大红山铁矿露天边坡隐伏采空区综合治理研究*

马凯[1],杨天鸿[2],张亚兵[2],付玉平[1],许友钦[2],高伟[3],段鑫[3]

(1.太原科技大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024;
2.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
3.玉溪大红山矿业有限公司, 云南 玉溪市 653100)

摘要:以大红山铁矿为工程案例,采用理论分析与数值计算相结合的方法,开展露天边坡隐伏采空区治理研究。依据采空区形态与露天境界的关系,提出了"境界内空区爆破+境界外空区充填"的治理方案。确定了采空区顶板安全厚度,揭示了采空区上部边坡的渐进破坏模式,得到了采空区充填治理范围与充填体抗压强度阈值,评价了采空区治理后的露天边坡稳定性。结果表明:露天境界内、外空区顶板安全厚度分别为20~30 m与20~25 m;含隐伏采空区的边坡先后经历了边坡后缘拉裂、采空区渐进破坏、边坡局部坍塌、边坡大范围失稳的破坏过程;第Ⅱ、Ⅲ层采空区充填治理范围为距离边帮30 m,且充填体抗压强度需达到20 MPa。境界外采空区充填治理后,边坡岩体的剪应变降低且向边坡内部转移,边坡安全系数可满足稳定性要求。

关键词:隐伏采空区;露天边坡;顶板安全厚度;边坡稳定性;采空区治理方案;数值模拟

中图分类号:TD325^{+}.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0113-08

Research on the Comprehensive Treatment of Hidden Goaf in the Open-Pit Slope of Dahongshan Iron Mine

MA Kai[1], *YANG Tianhong*[2], *ZHANG Yabing*[2], *FU Yuping*[1], *XU Youqin*[2], *GAO Wei*[3], *DUAN Xin*[3]

(1.College of Safety and Emergency Management Engineering,
Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
3.Yuxi Dahongshan Mining Co., Ltd., Yuxi, Yunnan 653100, China)

Abstract: Taking Dahongshan Iron Mine as the engineering case, the study on the treatment of hidden goafs in open-pit slopes was carried out by combining theoretical analysis with numerical calculation. According to the relationship between goaf morphology and open-pit boundary, a treatment scheme of "blasting of goafs inside the boundary and filling of goafs outside the boundary" was proposed. The safety thickness of the goaf roof was determined, the progressive failure mode of the slope above the goaf was revealed, the treatment scope of goaf filling and the compressive strength threshold of the filling body were obtained, and the stability of the open-pit slope after goaf treatment was evaluated. The results indicate that the safety thicknesses of the goaf roofs inside and outside the open-pit boundary are 20-30 m and 20-25 m, respectively. The slope containing hidden goafs has successively experienced the failure processes of tensile cracking at the slope rear edge, progressive failure of goafs, local slope collapse, and large-scale slope instability. The filling treatment range for Layer Ⅱ and Layer Ⅲ goafs is 30 m from the slope side, and the compressive strength of the filling body should reach 20 MPa. After the filling treatment of goafs outside the open-pit boundary, the shear strain of the slope rock mass is reduced and transferred to the interior of the slope, and the safety factor of the slope can meet the stability requirements.

Key words: Hidden goaf, Open-pit slope, Safety thickness of roof, Slope stability, Goaf treatment scheme, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2025-04-08

基金项目:太原科技大学科研启动基金资助项目(20242145);国家自然科学基金资助项目(52504097);山西省自然科学基金面上项目(202403021221136);山西省科技成果转化引导专项项目(202304021301046)

作者简介:马凯(1993—),男,山西晋城人,博士,讲师,主要从事岩石力学与矿山开采安全方面的研究。E-mail:1208988922@qq.com

通信作者:杨天鸿(1968—),男,辽宁抚顺人,教授,博士生导师,主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail:yang_tianhong@126.com

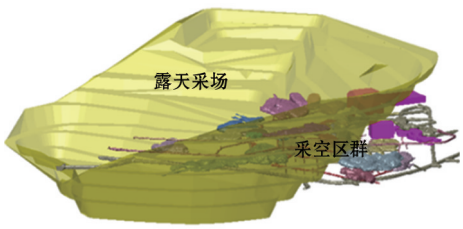
0 引言

近年来,我国矿山采空区安全事故频出,其中露天隐伏采空区是威胁边坡安全稳定性的重大隐患[1-2]。采空区不处理或处理不当会造成严重的安全事故,主要表现为采空区坍塌与露天矿边坡失稳滑坡[3]。由于采空区空间分布、形状、尺寸等数据往往不易获得,极大地增加了采空区稳定性评价及安全隐患治理的难度[4]。目前,许多学者在采空区精准探测、采空区稳定性分析、采空区监测、采空区处理等方面进行了大量的探索和研究。章林等[5]、杨镜明等[6]、李文[7]采用高密度电阻率法、瞬变电磁法、CMS空区探测系统等多种地球物理探测方法对矿山采空区进行探测与治理可行性评价,并在采空区治理工程中取得了良好的应用效果。杜坤等[8]、黄英华等[9]、康钦容等[10]采用物元分析、模糊评价方法、层次分析法、数值模拟等相结合的综合评价方法,对复杂采空区危险性进行评价,并验证了综合评价方法的可行性。胡建军等[11]、高磊等[12]采用有限差分软件(FLAC3D)数值方法,分析了地下采空区对地表边坡稳定性的影响。彭欣[13]、张敏思等[14]采用K.B.鲁别涅依他公式法、厚跨比法、结构力学梁等理论方法,并结合RFPA等数值算法,分析了采空区上方顶板厚度和临界跨度之间的关系,对采空区稳定性进行了综合评价。邓骐宁等[15]、苏毅苹等[16]、解联库等[17]针对复杂的采空区赋存形态,采用类比法、力学理论计算、数值模拟等多种方法,分析了地下采空区对露天边坡稳定性的影响,提出了采空区治理方案,为露天边坡下隐伏采空区治理提供了有益借鉴。

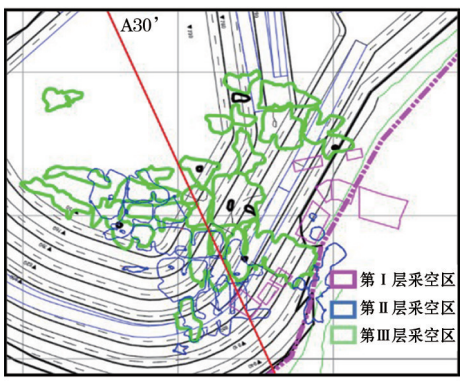
尽管目前在采空区探测、评价与治理方面取得了诸多成果,但在露天边坡隐伏采空区稳定性分析与治理方面仍缺乏典型案例。因此,本文以大红山铁矿露天边坡隐伏采空区综合治理为工程背景,针对露天境界内、外采空区分别采用“简支梁理论”和“冒落拱理论”进行采空区稳定性分析。通过确定采空区顶板安全厚度,进而提出“境界内空区爆破,境界外空区充填”的分区综合治理思路。借助数值模拟计算方法,进一步分析采空区对露天边坡稳定性的影响,确定合适的充填范围和充填体抗压强度,并对充填治理后的边坡稳定性进行评价,检验充填治理效果及可靠性,旨在为类似矿山采空区治理提供重要参考。

1 工程背景

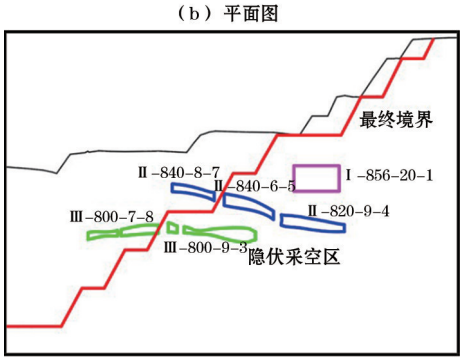
大红山铁矿位于云南省玉溪市,不同时期先后采用空场法与露天开采方法开采浅部矿脉,已有十余年的开采历史。浅部矿脉矿体埋深0～188 m,出露标高792～1 012 m,矿体呈层状产出,产状平缓,走向近东西,倾向南。围岩主要为大理岩、辉长辉绿岩与变钠质熔岩,属于坚硬岩石,稳固性较好。现阶段,露天采场采用“陡帮组合台阶采剥工艺”进行废石剥离,采用“缓帮横向采矿工艺”进行矿石开采,设计露天矿的最终边坡角为46°,开挖台阶坡面角为65°,台阶高度为15 m,开采过程中两两台阶并段,预留15 m安全平台。然而,随着露天开采不断降深与到界,早期浅部矿脉空场法开采形成的复杂采空区群已成为威胁露天安全开采与边坡稳定性的主要隐患,如图1所示。



(a) 立体图



(b) 平面图



(c) 剖面图

图1 大红山铁矿露天边坡隐伏采空区分布

Fig.1 The distribution of hidden goaf in the open-pit slope of Dahongshan Iron Mine

借助三维激光扫描技术,并结合现场勘察与历史开采资料,已探明大红山铁矿露天采场下部存在空间形态极为复杂的采空区群。依据采空区埋深进行统计分析,发现影响露天安全开采与边坡稳定的采空区主要分为3层,由浅至深大致分布的标高为850 m(第Ⅰ层)、840～820 m(第Ⅱ层)、800 m(第Ⅲ层),空区总体积约为52万 m^3。采空区东西方向累计跨度达200～400 m,南北方向350 m,高度4～20 m不等,形态各异,且露天境界内、外均有分布。按照"层号-标高-采空区高度-序号"对各个采空区进行统计编号,例如:Ⅲ-800-9-3表示第Ⅲ层的3号采空区,标高为800 m,采空区高度为9 m。探测结果显示,采空区内基本无积水,稳定性良好,未发生冒落,矿柱保存完整。

2 采空区治理稳定性理论分析

采空区治理既要把握时机,也要方法可靠。治理不当不仅会影响露天矿正常作业,导致采空区治理失效,甚至会造成设备损失和人员伤亡。因此,需要对采空区治理稳定性进行分析与评价。依据隐伏采空区与露天边坡最终境界的内、外位置关系,分别采用"冒落拱理论"和"简支梁理论"确定采空区的顶板安全厚度,对采空区稳定性进行理论分析与评价。

2.1 露天境界内采空区顶板安全厚度

露天境界内的采空区可视为由两侧矿柱与顶板简易封闭,基于材料力学理论,可将采空区暴露的顶板,以及两侧起支撑作用的矿柱在二维某一方向上简化为一个简支梁力学模型[18],如图2(a)所示。通过计算岩梁任意截面的弯矩与拉应力,进而由岩梁的强度指标评价岩梁是否会发生垮塌破坏。

通过对简支梁力学模型求解,得到露天境界内采空区的顶板安全厚度为:

$$h=\frac{3\gamma l^2}{4\sigma_t} \tag{1}$$

式中:h 为顶板预留厚度;γ 为岩体平均容重;l 为简支梁的跨度;σ_t 为岩体平均单轴抗拉强度。

依据大红山铁矿测试报告,σ_t 取0.35 MPa,γ 取27.5 kN/m^3。事实上,采空区暴露顶板岩体应简化为"平板",经计算,大部分顶板长宽比 $a/b<2$(双向板),少部分 $2<a/b<3$(应按双向板计算),个别 $a/b>3$(单向板)。无论单、双向板,短边均为主要承载边,简支梁模型理应以短边计算,即 $l=\min(a,b)$。通过理论计算得到:露天境界内第Ⅱ层采空区顶板平均最小安全厚度为20 m,个别采空区超过30 m;第Ⅲ层采空区顶板平均最小安全厚度13 m,个别采空区超过20 m。

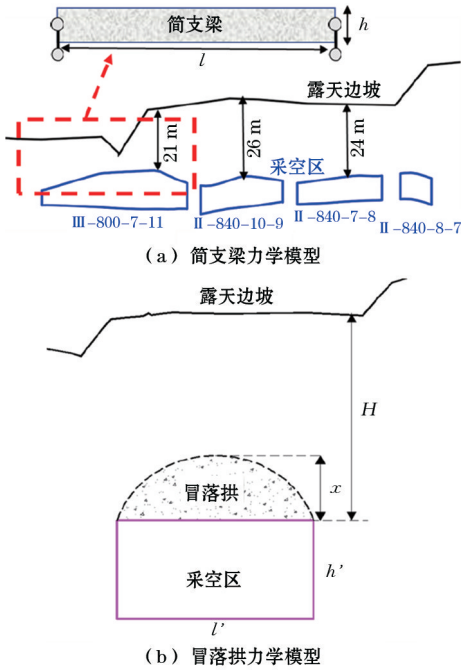


图2 采空区顶板安全厚度理论模型

Fig.2 Theoretical model of roof safety thickness of goaf

2.2 露天境界外采空区顶板安全厚度

对于露天境界外的采空区,可采用"冒落拱理论"计算顶板破坏高度与安全厚度[19],如图2(b)所示。该理论认为地下矿岩开挖后,采空区周围应力重新分布,顶板岩体弯曲下沉,出现拉应力。当拉应力超过岩体抗拉强度时,顶板便发生失稳冒落,最终冒落线近似于拱形。研究表明,岩体冒落过程、形态与采空区的跨度、埋藏深度、侧压力等因素有关。

如图2(b)所示,根据冒落拱理论,境界外采空区顶板的破坏高度,即顶板安全厚度,满足以下关系式:

$$\frac{l'}{2}=\sqrt{\lambda(h'+x)^2+\frac{2\lambda(h'+x)^3}{3(H-x)}} \tag{2}$$

式中:λ 为侧压力系数(根据大红山铁矿地应力测试结果,取 $\lambda=0.56$);l' 为采空区跨度;h' 为采空区高度;H 为采空区距地表或露天边坡的竖直距离;x 为采空区顶板最大破坏高度。

将各参数代入式(2),即可求得露天境界外第Ⅱ层采空区顶板安全厚度约为20 m,第Ⅲ层采空区顶板安全厚度约为25 m。

2.3 露天隐伏采空区分类治理方法

依据大红山铁矿露天采场的采空区分布探测结果,按位置大致可将采空区总体分为露天境界内、外两部分。充分考虑露天边坡开采工艺、最终境界设

计、边坡稳定性,提出“境界内空区爆破+境界外空区充填”的采空区分类综合治理思路,如图 3 所示。对于境界内的采空区,由于边坡在后续露天开采至境界过程中将被逐步揭露,因此,可依据空区形态分布与开采进度计划,通过设计合理的爆破方案,实现露天开采与境界内空区处理有序协同作业。然而,针对境界外的采空区,为保障露天开采至境界服务期内的边坡稳定性,则必须对采空区进行充填治理。以下采用数值计算方法,确定境界外采空区充填治理范围与充填体抗压强度参数,并评价充填治理后的边坡稳定性。

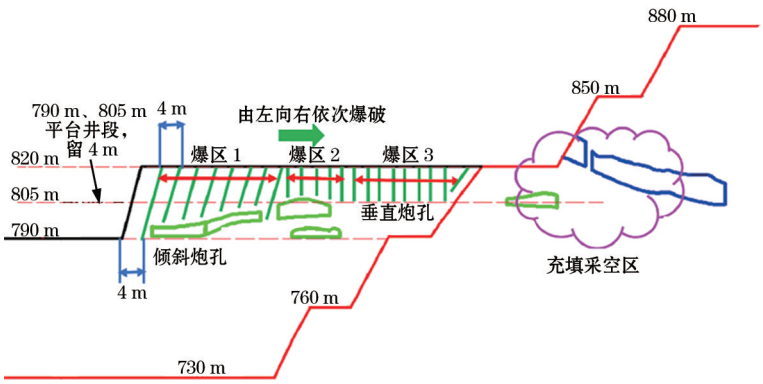


图 3 露天边坡隐伏采空区综合治理方案

Fig.3 Comprehensive treatment scheme for hidden goaf in the open-pit slope

3 采空区充填治理数值模拟计算

3.1 采空区稳定性与充填治理分析

3.1.1 结构面识别与岩体力学参数

边坡岩体质量评价是理论分析与数值模拟计算的基础,是边坡稳定性评价与制定充填方案的前提。通过收集矿山历史资料,得到了大红山铁矿主要岩性的岩石力学参数、*RQD* 值、地下水情况、节理条件等信息。同时,基于边坡无人机倾斜摄影测量获得的高密度点云数据,借助自主开发的结构面自动识别提取技术,对边坡结构面进行自动识别与提取。根据收集与获取的信息,采用 RMR 分级方法对岩体质量进行打分,确定岩体的 *RMR* 值,见表 1。

边坡岩体质量评价结果表明:边坡岩体质量等级为 2～3 级,黏聚力为 600～800 kPa,内摩擦角为 35°～38°。竖向结构面发育,整体为块状岩体。基于 Hoek-Brown 准则,得到边坡岩体力学参数,见表 2。此外,参考大红山铁矿历史研究报告,表 2 中列出了地下主要岩体(大理岩、白云质钠长岩)的力学参数。

表 1 边坡岩体质量 RMR 分级与结构面参数

Table 1 RMR quality classification and structural surface parameters of slope rock mass

台阶标高/m	岩性	抗压强度/MPa	节理组数	节理体密度/(条/m³)	岩体结构级度	*RQD*	地下水与节理条件	优势结构面产状/(°)	*RMR*
1 060～1 090	辉长辉绿岩	85.34	2	2.1	79.5	62.4～94.2	干燥无水;结构面稍粗糙,轻微风化	(276.6,50.9) (156.5,75.6)	66
970～1 000	角闪片岩	86.01	4	4.1	70.3			(135.9,53.9) (158.2,32.5)	61
940～970	变钠质熔岩	76.15	2	1.6	51.7			(282.2,58.5) (341.5,51.8)	58
850～880	磁铁贫矿	93.97	3	13.6	42.7			(283.3,70.6) (11.9,87.8)	74

表 2 大红山铁矿边坡岩体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of slope rock mass in Dahongshan Iron Mine

岩性	RMR 等级	密度/(g/cm³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa
变钠质熔岩	Ⅲ	2.86	19.51	0.30	0.63	36.8	7.03	0.34
角闪片岩	Ⅱ	3.12	17.94	0.28	0.79	36.4	6.53	0.39
磁铁贫矿	Ⅱ	3.31	22.67	0.27	0.80	37.2	7.13	0.28
辉长辉绿岩	Ⅱ	2.80	16.42	0.31	0.64	35.6	5.49	0.36
大理岩	Ⅲ	2.81	18.82	0.31	1.58	36.6	39.10	1.38
白云质钠长岩	Ⅲ	3.11	17.94	0.28	1.55	35.4	30.20	0.89

3.1.2 采空区稳定性与充填参数计算

3DEC是一款基于离散单元理论的数值模拟分析软件,是研究非连续岩体稳定性的有效工具。对于露天边帮外需要充填的采空区,借助该软件构建大红山铁矿露天边坡3DEC数值模型,开展离散元数值模拟计算,揭示下赋存有采空区的边坡的破坏模式,进而确定采空区充填范围与充填体抗压强度参数。依据矿山典型剖面地质资料,建立大红山铁矿露天边坡数值计算模型,如图4所示。

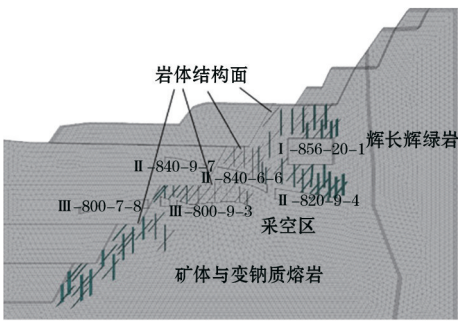
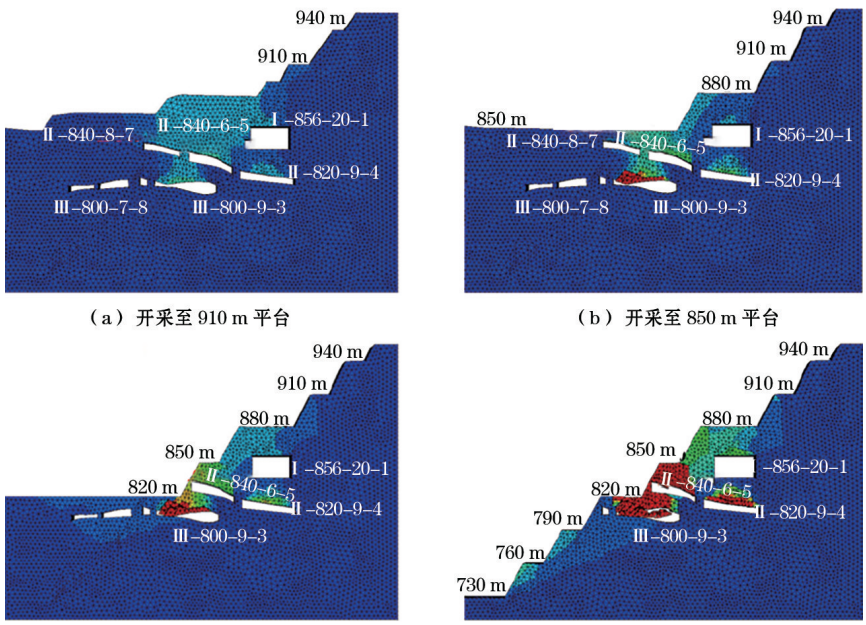


图4 大红山铁矿露天边坡A30′剖面数值计算模型

Fig.4 The numerical calculation model of the A30′ profile of the open-pit slope in Dahongshan Iron Mine

数值模型尺寸为349 m×244 m×10 m,采用表2中的岩体力学参数,角闪片岩在边坡中分布较少,建模中予以忽略。针对模型施加位移边界,在模型底部施加固定约束,限制位移;模型左右边界施加X向约束,限制岩体水平位移;对模型整体施加Y向约束,模拟围岩约束;边坡坡面可在重力及其他外力作用下自由移动。整个露天边坡结构面产状特征差异性较小。因此,为便于计算,基于结构面自动识别技术获取的现场结构面数据,在A30′剖面上,将结构面简化为两组,包括一组竖直结构面及一组倾角为50°的结构面。结构面平均间距设置为5.0 m,平均长度为20 m,分布于边坡设计境界以下50 m以及隐伏采空区上部等岩体易破坏失稳区域。

图5展示了露天边坡A30′剖面在开采扰动下的渐进破坏模式。由图5可以看出,露天边坡先后经历了边坡后缘拉裂、采空区渐进破坏、边坡局部坍塌、边坡大范围失稳的过程。



(a) 开采至910 m平台 (b) 开采至850 m平台

(c) 开采至820 m平台 (d) 开采至730 m平台

图5 A30′剖面开采扰动下的边坡渐进破坏模式

Fig.5 The progressive failure mode of the A30′ profile under mining disturbance

在图5(a)中,露天开采至910 m平台时,由于边坡岩体自身的下滑牵引作用,以及隐伏采空区的不利影响,边坡后缘呈现出局部的拉裂破坏现象。这些破坏仅局限于特定区域,并不会导致边坡整体失稳。由图5(b)、图5(c)可知,当边坡开采进行到820 m平台时,下伏采空区(Ⅲ-800-9-3)顶板逐渐发生弯曲破坏,随承载能力的逐步减弱,最终发生采空区垮塌,表明820 m平台在露天后续开采中无法保持稳定状态。同时,随着该平台岩体承载力失效,上部岩体直至850 m平台由于失去支撑,在重力

作用下易发生拉伸与剪切混合类型破坏,叠加采空区(Ⅱ-840-6-5)的不利影响,最终破坏区域逐步延伸至整个 850 m 平台。破坏重点区域位于采空区上部,未向边坡内部进一步发展。图 5(d)展现了露天矿持续向深部开采到界时的边坡稳定性状态,可见相对于已形成的岩体破坏区域,后续开采未增加明显的额外破坏范围,表明边坡岩体破坏仅局限于 850 m 和 820 m 平台,主要是受到了下伏第Ⅱ、Ⅲ层隐伏采空区的影响,对于不受采空区影响的其他范围边坡岩体,未观察到明显的破坏与失稳现象。

数值模拟分析结果表明,由于下伏采空区的存在,$A30'$剖面的破坏区域主要集中在 850 m 与 820 m 平台。由此可断定,这两个平台下的采空区(Ⅱ-840-6-5、Ⅲ-800-9-3)对于边坡岩体的整体稳定具有重要影响,是充填治理的重点地段。其中,Ⅲ-800-9-3采空区顶板岩体对于边坡局部稳定性具有重要的支撑作用,该区域发生破坏除了直接诱发 820 m 平台整体失稳外,还会间接导致边坡上部岩体失去支撑而失稳,引发 850 m 平台的大规模破坏。此外,数值模拟结果还表明,岩体破坏主要发生在坡体内部,远离坡面的采空区(Ⅰ-856-20-1、Ⅱ-820-9-4)对于边坡岩体的变形破坏无明显影响,对此类采空区封闭后,无需充填治理。因此,需要对第Ⅱ、Ⅲ层采空区进行充填。

通过对距离边坡境界不同充填范围(距离边坡表面水平距离分别为 20 m、30 m、40 m),以及可保障边坡稳定的充填体抗压强度进行正交试算,正交试算结果见表 3。由表 3 可以看出,对距离边帮 30 m 范围内的第Ⅱ、Ⅲ层采空区进行充填较为适宜。当距边帮的距离小于 30 m 时,充填体抗压强度由 10 MPa 增大至 30 MPa,均无法保障边坡稳定性,且现有较为经济的充填材料无法达到更高的充填体抗压强度要求。当距边帮的距离大于 30 m 时,充填体积将进一步增大,则会大幅增加采空区充填治理成本,且增加充填施工难度。图 6 展示了对第Ⅱ、Ⅲ层采空区距离边帮 30 m 的范围进行充填,且充填体抗压强度达到 20 MPa 条件下的边坡稳定性状态。由图 6 可知,仅在 820～880 m 平台坡脚处出现零星破坏区域,采空区顶板未发生明显的垮塌现象,边坡整体处于稳定状态。

表 3 隐伏采空区充填正交试算结果

Table 3 Orthogonal calculation results for filling of hidden goaf

序号	距边帮的距离/m	充填体抗压强度/MPa	边坡与采空区状态
1	20	15	不稳定,边坡坍塌
2	20	20	欠稳定,边坡开裂
3	20	30	欠稳定,采空区坍塌
4	30	15	边坡稳定,采空区坍塌
5	30	20	边坡与采空区稳定
6	30	30	边坡与采空区稳定
7	40	15	边坡与采空区稳定
8	40	20	边坡与采空区稳定
9	40	30	边坡与采空区稳定

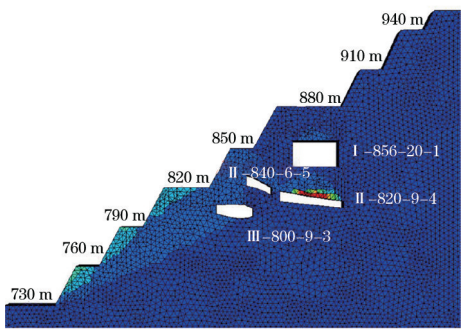


图 6 采空区充填治理后边坡开采至露天境界的稳定性状态($A30'$剖面)

Fig.6 Stability state of the slope when mining reaches the open-pit boundary after filling treatment of goaf ($A30'$ profile)

3.2 采空区充填治理后的稳定性评价

为校验露天隐伏采空区充填范围和充填体抗压强度可靠性,进一步评价边坡稳定性,同样选取$A30'$剖面,采用弹塑性有限元分析软件计算采空区充填治理前、后的露天边坡安全系数。本次计算共设置以下 2 个计算工况,数值模拟计算采用的岩体力学参数见表 2。

(1) 工况 1:对 3 层采空区均不做充填处理,此条件下的边坡稳定性模拟计算结果,如图 7(a)所示。

(2) 工况 2:对距离边坡表面水平距离 30 m 范围内的第Ⅱ、Ⅲ层采空区进行充填治理,采用打孔下放套管,混凝土注浆充填工艺,充填体抗压强度达到 20 MPa。此条件下的边坡稳定性模拟计算如图 7(b)所示。

露天隐伏采空区充填治理边坡稳定性计算结果如图 7 所示。如果不对采空区进行充填治理,边坡安全系数为 1.105(工况 1)。若采用 C20 混凝土对

第Ⅱ、Ⅲ层距离边坡 30 m 范围内的采空区进行充填治理，开采到界时的整体边坡安全系数可达到 1.2 以上，为 1.285(工况 2)。同时，第Ⅱ层采空区坡脚处剪应变降低，并且剪应变集中向边坡内部转移，可保障露天台阶爆破开采有序靠帮的安全性。因此，采用拟定的充填范围(距坡面水平距离 30 m 范围内)与充填体抗压强度(20 MPa)对采空区进行充填治理，可保障边坡处于稳定状态。

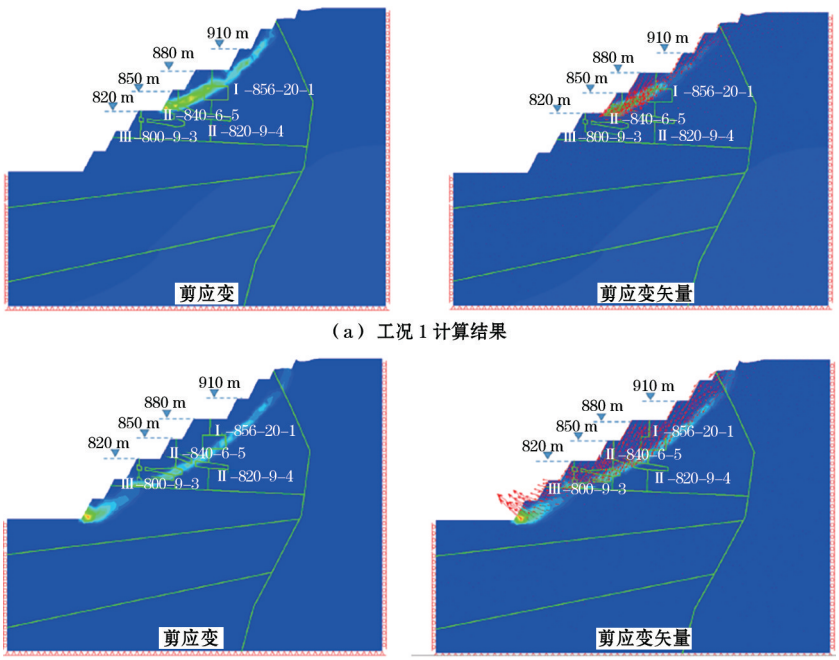


图 7　隐伏采空区充填治理前后的边坡稳定性计算结果

Fig.7　The calculation results of slope stability before and after filling treatment of hidden goaf

4　结论

(1) 以大红山铁矿露天边坡隐伏采空区治理为背景，提出了“境界内空区爆破＋境界外空区充填”的治理思路。通过“简支梁理论”和“冒落拱理论”分别对露天境界内、外采空区进行了稳定性分析，确定了境界内采空区顶板安全厚度为 20～30 m，境界外采空区顶板安全厚度为 20～25 m。

(2) 数值模拟分析结果表明，含隐伏采空区的露天边坡先后经历了边坡后缘拉裂、采空区渐进破坏、边坡局部坍塌、边坡大范围失稳的破坏过程。第Ⅰ层采空区对于边坡稳定性影响较小，封闭后无需充填治理。受第Ⅱ、Ⅲ层采空区影响，坡脚处应力集中明显，且采空区易发生垮塌，为保证边坡整体稳定，需对第Ⅱ、Ⅲ层采空区进行充填治理。

(3) 通过数值模拟试算，优化制定采空区注浆混凝土充填治理方案为：对距离边坡表面水平距离 30 m 范围内的第Ⅱ、Ⅲ层采空区进行注浆充填，充填体抗压强度需达到 20 MPa。经验证，充填治理后，边坡安全系数显著提高，达到 1.285，剪应变降低且向边坡内部转移，边坡整体处于稳定状态。

参考文献(References)：

[1] 李杭洲，王飞，刘红威，等.空气幕对采空区漏风和上隅角瓦斯积聚影响研究[J].矿业研究与开发，2024，44(10)：167-173.
LI Hangzhou，WANG Fei，LIU Hongwei，et al. Study on the effect of air curtain on air leakage in goaf and gas accumulation in upper corner[J]. Mining Research and Development，2024，44(10)：167-173.

[2] 马凯，杨天鸿，赵永，等.上行重复采动底板采空区突水及开采稳定性理论分析[J].煤炭学报，2023，48(增刊 1)：37-46.
MA Kai，YANG Tianhong，ZHAO Yong，et al. Theoretical analysis of water inrush from goaf in floor and mining stability for upward repeated mining[J]. Journal of China Coal Society，2023，48(Suppl.1)：37-46.

[3] 罗英嘉，陈晓青.某露天铁矿地下采空区废石充填胶结加固研究[J].矿业研究与开发，2022，42(3)：28-33.
LUO Yingjia，CHEN Xiaoqing. Study on waste rock cemented filling for the underground goafs in an iron mine[J]. Mining Research and Development，2022，42(3)：28-33.

[4] 薛涛，李夕兵，周士霖，等.露天矿开采境界内下部复杂隐伏采空区上部稳定性研究[J].矿业研究与开发，2012，32(2)：29-31.

XUE Tao, LI Xibing, ZHOU Shilin, et al. Stability study of complex hidden goaf within open-pit mining boundary[J]. Mining Research and Development,2012,32(2):29-31.

[5] 章林,孙国权,李同鹏,等.地下矿山采空区探测及综合治理研究与应用[J].金属矿山,2013(11):1-4+38.
ZHANG Lin, SUN Gouquan, LI Tongpeng, et al. Research of detection and comprehensive treatment of underground mine goaf and its application [J]. Metal Mine, 2013(11):1-4+38.

[6] 杨镜明,魏周政,高晓伟.高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘查及注浆检测中的应用[J].地球物理学进展,2014,29(1):362-369.
YANG Jingming, WEI Zhouzheng, GAO Xiaowei. The application of the methods of high density resistivity method and transient electromagnetic to detecting coal mining goaf and to inspect grouting effect[J]. Progress in Geophysics, 2014,29(1):362-369.

[7] 李文.煤矿采空区地面综合物探方法优化研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):194-199.
LI Wen. Optimization study of surface comprehensive geophysical detection methods of coal mine goafs[J]. Coal Science and Technology,2017,45(1):194-199.

[8] 杜坤,李夕兵,刘科伟,等.采空区危险性评价的综合方法及工程应用[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(9):2802-2811.
DU Kun, LI Xibing, LIU Kewei, et al. Comprehensive evaluation of underground goaf risk and engineering application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2011,42(9):2802-2811.

[9] 黄英华,闻磊,黄敏,等.金属矿山复杂采空区稳定性模糊评价体系研究[J].矿业研究与开发,2019,39(12):63-67.
HUANG Yinghua, WEN Lei, HUANG Min, et al. Study on fuzzy evaluation system of the complex goaf stability in metal mine[J]. Mining Research and Development,2019,39(12):63-67.

[10] 康钦容,张卫中,倪小山,等.采空区稳定性评价的综合指数法[J].金属矿山,2017(3):162-166.
KANG Qinrong, ZHANG Weizhong, NI Xiaoshan, et al. Comprehensive index method in goaf stability evaluation[J]. Metal Mine,2017(3):162-166.

[11] 胡建军,黄玉柱,吴鹏,等.复杂空区群影响下矿山边坡稳定性数值模拟[J].金属矿山,2013(11):25-28.
HU Jianjun, HUANG Yuzhu, WU Peng, et al. Study on the influence of complex mined-out area group on stability of mine slope with numerical simulation[J]. Metal Mine,2013(11):25-28.

[12] 高磊,施斌,朱友群,等.多层采空区条件下的高速公路路堑边坡稳定性数值分析[J].防灾减灾工程学报,2009,29(4):387-391.
GAO Lei, SHI Bin, ZHU Youqun, et al. Numerical simulation on the stability of the highway cut slope with goafs[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2009,29(4):387-391.

[13] 彭欣.复杂采空区稳定性及近区开采安全性研究[D].长沙:中南大学,2008.
PENG Xin. Study on stability of complex cavity and safety in near-cavity excavation [D]. Changsha: Central South University,2008.

[14] 张敏思,朱万成,侯召松,等.空区顶板安全厚度和临界跨度确定的数值模拟[J].采矿与安全工程学报,2012,29(4):543-548.
ZHANG Minsi, ZHU Wancheng, HOU Zhaosong, et al. Numerical simulation for determining the safe roof thickness and gritical goaf span[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2012,29(4):543-548.

[15] 邓骐宁,唐绍辉,潘懿,等.露天开采不同形态采空区处理技术研究[J].矿业研究与开发,2016,36(2):28-31.
DENG Qining, TANG Shaohui, PAN Yi, et al. Technical research on treatment of goaf with different shapes in open-pit mining[J]. Mining Research and Development,2016,36(2):28-31.

[16] 苏毅苹,宋卫东,张朝雷.高陡边坡下大型采空区充填及残矿回收技术研究[J].金属矿山,2011(5):53-56.
SU Yiping, SONG Weidong, ZHANG Chaolei. Research on the filling of large mined-out area and the recovery of residual ores in high and steep slope[J]. Metal Mine,2011(5):53-56.

[17] 解联库,熊代余,杨天鸿,等.露天采场边坡下隐伏空区灾害影响分析及其治理[J].中国有色金属学报,2020,30(10):2503-2512.
XIE Lianku, XIONG Daiyu, YANG Tianhong, et al. Hidden void area under the slope of the open-pit mine disaster impact analysis and management[J]. The Chinses Journal of Nonferrous Metals,2020,30(10):2503-2512.

[18] 吴浩.三山岛金矿海下开采合理开采上限的确定[D].长沙:中南大学,2014.
WU Hao. Design on the reasonable upper mining limit undersea of Sanshandao Gold Mine[D]. Changsha: Central South University,2014.

[19] 何荣兴,任凤玉,宋德林,等.和睦山铁矿倾斜厚矿体诱导冒落规律研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(5):899-904.
HE Rongxing, REN Fengyun, SONG Delin, et al. Induced caving rule of inclined thick ore body in Hemushan iron mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2017,34(5):899-904.