

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230272

露天矿山岩体质量精细化表征及边坡稳定性分析

孙东东^{1,2}, 杨天鸿^{1,2}, 刘飞跃^{1,3}, 刘洋^{1,2}

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 安徽理工大学 安徽省关闭/废弃矿井资源开发利用工程研究中心, 安徽 淮南 232001)

摘要: 在进行边坡岩体质量评价和稳定性分析时,通常将岩体简化为均质材料,而天然岩体实际上具有非均质的特征.针对该问题,提出了一种考虑非均质性的岩体质量精细化表征及力学参数建模方法.以乌拉根铅锌矿为例,详细阐述了岩体力学参数精细化建模的流程.基于所建立的精细化力学参数模型,分别采用均匀和非均匀两种岩体力学参数对南帮进行稳定性分析,结果表明,采用非均匀力学参数进行计算可以更准确地反映露天边坡稳定性的真实情况.本研究所建立的精细化块体模型能够反映露天边坡中的薄弱及不稳定区域,可为边坡岩体质量评价、稳定性分析及支护施工设计等提供科学有效的解决途径.

关键词: 露天矿;岩体质量;精细化建模;块体模型;边坡稳定性分析

中图分类号: TD 854 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)04-0097-09

Detailed Characterization of Rock Mass Quality and Slope Stability Analysis for Open-Pit Mines

SUN Dong-dong^{1,2}, YANG Tian-hong^{1,2}, LIU Fei-yue^{1,3}, LIU Yang^{1,2}

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Anhui Engineering Research Center of Exploitation and Utilization of Closed/Abandoned Mine Resources, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China. Corresponding author: YANG Tian-hong, E-mail: yangtianhong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Rock masses are often simplified as homogeneous materials when evaluating rock mass quality and analyzing slope stability. However, natural rock masses actually exhibit heterogeneous characteristics. To address this issue, a detailed characterization of rock mass quality and a modeling method for mechanical parameters considering heterogeneity are proposed. Taking the Wulagen lead-zinc mine as an example, the process of the detailed modeling method for rock mass mechanical parameters is elaborated in detail. Based on the established detailed mechanical parameter model, a stability analysis of the southern slope was conducted using both homogeneous and heterogeneous rock mass mechanical parameters. The results indicate that the calculations using heterogeneous mechanical parameters can more accurately reflect the true stability conditions of open-pit slopes. The detailed block model established in this study can identify weak and unstable areas in open-pit slopes, providing a scientific and effective solution for rock mass quality evaluation, stability analysis, and support design.

Key words: open-pit mine; rock mass quality; detailed modeling; block model; slope stability analysis

露天开采具有矿石回收率高、生产效率高和规模大等优点.目前,我国矿山采用露天开采的

比例较大,按矿石年产量计算,铁矿露天开采占77%,有色金属矿露天开采约占52%,煤矿露天开

收稿日期: 2023-09-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2903902); 国家自然科学基金资助项目(U1903216).

作者简介: 孙东东(1991—),男,辽宁海城人,东北大学博士研究生; 杨天鸿(1968—),男,辽宁抚顺人,东北大学教授,博士生导师.

采占 17.8%, 建材类矿山几乎全部采用露天开采^[1-2].

露天边坡岩体质量评价及稳定性分析一直是露天矿安全开采的研究热点和重点^[3-4]. 目前, 在进行露天矿边坡稳定性评价时, 往往将同一种岩性或一个较大区域内的岩体看作是均质的, 并在数值模拟计算中赋予相同的力学参数, 如: 柴利蒙等^[5]采用 Phase2 软件计算了金宝铁矿加固前后露天边坡的安全系数; Li 等^[6]基于强度折减法的节理有限元法研究了抚顺西露天煤矿软岩硬岩互层条件下的边坡破坏机理; Sun 等^[3]运用 COMSOL 软件对南芬露天矿层状边坡进行了三维稳定性计算, 并研究了其滑坡的发展和演化过程. 上述研究并没有充分考虑边坡岩体的非均质性, 而岩体作为一种天然地质材料, 具有非均质特性^[7-8], 其物理力学参数具有空间变异性^[9]. 因此, 在露天边坡数值计算过程中需要充分考虑岩体的非均质性, 以确保岩质边坡稳定性分析的准确性.

岩体质量评价是从宏观上表征岩体的非均匀性. 当前比较常用的评价方法包括: 岩石质量指标 (rock quality designation, RQD)^[10]、岩体评分系统 (rock mass rating, RMR)^[11]、地质强度指标 (geological strength index, GSI)^[12]、Q 分级法^[13] 及我国《工程岩体分级标准》所给出的 BQ 分级法^[14]. 然而, 上述方法大多无法与岩体力学参数建立定量关系, 仅依靠地质区划难以充分反映岩体性质的空间变异性. 总体而言, 在考虑实际数据可得性的前提下, 需结合更多工程参数提升岩体质量分级的定量程度. Liu 等^[7]通过经验公式将 RQD 值与节理体密度进行转换, 得到 GSI 值, 并基于地质统计学方法建立了非均匀岩体质量块体模型. 但当缺少节理体密度相关信息时, 则需要进一步研究以寻求快速建立精细化的岩体质量模型和获取力学参数的方法. 目前, 学者对 RMR 与 GSI 的空间变异性展开研究, 进而构建起岩体质量和力学参数的关系, 以此表征岩体性质的空间变异性^[15-18]. 基于地质统计学的手段, 能够将实测数据间的空间关联性纳入考虑范围, 对岩体的这种空间变异性有着较好的表征作用^[19-21]. 因此, 本文使用经验公式将 RMR 转换为 GSI.

综上所述, 本文提出了一种考虑非均质性的岩体质量精细化表征及力学参数建模方法. 以乌拉根铅锌矿为实际案例, 对该方法进行了详细阐述, 并对其南帮边坡进行了稳定性分析. 首先, 基于深度学习识别钻孔岩心图像, 进而计算出

该岩心的 RQD 值, 采用空间插值方法建立研究区域的 RQD 块体模型; 然后, 结合地勘数据、现场调查及实验室力学试验结果, 建立了精细化的非均匀岩体质量等级 RMR 块体模型; 最后, 使用经验公式将 RMR 值转换为地质强度指标 GSI, 运用 Hoek-Brown 方法^[22-24]构建基于实测数据的岩体力学参数块体模型. 在此基础上, 选取典型剖面, 采用极限平衡法对乌拉根铅锌矿南帮边坡进行了稳定性分析.

1 工程背景

新疆紫金锌业乌拉根铅锌矿 (简称“乌拉根铅锌矿”) 位于新疆乌恰县. 地形西北、西南高, 东南低, 呈马蹄形, 海拔最低处 2 000 m, 最高处 2 517 m. 乌拉根铅锌矿开采矿种为锌矿和铅矿, 采用露天开采方式^[25]. 设计露天最终境界上口尺寸为 3 055 m×1 080 m, 境界沿走向形成 3 个坑底, 坑底标高为: 西坑 1 819 m, 中坑 1 969 m, 东坑 2 059 m; 露天采场最大采深: 西坑 555 m, 中坑 435 m, 东坑 270 m. 最终边坡角: 上盘 (北帮) 43.5°~47.5°, 下盘 (南帮) 38°~42.7°, 东帮 45.0°~46.0°, 西帮 36.0°~44.0°, 如图 1 所示.

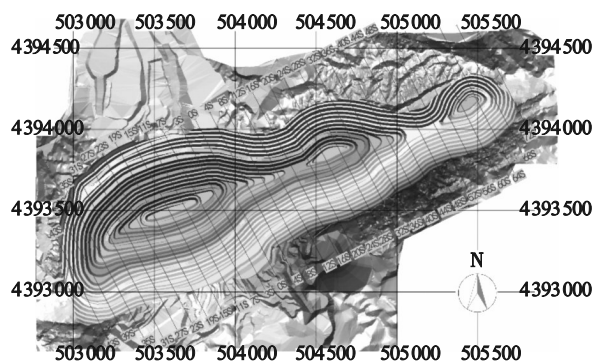


图 1 乌拉根铅锌矿最终境界矿坑形态

Fig. 1 Final boundary pit morphology of the Wulagen lead-zinc mine

目前, 乌拉根铅锌矿处于半山坡半凹陷露天开采阶段, 采坑最低处已降至 1 969 m 标高, 最高处为 2 344 m 标高; 南帮、北帮、东帮、西帮边坡的最高标高分别为 2 284, 2 209, 2 344, 2 314 m. 由乌拉根铅锌矿矿体及围岩赋存形态可知, 南帮为顺倾边坡, 北帮为反倾边坡. 台阶高度为 15 m, 并段后为 30 m, 台阶坡面角上盘为 70°, 其他位置为 65°.

矿山开采至今, 北帮相对稳定, 未出现边坡失稳情况, 但南帮最终靠帮台阶已多次发生楔体滑坡, 如图 2 所示. 由于滑坡区域 S1 和 S4 的边坡

失稳可能破坏矿山运输道路,影响矿山的正常生产,因此当前重点关注区域为S1和S4,亦是本文边坡分析的主要研究区域.S1区域位于南帮边坡

27#勘探线附近,2 134~2 209 m平台;S4区域位于11#勘探线附近,2 149~2 239 m平台.

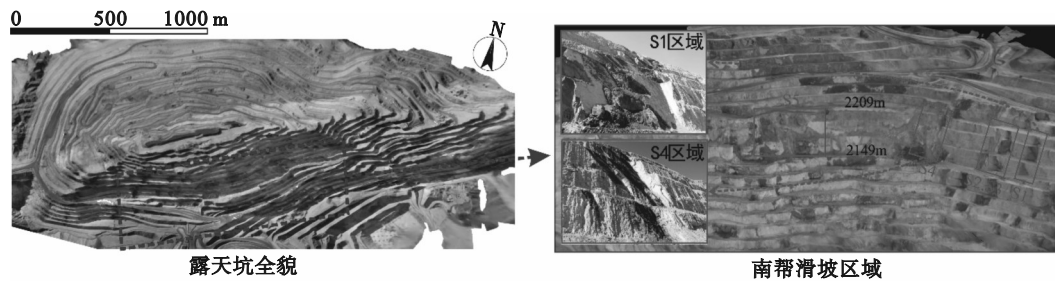


图2 乌拉根铅锌矿露天坑及南帮滑坡区域实景图

Fig. 2 Photographs of the Wulagen lead-zinc open-pit mine and southern slope landslide area

2 精细化岩体质量块体模型

露天矿山岩体质量精细化表征及力学参数建模方法主要由以下几个部分组成:①基于深度学习的钻孔岩心RQD自动识别并建立RQD块体模型;②基于实测及试验数据建立RMR块体模型;③基于经验公式将RMR转换为GSI,并相应建立GSI块体模型;④基于Hoek-Brown方法表征岩体力学参数块体模型,然后根据工程实际需求进行边坡稳定性数值计算.具体流程如图3所示.

以获取岩心;同时,随着矿山的开采还会根据生产需要进行相应的补勘,增加地质钻孔.这些地质钻探工程能够提供大量的岩心照片,非常适合采用深度学习方法自动识别岩体结构信息并开展岩体质量评价.鉴于这一特性,运用RQD对矿山岩体实施精细化的质量评价.

从乌拉根铅锌矿采集及整理了72个钻孔共计5 010幅岩心照片,每个岩心盒对应一张照片,累计长度达26 627.12 m.首先,对岩心照片进行处理,矫正在拍摄过程中造成的图像扭曲,并去除岩心盒外围多余部分;其次,使用实例分割的深度神经网络Mask R-CNN从钻孔岩心照片中自动识别出单排岩心(图4a);然后,同样基于该深度学习方法,识别出长度≥10 cm的岩心段(图4b),进而根据公式(1)计算出RQD值;最后,在3DMine软件中编录形成“定位表-测斜表-RQD表”格式的钻孔数据库.其中,定位表与测斜表决定了钻孔在三维空间中的轨迹,RQD表记录了从钻孔岩心照片中获取的RQD值.上述方法的具体介绍参见文献[26].

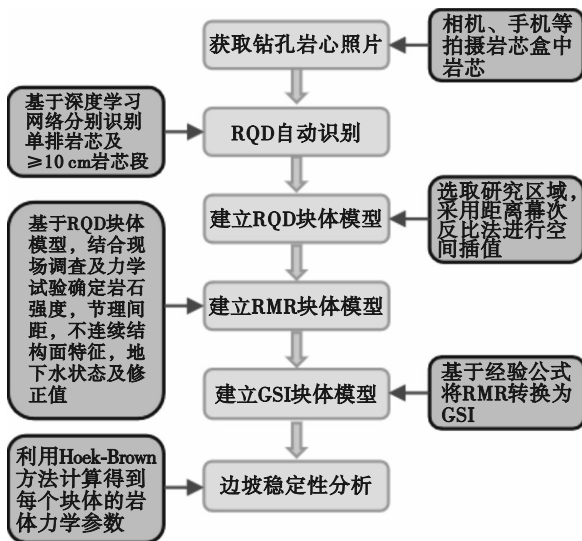


图3 精细化建模及数值模拟流程图

Fig. 3 Flow diagram of detailed modeling and numerical simulation

2.1 RQD自动识别及建立块体模型

对于矿山工程来说,在开采之前要进行一系列的勘察工作,其中一个重要的勘察手段是地质钻探,即在设定的勘探线上钻取若干个地质钻孔

$$RQD = \frac{\sum_{i=1}^m l_i}{L} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m 为岩心盒中长度≥10 cm的岩心段数目; l_i 为每个长度≥10 cm岩心段的长度; L 为钻孔进尺长度.

根据钻孔分布情况及矿山实际需要,圈定的乌拉根铅锌矿建模区域为2 800 m×1 300 m×1 200 m(长×宽×高),如图5所示.在3DMine软件中建立方位角为北偏东64°的旋转块体模型,块体单元尺寸为15 m,共计1 065 117个块体.基于所识别的各钻孔RQD值,根据地质统计学方法^[15],采用距离幂次反比法对块体模型中各个单

元的 RQD 值进行估值,得到的乌拉根铅锌矿 RQD 块体模型如图 6 和图 7 所示.

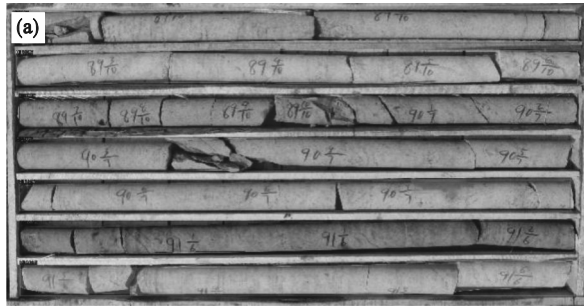


图 4 岩心照片的 RQD 自动识别

Fig. 4 Automatic identification of RQD in core photos
(a)—单排岩心; (b)—长度≥10cm 的岩心段.

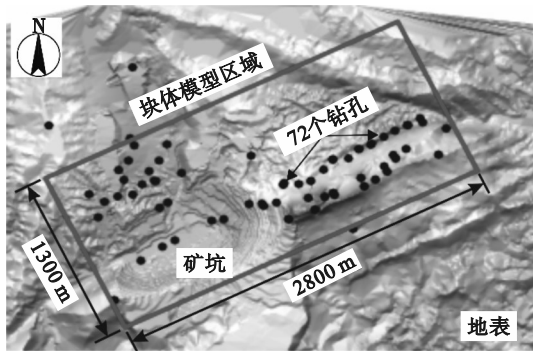


图 5 建模区域

Fig. 5 Modeling area

从图 6 和图 7 所展现的块体模型及剖面中可以看到,露天矿坑的东南侧存在低 RQD 区域,岩体质量较差,对将来的边坡管理及矿山安全生产可能有不利影响.同时,收集了该区域钻孔 SZK3602 的岩心照片(图 8),可以得出,岩心总体较为破碎,大部分呈现粉状,RQD 值接近于 0.钻孔岩心照片与该区域的 RQD 值具有很好的一致性,证明了基于深度学习的钻孔岩心识别及 RQD 精细化建模方法的准确性和适用性.

2.2 建立 RMR 块体模型

RMR 分级方法通过多因素评分并求代数和来对岩体质量进行评价.参与评分的 5 个因素分

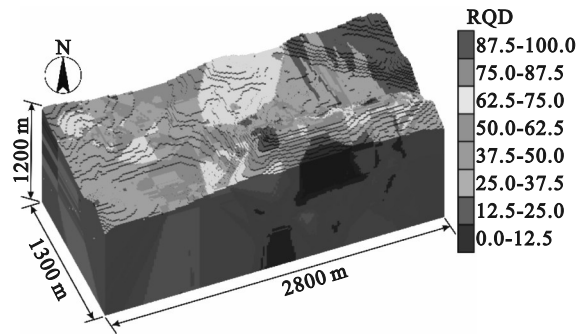


图 6 RQD 块体模型

Fig. 6 Block model of RQD

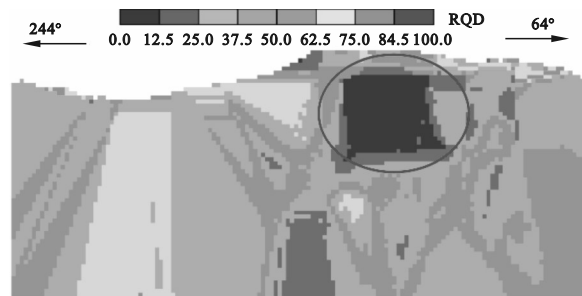


图 7 RQD 块体模型剖面

Fig. 7 Block model profile of RQD

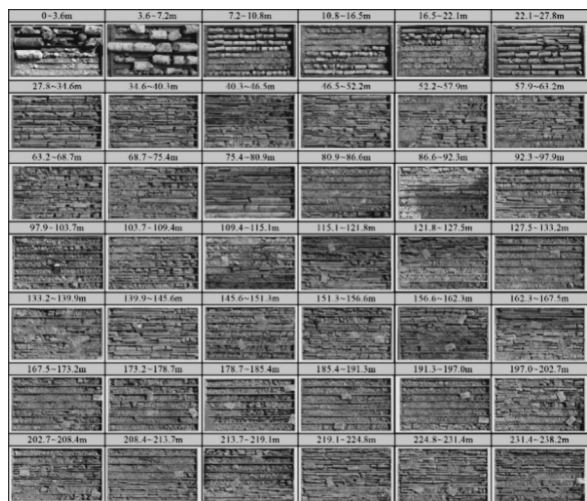


图 8 SZK3602 钻孔岩心照片

Fig. 8 SZK3602 borehole core photos

别为:完整岩石强度(A1)、RQD(A2)、节理间距(A3)、不连续结构面特征(A4)以及地下水状态(A5).在之后的修正版本中,不但对评分标准进行了修正,还对第 4 项结构面特征进行了分解,即节理性状细分为节理长度、间隙、粗糙度、充填物性质与厚度以及风化程度^[27].在本文中选用节理方向指标(B)对评价结果进行修正,如式(2)所示.

$$RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B. \quad (2)$$

按照不同岩性将乌拉根铅锌矿研究区域划分为 11 个工程地质分区(图 9).根据岩石力学试

验结果和工程地质调查获取RMR分级系统中其他评价因子(不含RQD值)在每个分区内的量化分值,见表1.在3DMine中,将自动识别得到的RQD值换算成RMR评价体系中所对应的量化分值,根据式(2)与表1所计算的分值累加,得到每个块体单元的RMR值,建立的RMR块体模型如图10所示.

表1 RMR分级系统评价因子(不含RQD值)
Table 1 RMR grading system evaluation factor (excluding RQD)

| 岩性 | A1 | A3 | A4 | A5 | B |
|-------|----|----|----|----|-----|
| 含砾砂岩 | 2 | 15 | 17 | 7 | -5 |
| 中风化砂岩 | 4 | 15 | 18 | 4 | -5 |
| 含矿砂岩 | 2 | 15 | 20 | 4 | -5 |
| 微风化砂岩 | 7 | 15 | 20 | 10 | -5 |
| 微风化泥岩 | 4 | 15 | 20 | 10 | -10 |
| 灰岩 | 7 | 10 | 18 | 10 | -5 |
| 中风化石膏 | 7 | 15 | 18 | 10 | -5 |
| 砾岩 | 4 | 15 | 20 | 7 | -10 |
| 长石砂岩 | 2 | 15 | 18 | 7 | -10 |

根据RMR分级结果,岩体质量位于35~67,主要属于一般(41<RMR<60),占比为89.24%;其次为差(21<RMR<40)和好(61<RMR<80),占比分别为8.96%和1.80%.

2.3 建立GSI块体模型

在岩体分级系统中,地质强度指标GSI与岩体力学参数是相关联的,通过定量的岩体分级系

统,可以减少力学参数获取对工程经验的依赖,通过经验公式(3)将RMR转换为GSI^[28].

$$GSI = RMR - 5, GSI \geq 18 \text{ 或 } RMR \geq 23. \quad (3)$$

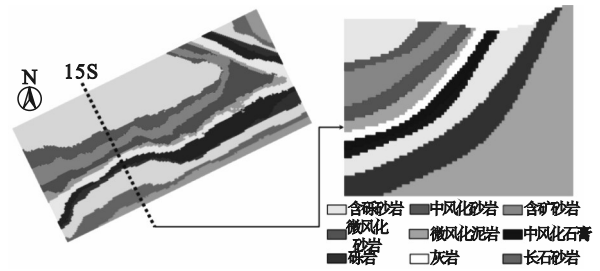


图9 岩层分布图

Fig. 9 Rock layer distribution

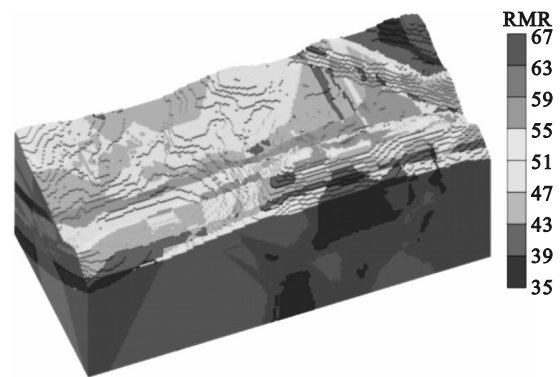


图10 RMR块体模型

Fig. 10 Block model of RMR

在3DMine中建立GSI块体模型,并分别利用当前境界及最终境界实体模型进行约束得到当前境界和最终境界的GSI块体模型,如图11所示.

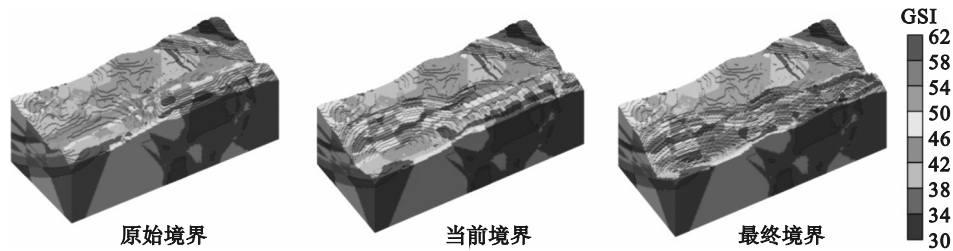


图11 GSI块体模型

Fig. 11 Block model of GSI

结合图9和图11可以看出,岩体质量在同一岩性中的空间分布既体现出非均匀性又表现出连续性;同时,在岩性分界面附近表现出较强的变异性.根据GSI分级结果得出,岩体质量位于30~62,乌拉根铅锌矿南帮边坡岩体质量较差,北帮边坡岩体质量相对较好,南帮岩体的GSI位于30~42,属于“块状/扰动”岩体.岩体质量分级结果也反映了乌拉根铅锌矿边坡失稳的情况,即滑坡均发生在南帮,而北帮未发生滑坡.因此,在建立

岩体力学参数块体模型时,应重点研究南帮区域.

2.4 建立岩体力学参数块体模型

本文采用H-B方法对各个块体单元内的岩体力学参数进行评价.H-B(Hoek-Brown)方法包括6个输入参数,即GSI,岩石H-B指标 m_i ,岩石单轴抗压强度 σ_c ,爆破扰动系数 D ,岩体密度 ρ ,边坡高度 H ;同时具有5个输出参数,包括岩体抗压强度 σ_c ,岩体抗拉强度 σ_t ,岩体弹性模量 E_m ,岩体黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ .为了获取非均匀的岩体

力学参数场,需在每个块体单元上进行H-B运算,具体的公式可参照文献[24].本文基于MATLAB开发了H-B批量处理程序,对上述参数进行计算.

6个输入参数中各块体的GSI值可在上述研究中得到; σ_c 和 ρ 可在实验室试验测得;乌拉根铅锌矿采用大区微差爆破,边坡帮帮时采用预裂爆破技术,因此爆破对边坡扰动较小, D 取值为0.4; H 通过各块体单元的高程 Z 值确定;H-B指标 m_i 的取值见表2.

使用H-B方法获得的乌拉根铅锌矿岩体力学参数块体模型如图12所示.可以看出,即使是相同的岩性样本,其变形参数(图12b)和强度参

数(图12c)也具有较强的变异性.

表2 H-B指标 m_i 取值
Table 2 H-B index values of m_i

| 岩性 | m_i |
|-------|-------|
| 含砾砂岩 | 20 |
| 中风化砂岩 | 17 |
| 含矿砂岩 | 19 |
| 微风化砂岩 | 20 |
| 微风化泥岩 | 8 |
| 灰岩 | 9 |
| 中风化石膏 | 14 |
| 砾岩 | 12 |
| 长石砂岩 | 13 |

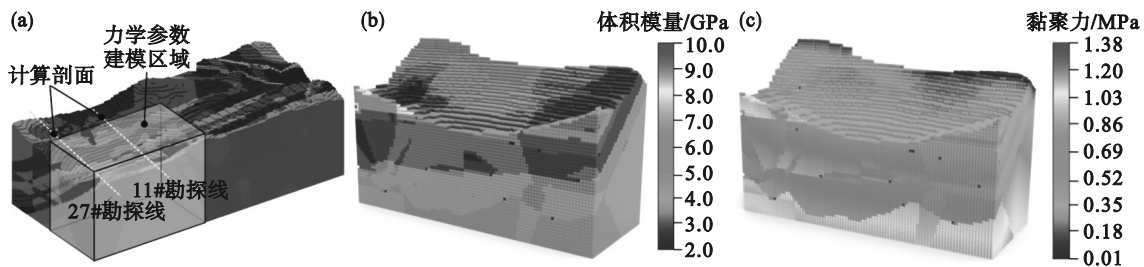


图12 力学参数块体模型

Fig. 12 Block model of mechanical parameters

(a)—力学参数块体模型(整体);(b)—体积模量块体模型(研究区域);(c)—黏聚力块体模型(研究区域).

3 基于精细化力学参数块体模型的边坡稳定性分析

3.1 数值模拟方案

以S1和S4区域为研究对象,选取典型剖面(27#和11#勘探线,如图12a所示)对边坡进行稳定性分析,以验证精细化岩体力学参数块体模型的适用性.27#勘探线几何模型长500 m,高330 m,共包含5种岩性,如图13a所示;11#勘探线几何模型长500 m,高360 m,共包含3种岩性,如图13b所示.地下水位约在2159 m处.

在露天矿边坡稳定性分析中,极限平衡法由于其简便性和准确性得到了广泛的应用^[29].本文采用有限元数值分析软件SLOPE/W中嵌入的Morgenstern-Price法,指定符合工程实际的滑面线进行极限平衡计算.Morgenstern-Price法的特点是为了消除计算方法中的误差,考虑了全部平衡条件与边界条件,滑面形状为任意的,基于力的平衡原则求解安全系数.在此过程中,使用Mohr-Coulomb方法而忽略了非线性失效准则,因此,在边坡稳定性分析中只考虑岩体的黏聚

力、内摩擦角和容重.当不考虑岩体非均质性并采用均匀力学参数(图13)进行计算时,其参数取值基于实验室力学试验结果,并通过H-B准则计算得出,见表3;而当考虑岩体非均质性时,则采用本文所建立的精细化块体模型导出的岩体力学参数.

表3 力学参数取值
Table 3 Mechanical parameter values

| 岩性 | 黏聚力 | 内摩擦角 | 容重 |
|-------|-----|-------|--------------------|
| | kPa | (°) | kN·m ⁻³ |
| 微风化泥岩 | 674 | 32.00 | 25.69 |
| 长石砂岩 | 355 | 31.43 | 23.26 |
| 含砾砂岩 | 304 | 31.28 | 25.09 |
| 砾岩 | 433 | 37.91 | 26.74 |
| 中风化石膏 | 477 | 36.50 | 29.39 |

3.2 结果分析

边坡设计安全系数是评价边坡稳定性的一项重要指标.依据《非煤露天矿边坡工程技术规程》的规定,考虑目前南帮边坡整体垂高为315 m且为非工作帮,同时历史滑坡未出现人员伤亡情况,将边坡安全等级归类为Ⅱ级,在荷载条件(自

重+地下水+爆破振动力)下,边坡安全储备系数为1.18~1.13(见表4)。

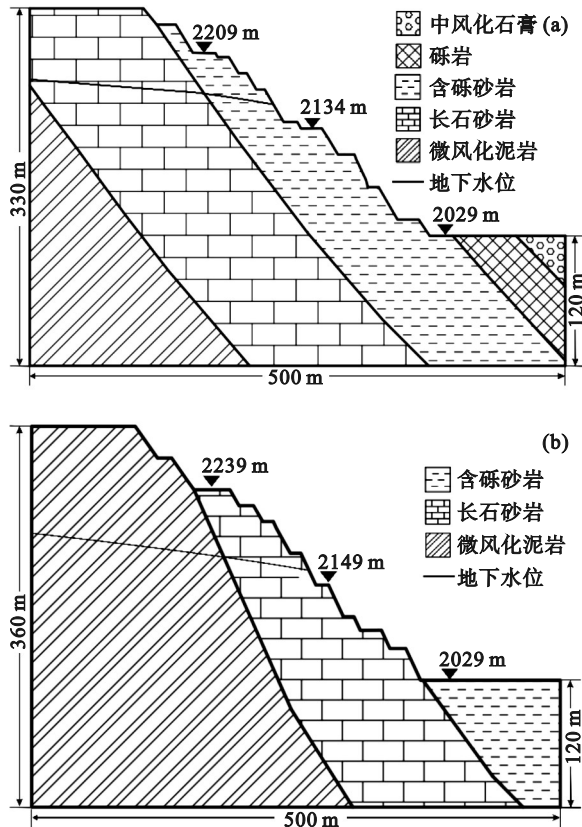


图13 计算剖面

Fig. 13 Calculation profile

(a)—27#勘探线剖面; (b)—11#勘探线剖面.

表4 总体边坡设计安全系数

Table 4 Design safety factors for slope

| 边坡工程安全等级 | 自重+地下水+爆破振动力 |
|----------|--------------|
| I | 1.23~1.18 |
| II | 1.18~1.13 |
| III | 1.13~1.08 |

图14和图15为两个典型剖面中均质岩体与非均质岩体的边坡稳定性分析结果.当采用均匀的岩体力学参数时,27#剖面 and 11#剖面边坡的安全系数分别为1.164和1.184(图14a和图15a),均大于荷载条件下安全系数下限(1.13),可以认为边坡处于安全状态;当考虑岩体的非均匀性时,27#剖面 and 11#剖面边坡的安全系数分别为0.964和0.982(图14b和图15b),均小于荷载条件下安全系数下限,认为出现了边坡失稳,这与现场调查结果一致.

图16为采用非均匀力学参数进行边坡稳定性数值分析时滑面处黏聚力及内摩擦角的分布特征.可以看到,在同种岩性条件下,黏聚力及内

摩擦角仍不相同,体现了岩体力学参数的不均匀分布特征.考虑到岩体作为一种天然的非均匀地质材料,与仅采用相同的力学参数相比,显然采用非均匀力学参数更为合理.

以上研究表明,在数值模拟计算过程中,均匀的力学参数过高地估计了边坡的稳定性;而考虑岩体力学参数的非均匀性,则可以得到更为合理的稳定性分析结果.因此,与简单的岩性划分相比,采用本文所建立的精细化力学参数块体模型可以更准确地反映露天边坡岩体的真实情况.

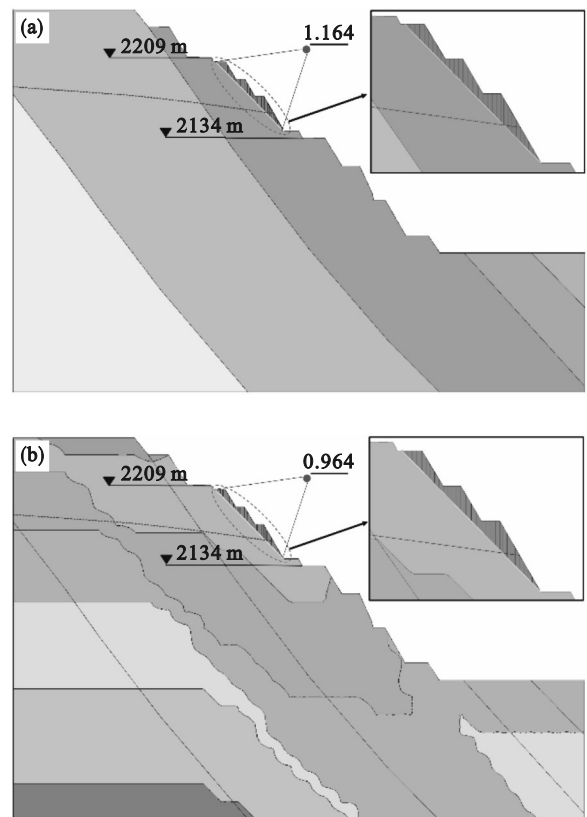
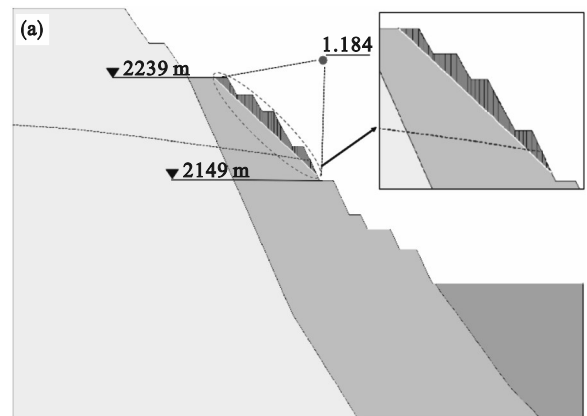


图14 27#剖面边坡稳定性分析结果

Fig. 14 Slope stability analysis results of the 27# profile

(a)—均匀岩体; (b)—非均匀岩体.



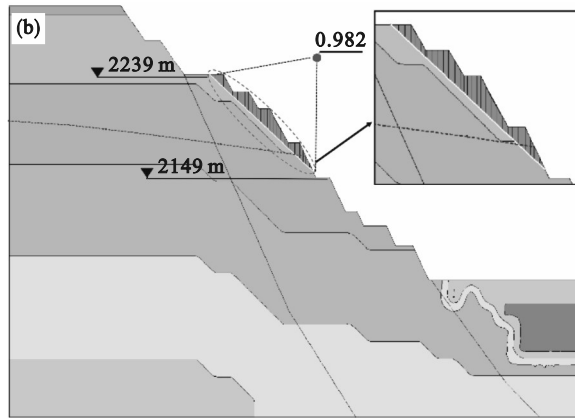


图 15 11#剖面边坡稳定性分析结果
Fig. 15 Slope stability analysis results of the 11# profile
(a)—均匀岩体; (b)—非均匀岩体.

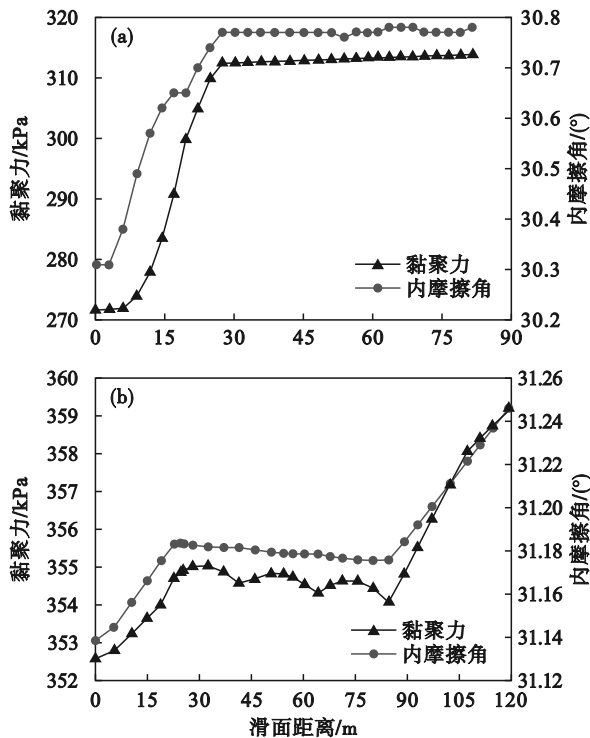


图 16 滑面上力学参数分布
Fig. 16 Distribution of mechanical parameters on the sliding surface
(a)—27#剖面; (b)—11#剖面.

4 结 论

1) 针对露天矿边坡稳定性分析中岩体非均质性的科学问题, 本文提出了一种能够精细化表征露天矿山岩体质量及力学参数的建模方法. 与已有研究成果相比, 该方法可在缺少岩体节理体密度的条件下, 采用经验公式得到 GSI 值, 进而从有限的矿山实测数据中获得更详细的非均匀力学参数, 建立精细化的岩体质量模型.

2) 以新疆乌拉根铅锌矿为例, 详细阐述了建模流程, 并对边坡岩体质量进行了评价, 结果表明南帮边坡岩体质量较差, 属于“块状/扰动”岩体; 北帮边坡岩体质量相对较好. 矿山实际情况中, 滑坡均发生在南帮, 而北帮未发生滑坡, 验证了本文提出的建模方法的适用性和准确性.

3) 采用均匀和非均匀两种岩体力学参数分别对乌拉根铅锌矿南帮进行边坡稳定性分析. 结果表明, 与采用均匀力学参数相比, 采用非均匀力学参数计算所得, 的安全系数更低. 通过与采场实际情况对比可知, 采用非均匀力学参数进行计算可以更准确地反映露天边坡稳定性的真实情况.

参考文献:

- [1] 章林. 我国金属矿山露天采矿技术进展及发展趋势[J]. 金属矿山, 2016(7): 20-25.
(Zhang Lin. Technical progress and development trend of open pit mining in metal mines of China [J]. *Metal Mine*, 2016(7): 20-25.)
- [2] 赵浩, 毛开江, 曲业明, 等. 我国露天煤矿无人驾驶及新能源卡车发展现状与关键技术[J]. 中国煤炭, 2021, 47(4): 45-50.
(Zhao Hao, Mao Kai-jiang, Qu Ye-ming, et al. Development status and key technology of driverless and new energy trucks in open-pit coal mine in China [J]. *China Coal*, 2021, 47(4): 45-50.)
- [3] Sun D D, Deng W X, Yang T H, et al. A case study integrating numerical simulation and InSAR monitoring to analyze bedding-controlled landslide in Nanfen open-pit mine [J]. *Sustainability*, 2023, 15(14): 11158.
- [4] 杨天鸿, 王赫, 董鑫, 等. 露天矿边坡稳定性智能评价研究现状、存在问题及对策[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2277-2295.
(Yang Tian-hong, Wang He, Dong Xin, et al. Current situation, problems and countermeasures of intelligent evaluation of slope stability in open pit [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2277-2295.)
- [5] 柴利蒙, 孙东东, 杨天鸿, 等. 金宝铁矿南帮顺倾边坡滑坡机理研究及治理工程实践[J]. 黄金, 2022, 43(12): 33-38.
(Chai Li-meng, Sun Dong-dong, Yang Tian-hong, et al. Study on landslide mechanism and treatment engineering practice of south consequent slope in Jinbao iron mine [J]. *Gold*, 2022, 43(12): 33-38.)
- [6] Li J D, Gao Y, Yang T H, et al. Integrated simulation and monitoring to analyze failure mechanism of the anti-dip layered slope with soft and hard rock interbedding [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(9): 1147-1164.
- [7] Liu F Y, Yang T H, Deng W X, et al. Geostatistics-block-based characterization of heterogeneous rock mass and its application on ultimate pit limit optimization: a case study [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(2): 1683-1700.
- [8] Hoek E, Karakas A. Practical rock engineering [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2008, 14(1): 55-58.

- [9] Li J, Gao Y, Yang T, et al. Effect of water on the rock strength and creep behavior of green mudstone [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 101.
- [10] Deere D U, Deere D W. Rock quality designation (RQD) after twenty years [M]. Vicksburg: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1989.
- [11] Singh B, Goel R K. Rock mass classification: a practical approach in civil engineering [M]. Amsterdam: Elsevier, 1999.
- [12] Sonmez H, Ulusay R. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1999, 36(6): 743-760.
- [13] Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support [J]. *Rock Mechanics*, 1974, 6(4): 189-236.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014 [S]. Beijing: China Planning Press. 2014.)
- [15] Mayer J M, Stead D. A comparison of traditional, step-path, and geostatistical techniques in the stability analysis of a large open pit [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(4): 927-949.
- [16] Eivazy H, Esmaili K, Jean R. Modelling geomechanical heterogeneity of rock masses using direct and indirect geostatistical conditional simulation methods [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(12): 3175-3195.
- [17] Egaña M, Ortiz J M. Assessment of RMR and its uncertainty by using geostatistical simulation in a mining project [J]. *Journal of GeoEngineering*, 2013, 8(3): 83-90.
- [18] Pinheiro M, Vallejos J, Miranda T, et al. Geostatistical simulation to map the spatial heterogeneity of geomechanical parameters: a case study with rock mass rating [J]. *Engineering Geology*, 2016, 205: 93-103.
- [19] Griffiths D V, Huang J S, Fenton G A. Influence of spatial variability on slope reliability using 2-D random fields [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(10): 1367-1378.
- [20] Pinheiro M, Emery X, Miranda T, et al. Modelling geotechnical heterogeneities using geostatistical simulation and finite differences analysis [J]. *Minerals*, 2018, 8(2): 52.
- [21] 胡小荣, 唐春安. 岩土力学参数随机场的空间变异性分析及单元体力学参数赋值研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 59-63. (Hu Xiao-rong, Tang Chun-an. Spatial variation analysis on the random field of mechanical parameters for rock and soil and the parameter estimation of elements [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(1): 59-63.)
- [22] Hoek E, Brown E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1980, 106(9): 1013-1035.
- [23] Hoek E, Wood D, Shah S. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses [C]// Proceedings of the Rock Characterization, Symposium of ISRM. London: British Geotechnical Society, 1992: 209-214.
- [24] 朱合华, 张琦, 章连洋. Hoek-Brown强度准则研究进展与应用综述 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1945-1963. (Zhu He-hua, Zhang Qi, Zhang Lian-yang. Review of research progresses and applications of Hoek-Brown strength criterion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(10): 1945-1963.)
- [25] 杨天鸿, 孙东东, 胥孝川, 等. 新疆大型露天矿绿色安全高效开采存在问题及对策 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 1-12. (Yang Tian-hong, Sun Dong-dong, Xu Xiao-chuan, et al. Problems and countermeasures in green, safe and efficient mining of large-scale open-pit mines in Xinjiang [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(1): 1-12.)
- [26] 刘飞跃, 刘一汉, 杨天鸿, 等. 基于岩芯图像深度学习的矿山岩体质量精细化评价 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 968-974. (Liu Fei-yue, Liu Yi-han, Yang Tian-hong, et al. Meticulous evaluation of rock mass quality in mine engineering based on machine learning of core photos [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(5): 968-974.)
- [27] Bieniawski Z T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering [M]. New York: Wiley, 1989.
- [28] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1165-1186.
- [29] Zheng W B, Zhuang X Y, Tannant D D, et al. Unified continuum/discontinuum modeling framework for slope stability assessment [J]. *Engineering Geology*, 2014, 179: 90-101.