

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2020.259

基于改进 CRITIC-G1 法组合赋权云模型的高阶段充填体稳定性分析

王 石, 魏美亮, 宋学朋, 刘 武, 宋 林

(江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:针对高阶段充填体稳定性风险评估过程中存在模糊性与随机性的特点,引入云模型理论,建立了高阶段充填体稳定性评判模型。以安庆铜矿等国内 4 座深井矿山为研究对象,选取坍塌度、侧向暴露面积、充填料浆坡度、充填接顶效果等 16 项影响因素作为风险评估指标,借助云理论计算隶属于不同风险等级的各指标云模型参数,同时基于改进 CRITIC-G1 法,综合考虑指标之间的相关性与专家的理性判断,将主客观权重进行优化组合,最终根据评估指标的云数字特征和组合权重确定 4 座矿山充填体稳定性等级。研究表明,安庆铜矿、李楼铁矿、冬瓜山铜矿、司家营铁矿风险等级分别为Ⅳ级、Ⅳ级、Ⅲ级、Ⅱ级,司家营铁矿充填体相对更稳定。与其他数学模型相比,该模型在保证结果准确的同时,利用云数字表征模糊性与随机性从而获得不同评估指标耦合作用下的充填体稳定性等级,实现了等级的可视化,具有一定的可靠性,为高阶段充填体稳定性风险评估提供了一种新方法。

关键词:高阶段充填体;云模型;改进 CRITIC 法;组合赋权;风险评估

中图分类号:TD803

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)02-068-13

Stability analysis of high stage backfill based on improved CRITIC-G1 method combined with weighted cloud model

WANG Shi, WEI Meiliang, SONG Xuepeng, LIU Wu, SONG Lin

(College of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, P. R. China)

Abstract: The process of high-stage filling stability risk assessment is characterized with fuzziness and randomness. A high-stage filling stability evaluation model with the introduction of the cloud model theory is proposed in this paper. Taking four domestic deep mines including Anqing Copper Mine as the research objects, 16 influential factors, such as slump, lateral exposure area, filling slurry slope, and filling effect, were selected as risk assessment indicators. The cloud model parameters of each index belonging to different risk levels were calculated with the help of cloud theory. At the same time, based on the improved CRITIC-G1 method, the subjective and objective weights of the evaluation indexes were optimized and

收稿日期:2020-08-24 **网络出版日期:**2020-11-04

基金项目:国家自然科学基金(51804134, 51804135);江西省自然科学基金(20181BAB216013);博士启动基金(jxxjbs17011)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51804134, 51804135), Natural Science Foundation of Jiangxi Province(20181BAB216013), and Doctoral Initial Foundation(jxxjbs17011).

作者简介:王石(1987—),男,江西理工大学讲师,博士,主要从事采矿工艺与充填技术研究。

通讯作者:魏美亮(1996—),男,硕士研究生,主要从事充填技术研究,(E-mail)w_15270631035@126.com。

integrated into the comprehensive weights of the indexes. Then, the comprehensive certainty degree of the backfill stability was calculated by using the forward Gaussian cloud generator, and the stability grade of the filling body of four mines was finally determined. The results show that the risk levels of Anqing Copper Mine, Lilou Iron Mine, Dongguashan Copper Mine and Sijiaying Iron Mine are grade IV, grade IV, grade III, and grade II, respectively, and the filling body of Sijiaying Iron Mine is relatively stable. Compared with other mathematical models, the proposed model not only ensures the accuracy of the results, but also uses cloud numbers to represent the fuzziness and randomness so as to obtain the stability grade of the filling body under the coupling effect of different evaluation indexes. The model realizes the visualization of the classification, and has certain reliability, providing a new method for the risk assessment of the stability of high-stage filling body.

Keywords: high stage filling body; cloud model; improved CRITIC method; combination weighting; risk assessment

阶段空场嗣后充填法具有采充效率高、损失贫化率低、作业安全等优点,同时能够起到控制地压、维护采场稳定性、保证作业安全以及控制地表塌陷等作用^[1-3],在国内外矿山得到广泛应用。然而在高阶段两步骤回采过程中,一步骤胶结充填体的强度和稳定性对二步骤矿柱的安全回采具有关键作用^[4-5],在矿柱回采工程中需要具有足够强度的胶结充填体来支撑围岩并且处于稳定状态,以安全回采相邻矿柱^[6-7]。因此,进行高阶段充填体稳定性风险评价对预防和规避回采过程可能发生的安全风险事件、降低矿石损失贫化意义重大。近年来许多专家学者针对高阶段充填体的稳定性开展了大量研究。魏晓明^[7]通过 FLAC 数值模拟,研究了李楼铁矿不同配比条件下高阶段充填体的应力场、位移场及塑性破坏区,为矿山设计了合理的采场充填配比方案。曾照凯等^[8]运用米切尔算法和强度计算经验公式从力学的角度探讨了安庆铜矿充填体强度与自立高度和宽度的关系,揭示了高阶段充填体稳定性的特征。刘志祥等^[9]建立高阶段矿柱开采爆破分析模型对胶结充填体动静强度进行了试验,分析了爆破动载下充填体破坏规律,研究成果指导了安庆铜矿 5 号矿柱的开采,并且取得良好的效果。徐文彬等^[10]认为岩体稳固性是影响嗣后充填采场矿柱稳定性的关键因素,研究了不同围压下矿柱失稳的 4 个阶段,结果表明剪切破坏是高阶段嗣后充填体的主要破坏方式。

以上研究通过数值模拟和理论分析的方法从充填配比、自立高度和宽度、爆破动载和岩体稳固性等角度分析了充填体的强度和稳定性,然而高阶段充填体稳定性是一个定性概念,且评估过程受诸多不确定因素影响与控制,单从某个影响因素分析,往往以偏概全、事倍功半^[11],因此综合考虑多种因素的耦合影响,将充填体稳定性进行定量化研究具有重要意义。云模型是由 Li 等^[12]提出的处理定性概念与定量描述的不确定性转换模型,通过运行正向正态云发生器,云模型能够将评估对象的模糊性和随机性转化为确定度这一定量值,从而克服了传统数学方法在模糊性与随机性、定性与定量之间存在的局限^[13]。故笔者采用云模型理论研究高阶段充填体的稳定性,同时结合改进 CRITIC-G1 法确定指标组合权重,得到不同风险等级的综合确定度,以此判定高阶段充填体稳定性风险等级,并用工程实例对该方法的有效性和合理性进行验证。

1 云模型理论

1.1 云模型概念及其数字特征

假设 C 是定量论域 U 中的一个定性概念,存在某个定量值 x 属于 U ,同时也是 C 的一个随机实现,定量 x 对定性 C 的确定度可表示为 $\mu(x) \in [0, 1]$,且 $\mu(x)$ 的分布满足^[14]

$$\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, \text{有 } x \rightarrow \mu(x), \quad (1)$$

则把每一个 x 称为云滴, x 在 U 中的分布称为云,云的数字特性由期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 表征。其中 E_x 为云滴所在论域区间的期望,体现了论域空间的中心值;熵 E_n 表示定性概念随机性与模糊性的综合度量;超熵 H_e 表示论域区间中云滴的厚度。

1.2 正向云发生器

云发生器是云模型将评价指标的定性概念与定量描述实现转化的工具,正向云发生器是完成定性到定量的映射,即根据云的数字特征生成云滴的过程。计算步骤如下^[15]:

- 1) 生成以 E_n 为期望、 H_e^2 为方差的一个高斯随机数 $E'_{n_i} = \text{NORM}(E_n, H_e^2)$ 。
- 2) 生成以 E_x 为期望值、 $E'^2_{n_i}$ 为方差的一个高斯随机数 $x_i = \text{NORM}(E_n, E'^2_{n_i})$ 。
- 3) 计算确定度值:

$$\mu_i = e^{-\frac{(x_i - E_x)^2}{2(E_n)^2}} \quad (2)$$

- 4) 形成某个区间内的一个云滴 (x_i, μ_i) 。
- 5) 重复步骤 1)~4), 直至产生 N 个云滴为止。

2 基于改进 CRITIC-G1 法组合赋权的高阶段充填体稳定性风险评价云模型

2.1 评判指标体系的建立

高阶段充填体稳定性评估是一个多因素的复杂系统工程^[11],影响充填体稳定性的因素有很多,既包含定量因素,又包含定性因素。参照相关论文和专家意见^[16-18],最终选取坍塌度(I_1)、充填料浆坡度(I_2)、骨料中值粒径(I_3)、充填间隔时间(I_4)、相邻结构面最大强度比(I_5)、内聚力(I_6)、爆破震动峰值振速(I_7)、垂直应力与水平应力比(I_8)、侧向暴露面积(I_9)、自立高度(I_{10})、充填体密度(I_{11})、28 d 最低抗压强度(I_{12})、地下水状况(I_{13})、接顶效果(I_{14})、布料均匀性(I_{15})、围岩稳固性(I_{16})等 16 项影响高阶段充填体稳定性因素。其中 $I_1 \sim I_{12}$ 为定量指标, $I_{13} \sim I_{16}$ 为定性指标,各影响指标的说明见表 1。

结合工程实际及相关资料^[11, 13]得到评价指标的定量分级标准和定性分级赋值,并对高阶段充填体受影响程度划分风险等级,分别为 I 级(风险较小)、II 级(风险一般)、III 级(风险较大)、IV 级(风险极大)。对于单边界限的变量,如指标 I_3 中,骨料中值粒径 $d < 40 \mu\text{m}$ 时均匀系数合理、级配良好,为 I 级风险, d 不为 0 是因为矿山充填所采用的骨料多为尾砂、河沙、棒磨砂等^[13]; $d \geq 100 \mu\text{m}$ 为 IV 级风险,因为此时料浆中粗颗粒过多,形成的充填体黏结性差,同时加剧了对管道的磨损。指标 I_4 中,充填间隔时间 $t < 12 \text{ h}$ 时处于 I 级风险,此时 t 可取值为 0,表示连续充填,因为间隔充填会使充填体内部产生结构面,破坏其稳定性。针对双边界限的变量,如指标 I_1 中风险等级为 I 级时取值范围为 18~25 cm,因为坍塌度处于这个区间内的料浆满足自流输送的条件,同时也能形成强度较高的充填体;IV 级风险的范围为 29~30 cm,因为此时料浆的坍塌度大,容易离析,形成的充填体强度低,最大上限值 30 cm 为坍塌度筒高度。各指标取值范围见表 2~3。

表 1 影响高阶段充填体稳定性评估指标

Table 1 Stability indexes of high stage filling body

指标名称	指标说明
坍塌度(I_1)	坍塌度是充填料浆流动性的指标,坍塌度越大表示料浆的流动性越好,但坍塌度过大容易产生离析、泌水,形成的充填体强度降低。
充填料浆坡度(I_2)	采空区充填时,料浆往往不能均匀布置。靠近料浆排放处大量的粗颗粒堆积形成坡度,细颗粒和水顺着坡度流失到远离排料口的位置,造成料浆离析现象。
骨料中值粒径(I_3)	骨料的级配和质量会影响料浆在充填管道中的流动性;均匀系数合理、质地坚硬、级配优良的骨料能增强胶结体的强度。
充填间隔时间(I_4)	充填造浆的间隔时间会使充填体产生分层现象,间隔时间越大,充填体的稳定性越差。
相邻结构面最大强度比(I_5)	嗣后充填的采场充填都是采用不同灰砂比的料浆进行分层间隔充填,充填体内部会产生强度不同的结构面,造成充填体的稳定性降低。
内聚力(I_6)	充填体内部颗粒分子之间存在的相互吸引力,内聚力越大,分子结合越紧密,充填体结构越不容易被破坏。

续表 2

指标名称	指标说明
爆破震动峰值 振速(I_7)	爆破产生的爆炸应力波在空气和充填体的界面处发生反射和透射,由于充填体内部存在大量的孔隙,透射入充填体内的应力波产生叠加并可能产生拉应力,造成充填体内部结构破坏。
垂直应力与水平 应力比(I_8)	胶结充填体矿柱水平应力随矿柱高度增高而逐渐增大,垂直方向剪应力在矿柱中心位置达到最大,且随高度增加剪应力值增大。
侧向暴露 面积(I_9)	暴露在空气中的充填体失去了围岩的挤压支护,此时受到的顶板剪切应力作用更加明显。侧向暴露面积越大,充填体稳定性越差。
自立高度(I_{10})	充填体的稳定性与所能达到的自立高度成正比关系,自立高度越高,则充填体的稳定性越好。
充填体密度(I_{11})	密度不仅能反映充填料浆浓度大小,也能表现充填体内部水化反应的剧烈程度。水化反应可以消耗自由水,反应越剧烈形成的充填体密度越大,稳定性越好。
28 d 最低抗压 强度(I_{12})	抗压强度是体现充填体力学性质的重要指标,在最低抗压强度前,充填体内部未出现裂痕等破坏形式;强度越大稳定性越好。
地下水状况(I_{13})	地下水会渗透到充填体里,使充填体的饱水性发生改变,导致稳定性变化,一般来说含水越高,强度越低。此外地下水渗透到充填体的结构面内会软化结构面,加速充填体破坏。
充填接顶 效果(I_{14})	充填接顶是充填体支撑采空区顶板或假顶的基础工作,接顶效果直接关系到充填体的承载强度。一般来说接顶效果越好,充填体的稳定性越高。
布料均匀 性(I_{15})	排料管口处因布料不均匀形成锥体,锥体附近有大量水泥和粗颗粒尾砂汇集,强度高,远离锥体的位置含有大量水和细颗粒尾砂,强度低,造成充填料离析,胶结充填体出现强度弱面。
围岩稳固 性(I_{16})	围岩对充填体具有局部支撑与让压作用,不仅可以承载充填体的自重,也能减小施加在承载层上的力,使充填体保持稳定状态。

表 2 充填体稳定性评估定量指标分类标准

Table 2 Classification criteria of quantitative indexes for stability evaluation of backfill body

风险等级	I_1/cm	$I_2/\%$	$I_3/\mu\text{m}$	I_4/h	I_5	I_6/MPa
I	18~<25	<2	<40	<12	<1.5	≥ 0.2
II	25~<27	2~<4	40~<70	12~<24	1.5~<3.0	0.15~<0.2
III	27~<29	4~<6	70~<100	24~<48	3.0~<4.5	0.10~<0.15
IV	29~<30	≥ 6	≥ 100	≥ 48	≥ 4.5	<0.1
风险等级	$I_7/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	I_8	I_9/m^2	I_{10}/m	$I_{11}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	I_{12}/MPa
I	<0.8	<1.2	<500	<30	≥ 1.8	≥ 2.0
II	0.8~<1.2	1.2~<1.8	500~<2000	30~<60	1.6~<1.8	1.5~<2.0
III	1.2~<1.6	1.8~<2.4	2 000~<4 000	60~<120	1.4~<1.6	1.0~<1.5
IV	≥ 1.6	≥ 2.4	≥ 4000	≥ 120	<1.4	<1.0

表 3 充填体稳定性评估定性指标评分标准

Table 3 Scoring standard of qualitative indexes for stability evaluation of filling body

风险等级	赋值	地下水状况 I_{13}	接顶效果 I_{14}	布料均匀性 I_{15}	围岩稳固性 I_{16}
I	0~2	无淋水水迹, 围岩周围干燥	料浆均匀稳定, 接顶率高	多管多点下料, 排口间距小, 料浆分布均匀	岩质稳定, 比较坚硬, 稳固性好
II	2~4	岩体受水的影响小, 略湿	料浆沉降率小, 部分接顶	单管多点下料, 排口间距小, 料浆坡度小	岩质中等稳定, 节理发育, 较硬
III	4~6	地下水发育, 岩体受水影响较大, 滴水	料浆出现分层离析, 部分接顶	单管多点下料, 排口间距大, 料浆坡度较大	岩质较不稳定, 节理发育明显, 较软
IV	6~8	长期有淋水, 岩体受水影响较大, 含水	料浆分层严重, 未接顶	单管两端下料, 排口间距大, 料浆坡度大	岩质极不稳定, 岩体破碎, 软弱

2.2 确定高阶阶段充填体稳定性指标的云数字特征参数

参照相关文献^[19], 高阶阶段充填体稳定性评估指标的云模型数字特征参数可通过下式来计算:

$$\begin{cases} E_x = (C_{\min} + C_{\max})/2, \\ E_n = (C_{\max} - C_{\min})/6, \\ H_e = k, \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_{\min} 和 C_{\max} 为评估指标某一风险等级标准的上限与下限; k 为常数, 表示评价指标的模糊程度, 根据经验取值 0.05。当出现单边界限的变量如 $[C_{\min}, +\infty]$ 或 $[-\infty, C_{\max}]$ 时, 可通过数据的最大上限或下限求出边界参数, 再通过式(3)求出指标的云数字特征^[20]。例如评价因子 x_i 的 4 个评价等级的区间分别为 I $(0, a)$ 、II (a, b) 、III (b, c) 和 IV $(c, +\infty)$, 云数字特征计算方法如表 4 所示, 高阶阶段充填体稳定性风险评价指标按上述模型确定 3 个云数字特征值 E_x 、 E_n 及 H_e , 见表 5。选取正向云发生器, 根据云的数字特征通过 MATLAB 编写程序生成指标云图, 如图 1 所示, 其中横坐标为指标等级取值范围, 纵坐标代表对应的确定度。图 1(a)(b)(c)(d)(e)(g)(h)(i)(j)(m)(n)(o)(p) 展示的云图中风险等级顺序相同, 从左至右依次为 I 级、II 级、III 级、IV 级, 可以明确指标的取值所隶属风险等级的情况。图(c)(d)(f)(g)(i) 中数据点有交叉现象, 反映了云滴的离散程度较大, 同时也说明将指标取值转换为所隶属风险等级确定度时存在的亦此亦彼的模糊性与不确定性。

表 4 评价指标云字特征计算方法

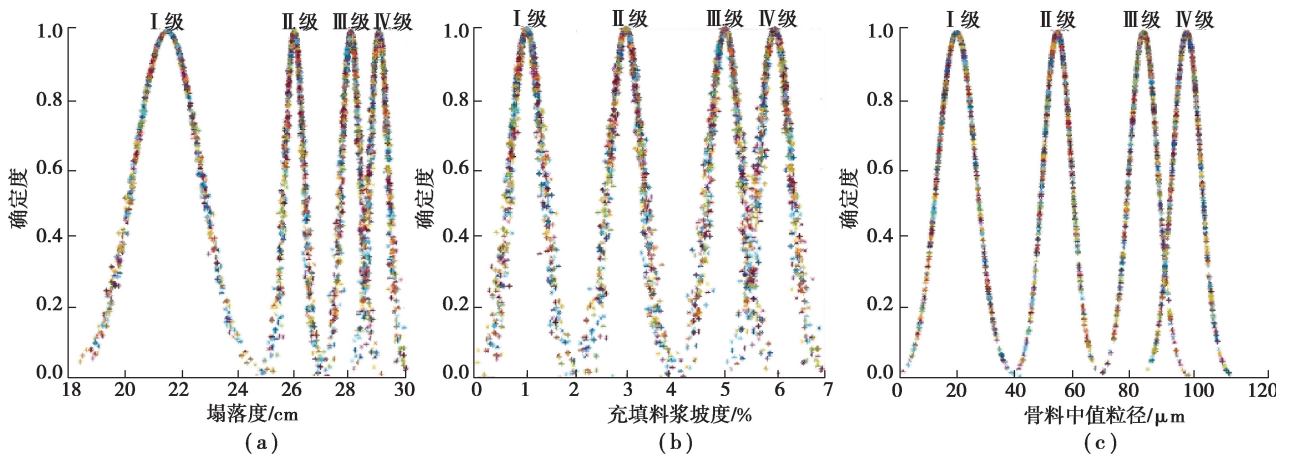
Table 4 Calculation rules of cloud model digital characteristics

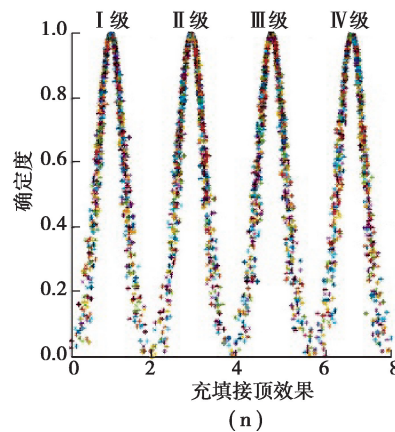
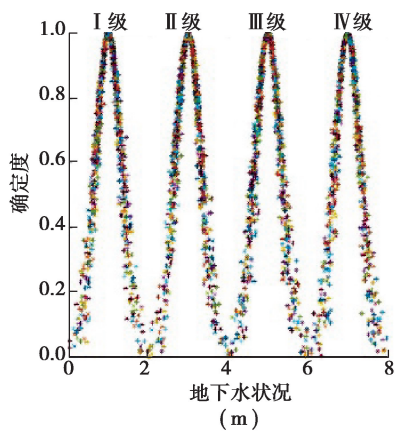
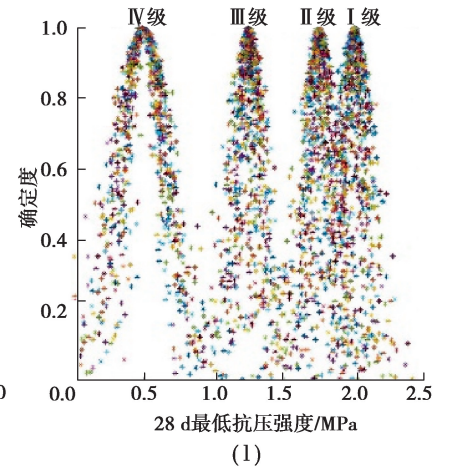
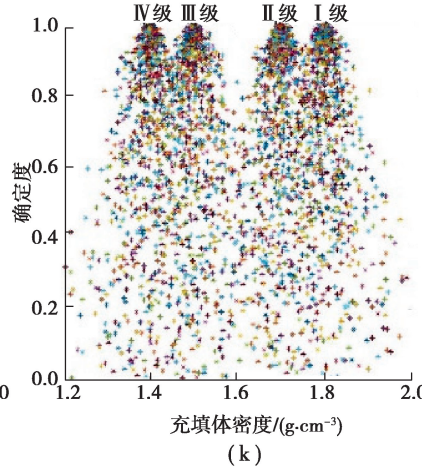
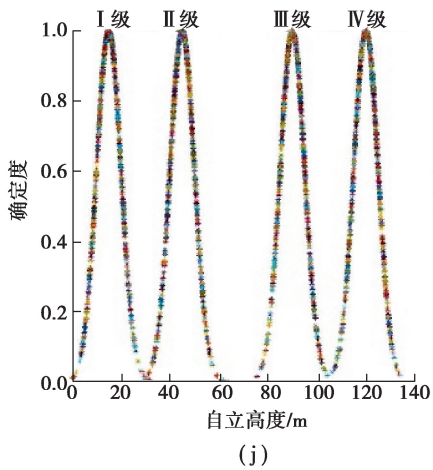
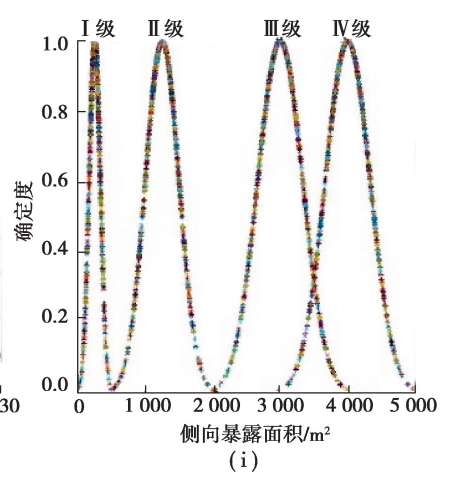
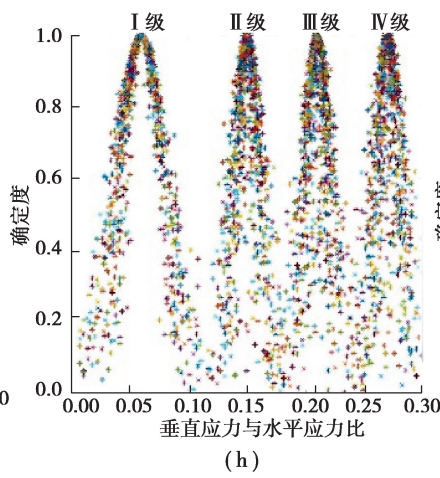
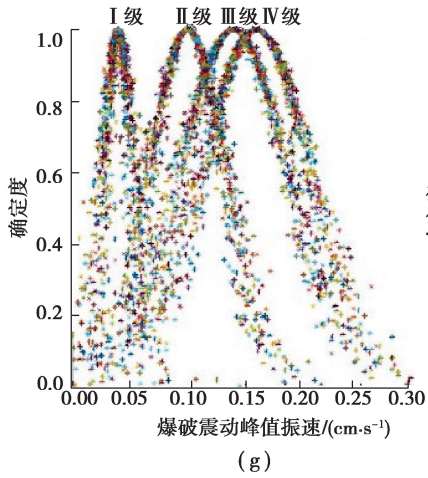
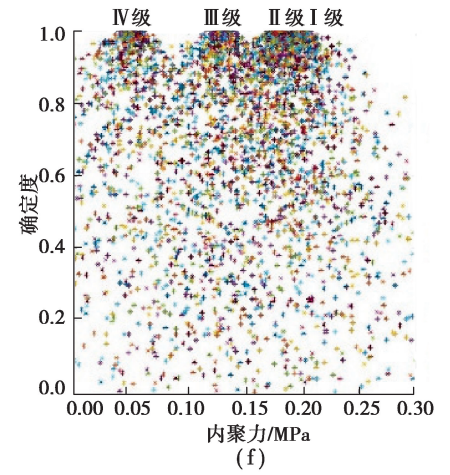
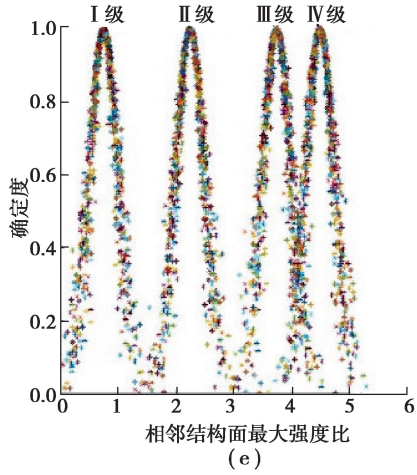
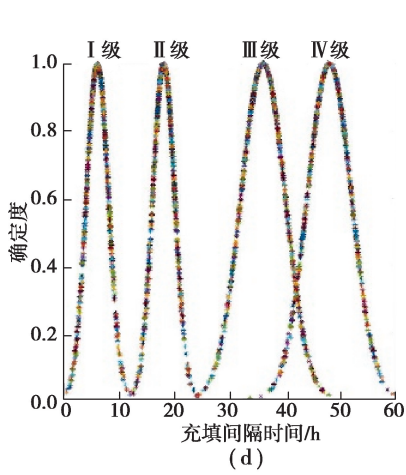
风险等级	期望 E_n	熵 E_x	超熵 H_e
I	$E_{x1} = (0+a) / 2$	$E_{n1} = (a-0) / 6$	0.05
II	$E_{x2} = (a+b) / 2$	$E_{n2} = (b-a) / 6$	0.05
III	$E_{x3} = (b+c) / 2$	$E_{n3} = (c-b) / 6$	0.05
IV	$E_{x4} = c$	$E_{n4} = E_{n3}$	0.05

表 5 高充填体稳定性风险指标的云数字特征

Table 5 Numerical characteristics of cloud model for stability risk index of filling body

评价 指标	(E_x, E_n, H_e)			
	I 级	II 级	III 级	IV 级
I_1	(21.50,1.17,0.05)	(26.00,0.33,0.05)	(28.00,0.33,0.05)	(29.00,0.33,0.05)
I_2	(1.00,0.33,0.05)	(3.00,0.33,0.05)	(5.00,0.33,0.05)	(6.00,0.33,0.05)
I_3	(20.00,6.67,0.05)	(55.00,5.00,0.05)	(85.00,5.00,0.05)	(100.00,5.00,0.05)
I_4	(6.00,2.00,0.05)	(18.00,2.00,0.05)	(36.00,4.00,0.05)	(48.00,4.00,0.05)
I_5	(0.75,0.25,0.05)	(2.25,0.25,0.05)	(3.75,0.25,0.05)	(4.50,0.25,0.05)
I_6	(0.20,0.01,0.05)	(0.18,0.01,0.05)	(0.13,0.01,0.05)	(0.05,0.02,0.05)
I_7	(0.40,0.13,0.05)	(1.00,0.33,0.05)	(1.40,0.47,0.05)	(1.60,0.47,0.05)
I_8	(0.60,0.20,0.05)	(1.50,0.10,0.05)	(2.10,0.10,0.05)	(2.70,0.10,0.05)
I_9	(250.00,83.33,0.05)	(1 250.00,250.00,0.05)	(3 000.00,333.33,0.05)	(4 000.00,333.33,0.05)
I_{10}	(15.00,5.00,0.05)	(45.00,5.00,0.05)	(90.00,5.00,0.05)	(120.00,5.00,0.05)
I_{11}	(1.80,0.03,0.05)	(1.70,0.03,0.05)	(1.50,0.03,0.05)	(0.70,0.23,0.05)
I_{12}	(2.00,0.08,0.05)	(1.75,0.08,0.05)	(1.25,0.08,0.05)	(0.50,0.17,0.05)
I_{13}	(1.00,0.33,0.05)	(3.00,0.33,0.05)	(5.00,0.33,0.05)	(7.00,0.33,0.05)
I_{14}	(1.00,0.33,0.05)	(3.00,0.33,0.05)	(5.00,0.33,0.05)	(7.00,0.33,0.05)
I_{15}	(1.00,0.33,0.05)	(3.00,0.33,0.05)	(5.00,0.33,0.05)	(7.00,0.33,0.05)
I_{16}	(1.00,0.33,0.05)	(3.00,0.33,0.05)	(5.00,0.33,0.05)	(7.00,0.33,0.05)





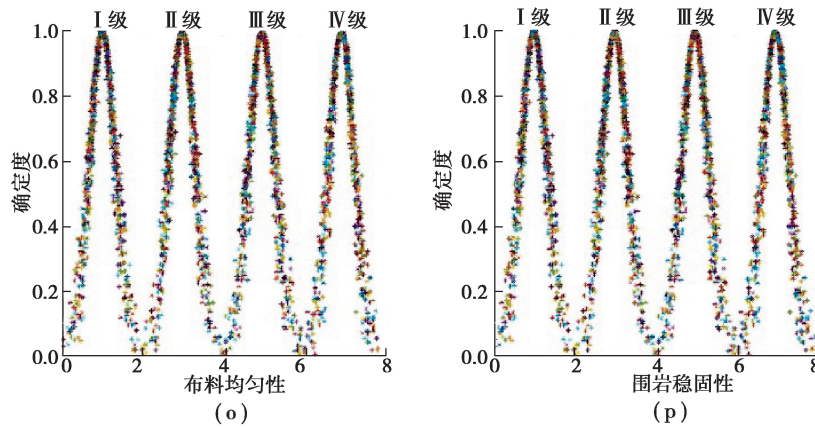


图 1 高阶段充填体风险指标评价等级的云模型

Fig. 1 Cloud model of risk index evaluation grade of high stage filling body

2.3 组合权重计算

2.3.1 G1 法计算主观权重

G1 法是在 AHP 法基础上提出的一种改进型主观权重的赋值方法,在确定各指标权重过程中不需要构造矩阵,计算过程比 AHP 法简便^[21]。G1 法步骤如下:

1) 确定评价指标的序关系。如果指标 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 对评估对象影响程度具有关系式

$$X_1 > X_2 > \dots > X_n, \tag{4}$$

称为在评价指标 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 之间确立了按“>”排序的序关系。

2) 得出各评价指标之间的相对重要程度比。通过邀请专家理性判断评价指标 X_{k-1} 与 X_k 对于评估对象的重要程度,得出重要程度之比:

$$W_{k-1}/W_k = r_k \quad (k = n, n-1, \dots, 3, 2), \tag{5}$$

即 W_{k-1} 的权重是 W_k 的 r_k 倍,其中 r_k 的参考值见表 6。

表 6 r_k 赋值表

Table 6 r_k assignment table

r_k	赋值含义
1.0	指标 X_{k-1} 与指标 X_k 同样重要
1.2	指标 X_{k-1} 与指标 X_k 相比稍微重要
1.4	指标 X_{k-1} 与指标 X_k 相比明显重要
1.6	指标 X_{k-1} 与指标 X_k 相比非常重要
1.8	指标 X_{k-1} 与指标 X_k 相比极其重要

3) 计算评价指标权重系数。基于以上 2 步,求出指标的主观权重:

$$W_k = (1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i) - 1, \tag{6}$$

$$W_{k-1} = r_k W_k \quad (k = n, n-1, \dots, 3, 2). \tag{7}$$

2.3.2 改进 CRITIC 法计算客观权重

CRITIC 法在综合考虑评价指标的信息量及指标之间的关联性的基础上确定权重,具有一定的优越性。由于标准差不能很好地衡量指标间量纲、数量级的变异性,本文中采用变异系数改进 CRITIC 法,其主要步骤如下^[22]。

1) m 个高阶段充填体评估对象和 n 个评价指标中第 i 个对象的第 j 个指标取值 x_{ij} 构成原始评估矩阵

$\mathbf{X}, \mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

2) 对评估矩阵 \mathbf{X} 中各指标值标准化:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n), \quad (8)$$

其中

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}, \quad s_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}. \quad (9)$$

式中: \bar{x}_j 和 s_j 分别为第 j 个指标的均值和标准差。

3) 求指标的变异系数:

$$v_j = \frac{s_j}{\bar{x}_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n), \quad (10)$$

式中 v_j 为第 j 个指标的变异系数。

4) 利用步骤 2) 求得的标准化矩阵 \mathbf{X} 求出相关系数, 得到相关系数矩阵:

$$\mathbf{R} = (r_{kl})_{n \times n} \quad (k = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, n). \quad (11)$$

5) 求各指标独立性程度的量化系数:

$$\eta_j = \sum_{k=1}^n (1 - r_{kj}) \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (12)$$

6) 求各评价指标的综合性系数:

$$C_j = v_j \sum_{k=1}^n (1 - r_{kj}) \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (13)$$

7) 确定各指标权重:

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (14)$$

2.3.3 综合权重的确定

运用 G1 法和改进 CRITIC 法得到了指标的主客观权重。由于主客观赋权法各有各的缺陷, 高阶阶段充填体稳定性风险评价指标权重确立需充分结合主观经验和客观信息的内在规律, 所以结合 2 种方法的优点, 定义了由 G1 法与改进 CRITIC 法组成的综合赋权法^[23]:

$$W_j^* = \frac{W_{G1j} W_{CRITICj}}{\sum_{j=1}^n W_{G1j} W_{CRITICj}}, \quad (15)$$

式中: W_j^* 为第 j 个评价指标对充填体稳定性的综合权重, W_{G1j} 和 $W_{CRITICj}$ 分别为利用 G1 法和 CRITIC 法得到的第 j 个指标对目标的权重。

2.4 计算综合确定度

根据高阶阶段充填体稳定性评价指标的 3 个云数字特征, 使用 MATLAB 软件编写程序生成单指标云图以确定该指标取值在不同等级下的确定度, 再结合指标权重计算获得综合确定度, 基于最大隶属度原则, 选择综合确定度最大值所对应的等级作为充填体稳定性评估结果^[24]。综合确定度计算公式为

$$U = \sum_{j=1}^n \mu(x) W_j^*, \quad (16)$$

式中 $\mu(x)$ 为单指标确定度。

3 应用实例

为了验证本文云模型的有效性并方便与其他方法进行对比, 以采用高阶阶段空场嗣后充填采矿法的安庆铜矿(S1)、李楼铁矿(S2)、冬瓜山铜矿(S3)和司家营铁矿(S4)为例, 利用改进 CRITIC-G1 组合赋权云模型对高阶阶段充填体的稳定性进行风险评估, 通过以往对高阶阶段充填体的研究^[4,8,9,11,18]和矿山的实际资料得到各

指标实测值见表 7。

表 7 各矿山充填体稳定性评估指标实测值

Table 7 Measured values of stability evaluation indexes of filling body in various mines

编号	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{15}	I_{16}
S1	26.8	1.2	108.86	22	4.21	0.29	0.68	2.32	6000	120	1.89	2.23	4.4	4.6	3.4	6.4
S2	27.8	1.1	178.28	28	3.04	0.30	0.99	2.28	5000	100	1.82	0.56	2.0	4.2	7.2	4.8
S3	26.6	0.6	40.66	20	3.73	0.40	1.06	2.06	4920	105	2.01	0.95	1.8	6.2	4.8	6.8
S4	27.4	0.8	66.09	26	2.06	0.18	0.75	1.72	5000	100	1.97	2.30	6.8	4.4	5.2	3.6

3.1 确定评价指标权重

根据 2.3 节的计算方法,通过 G1 法计算主观权重,邀请专家对评价指标的理性判断获得指标之间的序关系和重要程度比,由式(4)~(7)求得各指标主观权重如表 8 所示。利用改进 CRITIC 法进行客观权重计算,由式(8)~(11)计算出各指标的均值、标准差和变异系数,通过各矿山充填体稳定性指标的实测值进行标准化后,求出指标之间的相关系数,再根据式(12)~(14)求出评价指标的客观权重如表 9 所示。最后结合 2 种方法的优点,由式(15)计算出各指标的组合权重见表 10。

表 8 G1 法确定的指标权重

Table 8 Index weight determined by G1 method

W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}	W_{16}
0.108 9	0.075 0	0.099 0	0.062 5	0.052 1	0.174 2	0.026 7	0.022 2	0.018 5	0.013 2	0.010 2	0.209 0	0.006 1	0.040 0	0.082 5	0.008 5

表 9 改进 CRITIC 法确定的指标权重

Table 9 Index weight determined by CRITIC method

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9	ω_{10}	ω_{11}	ω_{12}	ω_{13}	ω_{14}	ω_{15}	ω_{16}
0.005 2	0.062 0	0.132 8	0.039 2	0.057 2	0.067 7	0.052 4	0.025 3	0.020 5	0.018 5	0.012 3	0.151 4	0.172 1	0.047 1	0.078 5	0.057 7

表 10 改进 CRITIC-G1 法组合权重

Table 10 Comprehensive index weight determined by CRITIC-G1 method

W_1^*	W_2^*	W_3^*	W_4^*	W_5^*	W_6^*	W_7^*	W_8^*	W_9^*	W_{10}^*	W_{11}^*	W_{12}^*	W_{13}^*	W_{14}^*	W_{15}^*	W_{16}^*
0.007 1	0.058 2	0.164 7	0.030 7	0.037 3	0.147 8	0.017 5	0.007 1	0.004 8	0.003 1	0.001 6	0.396 3	0.013 1	0.023 6	0.081 1	0.006 1

3.2 风险评估结果与分析

根据表 5 得到的高阶段充填体稳定性指标的云数字特征,由(2)式计算求得各评估指标隶属于不同风险等级的确定度,再结合表 10 得出的各评估指标综合权重值,用式(16)计算指标的综合确定度,根据最大确定度原则,确定每个矿山的最终风险等级,并与未确知测度理论模型、模糊数学理论模型评估结果对比,结果见表 11。

表 11 高阶阶段充填体稳定性风险等级评估结果及对比
Table 11 Assessment results of stability risk level of high stage filling body

评估对象	综合确定度				云模型 评估结果	未确知测度 理论模型	模糊数学 理论模型
	$U(I)$	$U(II)$	$U(III)$	$U(IV)$			
安庆铜矿	0.056 5	0.054 4	0.026 8	0.060 1	IV	IV	IV
李楼铁矿	0.057 0	0.017 9	0.030 8	0.447 5	IV	IV	IV
冬瓜山铜矿	0.030 0	0.039 9	0.125 1	0.027 8	III	III	III
司家营铁矿	0.069 3	0.204 8	0.082 0	0.014 4	II	II	II

由表 11 可知:4 座高阶阶段嗣后充填的矿山充填体稳定性风险等级分别为安庆铜矿 IV 级、李楼铁矿 IV 级、冬瓜山铜矿 III 级、司家营铁矿 II 级。且李楼铁矿 $U(IV)$ 、冬瓜山铜矿 $U(III)$ 与司家营铁矿 $U(II)$ 远大于另外 3 个风险等级的确定度,表明这 3 座矿山充填体稳定性风险等级比较稳定,司家营铁矿的风险等级为 II 级(风险一般),而针对 IV 级风险的李楼铁矿和 III 级风险的冬瓜山铜矿则需要大幅调节指标参数来确保其稳定性风险等级降低。此外,安庆铜矿经改进 CRITIC-G1 云模型对其充填体稳定性风险评估后,综合确定度分别为: $U(I)=0.056 5$, $U(II)=0.054 4$, $U(III)=0.026 8$, $U(IV)=0.060 1$,根据最大隶属度原则安庆铜矿的风险等级处于 IV 级(极大风险),然而该矿山稳定性风险隶属于 I 级和 II 级的综合确定度与 IV 级接近,表明安庆铜矿可通过调节影响稳定性的指标因素,能够较容易地控制矿山充填体稳定性风险等级。与其他 2 种评价模型对比分析可以发现,该模型利用云数字表征模糊性与随机性从而获得不同评估指标耦合作用下的充填体稳定性等级,实现了等级的可视化,结果与其他 2 种模型结果吻合,表明应用云模型评价高阶阶段充填体稳定性是有效可行的。另外,这里采用的改进 CRITIC-G1 组合赋权法综合考虑了专家对风险指标的理性判断与指标之间的相关性,评估结果更能反映矿山充填体的实际风险状况,可靠性更高。

4 结 论

1) 通过引入云模型,综合考虑充填体稳定性的影响因素,选取坍塌落度、侧向暴露面积、充填料浆坡度、充填接顶效果等 16 项定量与定性指标,将高阶阶段充填体稳定性划分为风险较小(I 级)、风险一般(II 级)、风险较大(III 级)、风险极大(IV 级)4 个等级,建立了高阶阶段充填体稳定性风险评价模型,基于云模型数字特征与组合权重计算综合确定度,根据最大隶属度原则确定风险等级,结果显示安庆铜矿、李楼铁矿、冬瓜山铜矿和司家营铁矿充填体稳定性风险等级分别为 IV 级、IV 级、III 级和 II 级。

2) 针对高阶阶段充填体风险评估过程中的模糊性和随机性,建立了基于改进 CRITIC-G1 组合赋权法与云模型相结合的高阶阶段充填体稳定性风险评估模型,较好地评估指标的信息量和指标之间的相关性,并综合专家经验和决策者的意见,兼顾主客观因素,使计算结果更为客观合理,解决了风险评估中评估指标存在不确定性的问题。

3) 基于云模型和组合赋权的高阶阶段充填体稳定性风险评价模型既可以通过最大综合确定度得到充填体稳定性的风险等级,而且能分析每一项指标,确定影响高阶阶段充填体稳定性的主要因素,对矿山回采工作安全管理及风险防控工作提供了一定参考,为高阶阶段嗣后充填的矿山有效解决充填体稳定性风险评价问题提供了新思路。

参考文献:

- [1] 李占金,郝家旺,孙文诚,等.深部大规模开采岩体稳定性数值模拟研究[J].金属矿山,2018(2):56-60.
Li Z J, Hao J W, Sun W C, et al. Numerical simulation analysis on stability of deep large-scale mining rock mass [J]. Metal Mine, 2018(2): 56-60. (in Chinese)

- [2] Yilmaz E, Belem T, Benzaazoua M. Effects of curing and stress conditions on hydromechanical, geotechnical and geochemical properties of cemented paste backfill[J]. *Engineering Geology*, 2014, 168: 23-37.
- [3] Ghirian A, Fall M. Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical behaviour of cemented paste backfill in column experiments; Part II: Mechanical, chemical and microstructural processes and characteristics[J]. *Engineering Geology*, 2014, 170, 11-23.
- [4] 魏晓明, 郭利杰, 李长洪, 等. 高阶段胶结充填体强度空间变化规律研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(S2): 45-52.
Wei X M, Guo L J, Li C H, et al. Study of space variation law of strength of high stage cemented backfill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S2): 45-52. (in Chinese)
- [5] Cao S, Xue G L, Yilmaz E, et al. Utilizing concrete Pillars as an environmental mining practice in underground mines[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123433.
- [6] Cao S, Zheng D, Yilmaz E, et al. Strength development and microstructure characteristics of artificial concrete pillar considering fiber type and content effects[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256: 119408.
- [7] 魏晓明. 高阶段全尾砂胶结充填体强度特性及充填体配比设计研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
Wei X M. Study on strength characteristic and ratio design of high stage whole tailing cemented backfill[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017. (in Chinese)
- [8] 曾照凯, 张义平, 王永明. 高阶段采场充填体强度及稳定性研究[J]. *金属矿山*, 2010(1): 31-34.
Zeng Z K, Zhang Y P, Wang Y M. Research on the strength and stability on fill body of high-bench stope[J]. *Metal Mine*, 2010(1): 31-34. (in Chinese)
- [9] 刘志祥, 李夕兵. 爆破动载下高阶段充填体稳定性研究[J]. *矿冶工程*, 2004, 24(3): 21-24.
Liu Z X, Li X B. Research on stability of high-level backfill in blasting[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2004, 24(3): 21-24. (in Chinese)
- [10] 徐文彬, 宋卫东, 杜建华, 等. 崩落法转阶段嗣后充填法采场稳定性分析[J]. *北京科技大学学报*, 2013, 35(4): 415-422.
Xu W B, Song W D, Du J H, et al. Stability analysis of a backfill stope due to transforming from block caving to stage backfill[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(4): 415-422. (in Chinese)
- [11] 王新民, 张国庆, 李帅, 等. 高阶段大跨度充填体稳定性评估[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(6): 91-97.
Wang X M, Zhang G Q, Li S, et al. Stability evaluation of high stage and large span backfill[J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(6): 91-97. (in Chinese)
- [12] Li D Y, Han J W, Shi X M, et al. Knowledge representation and discovery based on linguistic atoms[J]. *Knowledge-Based Systems*, 1998, 10(7): 431-440.
- [13] 王石, 宋学朋, 石海天. 基于云模型和改进 CRITIC 的深井垂直充填管道磨损风险评估[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(4): 73-84.
Wang S, Song X P, Shi H T. An improved CRITIC and cloud model evaluation method for predicting the wear risk of vertical filling pipes in deep well[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(4): 73-84. (in Chinese)
- [14] 王加闯, 黄明健, 过江. 基于 CRITIC-有限区间云模型的边坡稳定性评价[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(6): 113-119.
Wang J C, Huang M J, Guo J. Evaluation of slope stability based on CRITIC-finite interval cloud model[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(6): 113-119. (in Chinese)
- [15] 涂圣文, 郑克梅, 张尧, 等. 基于改进 CRITIC 法与云模型相结合的高速公路路堑高边坡工程施工安全总体风险评估模型研究[J]. *安全与环境工程*, 2019, 26(3): 127-132.
Tu S W, Zheng K M, Zhang Y, et al. Research on overall risk assessment model of construction safety of freeway high cutting slope engineering based on improved CRITIC method and cloud model[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(3): 127-132. (in Chinese)
- [16] Singh R, Mandal P K, Singh A K, et al. Coal pillar extraction at deep cover: with special reference to Indian coalfields [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 86(2/3): 276-288.
- [17] Zhou N, Yan H, Jiang S, et al. Stability analysis of surrounding rock in paste backfill recovery of residual room pillars

- [J]. Sustainability, 2019, 11(2): 1-13.
- [18] 刘志祥, 李夕兵, 张义平. 基于混沌优化的高阶段充填体可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 348-352.
Liu Z X, Li X B, Zhang Y P. Reliability analysis of high level backfill based on chaotic optimization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 348-352. (in Chinese)
- [19] 李健, 汪明武, 徐鹏, 等. 基于云模型的围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 83-87.
Li J, Wang M W, Xu P, et al. Classification of stability of surrounding rock using cloud model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 83-87. (in Chinese)
- [20] 崔铁军, 马云东. 基于 AHP-云模型的巷道冒顶风险评价[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(10): 2973-2976.
Cui T J, Ma Y D. Risk evaluation of roadway roof fall based on AHP-cloud model[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(10): 2973-2976. (in Chinese)
- [21] 王双川, 吕瑞强, 李德权, 等. 基于熵权 G1 法的飞行保障装备维修合同商模糊综合评价[J]. 兵工自动化, 2016, 35(12): 52-55, 59.
Wang S C, Lyu R Q, Li D Q, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of flight support equipment maintenance contractor based on entropy weight and G1 method[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(12): 52-55, 59. (in Chinese)
- [22] 过江, 张为星, 赵岩. 岩爆预测的多维云模型综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1199-1206.
Guo J, Zhang W X, Zhao Y. A multidimensional cloud model for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1199-1206. (in Chinese)
- [23] 郭春燕, 朱孔来. 城市软实力评价指标体系和测度方法的实证研究: 以山东省 17 市为例[J]. 西安财经学院学报, 2014, 27(4): 79-85.
Guo C Y, Zhu K L. Empirical study of city soft power index system and evaluation method: taking 17 cities in Shandong as an example[J]. Journal of University of Finance and Economics, 2014, 27(4): 79-85. (in Chinese)
- [24] 关贤欢, 郑相悦, 荣帅. 地下矿山充填管道堵塞风险评估模型研究[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(07): 51-56
Guan X H, Zheng X Y, Rong S. Study on risk assessment model of filling pipeline blockage in underground metal mines[J]. Industrial Minerals & Processing, 2018, 47(7): 51-56. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)