goaf, with generally positive outcomes. This method also offers valuable insights for the surface management of similar old mine goafs, highlighting its importance for engineering applications and environmental safety.

Key words: room-and-pillar mined-out area; surface subsidence; numerical simulation; grouting filling method

近年来,随着我国经济的快速发展,企业发展与土地需要的矛盾也日益突出,以山西省为代表的老煤炭生产基地对于老采空区土地利用也逐渐提上日程^[1-2]。我国煤矿开采历史悠久,在早期开发过程中,采煤方法^[3]多样且不统一,例如房柱式^[4-5]、巷柱式^[6]以及旺格维利式等多种采煤方法均在我国一些老矿区使用过,因此也形成了许多不同空间、形状规则的老采空区^[7],这些老采空区具有隐匿性、难发现、难治理等特点^[8-9],为矿区土地的二次开发利用带来了较大的阻碍。

为了实现老采空区土地的有效利用,国内诸多学者对于老采空区的稳定性分析^[10-11]及其相关治理措施^[12-14]进行了一系列卓有成效的研究。其中,王亮^[15]等基于水文地质、外界环境以及建设场地等三方面因素选取评价指标,构建了采空区建筑物场地稳定性评价指标;朱德福^[16]等通过对煤柱分布形态、大小尺寸等相关参数对浅埋房式采空区煤柱群稳定性进行了分析评价;顾士坦^[17]等通过数学模型对不规则煤柱最小安全尺寸及煤柱稳定性系数进行计算,在此基础上,以数值模拟对不规则煤柱两侧采空状态下的应力变化规律展开了分析;郭广礼^[18]等根据覆岩垮落结构将老采空区分为4类,分析了采空区上方地基失稳的机理,并给出了相应地基处理措施;江宁^[19]基于构筑物载荷作用下长壁老采空区失稳机理,提出了宏观应力拱壳注浆加固技术,并通过现场注浆效果验证了该技术的合理性;王爱群^[20]结合生产工程建设现场实例,通过理

论计算确定条带状充填的相关设计参数,同时提出了条带注浆布孔的方法与原则,确定了合理的注浆充填范围。

开发利用老采空区土地作为工程建设用地是缓解矿区用地紧张的有效途径。然而在老采空区上方进行新的工程建设是一个复杂的系统工程。现有研究成果主要集中在老采空区覆岩稳定性评价、地表残余变形等方面,对于地表载荷作用下房柱式采空区的失稳、控制研究较少。笔者根据老采空区房柱式采煤方法的特点,通过综合应用理论分析、钻孔勘探、数值模拟计算等手段,勘查了老矿区房柱式采空区空间状态,同时对房柱式采空区两种工况下的稳定性进行了探究,提出了房柱式老采空区地表治理方案,并通过瞬变电磁法验证了治理方法的有效性。

1 工程概况

昌盛煤矿拟在老采空区范围内建设危废暂存库,地表构筑物为钢结构,安全等级2级,构筑面积为1 890 m²,单位最大荷重150 kN/m²,埋置深度为-2 m,对差异沉降敏感程度一般,拟构筑物下老采空区为昌盛煤矿前期开采所留,采空区场地高程为202.79~204.03 m,最大高差1.24 m,场地整体较平坦。

昌盛煤矿老采空区开采年代久远,采空区结构及覆岩裂隙发育情况不明晰,现场采用钻孔窥视仪对老采空区进行钻孔勘查,如图1所示。

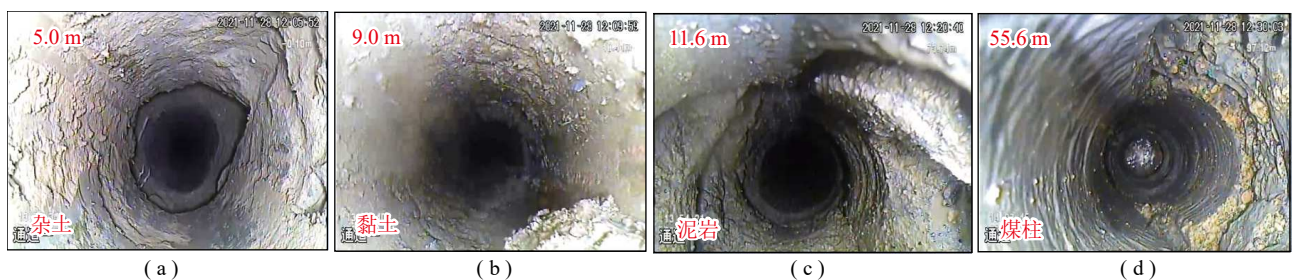


图1 老采空区覆岩裂隙分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of overlying rock fracture in old-mine goaf area

埋深0~7.5 m为杂土区,土体松软,裂隙发育杂乱;埋深7.5~19.5 m为黏土层,钻孔孔壁表面光滑,

裂隙较少;埋深19.5~45.0 m为泥岩,受采动影响,钻孔孔壁裂隙发育;埋深45.0~57.0 m为采场开采破坏层,裂隙发育丰富。老采空区为柱式开采遗留的残余空间,采空区内仍有遗留煤柱,如图1(d)所示,煤柱随时间发生蠕变,内部有裂隙发育,煤柱支撑

强度降低,但仍对老采空区覆岩起到一定的支撑作用。总体分析研究区内老采空区覆岩结构大体分为土体和岩体两个类型,土体以杂填土、粉质黏土为主,岩体以泥岩为主,老采空区覆岩勘查结果如图2所示。

地层 编号	时代 成因	地层 高程/m	地层 深度/m	分层 厚度/m	柱状	岩土名称及其特征
1	Q_4^{ml}	195.72	7.5	7.5		杂填土,以碎石为主,充填黄色粉质黏土,充填程度中密;碎石成分主要为灰岩、砂岩,碎石含量约70%以上
2	Q_3^{al}	183.72	19.5	12.0		粉质黏土,棕黄色,可塑-硬塑状态,见白色条纹及少量贝壳残片;局部为细砂,成分以石英、长石为主
3	P	171.22	32.0	12.5		泥岩,灰褐色,坚硬致密,泥质结构,块状构造,见灰绿色条纹,裂隙发育,含较多砂岩块
4		146.22	57.0	25.0		本单元主要为灰黑色煤层及煤矸石,坚硬致密,钻探时有轻微掉钻,漏水严重,人为扰动痕迹,疑似为老采空区。终孔深度为57.0 m,未穿透该层

图2 老采空区覆岩综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive histogram of overlying strata in old-mine goaf area

2 房柱式采空区上地表稳定性评价

煤层开采结束后,当地表半年内下沉量小于30 mm时,则可认为采空区上覆岩土层受采动影响发生移动变形的阶段已经结束^[21-23],若该区域地表不再构造新的构筑物,地表将会长期保持稳定状态。房柱式采煤法是依靠煤柱支撑顶板的一种采煤方法,在开采结束后,剩余煤柱在短时间内保持一定的稳定性,但随时间推移,采空区内的煤柱长期蠕变,承载能力逐渐降低,若在该区域地表构筑新的建筑物,老采空区煤柱有可能发生活化失稳,进而导致老采空区上方岩土层再次发生较大的不均匀下沉^[24-25],进而引发地表地基的失稳。

2.1 地表构筑物地基应力分析

地表拟建构构筑物地基自重应力为

$$\sigma_c = r_1 h_1 + r_2 h_2 + \cdots + r_n h_n \quad (1)$$

式中, n 为地基中的土层数; r_n 为地基中第 n 层的容重, kN/m^3 ; h_n 为地基中第 n 层的厚度,m。

矩形面积地基附加应力为

$$\sigma_z = K P_0 \quad (2)$$

式中, K 为竖直方向附加应力分布系数; P_0 为作用在基础底面附加平均压力, kN/m^2 。

$$P_0 = P - r_0 D \quad (3)$$

式中, P 为基础底面处竖直方向均布载荷, kN/m^2 ; r_0 为基础底面标高以上土层容重, kN/m^3 ; D 为基础埋深,m。

根据上述公式计算得到地表构筑物最大影响深度为60 m。同时,通过钻孔窥视分析可知,研究区域老采空区内的裂隙带高度为27 m。因此,研究区内若不对老采空区进行处理,将严重威胁地表构筑物的安全修建与使用。

2.2 房柱式采空区煤柱稳定性分析

房柱式采煤法是我国老煤炭生产基地早期开发中常用的采煤方法之一,其采空区顶板利用采场周边及两侧的煤柱支撑,采空区不随工作面推进而进行处理。在房柱式采空区中,煤柱承载上覆岩层载荷,保持覆岩处于平衡稳定状态,由于在老采空区上方新建地表构筑物,煤柱在原有载荷基础上增加了对地表构筑物载荷的承载 P_u ,煤柱内部应力发生了变化,房柱式采空区煤柱受力如图3所示。

在地表构筑建筑物后,老采空区煤柱内部重新分布后的平均应力 σ_s 可由辅助面积法^[26]计算得到,即

$$\sigma_s = \frac{1}{B^2} (P_u + \gamma H)(L + B)^2 \quad (4)$$

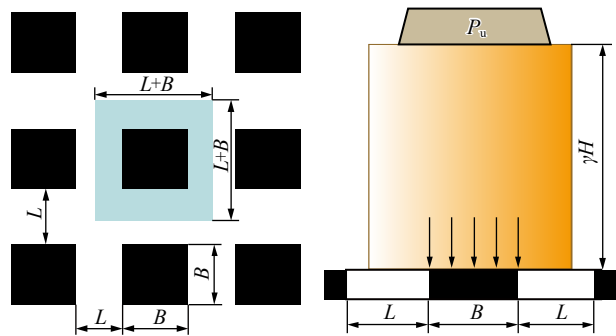


图3 房柱式采空区煤柱应力简图
Fig. 3 Coal pillar stress diagram of room-and-pillar mined-out area

式中, σ_s 为煤柱应力, MPa; γ 为覆岩容重, kN/m^3 ; H 为埋深, m; B 为煤柱宽度, m; L 为煤房宽度, m; P_u 为地表构筑物单位最大荷重, kN/m^2 。

将 $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$, $H=56.2 \text{ m}$, $B=6 \text{ m}$, $L=7 \text{ m}$, $P_u=150 \text{ kN/m}^2$ 代入式 (4), 可得到煤柱应力 σ_s 为 7.30 MPa。

由煤岩力学参数可知采空区煤柱强度为 6.5 MPa, 根据极限理论, 煤柱稳定性安全系数为 0.89, 小于 1.5。因此可知, 老采空区煤柱在地表构筑物载荷及覆岩载荷作用下处于不稳定状态。

2.3 房柱式采空区煤柱模拟分析

采用FLAC^{3D}模拟软件建立长×宽×高为220 m×60 m×102 m的三维模型, 煤柱留设为采7 m, 留6 m, 模型布置如图4所示。岩石力学参数见表1。

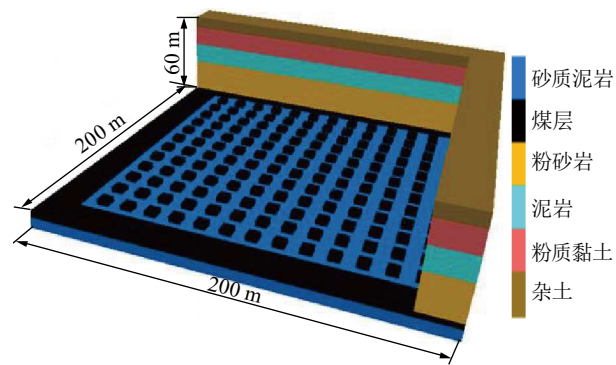


图4 房柱式采煤数值模型
Fig. 4 Numerical model diagram of room and pillar coal mining

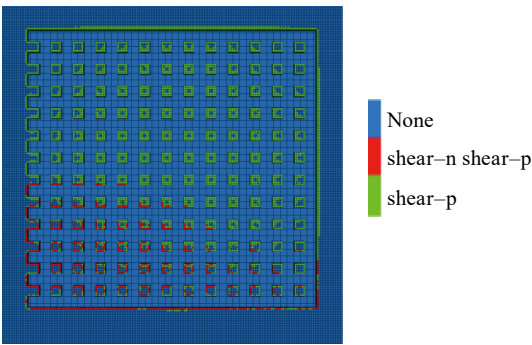
试验模拟两种条件下的地表沉降情况, 一种是房柱式采煤法开采过后的地表沉降; 另一种是在未做任何采空区治理情况下, 在其地表构建新建筑物时的地表沉降。为了准确模拟建筑物对老采空区地表沉降的影响, 在地表拟建筑范围内施加

表1 岩石力学参数
Table 1 Rock mechanics parameters

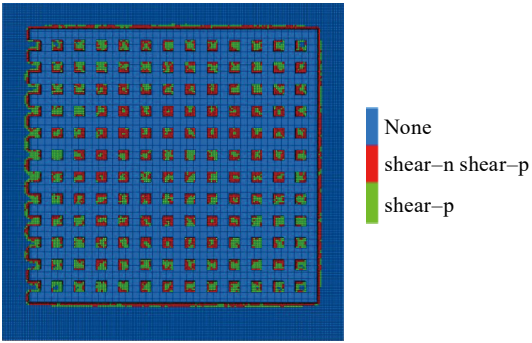
序号	岩性	厚度/m	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
1	砂质泥岩	3.0	9.6	4.4	30	1.63	0.6
2	煤层	3.0	5.2	2.7	24	1.30	1.1
3	粉砂岩	22.0	14.8	7.2	12	3.30	2.5
4	泥岩	12.5	4.2	2.7	32	3.13	2.5
5	粉质黏土	12.0	6.0	4.0	25	0.80	0.6
6	杂土	7.5	4.0	2.5	15	0.60	0.3

150 kN/m^2 的荷重。

两种条件下塑性区变化如图5所示。



(a) 开采后



(b) 施加单位载荷后

图5 采场煤柱塑性区云图
Fig. 5 Coal pillar plastic zone cloud of stope

分析图5可知, 房柱式开采过后, 采场中央的煤柱外部虽发生了剪切破坏, 但煤柱内部有长宽为2 m的煤体未发生塑性破坏, 因此, 采场中央煤柱未发生失稳, 而由采场中央向外采场煤柱内未发生塑性破坏的面积逐渐增大, 在采场边界附近的煤柱, 煤柱帮部塑性区深部仅1 m, 煤柱具有较强的承载能力; 在单位载荷施加过后, 采场中央的煤柱内部发生失稳、破坏, 进而由内向外引发多米诺骨牌效应, 导致整个采空区大范围垮落失稳, 覆岩发

生大范围移动。

由图6可知, 在房柱式正常开采过程中, 采空区遗留煤柱中形成椭圆形下沉区, 所有煤柱都发生不同程度的沉降, 椭圆形区域内煤柱垂直位移量显著高于周边其余位置, 采空区地表中心区域地表最大下沉值为22.7 cm。

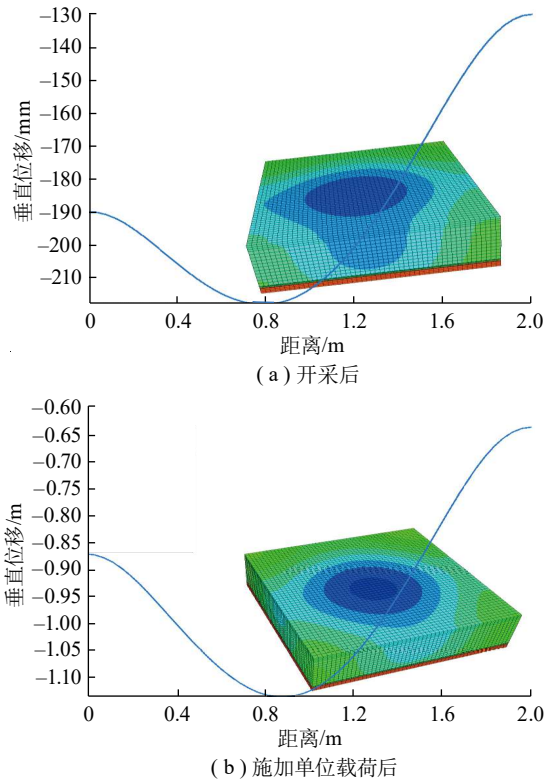


图6 采场地表垂直位移曲线

Fig. 6 Vertical displacement curve of the surface of stope

采用房柱式采煤法开采后, 采空区遗留的煤柱与采区边界煤柱共同承载上覆岩层重力载荷, 距离采空区中心较远位置的遗留煤柱由于靠近采区四周边界煤柱, 边界煤柱承担了大部分顶板载荷, 因而该范围内煤柱的应力集中程度相较于采空区中心位置较弱, 煤柱下沉量相对较小。遗留煤柱以采空区中心为核心向四周辐射形成椭圆形沉降区。正因如此, 对应地表表现出中心区形成盆地、四周形成盆缘的沉降规律。而在老采空区地表施加单位载荷后, 激活了遗留煤柱, 煤柱进一步发生破坏、失稳, 采场中心区域地表最大下沉值为119.6 cm, 采场边界位置最小下沉值87 cm, 地表在单位载荷下随煤柱破坏而发生大面积破坏, 进一步说明房柱式老采空区煤柱稳定性较差, 不足以保证采场地表的长期稳定。

3 房柱式采空区注浆充填特征分析

房柱式采煤法将采空区分为煤房与煤柱, 采空区上方覆岩受采动影响存在较为丰富的裂隙, 在拟构建建筑物的附加应力作用下, 地基下的覆岩处于不稳定状态, 难以满足构筑物地基强度的要求。注浆法可使浆液在设定的压力下充填老采空区煤房、冒落矸石、煤柱裂隙以及采空区顶板上覆岩层中存在的裂隙, 加强老采空区空间的完整性, 达到阻止老采空区“活化”的目的, 浆液在整个充填过程中针对充填位置不同, 其发挥的特性也有所不同。

3.1 浆液在房柱式采空区的流动特性

3.1.1 浆液在煤房的流动特性

对于房柱式开采法, 煤柱附近存在完整的煤房自由空间, 煤房在煤柱的支撑下保留一般完整, 浆液在煤房中流动呈自由扩散状态。根据注浆浆液在房柱式老采空区煤房中的动态变化过程, 可将其分为扩散阶段、层流阶段、紊流阶段等3个阶段。扩散阶段浆液依靠自重进入煤房, 浆液流动阻力较小, 注浆压力较小, 浆液整体呈自由扩散状态。当浆液自由扩散到一定程度后, 注浆压力逐渐增大, 注浆口外围的浆液不断被推动向煤房更远处进行扩散流动。随着浆液在紊流阶段堆积, 水平方向靠近煤柱, 垂直方向靠近采场顶底板, 煤房被浆液近乎充满, 此时浆液流动阻力增大, 浆液流动逐渐停止。

3.1.2 浆液在煤柱周围的流动特性

房柱式开采煤柱数量较多, 煤柱经长期的风化、侵蚀、蠕变等作用, 煤柱外侧存在大量裂隙, 其抗压强度也随之降低。浆液在煤柱周围的流动可填充遗留煤柱上存在的裂隙, 增强煤柱抗压强度。煤柱外部的注浆过程与煤房浆液流动过程一致, 浆液可以充填煤柱表面的裂缝, 提高煤柱的支撑强度, 房柱式采空区煤柱内部核心区域相对完整, 浆液依靠自重及注浆压力进入煤柱内部的微小裂隙, 进一步加强煤柱的抗压强度。

3.2 散点式注浆加固支撑系统分析

房柱式采煤法将长壁采煤法中存在的大面积采空区用煤柱分割成多个连续的小自由空间。传统的单点式或多点式的注浆方法很难将地下自由空间完全充填, 散点式注浆方法可将注浆口均匀分布到地下自由空间的每个位置, 浆液在这种小

的自由空间可以更好地发挥其层流与紊流的特性。

注浆完成后, 房柱式采空区内的煤柱、煤房、顶底板岩梁以及浆液形成新的地下支撑系统, 共同维持上覆岩层以及地基的稳定性。图7为房柱式采空区注浆加固支撑系统。图7中, f_s 为注浆后煤房内的横向约束力; f_r 为注浆后煤房内对上覆岩层产生的支撑力; f_m 为注浆后煤柱对上覆岩层产生的支撑力。散点式注浆形成的支撑系统将煤房、煤柱以及煤房内遗留的矸石等采场单一支撑单元统一起来, 各支撑单元以煤柱为中心相互作用, 从原来的二维受力状态改变为三维受力状态, 大大提高了地下自由空间的稳定性, 老采空区整体承压能力得以提升。

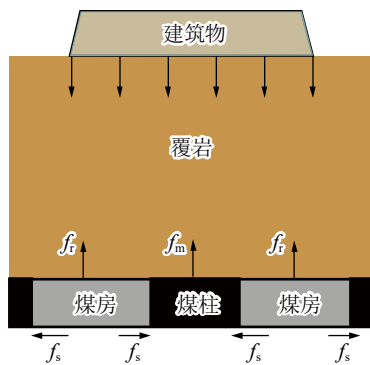


图7 房柱式采空区注浆加固支撑系统

Fig. 7 Grouting reinforcement support system of room-and-pillar mined-out area

在房柱式老采空区地表构建新的建筑物, 覆岩受到建筑物载荷影响将产生一定的下沉, 该垂直方向的位移促使井下支撑系统进一步与覆岩紧密联系, 系统内的横向约束力将大幅度提高上覆岩层承载重力的能力, 进而有效控制老采空区上方岩土层的竖直位移。

4 注浆设计

4.1 注浆材料及配比

对于老采空注浆材料选取需满足取材方便、价格低廉、运输方便、节约成本等原则。注浆材料选用水泥、粉煤灰浆液, 其中浆液水固比为1:1.0~1:1.4, 固相中水泥与粉煤灰比值为3:7, 帷幕孔根据现场具体情况采取较稠的浆液或在浆液中掺加水泥质量的2%速凝剂, 使得注入老采空区内的浆液尽快凝固, 以形成帷幕, 防止浆液流

失。

4.2 注浆工艺

老采空区充填注浆阶段采用散点多孔注浆法, 利用地面均匀分布通向老采空区的钻孔, 利用注浆泵, 通过注浆管从地面储浆池向地下可充填空间注入浆液, 该浆液主要占据老采空区空间以及裂隙带等可充填空间, 从而达到控制研究区域内地表发生下沉的目的。注浆孔设计深度为地面至采空区顶板以下1.5 m, 注浆孔的主要灌注长度为老采空区顶板以上5 m至采空区底板, 注浆孔在采空区治理范围内散点式(梅花型)布置, 注浆孔间距布置为10 m×10 m, 单孔注浆工艺原理如图8所示。

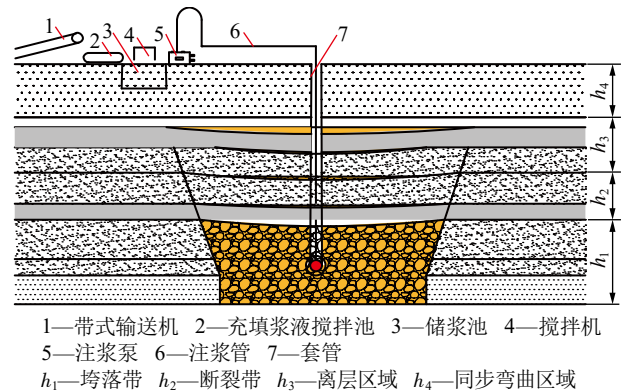


图8 老采空区单孔注浆充填工艺

Fig. 8 Single hole grouting filling technology in old-mine goaf area

为了达到较好的注浆效果, 注浆材料要有良好的脱水性和流动性, 一般选择粉煤灰并配以倍量的水作为充填材料, 粉煤灰粒径在0.1~1.0 mm。

5 瞬变电磁法勘查注浆结果分析

对散点式注浆结果的勘查主要是利用瞬变电磁法接收由老采空区内的充填浆液凝固后形成的良导地质体受激励引起的涡流所产生的二次场(非稳电磁场)。以二次场信号随时间变化的特征来判断地层内的电性变化及老采空区充填浆液分布是否均匀。

现场勘查采用的是PROTEM瞬变电磁勘探系统, 该系统具有发射电流大、抗干扰能力强、施工方式灵活等特点。在研究区域内均匀布置5条测线, 瞬变电磁基本网度为10 m×5 m, 共设定坐标点84个, 试验点1个, 质量检测点3个, 共计物理点88个, 勘查示意如图9所示。

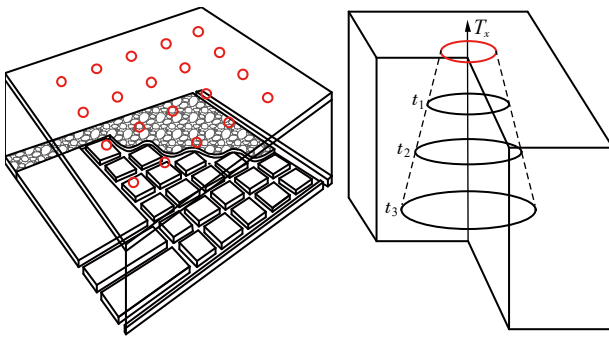


图9 瞬变电磁勘查示意

Fig. 9 Transient electromagnetic exploration schematic diagram

采用房柱式采煤法开采后, 采场形成分割的自

由空间, 在重力作用下, 采空区上方的岩层由于失去支撑而产生断裂, 造成采区上覆岩体不同程度的破坏和移动, 破坏了天然岩体的结构而出现大量的空隙、裂隙, 导致该区域的岩体电阻率高于周围相对完整岩层的电阻率。而在区域边缘, 由于岩体移动程度低和裂隙数量少, 电阻率的差异相对不大, 在电阻率等值线图上呈现层状延伸, 当老采空区的孔隙被水或泥质充填后, 其电阻率呈低阻现象。因此, 利用采空区周围岩体具有的电性异常, 就能够选用适当的物探方法探测采空区的注浆效果。

图10中横坐标表示点号从左向右依次增大, 纵坐标表示深度, 视电阻率由蓝到红依次增大。

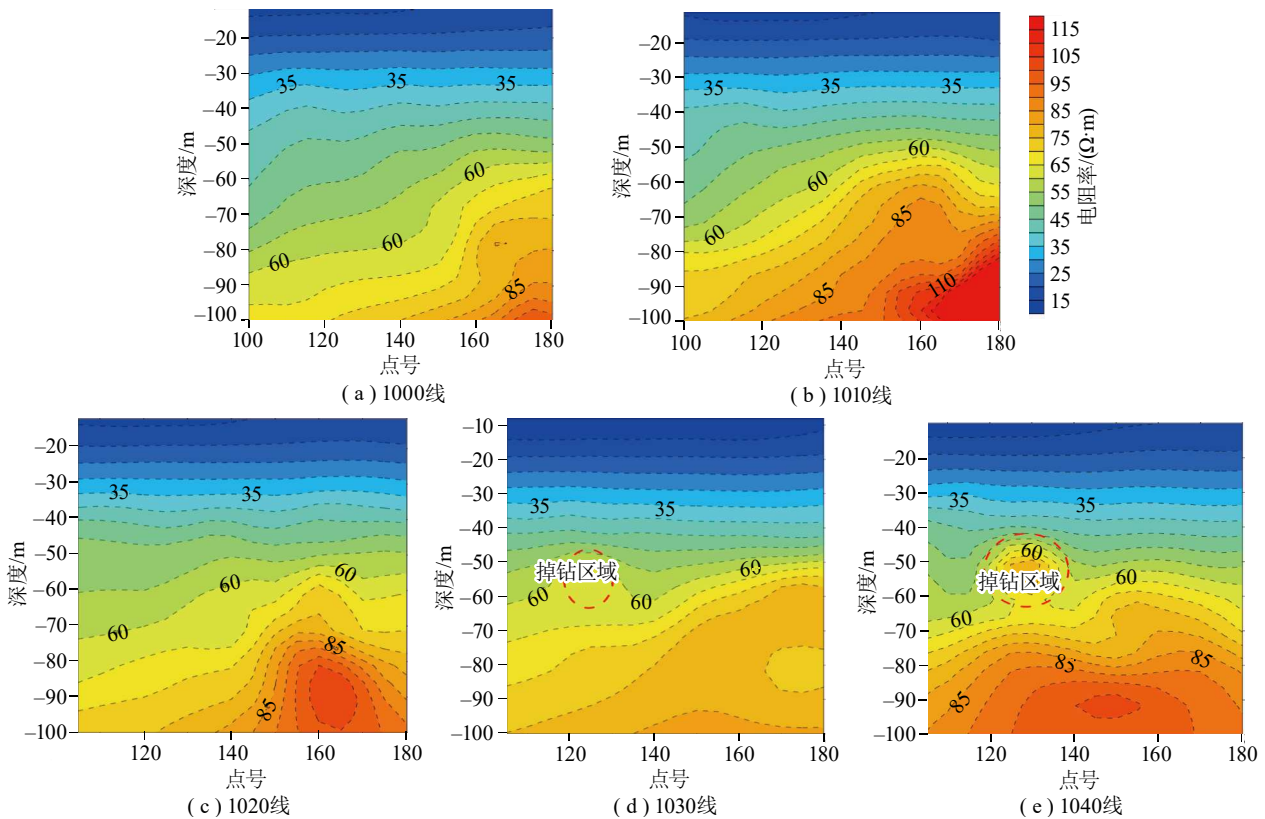


图10 视电阻率等值线剖面

Fig. 10 Contours of apparent resistivity section

如图10所示, 在浅部区域视电阻率没有发生大的波动, 地层成层性很好, 1000线视电阻率在150~180点之间, 1010线在130~180点之间, 1020线在140~180点之间, 电阻率呈高阻现象, 推测为注浆后引起的地电反应。1030线和1040线视电阻率在图中120点附近为已知掉钻区域, 视电阻率断面呈高阻现象, 以及分别在140~180点, 60~100点之间, 推测为注浆后引起的地电反应, 5条线整体视电阻率连续, 变化不大, 成层性很好, 注浆效果良好,

勘探区内无空洞。

图11为勘探区注浆量等值线图, 图中Y轴为纬度坐标, X轴为经度坐标, 颜色由蓝到红表示注浆量一次增大量, 黑色实心圆代表充填注浆钻孔位置, 红色空心圆代表瞬变电磁法实测点位。由图11可知, 在主巷道和溶洞区域采取加密散点注浆孔和加大注浆量的措施, 使注浆孔浆液能够充分注入。

图12为-60 m视电阻率等深切片图, 图中, X轴、Y轴为经纬度坐标; 黑色实心圆与红色空心圆

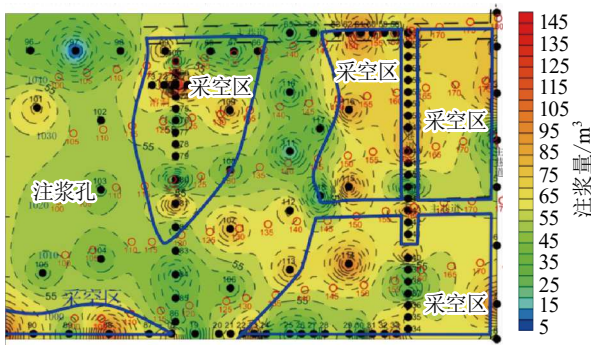


图 11 注浆量等值线图

Fig. 11 Contours of grouting amount

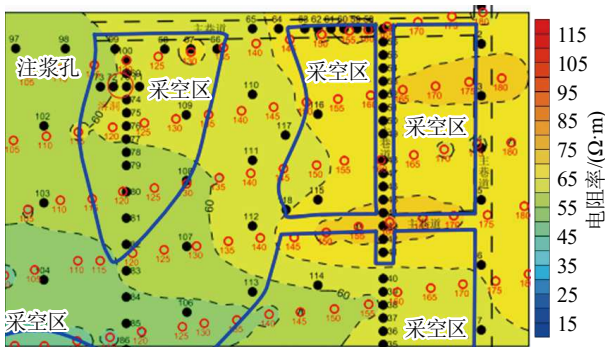


图 12 -60 m 视电阻率等深切片图

Fig. 12 Contours of -60 m apparent resistivity

分别代表注浆钻孔位置和瞬变电磁法实测点位, 颜色有蓝到红电阻率依次增大。在图12中, 该线视电阻率呈西南整体小, 东北大, 中间呈过度变化的趋势, 高阻区域与勘探区注浆位置和注浆量相一致。在已知注浆区域视电阻率呈高阻现象, 推测其为注浆引起的地电反应。综上分析表明, 该区域注浆充填效果良好, 未发现空洞。

6 结 论

(1)通过对老采空区现场踏勘和钻孔探查表明, 老采空区内存在垮落矸石、遗留煤柱以及大量的分割自由空间, 同时探明老采空区顶板上方岩层裂隙发育丰富。

(2)理论计算分析表明, 研究区内的老采空区裂隙发育高度与拟建构筑物载荷影响深度存在重合, 采空区煤柱在拟建构筑物载荷作用下安全系数小于1.5, 煤柱处于不稳定状态。

(3)数值模拟结果表明, 老采空区煤柱内部未遭到破坏, 煤柱整体具有一定承载能力, 但在新的单位载荷作用下, 遗留煤柱将被激活, 进而引发多米诺骨牌式的失稳、破坏, 从而导致整个采空区大范

围垮落失稳, 地表发生沉降破坏。

(4)通过对浆液流动特性的分析, 提出了散点式注浆充填方案, 该方法均匀填充了老采空区内的煤房以及煤柱与采场顶板的裂隙, 形成了统一的支撑系统, 将采空区的二维受力状态变为三维受力状态, 使得老采空区整体承压能力得以提升, 有效控制了岩土层的竖直位移。

(5)瞬变电磁勘查结果表明, 高阻区域呈现与勘探区注浆位置和注浆量相一致, 进一步说明散点式注浆充填法浆液能够充分注入, 注浆效果良好, 未发现空洞。

参考文献(References):

- [1] 陈绍杰, 张立波, 江宁, 等. 山东某煤矿老采空区上方大型工程建设案例研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1017-1030.
CHEN Shaojie, ZHANG Libo, JIANG Ning, et al. A case of large buildings construction above old-mine goaf in Shandong Province[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1017-1030.
- [2] 李学良. 煤矿老采空区覆岩移动变形监测方法分析及应用[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 157-162.
LI Xueliang. Analysis and application of monitoring method of overburden movement and deformation in old goaf of coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 157-162.
- [3] 郭惟嘉. 矿井特殊开采方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
GUO Weijia. Special mining method of mine[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [4] 蒋宇静, 王亚华, 颜鹏, 等. 矿山房式开采煤柱非稳定性破坏数值模拟[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 27-33.
JIANG Yujing, WANG Yahua, YAN Peng, et al. Numerical simulation analysis of instability failure of coal pillar in mine room mining[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(5): 27-33.
- [5] 关瑞斌. 房柱式残采区蹬空开采可行性研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(11): 6-9.
GUAN Ruibin. Research on the feasibility of over-goaf mining with room and pillar mining in residual mining area[J]. Coal Engineering, 2019, 51(11): 6-9.
- [6] 王东升. 房柱式和巷柱式采煤方法顶板冒落规律的探讨[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(S1): 182-183.
WANG Dongsheng. Discussion on roof caving law of room and pillar mining methods[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2003, 30(S1): 182-183.

- [7] 田文辉, 张帝, 曹安业, 等. 山寨煤矿锯齿状遗留煤柱群应力分布特征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(5): 053038.
TIAN Wenhui, ZHANG Di, CAO Anye, et al. Stress distribution characteristics of serrated residual coal pillar groups in Shanzhai Coal Mine[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(5): 053038.
- [8] 滕永海, 唐志新. 老采空区地面建筑技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 183–186.
TENG Yonghai, TANG Zhixin. Study and application of building construction technology on surface ground above mine goaf[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 183–186.
- [9] 马炳镇, 牛建立, 白铭波, 等. 房柱式采空区高精度勘查技术[J]. 煤矿安全, 2022, 53(2): 99–103.
MA Bingzhen, NIU Jianli, BAI Mingbo, et al. Precise exploration technology of room pillar goaf in Shenfu Mining Area[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(2): 99–103.
- [10] 李竹, 冯国瑞, 朱卫兵, 等. 柱式采空区蹬空复采充填体高-强协调机制及其临界高度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 469–478.
LI Zhu, FENG Guorui, ZHU Weibing, et al. Height-strength coordination mechanism of filling body in pillar goaf and its critical height in kick-off mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(3): 469–478.
- [11] 马进功. 履带行走支架在残煤短壁开采设计中的应用[J]. 煤炭工程, 2022, 54(7): 7–12.
MA Jingong. Design and application of crawler powered support in short wall mining of residual coal[J]. Coal Engineering, 2022, 54(7): 7–12.
- [12] 孙希奎. 矿山绿色充填开采发展现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 48–55.
SUN Xikui. Present situation and prospect of green backfill mining in mines[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 48–55.
- [13] 王云搏, 张强, 孟国豪, 等. 基于固体充填开采的充填材料选择设计方法[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(3): 033035.
WANG Yunbo, ZHANG Qiang, MENG Guohao, et al. Methods of selecting filling materials for solid filling mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(3): 033035.
- [14] 许茜, 王彦明, 张雯超. 基于正交试验的充填体力学及微观特性研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 063520.
XU Qian, WANG Yanming, ZHANG Wenchao. Mechanical performances and microscopic properties of cemented backfilling based on orthogonal experiment[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 063520.
- [15] 王亮, 郭庆彪, 王磊, 等. 采空区建设场地稳定性评价指标体系构建研究[J]. 金属矿山, 2022(8): 245–253.
WANG Liang, GUO Qingbiao, WANG Lei, et al. Study on construction of stability evaluation index system of construction site on the goaf[J]. Metal Mine, 2022(8): 245–253.
- [16] 朱德福, 屠世浩, 王方田, 等. 浅埋房式采空区煤柱群稳定性评价[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 390–397.
ZHU Defu, TU Shihao, WANG Fangtian, et al. Stability evaluation on pillar system of room and pillar mining in goaf at shallow depth seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 390–397.
- [17] 顾士坦, 魏宝贞, 蒋邦友, 等. 双侧采空不规则煤柱稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2020, 51(3): 216–220.
GU Shitan, WEI Baozhen, JIANG Bangyou, et al. Stability analysis of irregular coal pillars in bilateral goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(3): 216–220.
- [18] 郭广礼, 邓喀中, 汪汉玉, 等. 采空区上方地基失稳机理和处理措施研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2000, 17(3): 39–42.
GUO Guangli, DENG Kazhong, WANG Hanyu, et al. Study on foundation instability mechanism and treatment measures above goaf[J]. Mine Pressure and Roof Management, 2000, 17(3): 39–42.
- [19] 江宁. 建筑荷载作用下长壁老采空区失稳机理及控制技术[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
JIANG Ning. Research on instability mechanism and treatment technology of old goaf under construction load[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [20] 王爱群. 基于带状注浆理论的高速公路地下采空区处治范围分析与研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011(6): 87–90.
WANG Aiqun. Analysis and research on the treatment range of underground goaf in expressway based on strip grouting theory[J]. Highway Traffic Technology(Applied Technology Edition), 2011(6): 87–90.
- [21] 杜君武, 黄庆享. 浅埋煤层群不同煤柱错距覆岩结构演化规律及煤柱稳定性分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 013018.
DU Junwu, HUANG Qingxiang. Overburden structure evolution and coal pillar stability analysis with different offset distance of coal pillars in shallow multi-seam[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(1): 013018.
- [22] 张杰, 王斌. 浅埋间隔采空区隔离煤柱稳定性及覆岩失稳特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 936–942.
ZHANG Jie, WANG Bin. Stability of isolated coal pillar-

- and overburden instability in shallow-buried interval gob[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(5): 936–942.
- [23] 牛滕冲, 王方田, 王文林, 等. 区段煤柱聚能失稳关键因素及控制技术[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(2): 023017.
- NIU Tengchong, WANG Fangtian, WANG Wenlin, et al. Key factors and control technology of energy-gathered instability of coal pillar[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(2): 023017.
- [24] 滕永海, 唐志新, 易四海. 采煤塌陷区高层建筑地基评价与抗变形技术[J]. *矿山测量*, 2016(1): 1–6.
- TENG Yonghai, TANG Zhixin, YI Sihai. Evaluation and deformation resistance technology of high-rise building foundation in coal mining subsidence area[J]. *Mine Surveying*, 2016(1): 1–6.
- [25] 王正帅, 邓喀中. 老采空区地表残余变形分析与建筑地基稳定性评价[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(10): 133–137, 102.
- WANG Zhengshuai, DENG Kazhong. Analysis of surface residual deformation and stability evaluation of building foundation in old goaf[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(10): 133–137, 102.
- [26] 高紫鑫. 煤矿采空区覆岩破坏规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- GAO Zixin. Research on the Law of overlying rock failure in the goaf of coal mine[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.