

逆断层控制下的岩质滑坡形成机制研究

曾强 张鹏

四川省第一地质大队

DOI:10.12238/gmsm.v8i3.2179

[摘要] 逆断层在断层活动中,往往在下盘形成牵引向斜,上盘形成牵引背斜的独特构造。本文以内蒙古某露天煤矿西边帮岩质滑坡为例,结合现场调查和倾斜摄影技术,查明了西边帮受控于棋盘井逆断层形成的独特坡体结构,以及滑坡变形破坏特征,详细研究了其变形过程演化机制。独特的坡体结构是其发生滑坡的内在控制因素,削帮工程为牵引向斜西翼陡立-倒转岩层发生倾倒变形、上部灰岩下错失稳提供了良好的临空条件,是边帮发生滑坡的主要外在诱发因素。滑坡形成经历了削帮开挖岩体卸荷-断层下盘岩层弯曲倾倒变形及断层破碎带沉陷变形-潜在滑面贯通-断层上盘灰岩“下错体”整体下错-滑坡整体蠕滑转移破坏等五个阶段。实践表明,在未查明滑坡成因机制的情况下,盲目采用削坡减载的简单方式难以有效治理,反而可能引发后部层状或似板状岩体得累积倾倒变形破坏,扩大斜坡失稳规模。研究成果提供了一种逆断层控制下的边帮可能失稳模式,为相似矿山开采和终了边帮设计提供了参考。

[关键词] 牵引向斜; 岩质滑坡; 倾倒变形; 形成机制

中图分类号: TV139.2+32 文献标识码: A

Study on the formation mechanism of rock slope under reverse fault control

Qiang Zeng Peng Zhang

The First Geological Brigade of Sichuan

[Abstract] In fault activities, reverse faults typically form unique structural configurations where the lower fault zone develops a thrust syncline while the upper zone forms a thrust anticline. Using a rockslide case study at the western bench of an open-pit coal mine in Inner Mongolia as a case study, this paper combines field investigations with tilt photography technology to identify the unique slope structure of the western bench controlled by the Qipanjing Reverse Fault. The study reveals the deformation characteristics and evolutionary mechanisms of the slope. The distinctive slope structure serves as the intrinsic control factor for the landslide, while bench-cutting engineering provides favorable conditions for vertical deformation of steeply dipping and inverted rock layers on the western flank of the thrust syncline, along with upper limestone strata experiencing downward displacement. The landslide formation process involves five stages: rock mass unloading during bench-cutting excavation, bending and tilting deformation of lower fault zone rock layers, subsidence deformation in fault fracture zones, potential slip surface penetration, overall downward displacement of the upper limestone "downward displacement mass," and comprehensive creep sliding failure. Field evidence demonstrates that blindly adopting simple bench-cutting load reduction methods without identifying landslide mechanisms proves ineffective, potentially triggering progressive tilting deformation in subsequent layered or plate-like rock masses and exacerbating slope instability. This research provides a theoretical framework for analyzing bench instability under reverse fault control, offering valuable references for similar mining operations and final bench design.

[Key words] traction dip; rockslide; tilting deformation; formation mechanism

引言

国内露天矿山开采设计存在较为普遍的轻视岩土勘察的现

象,这一问题直接威胁矿山安全与生态治理效果。矿山的开采活动对矿区地质环境影响是不可逆的,不合理的开采设计则导

致开采效益降低,重则引发安全事故,导致大量人员伤亡^[1-2]。逆断层上盘岩层在向上推覆过程中,下盘岩层受拖拽会逐渐形成牵引向斜,并逐渐伴随岩层倒转^[3],地质环境复杂。露天矿山削帮过程中倾侧变形破坏问题较为突出,严重时发展至倾侧-滑移变形,引发大型滑坡灾害^[4-6]。

2022年11月内蒙古某露天煤矿西边帮削帮过程中,边坡发育大量横向张裂缝及竖向剪切裂缝,于2023年2月发生整体下错,并有持续变形发展迹象,直接威胁矿区安全生产。矿方曾紧急对变形范围上部坡体进行削坡减载,但变形依然持续,变形规模甚至有扩大趋势,变形过程复杂,滑坡治理措施难以有效对症。整个边坡现状已形成多级马道,基岩裸露,有利于对边坡坡体结构的直观观测和模型构建,结合现场调查和间隔3个月的两次三维倾斜摄影测量,基本查明了滑坡的变形特征和形成演化过程,揭示了滑坡的形成机制,研究成果对此类露天矿山边坡变形机理研究具有借鉴意义。

1 工程概况

内蒙古某露天煤矿位于桌子山煤田棋盘井矿区东北边缘处,属中山地貌,整体西高东低,海拔标高在1219~1639m,最大高差420m,最低点位于矿区采坑内,最高点位于矿区西部桌子上山。矿区西边帮发育北北东向棋盘井逆断层,为桌子山逆冲推覆断层的南端。断层走向北东 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$,倾角约为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,垂直断距大于300m。上盘为奥陶系灰岩,岩质坚硬,地貌上表现为陡崖峭壁,总体地形坡度 60° ,岩层产状 $290^{\circ}\angle 9^{\circ}$,发育两组优势节理: J1: $90^{\circ}\angle 80^{\circ}$, J2: $359^{\circ}\angle 88^{\circ}$;下盘为二叠系砂岩、泥岩,岩质相对较软,向斜西翼岩层倒转,产状 $288^{\circ}\angle 84^{\circ}$,东翼岩层平缓,产状 $281^{\circ}\angle 6^{\circ}$ 。断层横穿滑坡中部,滑体物质由断层上下盘各自一部分岩体和断层破碎带共同组成。

2 滑坡基本特征

2.1 滑坡形态及边界特征



图1 航拍滑坡全貌

滑坡平面形态呈近似圈椅状,纵剖面上呈折线形,地形变化较大。滑坡整体位于陡崖下部斜坡上,地势整体西高东低,分布高程1335~1475m,高差140m,平均坡度 25° ,局部开挖面较陡,坡度达 65° ;主滑方向 86° 。滑坡体发育宽度约550m,顺坡长度约270m,面积 $12.1\times 10^4\text{m}^2$,均厚约30m,体积约 $363\times 10^4\text{m}^3$ (图1)。

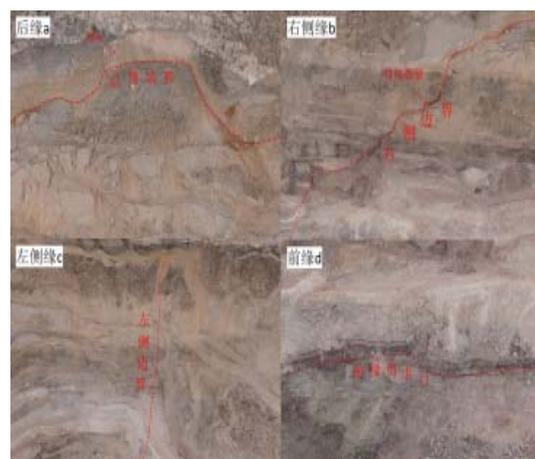


图2 滑坡边界特征

滑坡后缘以基岩陡崖为界,可见裸露滑床高约14m,较平整光滑,坡度约 67° ,与灰岩地层内优势节理J1基本一致(图2a);右侧边界以贯通式剪切裂缝为界(图2b);左侧边界以多条羽状剪裂缝为界(图2c),目前暂未完全贯通;前缘以相对软弱的砂质泥岩层剪出(图2d),通过间隔3个月的正射影像,可测量的最大水平剪出位移达8m。

2.2 滑坡变形破坏特征

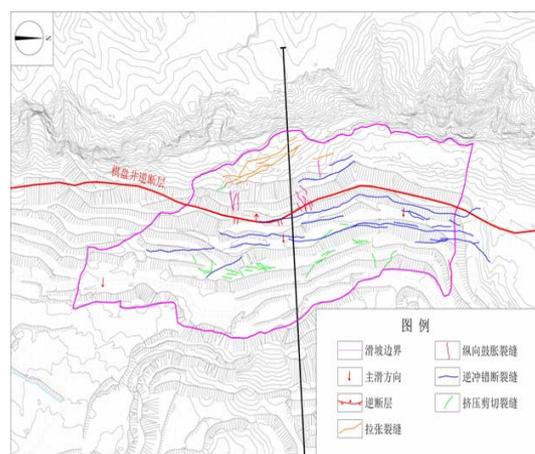


图3 滑坡区及裂隙分布平面图

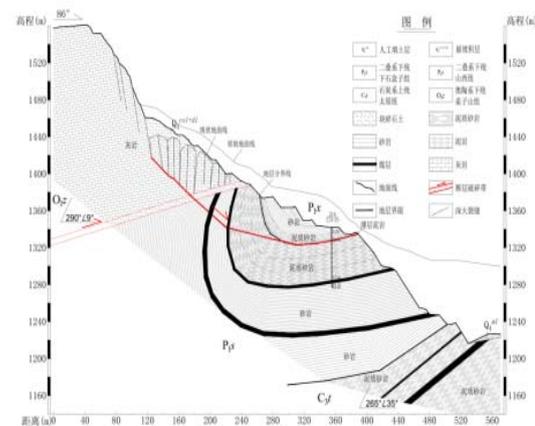


图4 滑坡工程地质剖面图

Geological and Mineral Surveying and Mapping

根据对矿区监测人员描述,该滑坡于2023年2月后缘发生下错,下错高度达14m,坡体内不同程度变形破坏,但滑体整体依然较完整,此后滑坡体一直处于持续变形中,直至调查期间,滑坡体仍处于蠕滑变形阶段。统计了滑坡区各类成规模的裂缝,主要分为四类,分别为后缘拉张裂缝、中部纵向鼓胀裂缝、层间逆冲错断裂缝和前缘挤压剪切裂缝(图3)。

根据滑坡的变形破坏特征差异,将滑坡在纵向上分为3个区段,分别为后部下错变形区、中部倾倒-滑移变形区和前部反倾阻滑区。



a. 滑坡后缘下错面及横向拉张裂缝

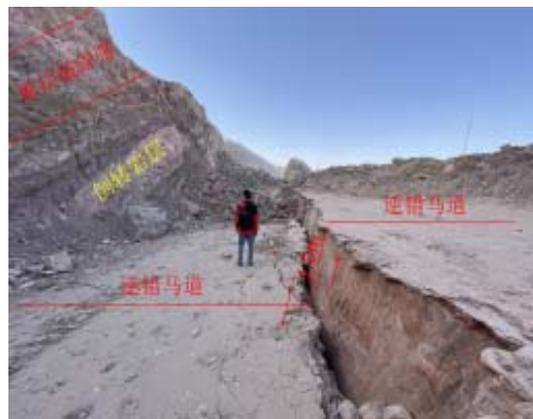


b. 滑坡侧缘剪切错断的马道



c. 滑坡中部反翘马道(断层上盘)

(1) 后部下错变形区。断层上盘灰岩块体倾倒变形特征明显,受控于节理J1。滑坡后缘存在相对较缓平台,上覆厚约10m崩坡积块碎石土层,本次下错最大高度达14m,下错面平整,发育明显擦痕,受控于优势节理J1,多条横向拉张裂缝近平行发育,形成多级拉陷槽,宽约32m(图5a),原开挖马道变形剧烈,扭曲严重,局部仅可见隐约轮廓。



d. 滑坡中部层间错动面(断层下盘)



e. 滑坡中部揭露岩层弯曲倾倒



f. 滑坡前缘剪出口(沿层面剪出)

图5 滑坡变形破坏特征

(2) 中部倾倒-滑移变形区。通过开挖坡体揭露岩层可见坡体内岩体存在大量倾倒变形,倾倒岩体根部折断后发生整体滑移,在左右侧缘均可见明显剪切错断马道,错断高度约2-3m(图

5b)。断层上盘灰岩层马道反翘, 裂缝展布与J1基本一致, 具有裂缝外侧岩体上升, 裂缝内侧岩体下降的特点(图5c); 断层下盘泥质砂岩层马道同样存在倾倒变形导致的错动裂缝, 裂缝最长可达约270m, 延伸方向与岩层走向一致, 多条马道外侧上升, 内侧下降, 错动面陡倾坡外, 可见最大错动距离达1.5m(图5d), 其与上盘倾倒变形岩体特征基本一致, 局部暂未开挖山梁也发生有岩层倒转的弯曲倾倒变形(图5e)。滑坡体内右侧下部局部阻滑岩体已基本被挖除, 导致上部岩体滑移失稳, 滑面擦痕明显, 残留厚约2cm泥皮。

(3) 前部反倾阻滑区。前缘岩层缓倾坡内, 为天然的阻滑段, 矿区削帮过程中, 该区岩体大量被剥离, 局部段甚至完全被挖除, 本次滑坡滑体前缘沿相对软弱的泥岩层剪切蠕滑, 蠕滑距离达8m, 前缘砂岩层发育大量斜向剪切裂缝和纵向鼓胀裂缝(图5f), 显示其受上部岩体挤压, 为明显阻滑的特征。

3 滑坡变形过程演化机制研究

矿山西边帮斜坡经历漫长的地质历史时期的风化卸荷、变形和失稳破坏后达到一个相对稳定的状态, 在棋盘井活动逆断层长期作用下, 坡体挤压应力积聚, 形成了现状颇具特点的坡体结构和应力状态。该滑坡变形演化机制和过程如下:

(1) 区域分布的棋盘井活动逆断层, 上盘长期推覆下盘岩体, 导致岩层压缩变形并积聚构造应力。推覆过程中, 上盘急剧隆升, 灰岩受控优势节理J1, 累进发生倾倒变形, 灰岩岩质坚硬, 倾倒变形属块体倾倒, 根部沿缓倾坡内的层面折断, 与结构面J1、断层面组合形成“下错体”^[7]; 下盘砂岩、泥岩岩质相对较软, 在推覆挤压应力作用下, 形成牵引向斜, 靠上盘翼岩层倒转。

(2) 露天煤矿削帮过程中, 坡体岩层发生卸荷, 应力逐步调整重分布, 滑体中部岩层在上部岩体重力挤压作用下, 加剧其倾倒变形, 过程中, 倾倒拉裂缝多沿层面展布, 裂缝延伸数十至数百米, 马道反翘或错段, 形成外侧升高, 内侧陷落的独特微地貌。

(3) 棋盘井逆断层由滑体中上部横穿, 其两侧破碎带岩体极破碎, 呈散体结构, 具有较强的塑性形变性质, 下部二叠系岩层的倾倒变形, 在断层破碎带形成空化现象, 导致断层破碎带沉陷变形。随着边帮岩体剥离过程中, 断层下盘岩层倾倒变形的扩展和加剧, 破碎带的沉陷变形亦不断加剧, 反过来刺激上部灰岩块体的倾倒变形。

(4) 断层破碎带的沉陷变形的加剧, 导致对上部灰岩的支撑力逐渐降低, 不足以支撑其重力分力时, 灰岩块体根部的倾倒折断裂隙逐步扩展贯通, 直至下错失稳。

(5) “下错体”形成后, 其下错面与中部断层破碎带密集裂隙、弯曲倾倒变形折断裂隙及前缘相对软弱泥岩层组成贯通滑面, 形成整体滑坡。通过现状简易监测, 滑体在后部岩体突发下

错后, 一直处于缓慢蠕滑的状态, 通过间隔3个月的正射影像, 可测量的前缘最大水平剪出位移达约8m。

4 结论

(1) 现场调查结合倾斜摄影技术, 该滑坡发育宽度约550m, 顺坡长度约270m, 面积 $12.1 \times 104\text{m}^2$, 均厚约30m, 体积约 $363 \times 104\text{m}^3$, 为大型岩质滑坡。

(2) 逆断层伴生的牵引向斜构造对本次滑坡的形成及变形过程起着控制作用。根据滑坡宏观变形破坏特征, 将滑坡区分为三个区段, 即后部下错变形区、中部倾倒-滑移变形区和前部反倾阻滑区。

(3) 露天矿山的削帮工程, 为牵引向斜西翼陡立-倒转岩层发生倾倒变形、上部灰岩下错失稳提供了良好的临空条件, 是边帮发生滑坡的主要诱发因素。

(4) 对此类坡体结构的滑坡采取简单的削坡减载措施, 可能引发后部层状或似板状岩体累进发生倾倒变形, 进而引发新的斜坡变形破坏, 难以达到有效的治理目的。

(5) 对于此类地质构造复杂区域的露天矿山开采, 进行开采设计前, 建议在查明斜坡坡体结构的基础上, 进行针对性的开采和终了边坡设计, 以便获得更充分的生产安全保证和经济效益。

【基金项目】

四川省自然资源厅基金项目(资助号: KJ-2023-030)。

【参考文献】

- [1] 葛新. 矿山地质环境保护问题分析与对策研究[J]. 中国金属通报, 2024(06): 192-194.
- [2] 王久玲, 张小军, 陈尚波. 露天矿山边坡稳定性分析及稳控技术要点探究[J]. 绿色中国, 2025(03): 52-54.
- [3] 张伟元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理(2版)[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 315-338.
- [4] 申力, 纪玉石, 刘大勇, 等. 采矿引起的边坡倾倒滑移变形机理与变形安全性分析研究——以抚顺西露天矿边坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006(03): 63-68.
- [5] 郑达, 毛峰, 王沁沅, 等. 上硬下软反倾边坡开挖变形响应的物理模拟[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 89-95.
- [6] 郭生, 闫杰, 王振伟. 安家岭露天矿逆断层区域边坡稳定性控制研究[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(2): 9-13.
- [7] 夏敏, 吕松梅, 宋昊, 等. 反倾边坡块状倾倒-滑移复合型大变形机理研究——以某水电站大变形岸坡为例[J]. 工程地质学报, 2023, 31(06): 1999-2007.

作者简介:

曾强(1990—), 男, 汉族, 四川资中人, 硕士, 中级工程师, 主要从事地质灾害防治和岩土工程方面的工作与研究。