基于RSM-FLAC的石墨矿采空区失稳概率定量评价*

叶海旺[1,2,3]，邓毕军[1]，陈东方[1,2,3]

（1.武汉理工大学 资源与环境工程学院， 湖北 武汉 430070；
2.武汉理工大学 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室， 湖北 武汉 430070；
3.武汉理工大学 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室， 湖北 武汉 430070）

摘要：在石墨矿开采过程中，由于石墨围岩的稳固性差，给矿山的安全生产带来了极大的威胁。针对现有响应面法计算石墨矿失稳概率未考虑岩体力学参数空间变异性的现状。首先，基于变异函数和协方差函数相结合的数理逻辑，解析各变量之间的关联关系，构建能够反映岩体参数空间变异性的区域化互相关随机场。然后，与破坏接近度指标相结合，构建裂隙岩体失稳的极限状态方程。最后，采用响应面法对采空区进行失效概率分析，实现考虑参数空间变异结构和响应面法的石墨矿采空区失稳风险定量评价。结果表明：蒙特卡洛法所计算的两帮失稳概率为17.67%，顶板失稳概率为30.19%；响应面法所计算的两帮失稳概率为17.71%，顶板失稳概率为29.57%。响应面法仅用蒙特卡洛法计算时间的1/4就得到较为精确的可靠度计算结果，简化了计算过程，提高了计算效率。

关键词：石墨矿；失稳概率；定量评价；蒙特卡洛法；响应面法

中图分类号：TD803　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)01-0112-08

Quantitative Evaluation of Instability Probability of Graphite Ore Goaf Based on RSM-FLAC

YE Haiwang[1,2,3], *DENG Bijun*[1], *CHEN Dongfang*[1,2,3]

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
2.Hubei Province Key Laboratory of Processing of Mineral Resources and Environment,
Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
3.Key Laboratory of Green Utilization of Key Non-metallic Mineral Resources,
Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: In the process of graphite mining, due to the poor stability of graphite surrounding rock, it has brought great threat to the safety production of the mine. In view of the current situation that the spatial variability of rock mass mechanical parameters was not considered in the calculation of the instability probability of graphite ore by the existing response surface method. Firstly, based on the mathematical logic of the combination of variogram and covariance function, the correlation among variables was analyzed, and a regionalized cross-correlation random field that can reflect the spatial variability of rock mass parameters was constructed. Then, combined with the failure proximity index, the limit state equation of fractured rock mass instability was constructed. Finally, the response surface method was used to analyze the failure probability of the goaf, and the quantitative evaluation of instability risk of graphite mine goaf considering parameter spatial variation structure and response surface method was realized. The results show that the instability probability of the two sides calculated by the Monte Carlo method is 17.67%, and the instability probability of the roof is 30.19%. The instability probability of the two sides calculated by the response surface method is 17.71%, and the instability probability of the roof is 29.57%. The response surface method only uses Monte Carlo method to calculate 1/4 of the time to obtain a more accurate reliability calculation result, which simplifies the calculation process and improves the calculation efficiency.

Key words: Graphite ore, Instability probability, Quantitative evaluation, Monte Carlo method, Response surface method

---

* **收稿日期**：2024-01-16

基金项目：湖北省重点研发计划项目(2021BCA152)；国家重点研发计划课题(2020YFC1909602，2021YFC2902901)

作者简介：叶海旺(1971—)，男，安徽望江县人，博士，教授，主要从事采矿、爆破、矿山安全等领域的研究。E-mail：yehaiwang369@hotmail.com

通信作者：陈东方(1986—)，男，黑龙江龙江县人，博士，副教授，主要从事岩体工程智能优化及风险量化领域的研究。E-mail：cdf612.cn@163.com

0 引言

石墨是一种用途十分广泛的特种非金属矿产原料[1]。但我国在石墨采矿方面存在采场生产能力低下、石墨矿岩稳固性不佳等问题[2]。因此,有效评价石墨矿采空区失稳概率是预防围岩失稳和提高石墨生产能力的关键手段。

目前,以 FLAC3D、MIDAS 及 UDEC3D 为代表的数值模拟软件在采空区稳定性分析中常被使用,FLAC3D 由于具有丰富的本构模型和强大的计算能力,应用最为广泛。杨立新等[3]通过 FLAC3D 数值模拟软件进行研究,并基于 Mathews 稳定图法分析暴露时间对采空区稳定性的影响。朱斌等[4]通过 FLAC 研究了不同分层数目、分层角度、充填体厚度及采空区跨度高度比对充填体顶板稳定性的影响。沙成满等[5]完善了 FLAC3D 的非饱和渗流计算功能,实现了充水采空区渗流场与应力场的模拟计算。

然而,在沉积环境、矿物组成、应力历史和地质作用的差异影响下,不同空间位置岩土体的材料参数存在较大的变异性,主要表现为岩土体材料属性呈现出强烈的场地差异性,并且随着空间位置的变化呈现出不同的性质,即空间变异性。岩土参数的空间变异性对岩土工程稳定性评价和支护设计优化有较大的影响,虽形成了较为完善的理论框架,但仍存在计算量大、耗时过长的缺陷,难以在工程实践中投入应用。因此,需对计算方法进行优化,在保证可靠的前提下提升其计算效率,具有重要的工程价值。国内外研究学者针对岩体材料参数的空间变异性展开了较为深入的研究。陈福勇[6]研究了岩体结构面参数空间变异性对隧道拱顶失效概率的影响规律,并开展了系统的参数分析,研究了隧道几何和地质参数的不确定性对隧道顶板楔形体失效概率的影响。刘昆珏等[7]通过有限元极限分析结合随机场分析的方法,研究了隧道设计中考虑围岩参数空间变异性的重要性。李剑平[8]基于 Hermite 随机多项式或反向传播神经网络展开构建边坡安全系数与空间变异参数之间的显式函数关系,提出了针对岩体参数空间变异性边坡可靠性分析问题的非侵入式随机有限差分法。陈东方等[9]以赋值于 FLAC3D 网格模型的参数随机场表征岩体力学参数的空间变异性,实现了磷矿采空区失稳风险的定量评价。罗周全等[10]运用响应面法计算,综合分析了采空区发生失稳破坏的可能性,验证了数值分析和失稳概率分析结论的正确性。

蒙特卡洛法是传统方法中最简便的一种,但其计算代价非常巨大,而响应面法虽可用于求解某些具有隐式函数形式的采空区,但因其表述形式不含交错项,导致对复杂采空区问题的拟合也比较困难。综上,以东冲河石墨矿采空区为工程背景,基于变异函数和协方差函数的数学逻辑,解析复杂各向异性的空间结构,从而构建一种考虑岩体参数空间变异性的区域化互相关随机场;然后,结合破坏接近度指标,建立裂隙岩体失稳的极限状态方程;最后,采用响应面法计算采空区破坏概率,实现考虑参数空间变异结构和响应面法的石墨矿采空区失稳风险定量评价。

1 区域化互相关随机场构建

1.1 区域化变量处理

岩体参数沿不同方向具有一定的变异性,一般采用协方差函数或变异函数来研究岩体参数的各向异性[11]。在此基础上,基于概率分布理论处理变量[12]。以 $Z(x)$ 作为一个区域化的随机变量,则 $Z(x)$ 的协方差矩阵是两个空间点 x 和 $x+h$(h 为采样点距)的二次混合中心距,其能够描述不同空间位置随机变量的涨落。

为更好地处理多个区域变量之间的差异性和整体性,需要交叉分析。假定各分区的随机变量均为 $Z_k(x)$,且满足(准)二阶稳定性假定,其交叉变异函数对于任意 h 满足:$E[Z_k(x+h)]=E[Z_k(x)]$。在点 x 和 $x+h$ 上,得到区域变量 $Z_k(x)$、$Z_{k'}(x)$、$Z_k(x+h)$、$Z_{k'}(x+h)$ 的结果值,则交互协方差函数为:

$$C_{kk'}(x,x+h)=C_{kk'}(h)=\frac{\sum_{i=1}^{N(h)}[Z_k(x_i)Z_{k'}(x_i+h)-m_k m_{k'}]}{N(h)} \tag{1}$$

相应的交叉变异函数为 $g_{kk'}(h)$,即:

$$g_{kk'}(x,x+h)=g_{kk'}(h)=\frac{\sum_{i=1}^{N(h)}\{[Z_k(x_i+h)-Z_k(x_i)][Z_{k'}(x_i+h)-Z_{k'}(x_i)]\}}{2N(h)} \tag{2}$$

式中:$N(h)$ 为分隔变量为 h 时的样本对数;m_k 和 $m_{k'}$ 分别为 $Z_k(x_i)$ 和 $Z_k(x_i+h)$ 的样本平均数。

当 $k=k'$ 时,两个函数可以互相转换。此时,协方差函数和变异函数可用作区域变量的空间分析与结构分析的距离函数。

1.2 随机场模拟与效果检验

1.2.1 岩体力学参数反演

选取合理岩体力学参数能够指导矿山工程,对于预测矿山稳定性及后续支护都具有重要意义[13-15]。采用岩石力学参数反演技术对采空区矿岩的岩石力学参数进行统计分析,过程如下。

(1) 基于摩尔-库伦理论,研究岩体各向同性力学特性,通过位移敏感性分析,获得对位移影响最大的岩石力学参量,即黏聚力(c)、内摩擦角(φ_j)。

(2) 将 c 和 φ_j 作为输入,将计算出的对应采空区围岩位移增量作为输出,构造神经网络的训练样本。

(3) 利用遗传算法对神经网络的结构和权重进行优化,并根据学习误差和检测误差对其进行了验证,最终获得神经网络模型。

(4) 将 60 套三维激光扫描位移增量作为神经网络模型的输入参数,进行石墨化岩石 c 和 φ_j 空间数据库的反演。

1.2.2 随机场模拟

矿山工程的岩体参数具有局域相关性和整体结构特征[16]。为此,构造了区域化互相关随机场,以实测资料为条件约束,采用协同克里金方法,综合考虑多变量之间的相互关系,构建待测点数据。

假定已经获得了每一次随机场参数 $Z_1(x)$,$Z_2(x)$,$Z_3(x)$,…,$Z_k(x)$ 的观察量。在此基础上,假定观测量所指向的各属性变量之间存在联系,称为区域化变量,并将其表示为相关联的区域变量 $\{Z_1(x),Z_2(x),Z_3(x),\cdots,Z_k(x)\}$,而 $Z_{k+1}(x)$,$Z_{k+2}(x)$,$Z_{k+3}(x)$,…,$Z_n(x)$ 是未知的。采用协同克里金法[17]将空间变异性结构引入到区域化互相关随机场中。主要步骤如下。

(1) 将已知条件数据转换为正态分布,得到其均值、方差及相关距离,并采用局部平均法建立用 $Z_u(x)$ 表示的完全随机场。

(2) 基于克里金法的交互变异函数模型 $g_{kk'}(h)$,对于未知点 x_{k+1},x_{k+2},x_{k+3},…,x_n,在所获得的有条件数据下,求其最优线性无偏估计,产生一个条件参数插值域,称为 $Z_{ck}(x)$。在此,最优的线性无偏估算系统方程为:

$$K\lambda=M \tag{3}$$

式中:K 为条件点函数;λ 为协同克里金权重向量;M 为已知点和未知点的函数。

(3) 提取随机场点位的估算值作为步骤(2)中协同克里金插值的条件数据,再重新建立一个在完全随机场基础上的约束随机场,记作 $Z_c(x)$。

将以上 3 种场叠加生成区域化互相关随机场 $Z_{scc}(x)$,其表达式为:

$$Z_{scc}(x)=Z_{ck}(x)+[Z_u(x)-Z_c(x)] \tag{4}$$

构建的随机场综合了多维度区域变量间的联系,融合了多元信息,在此基础上加入了空间变异性的结构,使其更接近于工程实际。对于给定的点 x_1,x_2,x_3,…,x_k,有 $Z_u(x)=Z_c(x)$,则 $Z_{scc}(x)=Z_{ck}(x)$,因此,点位数据是样本数据。对于待测点,将其作为约束场的一个随机误差,定义 $Z_u(x)-Z_c(x)$ 为约束场的误差,并将其作为克里金内插值加约束场的随机误差。

为了将随机场计算结果与后文的响应面法计算失稳概率联系起来,以 FLAC 为基础,采用非侵入式随机有限元方法[18],对二维随机场和有限差分网格进行耦合,耦合前先确定随机场网格的单元尺寸[18]。对于高斯型的自相关函数,随机场的单元个数与小波水平 m 有关,为 $2m$ 个,随机场沿倾向的单元尺寸 L_t 和沿走向的单元尺寸 L_d 可表示为:

$$\begin{cases} L_t=\dfrac{L'_x}{n_t} \\ L_d=\dfrac{L'_y}{n_d} \end{cases} \tag{5}$$

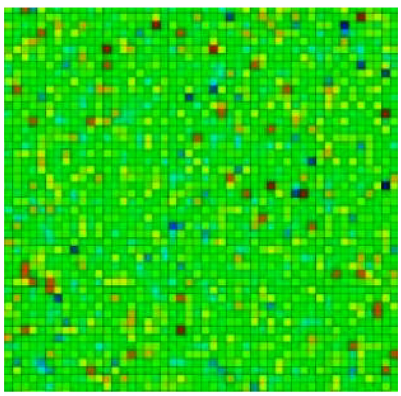
式中:n_t 为随机场沿岩层倾向的随机场单元离散个数;n_d 为随机场沿岩层走向的随机场单元离散个数。

在保证精度的前提下,选取 K-L 级数展开的前 n 项计算确定随机场单元取值顺序,可以有效提高计算效率。采用 FLAC3D 中的 fish 语言,根据随机场单元取值顺序和尺寸,对石墨矿体网格进行重新分组,对 N 套随机场数据进行 N 套运算,检验网格模型的随机参数与随机场量值是否吻合。利用响应曲面方法进行计算和分析,实现对采空区稳定性的定量评价。

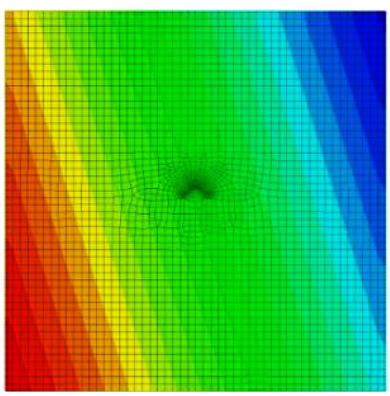
1.2.3 模拟结果检验

为检验区域化互相关随机场模拟性能,分别模拟两类随机场,对比算法一为结构化交叉约束随机

场，对比算法二为基于条件模拟相关理论[19]生成的随机场。两类算法下内摩擦角的随机场模拟结果如图 1 所示。对比两种随机场可以发现，区域化互相关随机场模拟方法以完全随机场和克里金法为基础，考虑了非均质各向异性的空间变异性和随机误差，在再现研究区域参数二阶统计量的基础上，通过调节不同方向变异函数的参数，得到了与实际地层参数的空间变异性更加吻合的随机场模型。



（a）对比算法一

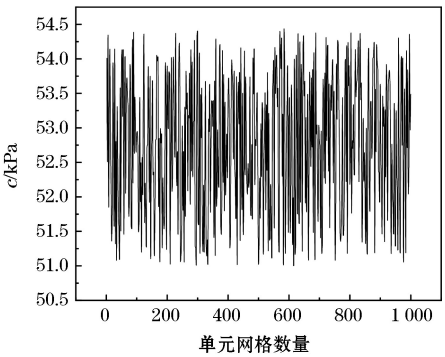


（b）对比算法二

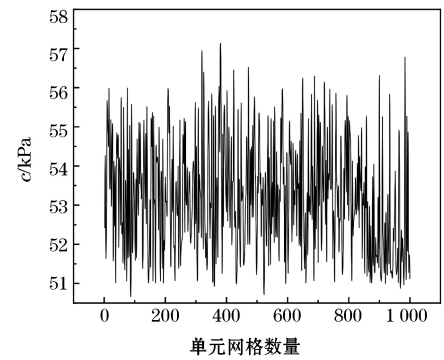
图 1　内摩擦角的随机场模拟结果

Fig.1　Simulation results of random field of internal friction angle

图 2 为模拟黏聚力随机场参数的波动范围。由图 2 可知，相对于考虑岩性条件的随机场，区域化互相关随机场数值模拟结果起伏不大。这是由于区域性和随机误差等因素[20]的作用，使得条件参数插值随机场模型中各参数间的局部差值较大。而跨约束随机场是以多个方向进行变化的，随着时间的增长，所包含的受限数据也随之增多。因此，区域化互相关随机场具有更高的精度，所生成的参数场更为严密。



（a）区域化互相关随机场



（b）条件参数插值随机场

图 2　不同随机场波动范围

Fig.2　Fluctuation range of different random fields

2　基于响应面法的采空区失稳概率定量评价

2.1　破坏极限状态方程的建立

由于破坏具有相对性和主观性，为定量评价岩体在弹塑性阶段的失稳状态，采用破坏接近度的新参量。

$$F=\begin{cases}\omega, & 0\leqslant\omega<1\\ 1+F_1, & \omega=1, F_1>0\end{cases} \tag{6}$$

式中：ω 为危险系数，$\omega=1-Y$；Y 为相同罗德角方向上最近屈服路径距离 d 与最安全屈服路径距离 D 之比，$Y=d/D$；F_1 为岩体破坏度，$F_1=\gamma_p\gamma_p^r$，其中 γ_p 为塑性应变，γ_p^r 为极限塑性应变[21]。

裂隙岩体破坏方式主要为软弱结构面破坏[22]，可根据软弱结构面破坏方式判断裂隙岩体破坏状态，即根据 F 的取值判断岩体单元稳定状态。当 $F=1$ 时，单元处于由屈服状态转变为塑性状态的临界状态；当 $F=2$ 时，单元处于临界破坏状态；当 $F>2$ 时，单元因塑性应变超过其极限塑性应变而处于破坏状态。因此，本文以裂隙岩体破坏接近度 F 作为裂隙岩体失稳评价指标，以 $z=F-2$ 作为东

冲河石墨矿岩体破坏的极限状态方程。

2.2 采空区允许失效概率确定

如何量化评估采空区失效概率是预防围岩失稳事故的关键问题。在此基础上,提出了一种基于失效概率与失效结果相结合的安全评价方法[23]。决策者依据主观评判,综合考虑项目的性质、重要性、实际损失的经验资料、风险与收益的平衡。根据采空区失稳破坏的可能程度、失稳的严重程度、失稳后的平均受害数等指标,对采空区进行了安全等级划分,划分为稳定、较稳定、失稳概率较大、失稳概率很大等 4 种情况,并对采空区的容许破坏概率进行了计算,结果见表 1。

表 1 采空区允许失效概率

Table 1 Allowable failure probability of goaf

破坏概率 P_f	回采空间安全等级
$<10\%$	稳定
$10\%\leqslant P_f<25\%$	较稳定
$25\%\leqslant P_f\leqslant 40\%$	失稳概率较大
$>40\%$	失稳概率很大

2.3 基于响应面法的采空区破坏概率计算

本文采用响应面法(RSM)计算采空区破坏概率。要研究采空区失稳破坏的可能性,就要分析和讨论顶板、侧帮围岩失稳破坏的可能性[24]。采空区的稳定性主要由采空区顶板和侧帮围岩共同决定,任何一个部件失效时,结构体系都会失效,即发生破坏。

根据RSM的基本原理,采用中心复合设计法进行失稳概率分析试验点 x_i 设计,包括体积模量 $K(x_1)$、剪切模量 $G(x_2)$、抗拉强度 $\mu(x_3)$、黏聚力 $c(x_4)$ 和内摩擦角 $\varphi(x_5)$5 个随机变量因子。

首先,利用拉丁超立方体抽样法,选择适当的采样点,利用线性回归法,对线性代数方程进行求解,获得 Hermite 随机多项式待定系数[25-26],进而构建输入参数采样值与输出响应量安全系数间的非线性关系;然后,基于破坏接近度评估采空区的稳定性,通过 Nataf 等概率转换,生成 1 000 套独立的非正态性样本,并基于 Hermite 随机多项式,获得 1 000 个破坏接近度响应量,将每一个响应量代入极限状态函数 $z=F-2$ 中进行失效判定;最终,根据式(7)和式(8),计算出石墨矿采空区失稳的破坏概率 P_f 和可靠性指数 β。

$$P_f=\frac{\sum_{k=1}^{N}M[I(x_k)]}{N} \tag{7}$$

$$\beta=-\phi^{-1}(P_f) \tag{8}$$

式中:N 为抽样次数;$M(\cdot)$ 为石墨矿岩体破坏的极限状态函数;$I(\cdot)$ 为巷道围岩随机场单元的破坏接近度响应量,当 $I(\cdot)<0$ 时,$M(\cdot)=1$,否则 $M(\cdot)=0$;x_k 为第 k 组输入的随机变量样本;$\phi(\cdot)$ 为标准正态分布累计分布函数值。

3 工程应用

3.1 工程背景

东冲河石墨矿区位于兴山县县城东南方向 31.5 km 处。该矿段矿岩裂隙分布特征明显,矿区分为上、下两段,其中下段为石墨矿的主要赋存部位。采用嗣后充填采矿法开采,矿块沿矿体走向布置,采场长度为 40~60 m,阶段高度为 30 m,矿体宽度为 2~8 m,矿块顶柱为 4 m,间柱宽 5 m。

为准确判定该采空区的失稳破坏情况,通过采空区的失稳破坏信息对现场进行探测。根据现场探测结果,揭露Ⅱ号矿体的顶底板 RQD 值统计结果,见表 2。矿体顶板的 RQD 值为 10%~83%,平均为 53%,岩石质量总体中等,局部为极劣;Ⅱ号矿体的 RQD 值为 12%~66%,平均为 51%,岩石质量总体中等,局部为极劣;矿体底板的 RQD 值为 39%~82%,平均为 64%,岩石质量总体中等,局部为劣。

表 2 石墨矿体及顶底板围岩 RQD 值

Table 2 RQD values of graphite ore body and surrounding rock of roof and floor

岩性	RQD 最小值/%	RQD 最大值/%	RQD 平均值/%
矿体顶板	10	83	53
Ⅱ号矿体	12	66	51
矿体底板	39	82	64

现场调查结果表明:石墨矿围岩基本由片麻岩夹块状变质杂岩组成,岩体中构造裂隙和结构面发育,完整性较差,岩石质量以中等为主。开采过程中的工程地质问题主要是顶板片状坍塌。

3.2 岩体力学参数反演

基于概率密度分布函数,通过拟合确定 c 和 φ_j 的最优概率密度分布分别为对数正态分布和正态分布,均值分别为 4.92 MPa 和 53.3°,最大值分别为 5.18 MPa 和 55.414°,最小值分别为 4.75 MPa 和 51°,标准差分别为 0.23 和 0.17。结合室内试验,数

值模拟中岩体力学强度参数见表 3。

表 3 岩体力学强度参数

Table 3 Mechanical strength parameters of rock mass

岩性	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
矿体	12.55	11.45	4.17	4.92	52.6
顶板围岩	9.87	9.01	6.74	6.19	51.2
底板围岩	16.99	15.51	3.43	4.51	52.4

3.3 有限元模型建立

根据矿体赋存状态,建立网格模型,如图 3 所示。模型沿岩层走向长度为 99 m,沿岩层倾向长度为 91 m,垂直高度为 73 m,石墨矿体网格单元尺寸为 1 m,整个模型包含 148 400 个单元和 156 213 个节点。随机场的模拟结果如图 4 所示。

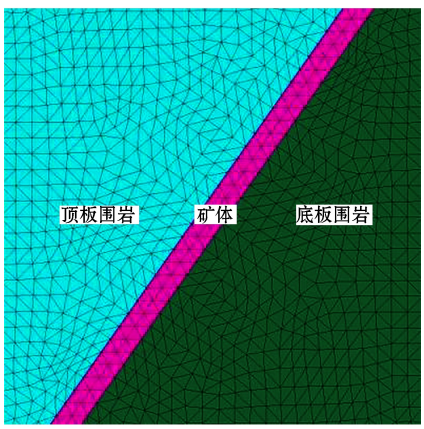


图 3 网格模型

Fig.3 Mesh model

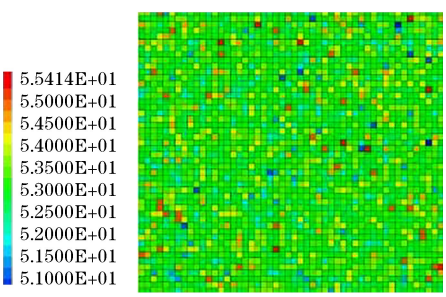


图 4 随机场模拟结果

Fig.4 Simulation results of random field

3.4 石墨矿采空区失稳概率计算

为了验证响应面法的计算结果,本文使用两种不同的算法,第一种算法是传统的蒙特卡洛随机差分法[27],该方法是目前使用最广泛、最有效的一种方法;第二种算法是响应面法[28-29]。采用两种不同的方法分别进行求解,直至收敛,得到不同算法计算性能对比,见表 4,不同算法计算顶板失效概率结果如图 5、图 6 所示。

表 4 不同算法计算性能对比

Table 4 Comparison of computing performance of different algorithms

区域	对比算法 1		对比算法 2	
	P_f/%	计算耗时/h	P_f/%	计算耗时/h
两帮	17.67	14.3	17.71	3.7
顶板	30.19	15.1	29.57	4.1

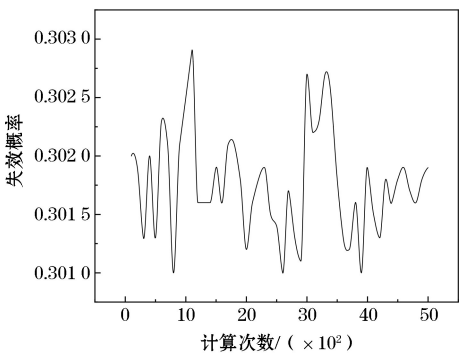


图 5 蒙特卡洛法计算顶板失效概率结果

Fig.5 The results of roof failure probability calculated by Monte Carlo method

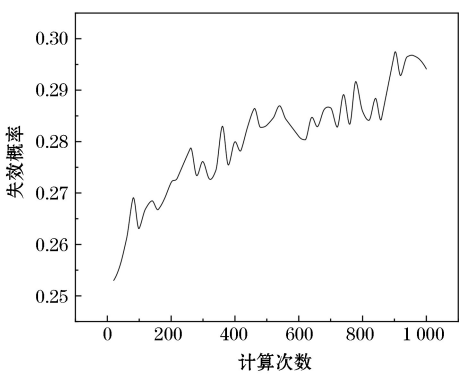


图 6 响应面法计算顶板失效概率结果

Fig.6 The result of roof failure probability calculated by response surface method

观察计算结果可知,传统的蒙特卡洛法虽然具有严谨的理论模型,但计算耗时过大。而响应面法计算失稳概率相较于传统的蒙特卡洛法提高了计算效率。结合表 1 和表 4 可以发现,对比算法 1 计算的两帮失稳概率为 17.67%,顶板失稳概率为 30.19%;对比算法 2 计算的两帮失稳概率为 17.71%,顶板失稳概率为 29.57%,安全等级属于失稳概率较大,顶板失稳概率明显大于两帮失稳概率。这与矿山现场实际调查的结果一致。

由图 5 和图 6 可知,蒙特卡洛法计算次数为 5 000次时,才达到收敛,但仍然具有不平稳性;而响应面法计算次数在 1 000 次以内就可以达到平稳的效果,极大地简化了计算过程。因此,响应面法可以有效地减少抽样次数,提高计算精度。

4 结论

(1) 基于变异函数和协方差函数相结合的数理逻辑,解析各变量之间的关联关系,构建能够反映岩体参数空间变异性的区域化互相关随机场。利用响应面法,通过独立编写的 Matlab 程序生成随机多项式和回归式进行最小二乘拟合,仅用蒙特卡洛计算时间的 1/4 就得到了较为精确的可靠度计算结果,提高了计算效率,实现了基于响应面法考虑空间变异结构的采空区失稳定量评价。

(2) 构建的区域化互相关随机场中,随机参数的均值与统计参数均值一致,标准差折减特征符合随机场基本理论,能很好地表征岩体力学参数的空间变异性。蒙特卡洛法所计算的采空区两帮失稳概率为 17.67%,顶板失稳概率为 30.19%;而响应面法计算的两帮失稳概率为 17.71%,顶板失稳概率为 29.57%。对比可知,响应面法极大地简化了计算过程,提高了计算效率。

参考文献(References):

[1] 肖克炎,孙莉,李思远,等.我国石墨矿产地质特征及资源潜力分析[J].地球学报,2016,37(5):607-614.
XIAO Keyan, SUN Li, LI Siyuan, et al. Geological characteristics and mineralization potential of graphite resource in China[J]. Acta Geoscientica Sinica,2016,37(5):607-614.

[2] 曹代勇,张鹤,董业绩,等.煤系石墨矿产地质研究现状与重点方向[J].地学前缘,2017,24(5):317-327.
CAO Daiyong, ZHANG He, DONG Yeji, et al. Research status and key orientation of coal-based graphite mineral geology[J]. Earth Science Frontiers,2017,24(5):317-327.

[3] 杨立新,陈俊智,任春芳,等.基于拓展的 Mathews 稳定图法和数值模拟的采空区稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),2024,76(1):40-46.
YANG Lixin, CHEN Junzhi, REN Chunfang, et al. Stability analysis of goaf based on extended Mathews stability map method and numerical simulation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(1):40-46.

[4] 朱斌,高通,涂艾林,等.下向进路倾斜分层胶结充填体稳定性研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):1-12.
ZHU Bin, GAO Tong, TU Ailin, et al. Study on stability of inclined layered cemented backfill in downward drift[J]. Mining Research and Development,2024,44(1):1-12.

[5] 沙成满,王星,杨慧敏.基于流固耦合的充水采空区渗流模型[J].东北大学学报(自然科学版),2023,44(4):551-557.
SHA Chengman, WANG Xing, YANG Huimin. Seepage model of water-filled goaf based on fluid-solid interaction[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2023,44(4):551-557.

[6] 陈福勇.基于随机场理论的岩体破坏机理及隧道工程可靠度分析[D].重庆:重庆大学,2021.
CHEN Fuyong. Study on rock mass failure mechanism and reliability analysis of tunnel engineering based on random field theory[D]. Chongqing:Chongqing University,2021.

[7] 刘昆珏,随意,程晓辉,等.考虑围岩参数空间变异性的连拱隧道稳定性分析[J].地下空间与工程学报,2023,19(3):911-920.
LIU Kunjue, SUI Yi, CHENG Xiaohui, et al. Stability analysis of double-arch tunnels considering the spatial variability of rock parameters[J]. Journal of Underground Space and Engineering,2023,19(3):911-920.

[8] 李剑平.考虑岩体参数空间变异性的边坡可靠性及大变形破坏概率研究[D].南昌:南昌大学,2022.
LI Jianping. Reliability and probabilistic analyhses of large deformation failure of rock slopes considering the spatial variability of rock mass parameters [D]. Nanchang: Nanchang University,2022.

[9] 陈东方,王梦柯,徐鼎平,等.层状岩体磷矿床采空区失稳风险定量评价方法研究[J].工程科学与技术,2024,56(05):168-175.DOI:10.15961/j.jsuese.20221242.
CHEN Dongfang, WANG Mengke, XU Dingping, et al. Study on quantitative evaluation method of goaf instability risk of phosphate deposits in layered rock mass [J]. Advanced Engineering Sciences,2024,56(05):168-175.DOI:10.15961/j.jsuese.20221242.

[10] 罗周全,谭浪浪,邓俏.基于 FLAC3D-RSM 的采空区失稳概率分析及验证[J].科技导报,2012,30(10):43-48.
LUO Zhouquan, TAN Langlang, DENG Qiao. Probability analysis and verification of cavity instability based on FLAC3D-RSM[J]. Science & Technology Review,2012,30(10):43-48.

[11] 夏侯云山,张抒,唐辉明,等.考虑参数空间变异结构的结构化交叉约束随机场模拟方法研究[J].岩土力学,2019,40(12):4935-4945+4962.
XIAHOU Yunshan, ZHANG Shu, TANG Huiming, et al. Study of structural cross-constraint random field simulation method considering spatial variation structure of parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4935-4945+4962.

[12] 黄宇,杨荣森,韩晓东,等.基于定向半变异函数的裂隙网络空间变异性分析[J].地质科技通报,2023,42(2):186-193.
HUANG Yu, YANG Rongsen, HAN Xiaodong, et al. Analysis of the spatial variability on afracture network based on an oriented semivariogram [J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2023,42(2):186-193.

[13] 张轩煜，施成华，孙晓贺，等.基于随机场理论的顶管隧道施工地表变形特性分析[J].中南大学学报(自然科学版)，2023，54(6)：2174-2189.
ZHANG Xuanyu，SHI Chenghua，SUN Xiaohe，et al. Analysis of surface deformation characteristics of pipe-jacking construction based on random field theory[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2023，54(6)：2174-2189.

[14] 张抒，唐辉明，刘晓，等.基于饱和渗透系数空间变异结构的斜坡渗流及失稳特征[J].地球科学，2018，43(2)：622-634.
ZHANG Shu，TANG Huiming，LIU Xiao，et al. Seepage and instability charateristics of slope based on spatial va6riation structure of saturated hydraulic conductivity[J]. Earth Science，2018，43(2)：622-634.

[15] 阎龙，王勤，刘利娇，等.基于随机场理论的土质边坡可靠度分析[J].水利科技与经济，2023，29(10)：13-16+28.
YAN Long，WANG Qin，LIU Lijiao，et al. Reliability analysis of soil slopes based on random field theory[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economics，2023，29(10)：13-16+28.

[16] 黄德镛，吕世玮，高聪，等.基于空间变异性及沉积规律的尾矿库稳定性模型研究[J].矿冶，2023，32(5)：1-7+73.
HUANG Deyong，LYU Shiwei，GAO Cong et al. Stability model of tailings pond based on spatial variability and sedimentary law[J]. Mining and Metallurgy，2023，32(5)：1-7+73.

[17] 于广婷，刘同文，王琦，等.基于空间变异修正普通克里金的矿区复杂地形高精度建模[J].测绘通报，2022(11)：106-111.
YU Guangting，LIU Tongwen，WANG Qi，et al. High-precision modeling of complex terrain in mining areas based on spatial variability modified ordinary Kriging method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping，2022(11)：106-111.

[18] 杨荣森.个旧矿区高松矿田断裂构造空间变异表征研究[D].昆明：昆明理工大学，2022.
YANG Rongsen. Characterization of spatial variation of fault structures in the Gaosong ore field of Gejiu mining area[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2022.

[19] 张顷顷，王来贵，张华宾，等.台阶边坡非饱和渗流随机场及参数敏感性分析[J].安全与环境学报，2022，22(2)：665-672.
ZHANG Qingqing，WANG Laigui，ZHANG Huabin，et al. Numerical analysis and filed monitoring on deformation characteristics of deep excavation adjacent to shallow foundation building[J]. Journal of Safety and Environment，2022，22(2)：665-672.

[20] 于佳月.考虑参数空间变异性的采空区塌陷风险分析方法研究[D].沈阳：东北大学，2021.
YU Jiayue. Study on the risk analysis method of goaf collapse considering spatial variability of parameters[D]. Shenyang：Northeastern University，2021.

[21] 汪志刚.基于随机场理论的裂隙岩体渗流分析[D].北京：华北电力大学(北京)，2023.
WANG Zhigang. Seepage analysis of fractured rock masses based on random field theory[D]. Beijing：North China Electric Power University (Beijing)，2023.

[22] TANG G L，PENG L M，DENG E，et al. Dynamic responses of train under deformation caused by underpass shield tunnel construction based on stochastic field theory[J]. Journal of Central South University，2023，30(3)：1006-1026.

[23] 吴高桥，聂建国.考虑地层空间变异性的岩溶区基础可靠度分析[J].湖南大学学报(自然科学版)，2022，49(7)：45-53.
WU Gaoqiao，NIE Jianguo. Reliability analysis of footings lying on karst area considering spatially variability of stratum[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences)，2022，49(7)：45-53.

[24] 赵超.基于随机场理论的地层类型与岩土参数空间分布耦合概率建模方法研究[D].武汉：中国地质大学，2022.
ZHAO Chao. Coupled characterization of stratigraphic and geo-properties uncertainties with random field theory[D]. Wuhan：China University of Geosciences，2022.

[25] 易顺，林伟宁，陈健，等.基于随机场理论的基坑开挖地表及围护墙变形分析[J].岩石力学与工程学报，2021，40(增刊2)：3389-3398.
YI Shun，LIN Weining，CHEN Jian，et al. Deformation analysis of surface and retaining wall induced by braced excavation based on random field theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(Suppl.2)：3389-3398.

[26] 文明，张顶立，方黄城，等.基于约束随机场理论的隧道围岩参数空间变异性优化分析[J].现代隧道技术，2021，58(1)：99-108.
WEN Ming，ZHANG Dingli，FANG Huangcheng，et al. Optimization analysis on spatial variability of tunnel surrounding rock parameters based on constrained random field theory[J]. Modern Tunnelling Technology，2021，58(1)：99-108.

[27] 陈志强，王贻明，戴超群，等.基于蒙特卡洛模拟的采空区顶板可靠性分析[J].矿业研究与开发，2019，39(11)：13-16.
CHEN Zhiqiang，WANG Yiming，DAI Chaoqun，et al. Reliability analysis of goaf roof based on Monte Carlo simulation[J]. Mining Research and Development，2019，39(11)：13-16.

[28] 金长宇，张家耀，于中杰，等.基于响应面法的地表塌陷可靠度分析[J].东北大学学报(自然科学版)，2023，44(12)：1734-1742.
JIN Changyu，ZHANG Jiayao，YU Zhongjie，et al. Reliability analysis of surface subsidence based on response surface methodology[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science)，2023，44(12)：1734-1742.

[29] 李鹏，苏超，段鹏坤.基于响应面法的煤巷掘进工作面顶板变形因素分析[J].矿业安全与环保，2023，50(4)：81-88+96.
LI Peng，SU Chao，DUAN Pengkun. Analysis of roof deformation factors in coal roadway heading face based on response surface method[J]. Mining Safety and Environmental Protection，2023，50(4)：81-88+96.