doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.002
引用格式：万良勇，刘健. 某露天矿采场与排土场复合边坡破坏机理及稳定性分析[J]. 矿冶，2026，35(2)：179-184.
WAN Liangyong, LIU Jian. Failure mechanism and stability analysis of a composite slope in an open-pit mine: integrating working face and waste dump[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 179-184.

某露天矿采场与排土场复合边坡破坏机理及稳定性分析

万良勇 刘 健
（中国兵器工业北方勘察设计研究院有限公司，石家庄 050011）

摘 要：鉴于由采场和排土场构成的复合边坡具有潜在破坏机理复杂的特点，本文采用工程地质分析法和有限元强度折减法，对其破坏模式展开研究。结果表明：在自重工况下，边坡滑移表现为“排土场主导型”；在自重+地下水、自重+地下水+暴雨工况下，则转变为“采场主导型”；滑面形态以圆弧形为主。同时，本文对排土场堆排加载的影响效应进行了对比分析。在此基础上，结合现行规范提出了该复合边坡的设计稳定系数评价标准，并分别采用简化Bishop法和Morgenstern-Price法计算了不同工况下的边坡稳定系数。结合有限元强度折减法所得结果，对复合边坡稳定性进行了综合评价。分析表明，在现有排土场与采场地表境界安全距离条件下，采场与排土场边坡之间的相互影响较小，边坡在自重、自重+地下水、自重+地下水+暴雨三种工况下均满足稳定系数要求。然而，排土场台阶边坡处于基本稳定状态，仍存在一定的安全隐患。

关键词：露天采场；排土场；复合边坡；边坡稳定性分析；极限平衡法；强度折减法
中图分类号：TD76 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854(2026)02-0179-06

Failure mechanism and stability analysis of a composite slope in an open-pit mine: integrating working face and waste dump

WAN Liangyong LIU Jian
(China North Industries Norengeo Ltd., Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: Given the complexity of potential failure mechanisms in composite slopes formed by an open-pit working face and an adjacent waste dump, this study employs engineering geological analysis and the finite element strength reduction method (SRM) to investigate failure modes. Under self-weight conditions, slope failure manifests as waste dump-dominated sliding, characterized by a near-circular arc slip surface. In scenarios involving self-weight+groundwater and self-weight+groundwater+storm rainfall, failure transitions to mining pit-dominated sliding, also exhibiting circular-arc slip surfaces. A comparative analysis quantifies the destabilizing effect of waste dump loading on slope stability. According to current design codes, stability evaluation criteria for the composite slope are established. Stability factors under various working conditions are calculated using both the simplified Bishop method and the Morgenstern-Price method, supplemented by SRM results for a comprehensive assessment. Findings indicate that with the current safe separation distance (178 m) between the waste dump toe and the mining pit crest, interaction effects between the two slopes are minimal. The composite slope meets required stability factors under all three working conditions (self-weight, self-weight+groundwater, self-weight+groundwater+storm rainfall). However, bench slopes within the waste dump exhibit safety factors below the required thresholds, posing potential safety hazards.

Key words: open-pit mining; waste dump; composite slope; slope stability analysis; limit equilibrium method; finite element strength reduction method

收稿日期：2025-02-19 **修回日期：**2025-09-19 **录用日期：**2025-10-24
第一作者：万良勇，博士，高级工程师，主要从事岩土工程安全技术研究工作。E-mail：41775172@qq.com
©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

露天矿边坡是露天开采活动所形成的一种特殊工程结构，通常包含露天采场边坡与排土场边坡两类。受场地条件与排土需求限制，排土场常设置在采场周边，从而在开采过程中形成采场与排土场相互作用的复合边坡。与单一采场边坡相比，复合边坡具有以下特征：其一，排土场作为附加荷载作用于采场边坡，形成叠加荷载效应，导致边坡应力重分布与结构复杂化；其二，排土场可能加剧采场边坡变形，而采场失稳也可能引发排土场连锁破坏，增大整体边坡风险；其三，复合边坡范围广、临空高度大，一旦失稳易引发大规模滑坡，威胁采矿设备与人员安全，灾害规模显著扩大。

复合边坡的稳定性直接影响矿山安全生产与经济效益，其破坏机理相较于单一岩土边坡更为复杂。近年来，相关研究已取得一系列进展，学者多采用极限平衡法、数值模拟与现场监测等手段，探讨露天矿采场与排土场间的安全距离及相互作用机制。例如，张长锁等[1]基于极限平衡法对某扩界露天矿的采场—排土场联合边坡进行多工况稳定性分析，发现预留足够安全距离后，排土场对采场边坡稳定性影响较小；国内多位学者针对不同条件开展研究，通过极限平衡与数值分析方法确定了相应的安全距离[2-8]；郭海棣等[9]采用数值模拟揭示了东明矿西帮复合边坡位移与剪切应变演变规律；厉美杰[10]通过正交试验与极限平衡理论对复合边坡稳定性影响因素进行敏感性分析；徐昆[11]研究了哈尔乌素露天矿复合边坡形成过程中的应力与位移响应规律；CROUSOE Jr[12]借助数值模拟分析软弱层对软岩边坡发育的影响，并提出胜利露天煤矿排土场边缘至采场的临界安全距离；李伟[13]则通过数值方法探讨了新疆某露天煤矿外排土场位置对坑帮稳定性的影响程度。然而，现有研究在复合边坡不同工况下的主导破坏模式及其协同稳定性评价标准方面，仍存在一定不足。

本文以内蒙古某露天煤矿西帮在开采过程中形成的排土场—采场复合边坡为研究对象，通过工程地质分析与有限元强度折减法探究其潜在破坏机理，并依据破坏模式结合现行规范，采用极限平衡法对该复合边坡稳定性进行系统评价。此外，为量化排土场堆排荷载对下部岩质边坡稳定性的影响，本文对比分析了有无排土场加载条件下边坡稳定系数的变化规律，从而为露天采场—排土场联合边坡的稳定控制提供依据。

1 工程概况

1.1 复合边坡工程地质概况

某露天煤矿位于内蒙古胜利煤田西部，主要开采位置位于首采区西南部，长约1 029 m，宽约448 m，开采标高+1 020 m至+920 m，整体向西推进，形成9个作业台阶，其中7个剥离台阶，2个采煤台阶，矿区台阶高度约9~10 m，台阶坡面角20°~42°，通路平盘23~46 m，边坡总高80 m，最终边坡角约13°；主采区开采境界以西约176 m为西排土场，设3~5级台阶，每层高10~20 m，台阶坡面角21°~40°，目前已排土至设计标高+1 100 m水平，最大排土高度约78 m，最终边坡角约11°。现状西排土场距采场地表境界约178 m，小于GB 51289—2018[14]规定200 m的安全距离要求，西排土场东帮与采场西帮形成了复合边坡，总临空高度最大约158 m。在该矿西排土场及采场选取1个典型工程位置构建采—排复合边坡工程地质模型，主要由排弃堆积物、第四系、泥岩、砂岩和煤层组成，堆积层、第四系为散体结构，下伏岩体以碎裂结构为主，局部为块状结构，复合边坡工程地质剖面如图1所示。

1.2 边坡岩土体物理力学性质

边坡岩土体物理力学性质是进行边坡稳定性分析的关键。根据现场原位测试及室内岩土物理力学试验结果，结合矿区的实际情况、工程地质条件、经验参数，综合确定边坡岩土体物理力学参数，见表1。排

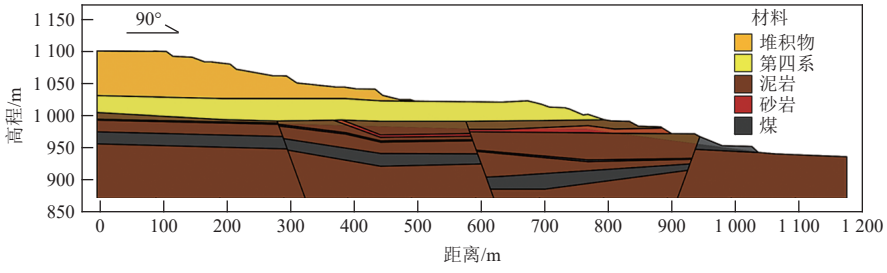


图1 复合边坡地质剖面图

Fig. 1 Geological section of the composite slope

表1 边坡岩土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of slope rock and soil

岩土类型	天然重度/(kN·m^{-3})	饱和重度/(kN·m^{-3})	天然抗剪强度		饱和抗剪强度		弹性模量/MPa	泊松比	饱和渗透系数/(m·s^{-1})
			c/kPa	ϕ/(°)	c/kPa	ϕ/(°)			
堆积物	18.7	19.85	7.5	25	/	/	3.715	0.35	2×10^{-5}
第四系	19.6	20.3	10	20	/	/	4.16	0.3	5×10^{-5}
泥岩	19.3	20	46.9	17.3	44.9	15.3	85.3	0.24	6×10^{-6}
砂岩	19.8	20.68	11.8	30.9	9.8	28.9	71.9	0.32	3×10^{-5}
煤层	12.2	13	27	17	25	15	23.2	0.2	1×10^{-5}

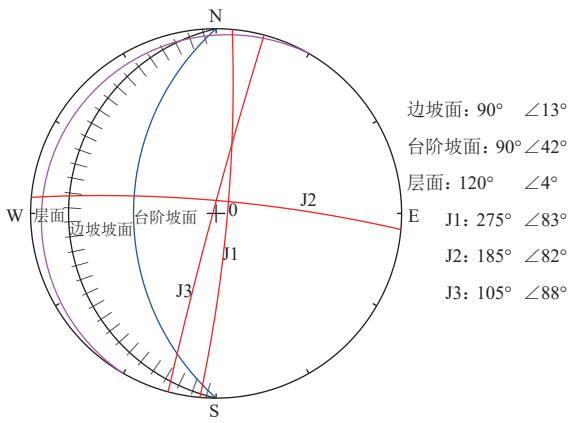
土场坡体是由风化岩块、煤屑、第四系砂土混合料堆排而成，均匀性较差，基于室内、室外物理力学试验结果，结合前期排土场局部滑动失稳情况进行稳定系数反演分析，综合确定堆积层物理力学参数，见表1。

2 复合边坡潜在破坏机理分析

2.1 工程地质分析

由图1可知，边坡倾向90°，采场边坡总高80 m，最终边坡角13°，台阶边坡最大高度约20 m，台阶坡面角42°。根据现场调查，边坡岩体主要由全风化-强风化的泥岩、砂岩及煤层组成，岩体顶部第四系覆盖层厚约30 m，第四系为散体结构，其下岩体以碎裂结构为主，局部为块状结构，钻孔揭示采场下伏泥岩、煤层抗剪强度较低，易发生剪切破坏。另外，该区岩层倾角2°~7°，出露3组优势结构面，其与采场边坡及台阶坡几何组合关系见图2，层面、J3与边坡小角度相交，层面倾角小于边坡角且近乎水平，J3倾角大于边坡角；J1与J2均与边坡面成大角度相交，且J1、J2、J3倾角近乎直立，与坡面组合不能形成平面或楔形体破坏，仅可形成后缘拉裂界面；J1倾向与坡面相反，沿台阶坡面可能产生倾倒破坏。

根据矿区已有资料及现场勘探，排土场基底为缓倾斜，倾角1°~3°，基底岩土体强度较低，堆积物具



备注：J1、J2、J3为优势结构面产状。

图2 边坡结构面赤平极射投影

Fig. 2 The stereographic projection of slope structure plane

有一定的黏聚力，依据GB 50778—2012[15]附录D，结合该矿东区内排土场局部滑移反演分析，判定其破坏模式为近圆弧形滑动破坏。

综上，上部30 m第四系覆盖层及全风化—强风化岩体（碎裂结构）因强度低、均质性差，易发生圆弧型滑动破坏；下部块状结构岩体受陡倾角结构面J1控制，可能沿台阶坡面产生倾倒-滑移复合型破坏；整体破坏模式可能表现为后缘拉裂-前缘剪出的复合滑动，滑面形态上部近似圆弧、下部沿煤层或泥岩软弱夹层发育。

2.2 有限元数值分析

2.2.1 分析方法

露天采场与排土场组成的复合边坡具有边坡规模大、临空面高的特点，其破坏机制较单一采场或排土场边坡复杂，采用传统的极限分析方法由于假定条件过多而存在较大弊端。有限元强度折减法全面满足静力平衡条件、变形相容条件、应力应变关系和边界条件，不需假定边坡滑裂面的位置，为复杂破坏模式的边坡稳定性研究提供了有效分析手段。

2.2.2 分析工况

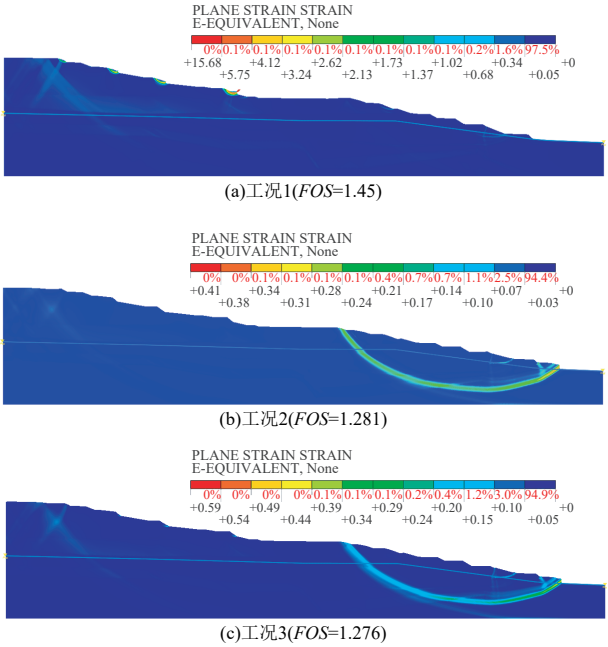
该矿区域地震烈度为6度，采用单斗—卡车开采工艺，根据GB 50778—2012[15]，不考虑地震力和爆破振动对边坡稳定的影响。考虑到水对边坡稳定性的重要影响，本文对露天采场-排土场复合边坡自重（工况1）、自重+地下水（工况2）、自重+地下水+暴雨三种（工况3）工况下的潜在失稳模式进行分析，其中暴雨强度按该地区多年日最大降雨量86.8 mm进行校核，降雨历时为1 d。

2.2.3 数值模拟结果及分析

采用Midas GTS岩土工程有限元软件进行计算分析，边坡岩土材料采用弹塑性本构模型，强度准则采用平面应变M-C屈服准则，以静力平衡法对应力和位移求解的不收敛作为边坡失稳依据。采用表1的边坡岩土物理力学参数，以地下水位为界，其上采用天然状态的重度和强度参数，其下采用饱和状态的重度和强度参数。暴雨工况采用瞬态渗流—应力耦

合模块进行分析，根据暴雨强度计算雨水入渗速率，进行饱和—非饱和渗流分析[16]，调整非饱和区基质吸力和渗透系数，更新饱和区范围及岩土体强度参数（堆积物和第四系饱和抗剪强度参照天然强度适当折减），迭代求解孔隙水压力分布及边坡稳定系数。

图3为工况1至工况3条件下复合边坡临界状态时的等效塑性应变分布图（*FOS*为计算得到的稳定系数）。由图3可以看出，仅考虑边坡岩土体自重作用时，复合边坡的破坏主要由排土场多处台阶边坡的滑动破坏引起，滑面近圆弧形，临界状态时排土场和采场整体边坡未见滑动迹象；考虑边坡岩土体自重和地下水作用时，复合边坡的破坏由采场边坡的整体滑动引起，滑面近圆弧形，后缘位于采场坡顶，前缘位于采场坡脚，临界状态时排土场边坡未见滑动迹象；考虑边坡岩土体自重和地下水、地表降水的双重作用，复合边坡的破坏主要由采场边坡的整体滑动引起，滑面与工况2类似，临界状态下排土场台阶边坡脚出现塑性区，但未见贯通滑移面。



(a)工况1(*FOS*=1.45)

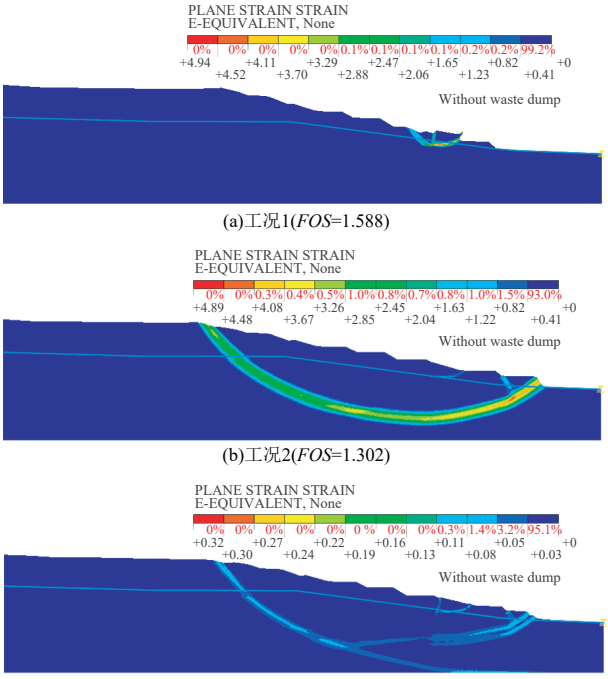
(b)工况2(*FOS*=1.281)

(c)工况3(*FOS*=1.276)

图3 临界状态等效塑性应变分布

Fig. 3 Distributions of critical equivalent plastic strain under varying working conditions

为进一步量化排土场堆载对采场边坡稳定性的影响，本文对无排土场加载时的对照工况进行了模拟分析，其临界状态等效塑性应变见图4。与图3对比可知，无排土场时，工况1表现为采场下部台阶边坡沿煤层滑移的局部破坏模式，其滑面近圆弧形，稳定系数与后述用极限平衡法计算的结果基本接近；工况2、



(a)工况1(*FOS*=1.588)

(b)工况2(*FOS*=1.302)

(c)工况3(*FOS*=1.300)

图4 临界状态等效塑性应变分布（不考虑排土场堆载）

Fig. 4 Distributions of critical equivalent plastic strain under varying working conditions without waste dump loading

工况3表现为采场整体边坡滑移破坏，滑面形态与图3类似，其稳定系数分别为1.302、1.300，而图3中对照工况下采场稳定系数分别降至1.281、1.276，这表明排土场堆载使采场稳定系数降低约1.7%，增加了采场主导型失稳的风险。

2.3 复合边坡潜在破坏机理分析

复合边坡有限元数值分析结果显示，该采场—排土场复合边坡在不同的工况条件下，表现出不同的潜在破坏模式，仅考虑自重时表现为“排土场主导型”失稳，考虑地下水作用后，则表现为“采场主导型”失稳，且破坏面形态与工程地质分析的近圆弧形破坏一致，其机理为地下水的作用显著弱化了采场边坡岩体强度，使得采场边坡先于排土场边坡发生破坏。此外，由于现阶段排土边界与地表开采境界距离为178 m，排土场对露天采场的边坡稳定性影响较小，尚未表现为复合边坡的整体失稳。

3 复合边坡稳定性评价

边坡稳定性分析是确定边坡是否处于稳定状态以及是否需要对其进行加固与治理的重要决策依据。本文利用传统极限分析法对复合边坡的整体稳定性和局部稳定性进行计算，并根据规范有关要求进行稳定性评价。

3.1 边坡稳定系数的确定和评价标准

现行规范[14,15]以边坡稳定系数F_s和边坡设计稳定系数F_{st}的比较来评价边坡安全性能，并根据边坡类型和服务年限给出了采场边坡和排土场边坡的F_{st}值。按照规范要求及该矿的实际情况，考虑边坡危害等级，综合确定采场和排土场边坡设计稳定系数F_{st}见表2。各规范及相关文献未见复合边坡设计稳定系数取值依据，数值分析结果表明，复合边坡随工况条件的变化可表现为“排土场主导型”和“采场主导型”两种破坏模式，作为采场与外排土场组合的边坡系统，其失效往往由最薄弱环节引发，从安全角度出发，为保证复合边坡系统的整体稳定安全，宜采用排土场边坡与采场边坡设计稳定系数中的较高值作为控制标准，以此作为稳定性分级的基础依据。参考GB 51289—2018[14]，稳定性状态分为稳定、基本稳定、欠稳定和不稳定四种状态，详见表3。

3.2 计算结果

由于该复合边坡滑面为近圆弧形，故采用简化Bishop法和Morgenstern-price法对边坡进行验算分析[15,17-18]，计算结果见表4。

表2 复合边坡设计稳定系数

Table 2 The designed stability factors of composite slope

计算工况	采场边坡	排土场边坡	复合边坡
工况1：自重	1.2	1.3	1.3
工况2：自重+地下水	1.15	1.25	1.25
工况3：自重+地下水+暴雨	1.1	1.2	1.2

备注：①根据现场钻探情况，排土场内部无稳定水位，不考虑地下水工况；②工况3为非正常工作状态，按规范要求进行校核。

表3 边坡稳定状态划分

Table 3 Classification of slope stability states

边坡稳定系数F_s	F_s<1.00	1.00≤F_s<1.05	1.05≤F_s<F_{st}	F_s≥F_{st}
边坡稳定性状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

由表4可知，Bishop和M-P法得到的单一边坡稳定系数接近，因计算方法未考虑排土场和采场间的相互作用，其计算结果均大于SRM法的计算结果，故本文以Bishop法计算结果作为单一边坡稳定系数值，以SRM法计算的FOS值作为整体边坡的稳定系数。按照表2、表3的边坡稳定性状态划分标准，可知该复合边坡在工况1至工况3条件下均满足规范稳定系数的要求，边坡整体处于稳定状态，但排土场台阶边坡判定为基本稳定，存在局部失稳的安全隐患。

表4 复合边坡稳定系数计算结果

Table 4 Calculation results of stability coefficient of composite slope

计算边坡	工况1			工况2			工况3		
	Bishop	M-P	SRM	Bishop	M-P	SRM	Bishop	M-P	SRM
整体边坡	/	/	1.45	/	/	1.281	/	/	1.276
排土场边坡	2.374(1.108)	2.365(1.105)	/	2.267	2.260	/	2.265	2.259	/
采场边坡	1.762(1.591)	1.759(1.585)	/	1.287	1.288	/	1.282	1.282	/

备注：括号内值为台阶边坡稳定系数（Bishop法/M-P法）。

4 结论

1）采场—排土场复合边坡破坏机制复杂，宜采用数值极限分析方法确定破坏模式和潜在滑裂面，然后再结合传统极限分析方法针对具体破坏部位进行评价的综合分析思路。但传统极限分析方法无法考虑排土场与采场相互作用的荷载效应，计算结果一般偏大，在工程应用中应结合数值分析结果综合确定边坡的稳定系数。

2）通过有无排土场堆排加载时的边坡稳定性对比分析表明，由于该复合边坡排土场与采场地表境界距离较大，排土场堆载使采场边坡稳定系数降低约1.7%；且复合边坡潜在滑动主要表现为排土场边坡、采场边坡及其局部台阶边坡的单一滑移，在不同的工况条件下其滑动破坏机理不同，自重条件下表现为“排土场主导型”边坡失稳，自重+地下水、自重+地下水+暴雨条件下表现为“采场主导型”边坡失稳。

3）按照极限平衡法和有限元强度折减法计算结果，该边坡在自重、自重+地下水、自重+地下水+暴雨三种工况下边坡整体均处于稳定状态，但排土场台阶边坡稳定系数小于规范要求的设计稳定系数，存在局部失稳的安全隐患。

参考文献

[1] 张长锁，刘建博. 露天矿扩界工程露天坑及排土场边坡协同稳定性分析[J]. 矿冶，2024，33(1)：116-123.
ZHANG C S，LIU J B. Collaborative stability analysis of open-pit and waste dump slope in open-pit expansion project[J]. Mining and Metallurgy，2024，33(1)：116-123.

[2] 谷运峰. 高排土场下露天矿采场边坡稳定性研究[D]. 包头：内蒙古科技大学，2021.
GU Y F. Study on slope stability of open pit mine under high dump[D]. Baotou：Inner Mongolia University of Science &

Technology, 2021.

[3] 董蒙蒙. 露天煤矿外排土场分布对复合边坡稳定性的影响[J]. 露天采矿技术, 2024, 39(1): 17-21.
DONG M M. Influence of the distribution of external dump on composite slope stability in open-pit coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2024, 39(1): 17-21.

[4] 郭海建, 成功. 别斯库都克露天矿采—排复合边坡稳定性分析[J]. 露天采矿技术, 2024, 39(4): 42-45.
GUO H J, CHENG G. Stability analysis of mining-dumping composite slope in Biesikuduke open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2024, 39(4): 42-45.

[5] 陈毓. 露天矿外排土场分布对复合边坡稳定性影响机理[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 288-291.
CHEN Y. Influence mechanism of distribution position of external dumping on stability of composite slope in open-pit coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(12): 288-291.

[6] 白润才, 白文政, 刘光伟, 等. 含弱层的复合边坡稳定性研究及应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 61-65.
BAI R C, BAI W Z, LIU G W, et al. Research and application of stability of composite slope with weak layers[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(1): 61-65.

[7] 宋伟豪. 吉林郭勒二号露天煤矿首采区西帮复合边坡稳定性研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
SONG W H. Study on the stability of west side composite slope in the first mining area of Jilinguole No.2 opencast mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.

[8] 曹博, 陶亚彬, 刘忠红, 等. 新疆准东露天煤矿单一巨厚煤层复合边坡空间形态优化[J]. 金属矿山, 2017, 46(7): 47-50.
CAO B, TAO Y B, LIU Z H, et al. Spatial formation optimization of composite slope of single thick coal seam of Zhundong open-pit coal mine in Xinjiang[J]. Metal Mine, 2017, 46(7): 47-50.

[9] 郭海棣, 王振伟, 李元浩, 等. 东明矿西帮复合边坡破坏模式及变形控制研究[J]. 露天采矿技术, 2023, 38(5): 89-92.
GUO H D, WANG Z W, LI Y H, et al. Research on failure mode and deformation control of west slope composite slope in Dongming mine[J]. Opencast Mining Technology, 2023, 38(5): 89-92.

[10] 厉美杰. 复合边坡影响因素敏感性分析[J]. 露天采矿技术, 2018, 33(6): 56-59.
LI M J. Sensitivity analysis of composite slope effect factors[J]. Opencast Mining Technology, 2018, 33(6): 56-59.

[11] 徐昆. 露天矿复合边坡的力学特征及变形规律[J]. 露天采矿技术, 2016, 31(4): 36-39.
XU K. Mechanical characteristics and deformation law of composite slope in open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(4): 36-39.

[12] CROUSOE Jr G E. 露天矿复合边坡形成和变形失稳机理及关键因素优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
CROUSOE Jr G E. Theory analysis of composite slope deformation and instability mechanism and key factors optimization[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2017.

[13] 李伟. 新疆某露天矿外排土场分布对复合边坡稳定性影响机理[J]. 露天采矿技术, 2022, 37(1): 16-19.
LI W. Influence mechanism of distribution position of external dump on stability of composite slope in Xinjiang open-pit coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2022, 37(1): 16-19.

[14] 中华人民共和国国家标准编写组. 煤炭工业露天矿边坡工程设计标准: GB 51289—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for design of slope engineering of open pit mine of coal industry: GB 51289—2018[S]. Beijing: China Plan Press, 2018.

[15] 中华人民共和国国家标准编写组. 露天煤矿岩土工程勘察规范: GB 50778—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering of open pit coal mine: GB 50778—2012[S]. Beijing: China Plan Press, 2012.

[16] 赵旭林, 刘杨, 刘立顺, 等. 堆弃排土场边坡降雨渗流特性及潜在危害治理研究[J]. 矿冶, 2024, 33(4): 495-502.
ZHAO X L, LIU Y, LIU L S, et al. Rainfall seepage characteristics and potential hazard control of abandoned dump slope[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(4): 495-502.

[17] 韩浩亮. 粤港澳大湾区某花岗岩矿高陡边坡稳定性分析研究[J]. 矿冶, 2024, 33(3): 347-355.
HAN H L. Stability analysis on high and steep slope of a granite mine in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(3): 347-355.

[18] 吴丹, 叶尔江·多力达西, 郄永波, 等. 某高台阶排土边坡不同失稳模式下稳定性分析[J]. 矿冶, 2020, 29(4): 29-32.
WU D, YE ERJIANG • Duolidaxi, QIE Y B, et al. Analysis of slope stability of a waste dump with high terrace under different failure modes[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(4): 29-32.