断层面分割露天矿边坡精细化建模及稳定性分析

陈应显[1,2]，王璞[1*]，周萌[3]，朱喆[1]，刘光伟[1]，迟晓东[1]

1. 辽宁工程技术大学矿业学院，辽宁 阜新 123000；
2. 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院，内蒙古 鄂尔多斯 017004；
3. 威海市海王旋流器有限公司，山东 威海 264200

第一作者，E-mail：lntucyx@163.com

* 通信作者，E-mail：w15291979278@163.com

2024-05-21 收稿；2024-09-27 修回；2024-09-29 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(52374123；52204135)；辽宁省教育厅基本科研项目(LJ222410147010；LJ242410147049)；辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院校地科技合作培育项目(YJY-XD-2024-B-008)

中图分类号：P628；TD824.7　　文章编号：2096-8523(2026)01-0314-10　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240273

摘　要：露天矿边坡断层带是边坡三维稳定性分析及数值模拟的重点，由于地质断层面将矿岩三维空间分割成复杂空间面域，成为露天矿边坡三维精细化网格生成的难点。为了提高含断层露天矿边坡稳定性分析的准确度，需要在对含断层露天矿边坡准确三维建模的基础上，对断层带网格模型进行细化。首先建立含断层露天矿边坡真三维网格模型；其次以断层面网格为中心，对边坡三维四面体网格模型进行分级自适应细化，以 VC++为开发平台，对 TetGen 库进行开发得以实现；最后以内蒙古自治区西二露天煤矿含断层边坡为例，使用 FLAC3D 软件通过数值模拟方法对细化前后的模型进行稳定性分析，得到分级细化前后模型的稳定性系数分别为 1.35 和 1.20。通过对模型细化前后的对比分析，发现精细化网格能够显著提高地质体的数值模拟精度。将数值模拟结果与实际滑体进行对比，验证了自适应分级细化方法的可靠性与有效性。

关键词：断层面；露天矿边坡；精细化建模；三维网格细化；稳定性分析

随着露天矿生产规模的不断扩大，边坡稳定性相关问题日趋复杂，尤其对于含断层露天矿边坡，无论是含断层的顺倾层状边坡还是含断层的逆倾软岩边坡[1-4]，其滑坡数量多、概率大，并且难于防治。断层的危害在于其周围往往形成明显的应力集中现象，在长期的作用下，断层自身强度会发生变化，最终导致断层揭露后边坡稳定性降低[5-8]。含断层露天矿诱发滑坡事故的例子比比皆是[9-10]，一旦发生地震，断层带附近发生滑坡事故的概率会明显增加[11-14]，滑动面的大小也影响着安全系数[15-16]。基于此，需要对断层处的网格进行更精细化的描绘，为了更准确的分析断层对露天矿造成的潜在危害，需要建立准确的三维边坡模型并对断层带进行自适应细化，并对断层处造成的危害进行准确地分析，从而规避滑坡地质灾害风险。

目前大部分学者基于轮廓线进行建模研究[17-21]，对于露天矿体建模，已有的研究是对单一矿体进行建模[21]，对于多面域的网格模型一般先对每个子矿体进行建模，这种方法往往出现多个子矿体之间的衔接问题。三维地质模型通常是在建立结构模型的基础上建立属性模型，对于简单层状地质模型建立已经有了比较成熟的方法[22-23]，但是对于相互交错的地质体模型没有普遍适用的方法，特别是含断层露天矿边坡模型。地质断层和边坡网格破坏了地质体的连续性，改变了地层数据的原始分布格局，地质断层的出现更是导致多面域模型在断层附近产生复

著录信息：陈应显，王璞，周萌，等. 断层面分割露天矿边坡精细化建模及稳定性分析［J］. 地质科技通报，2026，45(1)：314-323.
CHEN Yingxian, WANG Pu, ZHOU Meng, et al. Refined modeling and stability analysis of open-pit mine slopes segmented by fault planes[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 314-323.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

杂的交叉情况，形成了具有不连续性和突变特征的复杂地质界面[24-26]；在三维地质建模过程中，由于断层数据类型多样，数据稀疏，获取艰难，导致地层建模的不确定性[27-31]，因此使用约束 Delaunay 三角剖分方法创建含断层露天矿边坡地质模型自适应三角单元[32]。

通过实体模型的精细化的建立来实现断层区域数值模拟准确度的提高，国内外学者针对不同模型的精细化建立展开了研究。崔泽茹等[33]、武姝凝等[34] 提出了一种精细化建模方法并针对实际模型进行应用，提高了建模的精度；冯陈等[35] 提出了一种基于精细化建模的多目标优化策略；元素细分方法可以通过特定的分割顺序控制元素形状，例如：最长边细化算法，连续二等分程序根据 affine 变换控制分割顺序、三次单元法和最新的顶点二等分算法[36-40]。但这些方法往往会过度细化，并且不考虑弯曲的几何域和将元素更改为所需形状的泛化。本研究目的是提出一个通用的网格精细化过程，该过程应用网格修改操作来生成自适应细化网格，在此过程中获得网格质量相同但计算成本较低的网格。

综上所述，国内外研究学者在含断层三维地质建模及细化研究方面已经取得很多成果，但针对含断层露天矿边坡精细化建模网格仍存在精度不够、效率低及适应条件有限等问题。为了能更好解决目前存在的问题，从含断层复杂露天矿边坡精确地质三维实体建模考虑，提出一种含断层露天矿边坡精细化建模方法，为复杂地质条件下的露天矿边坡建模及稳定性分析提供一种新思路。

1　断层面分割露天矿边坡精细化建模

1.1　建立封闭的拓扑一致性面域空间

研究区位于内蒙古胜利煤田西部，行政隶属内蒙古自治区锡林浩特市郊区胜利苏木。地理坐标：东经 115°53′00″−115°58′15″；北纬 43°57′30″−44°00′00″。西二露天矿 EW 长 3.4 ~ 4.0 km，NS 宽 1.9 ~ 3.3 km，面积 12.282 km^2。西二露天矿西北帮近邻乌煤露天矿东北帮区域，其中本研究用于建模的正断层：走向 NW14° ~ 21°，倾向 NE，倾角 70°，落差 70 ~ 75 m，位于研究区的 WS 边缘，区内延伸长度为 2.1 km。

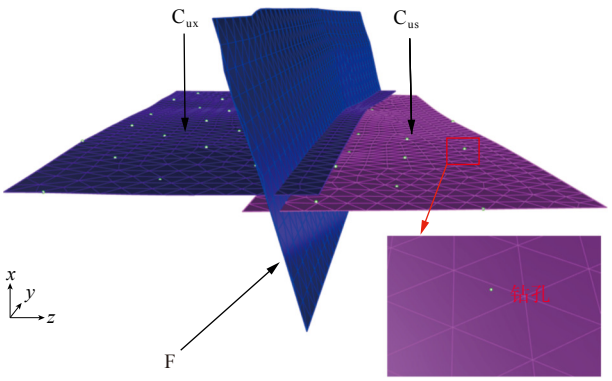
含断层露天矿边坡由露天矿边坡表面、地层界面和断层界面组合而成。由于断层对地层的破坏作用和露天矿的开采活动，形成了露天矿边坡界面、地层界面和断层界面之间交错的空间关系。在建立含断层露天矿边坡三维四面体网格之前，需要对组成边坡的各层界面之间的交错关系进行处理，建成封闭的拓扑一致性空间。数据来源建模区域由 1 个边坡界面、6 个地层界面和 1 个断层界面组成，在生成四面体网格之前，需要先根据各种类型界面的数据来源生成界面网格，再分析这些界面之间的空间关系并进行约束处理。

1.1.1　含断层露天矿边坡空间界面网格生成

本研究用于建模的数据来源是矿方提供的地质勘探资料及写实资料，含断层露天矿边坡空间界面网格生成的具体步骤为：

①露天矿边坡表面的数据来源是露天矿台阶坡顶线、台阶坡底线和平盘特征等线状数据及边坡表面的点状数据，通过 Delaunay 约束剖分生成露天矿边坡表面三角形网格；②断层界面的数据来源是钻孔断层采样点和断煤交线，使用距离平方反比法进行插值生成断层界面三角形网格；③地层界面的数据来源是地质勘探钻孔数据，以断层为界将地层划分为断层上盘区域和下盘区域，使用距离平方反比法进行分区域插值分别生成各地层界面的断层上、下盘三角形网格。

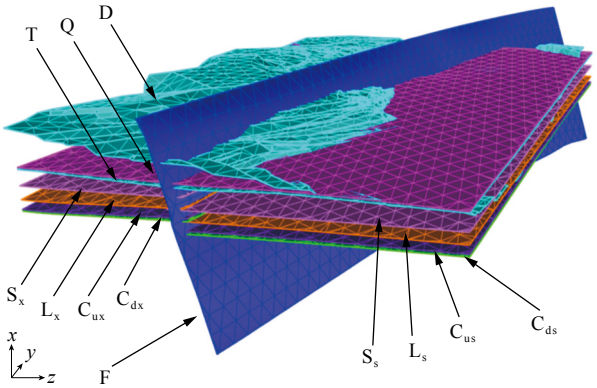
地层界面网格生成结果如图 1 所示，断层界面 F 将煤层顶板分为上盘 C_{us} 和下盘 C_{ux}。生成的所有界面网格如图 2 所示，其中露天矿边坡表面网格为 D，断层界面网格为 F，地层界面网格从上到下依次是：第四系网格为 Q、古近系、新近系网格为 T、砂岩上盘网格为 S_s、砂岩下盘网格为 S_x、砂质泥岩上盘网格为 L_s、砂质泥岩下盘网格为 L_x、煤层顶板上盘网格为 C_{us}、煤层顶板下盘网格为 C_{ux}、煤层底板上盘网格为 C_{ds} 和煤层底板下盘网格为 C_{dx}。



F. 断层界面；C_{ux}. 煤层顶板下盘；C_{us}. 煤层顶板上盘；下同

图 1　地层分区域插值结果

Fig. 1　Interpolation results of stratigraphic subregions



D. 露天矿边坡表面网格; Q. 第四系网格; T. 古近系、新近系网格; S_s. 砂岩上盘网格; S_x. 砂岩下盘网格; L_s. 砂质泥岩上盘网格; L_x. 砂质泥岩下盘网格; C_{ds}. 煤层底板上盘网格; C_{dx}. 煤层底板下盘网格; 下同

图 2　含断层露天矿边坡的界面网格

Fig. 2　Interface mesh of open-pit mine slope with faults

1.1.2　断层面网格与地层界面网格的空间关系及约束处理

断层面网格与地层界面网格之间形成相交的空间关系, 如图 3 所示, 其中图 3a 所示为断层界面 F 的三角形网格分别与煤层顶板下盘 C_{ux} 和煤层顶板上盘 C_{us} 的三角形网格相交, 图 3b 所示为断层面网格与所有地层界面网格之间形成相交的空间关系。

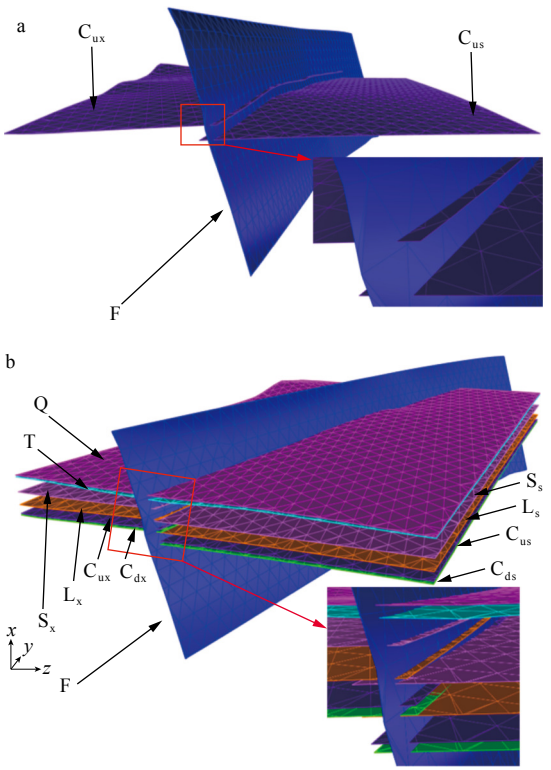


图 3　断层面网格与煤层顶板上下盘网格 (a) 及所有地层界面网格 (b) 的空间关系

Fig. 3　Spatial relationship between fault plane mesh (a) and stratigraphic interface mesh (b)

为了生成四面体网格, 要求断层面网格与各地层界面网格之间满足拓扑一致性, 需要对网格面之间进行约束处理(图 4)。约束处理的具体方法是: ①求断层面网格与地层界面网格的交线; ②将交线按约束 Delaunay 准则加入到断层面网格和地层界面网格中; ③将多余的网格删除, 得到新的断层面网格和地层界面网格。

如图 4 所示, 其中图 4a 为断层面网格 F 与煤层顶板下盘网格 C_{ux} 和煤层顶板上盘网格 C_{us} 的约束处理结果, 图 4b 为断层面网格 F 与所有地层界面网格的约束处理结果。

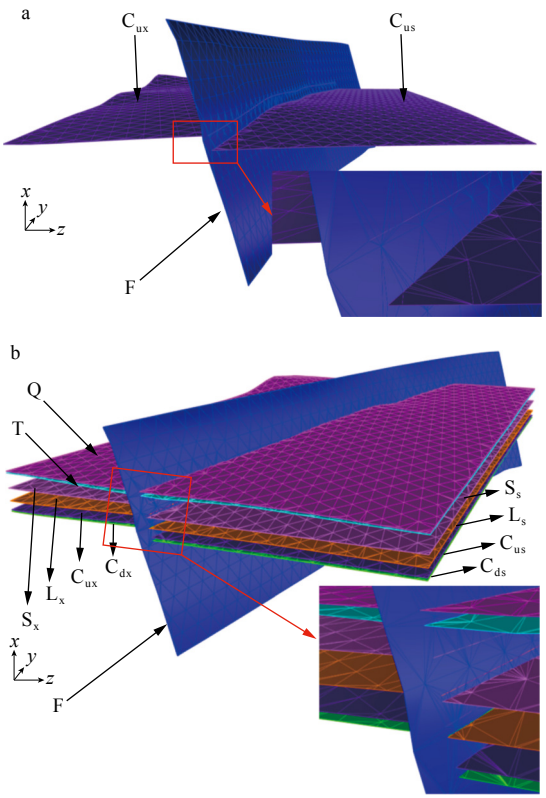


图 4　断层面网格与煤层顶板上下盘网格 (a) 及所有地层界面网格 (b) 的约束处理结果

Fig. 4　Constraint processing results of fault plane mesh (a) and stratigraphic interface mesh (b)

1.1.3　建立含断层露天矿边坡封闭面域空间

进行面模型到体模型的转换之前, 需要构建一个封闭的面域模型。以露天矿边坡表面为上表面, 四周范围为侧表面及底部范围为下表面的范围网格, 范围网格与断层面网格及地层界面网格之间依然是相交关系, 按照约束处理方法生成封闭的拓扑一致性面域空间, 如图 5 所示, 其中图 5a 为范围网格与断层面网格及地层界面网格的空间关系, 其中图 5b

为范围网格与断层面网格及地层界面网格的约束处理后生成的露天矿边坡封闭的拓扑一致性面域空间。

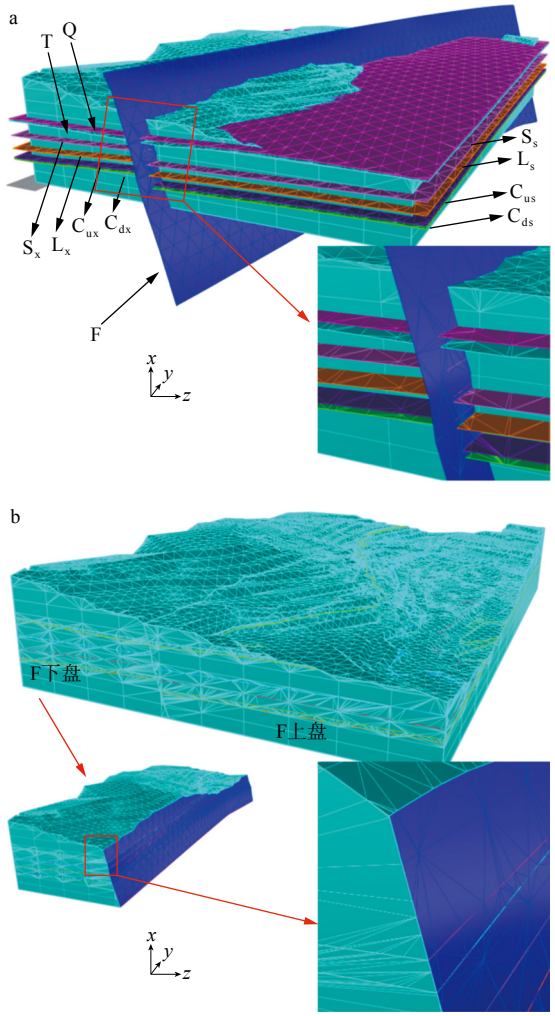


图 5　范围网格与断层面网格及地层界面网格的空间关系 (a) 及露天矿边坡封闭的拓扑一致性面域空间 (b)

Fig. 5　Spatial relationship between range mesh, fault plane mesh and stratum interface mesh (a) and topologically consistent surface area space enclosed by open-pit mine slope (b)

1.2　含断层露天矿边坡四面体网格建立

TetGen 库是一个开源的三维网格生成工具。该工具能够在三维空间中执行带约束的 Delaunay 四面体剖分，生成高质量的四面体网格。此外，它还支持通过插入顶点对网格进行细化，从而得到适用于数值计算的网格形状和大小。TetGen 库提供了可供满足分段线性复合形(PLC)输入格式的网格剖分函数 void tetrahedralize，它可用于本研究完成四面体网格剖分以及将信息存入到 tetgenio 输出对象中。基于 TetGen 库，使用 Visual C++2012 软件开发了四面体实体模型生成及优化程序。对露天矿边坡封闭的拓扑一致性面域空间模型进行分区域四面体剖分，生成含断层露天矿边坡分区域不规则四面体实体模型，优化后模型的平均网格边长度 $\bar{l}$ 为 20 m，如图 6 所示，图 6a 为含断层露天矿边坡封闭连通网格模型，图 6b 为含断层露天矿边坡不规则四面体实体模型及内部结构显示，含断层露天矿边坡不同的区域的四面体实体模型由不同颜色显示。

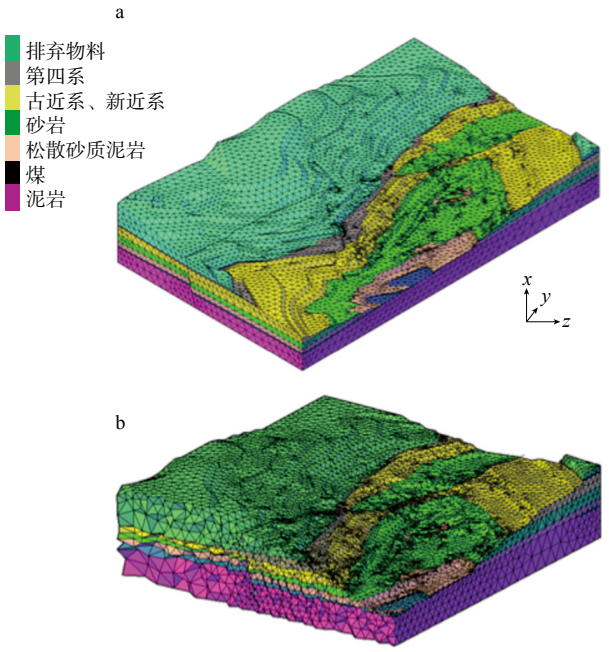


图 6　含断层露天矿边坡封闭连通网格模型 (a) 及不规则四面体实体模型 (b)

Fig. 6　Closed and connected mesh model of open-pit mine slope with faults (a) and irregular tetrahedral solid model of open-pit mine slope with faults (b)

1.3　边坡四面体网格模型细化

为了提高断层区域的数值模拟结果的精度，需要对断层区域的四面体网格进行细化。对于含断层露天矿边坡细化是在局部区域内自动改变网格单元尺寸的过程，关键在于自动确定细化区域范围和区域内不同位置网格单元的尺寸。通过对地质断层特征的分析，提出一种基于断层面细化区域内露天矿边坡网格的方法。

1.3.1　细化区域范围确定

细化区域范围 R 是在断层影响范围内，可以通过确定断层影响范围来确定。断层影响范围与断层的特征有直接关系。不同类型的断层存在一个断层影响带宽度阈值，范围区域以断层为中心向两侧扩展，宽度取断层上盘最大影响带宽度，具体见表 1[41]。给定断层类型和断层的走向长度，可以计算出断层影响范围，即为细化区域范围。

表 1　断层影响范围

Table 1　Fault influence range

逆断层		正断层		平移断层	
长度L/km	影响范围R/m	长度L/km	影响范围R/m	长度L/km	影响范围R/m
2.43	120	0.85	40	0.74	58
4.57	150	2.27	75	2.45	97
6.88	178	4.36	100	4.11	120
9.71	195	5.83	115	6.68	145

1.3.2　细化级数自适应确定

四面体网格的细分程度由所在边的级数决定，边的级数是指将边等分的次数。边的级数可以通过所在四面体的中心到细分参考图元距离计算得到。断层面作为细分参考图元，为了计算细化级数，提取断层面的顶点作为细分参考点集 $\boldsymbol{F}=\{f_1,f_2,...,f_p\}$，设 $d_{\min}$ 为四面体中心到所有参考点的最近距离，细化级数(g)公式如下：

$$g=\frac{R}{d_{\min}}, \tag{1}$$

式中：R 为断层的影响范围，m。

1.3.3　四面体网格分级细化方法

对四面体网格进行自适应分级细分处理，是在保证算法全局收敛的情况下生成高质量网格且能有效控制网格疏密分布。在三维情况下包含 8 种类型的不规则细分，由于需要保证网格的拓扑一致性，网格构造变得复杂，在这种情况下可以仅考虑 3 种细分情况(1∶8(case Ⅰ)、1∶4(case Ⅱ)和 1∶2(case Ⅲ)细分)，对于在四面体的不同面(非共面)具有 5, 4, 3 或 2 个细分节点的元素，需要在四面体中的未插入边分别增加 1, 2, 3 或 4 个节点，如图 7 所示。在自适应细化过程中，需要输入的有：断层类型 F_t、断层的走向长度 L、断层网格面顶点集 $\boldsymbol{F}$、有关四面体顶点集 $\boldsymbol{V}$、边集 $\boldsymbol{E}$ 和四面体集合 $\boldsymbol{T}$；输出结果为细化后的四面体相关顶点、边和体集。分级细化具体算法步骤如图 8 所示。

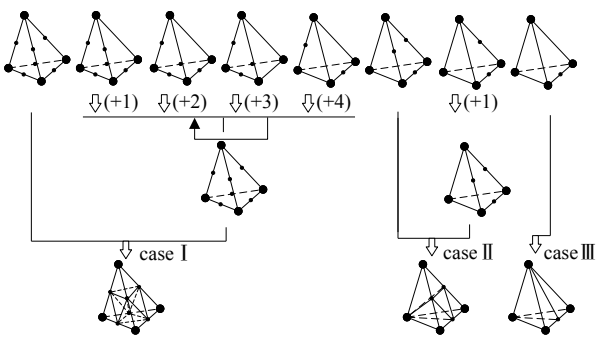


图 7　不同类型四面体细分过程（case Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ分别为 1∶8，1∶4，1∶2 细分情况）

Fig. 7　Subdivision process of different types of tetrahedra

1.3.4　露天矿边坡四面体网格细化

断层影响区域四面体网格以断层面为细分参考，从断层向两侧进行四面体网格的局部精细化。模型中断层长度为 2.08 km，根据断层影响范围选取 R=75 m，俯视图如图 9 所示，其中黑色框为范围框。根据模型平均网格边长度为 20 m，得到模型细分级数为Ⅳ、Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ 4 个级别。断层面附近最小网格边长度为 1.25 m，得到断层周围精确度高的生成网格，西二、乌煤露天矿相邻端帮含断层边坡四面体网格精细化模型如图 10 所示。

2　含断层露天矿边坡稳定性分析

2.1　构建 FLAC3D 计算模型

根据研究区域边坡参数，构建 FLAC3D 计算模型，数值模型中的煤层、各岩土层及排土场物料均采用理想弹塑性本构模型，对应屈服准则为拉剪复合破坏准则。具体构建方法如下：

算法1 四面体网格分级细化算法

输入: F_t, L, $\boldsymbol{F}=\{f_1, f_2, ..., f_p\}$, $\boldsymbol{V}=\{v_1, v_2, ..., v_n\}$, $\boldsymbol{E}=\{e_1, e_2, ..., e_o\}$, $\boldsymbol{T}=\{t_1, t_2, ..., t_m\}$

输出: $\boldsymbol{V}=\{v_1, v_2, ..., v_r\}$, $\boldsymbol{E}=\{e_1, e_2, ..., e_s\}$, $\boldsymbol{T}=\{t_1, t_2, ..., t_u\}$//返回细化后的四面体相关集

1: 根据表1, F_t, L, 计算细化范围R

2: for i=1; i<u; i++do

3:　计算$d_{\min}$//计算每个四面中心点到参考点的最小距离

4: end for

5: for i=1; i<o; i++do

6:　$g_i=\frac{R}{d_{\min}}$//计算每条边的细分级数

7: end for

8: for i=1; i<u; i++do//四面体细分

9:　if “存在边的g>0” then

10:　“根据细分准则细分四面体，将增加的顶点、边和四面体分别加入到$\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{T}$集中”

11:　“g=g−1”

12:　else “不用细分”

13:　end if

14: end for

15: return $\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{T}$//返回结果

图 8　算法伪代码图

Fig. 8　Algorithm pseudocode diagram

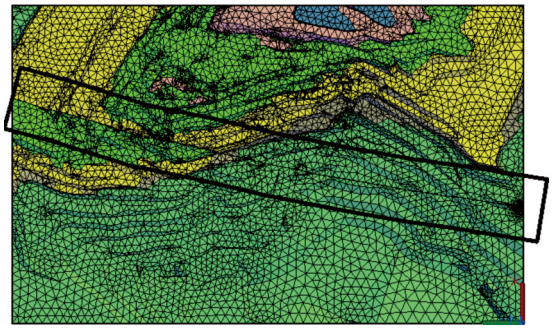


图 9　模型中断层影响范围框选取示意图

Fig. 9　Schematic diagram of fault influence scope box selection in the model

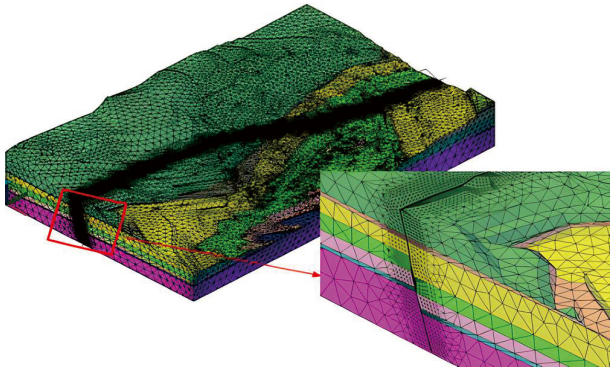


图 10　研究区四面体网格精细化模型示意图

Fig. 10　Schematic diagram of refined tetrahedral mesh model in the study area

(1)在 FLAC3D 软件中导入转换后的四面体网格数据模型，定义初始参考量：剪切模量和体积模量。

(2)为每个块体赋值参数，包括内摩擦角、黏聚力、容重、弹性模量和泊松比，具体如表 2 所示。

表 2　岩土体物理力学指标

Table 2　Physical and mechanical properties of rock and soil masses

岩层	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)	容重 γ/(kN·m^{-3})	弹性模量 E/MPa	泊松比 υ
第四系	15	26.9	2.03	10.0	0.38
古近系、新近系	70	28.7	20.8	40.9	0.38
泥岩	80	25.0	1.96	107.0	0.34
砂岩	150	14.3	2.01	107.8	0.34
煤层	70	30.0	1.22	800.0	0.30
排弃物料	15.13	14.0	1.80	80.0	0.34

(3)模型四周及底部均采用位移边界条件进行约束，进行模型的初始应力平衡，用位移边界条件约束节点位移，其中模型底面 Z=−0.1 m 和 Z=0.1 m 处设置 X、Y、Z 3 个方向约束，在 X=1 009.1 m 和 X=1 010.1 m 范围设置 X 方向约束，Y=1 619.9 m 和 Y=1 620.1 m 平面上设置 Y 方向约束，模型顶面为自由边界面。重力加速度为 9.8 m/s^2，在自重条件下计算模型的初始应力场。将最大不平衡力<1×10^{-5} 作为计算收敛原则，最终可计算出三维边坡表面位移量。

露天矿四面体网格数值模型分组见图 11a 所示，露天矿四面体网格分级自适应细化数值模型分组见图 11b 所示，断层面附近最小网格边长度大约为 0.005 m，满足断层面影响区域网格生成的精确度。根据上述提到的该区域地层信息自上而下大致分为：排弃物料、第四系、古近系和新近系、砂岩、松散砂质泥岩、煤、泥岩。

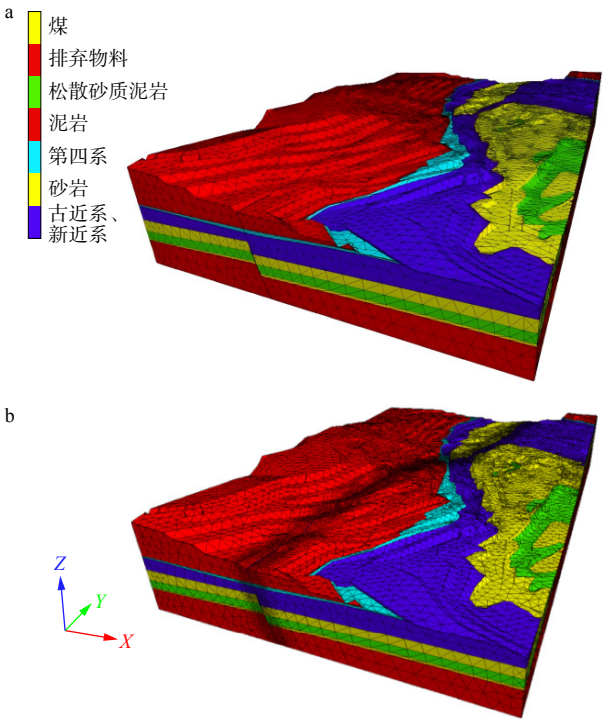


图 11　四面体网格分组结果 (a) 及细化分组结果 (b)

Fig. 11　Grouping results of tetrahedral mesh (a) and refined tetrahedral mesh (b)

2.2　边坡稳定性分析

2.2.1　四面体网格细分前分析

图 12a 为研究区边坡处于临界平衡状态下的模拟结果。边坡表面位移场云图表明，最大位移为 12.248 m，稳定性系数为 1.35。沿垂直于走向方向的剖面提取位移云图剖面位置处主滑体在断层上盘，如图 12b 所示。滑体位于煤层上盘顶板，主要形变位置包含一个边坡台阶且主要发生在浅表层。对图 12b 中区域 A 分析，由于断层的存在，拟滑坡区域上部牵拉力减弱使断层右侧边坡发生失稳现象。由于此区域的物理力学性质相对较差，这部分边坡基本处于受剪切作用的影响，但根据当前的分析，位移的集中区域尚未形成贯通的潜在滑移面。因此，虽然在红色区域存在较大的位移，但由于缺乏贯通的滑移面，斜坡的整体稳定性仍然相对较好。

2.2.2　四面体网格细分后分析

图 12c 为研究区边坡处于临界平衡状态下的模拟结果。三维边坡表面位移场云图表明，最大位移为 13.783 m，稳定性系数为 1.20。如图 12d 所示，滑体位于煤层上盘顶板，主要形变位置包含 3 个边坡台阶且位移区域向边坡更深处发展。由于网格细分后，红色区域范围扩大且存在较大的位移，形成了贯通的潜在滑移面，斜坡的整体稳定性显著降低。

对比数值模拟临界极限平衡状态可知，基于细

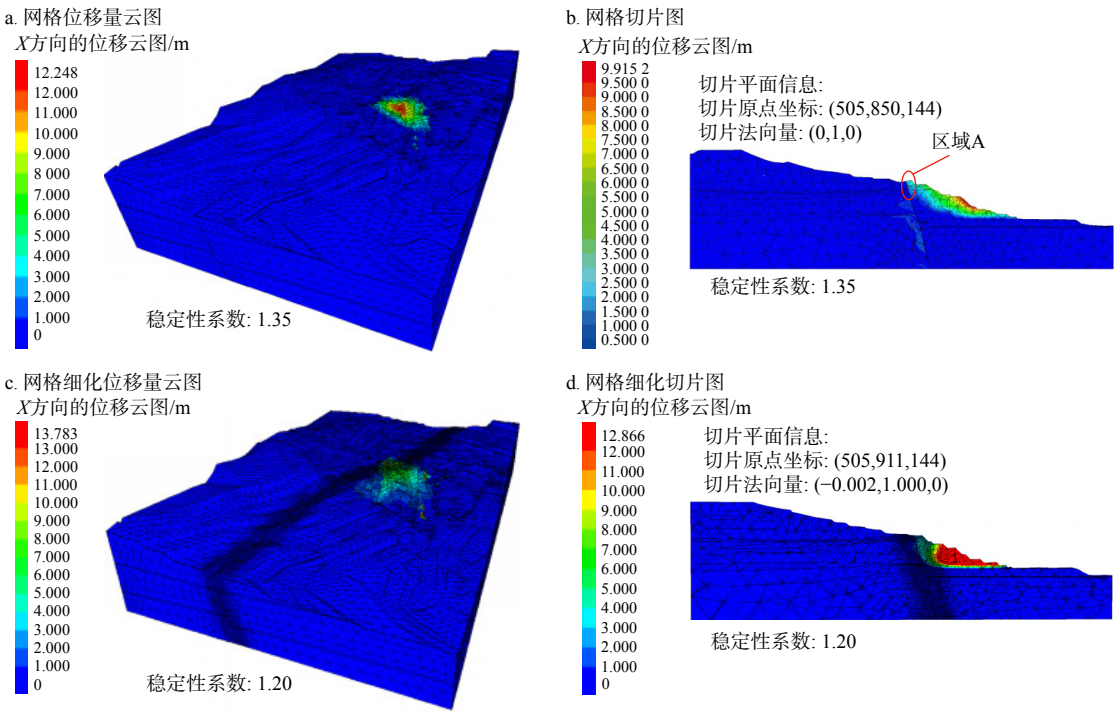


图 12　四面体网格位移量云图 (a)；网格切片图 (b)；网格细化位移量云图 (c)；网格细化切片图 (d)

Fig. 12　Displacement contour map(a) and slice view(b)of tetrahedral mesh;displacement contour map(c) and slice view(d) of refined tetrahedral meshand

化模型数值模拟得到的滑体空间展布及滑塌特征与现场调研和现场写实资料基本一致，如表 3 所示。从现场实测角度验证了精细化建模方法的有效性和可行性。

表 3　数值模拟对比

Table 3　Comparison of numerical simulations

数据来源	滑坡位置	滑体空间展布
现场滑体	煤层顶板上方3个剥离台阶	朝向采场空间的水平Y向（近EW向）位移
未细化模型数值模拟	煤层顶板上方1个剥离台阶	朝向采场空间的水平Y向位移
细化模型数值模拟	煤层顶板上方3个剥离台阶	朝向采场空间的水平Y向位移

3　结　论

(1)建立了露天煤矿含断层边坡三维建模。首先基于距离幂次反比法对地层网格进行插值，接着运用约束 Delaunay 三角剖分生成边坡界面网格，然后通过网格之间的约束处理生成拓扑一致的封闭面域空间，最后以 VC++为开发平台，对 TetGen 库进行开发得以实现复杂地质边坡界面网格剖分生成四面体网格并对生成的四面体网格进行优化，最终实现了露天煤矿含断层边坡四面体网格三维模型的建立。

(2)提出了一种断层面分割露天矿边坡精细化建模方法，包括细化过程中细化范围的自动确定、细化级数的确定和细化终止条件等。最终建立了以断层面为细分参考，细化影响范围 75 m，网格最小尺寸为 1.25 m 的含断层露天矿边坡精细化模型，保证了界面区域附近单元尺寸的平滑变化。

(3)采用 FLAC3D 三维数值模拟软件进行数值计算，通过岩性的赋值、初始条件设置、将最大不平衡力计算收敛到<1×10^{-5}，最终得到西二、乌煤露天矿相邻端帮含断层边坡三维四面体细化前后的位移量，最大位移分别为 12.248，13.783 m，稳定性系数分别为 1.35，1.20。通过对比分析发现，在地质实体模型的建立过程中，需对建模区域进行精细的网格划分，以提升地质体的数值模拟精度。最终，通过将数值模拟结果与实际滑体进行对比，验证了细化模型的计算结果更接近实际情况，具有一定的实际意义。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1]　陈应显，叶永超，杨红霞，等. 基于多剖面生成露天矿三维边坡最危险滑面 [J]. 地质科技通报，2025，44(6)：147-156.

CHEN Y X, YE Y C, YANG H X, et al. Most dangerous sliding surface of the three-dimensional slope of the open-pit mine was generated based on multiple profiles[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(6): 147-156. (in Chinese with English abstract)

[2] 曹兰柱, 王珍, 王东, 等. 露天矿含断层逆倾软岩边坡滑移模式及稳定性研究 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 457-461.
CAO L Z, WANG Z, WANG D, et al. Study on the sliding mode and stability of counter-dip bedded soft rock slope with fault in surface mine[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 457-461. (in Chinese with English abstract)

[3] 曹兰柱, 王珍, 王东, 等. 露天煤矿端帮逆倾软岩边坡稳定性研究 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(3): 1-6.
CAO L Z, WANG Z, WANG D, et al. Study on stability of reversed inclined soft rock slope at end slope of surface mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)

[4] STEAD D, WOLTER A. A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology[J]. Journal of Structural Geology, 2015, 74: 1-23.

[5] LIU T, LIN B Q, YANG W. Mechanical behavior and failure mechanism of pre-cracked specimen under uniaxial compression[J]. Tectonophysics, 2017, 712: 330-343.

[6] KALATEHJARI R, ALI N. A review of three-dimensional slope stability analyses based on limit equilibrium method[J]. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 119-134.

[7] CHENG P, LIU Y, HU J, et al. Experimental study on dynamic response and failure mode of bedding rock slope with cracks under earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84(2): 81.

[8] 侯林. 断层对露天矿边坡稳定性影响数值模拟 [J]. 露天采矿技术, 2017, 32(9): 59-62.
HOU L. Numerical simulation of the effect of faultage on slope stability in open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2017, 32(9): 59-62. (in Chinese with English abstract)

[9] 尚彦军, 金维浚, 张腾飞, 等. 断层控制与采空塌落诱发的天山北麓某煤矿滑坡分布特征 [J]. 新疆地质, 2020, 38(1): 106-112.
SHANG Y J, JIN W J, ZHANG T F, et al. Landslides controlled by faults and triggered by underground excavation at one coal mine at the north foot of Tianshan Mountain[J]. Xinjiang Geology, 2020, 38(1): 106-112. (in Chinese with English abstract)

[10] 杜昌华, 宋景辉, 李蕊, 等. 露天煤矿含断层顺倾边坡渗流与稳定性分析 [J]. 露天采矿技术, 2024, 39(2): 51-55.
DU C H, SONG J H, LI R, et al. Analysis of seepage and stability of down dip slopes in open-pit coal mines containing faults[J]. Opencast Mining Technology, 2024, 39(2): 51-55. (in Chinese with English abstract)

[11] 黄赠, 王锐, 赵宇, 等. 隐伏断层地震诱发滑坡易发性评价 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(11): 2136-2143.
HUANG Z, WANG R, ZHAO Y, et al. Susceptibility assessment of landslides triggered by buried fault earthquake[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(11): 2136-2143. (in Chinese with English abstract)

[12] JIANG S H, CHEN J D, WANG Z Z, et al. Three-dimensional discrete element analysis of jointed rock slope stability based on the universal elliptical disc model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(1): 505-525.

[13] MIAO S S, SU L J, ZHANG C L, et al. Dynamic response characteristics and damage failure process of bedding rock slope in shaking table test[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(9): 358.

[14] 王林康, 郑子涵, 章广成, 等. 顺层陡倾岩质边坡倾倒模式试验 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(2): 340-354.
WANG L K, ZHENG Z H, ZHANG G C, et al. Test study on the toppling mode of steep bedding rock slope[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 340-354. (in Chinese with English abstract)

[15] SU Z N, SHAO L T. A three-dimensional slope stability analysis method based on finite element method stress analysis[J]. Engineering Geology, 2021, 280: 105910.

[16] 邓东平, 李亮. 基于滑动面搜索新方法对地震作用下边坡稳定性拟静力分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 86-98.
DENG D P, LI L. Based on a new method of searching for sliding surface pseudo-static stability analysis of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 86-98. (in Chinese with English abstract)

[17] 钟德云, 王李管, 毕林. 复杂矿体模型多域自适应网格剖分方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1538-1544.
ZHONG D Y, WANG L G, BI L. Adaptive meshing of multi-domain complex orebody models[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(10): 1538-1544. (in Chinese with English abstract)

[18] 毕林, 刘晓明, 陈鑫, 等. 一种基于矿体轮廓线的三维建模新方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(10): 1359-1365.
BI L, LIU X M, CHEN X, et al. An automatic 3D modeling method based on orebody contours[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(10): 1359-1365. (in Chinese with English abstract)

[19] 陈佳瑜, 况立群, 庞敏, 等. 基于轮廓线与薄板样条的三维自动化建模方法 [J]. 计算机仿真, 2019, 36(4): 184-189.
CHEN J Y, KUANG L Q, PANG M, et al. Three-dimensional automatic modeling method based on contour line and thin plate spline[J]. Computer Simulation, 2019, 36(4): 184-189. (in Chinese with English abstract)

[20] 沈蔚, 李京, 陈云浩, 等. 基于 LIDAR 数据的建筑轮廓线提取及规则化算法研究 [J]. 遥感学报, 2008, 12(5): 692-698.
SHEN W, LI J, CHEN Y H, et al. Algorithms study of building boundary extraction and normalization based on LIDAR data[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(5): 692-698. (in Chinese with English abstract)

[21] 杜菊民, 景永波, 陈诚, 等. 坦桑尼亚纳钦圭阿石墨矿三维矿体建模及资源量估算对比 [J]. 现代矿业, 2021, 37(9): 31-34.
DU J M, JING Y B, CHEN C, et al. 3D model construction and resource estimation comparison of nachingwea graphite mine in Tanzania[J]. Modern Mining, 2021, 37(9): 31-34. (in Chinese with English abstract)

[22] 陈应显, 杨红霞, 李佳莹, 等. 基于空间多剖面边坡稳定性系数计算方法 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(5): 181-190.
CHEN Y X, YANG H X, LI J Y, et al. Calculation method of slope

stability coefficients based on spatial multi-profile slopes[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 181-190. (in Chinese with English abstract)

[23] 黄书岭, 丁秀丽, 邬爱清, 等. 层状岩体多节理本构模型与试验验证 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1627-1635.
HUANG S L, DING X L, WU A Q, et al. Study of multi-joint constitutive model of layered rockmass and experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1627-1635. (in Chinese with English abstract)

[24] 石玉玲, 侯明杰, 李怀鑫, 等. 断层斜交岩质高边坡开挖变形特征及其治理效果评价: 以陕南地区某岩质高边坡为例 [J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(3): 400-413.
SHI Y L, HOU M J, LI H X, et al. Excavation deformation characteristics and treatment effect inspection of high rock slope with oblique intersecting faults: Taking a high rock slope in the southern Shaanxi, China as an example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(3): 400-413. (in Chinese with English abstract)

[25] 荆永滨, 杜学胜, 张瑞林, 等. 复杂地质构造煤层三维模型自动构建技术 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 243-247.
JING Y B, DU X S, ZHANG R L, et al. Techniques for automatic 3D modeling of coal seam with complicated geological structure[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016, 35(3): 243-247. (in Chinese with English abstract)

[26] 赵洪宝, 张博, 张驰, 等. 采动诱发断层滑移评估模型及失稳范围确定方法 [J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 23-33.
ZHAO H B, ZHANG B, ZHANG C, et al. Mining-induced fault slip: Assessment model and method for determining fault instability ranges[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 23-33. (in Chinese with English abstract)

[27] 孙劲光, 高天鹏. 地质断层三维建模的表达式方法 [J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(10): 1322-1331.
SUN J G, GAO T P. The research of expression method on geological fault modeling[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(10): 1322-1331. (in Chinese with English abstract)

[28] WELLMANN F, CAUMON G. 3D structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties[A]. In: Advances in Geophysics[M]. Amsterdam: Elsevier, 2018: 1-121.

[29] HILLIER M, WELLMANN F, BRODARIC B, et al. Three-dimensional structural geological modeling using graph neural networks[J]. Mathematical Geosciences, 2021, 53(8): 1725-1749.

[30] HILLIER M, WELLMANN F, DE KEMP E A, et al. GeoINR 1.0: An implicit neural network approach to three-dimensional geological modelling[J]. Geoscientific Model Development, 2023, 16(23): 6987-7012.

[31] FERRER R, EMERY X, MALEKI M, et al. Modeling the uncertainty in the layout of geological units by implicit boundary simulation accounting for a preexisting interpretive geological model[J]. Natural Resources Research, 2021, 30(6): 4123-4145.

[32] WANG Y, MA G W, REN F, et al. A constrained Delaunay discretization method for adaptively meshing highly discontinuous geological media[J]. Computers & Geosciences, 2017, 109: 134-148.

[33] 崔泽茹, 王胜平, 陈小叶, 等. 基于点云的船闸精细化三维建模 [J]. 海洋测绘, 2022, 42(5): 64-67.
CUI Z R, WANG S P, CHEN X Y, et al. Refinement modeling and accuracy analysis of ship lock based on point cloud[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2022, 42(5): 64-67. (in Chinese with English abstract)

[34] 武姝凝, 李华强, 刘洋, 等. 考虑供热系统精细化建模的区域综合能源系统多目标优化调度 [J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1979-1992.
WU S N, LI H Q, LIU Y, et al. Multi-objective optimal scheduling of regional integrated energy system considering refined modeling of heating system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1979-1992. (in Chinese with English abstract)

[35] 冯陈, 周大庆, 郑源, 等. 基于精细化建模的抽水蓄能机组低水头背靠背启动多目标优化 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 3059-3071.
FENG C, ZHOU D Q, ZHENG Y, et al. Multi-objective optimization of back-to-back starting process for pumped storage units at low head area based on refined model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3059-3071. (in Chinese with English abstract)

[36] PETROV M S, TODOROV T D. Refinement strategies related to cubic tetrahedral meshes[J]. Applied Numerical Mathematics, 2019, 137: 169-183.

[37] BELDA-FERRÍN G, GARGALLO-PEIRÓ A, ROCA X. Local bisection for conformal refinement of unstructured 4D simplicial meshes[C]//Anon. 27th international meshing roundtable. Cham: Springer International Publishing, 2019: 229-247.

[38] FREYMUTHH N, DAHLINGER P, WÜRTH, T, et al. Swarm reinforcement learning for adaptive mesh refinement[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2023, 36: 73312-73347.

[39] LYU Z. Simplicial mesh refinement in computational geometry[R]. San Diego, US: University of California. 2018.

[40] ALKÄMPER M. Mesh refinement for parallel-adaptive FEM: Theory and implementation[D]. Stuttgart, Germany: Universität Stuttgart, 2019.

[41] 雷光伟, 杨春和, 王贵宾, 等. 断层影响带的发育规律及其力学成因 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 231-241.
LEI G W, YANG C H, WANG G B, et al. The development law and mechanical causes of fault influenced zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 231-241. (in Chinese with English abstract)

Summary for “断层面分割露天矿边坡精细化建模及稳定性分析”

Refined modeling and stability analysis of open-pit mine slopes segmented by fault planes

CHEN Yingxian[1,2]，WANG Pu[1*]，ZHOU Meng[3]，ZHU Zhe[1]，LIU Guangwei[1]，CHI Xiaodong[1]

1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China；
2. Ordos Institute of Liaoning Technical University, Ordos Inner Mongolia Autonomous Region 017004, China；
3. Weihai Haiwang Cyclone Co., Ltd., Weihai Shandong 264200, China

First author，E-mail：lntucyx@163.com

* Corresponding author， E-mail：w15291979278@163.com

Abstract：[**Objective**] The fault zone in an open-pit mine slope is a key focus of three-dimensional stability analysis and numerical simulation. Geological fault planes divide the three-dimensional space of ore rock into complex spatial areas, making the generation of refined three-dimensional meshes for open-pit mine slopes a major challenge. To enhance the accuracy of stability analysis for open-pit mine slopes with faults, it is necessary to refine the mesh model of the fault zone based on accurate three-dimensional modeling of such slopes. [**Methods**] First, an actual three-dimensional mesh model of an open-pit mine slope with faults was established. Then, using the fault plane mesh as the center, the three-dimensional tetrahedral mesh model of the slope was adaptively refined through a hierarchical approach. This method was implemented by developing the TetGen library on the VC++ platform. [**Results**] Taking the slope with faults of the Xi’er open-pit coal mine in Inner Mongolia Autonomous Region as an example, stability analysis was performed using FLAC3D for the models before and after mesh refinement. The stability coefficients of the models before and after graded refinement were 1.35 and 1.20, respectively. [**Conclusion**] Through comparative analysis of the models before and after refinement, it is found that the refined mesh can significantly improve the numerical simulation accuracy of the geological body. Finally, by comparing the numerical results with the actual sliding mass, the reliability and effectiveness of the adaptive graded refinement method are verified.

Key words: fault plane；open-pit mine slope；refined modeling；three-dimensional mesh refinement；stability analysis

Received：2024-05-21；Revised：2024-09-27；Accepted：2024-09-29

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240273