

基于 SEM 及 PCAS 的白云岩溶蚀孔隙结构 量化评价研究

刘朋恩¹, 刘文连², 许汉华², 吉锋¹

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司, 昆明 650051)

摘要: 白云岩的孔隙特征是研究白云岩溶蚀规律的重要内容, 针对震旦系陡山沱组白云岩, 利用扫描电镜(SEM)对不同结构白云岩孔隙形态进行扫描, 并利用孔裂隙特征分析系统软件(PCAS)对扫描的孔隙结构进行定量分析。结果表明, 随着不同结构白云岩中白云石含量降低, 孔隙数量明显增加, 孔隙结构变得更加复杂, 岩石强度更低, 并建立了白云石含量与孔隙结构特征的函数, 研究成果对白云岩溶蚀机理研究有重要意义。

关键词: 白云岩; 溶蚀; 扫描电镜; 孔隙结构特征

中图分类号: P642.25; P583 **文献标识码:** A

QUANTITATIVE EVALUATION OF DOLOMITE DISSOLUTION PORE STRUCTURE BASED ON SEM AND PCAS

LIU Peng-en¹, LIU Wen-lian², XU Han-hua², JI Feng¹

(1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry, Kunming 650051, China)

Abstract: The pore characteristics of dolomite is an important content in the study of dolomite Karst erosion law. For the sinian Doushantuo Formation dolomite, scanning electron microscope (SEM) was used to scan the pore morphology of dolomite with different structures, and the pore and fissure characteristic analysis system software (PCAS) was used to quantitatively analyze the pore structure. The results show that with the decrease of dolomite content in dolomites with different structures, the number of pores increases significantly, the pore structure becomes more complex, and the rock strength is lower. The function of dolomite content and pore structure characteristics is established, which is of great significance to the study of dolomite dissolution mechanism.

Key words: dolomite; corrosion; scanning electron microscopy; pore structure characteristics

1 引言

白云岩的孔隙特征一定程度上可以反映岩石溶蚀程度和机理, 定量分析不同结构白云岩孔隙特征,

有助于对白云岩溶蚀机理深化研究。研究孔隙结构特征, 可以利用聚焦离子束扫描电镜、宽离子束扫描电镜、氩离子抛光扫描电镜, 用于定性描述孔隙特征(吴松涛等^[1], 杨永飞等^[2], 王朋飞等^[3])。优点是能

直观观察孔隙特征,缺点是不能定量分析。高压压汞、小角中子散射等用于孔隙的定量描述(Clarkson et al^[4], Zhang^[5], Wang^[6], Sun^[7]),优点是能定量反映孔隙特征,缺点是不能反映孔隙发育位置与矿物的关系以及孔隙结构类型。闫高原等^[8]及 Liu et al.^[9]开发了一款基于高分辨率图像孔裂隙分析系统软件(PCAS),PCAS介绍了一系列的图像处理技术和几何测量方法,用以量化图像中的多尺度微孔隙度。其操作是无损的,可保证结果的准确性(Chun Liu, Bin Shi, Jian Zhou, Chaosheng Tang^[10])。将SEM图像导入PCAS软件,可以得到孔隙率、孔径等基本参数,以及反映孔隙结构的形状因子、分形维数和概率熵等结构参数。

本次研究针对陡山沱组白云岩,利用SEM查明其孔隙特征,再将SEM图像导入PCAS中对孔隙进行定量分析,得出不同结构白云岩与孔隙的数量、形状因子、概率熵、分形维数之间的关系,研究成果对白云岩溶蚀的研究提供可靠基础。

2 样品及方法

2.1 试验样品

研究区位于扬子准地台滇东台褶带,岩层单斜产出,场区岩体节理裂隙发育,岩性主要为震旦系陡山沱组白云岩,以泥晶白云岩为主,还有部分砂质粉晶白云岩,图1和图2为两种白云岩扫描电镜结构图像。

2.2 试验方法

试验选取不同结构的白云岩进行扫描电镜处理,然后将相同放大倍数下的电镜图像在PCAS内

进行孔隙结构定量分析。

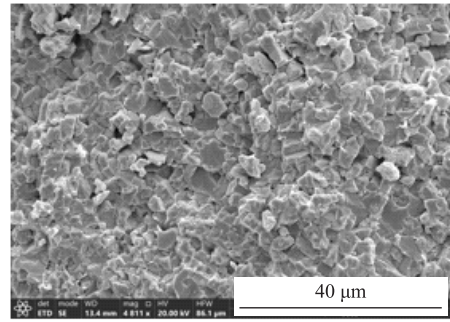


图1 泥晶白云岩扫描电镜结构图像

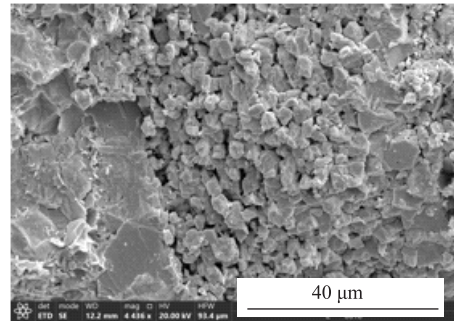


图2 砂质粉晶白云岩扫描电镜结构图像

2.3 数据获取

2.3.1 PCAS基本原理

PCAS基于全局阈值法,能够识别各种颗粒和孔隙。二值化处理的图像,可以排除无用点,分割并识别孔隙,进而输出孔隙的几何参数和统计数据。PCAS通过对图像的腐蚀运算可以修正对孔隙的识别,排除孔隙间细小连接处被误认为是新孔隙的影响,得出真实孔隙,图3介绍了孔隙识别的具体过程。

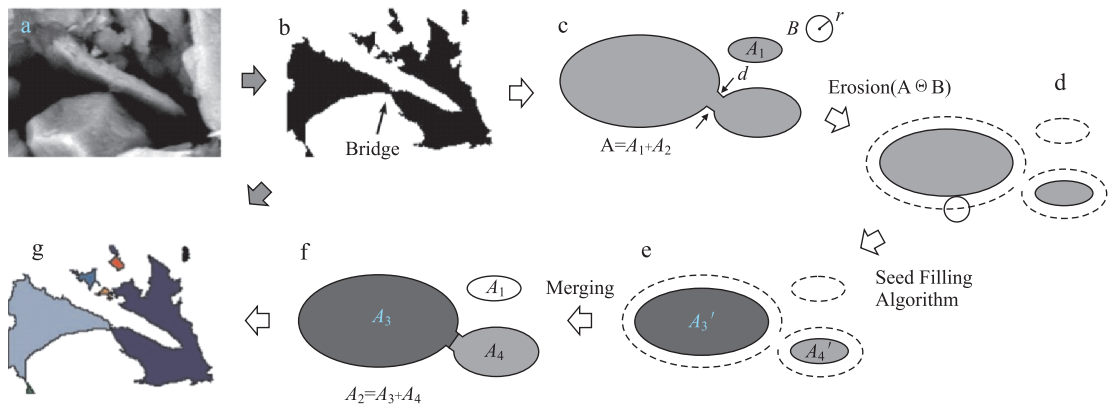


图3 孔隙系统识别过程

2.3.2 参数设定

(1) 灰度阈值设定。灰度阈值需要通过人工判断来确定,首先设定一个较大的阈值,并分割图像;

然后,逐渐减小阈值直到较暗区域的颗粒被转化为白色;最后,在这一值附近调整阈值,并将孔隙区分出来。

(2) 最小孔隙面积设定。在对扫描电镜图片处理前,设定最小孔隙面积,软件能够捕捉更加真实的孔隙形状。这一值通常取 50,可以在 30~100 之间调整。

(3) 封闭半径设定。封闭半径的设定,便于软件腐蚀运算,分割图像进而识别孔隙,有利于后续孔隙结构的分析。

3 孔隙结构定量表征

3.1 孔隙特征

利用 PCAS 软件对扫描电镜图像进行分析,每个样品取放大倍数为 150 的图像,观察其岩石表面

的孔隙情况,基于二值化对图像进行参数设定,得出最终图像。图 4~图 8 为不同结构白云岩成像图,其中 a 图为白云岩扫描电镜的原图,b 图为 PCAS 软件二值化后的图像,c 图为成像后的结果,其中的不同颜色用于区分不同孔隙。

3.2 孔隙定量分析

基于 PCAS 图像进行孔隙分析,不同样品的相关参数见表 1。形状因子(ff)反映孔隙边缘的粗糙程度,最大值为 1,形状因子的值越小表明孔隙边缘越粗糙,相应的结构也更加复杂。概率熵(H)用来量化孔隙的定向性,概率熵取值范围 0~1。值越大说明孔隙发育越具有不定向性。分形维数(D_f)用于



图 4 残余砂屑白云岩

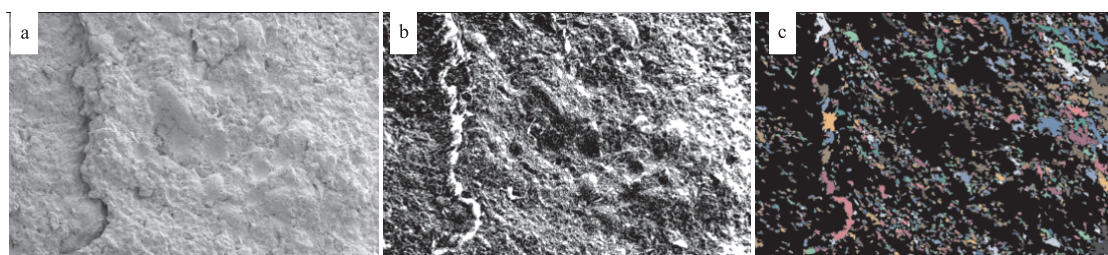


图 5 砂质细粉晶白云岩

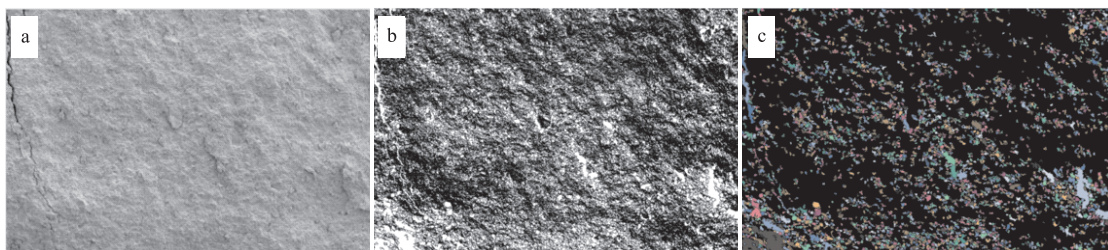


图 6 条带状泥质白云岩

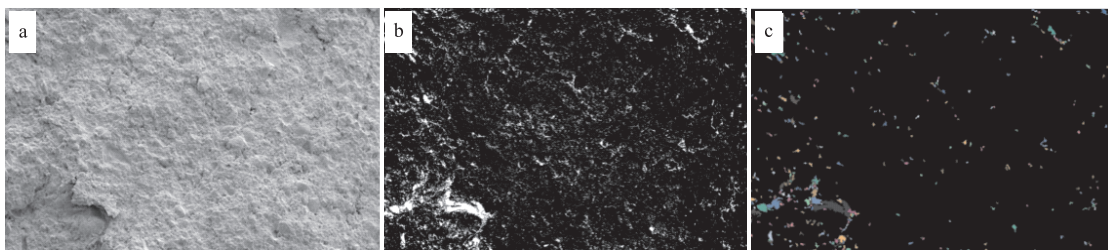


图 7 砂质细粉晶白云岩

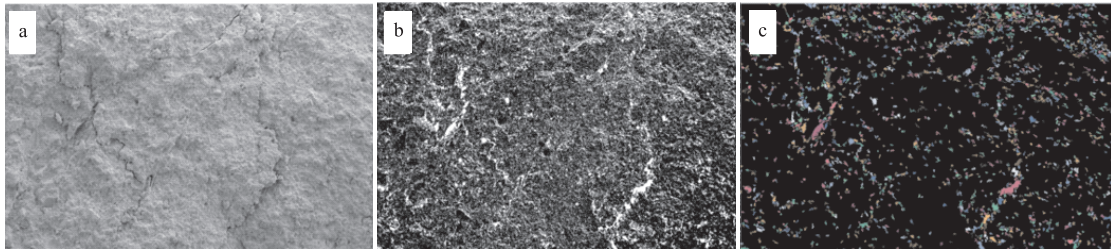


图8 砂质细粉-粗粉晶白云岩

表1 基于PCAS获取的孔隙相关参数

参数	SY-1	SY-2	SY-3	SY-4	SY-5
总孔数	137	2 144	3 325	441	1 998
孔隙率/%	4.15	29.69	24.36	8.31	16.21
平均区域面积/ μm^2	0.003 083	0.000 160	0.000 085	0.000 219	0.000 951
平均周长/ μm	10.25	6.9	4.93	5.70	5.16
形状因子	0.572 1	0.330 6	0.371 7	0.441 9	0.351 6
平均长度/ μm	3.166 6	1.946 7	1.413 3	1.817 5	1.504 1
平均宽度/ μm	1.314 1	1.076 7	0.836 6	0.910 0	0.854 1
概率熵	0.903 3	0.957 3	0.966 3	0.973 9	0.982 7
分形维数	0.928 4	1.224	1.436 7	1.147 8	1.372 6

描述参数在一定范围内的变化程度,即数据的非均匀性。

3.3 讨论

PCAS统计得出的孔隙参数反映了岩石样品结构性质,不同砂化程度的白云岩其矿物成分和矿物

含量也不相同,矿物成分和含量的不同反映了白云岩砂化过程中的溶蚀机理。由于白云岩中主要矿物成分是白云石,现将不同砂化程度样品中的白云石含量变化与PCAS分析得出的孔隙参数拟合(详见图9),进一步揭示研究区白云岩溶蚀过程。

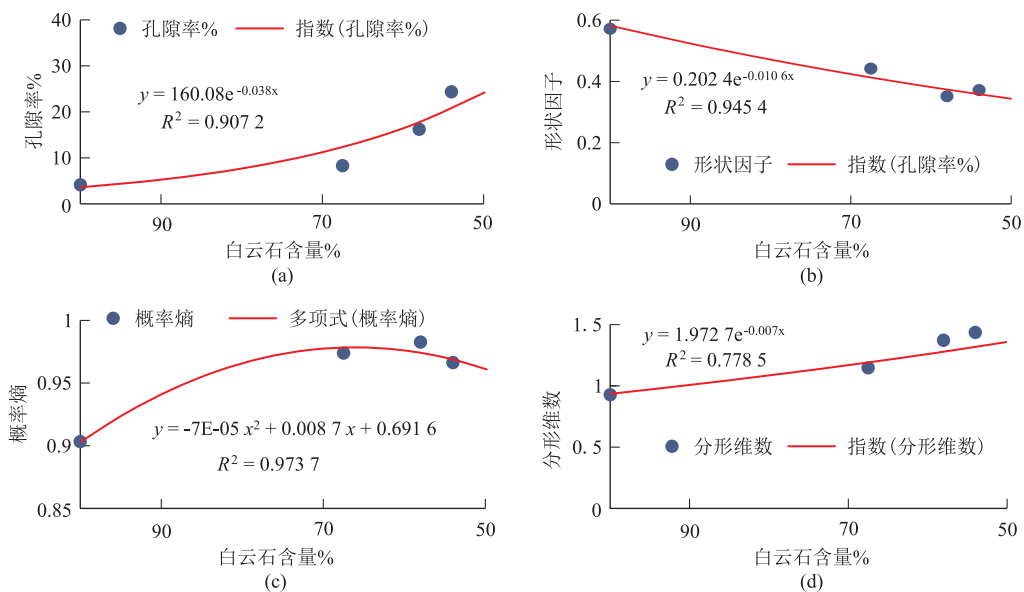


图9 白云石含量对孔隙参数的影响

通过图9可以发现,随着样品中白云石含量的降低,白云岩孔隙率逐渐增大,并且相关性较强。这是因为样品中白云石在酸性条件下会被溶蚀,并且在水动力条件下会被携带脱离母岩,进而导致母岩中白云石含量降低,孔隙逐渐增加。随着样品中白

云石含量的降低,可发现孔隙的形状因子逐渐减小,相关性很强,说明白云石含量较高时,岩石的整体性较好,比较规则;而当白云岩经过溶蚀后,白云石含量降低,而白云岩中有四面体结构的石英,会与粘土矿物相结合,使得白云岩中孔隙发育粗糙,结构更加

复杂。随着白云石含量的降低,概率熵和分形维数均升高,说明在溶蚀过程中,白云岩溶蚀形成孔隙的情况不是单一定向的,而是较为随机和具有选择性的,这与酸性溶液在流动过程中的方向随机性以及白云岩结构的不均匀性有关。

4 结论

(1) 白云岩的孔隙特征与白云石的含量相关,白云石含量越低,孔隙越发育,结构变得更复杂,并且相关性能达到0.9以上。

(2) 白云岩的孔隙特征可以反映白云岩溶蚀机理^[11],白云石在酸性条件下会被溶蚀,并且在水动力条件下会被携带脱离母岩,进而导致母岩中孔隙逐渐增加。当白云岩溶蚀后白云石含量降低,白云岩中有四面体结构的石英,其会与粘土矿物相结合,使得孔隙发育粗糙,结构更加复杂,并且由于孔隙发育的复杂程度可以推断白云岩溶蚀不是单一的定向的。

参考文献

- [1] 吴松涛,邹才能,朱如凯,等.鄂尔多斯盆地上三叠统长7段泥页岩储集性能[J].地球科学(中国地质大学学报),2015,40(11):1810-182.
- [2] 杨永飞,王晨晨,姚军,等.页岩基质微观孔隙结构分析新方法[J].地球科学,2016,41(6):1067-1073.
- [3] 王朋飞,姜振学,李卓,等.渝东北下寒武统牛蹄塘组页岩微米孔隙结构特征[J].地球科学,2017,42(7):1147-1156.
- [4] Clarkson C R, Solano N, Bustin R M, et. al. . Po-re Structure Characterization of North American Shale Gas Reservoirs Using US-AN-S/SANS[J]. Gas Adsorption and Mercury Intrusion. Fuel, 2013, 103(1): 606-616.
- [5] Zhang X, Liu, C L, Zhu Y M, et. al. . The Characterization of a Marine Shale Gas Reservoir in the Lower Silurian Longmaxi Formation of the Northeastern Yunnan Province China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27(1): 321-335.
- [6] Wang, B Y, Hu B, Bai J P, et. al. . Coal Accumulating Environments of the Upper Carboniferous Lower Permian Taiyuan Formation in Southeastern Qinshui Basin, Shanxi Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(5): 677-688(in Chinese with English abstract).
- [7] Sun, M D, Yu, B S, Hu, Q H, et. al. . Nano-scale Pore Characteristics of the Lower Cambrian Niutitang Formation Shale: A Case Study from Well Yuke # 1 in the Southeast of Chongqing China[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 154-155(5): 16-29.
- [8] 闫高原,韦重韬,宋昱,等.基于Ar-SEM及PCAS页岩孔隙结构定量表征[J].地球科学,2018,43(5):1602-1610.
- [9] Liu C, Shi B, Zhou J, et. al. . Quantification and characterization of microporosity by image processing geometric measurement and statistical method: application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1): 97-106.
- [10] Chun Liu, Bin Shi, Jian Zhou, et al. . Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1): 97-107.
- [11] 于静,胡于博,谢俊华,等.模拟环境水对隧洞石膏岩溶蚀的分析评价与灰色预测[J].地质灾害与环境保护,2016,27(4):71-75.

作者简介: 刘朋恩(1998—),男,硕士生,主要从事重大地质灾害稳定性预测评价方向的研究。E-mail:1667671098@qq.com