

运营高速下伏充水房柱式采空区治理技术研究

张耿耿, 胡 瑞, 陈 杰

浙江交投高速公路运营管理有限公司金华管理处, 浙江 金华

收稿日期: 2025年9月13日; 录用日期: 2025年10月3日; 发布日期: 2025年10月17日

摘 要

本文以运营高速公路下伏充水房柱式采空区为研究对象, 通过综合物探手段揭示该采空区的地质构造与空间分布特征, 选取典型断面进行稳定性分析, 验证了采空区上覆道路结构物处在不稳定 - 基本稳定状态。采用注浆法对采空区进行处治, 针对富水采空区易导致浆液流失、胶结体强度不足等问题, 提出“配比优化、帷幕截流、排水减压”的协同处治方案。工程实践表明, 该方案可有效控制浆液扩散范围, 实现了浆 - 水置换与动态水位平衡, 验证了其在运营高速公路下伏富水采空区治理中的可行性, 为类似工程提供参考。

关键词

高速公路, 房柱式采空区, 充水采空区, 注浆

Technology Research on Treatment of Water-Filled Room-and-Pillar Goaf under Operational Expressway

Genggeng Zhang, Rui Hu, Jie Chen

Jinhua Management Office of Zhejiang Communications Investment Expressway Operation Management Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

Received: September 13, 2025; accepted: October 3, 2025; published: October 17, 2025

Abstract

This paper takes the water-filled room-and-pillar goaf underlying an operational expressway as the research object. Through engineering geological investigation, the geological structure and spatial distribution characteristics of this goaf are revealed. Typical sections are selected for stability analysis, and it is verified that the road structures overlying the goaf are in an unstable to basically

stable state. The grouting method is adopted to treat the goaf. Aiming at the problems of grout loss and insufficient strength of the cemented body easily caused by water-rich goaf, a synergistic treatment scheme of "proportion optimization, curtain interception and drainage decompression" is proposed. Engineering practice shows that this scheme can effectively control the grout diffusion range, realize grout-water replacement and dynamic water level balance, verify its feasibility in the treatment of water-rich goaf underlying operational expressways, and provide a reference for similar projects.

Keywords

Expressway, Room-and-Pillar Goaf, Water-Filled Goaf, Grouting

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国煤炭资源规模化开采前,小煤矿广泛采用房柱式开采工艺,易导致地下形成层位交错、空间拓扑复杂的采空区网络[1][2]。受限于开采尺度约束,加之遗留矿柱的支撑作用,此类采空区初期通常呈现覆岩破坏梯度平缓、地表变形量可控的特征,但煤柱截面的非规则几何形态与结构性缺陷,使其在自重应力场与环境因素长期耦合作用下,逐步发生蠕变损伤与结构劣化[3]。

对于运营公路下伏采空区,车辆荷载的循环加卸载作用会使煤柱极限强度较静态工况低[4],显著加剧地表失稳风险。工程实践中针对房柱式采空区常用处置方法包括绕避法[2]、桥跨板跨法[2]、灌注柱支撑法[5]、井下浆砌干砌法[6]等,其中,绕避法、桥跨板跨法通过调整线路走向、架设桥梁以避免与采空区的直接接触,通常适用于新建公路工程;灌注柱支撑法通过钻孔灌注钢筋混凝土桩对采空区顶板进行支撑,适用于顶底板岩性较完整坚硬且埋深小于50m的场景;井下浆砌干砌法仅适用于仍保留井下巷道通道老矿区采空区,且该法对施工条件要求较为苛刻。

充填注浆法因其具有施工简便、可从根本上实现治理、适用范围广等优势,是房柱式采空区治理的主流技术手段[7][8]。然而,针对富水采空区,其空腔及巷道常被地下水充填,在此条件下开展注浆作业时,地下水会显著影响充填效果,造成浆液离析、扩散范围变小、浆液难以下到孔底等不良现象,甚至会造成地层上抬、地面大量开裂隆起等严重后果[9]。针对此类问题,本文依托某运营高速公路下伏采空区治理工程,系统探讨运营高速下伏充水采空区的注浆处治技术,旨在为同类型工程提供参考。

2. 工程概况

某高速穿越一历史遗留的房柱式采空区,该采空区采掘历史久远、时间跨度长且矿权关系复杂,有关矿脉主体萤石矿的成矿、探矿以及采矿资料欠缺,根据前期地质勘察结果,该采空区走向呈南北向展布,平面形态为长条状,整体呈现浅埋、急倾、充水的特征。

3. 工程地质

3.1. 地形地貌及地层岩性

项目区位于丘陵前坡洪积斜地,近丘陵坡麓,地势缓倾,总体北高南低,场地附近最高点为北侧山丘,高程124m,南侧较低点高程78.5m,高差46.5m,既有高速东西走向,高速两侧高差约5~7m。区

域 75 m 深度范围内，地层由老至新为白垩系 - 第四系，区域内第四系主要分布于表层坡洪积粉质黏土，成分主要为黏性土及碎石组成，厚度不均匀，分布不连续。下部基岩为下白垩统朝川组火成岩，广泛分布，岩性主要由酸性火山碎屑岩组成，主要为分布于上部的青灰色玄武岩，分布于中下部的紫红色凝灰质砂岩、褐色凝灰岩等。

3.2. 水文情况

3.2.1. 地表水

项目区地表水体主要有：南边约 2.3 km 为 A 江，北边约 250 m 处为 B 水库，东边约 2 km 为一溪流，周边零星分布鱼虾塘。B 水库对采空区积水有一定的侧向补给作用，为较稳定的地表水补给水源，附近地表水与地下水水力联系强烈，鱼虾塘水源均来源于采空区原竖井抽水。

3.2.2. 地下水

项目区内地下水主要包括基岩裂隙水及采空区积水。基岩裂隙水主要赋存于强风化及中风化基岩裂隙中，受构造破碎带控制，项目区基岩中裂隙发育，基岩中富水性极强，采空区积水来源为基岩中的裂隙水。

3.2.3. 补径排情况

项目区总体上南侧水位较北侧低，如图 1 所示，本项目处于区域地下水循环的径流区上，补给区位于北边山区，排泄区位于南侧 2.3 km 处的 A 江。但由于人类活动频繁，对浅部地下水系统干扰较大，地下水在竖井 S1 处通过长期抽水进行排泄，高程在 74.6~77.1 m 之间变化，当竖井 S1 不抽水时，地下水会沿 S5 竖井向外渗出地表。因此，项目区地下水主要径流通道就是断层破碎带及采空区。

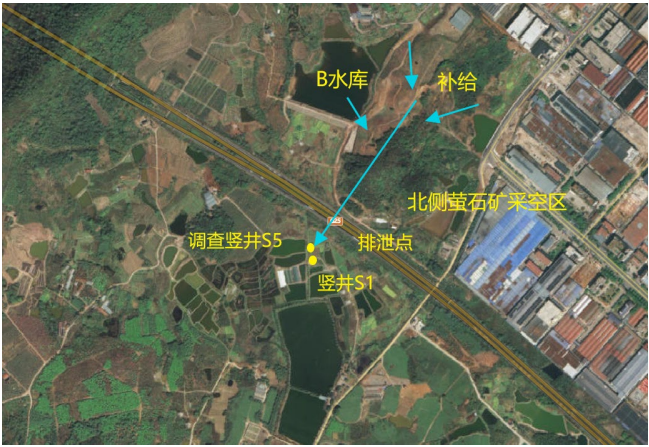


Figure 1. Diagram of groundwater recharge, runoff and discharge
图 1. 地下水补径排示意图

4. 采空区空间分布特征

4.1. 横向特征

探明采空区集中在公路中部及南侧，走向与萤石矿矿脉走向一致，平面形态近似长条状，最大宽度 21.5 m，揭示长度约 85 m，面积约为 1220 m²。既有高速公路北侧无采空区，北侧东部矿脉边界分布有一条埋深 8.0~13.2 m 已部分坍塌的巷道，推测巷道宽度 2.0 m 左右，揭示高度 1.0~1.2 m，推测为探矿巷道。

4.2. 纵向特征

如图 2 所示, 采空区总体形态为向西北倾斜的脉状, 倾角约 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$, 最大高度约 23 m, 顶底最大高差约 40 m, 南北向形态上呈现出北侧采空区范围小、南侧大, 并向南侧倾斜的特征; 因矿体开采水平较多及顶板塌陷, 采空区内部纵向分布形态极为复杂, 可大致分为 2 层, 上层长度南北向长约 85 m, 高程 50~60 m 左右, 下层南北向长约 40 m, 高程 30~45 m 左右, 上下层之间局部垮塌, 具有一定的联通性。

根据采空区三维形态分析计算, 上层采空区体积为 9254 m^3 , 下层采空区体积为 4213 m^3 , 巷道体积为 60 m^3 , 空洞体积合计为 14527 m^3 。

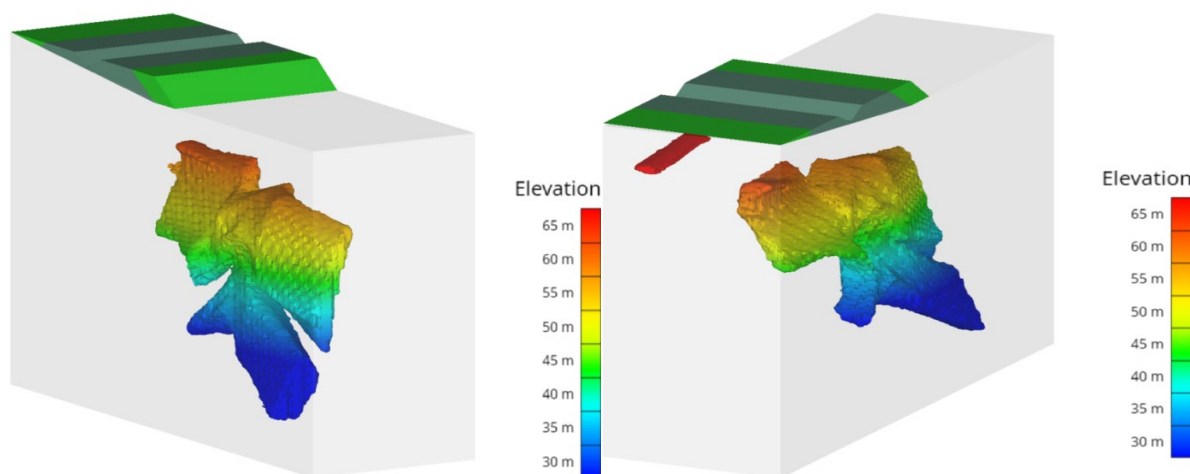


Figure 2. 3D model of goaf (Left: Southwest View; Right: Northwest View)

图 2. 采空区三维模型(左: 西南视角; 右: 西北视角)

5. 稳定性分析

采空区稳定评价采用《采空区公路设计与施工技术规范》(JTG/T3331-03-2024)中附录 F.0.3 极限平衡法进行计算分析[10], 选取第 1 款计算公式, 如下:

临界深度 H_0 为:

$$H_0 = \frac{B\gamma + \sqrt{B^2\gamma^2 + 4B\gamma p_0 \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)}}{2\gamma \tan \phi \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)} \quad (1)$$

B : 巷道宽度(单位: m)。

p_0 : 公路基底单位压力(单位: kN/m^2)。

H : 巷道顶板的埋藏深度(单位: m)。

γ : 岩层的重度(单位: kN/m^3)。

ϕ : 岩层的内摩擦角。

稳定系数 F_s 计算公式如下:

$$F_s = H/H_0 \quad (2)$$

当 $F_s < 1.5$ 时, 地基不稳定; $1.5 \leq F_s < 2.0$ 时, 地基基本稳定; $F_s \geq 2$ 时, 地基稳定。

针对下伏采空区的中分带以南区域选取五个典型剖面进行稳定性分析, 其中剖面 1 位于中分带, 剖

面 2、3 位于南侧改扩建红线外原塌陷区，剖面 4 位于塌陷区以南，计算结果见下表 1。

依据计算结果，采空区处于不稳定 - 基本稳定状态，由于顶板局部中风化石英岩及部分较好的强风化玄武岩仍具有一定的支承能力，因此目前暂未发生塌陷现象，需对采空区进行处治。

Table 1. Calculation data of stability coefficient
表 1. 稳定性系数计算数据

计算断面	巷道宽度(m)	平均容重(kN/m³)	内摩擦角(°)	P0 (kN/m²)	采空区顶埋深(m)	临界深度(m)	稳定性系数
剖面 1	5.7	24	32	100	18.0	29.2	0.62
剖面 2	10	24	32	100	19.7	56.8	0.35
剖面 3	10	24	32	0	19.0	52.2	0.36
剖面 4	6.0	24	32	0	35.2	31.3	1.12
巷道	2.0	24	32	0	8.0~12.0	10.4	0.77~1.55

附：上表中物理力学指标参照前期勘察结论，为简化计算，顶部覆岩按照强风化玄武岩考虑，计算的宽度(巷道宽度)及埋深根据模型取值，建筑物基底压力按照扩建填土高度估算。

6. 注浆加固

6.1. 处治范围

采空区治理长度为下伏采空区实际长度加覆岩移动影响范围，勘查报告提供的上部荷载、地下水工况等边界条件下，采空区塌陷主要影响长度为 86~94 m，因此处治长度按 94 m 选用；治理宽度由路基宽度、围护带宽度、覆岩移动影响宽度 3 部分组成，矿脉走向上(垂直于公路方向)的采空区影响宽度为 92.0~94.0 m，治理宽度按 94 m 选用。

6.2. 注浆孔布设

对采空区及其边缘影响带进行分区布孔处治，布孔范围如图 3 所示，边缘影响带钻孔梅花型布设，注浆孔排距 10 m，孔距 5 m；采空区范围进行注浆填充处理，为避免既有路面施工，采用垂直与斜孔联合布设方法，中央隔离带与路堤外侧布设倾斜孔，斜孔角度 5°和 10°，倾向 223°和 43.1°，中央隔离带竖直注浆孔排距 5 m，孔距 5 m，公路两侧排距 10 m，孔距 5~10 m。

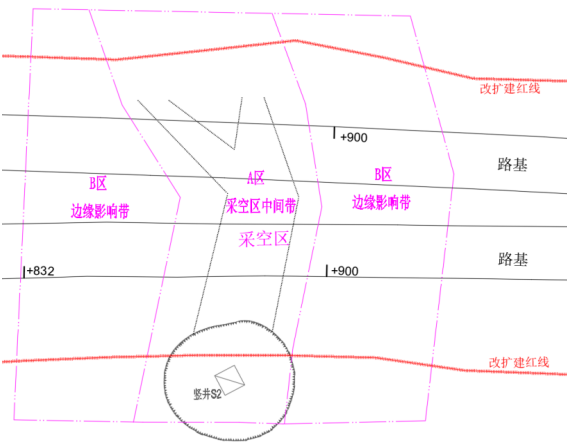


Figure 3. Figure of zoned drilling layout
图 3. 分区布孔示意图

6.3. 地下水处理

该采空区空腔内赋存积水，且与地表水系水力联系强烈，常规注浆存在下列问题：一是中央分隔带及其以南路基下伏大空腔采空区，注浆过程中由于注浆压力陡升、钻机振动、车辆动荷载等因素耦合，易对路基稳定性造成不良影响；二是富水环境易导致水泥粉煤灰浆液离析，初凝时间延长且扩散路径无序，影响充填效果。针对上述问题，处治工程提出并应用了以下针对性技术方案：

1) 帷幕控制浆液扩散范围。在地下水径流下游布置帷幕孔，遇多层空洞或破碎地层采用下行式注浆形成帷幕墙，阻断地下水径流路径，避免浆液无序扩散。

2) 布设排水孔排水减压。矿脉两侧和地下水径流上游即公路北侧不设帷幕孔且后施工，根据采空区、巷道的方向性，在公路的南北两侧和中间布置 3 个排水管井($\phi 400$ mm 无砂混凝土，井深 20 m)，形成采空区积水向不同方向的挤排通道，在注浆过程中进行排水卸压。

3) 针对富水环境浆液组成设计。结合室内试验，采用 4:6 的水泥粉煤灰固相比，1:1.2 的水固比，该配比浆液水下抗分散能力强、流动性满足要求，帷幕区采用水泥 - 粉煤灰、水玻璃双液注浆，浆液拌合用水采用采空区空腔水，边抽水边制浆注浆，以浆液置换采空区空腔水。

4) 采用间歇式注浆工艺。采用间歇式灌浆方法，严格控制每序次灌浆时间不超过 12 h，以控制耗浆量及其扩散范围；同时，严格控制每孔注浆量，一般不超过 300 m³；各孔灌注间歇时间应不少于 12 h (期间换灌其它孔)，循环往复。

5) 布设安全监测。在采空区施工区域及竖井区域共布设 4 个水位计与 1 个孔隙水压力计，动态监测水位及水压力，其中水位日变化量预警阈值设定为 2000 mm/d，孔隙水压力计监测以初始值的 10%并结合沉降监测综合判定。

6.4. 处治结果

本项目各注浆孔累计注浆总量 14742.6 m³，注浆过程未见地面变形、隆起等不良现象，注浆作业期间水位变化峰谷值差异 0.94 m，日变化量满足 ± 2 m 控制标准；如图 4 所示，剔除异常突变后的水压力日变化幅度 2 kPa 左右，满足控制要求。

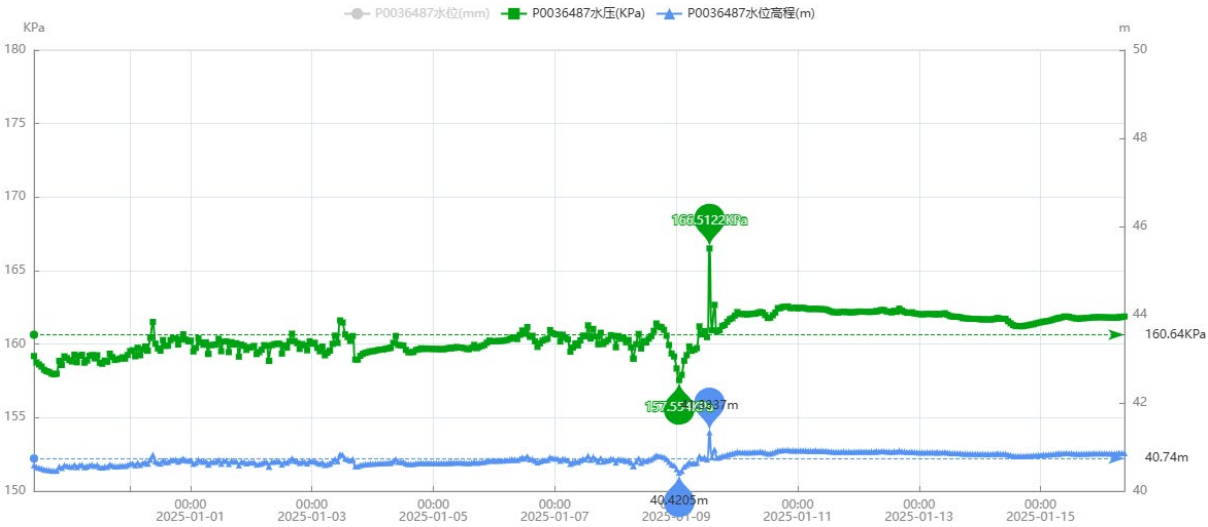


Figure 4. Pore water pressure monitoring value

图 4. 孔隙水压力监测值

本项目注浆结束 6 个月后，采用钻探(含室内试验)、地震波跨孔 CT、管波、钻孔电视四种方法对采

空区加固效果进行检测，检测范围为高程+30 m 至地表范围，如表 2 所示，检测结果均满足《采空区公路设计与施工技术规范》要求。

Table 2. Goaf detection items and detection conclusions
表 2. 采空区检测项目与检测结论

序号	检测项目	规范要求	检测结果
1	充填率 η (%)	≥ 80	> 83
2	结石体无侧限抗压强度 R_c (MPa)	≥ 0.6	3.39~15.5
3	横波波速 v_s (m/s)	> 250	> 250

7. 结论与讨论

7.1. 结论

- 基于本工程的实践成效，可得出以下结论：
- 1) 使用斜孔进行注浆作业可在不封闭交通的情况下实现运营高速下伏采空区的注浆处治。
 - 2) 水泥粉煤灰质量比 4:6，水固比 1:1.2 配置而成的浆液水下抗分散能力、流动性可满足富水采空区的注浆要求。
 - 3) 利用地下水作为浆液拌合用水，抽注结合，使地下水位处于动态平衡状态，该方案针对富水采空区的处理措施是合理可行的，可供类似工程参考。

7.2. 讨论

7.2.1. 协同处治方案内在机理分析

协同处治方案的目的在于依托多技术的耦合，解决富水采空区注浆治理中“浆液流失严重、路基扰动风险突出”等技术问题，其内在作用机理可从以下方面展开。

帷幕截流作为控制浆液无序扩散的关键技术屏障，其作用机制在于利用水泥水玻璃的速凝特性，在地下水径流下游区域构建胶结密实的“帷幕防渗墙”。具体而言，水玻璃的引入可向体系中提供硅酸根离子，该离子在溶液中易形成长链螺旋结构并产生空腔，进而吸附溶液中的极性水分子，同时水玻璃中的硅酸钠易与体系内的氢氧化钙发生化学反应，生成固相硅酸钙凝胶[11] [12]，显著降低浆液的流动性，确保富水环境下帷幕屏障的快速成型。此外，帷幕孔设计采用 5 m 孔距，确保相邻注浆体在水平方向实现有效搭接，避免出现防渗盲区。从截流效率验证结果来看，本方案构建的帷幕系统不仅成功阻断了采空区与南 A 江、北侧 B 水库之间的水力联系，还能在后续采空区填充注浆过程中，将浆液扩散范围严格限定于帷幕内侧区域。

针对帷幕内侧充水空腔压力过高的问题，采用了“抽排结合”的排水减压措施，以孔隙水压力与注浆孔口压力作为控制指标，将采空区水位稳定控制在高程 74.6~77.1 m 区间，对应的孔隙水压力维持在 157.6~166.5 kPa 范围内，避免了注浆压力与孔隙水压力叠加后超出路基承载极限的风险。

7.2.2. 研究不足与展望

本研究依托实体工程展开，在研究深度及研究结论普适性方面存在一定的局限性，一是本研究所用协同调控方案的量化机制不明确，方案中“帷幕、排水、注浆”的协同依赖现场经验调控，缺乏量化阈值。例如，排水速率与注浆压力的匹配关系、帷幕形成后需达到的渗透系数阈值、浆液配合比与水下扩散半径的对应关系等，均未建立明确的量化标准。

二是本研究仅基于该浅埋、急倾的富水萤石矿房柱式采空区展开,成矿机理、开采后煤柱的材质强度、采空区空间拓扑均与煤矿等差异显著,且煤矿房柱式采空区常伴随煤层自燃、瓦斯富集等问题,而该研究未涉及此类工况。此外,该采空区地表水与地下水水力联系强烈,若其他采空区无稳定地表水体补给,或补给源为承压水,则帷幕阻断径流的必要性降低,排水减压的设计参数也会因补给强度变化而失效。

针对以上问题,后续研究者可在以下方面进一步深入研究:一是结合室内试验与数值模拟,建立相关模型,形成标准化参数体系;二是拓展研究对象,同时针对无稳定地表水补给、承压水补给等场景,优化帷幕与排水方案,为不同类型运营高速下伏采空区治理提供更全面理论与技术支撑。

参考文献

- [1] 张雪媛,马昊宾,许健飞,等.尺寸与形状效应下煤岩组合体力学特性与声发射特征分析[J].煤矿安全,2022,53(7): 45-51.
- [2] 王永倩,宣以琼.采空区地基处理相关问题研究[J].安徽建筑大学学报,2015,23(5): 31-35.
- [3] 陈璐,余茜,罗容,周子龙,曾铃,郭一鹏.柱式采空区矿柱失稳诱导边坡滑塌机制研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(5): 148-163.
- [4] 王东昊,李文,张彬,等.动静载作用下房柱式采空区煤柱失稳时间预测研究[J].中国矿业,2023,32(6): 123-130.
- [5] 张引,付宏博.煤矿采空区变形破坏特征及治理措施建议[J].中国井矿盐,2025,56(4): 30-32.
- [6] 李章,王平,鲁东枝.山西省某高速公路下伏采空区治理工程总结[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1): 292-294.
- [7] 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): 104-113.
- [8] 何旭辉.硬岩采空硐室稳定性及支撑加固研究——以观音堂采空硐室为例[D]:[硕士学位论文].徐州:中国矿业大学,2022.
- [9] 童立元,刘松玉,方磊,邱钰.公路路基下伏煤矿采空区注浆处理设计计算方法探讨[J].岩土工程学报,2003(3): 374-376.
- [10] 张志沛,王红,等.某高速公路下伏煤矿采空区稳定性分析[J].煤田地质与勘探,2005,33(1): 46-48.
- [11] Zhang, Y., Wang, S., Li, L., Han, J., Zhang, B., Hou, D., *et al.* (2020) A Preliminary Study of the Properties of Potassium Phosphate Magnesium Cement-Based Grouts Admixed with Metakaolin, Sodium Silicate and Bentonite. *Construction and Building Materials*, **262**, Article ID: 119893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119893>
- [12] Lin, R., Yang, L., Pan, G., Sun, Z. and Li, J. (2021) Properties of Composite Cement-Sodium Silicate Grout Mixed with Sulphoaluminate Cement and Slag Powder in Flowing Water. *Construction and Building Materials*, **308**, Article ID: 125040. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125040>