

# 基于Bishop极限平衡法的后安煤矿采煤沉陷区边坡角确定与稳定性评价

赵伟<sup>1</sup>, 周连春<sup>2</sup>, 赵雄<sup>1</sup>, 谭诗<sup>2</sup>, 赵津<sup>1</sup>, 古娜<sup>2</sup>, 赵尚海<sup>1</sup>, 赵成<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山西朔州平鲁区后安煤矿后安煤炭有限公司, 山西 朔州

<sup>2</sup>西昌学院土木与水利工程学院, 四川 西昌

收稿日期: 2025年12月12日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月23日

## 摘要

本文以山西朔州平鲁区后安煤矿采煤沉陷区为研究对象, 结合现场地质勘察与室内岩土力学试验数据, 采用Bishop极限平衡法对沉陷区南、北、东、西四个方向的边坡剖面进行稳定性分析。通过圆弧滑动模型计算各剖面在不同坡角下的安全系数, 确定了最终稳定边坡角分别为南帮33°、北帮30°、东帮33°、西帮33°, 并给出了相应的安全储备系数选取依据。研究结果表明, 所确定的边坡角可为沉陷区治理中黄土覆盖量估算及边坡加固设计提供科学依据。本研究建立的边坡稳定性评价方法对类似地质条件矿区的沉陷区治理具有参考价值。

## 关键词

Bishop法, 边坡稳定性, 采煤沉陷区, 安全系数, 边坡角, 后安煤矿

# Determination of Slope Angle and Stability Evaluation of Coal Mining Subsidence Area in Hou'an Coal Mine Based on Bishop's Limit Equilibrium Method

Wei Zhao<sup>1</sup>, Lianchun Zhou<sup>2</sup>, Xiong Zhao<sup>1</sup>, Shi Tan<sup>2</sup>, Jin Zhao<sup>1</sup>, Na Gu<sup>2</sup>, Shanghai Zhao<sup>1</sup>, Cheng Zhao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hou'an Coal C., Ltd., Hou'an Mine, Shuzhou Shanxi

<sup>2</sup>School of Civil Engineering and Water Conservancy, Xichang University, Xichang Sichuan

Received: December 12, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 23, 2026

## Abstract

In this study, the coal mining subsidence area of Hou'an Coal Mine in Pinglu District, Shuzhou City, Shanxi Province was taken as the research object. Combined with the data from field geological surveys and laboratory geotechnical mechanics tests, the Bishop limit equilibrium method was adopted to conduct stability analysis on the slope profiles in the south, north, east and west directions of the subsidence area. The safety factors of each profile under different slope angles were calculated by means of the circular slip surface model, and the final stable slope angles were determined as 33° for the south slope, 30° for the north slope, 33° for the east slope and 33° for the west slope, with the corresponding basis for the selection of safety reserve coefficients provided. The research results show that the determined slope angles can provide a scientific basis for the estimation of loess coverage and the design of slope reinforcement in the treatment of the subsidence area. The slope stability evaluation method established in this study has reference value for the treatment of subsidence areas in mining areas with similar geological conditions.

## Keywords

**Bishop's Method, Slope Stability, Coal Mining Subsidence Area, Safety Factor, Slope Angle, Hou'an Coal Mine**

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

煤炭资源的大规模开采在支撑我国经济社会发展的同时，也引发了严重的矿区生态环境问题，其中采煤沉陷区的形成与治理是亟待解决的挑战之一。井工开采导致上覆岩层应力重分布，进而引发地表沉降、变形与破坏，形成大面积的沉陷土地。这些沉陷区不仅破坏了原始地形地貌与植被，更往往伴随产生一系列高陡、不稳定的边坡，对周边基础设施、居民生命财产安全构成潜在威胁[1]。因此，对采煤沉陷区边坡进行科学的稳定性评价，并据此确定安全、经济的最终边坡角，是实现沉陷区灾害治理成功的关键前提。

边坡稳定性分析是一个经典的岩土工程问题，其分析方法历经了从极限平衡法到现代数值模拟技术的不断发展。在众多方法中，由 Bishop 提出的简化 Bishop 法因其概念清晰、计算简便且在圆弧滑动模式下的可靠性，至今仍在工程实践中被广泛采用[2]。该方法在满足力矩平衡的条件下，通过考虑土条间的竖向相互作用力，对普通圆弧条分法进行了改进，使其计算结果更接近真实情况，尤其适用于由松散堆积体或均质软岩构成的边坡稳定性分析[3]。山西省朔州市平鲁区后安煤炭有限公司后安煤矿(以下简称“后安煤矿”)采煤沉陷区边坡地层主要由砂岩、泥岩及煤线等软质岩石及其风化产物构成，其潜在的破坏模式与 Bishop 法的适用条件较为吻合。

目前，国内外学者在矿山边坡稳定性方面已开展了大量研究。例如，Cheng 等人对山区采动滑坡机理进行了深入探讨[4]；付士根将可靠度理论应用于边坡稳定性评价中[5]。这些研究极大地丰富了该领域的理论体系。然而，针对特定矿区，尤其是井工开采形成的采煤沉陷区边坡，其地层结构、岩体力学性质及变形破坏机制均具有其特殊性，亟需结合具体的地质条件与详实的岩土参数开展个案研究。

基于此，本研究以山西朔州平鲁区后安煤矿采煤沉陷区为工程背景，旨在通过系统的工程地质分析

与现场调查, 获取边坡地层的物理力学参数; 进而应用 Bishop 极限平衡法, 对沉陷区南、北、东、西四个方向的代表性剖面进行稳定性计算, 系统分析不同边坡角下的安全系数变化规律。研究的目标是确定满足规范安全储备要求的最终边坡角, 为沉陷区范围的精确圈定、治理工程中土方量的科学计算以及边坡加固治理方案的制定提供直接的理论依据与工程指导, 对保障矿区生态安全与促进可持续发展具有重要的现实意义。

## 2. 研究区域概况与工程地质条件

### 2.1. 研究区域概况

后安煤矿位于山西省朔州市平鲁区东南部, 矿井采用斜井开拓, 主要开采煤层为石炭系太原组的 4#、9#和 11#煤层。历经多年高强度开采, 井田范围内已形成大面积的采空区, 并在地表相应位置引发了显著的沉陷盆地。本研究的研究对象即为该沉陷盆地周边因不均匀沉降所形成的人工边坡。这些边坡环绕沉陷区分布, 其稳定性直接关系到沉陷区边界的确立、治理工程的安全性以及周边道路、管线等设施的长久安全, 因此对其进行系统性稳定性评价至关重要。

### 2.2. 工程地质条件

区内地层由老至新主要包括奥陶系中统马家沟组、石炭系中统本溪组、上统太原组、二叠系下统山西组与下石盒子组, 以及新生界第四系。与边坡稳定性密切相关的岩层主要为太原组含煤地层及其上覆岩层。

太原组( $C_3t$ ): 为本区主要含煤地层, 平均厚度 105.07 m。岩性以深灰色、灰黑色砂岩、粉砂岩、泥岩及煤层为主, 属典型的软岩 - 中硬岩组合。其中, 11#煤层平均厚度 4.90 m, 其直接顶板多为灰岩或砂质泥岩, 底板为细砂岩或泥岩。这些岩层在采动扰动和风化营力作用下, 力学性质易发生劣化[6]。

第四系(Q): 不整合覆盖于各老地层之上, 主要由黄土状粉土、粉质粘土及残坡积物组成, 结构松散, 强度低, 是构成边坡浅表层滑动的主要物质来源。

### 2.3. 地质构造与水文地质特征

井田总体为一单斜构造, 地层走向近南北, 倾角平缓, 一般  $5^\circ\sim10^\circ$ 。区内未发现大型断层, 但小型断裂及节理裂隙较为发育, 这些结构面破坏了岩体的完整性, 为地下水渗流和潜在滑动面的形成提供了条件。

水文地质条件相对简单。地下水类型主要为基岩裂隙水和第四系孔隙水, 富水性普遍较弱。现场勘查与地质报告表明, 沉陷区边坡地层内含水量较小, 地下水对边坡稳定的影响主要体现在软化岩土体、降低其抗剪强度方面, 其所产生的动水压力及浮托力可忽略不计, 在本次稳定性计算中予以考虑。

### 2.4. 边坡特征与潜在破坏模式

沉陷区形成的边坡按其方位与地层关系可分为不同类型。南部边坡倾向与地层倾向基本一致, 具备典型的顺层滑动地质条件; 而东、西部边坡走向与地层走向大致平行, 北部边坡则表现为切层或近似均质土质边坡的特征。

基于勘探资料与岩性分析, 研究区边坡主要由软质岩石及其风化产物构成, 整体强度较低。综合判断, 其潜在破坏模式主要为: 在岩土体相对均质或强风化的东、西、北帮边坡, 最可能发生圆弧形滑动, 这也是本次 Bishop 法分析的核心模式。在南帮等部位, 由于边坡倾向与软弱夹层倾向相近, 可能形成后缘拉裂、前缘沿软弱面剪出的复合滑动模式。

上述工程地质条件是本次边坡稳定性计算中模型选择与参数取值的基础, 其复杂性也决定了需对不同剖面进行分区段评价。

### 3. 研究方法与参数选取

本研究采用 Bishop 简化法进行边坡稳定性计算，该方法属于极限平衡法的范畴，以其在圆弧滑动分析中的简洁性与可靠性而被广泛认可。计算参数的选取是边坡稳定性分析的核心。本研究中的岩土体物理力学参数主要来源于两个途径：(1) 针对研究区内地层进行的室内岩石力学试验结果；(2) 矿区地质勘察报告及相关研究成果。综合考虑地层岩性、风化程度及工程地质特征，将边坡岩土体概化为若干计算单元，其物理力学参数取值如表 1 所示。

**Table 1.** Physical and mechanical parameters of slope rock and soil mass

**表 1.** 边坡岩土体物理力学参数

岩性	天然密度(g/cm <sup>3</sup> )	粘聚力 $c$ (MPa)	内摩擦角 $\varphi$ (°)
第四系覆盖层	1.91	0.11	19.8
粗砂岩	2.26	0.67	33.60
中砂岩	2.52	0.65	35.55
粉砂岩	2.24	0.61	28.03
煤	1.32	0.21	31.67

其中，11#煤层及其直接顶板的参数直接取自力学试验成果，确保了核心岩层参数取值的准确性与代表性。

研究区水文地质条件简单，地下水贫乏。对于未来可能因长期降雨等因素导致的局部暂态水压力影响，将在后续讨论中予以说明。

安全系数  $F_s$  的选取直接关系到工程的安全性与经济性[6]。本文参考中华人民共和国国家标准《煤炭工业露天矿设计规范》的相关规定，结合后安煤矿沉陷区边坡的服务年限与工程重要性进行选取。规范要求，采场最终边坡的安全系数应在 1.3~1.5 之间。基于此，并综合考虑沉陷区各边坡的方位、潜在危害程度及治理目标，为本研究各剖面设定了差异化的安全系数目标值：

南帮边坡：由于地层倾向与坡向一致，稳定性相对较差，设定  $F_s \geq 1.20$ 。

北帮、西帮边坡：设定  $F_s \geq 1.30$ ，满足规范对最终边坡的下限要求。

东帮边坡：因靠近特定设施或考虑更高安全储备，设定  $F_s \geq 1.50$ 。

为确定给定坡角下的最小安全系数及其对应的最危险滑裂面，本文采用“网格法”与“优化法”相结合的策略进行全局搜索。首先，在预设的圆心区域内布置密集的网格点；然后，对每个圆心，通过改变滑动圆弧的半径，计算一系列潜在滑裂面的安全系数；最后，利用优化算法在初步找到的最小值区域进行精细搜索，以精确确定最危险滑裂面的圆心位置与半径，从而得到该剖面在该坡角下的最小安全系数。

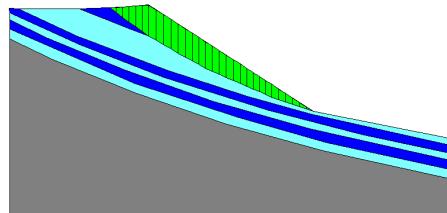
### 4. 边坡稳定性计算与分析

基于前述的 Bishop 极限平衡法原理与确定的岩土体参数，本研究对后安煤矿沉陷区四个方向的代表性剖面( $P_1$ ~ $P_4$ )进行了系统的稳定性计算。通过遍历搜索最危险滑裂面，确定了各剖面在不同坡角下的最小安全系数，进而确定了满足预设安全储备的最终边坡角。

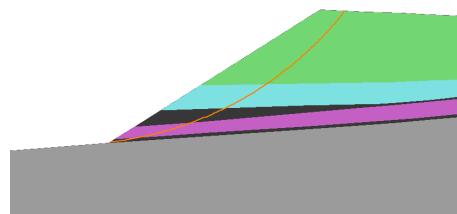
(1) 南帮边坡( $P_1$  剖面)

南帮边坡地层倾向与坡向基本一致，地质条件最为不利。计算结果表明，当坡角达到 33° 时，其最小安全系数为 1.209 (如图 1 所示)，略高于预设的 1.20 目标值。最危险滑裂面呈现典型的深层圆弧形态，其剪出口位于坡脚附近，滑体深度较大，反映出顺层地质结构对稳定性的控制作用。若将坡角提升至 34°，

安全系数将降至 1.18，已不满足要求，故确定其最终边坡角为 33°。



**Figure 1.** Calculation results of south slope stability  
**图 1.** 南帮边坡稳定性计算结果

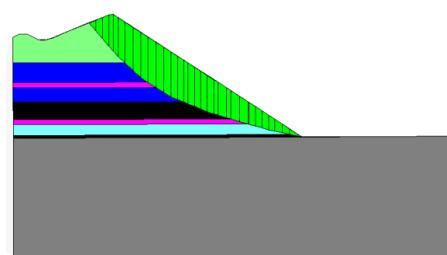


**Figure 2.** Calculation results of north slope stability  
**图 2.** 北帮边坡稳定性计算结果

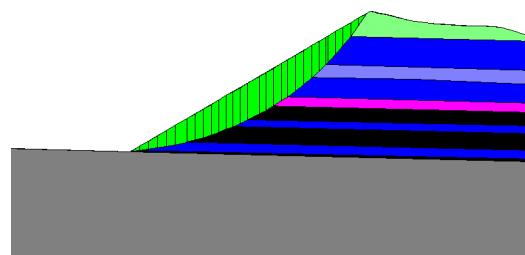
(2) 北帮边坡( $P_2$ 剖面)

北帮边坡表现为切层边坡特征。计算显示，当坡角为 30°时，其最小安全系数为 1.31 (如图 2 所示)，满足  $\geq 1.30$  的要求。其滑裂面相对较浅，主要受浅部第四系覆盖层及强风化岩体的强度控制。因此，确定其最终边坡角为 30°。相较于其他帮坡，北帮允许的坡角较小，这与其岩体结构面发育和力学性质相对较弱有关。

(3) 西帮边坡( $P_3$ 剖面)与东帮边坡( $P_4$ 剖面)



**Figure 3.** Calculation results of west slope stability  
**图 3.** 西帮边坡稳定性计算结果



**Figure 4.** Calculation results of east slope stability  
**图 4.** 东帮边坡稳定性计算结果

西帮与东帮边坡的地质条件较为相似。计算结果显示,两者在33°坡角下均能满足稳定性要求。西帮边坡安全系数为1.221(如图3所示),东帮边坡安全系数为1.217(如图4所示)。两者的最危险滑裂面形态相似,均为贯穿表层覆盖层和部分风化基岩的中等深度圆弧滑动。因此,确定西帮与东帮的最终边坡角均为33°,后安煤矿沉陷区最终边坡角确定结果如表2所示。

**Table 2.** Summary of final slope angle determination results for the subsidence area of Hou'an coal mine  
**表2.** 后安煤矿沉陷区最终边坡角确定结果汇总

边坡位置	计算剖面	预设安全系数 $F_s$	最终边坡角(°)	计算最小安全系数
南帮	P <sub>1</sub>	≥1.20	33	1.209
北帮	P <sub>2</sub>	≥1.30	30	1.310
西帮	P <sub>3</sub>	≥1.30	33	1.221
东帮	P <sub>4</sub>	≥1.50	33	1.217

为探究岩土体参数不确定性对计算结果的影响,本文对南帮边坡(P<sub>1</sub>剖面)在33°坡角下进行了参数敏感性分析。通过保持其他参数不变,单独改变粘聚力c或内摩擦角φ,观察安全系数F<sub>s</sub>的变化规律,分析表明:

安全系数F<sub>s</sub>对内摩擦角φ的变化更为敏感。当φ降低10%时,F<sub>s</sub>下降约8.5%;而当c降低10%时,F<sub>s</sub>仅下降约2.3%。这符合Bishop法在土质及碎裂岩质边坡分析中的一般规律。这一结果提示,在后续的边坡治理与监测中,应特别关注由于降水入渗、风化作用等导致岩土体内摩擦角弱化的潜在风险。

根据确定的最危险滑裂面,对潜在滑体的几何特征进行了估算。以南帮边坡为例,其潜在滑体体积最大,平均厚度约8.5 m,估算方量约为每延米坡长45 m<sup>3</sup>。这一估算为后续可能需要的抗滑桩、挡土墙等支挡结构的设计提供了初步的荷载依据,同时也为沉陷区复垦中需重点加固或削坡减载的区域指明了方向。

综上所述,通过系统的极限平衡计算,本研究明确了后安煤矿沉陷区四周边坡的稳定状态与临界坡角,其成果为该区域的精准治理与安全复垦奠定了坚实的定量基础。

## 5. 工程建议与治理措施

基于边坡稳定性分析结果,为确保后安煤矿沉陷区治理工程的安全性、经济性与长效性,本文提出以下分层、分区的工程建议与治理措施。

### (1) 差异化削坡与坡形优化

南帮、西帮、东帮:在保证最终边坡角不大于33°的前提下进行削坡。建议采用阶梯形放坡,设置宽度不小于2 m的安全平台,以分段降低坡高,拦截部分坡面滚石,并为后续植被恢复提供条件。

北帮:严格控制最终边坡角不超过30°。鉴于其稳定性相对更差,建议适当增加平台宽度和数量,必要时可采用更缓的坡率。

削坡工程产生的土石方应优先用于沉陷坑的回填,遵循内排土原则,以减少外购土方量和二次占地。

### (2) 支挡与加固结构

对于局部稳定性不足或因场地限制无法充分放坡的区段,应考虑设置支挡结构。在坡脚处利用削坡产生的岩土进行反压,增加抗滑力矩,是一种经济有效的措施。对于南帮等潜在滑体推力较大的区域,可在坡脚或潜在滑面出口附近布设抗滑桩。对于高度较小的边坡或平台边缘,可设置浆砌石或生态袋挡土墙。在岩体较为破碎的强风化边坡区域,可采用锚杆(索)与混凝土格构梁相结合的支护体系,既可提高

浅表层稳定性，也利于坡面绿化。

### (3) 地表与地下排水系统

鉴于敏感性分析表明内摩擦角对稳定性影响显著，而水是降低  $\varphi$  值的主要因素，因此建立完善的排水系统至关重要。在沉陷区边坡外围设置环形截水沟，拦截坡体以外的地表径流。沿边坡平台内侧设置纵向排水沟，并与坡面上的急流槽相连，将汇水有序导排至坡脚。在最终坡脚处设置排水明沟，确保坡面水及时排走。对于地下水相对富集的局部地段，可考虑设置仰斜式排水孔，以降低坡体内地下水位。

## 6. 结论

本研究围绕后安煤矿采煤沉陷区的边坡稳定性问题，综合运用工程地质分析、室内试验与极限平衡理论，系统性地开展了边坡角确定与稳定性评价研究，主要获得以下结论：

- (1) 基于 Bishop 极限平衡法，确定了后安煤矿沉陷区四周边坡在满足预定安全储备下的最终稳定边坡角。具体结果为：南帮、西帮、东帮的最终边坡角为  $33^\circ$ ，北帮为  $30^\circ$ 。各边坡在此角度下的计算安全系数均达到或超过预设目标值(南帮 1.209，北帮 1.31，西帮 1.221，东帮 1.217)，为沉陷区边界圈定与复垦工程设计提供了关键参数。
- (2) 参数敏感性分析表明，边坡稳定性对岩土体内摩擦角  $\varphi$  的变化更为敏感，其影响显著大于粘聚力  $c$ 。在未来的边坡治理与长期监测中，应重点关注由于雨水入渗、风化作用等导致滑带附近岩土体内摩擦角弱化的风险，并采取有效的防水、排水措施。
- (3) 本文将理论分析、试验参数与工程规范相结合，形成了一套针对采煤沉陷区边坡稳定性评价的实用方法。所确定的最终边坡角不仅为边坡自身的加固治理(如削坡、支护)提供了直接依据，也为后续治理工程中黄土覆盖体积的科学计算奠定了坚实基础，实现了稳定性评价与治理工程的有机结合。

## 参考文献

- [1] 高永. 采煤区土壤治理与修复[M]. 北京：科学出版社, 2016.
- [2] Bishop, A. W. (1955) The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, **5**, 7-17.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>
- [3] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京：人民交通出版社, 2007.
- [4] Cheng, Y.M., Lansivaara, T. and Wei, W.B. (2007) Two-Dimensional Slope Stability Analysis by Limit Equilibrium and Strength Reduction Methods. *Computers and Geotechnics*, **34**, 137-150.  
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.011>
- [5] 付士根. 基于模糊随机可靠性的边坡稳定性评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(8): 98-101.
- [6] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.