余云燕,张斌斌.红层泥岩崩解进程的宏观粒度分析及分形研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1052-1063.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240701003
YU Yunyan,ZHANG Binbin.Macroscopic particle size analysis and fractal study of the disintegration process of red-bed mudstone [J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1052-1063.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240701003

红层泥岩崩解进程的宏观粒度分析及分形研究

余云燕,张斌斌
(兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:红层泥岩的崩解特性对红层地区工程建设及管理维护的正常进行构成了严重威胁。为深入了解红层泥岩的崩解特性,选取甘肃兰州地区自然风干的红层泥岩作为研究对象,开展干湿冷热、干湿循环以及冷热交替作用下的室内崩解循环试验,每次循环结束通过筛分试样获得各粒径组的颗粒质量。以此为基础运用分形理论计算红层泥岩崩解进程中的粒度分形维数指标,从而得到红层泥岩崩解趋于稳定时的粒度分形维数。研究结果表明:同等加水量以及相同崩解循环次数下,干湿冷热组的崩解程度最深、干湿循环组的崩解程度次之、冷热交替组不崩解;随着加水量的增加,红层泥岩崩解物的各粒径组颗粒质量变化情况有4种,且在30%~40%加水量时红层泥岩的崩解进程有一个突然的加速过程;随着崩解循环次数的增加,红层泥岩的崩解进程在粒度分形维数达到2.7~2.8时趋于停止。

关键词:红层泥岩;崩解试验;粒度分析;分形理论
中图分类号:TU446 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1052-12
DOI:10.20000/j.1000-0844.20240701003

Macroscopic particle size analysis and fractal study of the disintegration process of red-bed mudstone

YU Yunyan, ZHANG Binbin
(*College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China*)

Abstract: Disintegration characteristics of red-bed mudstone pose a serious threat to the construction, management, and maintenance of engineering works in red-bed areas. To better understand these characteristics, naturally air-dried red-bed mudstone from the Lanzhou area of Gansu Province was selected as the research object. Indoor disintegration cycle tests were carried out under three conditions: combined dry-wet and cold-hot cycles, dry-wet cycles alone, and cold-hot cycles alone. At the end of each cycle, the samples were sieved to obtain the particle mass of each size fraction. On this basis, fractal theory was applied to calculate the grain-size fractal dimension during the disintegration process, thereby determining the fractal dimension at which the disintegration of red-bed mudstone

收稿日期:2024-07-01
基金项目:甘肃省科技计划(23JRRA854,21YF5GA050);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-28)
第一作者简介:余云燕(1968-),女,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土力学、结构动力学方面的研究。E-mail:yuyunyan@mail.lzjtu.cn。

tends to stabilize. The results showed that under the same water content and the same number of disintegration cycles, the combined dry-wet and cold-hot group exhibited the most severe disintegration, followed by the dry-wet cycle group, whereas the cold-hot cycle group showed no disintegration. With increasing water content, the particle mass of each size fraction of disintegrated red-bed mudstone exhibited four types of variation patterns, and the disintegration process underwent an abrupt acceleration when the water content reached 30%－40%. With an increasing number of disintegration cycles, the disintegration process of red-bed mudstone tended to cease when the grain-size fractal dimension reached 2.7－2.8.

Keywords: red-bed mudstone; disintegration test; particle size analysis; fractal theory

0　引言

岩石在水、热、风等外部条件相互作用下，逐渐失去黏结力和强度，形成松散细小颗粒物质的过程被称为岩石的崩解[1]。而岩石的崩解与许多工程设施的破坏和地质灾害事故的发生密切相关，如滑坡、崩塌、泥石流等[2]。红层泥岩具有较强的崩解特性并且广泛分布于我国西北地区，长期困扰着该地区工程建设的开展。目前随着国家新一轮西部大开发战略、扶贫开发战略和“一带一路”战略等一系列重大政策的实施，西北地区工程建设的需求急剧增加，亟需对该地区红层泥岩的崩解特性展开研究和分析。

红层泥岩的崩解特性一直备受学者和相关工程人员的关注，相关研究主要集中在以下几个方面：

(1)根据岩石崩解程度的差异对其进行分类，如曲永新等[3]根据泥质岩崩解后形态的不同将泥质岩分为强胶结、中胶结、弱胶结三种类型；赵明华等[4]、吴道祥等[5]也分别从不同的角度提出红层岩石的分类方法。(2)研究不同崩解条件下岩石的崩解特征，如程树范等[6]对石膏质泥岩崩解过程中的矿物夹杂效应进行了研究，发现石膏溶蚀产生的微裂隙和酸性环境下钙质结核的脱落是导致石膏质泥岩加速崩解的主要原因；赵顺良等[7]开展了不同PH值条件下的红层泥岩崩解试验，发现在酸性条件下红层泥岩的崩解现象最剧烈。(3)岩石崩解机理研究，如尹红亮等[8]认为红层泥岩的崩解是由于泥岩存在原生缺陷，遇水后产生表面裂缝，进而裂缝扩展贯通导致泥岩崩解劣化；马文鹏[9]、熊力[10]认为红层岩石的表面矿物成分与水接触会被溶解或者发生水化反应产生易溶物质，从而促进其自身的崩解进程；而崔雪雪[11]及吕学伟[12]认为岩石的崩解是由于岩石内部的黏土矿物吸水后产生膨胀力，导致岩石的微观结构遭到破坏，进而引起岩石在宏观上产生崩解现象。(4)对岩石崩解程度进行描述，如Singh等[13]结合统计学和传统的数学方法建立泥岩崩解耐久性指数的预测模型；曾志雄等[14]引入标准基础熵指标用于量化岩石的整个崩解进程，在试验角度论证该指标的适用性，为岩石崩解破碎后的粒度分析提供了新的量化指标。而目前国内主流的衡量岩石崩解程度的指标依然为分形维数，各学者[15-18]都运用分形理论对自己地区红层的崩解特性进行研究并取得了相应的成果。

尽管如此，目前针对红层泥岩的研究仍存在一些不足之处。例如大多数研究集中在干湿循环过程对红层泥岩崩解特性的影响方面，缺少干湿冷热的对比研究；对红层泥岩崩解进程中各粒径组的颗粒质量变化特征目前尚未有一个总结性的归纳；大量学者已运用分形理论研究了我国西南地区的红层崩解，但对甘肃地区红层崩解的总体研究涉猎不多。

综上，本文首先开展红层泥岩的室内干湿循环、冷热循环以及干湿冷热循环试验，分析红层泥岩崩解过程中各粒径组的粒度变化特征，随后进行崩解程度的对比；其次，在获得红层泥岩各级崩解下不同粒径组的颗粒质量的数据后，运用分形理论提出衡量红层泥岩崩解进程的分形维数量化指标，以期为红层泥岩地区的工程建设提供理论支持。

1　试样物理性质与试验方案

1.1　试样物理性质

试验样品取自甘肃兰州G312线傅苦路K81＋018段工点，在取样地挖掘出红层泥岩岩样后，运至兰州交通大学岩土大厅，将取好样的红层泥岩岩样放置于阴凉处风干三个月用于本文崩解试验，选择一定数量且具有代表性的兰州地区天然红层泥岩

岩块，根据《公路土工试验规程》[19]进行物理指标试验，结果如表1所列；对其进行矿物成分分析，结果如表2所列；对其进行易溶盐试验，结果如表3所列。由表1～3可知，兰州地区红层泥岩为泥状崩解，高岭石含量为7%，伊利石含量为42.3%，且为中硫酸盐渍土。

表1 兰州地区红层泥岩物理指标

Table 1 Physical indexes of red-bed mudstone in the Lanzhou area

岩样	天然干密度 ρ_d/(g/cm^3)	天然含水率 ω/%	孔隙比 e	饱和含水率 ω/%	试验初始含水率 ω/%	水理特性
兰州地区	2.17	8.8	0.235	13.4	2.5	泥状崩解

表2 兰州地区红层泥岩矿物成分

Table 2 Mineral composition of red-bed mudstone in the Lanzhou area

岩样	矿物含量/%								
	石英	高岭石	伊利石	方解石	钠长石	蒙脱石	斜长石	赤铁矿	其他
兰州地区	25.10	7.00	42.30	13.10	9.20	-	-	-	3.30

表3 兰州地区红层泥岩易溶盐试验结果

Table 3 Test results of soluble salts in red-bed mudstone in the Lanzhou area

编号	成分含量/(mmol/kg)							易溶盐总量/%
	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	
1#	2.00	0.00	3.90	11.77	31.67	9.34	242.68	0.895
2#	2.00	2.00	6.24	26.80	36.54	10.96	308.24	1.241
3#	2.00	2.00	9.36	19.08	12.59	6.90	172.16	0.732

1.2 试验方案

根据前期的预试验结果发现，兰州地区红层泥岩遇水表现出极强的崩解特性，在1 h内就快速崩解为泥状，难以研究其崩解规律。故本文参考张丹等[1]的研究，先使用真空冷冻干燥法，继而使用酒精进行真空饱和得到兰州地区红层泥岩原状样的饱和含水率，以饱和含水率的10%、20%、30%、40%和50%作为红层泥岩崩解进程的加水量。

本次试验分别从干湿、冷热及干湿冷热3种方式来设计试验方案。每种处理方式完成一次循环后，将残余岩样及崩解产物分别过孔径为200、60、40、20、10、5、2、1、0.5、0.25、0.075 mm的分样筛，并记录不同粒级的颗粒重量。筛分结束后，将残余岩样与崩解产物混合到一起进入下次循环。各种处理方式如下：

（1）冷热处理：根据兰州市永登县历史极端气温，取温差范围为－35～40 ℃。将红层泥岩原岩样先放置于－35 ℃的冰箱中冷冻12 h，再放置于40 ℃的烘箱中烘12 h，每天上午10:00过筛，称重并记录筛余量。

（2）干湿处理：用喷壶将预定加水量喷洒至原岩表面，当预定加水量过多（如30%、40%、50%加水量），则在前几次循环时用胶头滴管缓慢加水，待原岩破碎覆盖盘面时再使用喷壶，后将原岩放置空旷处在自然温差下风干，原岩重量小于或等于加水前质量时视为一次循环完成，每次循环完成后称重并记录筛余量。

（3）干湿冷热处理：在干湿处理加水步骤完成后，将原岩样放置于－35 ℃的冰箱中冷冻12 h，再放置于40 ℃的烘箱中烘12 h，每天上午10:00过筛，称重并记录筛余量。

以上处理方式每过一次筛视为一次循环，共进行25次循环。

2 试验结果及分析

2.1 崩解现象分析

图1为兰州地区泥岩样冷热循环下的崩解形态图。由图可知，纯粹的温度变化并不会引起红层泥岩的崩解。因冷热循环作用下兰州地区红层泥岩并未崩解，即冷热循环作用下兰州地区红层泥岩的崩解比与分形维数均为0，故在下文的崩解比与分形维数等各项指标分析中，没有加入冷热循环组进行对比。

图2～3分别为兰州地区红层泥岩样干湿循环、

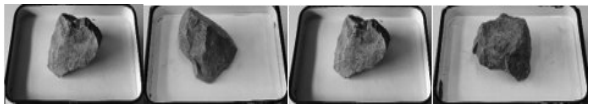


图 1　冷热循环下红层泥岩不同崩解天数的崩解形态

Fig. 1　Disintegration morphology of red-bed mudstone with different disintegration days under cold-hot cycles

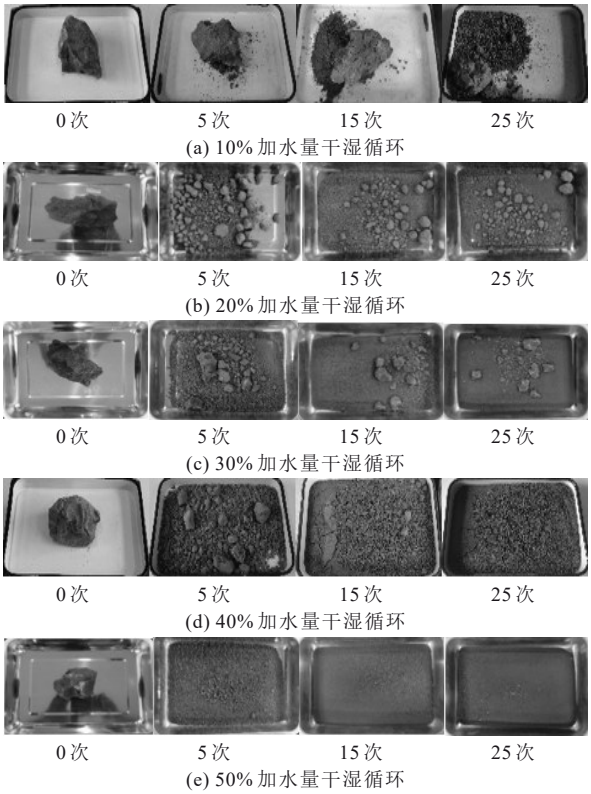


图 2　干湿循环下红层泥岩不同加水量不同循环次数下的崩解形态

Fig. 2　Disintegration morphology of red-bed mudstone with different water contents and cycle numbers under dry-wet cycles

干湿冷热循环下不同加水量以及不同循环次数的崩解形态图。

由图 2～3 可知，随着循环次数的增加，10 组红层泥岩颗粒不断趋于细化；对于干湿循环组，相同循环次数下高加水量组与低加水量组相比，红层泥岩的崩解颗粒明显趋于细化，干湿冷热组亦然；对比干湿循环组与干湿冷热循环组，在循环次数与加水量均相同的条件下，干湿冷热组的红层泥岩崩解颗粒更为细化，说明温度变化可进一步促进崩解的发展。

2.2　崩解比指标分析

Erguler 等[20]、Chaowarin[21]提出崩解比（Disintegration Ratio，DR）来综合评价泥质岩的崩解特性。

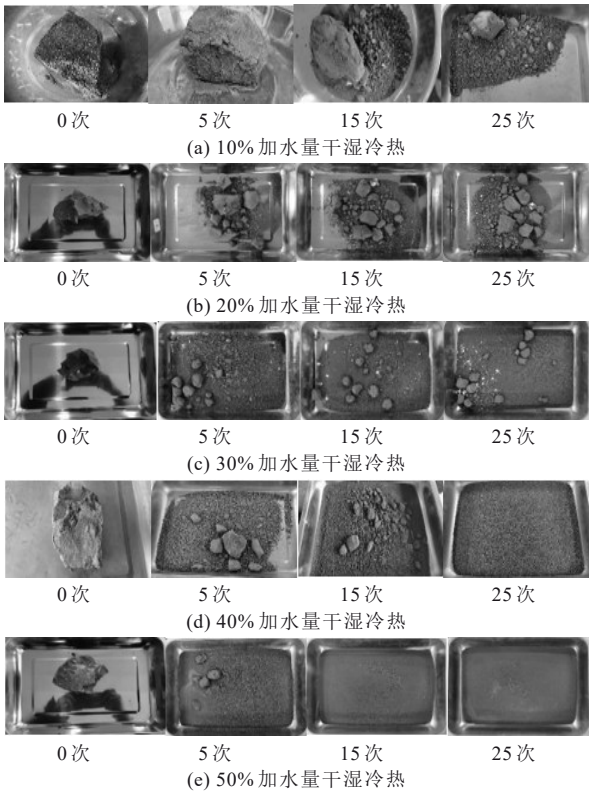


图 3　干湿冷热循环下红层泥岩不同加水量不同循环次数下的崩解形态

Fig. 3　Disintegration morphology of red-bed mudstone with different water contents and cycle numbers under combined dry-wet and cold-hot cycles

首先绘制岩样粒径变化曲线图，横坐标为粒径，纵坐标为大于该粒径大小的颗粒百分含量，然后根据式（1）计算崩解比 DR：

$$DR_n = S_n / S \times 100\% \tag{1}$$

式中：DR_n 为岩样第 n 次筛分崩解比（%）；S_n 为第 n 次筛分粒径变化曲线下方面积；S 为整体面积。

根据式（1）计算干湿循环作用与干湿冷热作用下 10%～50% 加水量时的崩解比，其结果如图 4～5 所示，最终崩解比如表 4 所列。

由图 4～5 可知，随着加水量的提升与循环次数的增加，干湿循环组与干湿冷热组的崩解比都不断减小，表明兰州地区红层泥岩在此过程中崩解程度不断加深，耐崩解性逐渐降低。低加水量（10%～20%）下红层泥岩的崩解比经 10～15 次循环后显著降低，高加水量（30%～50%）下红层泥岩的崩解比在 5 次循环左右即降低至最终值附近，说明红层泥岩遇水即具有较强崩解性，且遇水量愈多，其表现出的崩解性就愈强。

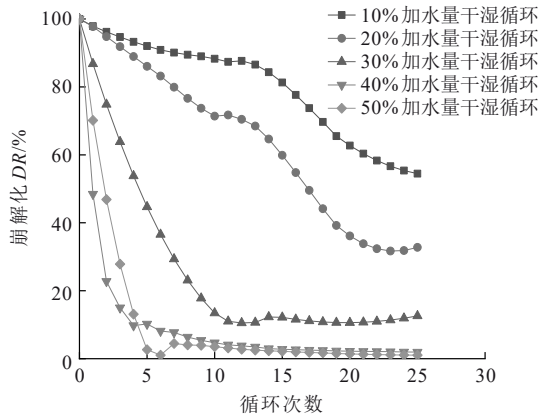


图 4 干湿循环下红层泥岩崩解比与循环次数的关系

Fig. 4 Relationship between disintegration ratio and cycle number for red-bed mudstone under dry-wet cycles

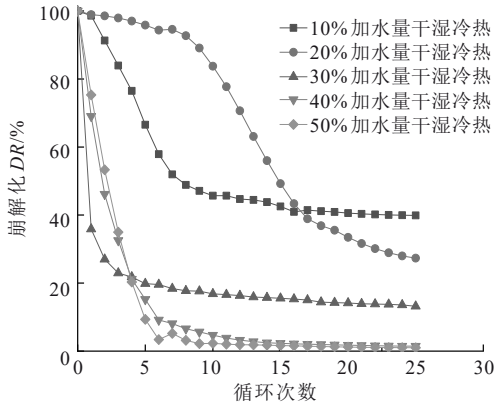


图 5 干湿冷热循环下红层泥岩崩解比与循环次数的关系

Fig. 5 Relationship between disintegration ratio and cycle number for red-bed mudstone under combined dry-wet and cold-hot cycles

由表 4 可知，干湿循环下经 25 次崩解循环后红层泥岩在 10%～50% 加水量作用下的最终崩解比分别为 54.46%、32.76%、12.58%、1.94%、1.03%；干湿冷热循环下经 25 次崩解循环后的最终崩解比分别为 39.90%、27.33%、13.17%、1.46%、1.00%。可以看到，在达到最终崩解比所需的循环次数上，干湿冷热循环组所需循环次数小于干湿循环组；在最终崩解比的比较上，相同加水量下干湿冷热循环组的最终崩解比小于干湿循环组，说明红层泥岩在遇水的前提下，冷热交替作用会促进红层泥岩的崩解，能在一定程度上降低红层泥岩的耐崩解性。

2.3 崩解过程中的粒度分析

在完成上述崩解试验的基础上，对 25 次崩解循环结束后的干湿循环及干湿冷热循环条件下的崩解产物进行粒度分析，具体包括以颗粒级配曲线随循环次数变化情况及各粒径组颗粒质量的百分含量随循环次数变化两项指标衡量崩解产物整体分布情况。

表 4 各试验条件下红层泥岩岩样最终崩解比

Table 4 Final disintegration ratios of red-bed mudstone pecimens under various test conditions

各试验岩样	最终崩解比/%
10% 加水量干湿循环	54.46
20% 加水量干湿循环	32.76
30% 加水量干湿循环	12.58
40% 加水量干湿循环	1.94
50% 加水量干湿循环	1.03
10% 加水量干湿冷热循环	39.90
20% 加水量干湿冷热循环	27.33
30% 加水量干湿冷热循环	13.17
40% 加水量干湿冷热循环	1.46
50% 加水量干湿冷热循环	1.00

崩解试验采用 5 种不同加水量、2 种不同循环方式、25 次循环进行控制，将颗粒级配曲线全部画出所占篇幅过多，且经过前期对比发现各颗粒级配曲线变化趋势大致相同，故本节具体给出 10% 加水量干湿循环下兰州地区红层泥岩在整个 25 次崩解循环进程中的颗粒级配曲线，以此来表征不同崩解条件下所有崩解试验在崩解过程中的颗粒级配变化情况。10% 加水量干湿循环下 25 次循环过程中红层泥岩崩解产物的各粒径数据如表 5 所列，颗粒级配曲线如图 6 所示。

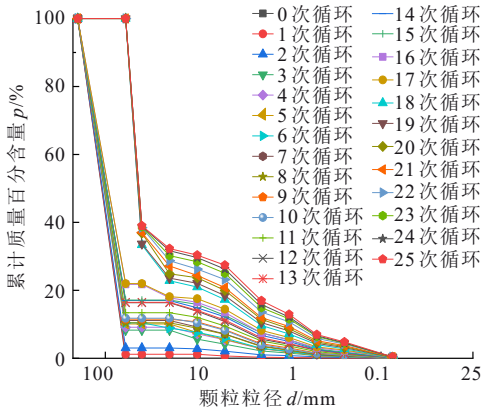


图 6 10% 加水量干湿循环下 25 次循环过程中的颗粒级配曲线

Fig. 6 Grain size distribution curves during 25 cycles under dry-wet cycles with a water content of 10%

由表5可以看得出，同一加水量下，随着循环次数的增加，红层泥岩岩块逐渐向小粒径范围转移，第18次循环前，岩块的质量主要集中在200～60 mm的粒径范围以及20 mm以下的粒径范围，在第18次循环时粒径60 mm以上的岩块已经全部崩解完毕，此时红层泥岩的质量集中于60 mm以下的粒径范围，且5 mm以下粒径范围的红层泥岩崩解产物的质量增速随着循环次数的增加而增大。同时由图6可知，随着循环次数增加，红层泥岩在10%加水量干湿循环下、25次循环过程中颗粒级配曲线的始终点与X、Y轴所围成面积逐渐增大，在始终点一致的情况下，颗粒级配曲线围成的面积越大，红层泥岩崩解样的粒径就愈向小粒径范围发展。

2.3.1　干湿循环下各粒组间颗粒质量百分含量变化情况

图7为干湿循环下各粒组间颗粒质量百分含量变化情况。由图7可知，曲线变化趋势可归纳为以下4种：

（1）如图7(a)所示为200～60 mm粒组，曲线呈现出循环加水量越高，该粒组百分含量在相同循环次数下下降越快的特点。在崩解进程中表现为加水量越高，红层泥岩原状样会越快崩解为小型土块，这是由于红层泥岩遇水表现出的极强崩解性所导致的。此外，60～40 mm粒组的百分含量变化曲线图7(b)也具有相似的变化趋势。

（2）如图7(c)所示为40～20 mm粒组，曲线呈

表5　10%加水量干湿循环下25次循环过程中红层泥岩崩解产物的粒径数据

Table 5　Particle size data of disintegrated products of red-bed mudstone during 25 cycles under dry-wet cycles with a water content of 10%

循环次数	不同粒径范围(取上边界)/mm											总质量/g
	200～60	60～40	40～20	20～10	10～5	5～2	2～1	1～0.5	0.5～0.25	0.25～0.075	0.075～0	
1	464.17	0	0	0	2.41	1.76	0.42	0.52	0.28	0.24	0	469.8
2	457.78	0	0	1.31	3.16	5.02	1.07	1.71	1.08	0.87	0.14	472.14
3	434	0	0	12.5	7	9.5	3	3.5	1.5	2	0.2	473.2
4	429.33	0	0	9.11	8.38	12.61	3.65	5.1	1.83	2.22	0.25	472.48
5	424.82	0	0	11.92	9.52	12.83	4.44	5.61	1.2	2.02	0.2	472.56
6	422.6	0	7.38	5.91	8.04	14.22	4.1	5.39	1.86	2.05	0.38	471.93
7	419.96	0	0	9.09	9.56	16.91	5.39	6.55	2.1	2.58	0.31	472.45
8	423.36	0	0	7.43	8.43	17.2	5.2	5.32	2.02	3.37	0.35	472.68
9	416.84	0	0	3.63	10.86	19.57	5.91	7.04	2.52	4.3	0.37	471.04
10	415.54	0	0	6.44	10.37	20.14	6.06	5.83	2.71	3.81	0.29	471.19
11	409.37	0	0	6.46	11.97	20.83	6.96	7.96	3.54	5.04	0.63	472.76
12	392.84	0	0	11.85	14.11	24.62	6.94	8.33	4.16	6.24	0.61	469.7
13	392.54	0	0	11.25	13.2	24.72	7.72	8.99	4.62	6.54	0.38	469.96
14	390.41	0	0	10.11	12.53	25.71	8.36	11.37	4.23	7.16	0.56	470.44
15	388.93	0	0	5.91	15.24	24.19	9.52	12.85	4.17	7.92	0.64	469.37
16	367.15	0	18.68	6.19	14	28.44	9.52	10.93	4.21	9.31	0.88	469.31
17	366.23	0	18.06	2.81	14.41	29.37	9.86	12.92	4.34	10.51	0.88	469.39
18	0	311.64	49.44	8.74	17.16	35.68	11.74	14.92	5.54	12.08	0.99	467.93
19	0	310.33	47.22	7.17	16.94	37.25	11.38	17.25	5.81	13.43	1.27	468.05
20	0	295.57	56.06	5.5	17.42	39.89	12.8	18.47	6.31	14.46	1.59	468.07
21	0	294.68	46.03	13.04	16.65	41.34	12.29	19.52	6.83	15.89	1.52	467.79
22	0	286.8	45.3	11.5	14.4	44.6	13.4	22.7	7.8	17.52	1.94	465.96
23	0	288.12	40.08	8.48	15.87	47.59	15.54	24.55	9.22	18.93	1.89	470.27
24	0	288.2	33.88	9.66	15.8	49.14	17.49	25.81	9.94	19.67	1.75	471.34
25	0	287.59	31.74	8.97	13.99	49.25	19.03	28.02	10.29	20.65	1.98	471.51

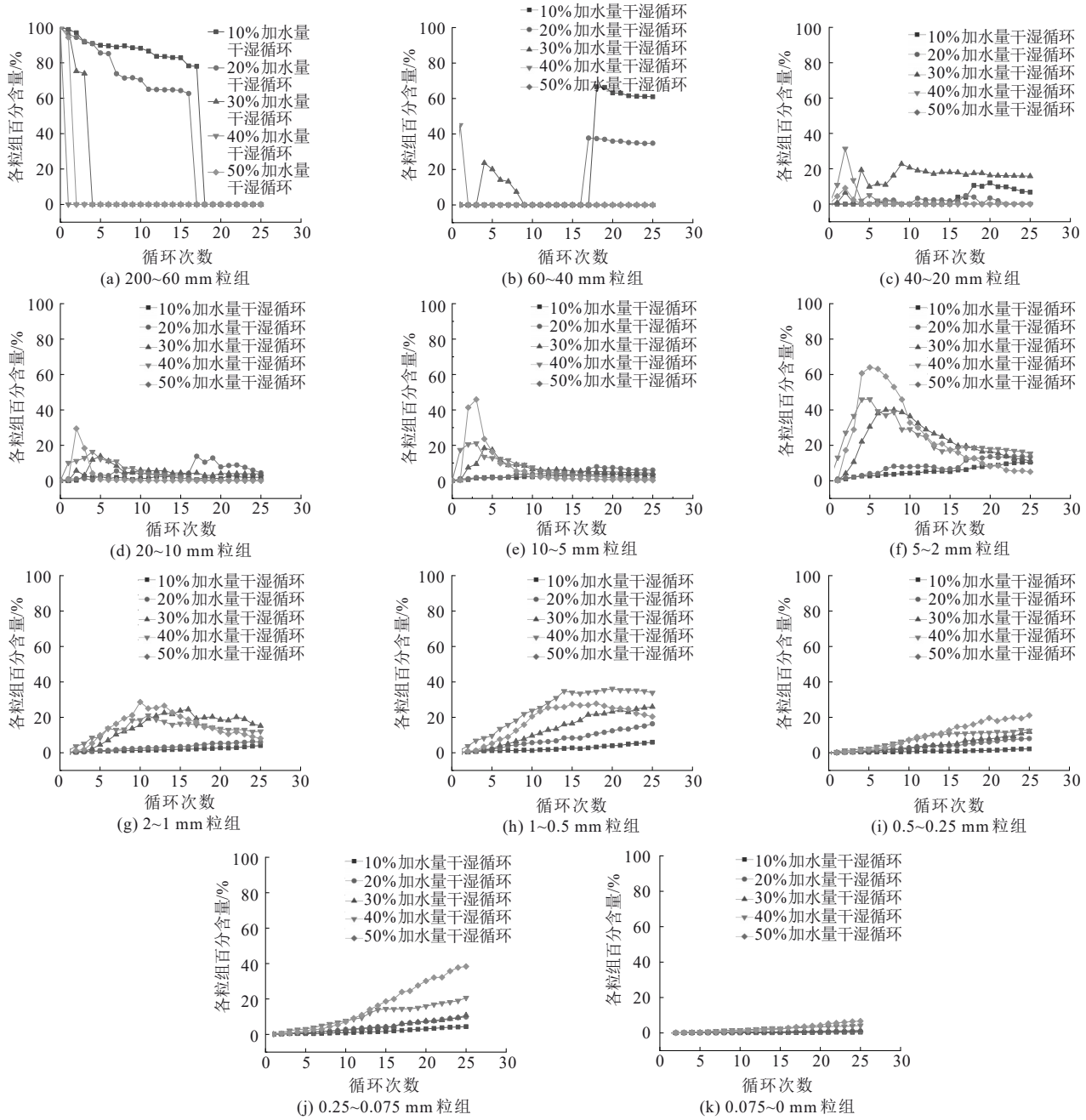


图 7 干湿循环方式下不同粒组百分含量变化情况

Fig. 7 Variation of percentage content of different grain size groups under dry-wet cycles

现出循环加水量越高,该粒组百分含量在循环次数增加时占比降低的特点。在崩解进程中表现为加水量越高,崩解物大块易崩解,难以在中间粒径组留存;加水量越低,崩解物大块难崩解,中间粒径组没有崩解物产生的状况。此外,20～10 mm粒组的百分含量变化曲线图7(d)也具有相似的变化趋势。

(3) 如图7(e)所示为10～5 mm粒组,曲线呈现出高循环加水量粒组百分含量在循环次数增加时占比先增高,后降低的趋势。且其加水量越高,粒组百分含量达到的峰值占比越高。这是由于10～5 mm粒组属于较小偏中等粒径粒组,高加水量组别在进行崩解循环时会很快生成该粒组颗粒。但随着循环次数的增加,该粒组颗粒又崩解成为更小粒径;低加水量组在进行崩解循环时,在整个循环过程中加水量不足以很快崩解该粒组颗粒,且其高粒径粒组的颗粒崩解速率大于该粒径粒组的颗粒崩解速率。故30%～50%加水量下的曲线呈现先升高后降低的趋势,且加水量越高,曲线终值越

低；10%～20% 加水量下的曲线近似呈现线性上升，加水量高，曲线终值偏大。此外，5～2 mm 粒组的百分含量变化曲线图 7(f)、2～1 mm 粒组百分含量变化曲线图 7(g)及 1～0.5 mm 粒组百分含量变化曲线图 7(h)也具有相似的变化趋势。

(4) 如图 7(i)所示为 0.5～0.25 mm 粒组，曲线呈现出循环加水量越高，该粒组百分含量随循环次数近似成线性增加的趋势，且其加水量越高，曲线斜率越大，循环结束后达到的终值越大。这是由于 0.5～0.25 mm 粒组已经属于小粒径粒组，加水量越高，其崩解物的形成速率越快，且比该粒组粒径小的粒组在循环过程中的颗粒生成速率小于该粒组的颗粒生成速率，故曲线呈现出上述特性。此外，0.25～0.075 mm 粒组的百分含量变化曲线图 7(j)及 0.075～0 mm 粒组百分含量变化曲线图 7(k)也具有相似的变化趋势。

干湿冷热循环下各粒组间颗粒质量百分含量变化情况与干湿循环下各粒组间颗粒质量百分含量变化情况基本一致，不再赘述。

2.3.2　干湿冷热循环下各加水量组内颗粒质量百分含量变化情况

图 8 为干湿冷热方式下各加水量组内颗粒质量百分含量变化情况。

由图 8 可知，曲线的变化趋势可归纳为以下 3 种：

(1) 百分含量主要占比粒组：对干湿冷热循环下的崩解试验而言，随着加水量的提升，25 次循环结束后，其百分含量占比最高粒组的粒径由 40～20 mm 变为更小粒径，到 50% 加水量 25 次循环结束后，其百分含量主要占比粒组已经变为 0.25～0.075 mm 粒组，百分含量占比已经超过 40%。这可以证明随着加水量的提升，兰州地区红层泥岩在崩

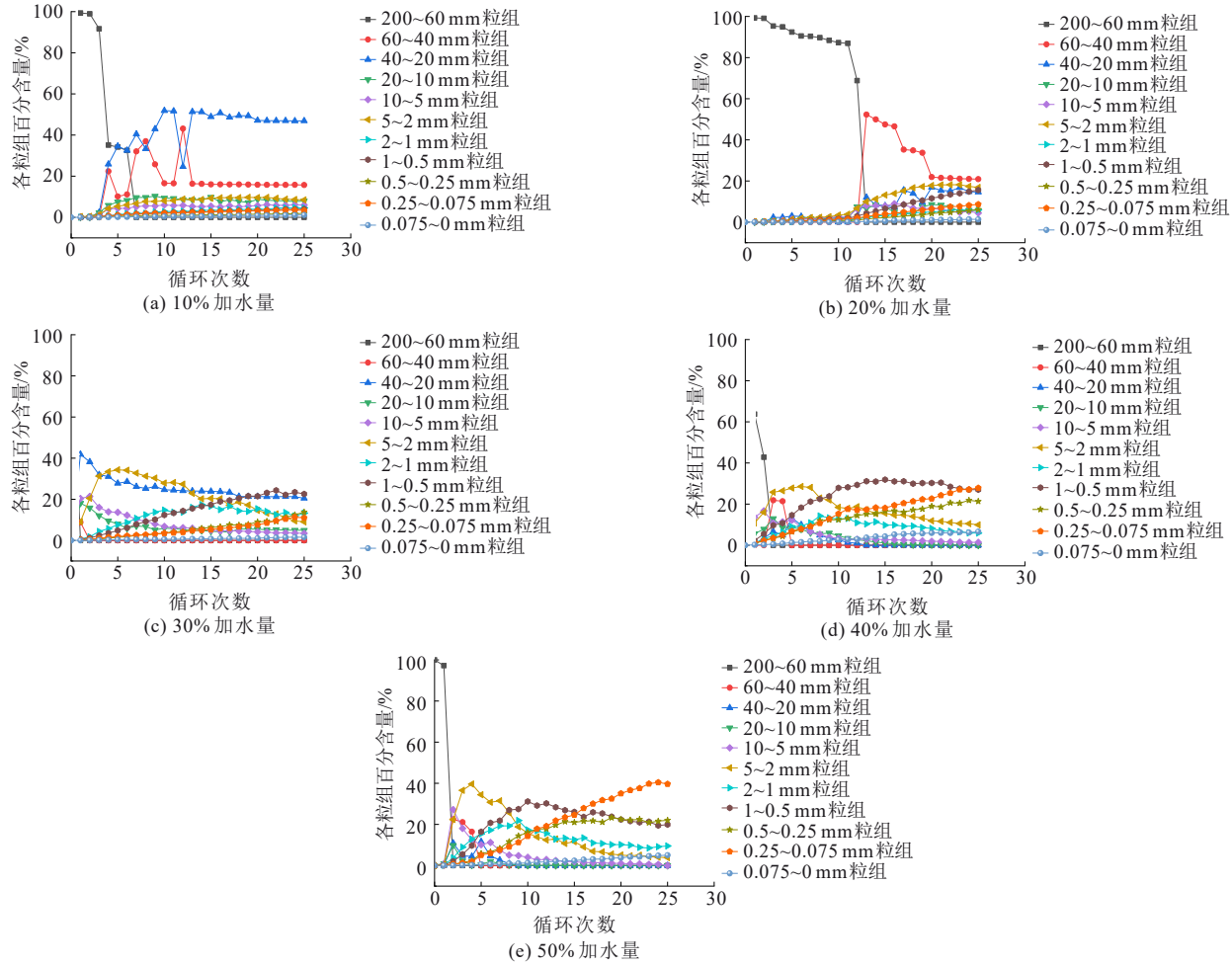


图 8　干湿冷热方式下不同加水量粒组百分含量变化情况(取上边界)

Fig. 8　Variation of percentage content of grain size groups with different water content under combined dry-wet and cold-hot cycles (taking the upper boundary)

解进程中土颗粒逐渐趋于细化。

（2）大粒径粒组：10%～50% 加水量下 200～60 mm 粒组在 25 次循环后百分含量为 0，随着加水量的提升，10% 加水量下 60～40 mm 及 40～20 mm 粒组百分含量占比超过 70%；20% 加水量下 60～40 mm 及 40～20 mm 粒组百分含量占比已经不足 50%；30% 加水量下 60～40 mm 及 40～20 mm 粒组百分含量占比已经不足 30%；40% 加水量下 60～40 mm、40～20 mm、20～10 mm、10～5 mm 粒组百分含量占比已经接近 0；50% 加水量下 60～40 mm、40～20 mm、20～10 mm、10～5 mm 粒组百分含量占比已经为 0。从以上数据可以看出，随着加水量的提升，兰州地区红层泥岩大粒径组快速崩解，且崩解进程在 30%～40% 加水量时有一个突然的加速过程。

（3）小粒径粒组：在经过 25 次循环后，10% 加水量下小粒径组百分含量占比基本上与粒径呈正相关关系，从上到下排列；20% 加水量下小粒径组百分含量占比提升，但还是落后于几个主要的大粒径粒组；30% 加水量下 1～0.5 mm 粒组的百分含量占比最高，基本达到 30%，各小粒径组的占比都有不同程度的提高；40% 加水量下百分含量占比前 6 的粒组仅有一个为 5～2 mm 粒组，其余 5 个均为 2 mm 以下粒组，百分含量占比总和超过 80%；50% 加水量下 2 mm 以下粒组百分含量占比超过 90%。进一步证明了 30%～40% 加水量之间兰州地区红层泥岩崩解特性具有较大突变。

干湿循环下各加水量组内颗粒质量百分含量变化情况与干湿冷热循环下各加水量组内颗粒质量百分含量变化情况基本一致，不再赘述。

3 分形理论研究

岩石的崩解进程属于复杂的非线性动力过程。鉴于分形理论在反映事物非线性变化方面具有独到之处，本文将采用分形理论对红层泥岩崩解进程中的粒度变化特征进行研究。

3.1 分形维数的计算方法

常用的分形维数包括豪斯道夫维数、盒维数和相似维数等。通过红层泥岩的室内崩解试验可以直接得到红层泥岩在各个崩解循环完成之后各粒径组的颗粒质量，故本文采用基于质量与粒径[16]相关的求解分形维数的方法。

$$D=-\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln\varepsilon}\text{或}N(\varepsilon)\propto\varepsilon^{-D} \tag{2}$$

式中：ε 为标度；$N(\varepsilon)$ 为在该标度下得到的量度值；D 为研究对象的分数维。

假设崩解后岩块的总质量为 M，分样筛的筛网孔径为 ε，设 $M(\varepsilon)$ 为直径小于 ε 的质量，根据关联分数维理论，分形维数 D 可表示为：

$$D=3-b \tag{3}$$

式中：D 为分形维数；b 为 $\lg\varepsilon-\lg\left[\frac{M(\varepsilon)}{M}\right]$ 坐标系下的斜率值；$\frac{M(\varepsilon)}{M}$ 是直径小于 ε 的岩块累计百分含量。

3.2 计算结果与分析

不同崩解条件下进行崩解试验的崩解物粒度分形维数通过关联分数维，采用式（2）、（3）进行计算。将试验数据绘制在 $\lg\varepsilon-\lg\left[\frac{M(\varepsilon)}{M}\right]$ 双对数坐标轴中，进行线性回归后，其回归直线的斜率为 b，而分形维数 D 即为 3-b。不同崩解条件下各崩解试验崩解产物的粒度分形维数计算结果如图 9～10 所示，同时不同崩解条件下各崩解试验崩解产物的最终粒度分形维数具体数值如表 6 所列。

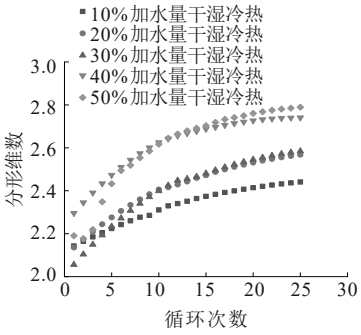


图 9 干湿循环崩解分形维数

Fig. 9 Fractal dimension of disintegration under dry-wet cycles

由图 9～10 可知，随着崩解循环次数的增加，干湿循环及干湿冷热循环下兰州地区红层泥岩的分形维数均递增，但增幅逐渐减小；冷热交替作用对红层泥岩的分形维数存在一定影响，在同级加水量前提下，相较于干湿循环崩解方式，干湿冷热崩解方式下红层泥岩在经历 25 次循环后分形维数更大；随着崩解循环次数的增加，冷热交替作用对红层泥岩崩解特性的影响逐渐减弱。分形维数愈大，红层泥岩的崩解特性愈弱，结合图 9～10 可知，红层泥岩

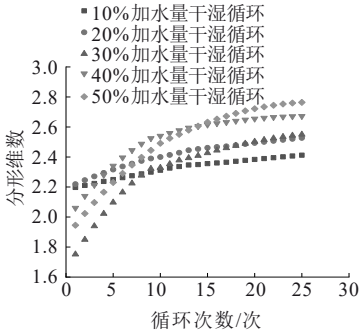


图 10　干湿冷热循环崩解分形维数

Fig. 10　Fractal dimension of disintegration under combined dry-wet and cold-hot cycles

表 6　各试验条件下红层泥岩岩样最终粒度分形维数

Table 6　Final grain size fractal dimensions of red-bed mudstone specimens under various test conditions

各试验岩样	最终粒度分形维数
10%加水量干湿循环	2.412
20%加水量干湿循环	2.527
30%加水量干湿循环	2.550
40%加水量干湿循环	2.672
50%加水量干湿循环	2.764
10%加水量干湿冷热循环	2.440
20%加水量干湿冷热循环	2.568
30%加水量干湿冷热循环	2.585
40%加水量干湿冷热循环	2.740
50%加水量干湿冷热循环	2.789

的崩解分形维数在达到2.7后增长极为缓慢,故可判定此时的红层泥岩失去强崩解性。由表6可知,干湿循环崩解方式下红层泥岩在10%～50%加水量作用下的分形维数分别为2.412、2.527、2.550、2.672及2.764。干湿冷热崩解方式下兰州地区红层泥岩在10%～50%加水量作用下的分形维数分别为2.440、2.568、2.585、2.740及2.789。

3.3　分形维数曲线的拟合

将求得的粒度分形维数与崩解循环次数进行函数拟合,可得拟合函数为:

$$D = A + (B + C/N)\ln(N) \tag{4}$$

式中:A、B、C为拟合参数;N为红层泥岩崩解循环次数,参数取值如表7所列。表中10-gs代表10%加水量下干湿循环岩样,10-gslr代表10%加水量下干湿冷热循环岩样,其余编号含义以此类推。崩解分形维数拟合曲线如图11～12所示。

由表7可知,不同加水量及不同循环方式下各岩样根据拟合函数[式(4)]所得的拟合公式的相关

表 7　拟合参数

Table 7　Fitting parameters

岩样	A	B	C	R^2
10-gs	2.200 4	0.069 5	−0.175 8	0.985 1
20-gs	2.222 5	0.099 8	−0.189 7	0.994 9
30-gs	1.750 3	0.263 0	−0.199 1	0.994 5
40-gs	2.058 8	0.207 7	−0.117 6	0.983 6
50-gs	1.952 9	0.277 1	−0.458 1	0.996 9
10-gslr	2.147 9	0.098 9	−0.236 2	0.987 1
20-gslr	2.139 9	0.141 8	−0.260 7	0.995 9
30-gslr	2.060 5	0.175 9	−0.299 6	0.997 3
40-gslr	2.297 7	0.152 4	−0.176 3	0.992 4
50-gslr	2.185 1	0.212 6	−0.355 7	0.984 2

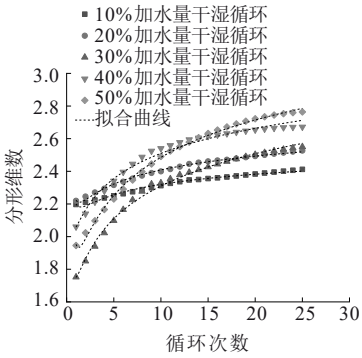


图 11　干湿循环崩解分形维数拟合曲线

Fig. 11　Fitting curve of fractal dimension of disintegration under dry-wet cycles

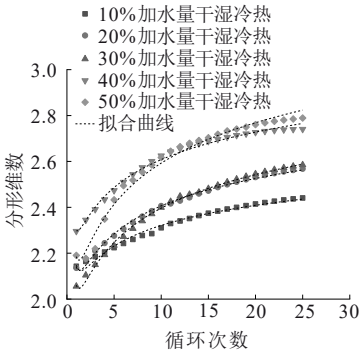


图 12　干湿冷热循环崩解分形维数拟合曲线

Fig. 12　Fitting curve of fractal dimension of disintegration under combined dry-wet and cold-hot cycles

度R^2均在0.98以上,证明此拟合公式拟合效果良好,可以用来预测10%～50%加水量下兰州地区红层泥岩在干湿循环和干湿冷热循环下的粒度分形维数。

4　结论

针对甘肃兰州地区红层泥岩进行干湿循环、冷热循环和干湿冷热循环下的室内崩解试验,分析其

崩解差异性、崩解比、粒度变化特征和分形维数，得出以下结论：

（1）纯粹的温度变化并不会引起红层泥岩的崩解，但在有水分参与的情况下温度变化可以在一定程度上促进红层泥岩的崩解。

（2）兰州地区红层泥岩在10%～50%加水量下经25次干湿循环后的最终崩解比分别为54.46%、32.76%、12.58%、1.94%、1.03%；干湿冷热循环后的最终崩解比分别为39.90%、27.33%、13.17%、1.46%、1.00%。从试验的角度验证了温度对红层泥岩崩解的促进作用。

（3）通过分析崩解进程中不同加水量、不同循环条件和不同循环次数下红层泥岩各粒径组含量变化可知，随着加水量的提高，各粒组百分含量变化的曲线随循环次数增加分别呈现出加快下降、慢速下降、先增高后降低和线性增加4种趋势；随着加水量的提高和循环次数的增加，百分含量主要占比的粒组向小粒径组趋近，大粒径粒组颗粒加快减少，小粒径粒组在30%～40%加水量之间会有一个突变式的增加，说明红层泥岩在30%～40%加水量之间结构会遭受较大破坏。

（4）兰州地区红层泥岩在10%～50%加水量下经25次干湿循环后的最终粒度分形维数分别为2.412、2.527、2.550、2.672及2.764；干湿冷热循环下的最终粒度分形维数分别为2.440、2.568、2.585、2.740及2.789。根据所得的粒度分形维数，得出兰州地区红层泥岩在粒度分形维数达到2.7～2.8时趋于停止，且当其粒度分形维数超过2.7时可将其视为完全崩解状态，此时红层泥岩不再具有强崩解性。

参考文献（References）

[1] 张丹，陈安强，刘刚才．紫色泥岩水热条件下崩解过程的分维特性[J]．岩土力学，2012，33(5)：1341-1346.
ZHANG Dan，CHEN Anqiang，LIU Gangcai. Disintegration characteristics of purple mudstone based on fractal dimension under hydrothermal condition[J]. Rock and Soil Mechanics，2012，33(5)：1341-1346.

[2] 王骑虎．甘肃红层工程地质特性与边坡稳定性研究[D]．北京：北京工业大学，2016.
WANG Qihu. Study on engineering geological characteristics and slope stability of red beds in Gansu Province[D]. Beijing：Beijing University of Technology，2016.

[3] 曲永新，徐晓岚，时梦熊，等．泥质岩的工程分类和膨胀势的快速预测[J]．水文地质工程地质，1988，15(5)：14-16，13.
QU Yongxin，XU Xiaolan，SHI Mengxiong，et al. Engineering classification and rapid prediction of swelling potential of argillaceous rocks[J]. Hydrogeology and Engineering Geology，1988，15(5)：14-16，13.

[4] 赵明华，邓觐宇，曹文贵．红砂岩崩解特性及其路堤填筑技术研究[J]．中国公路学报，2003，16(3)：1-5.
ZHAO Minghua，DENG Jinyu，CAO Wengui. Study of the disintegration character of red sandstone and the construction techniques of red sandstone embankment[J]. China Journal of Highway and Transport，2003，16(3)：1-5.

[5] 吴道祥，刘宏杰，王国强．红层软岩崩解性室内试验研究[J]．岩石力学与工程学报，2010，29(增刊2)：4173-4179.
WU Daoxiang，LIU Hongjie，WANG Guoqiang. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2010，29(Suppl02)：4173-4179.

[6] 程树范，曾亚武，叶阳，等．甘肃红层泥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 Shufan，ZENG Yawu，YE Yang，et al. Slake durability test and mineral inclusion effect of Gansu red-bed clay rock[J]. Rock and Soil Mechanics，2023，44(Suppl01)：99-106.

[7] 赵顺良，查焕奕．不同pH条件下红层泥岩崩解特性研究[J]．人民长江，2022，53(9)：140-146.
ZHAO Shunliang，ZHA Huanyi. Disintegration characteristics of red bed mudstone under different pH conditions[J]. Yangtze River，2022，53(9)：140-146.

[8] 尹红亮，文良东，吴国庆，等．干湿循环条件下红层泥岩崩解特性及规律研究[J]．公路交通科技，2023，40(4)：94-102.
YIN Hongliang，WEN Liangdong，WU Guoqing，et aStudy on disintegration characteristics and rule of red-bed mudstone under action of dry-wet cycles[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2023，40(4)：94-102.

[9] 马文鹏．兰州地区红层遇水崩解机理及微观特征研究[D]．兰州：兰州大学，2020.
MA Wenpeng. Study on the mechanism and microscopic characteristics of red layer disintegration in Lanzhou[D]. Lanzhou：Lanzhou University，2020.

[10] 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.

[11] 崔雪雪．干湿循环条件下川中红层软岩崩解特性与微观机理分析[D]．淮南：安徽理工大学，2019.
CUI Xuexue. Analysis of disintegration characteristics and microscopic mechanism of red bed soft rock in central Sichuan Province under dry-wet cycle[D]. Huainan：Anhui University of Science & Technology，2019.

[12] 吕学伟．红层泥岩崩解机理的实验研究[D]．成都：西南交通大学，2013.
LÜ Xuewei. Experimental research of slaking mechanism of red bed mudstone[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2013.

[13] SINGH T N, VERMA A K, SINGH V, et al. Slake durability study of shaly rock and its predictions[J]. Environmental Geology, 2005, 47(2): 246-253.

[14] 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 Zhixiong, KONG Lingwei, 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.

[15] 刘跃东，康红普. 不同应力路径下含水泥岩崩解破坏跨尺度分形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(增刊2)：4162-4173.
LIU Yuedong, KANG Hongpu. Study on cross-scale fractal law of disintegration and failure of water-bearing mudstone under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Suppl02): 4162-4173.

[16] 杨峰峰，张巨峰，郑超，等. 基于分形原理的红层软岩崩解特性试验研究[J]. 应用力学学报，2022，39(2)：350-355.
YANG Fengfeng, ZHANG Jufeng, ZHENG Chao, et al. Experimental study on disintegration characteristics of red bed soft rock based on fractal principle[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(2): 350-355.

[17] 张宗堂，高文华，张志敏，等. 干湿循环作用下膨胀岩的崩解特性及分形特征[J]. 铁道科学与工程学报，2019，16(4)：930-937.
ZHANG Zongtang, GAO Wenhua, ZHANG Zhimin, et al. Disintegration characteristics and fractal features of swelling rock during dry-wet cycles[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(4): 930-937.

[18] 赵晓彦，李昆鹏，肖典，等. 基于分形理论的粉砂质泥岩酸雨崩解特征研究[J]. 工程地质学报，2020，28(2)：232-239.
ZHAO Xiaoyan, LI Kunpeng, XIAO Dian, et al. Slaking characteristics of silty mudstone under acid rain action based on fractal dimension[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 232-239.

[19] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程：JTG E40—2007[S]. 北京：人民交通出版社，2007.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineering: JTG E40—2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[20] ERGULER Z A, SHAKOOR A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks[J]. Engineering Geology, 2009, 108(1-2): 36-42.

[21] CHAOWARIN WALSRI. Simulation of sandstone degradation using a large-scale slake durability index testing device[J]. Songklanakarin Journal of Science andTechnology (SJST), 2012, 34(5):587-596.

（本文编辑：贾源源）