

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 057.2—2025

非煤岩岩爆倾向性评价规范 第2部分：数值模拟方法与材料模型参数标定

Regulation for Rockburst Proneness Evaluation of Non-coal Rocks —
Part 2: Numerical simulation method and material model parameter calibration

2025 - 02 - 24 发布

2025 - 02 - 25 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
5 岩爆模拟问题分析	4
6 数值模型几何分析	4
7 数值模拟方法与软件	4
8 建模及网格划分	5
9 本构模型及参数标定	5
10 初始化和边界条件	6
11 模型验证	7
12 岩爆倾向性预测模拟	7
附录 A (资料性) 基于 FLAC3D 岩爆倾向性数值模拟案例	8
附录 B (资料性) 基于 LS-DYNA 岩爆倾向性数值模拟案例	11
附录 C (资料性) 基于 PFC3D 岩爆倾向性数值模拟案例	14
附录 D (资料性) 岩爆数值模拟软件基本情况	18

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：中南大学、中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司、西南石油大学、中广核铀业发展有限公司、西安科技大学、中铁二院地勘岩土工程设计研究院、湖南科技大学。

本文件主要起草人：陶明、洪志先、赵华涛、刘恺、刘玉龙、周健、顾合龙、杜坤、王栋、赵瑞、王少锋、吴秋红、向恭梁、罗豪。

非煤岩岩爆倾向性评价规范

第2部分：数值模拟方法与材料模型参数标定

1 范围

本文件规定了非煤岩岩爆倾向性评价中数值模拟方法与材料模型参数标定的岩爆模拟问题分析、数值模型几何分析、数值模拟方法、数值模拟软件、建模及网格划分、本构模型及参数标定、初始化和边界条件、模型验证和岩爆倾向性预测模拟等。

本文件适用于非煤地下矿山及其他非煤地下工程中围岩岩爆倾向性的数值模拟，涵盖前期准备和实施阶段。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

T/GRM 057.1—2023 非煤岩岩爆倾向性评价规范 第1部分：室内指标测定及等级分类
 DZ/T 0276.18-2015 岩石物理力学性质试验规程 第18部分：岩石单轴抗压强度试验
 GB/T50266-2013 工程岩体试验方法标准
 MT 223-1990 煤和岩石渗透率测定方法
 GB T50218-2014 工程岩体分级标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

非煤岩 Non-coal rock

指不含煤层或煤质成分的岩石，常见于非煤矿山及地下工程围岩。

3.2

岩爆倾向性数值模拟 Numerical simulation for rockburst proneness

利用数值分析方法，建立岩体模型并施加初始应力、边界条件及开挖过程，预测和评估地下工程围岩岩爆风险。

3.3

岩爆倾向性预测 Rockburst proneness prediction

通过综合分析地下工程岩体地质条件、力学特性、应力和能量状态，采用数值模拟、实验测试及经验模型等手段，评估地下工程岩体在开挖过程中发生岩爆的可能性。

3.4

连续模拟方法 Continuum simulation method

用于模拟假定具有连续特性材料，在承载荷载的过程中力学行为变化的数值模拟方法。

3.5

不连续模拟方法 Discontinuum simulation method

用于模拟具有不连续面结构材料，在承受荷载的过程中力学行为变化的数值模拟方法。

3.6

混合模拟方法 Hybrid simulation method

用于模拟材料在复杂荷载和环境因素下，同时表现出连续和离散力学行为的数值模拟方法。

3.7

有限元法 Finite element method FEM

将结构或材料等连续体划分为多个有限小单元，每个单元用简单形函数近似描述位移、应力、温度等场变量变化，建立单元平衡方程并组合成整体方程，求解得到系统近似解的数学方法。

3.8

有限差分法 Finite difference method FDM

用差分近似代替微分，将连续微分方程转换为离散代数方程，在问题域上设置规则或不规则的网格，将微分方程在每个网格点离散化，求解得到各点近似值的数学方法。

3.9

离散元法 Discrete element method DEM

通过计算每个块体或颗粒的运动轨迹、相互作用力及其碰撞、摩擦等力学效应，模拟颗粒材料在外力作用下整体响应的数学方法。

3.10

边界元法 Boundary element method BEM

仅在问题域边界上离散化，将原始偏微分方程转化为边界积分方程，减少问题维数，求解无限或半无限域中偏微分方程问题的数学方法。

3.11

不连续变形分析法 Discontinuous deformation analysis DDA

研究岩体和结构在受力状态下的不连续变形行为的数学方法。

注：DDA法通过将复杂岩体或结构划分为多个块体，分析块体在外力作用下的滑动、旋转和分离等运动和相互作用。

3.12

离散裂隙网格法 Discrete fracture network DFN

通过明确表示岩体中的裂隙网络，将裂隙作为独立的几何实体来处理，反映裂隙的空间分布、几何特征和力学性质，模拟和分析地下岩体中裂隙分布和行为的数值方法。

3.13

应力初始化 Stress initialization

为反应介质在实际地质条件下的应力状态而对模型施加初始应力的行为。

注：应力初始化确保模型在模拟过程中准确模拟工程活动引起的应力变化和材料响应。

3.14

弹性应变能密度 Elastic strain energy density ESED

岩石承受外部荷载发生弹性变形时，单位体积储存的应变能。

4 总则

4.1 模拟流程

非煤岩岩爆倾向性预测数值模拟过程及材料模型参数标定，可遵循如图1所示系统性流程。该流程分为前期准备和数值模拟阶段，可按下列步骤执行：

1) 前期准备可按下列步骤执行：

a) 岩爆问题分析：分析并确定拟通过数值模拟方法研究的岩爆问题及其目标，包括岩爆发生条件、影响范围及预测精度等。

b) 数值模型几何分析：根据研究对象的实际情况和模拟需求，选择构建二维或三维数值计算模型。分析模型复杂度、计算资源及模拟精度平衡，并按地质勘测资料和工程实际情况，准确构建工程岩体岩爆发生的数值计算模型。

c) 数值模拟方法选择：根据模拟岩体的行为方式，将数值模拟方法分为有限元等连续方法、离散元等不连续方法和结合连续与不连续特性的混合方法。

d) 数值模拟软件选择：根据已选定的数值模拟方法，按软件功能完整性、用户友好性、计算性能及技术支持等，评估并选择数值模拟软件或程序。

2) 数值模拟可按下列步骤执行：

a) 建模及网格划分：利用数值模拟软件内置的语言或工具，根据前期准备阶段确定的几何模型进行数值建模。确保模型能够准确反映研究对象的实际结构和特征。采用模拟软件内置的网格划分模块或外部网格划分工具，对模型进行精细的网格划分。

b) 本构模型及参数标定：根据岩石物理力学特性和模拟需求，选择合适的本构模型。岩石材料参数通过室内试验、现场监测和文献参考等方式确定。

c) 初始和边界条件：对建立的非煤岩岩爆模型进行应力场、孔隙水压力场、温度场等的初始化设置。根据工程实际情况，施加固定边界、自由边界、压力边界等边界条件。

d) 模型验证：岩爆倾向性预测前，验证数值模拟方法、岩石本构模型及参数验证。通过对比模拟结果与已知试验结果、工程实测数据或理论解等方式，评估模型准确性和可靠性。

e) 岩爆倾向性预测：完成数值模拟验证后，利用已建立的数值模型和标定参数，针对不同环境下的非煤岩地下工程开展岩爆倾向性预测数值模拟研究。分析不同工况下岩爆的发生条件、演化过程及危害程度，为工程设计和施工提供科学依据和决策支持。

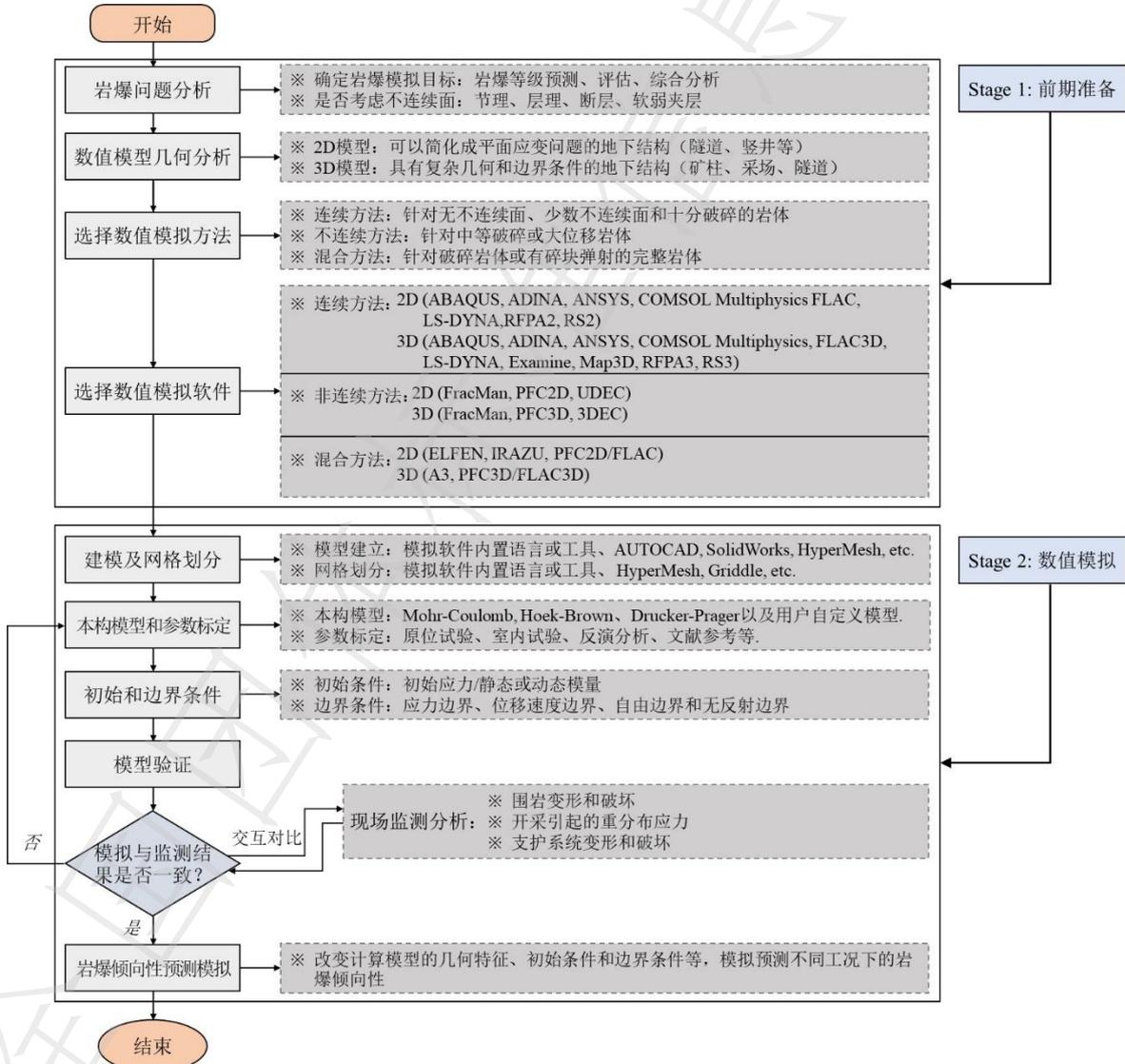


图1 岩爆倾向性预测数值模拟流程图

4.2 资料数据

岩爆预测模型建立过程中，检查核对模型细节和数据点，包括验证数据来源可靠性以及检查数据逻辑一致性。

岩爆倾向性模拟的核心为材料参数准确标定和数值模拟方法可靠验证。收集和整理室内试验数据及现场监测资料时，确保数据的可靠性和准确性。

4.3 数值模拟精度

岩爆倾向性指标模拟精度符合研究目标的规定。模拟精度可根据不同非煤岩岩体开挖顺序、地质条件及研究问题的需求设定。关键工程部位或高风险区域的岩爆预测，可采用更高精度的数值模拟方法。

5 岩爆模拟问题分析

岩爆模拟前，明确岩爆模拟问题。包括下列目标：

- 1) 岩爆发生时间和地点预测：通过数值模拟方法，预测岩爆可能发生的时间和地点，为工程设计和施工提供预警信息。
- 2) 岩爆等级确定及评估：基于模拟结果，计算能量释放率等岩爆倾向性指标，确定岩爆等级，量化评估岩爆风险。
- 3) 岩爆孕灾机理研究：分析岩爆发生的地质条件、力学机制及影响因素，揭示岩爆的孕灾机理和演化规律。
- 4) 岩爆综合分析：按模拟结果和工程实际情况，对岩爆综合分析和评估，提出防治措施和建议，为工程安全提供科学依据。

6 数值模型几何分析

数值模型几何分析按下列步骤执行：

- 1) 根据研究对象确定岩爆影响区域，设置合理边界条件，以减小开挖区对边界效应的影响；
- 2) 确定采用三维或二维数值计算模型。长隧道和竖井可简化成平面应变问题的地下结构，宜采用二维数值计算模型。矿柱、采场和交叉隧道等具有复杂几何和边界条件的地下结构采用三维数值计算模型；
- 3) 分析地层结构的影响，构建不同岩层的分布和厚度；
- 4) 分析不连续面的影响，明确裂隙网络和断层的几何特征和分布；
- 5) 确定开挖顺序和步骤，分析逐步开挖对岩体影响；
- 6) 评估支护结构，评估其对岩爆倾向性影响。

7 数值模拟方法与软件

7.1 连续模拟方法与软件

假设岩石为连续且均匀的介质，采用连续模拟方法分析岩石弹性应变能、应力、变形和位移等指标的时空演化特征。连续模拟方法包括有限差分法（FDM）、边界元法（BEM）和有限元法（FEM）等。有限差分法软件可包括FLAC2D、FLAC3D（相关案例可参考附录A），边界元软件可包括Examine、Map3D Non-Linear（Map3D），有限元软件包括ANSYS、LS-DYNA（相关案例可参考附录B）、ABAQUS、COMSOL Multiphysics、ADINA、PLAXIS2D、PLAXIS3D、RS2（Phase2）/RS3。

7.2 不连续模拟方法与软件

当工程岩体中存在节理、裂隙、断层等软弱结构面时，采用不连续模拟方法模拟裂隙的张开、滑移和扩展等不连续行为。不连续模拟方法包括离散元法（DEM）和离散裂缝网格法（DFN）等。离散元软件可包括PFC2D（相关案例可参考附录C）、PFC3D、UDEC、3DEC，离散裂缝网络软件有FracMan和NAPSAC。

7.3 混合模拟方法与软件

混合模拟方法可处理岩体介质中同时存在连续和不连续行为的复杂情况。模拟非煤岩岩爆时，可采用混合BEM-DEM方法。远场岩石可采用BEM表示为各向同性连续介质，准确反映远场对近场的影响。近场岩石可采用DEM表示为由岩石裂隙定义的离散单元块，模拟近场开挖引起的复杂动力学行为。混合模拟软件有PFC2D+FLAC和PFC3D+FLAC3D。

常用岩爆倾向性数值模拟软件基本情况见附录表D。

8 建模及网格划分

8.1 数值模型建立

数值计算模型几何尺寸和形状根据模拟的非煤岩岩爆灾害影响区域确定。模型几何尺寸和形状确立依据包括下列内容：

- 1) 地质特征：模型包括岩层分层、岩性变化、断层、褶皱等地质信息，真实反映地下岩体地质结构；
- 2) 影响范围：模型尺寸覆盖开挖作业对周围岩体的影响区域，应力扰动区和潜在的岩爆区域，模拟结果全面反映岩爆灾害实际情况；
- 3) 边界效应：模型边界设置在开挖扰动范围外，开挖区及其邻近区域的应力场和位移场不受边界条件约束；
- 4) 数值收敛性：通过逐步调整模型尺寸，检查模拟结果收敛性，模型在给定计算条件下获得稳定且可靠的解；
- 5) 计算能力：在保证模拟精度前提下，合理控制模型尺寸，适应现有计算资源，模拟过程在合理时间内完成。
- 6) 模型建立可通过模拟软件内置的语言或工具进行，也可利用Rhino、SolidWorks、AUTOCAD等软件初步建模，通过数据接口导入模拟软件中进行后续处理。

8.2 网格划分

网格划分时，按下列因素确定：

- 1) 网格密度：根据模拟需求，在开挖面、裂隙密集区等关键区域采用小尺寸网格，提高计算精度。在非关键区域，可适当降低网格密度；
- 2) 网格形状：根据模型几何形状和地质结构特点，选择三角形、四边形、四面体等合适的网格形状。在复杂地质结构处，可采用多种网格形状组合提高网格适应性；
- 3) 网格质量：确保网格质量良好，避免出现畸形、扭曲或过度变形的网格；
- 4) 计算资源：平衡计算精度和资源消耗，确保计算在可接受时间内完成；
- 5) 渐变网格：采用渐变网格，远离关键区域的网格尺寸适当增大。
- 6) 网格划分可采用模拟软件内置的语言或工具，也可采用Griddle和HyperMesh等专业网格剖分软件进行模型切割。

9 本构模型及参数标定

9.1 非煤岩本构模型

构建非煤岩岩爆计算模型前根据使用的数值模拟软件，选择准确反映岩石力学特性的本构模型，非煤岩岩石本构模型选择按下列因素确定：

- 1) 应力状态：岩石开挖过程中的应力路径和应力状态；
- 2) 裂隙和缺陷：分析岩石中的裂隙和缺陷对力学行为的影响，选择能模拟特征的模型；
- 3) 应变速率：岩石在高应变速率下的动态响应；
- 4) 温度和湿度影响：分析环境条件对岩石力学性能的影响。

非煤岩岩石可采用Mohr-Coulomb、Hoek-Brown、Drucker-Prager等强度准则，可采用最大拉应力准则修正的Mohr-Coulomb模型等用户自定义的本构模型。在LS-DYNA动力有限元软件中，Riedel-Hiermaier-Thomamodel (RHT)、Holmquist-Johnson-Cook (HJC)、Continuous Surface Cap Model (CSCM)本构模型可运用于模拟脆性材料在高应变速率荷载作用下的动态力学响应。

9.2 非煤岩参数标定

9.2.1 岩石材料参数可通过室内试验、现场试验、反演分析和文献参考等方式获得。

9.2.2 室内试验

非煤岩基本力学参数采用下列室内试验方法获取：

- 1) 单轴压缩试验：用于测定岩石单轴抗压强度和弹性模量。通过加载试样直至破坏，记录应力-应变曲线。按DZ/T 0276.18和GB/T 50266的有关规定执行；
- 2) 巴西劈裂试验：用于测定岩石的抗拉强度。将圆柱形试样沿直径方向施加压力，直至试样劈裂。按GB/T 50266的有关规定执行；
- 3) 三轴压缩试验：用于测定岩石的剪切强度和内摩擦角。对试样施加围压和轴向压力，模拟地下实际应力状态。按GB/T 50266的有关规定执行；
- 4) 声波测试：用于测定岩石的弹性波速，推算岩石动态弹性模量和泊松比。按GB/T 50266的有关规定执行；
- 5) 劈裂注水试验：用于测定岩石的渗透系数。通过施加水压力，测量渗流速度和压力变化。按MT/T 223的有关规定执行。

9.2.3 现场试验

获取非煤岩原位力学参数采用下列现场试验方法获取：

- 1) 现场应力测试：通过应力解除法、水压致裂法等，测定岩体原位应力场。按GB/T 50266的有关规定执行；
- 2) 岩体质量测试：用于评估岩体结构面特征和质量级别。按GB/T 50218的有关规定执行；
- 3) 地震波速测试：测定岩体纵波和横波速度，推算岩石动力学参数。按GB/T 50266的有关规定执行；
- 4) 现场直剪试验：用于测定岩体的剪切强度参数，如内摩擦角和粘聚力。按GB/T 50266的有关规定执行。

9.2.4 文献参考

非煤岩参数标定可采用文献参考方法。模型参数标定可按下列步骤执行：

- 1) 关键词选择：根据标定参数和应用场景，挑选非煤岩参数标定、力学性质测试、物理特性分析等关键词，按花岗岩、大理岩等岩石类型搜索；
- 2) 筛选标准：除分析文献发表时间、作者和研究机构权威性外，文献引用次数和被引频次也值得分析；
- 3) 参数值汇总：将搜集到的文献中提及的非煤岩参数值整理，建立参数名称、参数数值、测试方法、文献来源等信息的数据库；
- 4) 标定方法对比：分析不同文献中采用的实验设计、测试条件、数据处理等标定方法。分析与研究条件相似或具有参考价值的方法，评估优缺点和适用性；
- 5) 参数范围确定：基于汇总数据，计算参数平均值、标准差、最小值、最大值等统计量，了解参数分布范围和离散程度。分析不同文献间的差异性，综合评估后确定合理参数范围或推荐值；
- 6) 不确定性评估：确定参数值时，分析不确定性并在后续分析和模型中体现。

10 初始化和边界条件

10.1 初始化

初始化根据现场测试结果提供模型初始应力、初始孔隙水压力和初始温度场等，对应力、孔隙水压力和温度的初始化计算，获得模型中任意岩体质点的初始压力分布、初始孔隙水压力和初始温度分布场，并进行平衡性检测。

10.2 边界条件

下列边界条件根据研究对象在实际工程中的环境设定：

- 1) 固定边界条件：节点位移为零，用于模拟不可移动的边界；
- 2) 自由边界条件：无约束的边界，允许节点自由运动；
- 3) 施加应力边界条件：在边界节点上施加特定应力，模拟外部荷载作用；
- 4) 对称边界条件：用于模拟几何和载荷对称情况，减少计算区域；

- 5) 周期性边界条件：用于模拟重复性结构，边界上的节点位移在一个周期内重复；
- 6) 无反射边界：用于消除边界反射波，模拟无限大介质的效果。

11 模型验证

11.1 数值模拟方法、岩石本构模型及参数验证

- 1) 室内力学试验对比，可采用下列验证方式：
 - a) 通过在实验室进行完整的非煤岩岩石力学试验（如单轴压缩、三轴压缩试验等），获取岩石的强度和应力-应变曲线等关键力学参数；
 - b) 对比试验与数值模拟结果，验证数值模拟方法和岩石本构模型有效性。数值模拟方法应准确再现岩石的破坏模式、峰值强度、残余强度以及应力-应变曲线的整体趋势。
- 2) 微震监测对比，可采用下列验证方式：
 - a) 在工程现场进行微震监测，实时记录岩爆事件及其特征；
 - b) 对比微震监测与数值模拟岩爆预测结果，评估数值模拟在捕捉岩爆发生时间、地点和强度方面准确性。
- 3) 现场测量与数值模拟对比，可采用下列验证方式：
 - a) 在现场测量开挖损伤区范围、岩体变形等特征值，反映开挖活动对岩体的实际影响；
 - b) 对比现场测量与数值模拟损伤区厚度、岩体变形等指标，验证数值模拟在模拟开挖扰动效应中的能力。
- 4) 文献验证，可采用下列验证方式：
 - a) 查阅已有文献中的试验/现场监测结果，与当前研究条件相似的案例；
 - b) 将结果与数值模拟结果对比，验证数值模拟方法和本构参数的有效性。

11.2 模型网格尺寸分析

- 1) 根据非煤岩岩体平均矿物颗粒尺寸，框定合理的网格尺寸范围；
- 2) 遵循等差数列的精密逻辑，挑选出多组不同尺寸的网格，逐一进行数值模拟验证；
- 3) 完成上述多组模拟后，对比不同网格尺寸下模型的数值结果；
- 4) 发现连续两组网格尺寸模拟结果之间差异不超过5%的阈值时，可认为两个网格尺寸构成的区间内，网格尺寸选择科学合理。

12 岩爆倾向性预测模拟

- 1) 完成数值验证流程后，可采用经验验证数值模拟方法和材料本构参数，对拟研究的非煤岩岩爆问题模拟研究。模拟宜包括前处理、求解计算和后处理。
- 2) 模型求解完成后，可通过后处理工具查看并分析模拟结果。可包括生成孔洞周边岩体弹性应变能、应力、应变、变形及位移的云图，以及提取单元或节点上变量时程曲线。
- 3) 开源软件环境中，可通过二次开发编程获取模型应变能、应变能密度等岩爆参数。
- 4) 获取模型能量、应力、应变能等变量数据后，按T/GRM 057.1-2023中的岩爆强度理论判据或能量理论判据，对非煤岩岩爆类型、烈度及潜在发生位置评估。

附录 A
(资料性)
基于 FLAC3D 岩爆倾向性数值模拟案例

A.1 数值模型构建

构建尺寸为100 m×50 m×100 m (长×宽×高) 数值计算模型, 中间部位有直径10 m、单循环进尺5 m的圆形隧道。模型几何特征及初始应力条件如图A.1所示。

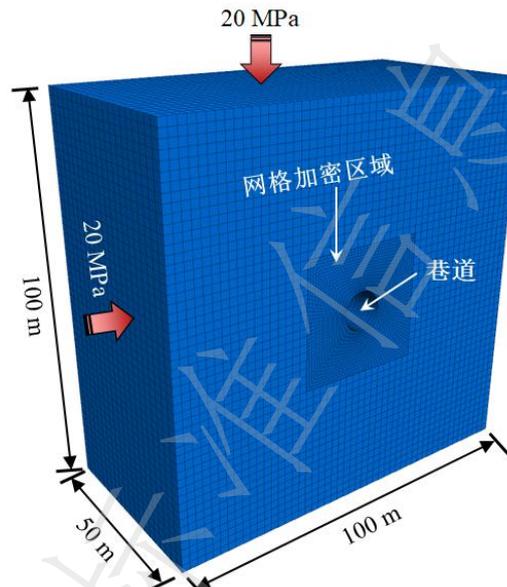


图 A.1 FLAC3D 数值计算模型

A.2 模型网格划分

为了加强对隧道附近岩体力学响应的分析, 对模型中心32 m×32 m范围进行网格加密, 实现对该地质条件的准确有效模拟。

A.3 设置初始条件和设定边界条件

基于以上原则, 在本案例中考虑实际模拟条件, 对顶部施加15 MPa垂直应力, X、Y方向的水平应力分别为垂直应力的0.8和1.2倍, 模型四周和底部采用位移限定边界。

A.4 本构模型选取

在FLAC3D中, 常用的本构模型主要有Mohr-Coulomb模型, Hoek-Brown模型, Drucker-Prager模型等。不同本构模型需根据研究内容和研究对象的特点来决定。

依据研究内容要求, 综合考虑岩体力学环境特点, 在本案例中最终选取简单易用且适用范围广泛的Mohr-Coulomb本构模型来进行数值模拟研究。三维情况下的Mohr-Coulomb模型, 通常使用以下函数表达式描述材料的强度条件:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi) \quad \text{..... (A.1)}$$

式中: τ 是剪切应力, c 是内聚力, σ 是正应力, φ 是内摩擦角

A.5 非煤岩力学参数获取

在FLAC3D软件中选取Mohr-Coulomb本构模型进行模拟时, 需要选取适当的岩体力学参数, 包括内聚力和内摩擦角。

A.6 数值模型求解流程

在使用FLAC3D进行非岩爆模拟时通常采用以下步骤：

1) 构建模型并划分网格

构建模拟对象的几何模型和网格。可通过FLAC3D软件中几何建模工具或导入外部模型文件实现。确保模型几何形状和尺寸符合实际情况，并使用适当的网格划分方法生成网格。

2) 岩体力学参数赋值

模拟开始之前，定义模拟岩体参数，包括密度、弹性模量、泊松比等。对于使用Mohr-Coulomb模型的模拟，需要设置材料的内聚力和内摩擦角。

3) 设置边界条件

根据实际情况设置模拟对象边界条件，确保边界条件设置合理，能够准确地模拟实际情况下的加载和约束条件。

4) 定义加载方案

定义模拟过程中施加到模拟对象上的加载方案，包括静态加载和动态加载。根据实际情况设置加载的方向、大小和加载速率等参数。

5) 设置计算参数

设置FLAC3D软件计算中的时间步长、收敛准则、求解器选项等参数。在本案例中以模型运算达到初始平衡为准则进行计算。确保计算参数设置合理，能够保证模拟的准确性和稳定性。

6) 求解模型

完成模型、岩石属性、边界条件、加载方案和计算参数设置后，通过FLAC3D软件启动模拟计算。软件将根据设定的条件进行模拟计算，并生成模拟结果。

A.7 模拟结果验证

在进行岩爆模拟后，验证模拟结果的方法通常可以考虑以下几个步骤：

1) 现场监测验证

在模拟工程岩体工程力学响应后，可以进行现场监测，包括岩石裂纹、碎片飞溅、坑洞形成等情况。通过比较实地观察和模拟结果，验证模拟的准确性。

2) 数据对比分析

将模拟结果与实际观测数据进行对比分析。可以将模拟结果中的岩石位移、应力分布、裂缝形态等参数与实测数据进行比较，评估模拟的准确性和可靠性。

3) 灵敏度分析

进行模拟结果的灵敏度分析，即对模型中的关键参数进行变化，观察模拟结果的变化情况。通过调整参数，如材料参数、边界条件等，以及观察结果的变化，评估模拟结果对参数的敏感性，从而验证模拟的可靠性。

4) 专家评估和经验验证

邀请岩石力学相关领域专家对模拟结果进行评估和验证。通过专家的经验 and 知识，评估模拟结果的合理性和可信度，以确保模拟结果的准确性和可靠性。

综合以上方法，可以对模拟结果进行多方面的验证和评估，以确保模拟结果的准确性和可信度。同时，需要根据具体情况和研究目的，选择合适的验证方法和指标，以得到更可靠和可信的模拟结果。

A.8 岩爆倾向性判定

模拟完成后，从岩体应力、塑性破坏情况以及位移变形情况综合考虑并结合实际岩体工程特点判定隧道开挖过程中在何处产生了岩爆事故。其具体考虑标准参考如下：

1) 监测岩体应力变化

岩爆通常是由于岩体内部应力超限，因此通过监测岩体的应力变化，分析岩体中应力集中的区域，尤其是在隧道开挖过程中，可能存在高应力集中位置。这些应力集中区域往往是岩爆事故发生的重要标志，通过分析这些区域，可确定岩爆潜在发生的位置。

2) 观察塑性破坏区域

模拟过程中观察模拟结果中塑性破坏区形态和范围，包括破碎程度以及变形情况等。塑性破坏区越广泛、越集中，岩爆发生的可能性就越大。因此通过观察这些区域，可以初步确定潜在发生岩爆位置。

3) 分析岩体位移和变形

通过监测位移变化，可初步确定可能发生岩爆位置。分析岩体位移和变形情况，特别是在岩体开挖过程中出现的位移和变形异常。岩体的不定位移和变形往往是岩爆事故发生的先兆，因此通过分析位移和变形情况，能够判定可能发生岩爆的位置。

4) 验证与比对

将模拟结果与实际观测数据进行比对和验证，从而判定岩爆发生的可能性。

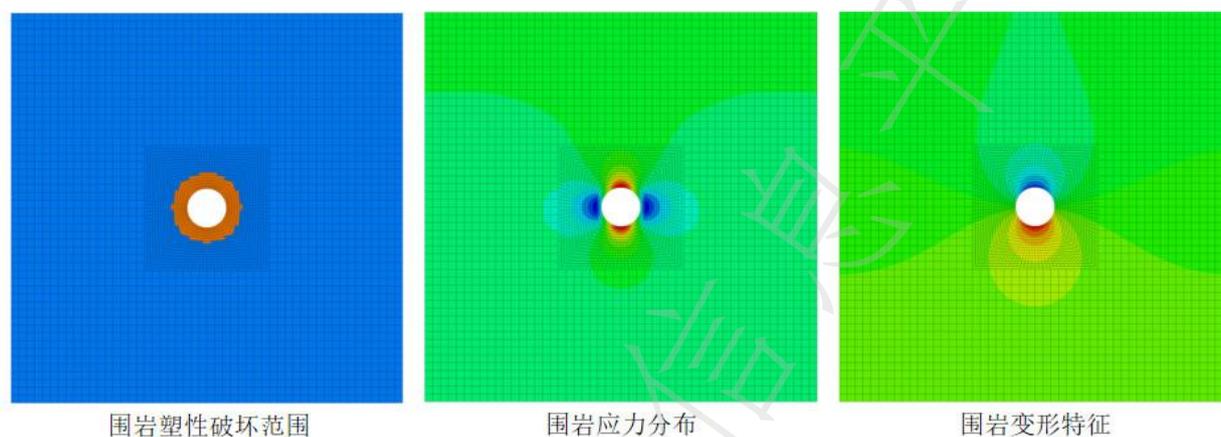


图 A.2 巷道围岩力学响应情况

附录 B
(资料性)
基于 LS-DYNA 岩爆倾向性数值模拟案例

B.1 数值模型构建

采用HyperMesh软件构建地下巷道开挖模型，模型尺寸及受力情况如图B.1所示。

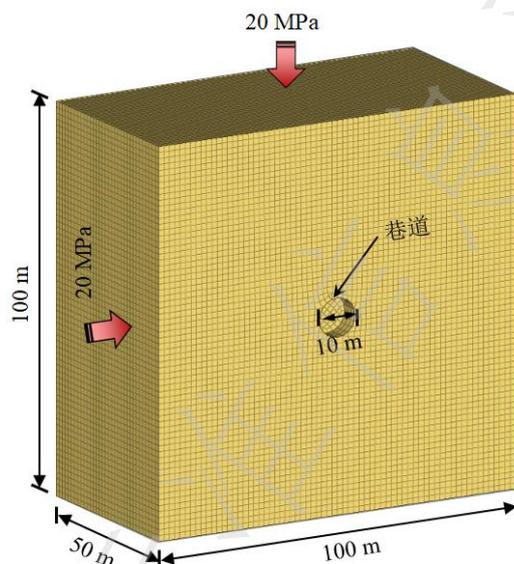


图 B.1 LS-DYNA 数值计算模型

B.2 模型网格划分

按照 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 尺寸划分六面体网格单元，可实现对该地质条件的有效模拟。

B.3 设置初始条件和边界条件设定

基于以上原则，在本案例中考虑实际模拟条件，对上下和左右两侧均施加 20 MPa 的垂直应力，模型四周和底部施加固定约束。

B.4 本构模型选取

在LS-DYNA材料数据库中，模拟岩石常用的本构模型主要有Riedel-Hiermaier-Thoma模型（RHT）、Johnson-Holmquist（JH）模型等。不同本构模型需根据研究内容和研究对象的特点来决定。

1) RHT模型

RHT本构考虑了材料强度与压力、应变速率的关系、材料的损伤与失效、多孔隙特征以及裂纹扩展与破碎，材料参数可通过理论分析、三轴压缩试验和文献参考确定。

2) JH模型

该模型旨在描述脆性材料在极端动态载荷条件下的力学行为。模型主要考虑了材料的强度、损伤和压实特性，通过应力、应变和应变率之间的关系来描述材料的动态响应。

依据研究内容要求，综合考虑岩体力学环境特点，在本案例中最终选取简单易用且适用范围广泛的RHT模型来进行数值模拟研究。

B.5 岩体力学参数获取

在LS-DYANA软件中选RHT本构模型进行模拟时，需要选取适当的岩体力学参数，该模型包括38个基本参数。这些参数的选择应基于实验数据、场地调查和工程经验等因素进行综合考虑。以下是一些常用的选取方法：

1) 实验数据分析

通过室内试验、岩芯取样等方式获取岩体力学参数的实验数据，如抗压强度、抗拉强度、内摩擦角等。根据实验数据，可以直接确定岩体力学参数的数值范围。

2) 现有文献和标准

可以参考相关文献和标准，了解类似岩石或土体的典型力学参数范围。这些文献和标准可以提供对岩体力学参数的参考值，供选取时参考。

3) 敏感性分析

在模拟过程中进行敏感性分析，调整岩体力学参数的数值，观察模拟结果的变化情况。通过不断调整参数值，优化模型，以使模拟结果与实际情况尽可能一致。

4) 工程经验

最后，根据岩石类型、地质条件、工程目的和设计要求等因素，结合工程经验和专业知识，综合考虑各种因素，选取合适的岩体力学参数。

B.6 数值模型求解流程

在使用LS-DYNA进行工程地质模拟时通常采用以下的步骤逐一进行。

1) 几何建模

利用HyperMesh软件建立模拟对象的几何模型，然后导出为LS-DYNA支持的格式（.k文件类型）。

2) 网格划分

几何模型创建后，将其离散化为有限元网格。网格划分的质量直接影响计算结果的准确性和效率。通常使用前处理软件HyperMesh或ANSA进行网格划分，并导出为LS-DYNA可以读取的格式。

3) 材料定义

在LS-DYNA中，需要定义材料的物理和力学性质。这包括材料模型（如弹性、塑性、粘弹性等）和相关参数（如密度、弹性模量、屈服应力等）。材料定义在.k文件中通过*MAT卡片完成。

4) 边界条件和载荷定义

在模型中施加边界条件和外部载荷。这包括固定边界、对称边界、位移边界等，以及外力、压力、重力等载荷。边界条件和载荷在.k文件中通过*BOUNDARY和*LOAD卡片定义。

5) 接触定义

如果模型中存在多个部件或材料，需要定义它们之间的接触关系。LS-DYNA提供了多种接触算法（如显式接触、隐式接触），通过*CONTACT卡片进行定义。

6) 控制参数设置

控制参数包括时间步长、求解器设置、输出选项等。控制参数的设置直接影响计算的稳定性和效率。通过*CONTROL卡片设置这些参数。

7) 输入文件准备

前处理完成后，所有信息都包含在.k文件中。将.k文件准备好，作为LS-DYNA求解的输入文件。

8) 运行LS-DYNA求解器

通过命令行或图形界面运行LS-DYNA求解器。

9) 求解结束

求解完成后，LS-DYNA会生成一系列结果文件，包含模拟的详细信息。常见的结果文件包括d3plot（位移和应力应变分布）、d3plotaa（重启动结果）等。

B.7 岩爆倾向性判定

在模拟完成后，可以主要从围岩有效应力分布情况、有效应变以及位移变形情况综合考虑并结合实际岩体工程特点判定隧道开挖过程中在何处产生了岩爆事故。其具体考虑标准参考如下：

1) 监测岩体有效应力变化

岩爆通常是由于岩体内部应力超过其承载能力而导致的，因此通过监测岩体的应力变化，分析岩体中应力集中的区域。这些应力集中区域往往是岩爆事故发生的重要标志，通过分析这些区域，可以确定可能发生岩爆的位置。

2) 观察有效应变区域

当局部区域的应变能积累达到临界值时，这些区域可能发生岩爆，通过监测有效应变，可以识别和预测潜在的岩爆危险区域。这些区域的应变也会显著增加，导致应变集中现象。应变集中的位置通常是岩爆发生的潜在位置。

3) 分析围岩位移和变形

岩体的不定位移和变形往往是岩爆事故发生的先兆，因此通过分析位移和变形情况，能够判定可能发生岩爆的位置。

4) 验证与比对

将模拟结果与实际观测数据进行比对和验证，从而判定岩爆发生的可能性。

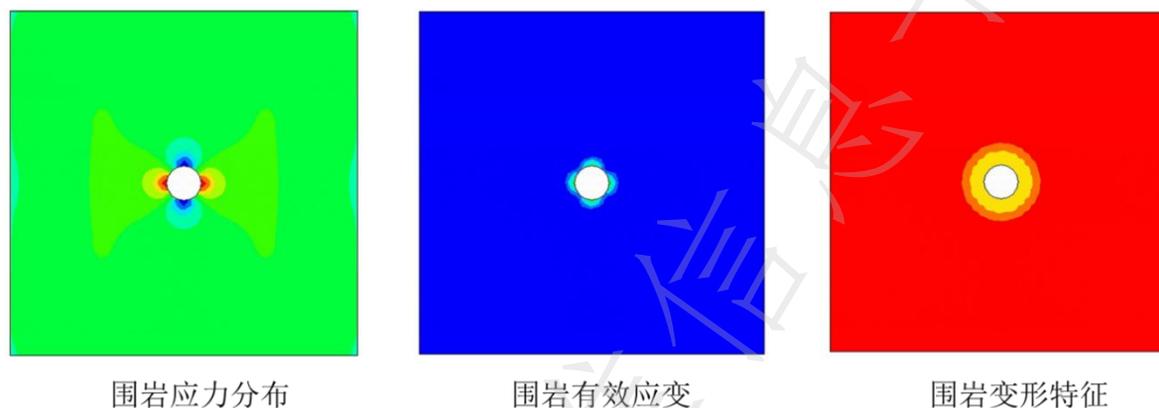


图 B.2 巷道围岩力学响应情况

B.8 模拟结果验证

模拟结果验证参考附录A中基于FLAC3D模拟岩爆倾向性内容

附录 C
(资料性)
基于 PFC3D 岩爆倾向性数值模拟案例

C.1 数值模型构建

建立完整岩体模型，通过逐步删除中心的颗粒来模拟逐步开挖。开挖速率、孔洞的位置、尺寸和形状应符合实际隧道的的设计参数。非煤岩岩爆倾向性分析数值计算模型的示意图如图C.1所示。

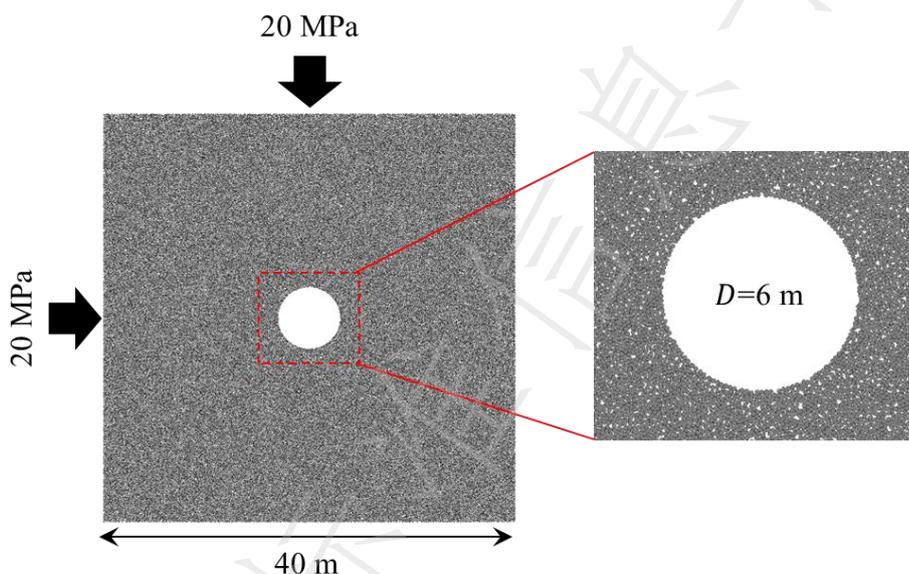


图 C.1 PFC2D 数值计算模型

C.2 初始应力平衡

模型建立后，应设定初始应力平衡，确保在开始模拟前系统处于静态平衡状态，从而可以精确地分析加载后的行为。以下是在 PFC 中设定初始应力平衡流程：

- 1) 运行初始平衡模拟
 - a) 边界条件设置：在模型的边界设置适当的边界条件，通过定义伺服墙的运动向模型施加初始应力来模拟地下应力状态；
 - b) 初始化：开始初始的静态平衡求解过程，颗粒会逐渐移动和重新排列，直到整个颗粒系统内部力平衡；
 - c) 监控收敛：密切观察模拟收敛情况，确保颗粒移动减小到可接受的水平，系统中的未平衡力降到最小。
- 2) 检查和调整
 - a) 检查平衡状态：通过查看颗粒的位移和系统的总动能来判断是否达到了应力平衡。PFC 提供了检测动能和未平衡力的工具，可以帮助评估系统是否稳定；
 - b) 进行调整：如果发现颗粒还在显著移动或存在较大的未平衡力，可能需要调整接触刚度或重新施加边界条件，并再次运行平衡求解。
- 3) 再次验证
 - a) 多次迭代：在必要时重复迭代求解过程，直到系统达到满意的静态平衡状态；
 - b) 最终确认：确认系统的动能和未平衡力都已足够小，保证初始状态真正的静态平衡；
 - c) 这个流程确保了在进行任何进一步的加载或分析前，模型处于一个真实且稳定的初始应力状态，从而提高了模拟结果的可靠性和准确性。

C.3 微观参数标定

在PFC中对岩石参数进行标定是关键步骤，可确保模拟结果能够精确反映岩石的真实行为。参数标定应通过一系列试验数据与模拟结果之间对比进行调整，不仅涵盖岩石力学性质，还包括其破碎、接触以及流变特性。以下是PFC中岩石参数标定的一般流程：

- 1) 收集实验数据
 - a) 基础数据收集：收集岩石的力学参数，如单轴压缩强度、三轴压缩强度、拉伸强度、弹性模量、泊松比等；
 - b) 补充数据：根据需要，收集岩石疲劳特性、裂隙扩展速度、破碎能量等额外数据。
- 2) 建立初步模型
 - a) 几何建模：在PFC中建立代表岩石试样的简化模型。初步模型应该简化实际岩石的复杂性，但需保留关键的几何特征和加载条件；
 - b) 颗粒生成：创建颗粒以模拟岩石的微观结构。颗粒大小、形状和分布应基于岩石的实际微观结构。
- 3) 定义材料属性和接触模型
 - a) 选择接触模型：根据岩石类型和预期的破坏模式选择合适的接触模型（如黏结模型（PBM）、滑移模型（SJM）等）；
 - b) 初步参数设置：设置材料颗粒密度、弹性模量、接触刚度、黏结强度等初始参数。
- 4) 进行校准模拟
 - a) 模拟试验：使用PFC执行单轴压缩、直接拉伸、剪切力学实验，记录模拟结果；
 - b) 调整参数：对比模拟与实验结果，调整岩石参数，以更好地匹配实验数据。
 - c) 验证模型：完成模型和参数验证后，进行更复杂的加载条件或不同岩石条件的模拟，以进一步验证模型的准确性和适用性。

微观参数标定完成之后，将这些参数输入到非煤岩岩爆模型中。

数值模拟的模型采用平行链接键，模型的材料参数及取值见表C.1

表 C.1 模型参数及取值

微参数	数值
安装间隙比, g_{ratio}	0.3
缝隙单元摩擦, φ_B	0.9
狭缝摩擦, φ_s	0.1
接触元素, N	2
粒子和键的有效模量, E_c	35
颗粒和粘结的法向与剪切刚度之比, η	1.5
粘结抗拉强度, σ_{b1} (MPa)	8.7
粘结强度, c_{b1} (MPa)	50.5

C.4 施加边界条件

正确施加边界条件是PFC2D模拟岩爆的关键环节。边界条件对模拟的实际应力分布、应力集中区域及其动态响应有重大影响。以下是施加边界条件的基本步骤，特别是针对岩爆模拟特定要求：

1) 定义模拟范围与边界

依据岩体的实际地质情况以及关注区域，设定模拟几何尺寸和形状。在岩爆的模拟中，通常关注隧道、矿井或其他地下结构附近的岩体。

2) 设置初始应力状态

岩爆通常与高地应力状态有关，因此需要准确地模型中施加初始应力。初始应力一般通过wall施加，控制wall的运动给模型施加水平和垂直方向的应力。

3) 模拟动力扰动

为了模拟岩爆的触发条件，模拟开挖作业或其他形式的动力扰动。

逐步开挖：通过逐步删除代表岩石的颗粒来模拟隧道或矿井的开挖。这可以通过Ball delete 命令实现。

模拟爆破或动态扰动：可以使用Ball velocity 命令给予颗粒初速度，模拟爆破引起的动态效应。

C.5 求解

1) 初始化模型

模型设定：在开始求解之前，需要定义模型的初始状态，包括颗粒的生成、布局、材料属性、初始速度、初始位置和任何初始应力状态。

2) 时间步设置

a) 时间步的重要性：PFC中的求解是基于时间步进的迭代过程。时间步的大小决定了求解的稳定性和精确度。时间步太大可能导致计算不稳定，太小则会使计算过程不必要地延长；

b) 自动时间步调整：PFC提供了自动时间步调整功能，可以根据系统的动态响应自动调整时间步的大小。这一功能可以通过命令 `model timestep auto` 启用。

3) 荷载计算

a) 接触力：PFC中力主要是接触力，包括正应力和切应力。这些力基于颗粒之间的相互作用，如碰撞和摩擦；

b) 外部力：除了接触力外，还会施加外部力，如重力、边界荷载等。

4) 接触检测

检测机制：为了计算颗粒间的力，必须首先检测哪些颗粒之间存在接触。PFC使用高效的空分技术来检测和处理接触。

5) 运动方程求解

a) 积分方程：使用牛顿第二定律，PFC计算每个颗粒的加速度，然后根据加速度更新颗粒的速度和位置；

b) 迭代求解：这一过程在每个时间步内重复进行，直到模拟完成。

6) 数据更新与输出

a) 结果输出：在整个求解过程中，可以设定特定的时间点保存或输出模拟结果，如颗粒的位置、速度、应力等；

b) 监控与调整：可以使用PFC的FISH脚本语言进行求解过程中的实时监控和参数调整。

7) 模拟结束

结束条件：模拟可以基于预设的结束条件终止，如达到指定的模拟时间、系统能量降到一定水平或其他自定义条件。

C.6 后处理

后处理涉及分析和解释模拟结果，从而能够提供对岩爆机制的深入了解以及对防治措施的建议。以下是进行岩爆模拟的后处理步骤：

1) 数据收集与整理

a) 收集关键数据：确保在模拟过程中收集了关键数据，如颗粒位移、速度、应力、应变、接触力和任何裂缝或破碎模式的发展；

b) 输出和保存数据：使用 PFC 的输出功能保存所需的数据，这些数据可能包括时间步数据、颗粒的状态数据、系统的能量数据等。

2) 视觉化分析

a) 绘图和图表：利用 PFC 提供的工具或外部软件（如 Excel、Python 脚本等）生成应力-应变图、位移图和其他有助于分析的图表；

b) 动画制作：制作模拟过程的动画，这有助于直观地理解岩体在模拟过程中的行为，特别是岩爆的发生和扩展过程；

3) 结果解释与分析

a) 分析应力分布：分析模拟过程中岩体的应力分布变化，特别是关注高应力集中区域以及这些区域如何导致岩爆的发生；

b) 识别破碎区域：识别并分析岩体中的破碎区域，理解岩爆的发生位置和范围；

c) 评估动态响应：分析岩体对模拟中施加的动态扰动（如开挖、爆破等）的响应。

4) 比较与验证

a) 与理论和实验结果比较：将模拟结果与现有的理论分析、实验数据或其他模拟研究进行比较，以验证模拟的准确性和可靠性；

- b) 案例研究：如果可能的话，将模拟结果与实际岩爆事件的观察结果进行比较，以评估模型的实用性和预测能力。
- 5) 优化与改进
 - a) 模型优化：根据后处理分析的反馈，对模型进行必要的调整和优化，以改善未来模拟的精度和效果；
 - b) 建议实施：基于模拟结果提出实际的岩爆防治措施和优化建议

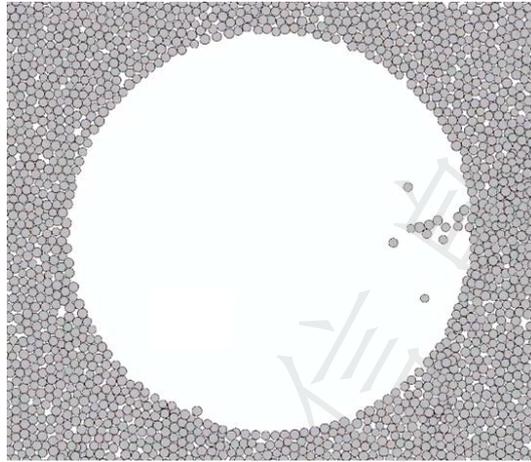


图 C.2 开挖过程中巷道表面发生岩爆

通过这些后处理步骤，可以充分利用PFC模拟岩爆的结果，为地下工程提供科学的决策支持和技术指导。图C.2为在逐步开挖过程中，巷道表面发生岩爆，可以明显的观察到岩爆发生的位置。

C.7 结果验证

得到数值模拟结果后，应该要根据现场监测的结果对其进行可靠性验证，从而确定数值模拟方法以及材料参数的准确性。

附录 D

(资料性)

岩爆数值模拟软件基本情况

表 D.1 岩爆数值模拟软件

数值模拟方法	计算原理	软件/代码名称	开发公司/作者	特点
连续方法	有限元 (FEM)	ANSYS	ANSYS, Inc.	能够处理复杂的材料行为, 包括岩石的非线性断裂和破坏过程
		LS-DYNA	LSTC	可执行复杂的动态和静态分析, 在处理高速冲击和破坏问题 (如岩爆) 方面表现出色
		ABAQUS	Dassault Systèmes	适用于从简单的线性分析到复杂的非线性模拟, 其强大的材料模型和断裂模拟能力非常适合进行岩爆研究
		RFPA2D, RFPA3D	Mechsoft	基于损伤力学和统计理论, 采用 FEM 方法来模拟岩石在不同应力条件下的变形和破裂过程, 可以反映岩石材料在介观尺度上的异质性, 通过 Weibull 分布描述材料属性的不均匀性
		COMSOL Multiphysics	COMSOL Inc.	支持多种材料模型如 Hoek-Brown、Mohr-Coulomb 和 Drucker-Prager 等, 用于描述岩石在不同应力条件下的变形和破坏过程, 结合流体流动、热传导和固体力学等多种物理场, 实现全耦合分析, 精确模拟岩体破坏过程中的水力和热力效应
		ADINA	ADINA R&D, Inc.	能够处理复杂的几何形状和材料行为, 适用于静态和动态载荷条件下的分析
		PLAXIS2D, PLAXIS3D	PLAXIS	专用于岩土工程中复杂地质问题的模拟和分析, 具备强大的非线性材料模型、动态分析、裂隙扩展和破裂模拟能力
	RS2 (Phase2), RS3	Rocscience	分别用于二维和三维岩土工程问题的模拟和分析。RS2 (Phase2) 适用于分析地基、边坡、隧道和地下开挖等工程中的应力和变形, 具备非线性材料模型和稳态/瞬态渗流分析功能。RS3 扩展了 RS2 的能力, 能够处理更加复杂的三维问题, 包括大型地下结构、采矿工程和地质灾害模拟, 提供高精度的应力、变形、稳定性和流体流动分析	
	有限差分法 (FDM)	FLAC, FLAC3D	Itasca Consulting Group, Inc.	分别用于二维和三维岩土工程及地质工程问题的数值模拟, 能够分析土壤、岩石等材料在静态和动态条件下的力学行为
	边界元 (BEM)	Examine	Rocscience	通过对表面进行网格划分, 简化了复杂地下结构的离散化过程, 提高了计算效率
Map3D Non-Linear		Map3D	采用非线性材料模型, 能够模拟复杂的岩石和土壤行为, 包括应力、变形和破坏过程	

表D.1 岩爆数值模拟软件（续）

数值模拟方法	计算原理	软件/代码名称	开发公司/作者	特点
不连续方法	离散元 (DEM)	PFC2D, PFC3D	Itasca Consulting Group, Inc.	分别用于模拟二维和三维颗粒的变形、破裂和动力学行为
		UDEC, 3DEC	Itasca Consulting Group, Inc.	非常适合于处理含有裂隙、接合面和其他结构不连续性的岩体的力学问题。在岩爆模拟方面, 优势在于其能够详细处理岩体内部的裂隙生成、扩展以及块体之间的相互作用
	不连续变形法 (DDA)	DDA codes	Goodman and Shi	DDA 是一种用于模拟不连续变形的数值方法, 特别适用于岩石工程中的地质稳定性分析, 它能够处理岩体系统中的块体滑移、张开和旋转等运动模式, 适合于模拟地震响应、边坡滑坡、坝体稳定性和隧道开挖等工程问题
混合方法	BEM/DEM	DEM_SRS+BEDA +FNET+BEFA	Wei (1992), Wei and Hudson (1998)	结合了多种方法的混合数值模拟技术, 用于复杂地质和岩体工程中的水力-力学耦合分析, 实现了近场和远场区域的全耦合变形和流体分析。它适用于模拟岩体在高应力条件下的破裂和流体迁移行为
	DEM/FEM	CA3	Fakhimi (2009)	结合了 FEM 和 DEM 法的数值模拟软件, 能有效模拟岩爆过程, 通过模拟块体的旋转、裂隙的开启和完全分离, 反映岩石在高应力条件下的破坏机制
		ELFEN	Rockfield	结合了 FEM 和 DEM 优点, 适用于解决多物理场、多尺度和高度非线性问题。可以处理复杂的断裂和破裂过程, 包括裂隙的萌生和扩展, 无需预先设定裂缝路径, 适合研究岩石在静态和动态加载下的破坏行为
		IRAZU	Geomechanica	能够显式捕捉裂缝和破碎过程, 适用于处理复杂的非线性行为, 能够在岩石力学和岩石工程中有效应用。该软件利用高性能计算技术, 特别是通用图形处理单元 (GPGPU), 显著提高了计算速度, 使得大规模模拟在数小时内完成
DEM/FDM	PFC2D/FLAC, PFC3D/FLAC3D	Itasca Consulting Group, Inc.	DEM/FDM 混合方法结合了离散元法 (DEM) 与有限差分法 (FDM) 的优点, 能够同时模拟岩石颗粒间的相互作用及连续介质的变形行为。DEM 捕捉岩体的破裂与颗粒运动特征, 而 FDM 处理大范围地质体的连续变形响应, 两者协同工作, 有效再现深部地下工程中的岩爆现象。	