

基于极限平衡分析法的南张家金矿采空区稳定性评价

苏 盛¹, 王 恒^{2*}, 杨尚儒², 周 凯¹, 翟彦棋¹

¹烟台经济技术开发区黄渤海地质资源环境研究院, 山东 烟台

²山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队(山东省第六地质矿产勘查院), 山东 威海

收稿日期: 2026年7月2日; 录用日期: 2026年8月5日; 发布日期: 2026年8月13日

摘 要

为了研究南张家金矿采空区对某线路工程建设的影响。本文在查明矿山开采时序、各中段采空空间形态与场区工程地质条件的基础上。采用了极限平衡分析法, 多影响因子开展综合稳定性研判。最终分析划定了采空区影响范围, 将研究区划分为不稳定区139,384 m²、基本稳定区36,859 m²、稳定区53,766 m²。并分区提出了注浆充填、桩基加固、地表沉降长期监测等针对性工程处置方案, 为项目施工设计及后续施工管控提供技术依据。

关键词

闭坑金矿, 采空区, 稳定性评价

Stability Evaluation of Goaf in Nanzhangjia Gold Mine Based on Limit Equilibrium Analysis Method

Sheng Su¹, Heng Wang^{2*}, Shangru Yang², Kai Zhou¹, Yanqi Zhai¹

¹Yantai Economic and Technological Development Zone Huangbohai Geological Resources and Environment Research Institute, Yantai Shandong

²No. 6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (No. 6 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province), Weihai Shandong

Received: July 2, 2026; accepted: August 5, 2026; published: August 13, 2026

*通讯作者。

文章引用: 苏盛, 王恒, 杨尚儒, 周凯, 翟彦棋. 基于极限平衡分析法的南张家金矿采空区稳定性评价[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(8): 1169-1176. DOI: 10.12677/ag.2026.168104

Abstract

To study the impact of the abandoned mining area in the Nanzhangzhang Gold Mine on the construction of a certain railway line, this paper conducted a comprehensive stability assessment using the limit equilibrium method and multiple influencing factors. Based on the investigation of the mining chronology, the spatial morphology of each mining level, and the engineering geological conditions of the site, the affected area of the abandoned mining zone was ultimately delineated. The study area was classified into an unstable zone (139,384 m²), a basically stable zone (36,859 m²), and a stable zone (53,766 m²). Targeted engineering countermeasures such as grouting filling, pile foundation reinforcement, and long-term surface subsidence monitoring were proposed for each zone, providing a technical basis for project design and subsequent construction management.

Keywords

Closed Gold Mine, Mined-Out Area, Stability Evaluation

Copyright © 2026 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

某线路横穿南张家金矿区,该矿山 2020 年因城市国土空间规划调整、采矿许可到期依法政策性关停,矿山自上世纪 90 年代投产,历经 20 余年开采,形成多层重叠、空间交错的地下采空区与废弃运输巷道[1]-[6]。矿区历史 2008 年、2013 年雨季曾发生两次浅层采空塌陷事故,塌陷区后期仅简易土方回填,未开展深部空洞专项充填治理。若线路工程直接铺设于不稳定采空上方,在车辆往复动荷载叠加汛期降水入渗作用下,极易发生顶板垮塌、路基沉陷、路面断裂,造成重大交通安全隐患[7]-[9]。

胶东半岛招远、烟台、莱州等黄金集中开采区,浅部金矿多采用浅孔留矿法开采[10]-[12],早期废石充填密实度差,顶板多为遇水软化的千枚岩、碎裂绢英岩,浅层采空塌陷风险突出,现有研究多聚焦矿山井下开采安全,针对线路工程受金矿采空区影响定量评价案例相对匮乏。南张家金矿开采跨度大、8 个中段多层交错分布,深浅部充填工艺差异显著,浅层空洞无规范充填、深部尾砂充填无完整检测数据,叠加区域汛期集中降雨、长期车辆动荷载双重扰动,常规单一评价方法难以兼顾计算效率与分区精度。本次研究采用极限平衡分析法,结合多影响因子耦合研判,划定采空区影响范围。

2. 工程及矿区自然概况

2.1. 研究区概况

本次采空专项研究范围沿某线路走向,左右外延各 500 m,调查总面积 1.27 km²。

2.2. 矿区自然地理与地质概况

矿区地处烟台开发区古现街道低山丘陵区(见图 1),整体地势南高北低,地面海拔 77~155 m,沟谷发育,地表切割深度 10~30 m。区域暖温带季风气候,多年平均降水量 714.1 mm,降雨集中 7~9 月汛期,短时强降雨集中入渗是诱发围岩软化、采空活化重要外因。区内主干构造为近南北向张家断裂,矿体赋存于断裂蚀变带,顶板依次分布千枚岩、大理岩、花岗闪长岩,千枚岩遇水膨胀软化,是浅层采空顶板

薄弱地层。



Figure 1. Topography and geomorphology of the study area
图 1. 研究区地形地貌

2.3. 矿山开采发展历程

全矿共 8 个开采中段，I、II、III、IV 四条矿体，其中 II、III、IV 矿体浅部 2004 年前全部采空，仅 I 号矿体保留深部资源，全矿区采空区总体积 847982.74 m³。

矿山开采分为初创浅采、深部充填开采、闭坑封堵三个阶段，不同开采工艺直接决定采空成型形态与充填质量差异(见表 1)。

Table 1. Statistical table of staged mining and filling parameters in mines
表 1. 矿山分阶段开采及充填参数统计表

开采时段	采矿方法	开采中段	填充方式
1994~2004	浅孔留矿法	+55、+20、-15、-50、-85 m	掘进废石充填
2004~2020	分层尾砂充填	-120、-155、-190 m	尾砂充填(设计充填率 90%)
2020 年至今	停产闭坑	全 8 个中段	竖井混凝土封堵

2.4. 历史塌陷灾害简述

2008 年汛期连续降雨后，+55 m 中段上部地表形成 80 m² 塌陷坑；2013 年雨季再次发生 15 m² 次生塌陷，两次塌陷仅采用就近渣土简易回填，未钻探探明下部空洞、未注浆加固，回填体松散，遇雨水冲刷易再次掏空失稳。两处塌陷点位均落在拟建线路工程红线范围内。

3. 采空区发育情况

依托勘探线剖面、井下实测巷道数据，按照矿体边界划分为 I、II、III、IV 矿体采空 + 巷道采空五大区块(见表 2)，根据 1994 年勘探报告及 2015 年储量核实报告计算得知空区总体积约 847982.74 m³，各空区赋存标高、最大跨度、顶板埋深差别悬殊，部分空区顶板埋深不足 10 m，直接位于路基之下。

4. 采空稳定性定量评价

4.1. 评价计算原理

本次采用极限平衡分析法[13]-[16]。现取采空段(巷道)单位长度为计算单元，则作用在巷道顶板的压

力为:

Table 2. List of characteristics of mined areas
表 2. 采空区特征一览表

采空区编号	I	II	III	IV	井下巷道
平面(线)	9~27 线	15~27 线	21~25 线	25 线	8~28 线
标高(m)	+80~-198	+110~-70	+70~-25	+55~-15	+55~-190
顶底板岩性	绢英岩	绢英岩	绢英岩	绢英岩	绢英岩
倾向	90°	90°	90°	90°	-
倾角	40°~54°	43°	43°	43°	-
长度(m)	550	550	200	50	1000
斜深(m)	390※	260	100	150	390
最大厚度(m)	26	9.33	2.68	2.92	2.50
垂直投影面积(m ²)	78537.54	50,131	12,586	2900	-
体积估算(m ³)	597783.24	162858.63	25842.87	8120	53,378

$$Q = W - 2f$$
$$W = BH\gamma$$
$$f = P \tan \varphi = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$
$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

式中:

- Q ——巷道单位长度顶板上所受的压力, 单位为千牛每米(kN/m);
- W ——巷道单位长度顶板上所受的总重力, 单位为千牛每米(kN/m);
- P ——楔体 ABM 和 CDN 作用在 AB 和 CD 面上的主压应力的最大值, 单位为千牛每米(kN/m);
- f ——巷道单位长度侧壁的摩擦阻力, 单位为千牛每米(kN/m);
- H ——巷道顶板的埋藏深度, 单位为米(m);
- B ——巷道宽度, 单位为米(m);
- φ ——岩层的内摩擦角, 单位为度(°)。

当建筑物建在废弃矿井采空区上时(设建筑物基底单位压力为 P_0), 根据力平衡分析, 有:

$$Q = W + BP_0 - 2f$$

即:

$$Q = W + BP_0 - 2f$$
$$= \gamma H \left[B - H \tan \varphi \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] + BP_0$$

当 H 增大至某一深度, 使顶板岩层恰好保持自然平衡状态(即 $Q=0$), 此时的 H 称为临界深度 H_0 , 可得临界深度的计算公式:

$$H_0 = \frac{B\gamma + \sqrt{B^2\gamma^2 + 4B\gamma P_0 \tan \varphi \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}}{2\gamma \tan \varphi \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}$$

式中： B ——采空区平均宽度(m)；
 γ ——上覆岩层的加权平均重度(kN/m³)；
 P_0 ——建筑物基底单位压力；
 φ ——上覆岩层的加权平均内摩擦角(°)。

4.2. 参数选取

根据 2015 年开发利用方案，当矿体厚度小于 15 m 时，矿块沿矿体走向布置，长 50 m，宽为矿体水平厚度，高为中段高度。当矿体厚度大于 15 m 时，采场垂直走向布置，采场长为矿体厚度，高为中段高度 40 m，宽 8 m。

根据 1994 年勘查报告得知，I 矿体最大厚度 26 m，II 号矿体最大厚度 9.33 m，III 号矿体最大厚度 2.68 m，IV 号矿体最大厚度 2.92 m，井下巷道最大宽度为 2.5 m，均赋存在断裂蚀变带的绢英岩中，顶板岩性为绢英岩。

本次稳定性评估计算中，采空区宽度取值见表 3；采空区为自然状态下，地面无较高建筑物，故上覆压力 P_0 取零；根据岩石力学测试数据，得出顶板稳定性评估参数表(表 3)，采空区上覆岩层加权平均重度 γ 取经验值 26.46 KN/m³，采空区上覆岩层加权平均内摩擦角 φ 取经验值 45°。

受现场取样条件、试验样本数量有限、岩土体空间分布不均匀、局部裂隙发育程度存在差异，开展大批量室内试验与原位试验经费及周期受限，无法针对每一处微分区开展专项试验；结合本项目区域地质条件、同类工程勘察试验成果、规范推荐取值区间以及长期工程实践积累的经验综合选定参数，本次计算选用的相关参数参考工程行业普遍采用的经验取值确定。

Table 3. Stability parameters of top plate

表 3. 顶板稳定性参数表

采空区序号	采空宽度(m)	重度(KN/m ³)	内摩擦角(°)
I 号	26.00	26.46	45°
II 号	9.33	26.46	45°
III 号	2.68	26.46	45°
IV 号	2.92	26.46	45°
井下巷道	2.50	26.46	45°

将上述参数代入公式计算，结果见下表 4。

Table 4. Stability data of top plate

表 4. 顶板稳定性数据表

采空区序号	H_0 (m)	$1.5H_0$ (m)	H_f (m)	H_1 (m)	H_2 (m)
I 号	152.88	229.32	15	167.88	244.32
II 号	55.48	83.22	15	70.48	98.22

续表

III 号	15.94	23.91	15	30.94	38.91
IV 号	17.36	26.04	15	33.36	42.04
井下巷道	14.87	22.31	15	29.87	37.31

注： H_f 为风化层厚度，取经验值，单位为米(m)； H_1 为不稳定区最小深度， $H_1 = H_0 + H_f$ ，单位为米(m)； H_2 为稳定区最小深度， $H_2 = 1.5H_0 + H_f$ ，单位为米(m)。

4.3. 稳定性分区划定

按照 $H < H_0$ 时地基不稳定， $H_0 < H < 1.5H_0$ 时地基基本稳定， $H > 1.5H_0$ 时地基稳定的标准。I 号采空区顶板埋深 33.33 m~167.88 m(+55 m、+20 m、-15 m、-50 m、-85 m 中段)为不稳定区，167.88 m~244.32 m (-120 m 中段)为基本稳定区，大于 244.32 m (-155 m、-190 m 中段)为稳定区。II 号采空区顶板埋深 10.00 m~70.48 m(+55 m、+20 m 中段)为不稳定区，70.48 m~98.22 m (-15 m 中段)为基本稳定区，大于 98.22 m(-50 m 中段)为稳定区。III 号采空区顶板埋深 10.00 m~30.94 m(+55 m、+20 m 中段)为不稳定区，30.94 m~38.91 m (-15 m 中段)为基本稳定区，大于 38.91 m (-50 m 中段)为稳定区。IV 号采空区顶板埋深 13.5 m~33.36 m(+55 m、+20 m 中段)为不稳定区，33.36 m~42.04 m(+20 m 中段部分区域)为基本稳定区，大于 42.04 m(-15 m 中段)为稳定区。井下巷道顶板埋深 10~29.87 m 为不稳定区(+55 m 中段、+20 m 中段部分区域)，顶板埋深 29.87 m~37.31 m 为基本稳定区(+55 m、+20 m 中段部分区域)，顶板埋深大于 37.31 m 为稳定区(+55 m 中段部分区域、+20 m 中段部分区域、-15 m、-50 m、-85 m、-120 m、-155 m、-190 m 中段)。

综上，研究区划分为三类稳定区块(见图 2)。

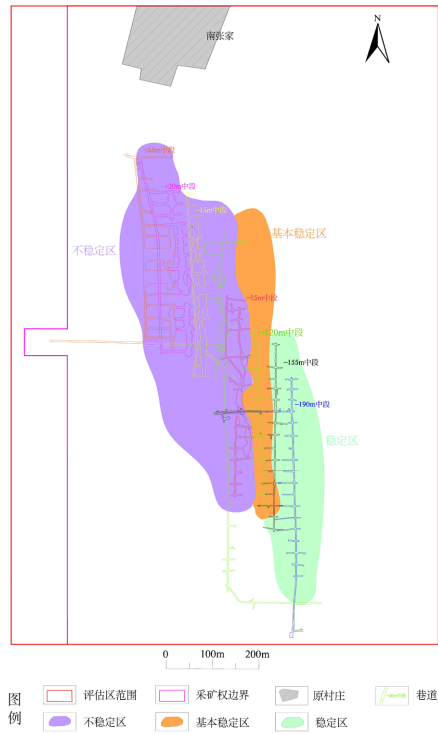


Figure 2. Stability zoning map of goaf
图 2. 采空区稳定性分区图

(1) 不稳定区：总面积 139,384 m²

各矿体+55 m、+20 m 全浅层中段，顶板实测埋深全部小于 H_1 临界值，大范围落在线路工程正投影下方。埋深浅、废石充填空洞多、千枚岩顶板遇水易软化，叠加长期车辆荷载，塌陷风险极高，为路基重点治理区段。

(2) 基本稳定区：总面积 36,859 m²

各矿体中部-15 m、-50 m 中段，埋深介于 H_1 ~ H_2 之间，局部顶板破碎、零星存在小型空洞，线路边坡、辅道零星穿越，极端暴雨 + 重载工况下局部小垮塌。

(3) 稳定区：总面积 53,766 m²

-85 m、-120 m、-155 m、-190 m 深部全部中段，顶板埋深大于 H_2 ，上覆岩层厚度大，围岩以完整花岗岩为主，采空深埋不受路面车辆荷载影响，无塌陷隐患。

5. 工程治理措施

按照不稳定、基本稳定、稳定分区，结合工程设计规范，差异化制定采空治理与路基优化方案。

(1) 不稳定区(主线正穿地段)

采用高密度电法 + 钻探组合勘探，加密钻孔探明空洞平面范围、竖向高度，精准划定注浆边界；采用水泥 + 选矿尾混合浆液压力注浆，全充填地下空洞，封堵连通地表的所有废弃盲井、风井[7]；空洞注浆固结达标后优先优化线位，无法避让段采用 CFG 桩复合地基或桩板结构路基；沿线路纵向 50 m 布设地表沉降观测桩，横向路基坡脚同步布点，雨季加密监测频次，建立常年观测台账[17]-[19]。

(2) 基本稳定区(线路边线、辅道区段)

全线地表定期巡检，重点排查地裂缝、局部洼地沉降；破碎顶板、小型空洞位置定点低压补浆加固[20]；辅道适当放缓路基填筑高度，减少上覆附加荷载。

(3) 稳定区(线路外围深部采空)

无需专项采空治理，每年开展 1 次井口封堵完整性巡查，发现井口开裂覆土塌陷及时修补。

6. 结语

(1) 根据矿体空间分布及地下井巷工程分布情况，划分了 I 号、II 号、III 号、IV 号、井下工程 5 个采空区，采空区走向 0°，倾向 90°，倾角 40°~54°，采空区总体积约 847982.74 m³。采空区顶板岩性为绢英岩，埋深最浅处不足 10 m，最大空区宽度为 26 m。

(2) 经临界埋深法定量计算结合多因素耦合分析，研究区划分为不稳定 139,384 m²、在降雨 + 行车荷载耦合作用塌陷风险突出，基本稳定 36,859 m²、稳定 53,766 m²。

(3) 分区域实施注浆充填、桩基补强、线位微调及长效沉降监测的综合处置方案，可以大幅降低采空塌陷隐患，改善岩体稳定条件，保障工程施工及长期运营安全。

(4) 本次研究简化了采空形态与车辆荷载条件，岩体参数依托试验和工程经验选取存在取值浮动，评价成果基于现阶段探明的采空形态、地层条件和道路设计工况得出，后续若发现隐伏采空区、地层条件或者荷载标准发生改变，本分区结论不再适用；提出的治理方案仅适用于本路段，不能直接套用至其他矿山采空治理项目；场区长期稳定性不能单纯依靠本次静态计算结果判定，后期仍需结合沉降监测数据持续开展稳定性评判。

参考文献

- [1] 曹建生, 徐春森, 申玉科. 山东蓬莱黑岚沟金矿区控矿构造研究与找矿预测[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),

- 2021, 44(4): 326-337.
- [2] 邹占春, 王峰, 张红, 等. 烟台张家金矿弧形断裂构造控矿特征及找矿方向研究[J]. 山东国土资源, 2021, 37(11): 9-14.
- [3] 赵冬冬, 黄吉友, 金刚. 胶东半岛金矿床控矿构造特点浅析[J]. 地质找矿论丛, 2008(2): 125-129.
- [4] 王晓民, 申玉科, 郭涛, 等. 蓬莱东南部金矿发育区控矿构造的几何学特征[C]//中国地球物理学会金属矿勘查专业委员会. 第三届全国矿产勘查大会论文集. 南昌, 2025: 486-487.
- [5] 孟繁聪, 孙岱生, 李胜荣, 等. 山东烟台南张家金矿黄铁矿的标型特征[J]. 现代地质, 2001, 15(2): 231-237.
- [6] 孟繁聪, 孙岱生, 李胜荣. 烟台南张家金矿毒砂的标型特征[J]. 有色金属矿产与勘查, 1999(2): 113-117.
- [7] 马凯, 杨天鸿, 张亚兵, 等. 大红山铁矿露天边坡隐伏采空区综合治理研究[J]. 矿业研究与开发, 2026, 46(4): 113-120.
- [8] 石磊, 张国斌, 刘海龙, 等. 煤矿采空区地质灾害评估与综合治理技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(23): 172-174.
- [9] 邱晓东, 许祉涵. 新建山东某铁路沿线采空区分布特征及稳定性评价[J]. 铁道技术标准(中英文), 2026, 8(4): 47-56.
- [10] 周进伟, 田忠华, 刘浪涛, 等. 胶东半岛牟平邓格庄金矿带构造控矿特征及成矿机理研究[J]. 地质科学, 2025, 60(5): 1407-1425.
- [11] 刘兰海, 熊玉新, 马祥县, 等. 胶莱盆地东北缘深部地质特征及找矿验证[J]. 地质论评, 2025, 71(S1): 124-126.
- [12] 杨真亮, 徐韶辉, 高书剑, 等. 胶东焦家超巨型金矿床三维空间特征及赋矿规律[J]. 地质通报, 2022, 41(6): 958-967.
- [13] 秦柯, 倪智伟, 骆明华. 基于有限差分与极限平衡法的矿区碎屑流堆积体稳定性分析[J]. 现代矿业, 2026, 42(5): 149-155.
- [14] 杨世龙. 神火矿区临界深度及地应力对巷道布置的影响[J]. 煤炭技术, 2021, 40(5): 31-34.
- [15] 尹欧, 杨贵花, 童军. 建设用地采空区地面沉降危险性评价方法探讨[J]. 地下水, 2024, 46(2): 174-176.
- [16] 宋韬, 魏现涛, 王康, 等. 济南某大型场馆地下采空区精细勘查及注浆治理研究[J]. 中国矿山工程, 2026, 55(2): 18-29.
- [17] 田剑. 采空区稳定性评价方法在实践中的应用[J]. 地下水, 2024, 46(3): 195-197+232.
- [18] 贾涛. 北方某高速公路路基下伏采空区稳定性评价及处治方案研究[J]. 北方交通, 2024(3): 38-42+47.
- [19] 董悬. 地下金属矿采空区治理与地压控制关键技术研究[J]. 世界有色金属, 2026(7): 112-114.
- [20] 曲强, 孙雅飞, 赵振华. 采空区稳定性评价方法与治理措施研究现状及展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(S1): 418-421.