

375-382

碳酸盐岩风化过程中空隙结构的变化*

韩宝平 张 井
(中国矿业大学)

P 588.245

A

提 要 本文以一个灰岩和一个大理岩风化剖面为例,运用压汞实验和扫描电镜观察等方法,研究了风化过程中碳酸盐岩空隙结构的变化。在风化过程中,岩石的有效空隙度**,平均空隙直径均增加,风化溶蚀孔洞发育的分异作用明显,直径较大的连通性空隙在全部空隙中所占比例随着风化程度提高而明显增大。未风化的岩石仅发育少数直径段的原生孔隙,有效空隙度一般小于1%,累积进汞体积曲线呈台阶状;风化岩石不同直径的空隙均有发育,有效空隙度一般为1~10%,累积进汞体积曲线多为直线型;强烈风化岩石以连通性大溶孔为主,有效空隙度为10~20%,累积进汞体积曲线多为反抛物线型。

关键词 风化过程;碳酸盐岩;空隙结构;压汞实验;有效空隙度。

碳酸盐岩

0 前 言

碳酸盐岩中各种不同成因的空隙是岩溶水的赋存空间和运移通道。空隙结构(空隙大小、不同直径的空隙在全部空隙中的比例,空隙之间的连通性等)常常控制了含水介质的渗透性能^{[1][2]}。除石油勘探系统采用压汞实验对储集层的孔隙结构进行了大量研究外,地质界以往对岩石空隙的研究多采用传统的密度法,它只能提供孔隙度参数,而对岩石的空隙结构参数却无能为力。作者选择了一个灰岩风化剖面和一个大理岩风化剖面,初步系统研究了风化过程中岩石空隙结构的变化,特此文抛砖引玉。

1 测试仪器和方法

1.1 9310型微孔结构分析仪(Pore Sizer 9310)

美国佐治亚州Micromeritics公司生产,工作压力0MPa~207MPa,低压分辨率 ± 0.001 MPa,高压分辨率 ± 0.01 MPa,汞液与岩石样品接触角 140° ,汞的表面张力480

* 煤炭部归国人员基金资助项目成果之一。

** 为了与松散层的孔隙度相区别,此处以空隙度表示。

第一作者简介:韩宝平,男,39岁,副教授,1982年毕业于南京大学水工专业。1985年于中科院地质所获硕士学位。(221008)江苏省徐州市。

mN/m,测定孔径范围为0.006~360 μ m。

测定时,首先将试样在烘箱中烘干,然后装入试样室中,经抽真空后,通过逐步加压注入金属汞液使之进入岩石空隙中。汞液首先进入较大的空隙,随着压力增大再侵入直径较小的空隙。压入空隙中汞的体积由露出液面的铂丝电阻变化求出。岩石的空隙度(n)通过下式求出:

$$n = \frac{\text{最大累积注汞体积}}{\text{岩石试样体积}} \times 100\%$$

因为是通过汞液对空隙的有效渗透而得出的,因此它实际上代表有效空隙度。孤立的非连通性空隙,使用该法无法测定。此外对于直径大于360 μ m的空隙结构无法分别测定。

1.2 S-250 III型扫描电子显微镜

为英国剑桥公司产品,加速电压40kV,放大倍数9~20万倍,分辨率60 μ m。可以直接观察岩石溶孔结构及其之间连通喉道大小。与之匹配的波谱仪和能谱仪可以进行点扫描、线扫描分析,定点定线地确定化学成分对溶孔发育的影响。

2 徐州翟山灰岩风化剖面

该剖面位于徐州市东南郊翟山垭口斜坡上,修建环城路时被开挖揭露,受土下风化溶蚀作用,寒武系张夏灰岩表层形成溶孔溶隙风化带。剖面情况及取样位置详见图1。本区属于暖温带半湿润气候区,年平均降雨量853mm,年平均气温14 $^{\circ}$ C,风化作用的强度为中等。

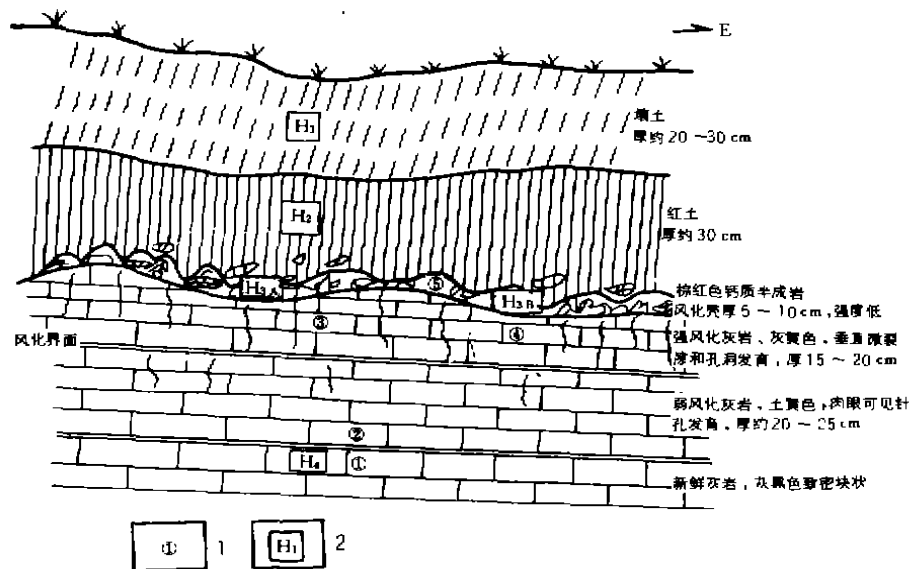


图1 徐州市翟山灰岩风化剖面示意图

Fig. 1 Sketch map of weathered limestone profile in Zhaishan

1. 压汞分析取样点; 2. 岩土化学成分取样点

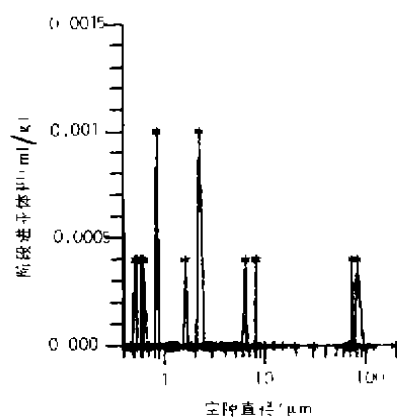
不同岩土层化学成分和压汞分析结果分别见表1、表2。相应的压汞曲线分别见图2、3、4、5。

综合压汞分析及扫描电镜观察,可以得出下列几点认识:

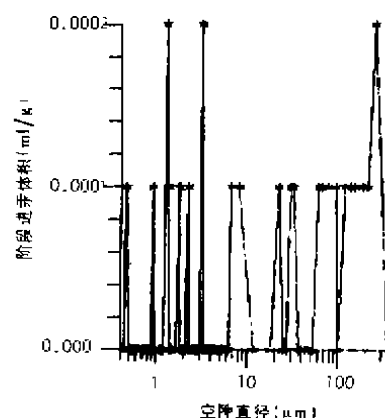
表1 岩土化学成分表

Tab. 1 Chemical composition of soils and carbonate rock

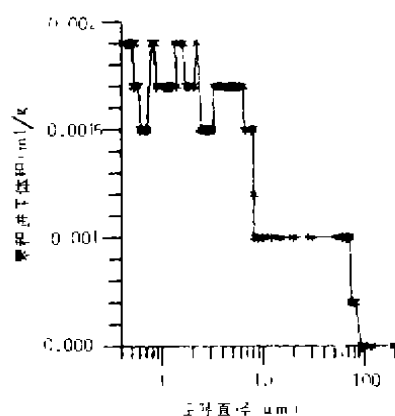
试样号	层位	化 学 成 分 (重量%)											
		CaO	MgO	CO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
H ₁	壤土	2.89	1.46	1.2	63.37	13.11	0.56	4.23	0.01	0.54	2.25	1.0	0.16
H ₂	红土层	1.65	1.87	0.1	55.66	17.29	0.19	6.44	0.13	0.59	2.06	0.74	0.075
H ₃ A	棕红风化层	49.02	0.43	39.09	7.81	2.15	0.052	0.87	0.02	0.012	0.25	0.35	0.012
H ₃ B	同上	48.44	2.87	39.95	7.51	0.22	0.053	0.19	0.03	—	0.07	0.37	0.009
H ₄	新鲜灰岩	47.00	4.29	41.96	5.85	0.22	0.1	0.09	0.01	0.01	0.06	0.25	—



a 不同直径空管阶段 进汞
量与直径关系曲线



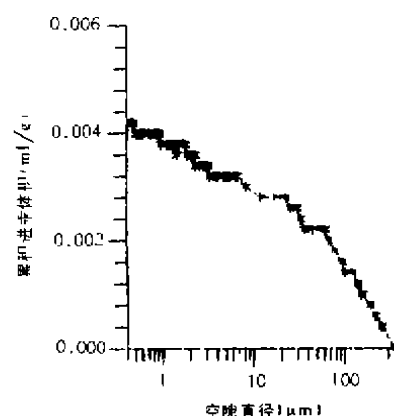
b



b 累积进汞量(直径+者先进)
与空管直径关系曲线

图2 Y₁号样压汞曲线

Fig. 2 Curves of pressured-mercury
testing on Y₁ rock sample



b

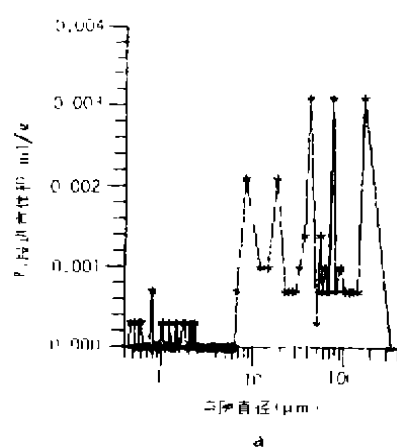
图3 Y₂号样压汞曲线

Fig. 3 Curves of pressured-mercury
testing on Y₂ rock sample

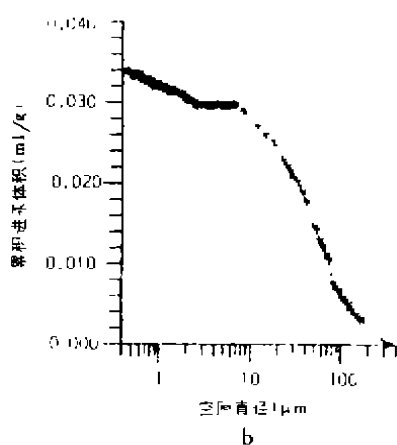
表 2 压汞分析结果表

Tab. 2 Results of pressured-mercury testing on limestones

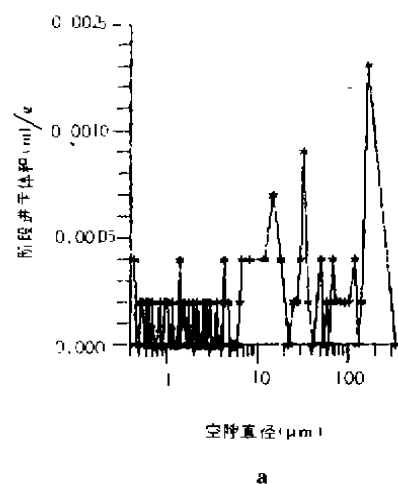
试样号	层位	有效空隙度	平均空隙直径(μm)	各种直径(μm)空隙在全部空隙体积中所占比例(%)							
				≥ 300	> 235	> 112	> 69	> 42	> 20	> 10	> 1
Y_1	新鲜灰岩	0.96	2.198	0	0	0	33	33	33	33	63
Y_2	半风化灰岩	3.36	4.223	5	12	33	46	67	67	70	91
Y_3	强风化灰岩	15.76	6.867	2	3	14	29	39	60	80	96
Y_4	强风化灰岩	15.19	7.433	4	7	39	57	66	81	87	95
Y_5	棕色风化壳层	25.58	2.458	0	0	6	12	23	33	6	84



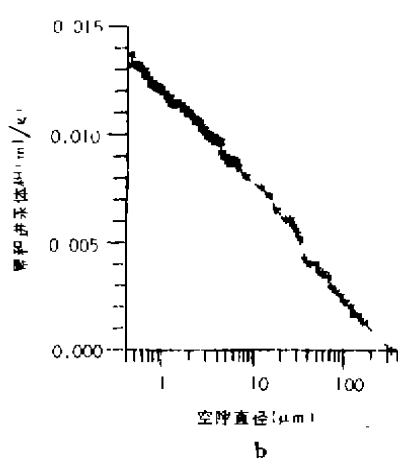
a



b

图 4 Y_4 号样压汞曲线Fig. 4 Curves of pressured-mercury testing on Y_4 rock sample

a



b

图 5 Y_5 号样压汞曲线Fig. 5 Curves of pressured-mercury testing on Y_5 rock sample

1. 该剖面风化岩石和新鲜岩石界面清楚,图版照片 1 中下部为新鲜灰岩,岩石致密,有效空隙度仅为 0.91%;而风化灰岩一边则溶孔发育,相应的有效空隙度为 3.36%。

2. 从不同风化程度灰岩的压汞分析数据(表 2)和图 2、3、4、5 的对比中,可以看出岩石的

有效空隙度和平均空隙直径均随风化程度加强而明显增加,而且溶孔发育的分异作用明显。 Y_1 号新鲜灰岩仅有少数直径段的原生孔隙发育,且孔径多小于 $10\mu\text{m}$,因此累积进汞体积曲线呈台阶状。 Y_2 号样,由于风化溶蚀作用,各种直径段的空隙均有发育,因此阶段进汞体积曲线显示多峰值型。电镜下可见多为大小宽窄不等的粒间溶蚀孔隙(图版照片2)。 Y_3 、 Y_4 号样因强烈的风化溶蚀作用导致溶孔发育的分异性增强,直径大于 $10\mu\text{m}$ 的空隙在全部空隙中的比例分别高达80%和87%,累积进汞体积曲线为反抛物线型。 Y_5 号为半成岩状,硬度介于土壤和岩石之间,各种直径的溶孔均强烈发育,虽然平均空隙直径不大,但有效空隙度高达25.58%。

3. 随着风化作用加强,空隙的连通性增强,喉道宽度加大,强烈风化灰岩以互相连通的峰窝状溶孔为主(图版照片3、4)。

3 铜山县班井大理岩风化剖面

班井大理岩是受一侵入岩墙烘烤热变质而成,其成分经X射线衍射分析为纯方解石。在大理石采石场剖面处,选一受两垂直裂隙切割高达1.5m的巨石块,根据其颜色、溶孔发育情况连续取样,进行压汞分析,其结果见表3。代表性压汞曲线见图6、7、8。

表3 班井大理岩风化剖面压汞分析结果表

Tab. 3 Results of pressured-mercury testing on weathered marbles

试样号	取样层位描述	有效空隙度 (%)	平均空隙 直径(μm)	各种直径(μm)空隙在总空隙中所占比例(%)							
				≥ 300	> 235	> 112	> 69	> 42	> 20	> 10	> 1
Ba ₁	纯白色新鲜致密大理岩,距地表1.0m	0.82	7.007	0	0	29	43	52	71	77	100
Ba ₂	灰黄色,肉眼可见针状溶孔距地表0.4m	9.27	2.938	2	6	16	24	30	46	58	86
Ba ₃	风化状同上,距地表0.35m	9.75	3.940	1	3	7	21	31	46	60	92
Ba ₄	灰黄色,肉眼可见溶孔增大,呈峰窝状,距地表0.25m	11.56	6.596	2	5	16	33	52	71	86	95
Ba ₅	棕红色钙质壳,厚5~10cm,上面有10cm土层覆盖	28.90	2.912	0	0	12	25	38	52	61	85

根据压汞数据及压汞曲线,结合扫描电镜观察,可以得到下列几点认识:

1. 因大理岩经受了重结晶作用,晶体多呈紧密镶嵌状接触,故有效空隙度仅为0.82%。但因空隙多为局部残留结晶空位和晶间大孔隙,因而平均直径较大(图版照片5、6)。与新鲜灰岩一样,它仅有少数直径段的空隙发育,因此累积进汞体积曲线仍为台阶状。

2. 从Ba₂、Ba₃、Ba₄三个试样的总体趋势看,随着风化程度增强,有效空隙度和平均空隙直径均增加,溶孔发育的分异作用加强。Ba₂号试样不同直径的晶内溶孔和晶间溶孔均较发育(图版照片7),累积进汞体积曲线为直线型。Ba₄号样风化更为强烈,大于 $10\mu\text{m}$ 的空隙在全部

空隙中所占比例高达 86%, 累计进汞体积曲线亦显示反抛物线型。电镜观察可见溶孔多为晶间大溶孔和与之连通的晶间溶隙(图版照片 8)。

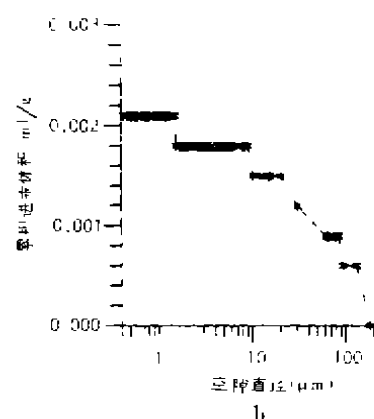
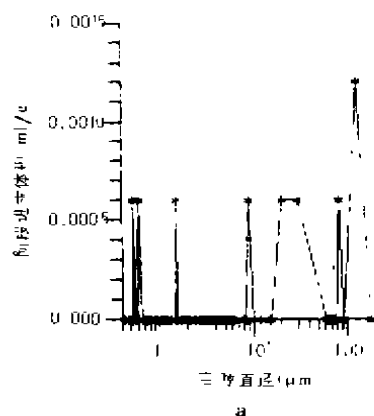


图 6 Ba₁ 号样压汞曲线

Fig. 6 Curves of pressured-mercury testing on Ba₁ rock sample

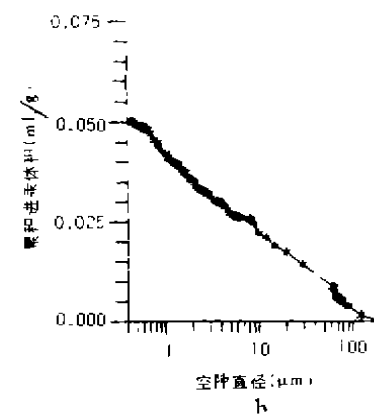
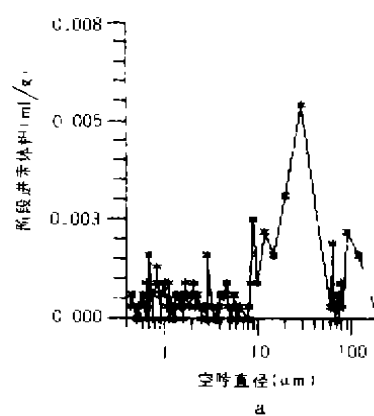


图 7 Ba₂ 号样压汞曲线

Fig. 7 Curves of pressured-mercury testing on Ba₂ rock sample

3. 与灰岩风化剖面一样, 表层半成岩的棕红色钙质壳层, 溶孔强烈发育, 有效空隙度高达 28.90%, 但由于大小空隙混杂, 其平均直径并不大。

4 结 论

综合翟山灰岩风化剖面 and 班井大理岩风化剖面研究结果, 可以得出下列几点结论:

1. 新鲜碳酸盐岩有效空隙度一般小于 1%, 因仅发育少数直径的原生孔隙, 故累积进汞曲线为台阶状。
2. 随着风化、溶蚀作用的加强, 其有效空隙度和平均空隙直径增大, 弱风化和中等风化条件下(此处指有效空隙度为 1~10%者), 由于各种直径的空隙均较发育, 累积进汞体积曲线显示近乎直线型。
3. 强风化岩石(有效空隙度大于 10%者)溶孔发育的分异作用明显, 连通的大溶孔在全部

空隙中占有绝对优势,累积进汞体积曲线呈反抛物线型。

4. 该研究表明,运用压汞实验和扫描电镜观察相结合,既可以得到空隙结构的定量数据,又可以直观地了解不同空隙之间的连通情况,是研究微观空隙发育的有效手段。如结合液压伺服机则可以定量研究空隙结构与渗透性的关系。

参 考 文 献

- 1 杨立中. 压汞实验在低渗透性含水介质研究中的应用. 勘察科学技术, 1990(6)
- 2 韩宝平, 张井, 唐家祥. 煤和岩石的空隙结构研究. 矿业世界, 1994, 1(1)

图版照片说明

照片1 风化灰岩和新鲜灰岩交界面, A区为新鲜灰岩, B区为风化区, 160 \times 。

照片2 Y_2 号试样上粒间孔隙, 210 \times 。

照片3 Y_3 号试样上蜂窝状溶孔, 50.5 \times 。

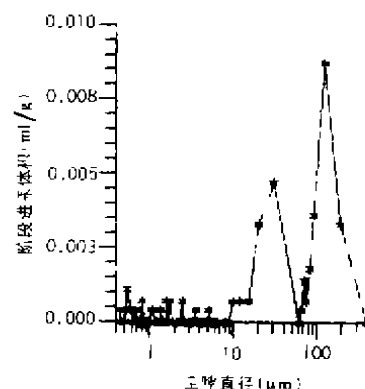
照片4 Y_4 号试样上连通性溶孔孔隙, 80 \times 。

照片5 Ba_1 号样大理岩中重结晶残留空位; 400 \times 。

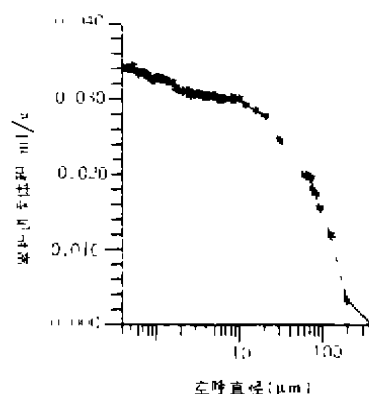
照片6 Ba_1 样大理中晶间孔隙, 1000 \times 。

照片7 Ba_3 号样晶内溶孔和晶间孔隙, 1200 \times 。

照片8 Ba_4 号晶间溶孔和与之连通的溶隙, 1200 \times 。



a



b

图8 Ba_4 号样压汞曲线

Fig. 8 Curves of pressured-mercury testing on Ba_4 rock sample

CHANGE OF VOID STRUCTURE IN THE COURSE OF WEATHERING OF CARBONATE ROCKS

Han Baoping Zhang Jing

(China University of Mining and Technology)

Abstract

This paper studies the change of void structure in the course of weathering of two pro-

files (one limestone and one marble) using pressured-mercury testing and SEM technique. Effective void ratio (EVR), mean void diameter and proportion of larger voids to whole void increase with weathering degree. Differential corrosion is pronounced in the course of corrosive void evolution in weathering process. For intact carbonate rocks, only some original pores of a few diameter intervals are found, EVR is less than 1 percent, the curve relating cumulative intrusive mercury volume (CIMV) to diameter of void (DV) exhibits step-shape. In weathered carbonate rocks corrosive voids of all diameters are developed, EVR is between 1 and 10 percent, the curve of CIMV versus DV represents a straight line. For intensely weathered carbonate rocks, larger through voids dominate, EVR is larger than 10 percent, and the CIMV-DV curve is of opposite-parabola shape.

Key words weathering process; carbonate rock; void structure; pressured-mercury testing; effective void ratio.

河南栾川石庙老母洞发现古脊椎动物及古文化堆积

由地质矿产部朱沐高级工程师率领,中国科学院地质研究所谭明博士后、长期地质学院陈鸿汉博士、中国科学院长春地理研究所博士生王景璐组成的研究小组,于1994年11月9日至11月15日对河南省栾川县石庙乡弓把沟天鼓山下老母洞中的古脊椎动物群及文化堆积从地貌学、第四纪地质学、洞穴学、考古学等几个学科方面进行了初步的综合研究,确定该堆积层基本为原地堆积,按物质组成可分9层,包含5个较大的环境变化阶段;层厚8m,目前发现有人、猴、虎、鹿、豹、猪、山羊、羚羊、兔、鼠、犬种动物、蝙蝠等共7目10种脊椎动物,并发现多层灰塔、陶片(夹砂陶)和骨器。

该堆积层具有稳定的钙质顶、底板,年代测定工作正在进行,预期这些环境记录对揭示中原地区晚更新世的环境变化将做出贡献。

谭 明(中国科学院地质研究所)