DOI：10.16285/j.rsm.2024.0998　　**CSTR:**32223.14.j.rsm.2024.0998

红层软岩崩解面释放率与崩解特性研究

喻昭晟[1]，陈晓斌[1,2]，周雨晴[1]，吕鑫龙[1]

（1. 中南大学 土木工程学院，湖南 长沙 410083；2. 中南大学 重载铁路工程结构教育部重点实验室，湖南 长沙 410083）

摘　要：红层软岩崩解特性随含水率的变化规律具有重要工程意义，准确地描述崩解特性需要提出合适的崩解指标。目前，广泛使用的干湿循环崩解试验无法测量崩解程度随含水率变化的连续过程，常用崩解指标（耐崩解指数 I_d 与崩解率 D_R）无法准确地度量崩解程度和区分崩解特性差异。针对这问题，推导了散体材料表面积的计算方法，提出了崩解面释放率 D_S 作用崩解指标，对比了不同崩解指标的差异；开展干湿循环浸水崩解试验，研究了循环次数对 D_S 的影响；开展离散元法（discrete element method，DEM）模拟，研究了含水率对 D_S 的影响。结果表明，D_S 存在准确物理含义，能准确描述崩解颗粒尺寸对崩解程度的影响。随着循环次数增加，在第 2 次干湿循环后 D_S 变化率达到最大值，第 5 次崩解循环后 D_S 趋于定值。随崩解时间 t 增加，D_S 表现出先增加后稳定的非线性变化，D_S 与饱和度 S_r 表现出线性关系。研究对于红层软岩工程应用与崩解预测具有重要意义。

关　键　词：红层软岩；崩解特性；崩解指标；离散元模拟

中图分类号：TU451　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000－7598 (2025) 增刊－0285－12

Release rate of disintegration surface and disintegration characteristics of red-layer soft rock

YU Zhao-sheng[1]，　CHEN Xiao-bin[1,2]，　ZHOU Yu-qing[1]，　LÜ Xin-long[1]

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
2. MOE Key Laboratory of Engineering Structures of Heavy Haul Railway, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The variation of the disintegration characteristics of red-layer soft rock with changes in water content has significant engineering importance. To accurately describe the disintegration characteristics, it is necessary to propose appropriate disintegration indices. Currently, widely used disintegration tests under drying-wetting cycles cannot measure the continuous process of disintegration rate as water content changes. Commonly used disintegration indices, disintegration resistance index I_d and disintegration rate D_R, are unable to accurately measure the degree of disintegration or distinguish differences in disintegration characteristics. To address this issue, a method for calculating the surface area of granular materials was derived. A new disintegration index, the disintegration surface release rate (D_S), was proposed, and the differences between various disintegration indices were compared. Water immersion and disintegration tests were conducted to study the impact of the number of drying-wetting cycles on D_S. Discrete element method (DEM) simulations were performed to study the impact of moisture content on D_S. The results show that D_S has an accurate physical meaning and accurately describing the influence of particle size on the disintegration rate. With the increase in the number of cycles, the D_S change rate reaches its maximum after the second drying-wetting cycle, and D_S tends to stabilize after the fifth disintegration cycle. As disintegration time (t) increases, D_S exhibits a nonlinear change, initially increasing and then stabilizing. D_S shows a linear relationship with saturation (S_r). This research is of great significance for the engineering application and disintegration prediction of red-layer soft rock.

Keywords: red-layer soft rock; disintegration characteristics; disintegration indices; discrete element simulation

收稿日期：2024-08-13　　录用日期：2024-11-25
基金项目：国家自然科学基金（No.51978674）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51978674).
第一作者简介：喻昭晟，男，1994 年生，博士研究生，主要从事红层泥岩崩解性质研究。E-mail: yuzhaosheng@csu.edu.cn
通讯作者：陈晓斌，男，1978 年生，博士，教授，主要从事交通岩土工程领域粗颗粒土工程性质研究。E-mail: chen_xiaobin@csu.edu.cn

1 引 言

红层软岩崩解是岩体遇水后在孔隙水作用下局部裂纹发育成崩解面的细观过程，具体为红层软岩中的泥质结构与风化孔隙在孔隙水作用下产生局部的应力集中与细观结构软化，最终导致细观结构失效继而发生崩解。红层软岩崩解现象主要受湿度条件（含水率、干湿循环）影响。对崩解程度的度量主要通过对崩解级配进行描述。研究湿度作用下红层软岩崩解行为，提出便捷、准确的崩解指标对红层软岩崩解特性研究具有重要意义。

易崩解的泥岩以及泥质岩在自然环境下的含水率变化十分复杂，已有大量学者开展了干湿循环崩解研究。Franklin 等[1]最早提出了耐崩解试验方法用于研究干湿循环作用下岩石的耐崩解能力，并且提出了耐崩解指数 I_{d} 用以描述试样抵抗崩解的能力。Erguler 等[2]开展了耐崩解试验研究，提出了崩解率 D_{R} 用以描述试样的耐崩解性。Kikumoto 等[3]开展耐崩解试验，采用 Hardin[4]提出的相对破碎率 B_{r} 度量材料的崩解性能。刘晓明等[5]开展浸水崩解试验，采用灰色关联法分析了影响 I_{d} 的因素。熊力[6]和刘晓明[7]等考虑了崩解过程中崩解面增加的能量耗散过程，提出了崩解过程中新增表面能 E_{b} 计算方法。曹雪山等[8]分析了崩解颗粒粒径阈值的选择对崩解特征的影响。曾志雄等[9]分析了崩解产物的级配分布，并通过粒度熵描述崩解特征。赵明华[10]、刘晓明[11-12]和徐汉飞[13]等用分形理论解释了崩解过程，提出了分形维数作为一个有效崩解评价指标。闫猛[14]开展了浸水和洒水崩解试验，分析了剩余试样质量的变化规律。潘艺等[15]开展了浸水崩解试验，采用 D_{R} 描述材料崩解特性，提出了红层软岩遇水崩解的界面模型。张宗堂[16]研究了干湿循环作用下膨胀岩的崩解率 D_{R} 的变化规律。程树范等[17]开展了自然崩解试验和耐崩解试验，研究了 I_{d} 变化规律与矿物夹杂效应。

干湿循环崩解试验能快速获得每个循环过程中试样的极限崩解状态。然而，在实际工程中，湿度环境变化可能是个缓慢的过程，崩解性随含水率的变化规律有重要意义。由于崩解性测试中对试样的烘干和筛分会产生扰动，影响后续试验结果。干湿循环崩解试验虽然包含了湿度变化全部过程，却难以通过试验手段得到对应崩解性变化过程。

常用崩解指标中，I_{d} 的定义简单，使用最广泛，但是没有包含全部的崩解级配信息。使用级配曲线推导的崩解指标如 B_{r}、D_{R} 等，又缺乏明确的物理含义。对于复杂崩解情况，两类指标都可能存在准确性与敏感性不足的问题。

针对干湿循环过程中崩解性随含水率的连续变化规律不明确与现有崩解指标准确性与敏感性不足的问题，首先，基于崩解面面积基本物理含义，提出了崩解面释放率 D_{S} 用于描述红层软岩崩解程度的变化；接着开展浸水崩解试验和离散元法（discrete element method，DEM）数值模拟研究，验证了 D_{S} 对比现有崩解指标的优势，分析了干湿循环次数与含水率对崩解性的影响规律，成果有助于为红层软岩崩解预测提供新的思路。

2 红层软岩崩解面释放率

2.1 散体材料总表面积

工程中采用筛分试验得到材料级配曲线来表征散体材料粒径分布特征。实际上，筛分试验中的孔径数量远小于实际颗粒粒径数量，筛分得到的级配曲线是对颗粒粒径分布的近似描述。如图 1 所示，若每个颗粒粒径已知，由于颗粒粒径不可能连续分布，实际级配曲线是阶梯状曲线，每个上升阶梯代表对应粒径颗粒所增加的累积质量百分数。将每个级配数据点连接，可得到光滑的级配曲线。

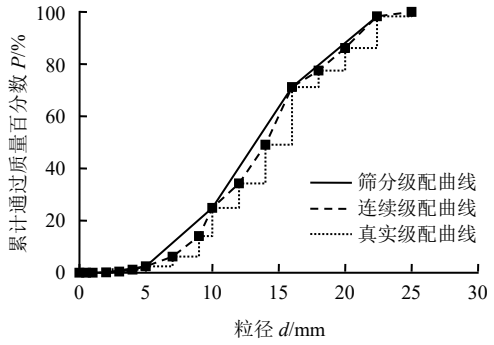


图 1 真实级配曲线与筛分级配曲线

Fig.1 Actual gradation curve and gradation curve obtained by sieve analysis

图 1 中，令真实级配曲线每个台阶对应的增加累积质量百分比为 dP，对应粒径为 d。dP 对应增加的质量 dm 为

$$\mathrm{d}m = m_0 \mathrm{d}P \tag{1}$$

式中：m_0 为散体材料总质量。

近似考虑散体材料颗粒形状为球体，粒径为 d 的颗粒质量 m_{d} 为

$$m_{\mathrm{d}} = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 \rho \tag{2}$$

式中：ρ 为颗粒密度。

质量 dm 所包含的粒径为 d 的颗粒数目 N 为

$$N=\frac{\mathrm{d}m}{m_{\mathrm{d}}}=\frac{m_0\mathrm{d}P}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3\rho} \tag{3}$$

质量 dm 所包含的粒径为 d 的颗粒表面积 dS 为

$$\mathrm{d}S=N\times4\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2=\frac{6m_0}{\rho}\frac{\mathrm{d}P}{d} \tag{4}$$

近似考虑颗粒粒径为连续分布，对式（4）两边积分可得散体材料总表面积 S 的计算公式如下：

$$S=\frac{6m_0}{\rho}\int_0^1\frac{1}{d}\mathrm{d}P \tag{5}$$

对于筛分得到的离散数据，等式右侧的积分可通过计算 P–1/d 曲线下围区域面积来计算，如图 2 所示。显然，根据筛分级配曲线计算的材料总表面积 S 大于等于材料的实际总表面积，S 的计算精度取决于筛分孔径数量。

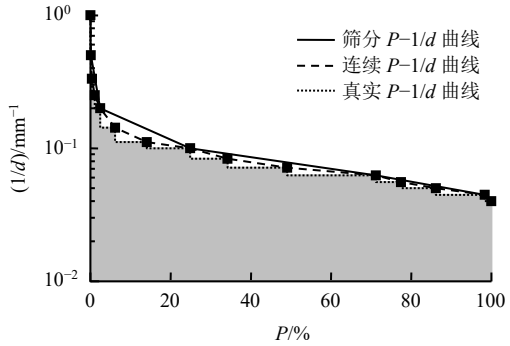


图 2　P–1/d 关系曲线

Fig.2　Relationship curves between P and 1/d

为确定 S 计算精度，以一组理想散体材料为算例对式（5）计算结果进行验证。假定存在一个试样初始为整体，相对密度为 2.5，崩解后形成粒径不一的球形散体材料，崩解试样级配分布与累积表面积见表 1，筛分结果见表 2。

根据筛分结果，得到 P–$6m_0/\rho d$ 关系曲线见图 3。图中，总体曲线 AE 分为 3 个部分。BD 段在筛分孔径范围内，由级配曲线转换而来，筛分范围内的颗粒总表面积为图中面积 $A_{\square GBDH}$。AB 段为小于最小筛分孔径部分曲线，若最小粒径 $d_{\min}$ 按最小筛分粒径计算，小于最小筛分粒径的颗粒表面积为图中面积 $A_{\square OABG}$。DE 段为大于最大筛分孔径曲线，最大粒径 $d_{\max}$ 按式（6）计算，大于最大筛分粒径的颗粒表面积为图中面积 $A_{\square DEJH}$。根据式（5），曲线 AE 下围区域面积 $A_{\square OAEJ}$ 即为全部颗粒总表面积 S。根据表 2 筛分数据计算得到 S = 2 764.5。与表 1 中最大累积表面积 2 237.1 对比发现，式（5）结果与实际表面积较为接近，可以用来估算散体材料的总体表面积。

表 1　崩解试样级配分布与累积表面积

Table 1　Gradation distribution and cumulative surface area of the disintegrated sample

颗粒粒径 /mm	颗粒数量 /个	累积质量 /g	累积表面积 /cm²
0.5	100	0.02	0.79
1.0	100	0.15	3.93
2.0	100	1.19	16.49
3.0	100	4.73	44.77
4.0	100	13.11	95.03
5.0	100	29.47	173.57
7.0	100	74.37	327.51
9.0	100	169.79	581.98
10.0	100	300.69	896.14
12.0	50	413.79	1 122.33
14.0	50	593.38	1 430.21
16.0	50	861.47	1 832.33
18.0	10	937.81	1 934.12
20.0	10	1 042.53	2 059.79
22.4	10	1 189.65	2 217.42
25.0	1	1 210.10	2 237.05

表 2　崩解试样筛分结果

Table 2　Sieve analysis results of the disintegrated sample

筛分孔径/mm	累计通过质量百分比/%
2.0	0.10
5.0	2.44
10.0	24.85
16.0	71.19
22.4	98.31

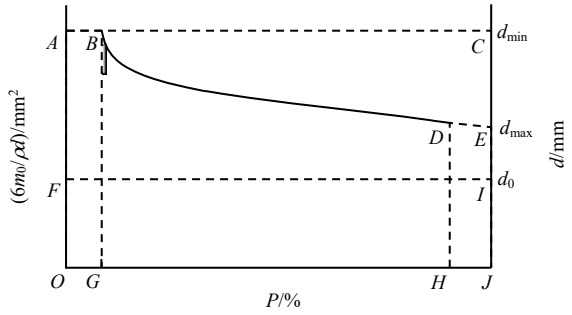


图 3　P–$6m_0/\rho d$ 关系曲线

Fig.3　Relationship curve between P and $6m_0/\rho d$

$$d_{\max}=\sqrt[3]{\frac{6m_0\left(100\%-P_{\max}\right)}{\pi\rho}} \tag{6}$$

式中：$P_{\max}$ 为最大筛分粒径对应累积通过质量百分

比。

2.2 崩解面释放率

试样的崩解过程是试样总表面积增加的过程，崩解过程中增加的表面积 S 的大小可以用来判断试样的崩解程度。根据图 3 中曲线下围面积与 S 的关系，定义崩解面释放率 D_S 为当前崩解增加的表面积与完全崩解增加表面积之比：

$$D_S = \frac{A_{\square OAEJ} - A_{\square OFIJ}}{A_{\square OACJ} - A_{\square OFIJ}} = \frac{A_{\square FAEI}}{A_{\square FACI}} \tag{7}$$

式中：曲线下围面积 $A_{\square OAEJ}$ 为当前崩解试样总表面积；$A_{\square OFIJ}$ 为初始未崩解试样总表面积；$A_{\square OACJ}$ 为完全崩解试样总表面积；$A_{\square FAEI}$ 为当前崩解增加的表面积；$A_{\square FACI}$ 为完全崩解增加的表面积。显然，未崩解试样 D_S 为 0，完全崩解试样 D_S 为 1。D_S 计算公式为

$$D_S = \frac{d_{\mathrm{ini}} d_0}{d_{\mathrm{ini}} - d_0}\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{2d_i} + \frac{1}{2d_{i-1}}\right)\left(P_i - P_{i-1}\right) - \frac{1}{d_{\mathrm{ini}}}\right] \tag{8}$$

式中：d_{ini} 为材料初始等效粒径；n+1 为特征粒径数量；d_i 为第 i+1 个特征粒径；P_i 为粒径大于 d_i 的累计通过质量百分比。特征粒径是在筛分粒径的基础上，补充最小粒径 P_0 = 0%对应粒径 d_0，和最大粒径 P_n = 100%对应粒径 d_n。d_0 与 d_n 即为上文中讨论的最小粒径 $d_{\min}$ 和最大粒径 $d_{\max}$。以表 2 中数据为例，d_i 与 P_i 见表 3，D_S 计算结果见表 4，d_{ini} 的计算公式为

表 3 d_i 与 P_i 计算结果

Table 3 Calculation results of d_i and P_i

特征粒径/mm							累计通过质量百分比/%						
d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
2.0	2.0	5.0	10.0	16.0	22.4	25.0	0.00	0.10	2.44	24.85	71.19	98.31	100.00

表 4 D_S 计算结果

Table 4 Calculation results of D_S

m_0/g	ρ/(g • cm^{-3})	d_{ini}/mm	D_S
1 210.1	2.5	97.4	0.17

$$d_{\mathrm{ini}} = \sqrt[3]{\frac{6m_0}{\pi\rho}} \tag{9}$$

根据计算结果，算例所示散体材料可看作由尺寸 97.4 mm 的初始试样崩解后形成的崩解试样，计算得到崩解面释放率 D_S = 0.17，代表该崩解试样增加表面积占完全崩解试样增加表面积的 17%。

3 红层软岩干湿循环崩解试验研究

3.1 红层软岩浸水崩解试验

为研究干湿循环对红层软岩崩解性的影响，开展了干湿循环浸水崩解试验。试验使用的试样为取自藏南地区某路基工程填料料场的泥质粉砂岩，根据 X 射线衍射图谱（如图 4 所示）可知，其主要矿物成分为石英、云母、赤铁矿、高岭石、钠长石、绿泥石和锐钛矿，胶结形式为泥质胶结。

本文采用浸水崩解试验研究干湿循环作用下红层软岩的崩解特性。试验装置如图 5 所示，试验装置由水箱和可拆卸的试样放置平台组成。干湿循环试验中，首先将干燥后的天然试样冷却至室温；随后放入水箱中浸水 24 h；最后将 24 h 浸水崩解试样烘干后进行筛分；冷却至室温后进行下一个干湿循环，循环至级配无明显变化。

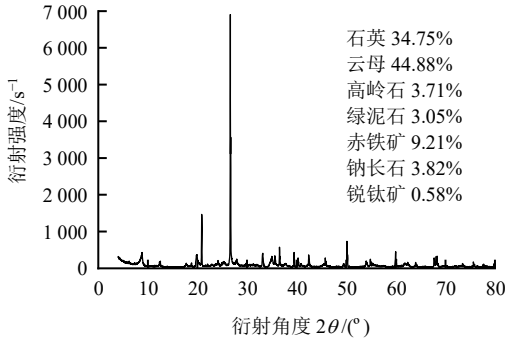


图 4 软岩样品的 X 射线衍射图谱

Fig.4 X-ray diffraction spectrum of soft rock sample

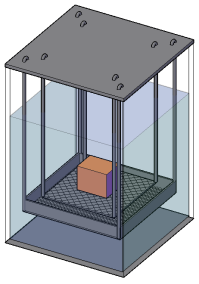


图 5 试验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of experimental device

试验使用了 3 个泥质粉砂岩试样 RWMS#1、RWMS#2、RWMS#3，开展了 3 组干湿循环试验。

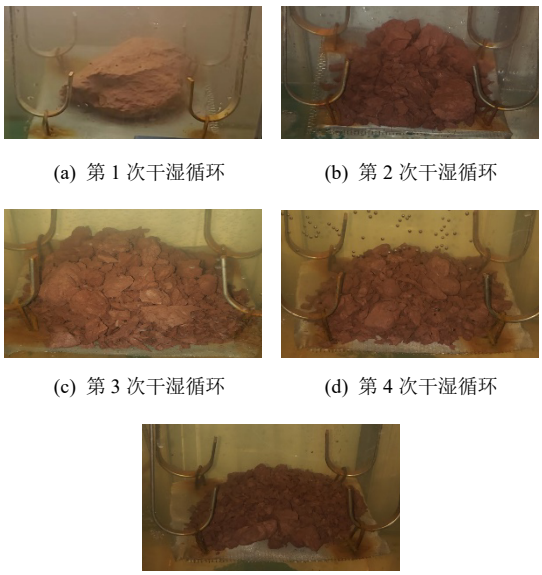
三维扫描后的初始试样见图 6，RWMS#3 试验过程见图 7，试样基本参数见表 5。



(a) RWMS#1　(b) RWMS#2　(c) RWMS#3

图 6　初始试样三维扫描结果

Fig.6　3D scanning results of the initial sample



(a) 第 1 次干湿循环　(b) 第 2 次干湿循环

(c) 第 3 次干湿循环　(d) 第 4 次干湿循环

(e) 第 5 次干湿循环

图 7　RWMS#3 干湿循环崩解过程

Fig.7　Disintegration process in different drying-wetting cycles of sample RWMS#3

表 5　初始试样基本参数

Table 5　Basic parameters of the initial sample

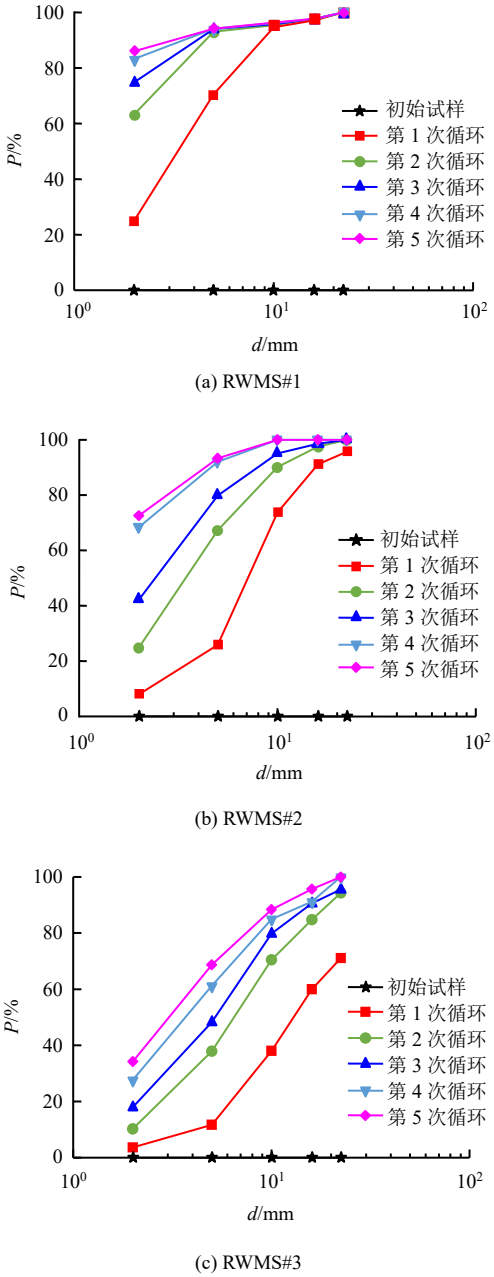
试样	初始质量/g	相对密度	平均相对密度
RWMS#1	574.60	2.68	2.68
RWMS#2	570.28	2.64	2.68
RWMS#3	556.65	2.73	2.68

图 8 为试样 RWMS#1、RWMS#2、RWMS#3 崩解后的级配曲线。由于初始试样尺寸大于最大筛分孔径，初始试样级配曲线为 $P=0\%$的水平直线。随着试样崩解，颗粒尺寸减小，崩解后试样级配曲线上升。3 组试样级配曲线均在第 5 次干湿循环后趋于稳定。3 组试样中，RWMS#1 级配曲线在崩解后上升最多，最终级配曲线斜率最小。RWMS#3 级配曲线崩解后上升最少，最终级配曲线斜率最大。因此，通过级配曲线初步判断 3 组试样崩解性由大至小为：RWMS#1、RWMS#2、RWMS#3。

3.2　循环次数与 D_S 关系

根据崩解试验级配曲线可以得到各组试样的 $P-1/d$ 曲线与 D_S 结算结果，见图 9。图中各试样的 $P-1/d$ 曲线随循环次数的增加而改变，代表了试样崩解面面积的改变。试样 RWMS#1 在第 1 次循环后崩解面积 S = 4 169.73 cm^2，崩解面释放率 D_S = 0.64，在第 5 次循环后 S = 5 969.23 cm^2，D_S = 0.93，崩解性最强。试样 RWMS#3，在第 1 次循环后 S = 1 482.75 cm^2，D_S = 0.22；在第 5 次循环后 S = 4 106.77 cm^2，D_S = 0.65，崩解性最弱。试样 RWMS#2，在第 1 次循环后 S = 2 458.01 cm^2，D_S = 0.37，在第 5 次循环后 S = 5 687.90 cm^2，D_S = 0.89，崩解性中等。

图 10 为各试样循环次数与 D_S 的关系曲线。图



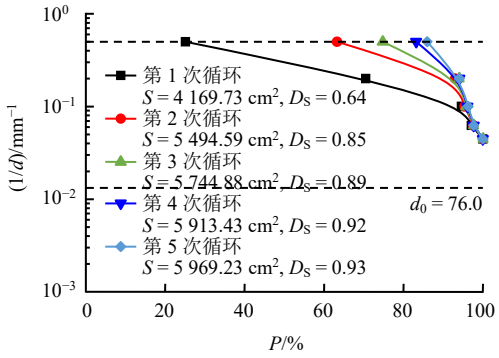
(a) RWMS#1

(b) RWMS#2

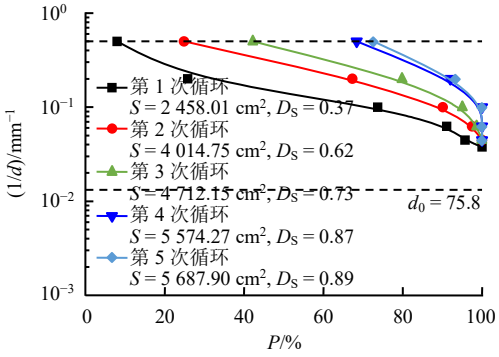
(c) RWMS#3

图 8　干湿循环崩解试样级配曲线

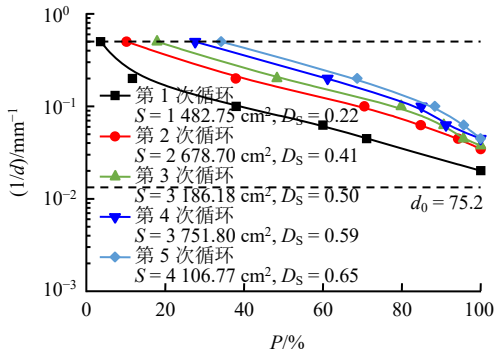
Fig.8　Gradation curves of disintegrated sample under drying-wetting cycles



(a) RWMS#1



(b) RWMS#2



(c) RWMS#3

图 9 干湿循环崩解试样的 P–1/d 关系曲线

Fig.9 Relationship curves between P and 1/d of disintegrated sample under drying-wetting cycles

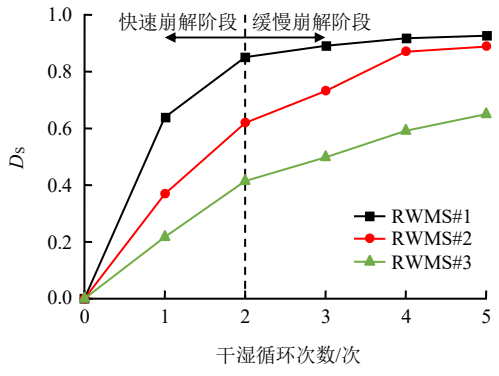


图 10 干湿循环次数与 D_S 的关系曲线

Fig.10 Relationship curves between number of drying-wetting cycles and D_S

中，D_S 随循环次数的增加而增加，代表试样崩解性随循环次数的增加而增加。根据 D_S 的变化速率大小，试样崩解过程可分为快速崩解阶段和缓慢崩解阶段。在第 2 次干湿循环之前，D_S 快速增加；在第 2 次干湿循环之后，D_S 缓慢增加。考虑以第 2 次干湿循环的 D_S 代表试样崩解性，试样 RWMS#1、RWMS#2、RWMS#3 的崩解性分别为 0.85、0.62、0.41。

3.3 崩解指标比较

与其他崩解指标相比，D_S 具有明确的物理含义并且包含全部级配信息，能正确反映崩解后粗细颗粒对崩解性贡献的差异。为了进一步验证 D_S 对于其他崩解指标的优势，比较了 D_S 与耐崩解指数 I_d、崩解率 D_R 对描述崩解程度大小与崩解变化敏感性的差异。

与 D_S 相反，I_d 与 D_R 均用以描述材料耐崩解性，即不崩解时 I_d 与 D_R 为 1，完全崩解时 I_d 与 D_R 为 0。为方便比较，定义潜在崩解面释放率 $D_P=1-D_S$，计算得到的 D_P、I_d 和 D_R 见表 6。

表 6 不同干湿循环次数的 D_P、I_d 和 D_R 计算结果

Table 6 Calculation results of D_P, I_d and D_R under different numbers of drying-wetting cycles

循环次数	RWMS#1			RWMS#2			RWMS#3		
	D_P	I_d	D_R	D_P	I_d	D_R	D_P	I_d	D_R
1	0.36	0.75	0.14	0.63	0.92	0.32	0.78	0.96	0.58
2	0.15	0.37	0.06	0.38	0.75	0.15	0.59	0.90	0.32
3	0.11	0.25	0.05	0.27	0.58	0.10	0.50	0.82	0.25
4	0.08	0.17	0.04	0.13	0.32	0.04	0.41	0.72	0.20
5	0.07	0.14	0.04	0.11	0.27	0.03	0.35	0.66	0.15

$$I_d = 1 - P_2 \tag{10}$$

式中：P_2 为通过 2 mm 筛孔的试样累积质量百分比。

崩解指标能否准确量化崩解程度的大小直接影响崩解指标的实用性。根据 I_d 的定义（式（10）），I_d 仅考虑了大于 2 mm 颗粒累积含量，忽略了大部分隐藏在级配曲线中的崩解信息，显然会过小地估计材料的崩解性，过大地估计材料的耐崩解性。

D_R 定义见图 11，D_R 为级配曲线上围面积 $A_{\square ABC}$ 与面积 $A_{\square ABED}$ 之比。D_R 能反映整个级配曲线的变化，但是其定义缺乏明确物理含义。根据 D_R 定义，耐崩解性的大小由面积 $A_{\square ABC}$ 控制，崩解性的大小由面积 $A_{\square CBED}$ 控制。单位粒径变化增加的面积 $\mathrm{d}A_{\square CBED}$ 为

$$\mathrm{d}A_{\square CBED} = P\mathrm{d}d \tag{11}$$

根据式（11），当 P 一定时，只要粒径变化 dd

相同，计算得到的 $dA_{\square CBED}$ 就相同，与粒径 d 无关，即粒径大小对崩解程度的贡献没有影响。然而，崩解颗粒越小对应崩解程度越高，崩解颗粒越大对应崩解程度越低，忽略 d 对崩解性的影响导致 D_R 会错误估计粗/细崩解颗粒对应的崩解程度。

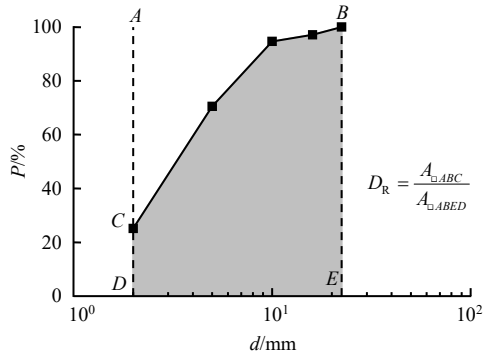


图 11　崩解面释放率 D_R 计算示意图

Fig.11　Diagram of release rate of disintegration surface (D_R) calculation

为进一步比较 D_P、I_d 和 D_R 描述崩解程度大小的差异，根据表 5 数据绘制了图 12。图中黑色和红色数据分别代表 D_P–I_d 关系和 D_P–D_R 关系。图中斜线为等值线，即 $D_P=I_d$ 或 $D_P=D_R$。图中，D_P–I_d 关系和 D_P–D_R 关系表现出明显的指数函数关系：

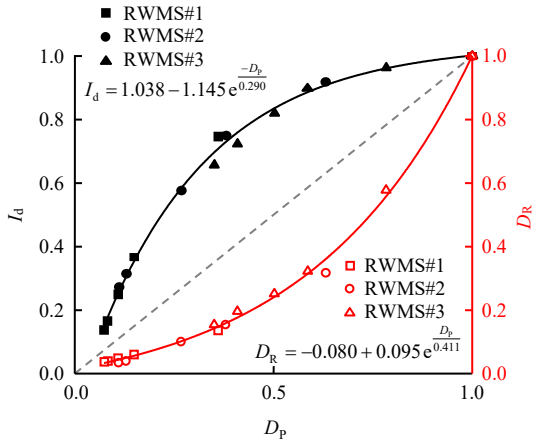


图 12　D_P–I_d 关系和 D_P–D_R 关系

Fig.12　Relationship of D_P–I_d and D_P–D_R

$$\begin{aligned} I_d &= 1.038-1.145e^{\frac{-D_P}{0.290}} \\ D_R &= -0.080+0.095e^{\frac{D_P}{0.411}} \end{aligned} \tag{12}$$

以 D_p 为标准，图 12 中 I_d 数据点均在等值线上方，表示 I_d 过大地估计了材料的耐崩解性，过小地估计了材料的崩解性。D_R 数据点均在等值线下方，代表 D_R 过小估计了材料的耐崩解性，过大地估计了材料的耐崩解性。

崩解指标对崩解变化的敏感性决定了该指标能否更好地区分崩解程度的细微差异。图 12 中 D_P–I_d 曲线和 D_P–D_R 曲线的斜率分别表示了该指标（I_d、D_R）相对于 D_P 描述崩解变化的敏感性。以 D_P–I_d 曲线斜率 $\frac{dI_d}{dD_P}$ 为例，$\frac{dI_d}{dD_P}=1$ 代表相同的崩解变化可用相同的 D_P、I_d 变化描述，即 D_P、I_d 描述崩解程度变化的敏感性相同；$\frac{dI_d}{dD_P}>1$ 代表相同的崩解变化可用更小的 D_P 或更大的 I_d 变化来描述，代表 D_P 的敏感性低于 I_d 的敏感性，反之同理。为了比较各崩解指标的敏感性，对式（12）进行求导，结果为

$$\begin{aligned} \frac{dI_d}{dD_P} &= 3.95e^{\frac{-D_P}{0.290}} \\ \frac{dD_R}{dD_P} &= 0.23e^{\frac{D_P}{0.411}} \end{aligned} \tag{13}$$

为比较 D_P、I_d 和 D_R 描述崩解变化敏感性的差异，图 13 为 $\frac{dI_d}{dD_P}$–Dp 曲线和 $\frac{dD_R}{dD_P}$–D_P 曲线，其中竖坐标采用了对数坐标轴。以 $\frac{dI_d}{dD_P}$ 为例，当 $\frac{dI_d}{dD_P}=2$ 时，认为 I_d 的敏感性为 D_P 的 2 倍；当 $\frac{dI_d}{dD_P}=0.5$ 时，认为 D_P 的敏感性为 I_d 的 2 倍。图 13 中，以敏感性差异分别 1 倍、2 倍、4 倍、10 倍为分界线，用颜色深浅代表了不同参数敏感性差异的区域，颜色越深参数敏感性差异越大。上半区域代表 D_P 敏感性更小，下半区域代表 D_P 敏感性更大。由图可知，在 D_P 较小时，D_P 的敏感性至多为 D_R 敏感性的 4 倍，代表在强崩解情况下 D_P 比 D_R 能更好地区

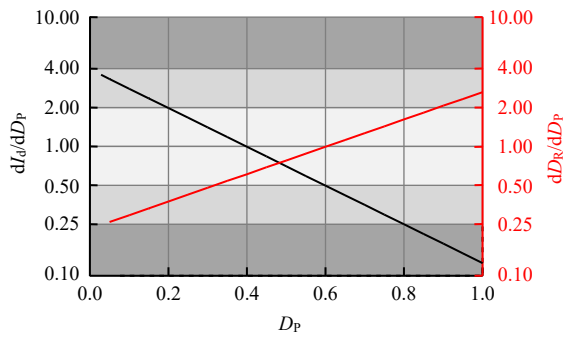


图 13　$\frac{dI_d}{dD_P}$–D_P 和 $\frac{dD_R}{dD_P}$–D_P 关系曲线

Fig.13　Relationship of $\frac{dI_d}{dD_P}$–D_P and $\frac{dD_R}{dD_P}$–D_P

分材料的崩解程度差异。在 D_P 较大时，D_P 的敏感性接近于 I_d 敏感性的 10 倍，代表在弱崩解情况下，D_P 比 I_d 能更好地区分材料的崩解程度差异。整体上，$\frac{dI_d}{dD_P}-D_P$ 曲线和 $\frac{dD_R}{dD_P}-D_P$ 曲线大部分处于图中下半区域，代表针对整个崩解过程，D_P 总体具备更高的敏感性。因此，无论是从量化崩解程度大小还是描述崩解变化的敏感性而言，D_P（D_S）相较于 I_d、D_R 都具有明显优势，有助于在工程应用中准确判断红层软岩崩解程度和区分红层软岩耐崩解性能。

4 红层软岩含水率变化崩解过程 DEM 模拟研究

4.1 含水率变化崩解过程 DEM 模拟方法

为得到一次干湿循环中的崩解性随含水率变化规律，本文基于干湿循环崩解试验，通过 PFC 数值模拟对中间崩解过程进行内插反演，以得到连续的含水率变化崩解过程。计算步骤如下：

（1）根据初始试样轮廓，用 ball 颗粒填充，生成初始试样。

（2）基于崩解试样级配，生成崩解试样，确定潜在崩解面。

（3）采用 PFC 热传导计算模拟水分入渗过程，基于试验结果确定入渗参数。

（4）设置含水率作用下崩解面间接触失效准则，确定失效参数。

4.2 崩解试样建模

为考虑真试样粒形状，对初始试样三维模型的特征截面进行截取，得到特征截面轮廓。将试样轮廓导入数值软件，在试样轮廓内用 ball 颗粒进行填充，得到符合真实试样形状的柔性颗粒簇，见图 14。ball 颗粒平均尺寸为 1 mm。

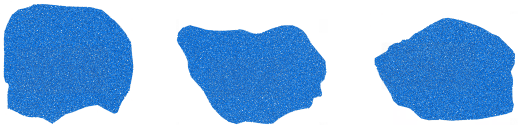


图 14 DEM 初始试样建模

Fig.14 Initial sample modeled by DEM

以颗粒簇表示未崩解的试样，初始试样整体就是一个颗粒簇，崩解试样则由多个大小不一的颗粒簇聚集体组成。根据 24 h 浸水崩解试验结果，对崩解后试样进行建模，如图 15 所示。图中白色 ball 为独立颗粒，代表极限崩解的细颗粒。其他不同颜色的 ball 颗粒的聚集体为不同颗粒簇，代表了较大粒径的崩解颗粒。

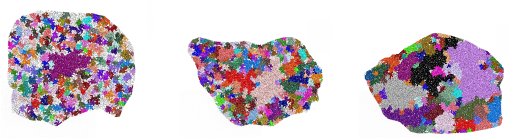


图 15 DEM 崩解试样建模

Fig.15 Disintegrated sample modeled by DEM

图 16 为试验级配曲线与模拟级配曲线。如图所示，生成试样的级配曲线与试验结果吻合良好。根据图 15 崩解试样，得到试样潜在崩解面分布如图 17 所示。

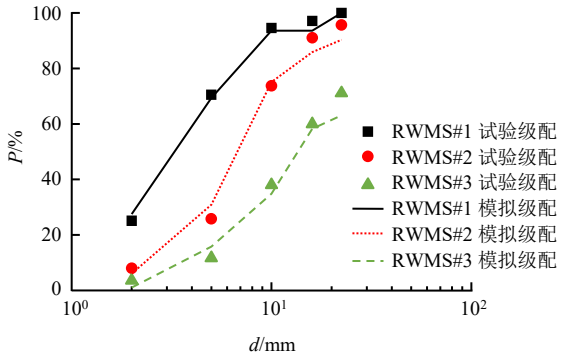


图 16 DEM 崩解试样级配曲线

Fig.16 Gradation curves of the disintegrated sample modeled by DEM

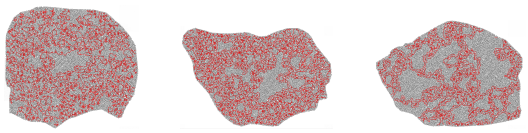


图 17 试样潜在崩解面

Fig.17 Potential disintegration surface of the sample

4.3 入渗参数标定

红层软岩浸水崩解试验中的吸水过程属于饱和边界条件下的入渗问题，湿度场的变化对崩解发展起主要作用。缪协兴等[18]在 1993 年提出了湿度应力场概念。陈晓斌[19-20]、马旭[21]等采用温度场模拟湿度场的方法，分析了湿度引起的吸水膨胀与失水收缩问题。本文用 PFC 中的热传导模拟对红层软岩入渗过程的湿度场进行计算。一维热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{k}{c\rho}\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{14}$$

Richard 方程为

$$\frac{\partial \psi_m}{\partial t}=\frac{K}{C}\frac{\partial^2 \psi_m}{\partial x^2} \tag{15}$$

热传导参数与入渗参数对应关系见表 7。表中

比水容量 C 通过土−水特征曲线（soil-water characteristic curve，SWCC）确定，土壤水分扩散率 D 通过自由吸水试验反演。图 18 为泥岩土−水特征曲线[22]，当含水率小于 12%时，将 SWCC 近似为线性，可得 $C=-1.78\times10^{-5}$。

表 7　热传导参数与入渗参数对应关系

Table 7　Correspondence between thermal conductivity parameters and infiltration parameters

热力学参数	对应入渗参数
热能 Q	含水率 θ
温度 T	基质势 Ψ_m
热导率 k	导水率 K
热扩散率 κ	土壤水分扩散率 D
热容 $c\rho=\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}T}$	比水容量 $C=\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}\psi_m}$

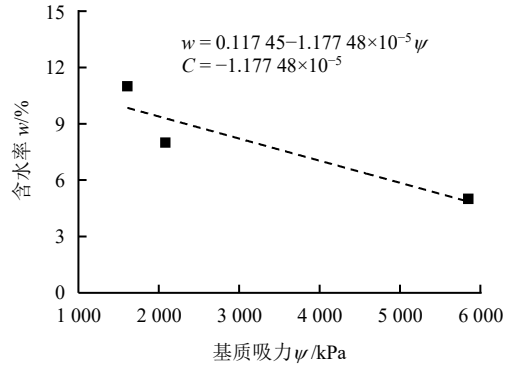


图 18　SWCC 曲线

Fig.18　Soil-water characteristic curve

对取样地的弱风化红层软岩开展了自由吸水试验和真空吸水试验，其中自由吸水试验为了模拟崩解试验入渗条件没有进行排气过程。得到的最大自由吸水含水率 w_{free} = 2.58%，最大真空吸水含水率 w_{vac} = 8.14%。

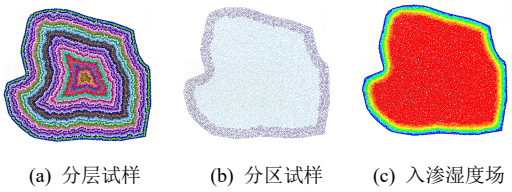
考虑不排气条件下，试样内部孔隙气压力对入渗的阻碍作用，将试样内部孔隙水与孔隙气体的分布简化为饱和区和干燥区，饱和区内扩散系数为 D，干燥区内扩散系数为 0。将真空吸水含水率近似为饱和边界含水率，根据最大自由吸水含水率与饱和含水率，可计算得到分界面相对深度 z_c：

$$z_c=\frac{w_{vac}V_{sat}}{w_{free}V} \tag{16}$$

式中：V_{sat} 为试样饱和区体积；V 为试样体积。

图 19 为 PFC 入渗模拟过程。图 19(a)中不同颜色代表不同相对深度；图 19(b)中深色为饱和区，浅色为干燥区；图 19(c)为入渗模拟过程，红色代表低含水率，蓝色代表高含水率。

图 20 为土壤水分扩散率 D 标定结果。图中数据点为自由吸水试验数据，不同曲线为不同 D 对应的含水率变化曲线。如图所示，当 $D=3.23\times10^{-6}$ 时，模拟结果与试验结果吻合最好。



(a) 分层试样　(b) 分区试样　(c) 入渗湿度场

图 19　PFC 入渗模拟过程

Fig.19　Infiltration simulation process by PFC

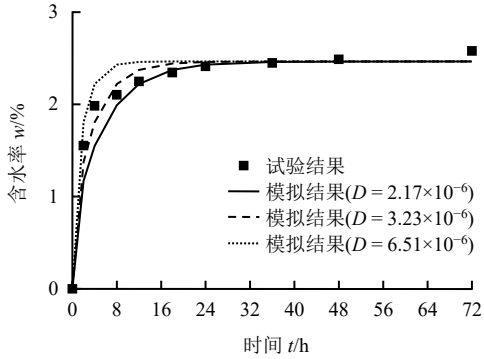


图 20　土壤水分扩散率 D 标定结果

Fig.20　Calibration results of soil moisture diffusivity

4.4　失效参数标定

将红层软岩的浸水崩解过程看作在含水率作用下潜在崩解面转化为崩解面的过程，定义该临界含水率为失效含水率 w_f。考虑 w_f 为定值，在入渗过程中潜在崩解面的含水率大于 w_f 时转为崩解面，同时崩解面成为新的入渗表面。基于崩解性最大的试样 RWMS#3 的 24 h 浸水崩解试验结果，对 w_f 进行参数反演得到崩解模拟所有参数设置见表 8。

表 8　入渗崩解模拟参数设置

Table 8　Parameter setting of infiltration and disintegration simulation

C	相对密度	D	w_f
-1.78×10^{-5}	2.68	3.23×10^{-6}	7.32%

4.5　含水率与 D_S 关系

图 21 为 RWMS#3 的湿度场、崩解试样随浸水时间的变化。图中，湿度场随着时间的增加呈现出十分复杂的变化，这是由于随着浸水时间的增加，崩解表面不断增加，入渗边界不断改变。崩解试样总体呈现出随着时间的增加由表面崩解转向内部崩解的规律。

图 22 为各试样的级配曲线随浸水时间的变化。

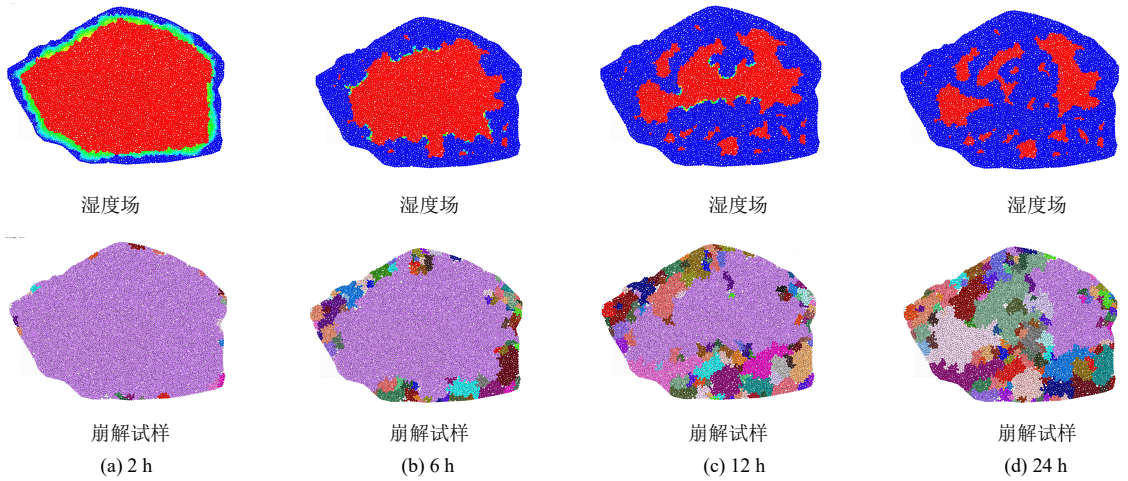


图 21 RWMS#3 湿度场、崩解试样随浸水时间的变化

Fig.21 Variation of moisture field in sample RWMS#3 and disintegration of the sample with soaking time

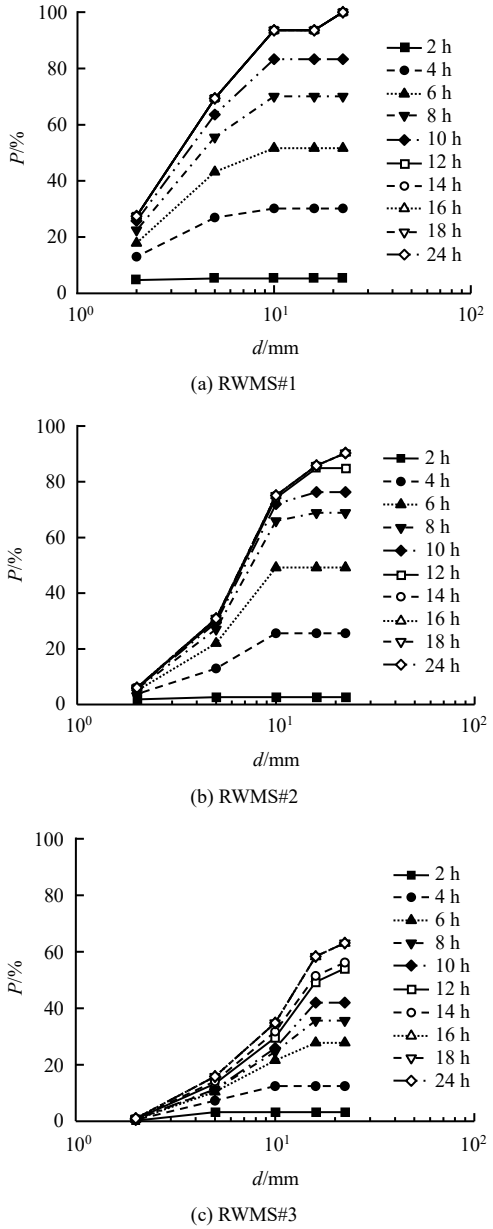


图 22 试样级配曲线随时间的变化规律

Fig.22 Variation law of the sample's particle size distribution curves with disintegration time

图中，RWMS#1 级配曲线上升最快，代表试样崩解性最大；RWMS#3 级配曲线上升最慢，代表试样崩解性最小；RWMS#2 崩解性中等。

图 23 为 D_S 随崩解时间的变化规律。由图可知，D_S 随 t 的增加首先迅速增加然后趋于定值，代表试样在第 1 次干湿循环中崩解速度由快变慢直至达到了极限崩解状态。RWMS#1 的 D_S–t 曲线初始斜率最大，表示 RWMS#1 崩解速率最快。RWMS#3 的 D_S–t 曲线初始斜率最小，表示 RWMS#1 崩解速率最慢。

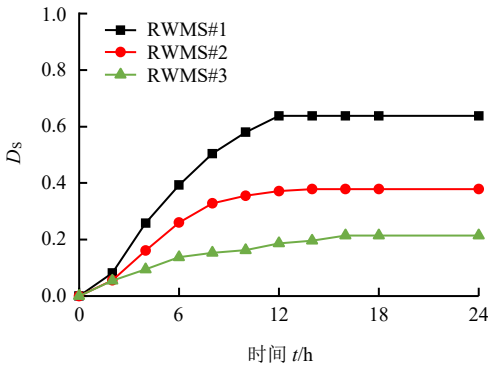


图 23 D_S 随崩解时间的变化规律

Fig.23 Variation of D_S with disintegration time

为分析 24 h 浸水崩解试验中，崩解面释放率 D_S 随含水率 w 的变化规律，以 24 h 试样含水率为最大含水率，可以得到饱和度 S_r 与 D_S 关系曲线见图 24。如图所示，D_S 与 S_r 表现出明显的线性关系，拟合得到第 1 次干湿循环过程中的 D_S 计算公式为

$$D_S = S_r D_{S-1} \tag{17}$$

式中：D_{S-1} 为第 1 次干湿循环后的 D_S 值。

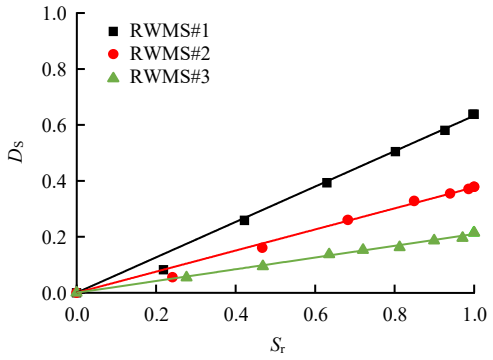


图 24　饱和度 S_r 与崩解面释放率 D_S 关系曲线
Fig.24　Relationship curves between S_r and D_S

5　结　论

本文针对干湿循环过程中崩解性随含水率的连续变化规律不明确和现有崩解指标准确性与敏感性不足的问题。首先基于崩解面面积基本物理含义，提出了崩解面释放率 D_S 用于描述红层软岩崩解程度的变化。接着开展浸水崩解试验和 DEM 数值模拟研究。验证了 D_S 对比现有崩解指标的优势，分析了干湿循环次数与含水率对崩解性的影响规律，主要结论如下：

（1）本文基于散体材料级配信息提出了散体材料总体表面积 S 的计算公式，根据算例证明了该公式的准确性。

（2）基于崩解面面积概念，定义新的崩解度指标崩解面释放率 D_S，为崩解后增加的崩解面面积与极限崩解面面积之比。D_S 存在明确的物理含义，相比耐崩解指数 I_d 与崩解率 D_R，在整个崩解过程中 D_S 都能更准确地估计崩解程度的大小。对于崩解程度过低或过高的极限状况，D_S 对崩解程度变化的描述具有更高的敏感性。

（3）在干湿循环崩解试验中，根据 D_S 变化规律，藏南地区风化红层软岩表现出 2 次干湿循环之前的迅速崩解阶段和 2 次干湿循环之后的缓慢崩解阶段。3 组试样均在 5 次崩解循环后达到极限崩解状态。

（4）在考虑含水率变化的 DEM 崩解过程模拟中，D_S 随崩解时间 t 表现出先增加后稳定的非线性变化。D_S 与饱和度 S_r 表现出线性关系，得到了第 1 次干湿循环过程中的 D_S 计算公式。

参 考 文 献

[1] FRANKLIN J A, CHANDRA R. The slake-durability test[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1972, 9(3): 325-328.

[2] ERGULER Z A, SHAKOOR A. Quantification of fragment size distribution of clay-bearing rocks after slake durability testing[J]. **Environmental and Engineering Geoscience**, 2009, 15(2): 81-89.

[3] KIKUMOTO M, PUTRA A D, FUKUDA T, et al. Slaking and deformation behaviour[J]. **Géotechnique**, 2016, 66(9): 771-785.

[4] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(10): 1177-1192.

[5] 刘晓明, 赵明华, 苏永华. 红层软岩崩解性路用控制方法研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 2): 111-114.
LIU Xiao-ming, ZHAO Ming-hua, SU Yong-hua, et al. Study on slaking control method of red beds soft rock used in road construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Suppl.2): 111-114.

[6] 熊力. 红层软岩崩解机理研究及工程应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
XIONG Li. Study and application of slaking mechanism of red bed soft rock[D]. Changsha: Hunan University, 2011.

[7] 刘晓明, 熊力, 刘建华, 等. 基于能量耗散原理的红砂岩崩解机制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 3143-3149.
LIU Xiao-ming, XIONG Li, LIU Jian-hua, et al. Slacking mechanism of red sandstone based on energy dissipation principle[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2011, 42(10): 3143-3149.

[8] 曹雪山, 额力素, 赖喜阳, 等. 崩解泥化过程中泥岩强度衰减因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1936-1942.
CAO Xue-shan, E Li-su, LAI Xi-yang, et al. Factors for strength attenuation of mudstone during slaking and disintegration[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(10): 1936-1942.

[9] 曾志雄, 孔令伟, 田海, 等. 膨胀岩崩解特性的干湿循环效应与粒度熵表征[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1983-1989.
ZENG Zhi-xiong, KONG Ling-wei, TIAN Hai, et al. Effect of drying and wetting cycles on disintegration behavior of swelling mudstone and its grading entropy characterization[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 1983-1989.

[10] 赵明华, 苏永华, 刘晓明. 湘南红砂岩崩解机理研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006(1): 16-19.

ZHAO Ming-hua, SU Yong-hua, LIU Xiao-ming. Research on the mechanics of the swelling and collapse of the red stratum rock mass in south Hunan[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2006(1): 16-19.

[11] 刘晓明, 徐汉飞, 赵明华. 基于分形理论的红层软岩崩解性消除方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 27-32.
LIU Xiao-ming, XU Han-fei, ZHAO Ming-hua. Research on methods of eliminating the slacking properties of red beds soft rock based on fractal theory[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2013, 40(6): 27-32.

[12] 刘晓明, 赵明华, 苏永华. 软岩崩解分形机制的数学模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2043-2046, 2069.
LIU Xiao-ming, ZHAO Ming-hua, SU Yong-hua. Mathematical simulation of fractal mechanism for slaking of soft rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2043-2046, 2069.

[13] 徐汉飞. 红层软岩崩解破碎分形特性及其应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
XU Han-fei. Study and application of the fractal properties of slacking and crushing of red bed soft rock[D]. Changsha: Hunan University, 2014.

[14] 闫猛. 东昌高速红砂岩崩解机理及路基填料改良技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
YAN Meng. Study on disintegration mechanism of dongchang highway red sandstone and improvement of roadbed[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.

[15] 潘艺, 刘镇, 周翠英. 红层软岩遇水崩解特性试验及其界面模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3231-3239.
PAN Yi, LIU Zhen, ZHOU Cui-ying. Experimental study of disintegration characteristics of red-bed soft rock within water and its interface model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 3231-3239.

[16] 张宗堂. 干湿循环作用下膨胀岩的崩解特性试验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2018.
ZHANG Zong-tang. Experimental study on disintegration characteristic of swelling rock subjected to the dry and wet cycle[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2018.

[17] 程树范, 曾亚武, 叶阳, 等. 甘肃红层软岩耐崩解试验与矿物夹杂效应研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊 1): 99-106.
CHENG Shu-fan, ZENG Ya-wu, YE Yang, et al. Slake durability test and mineral inclusion effect of Gansu red-bed clay rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(Suppl.1): 99-106.

[18] 缪协兴, 杨成永, 陈至达. 膨胀岩体中的湿度应力场理论[J]. 岩土力学, 1993, 14(4): 49-55.
MIAO Xie-xing, YANG Cheng-yong, CHEN Zhi-da. Humidity stress field theory in swelling rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1993, 14(4): 49-55.

[19] 陈晓斌, 丁瑜, 易世主, 等. 无砟轨道基床吸水膨胀上拱对高速列车的影响分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59(2): 26-30.
CHEN Xiao-bin, DING Yu, YI Shi-zhu, et al. Analysis on influence of expansion and heaving of ballastless track subgrade bed caused by water absorption on high speed trains[J]. **Railway Engineering**, 2019, 59(2): 26-30.

[20] 陈晓斌, 喻昭晟, 周雨晴, 等. 红层泥质胶结物干缩裂缝深度与间距预测模型[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 868-878.
CHEN Xiao-bin, YU Zhao-sheng, ZHOU Yu-qing, et al. Prediction model of desiccation shrinkage fracture depth and spacing of argillaceous cement in red bed mudstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(4): 868-878.

[21] 马旭. 黏性土竖向干缩裂缝演化离散元数值模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
MA Xu. Numerical simulation of desiccation cracking in the cross section of clay soil[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.

[22] 熊存洪, 马煜, 赵森, 等. 乐山泥岩的水土曲线和崩解特征试验研究[J]. 力学与实践, 2023, 45(5): 990-998.
XIONG Cun-hong, MA Yu, ZHAO Sen, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve and disintegration characteristics of Leshan Mudstone[J]. **Mechanics in Engineering**, 2023, 45(5): 990-998.