

文章编号: 1001-1986(2012)03-0062-04

不同水流速度下温度对奥陶系碳酸盐岩溶蚀速度的影响

邵东梅

(中煤科工集团西安研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了解不同水流速度下温度对碳酸盐岩溶蚀速度的影响, 以自行设计、制造的能够模拟水流条件, 并且可同时容纳 24 个样品的溶蚀试验装置为平台, 以淮南张集矿、潞安漳村矿和兖州东滩矿奥陶系灰岩为代表性岩石试样, 选取不同温度、水流速度及 CO_2 压力, 进行了溶蚀试验。试验结果显示, 在水流速度较低时(16.67 mL/min), 环境温度的变化对溶蚀速度的影响比较微小(平均溶蚀变化量为 0.0006 g/cm^2)。在水流速度较大时(60 mL/min), 温度的改变对溶蚀速度影响较大(平均溶蚀变化量为 0.0038 g/cm^2)。也就是说在地下水的强径流带, 温度对溶蚀速度的影响相对较大, 溶蚀速度较快, 所以岩溶较发育。

关键词: 碳酸盐岩; 溶蚀试验; 溶蚀温度; 溶蚀速度

中图分类号: P641.134 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2012.03.015

Influence of temperature on dissolution rate in Ordovician carbonate rock in different water flow rate

SHAO Dongmei

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to understand the influence of temperature on dissolution rate in Ordovician carbonate rock in different water flow rate, dissolution experiment was conducted at different temperature, different water flow rate and different CO_2 pressure with self-designed and manufactured dissolution device which can simulate water flow conditions and contains 24 samples as platform, samples collected from Zhangji mine in Huainan, Zhangcun mine in Luan and Dongtan mine in Yanzhou were used as representative samples. The experiment results show that when water flow rate is relatively low(16.67 mL/min), the influence of environmental temperature change on dissolution rate is insignificant(the average dissolution volume is 0.0006 g/cm^2), when the water flow rate is high (60 mL/min), the influence of temperature change on dissolution rate is significant (the average dissolution volume is 0.0038 g/cm^2). That is to say, in strong run-off zone of ground water, the influence of temperature on dissolution rate is bigger and the dissolution rate is higher, so karst is developed.

Key words: carbonate rock; dissolution experiment; dissolution temperature; dissolution rate

我国煤矿床水文地质条件复杂, 主要煤产地的华北石炭-二叠纪煤田和南方晚二叠世煤田, 属于岩溶水文地质类型煤田, 岩溶水往往对煤矿安全生产构成巨大威胁^[1]。

岩溶研究主要分为溶蚀机理理论与岩溶探测方法研究两个方面。溶蚀的试验研究属于理论研究的一项重要内容。黄尚瑜等^[2]对碳酸盐溶蚀过程中的温度效应进行了研究; 王洪涛等^[3]开展了碳酸盐岩溶蚀动力学模拟试验研究; 祝凤君^[4]对碳酸盐岩中裂隙的溶蚀反应动力学机理开展了试验研究和理论数值模拟分析。刘再华等对岩溶发育的水文地球化学环境及溶蚀的动力学机制进行了深入研究^[5-6], 并且对岩溶水溶液的化学平衡及其碳酸盐岩的溶解和

沉积的动力学过程机理模型开展了一系列的试验研究与理论分析^[7-11]。但前面一系列研究都未将温度与水流速度进行综合模拟。本文主要对碳酸盐岩的溶蚀温度、水流速度和溶蚀速度的关系进行试验研究, 目的在于了解碳酸盐岩溶蚀速度在两者的共同作用下的性质。本次试验只选取了两个水流速度和两组温度, 今后可在此基础上对更多的水流速度和温度进行模拟试验, 以接近煤矿地下水实际情况, 为矿区碳酸盐岩的岩溶作用做出地质评价。

1 溶蚀试验

1.1 试验原理

溶蚀试验是将碳酸盐岩破碎到一定粒径或是切

收稿日期: 2011-06-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202205)

作者简介: 邵东梅(1979—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士, 从事矿井水文地质工作。

成一定体积的长方块体，之后通入含有高浓度 CO_2 的蒸馏水，不断缓慢地流过试样，使其互相作用，并测定溶蚀作用过程中溶蚀液的成分。在与试样持续地溶蚀作用经过一段时间后，求出试样的总溶解量或测定试样重量的变化，将其与试样的体积或面积相比，得出各试样的单位体积溶解度或单位面积溶解度。

1.2 试验样品

本文试验样品采自于淮南张集矿、潞安漳村矿和兖州东滩矿的奥陶系灰岩(表 1)。

表 1 试样编号及取样深度对照表
Table 1 Comparison of sample No. and sampling depth

试样编号	所属矿区	岩石名称	取样深度/m
1	淮南张集矿	石灰岩	686.6
2	淮南张集矿	石灰岩	697.4
3	淮南张集矿	云质石灰岩	703.7
4	淮南张集矿	砂质白云质灰岩	726.8
5	淮南张集矿	砂质白云岩	728.7
6	淮南张集矿	含砂白云质灰岩	738.0
7	淮南张集矿	砂质灰岩	742.0
8	淮南张集矿	白云岩	751.6
9	潞安漳村矿	石灰岩	500.6
10	潞安漳村矿	石灰岩	503.0
11	潞安漳村矿	石灰岩	504.6
12	潞安漳村矿	石灰岩	526.6
13	潞安漳村矿	石灰岩	554.0
14	潞安漳村矿	石灰岩	558.7
15	潞安漳村矿	石灰岩	564.0
16	兖州东滩矿	石灰岩	235.31
17	兖州东滩矿	石灰岩	245.10
18	兖州东滩矿	石灰岩	248.63
19	兖州东滩矿	石灰岩	259.79
20	兖州东滩矿	石灰岩	273.39
21	兖州东滩矿	石灰岩	290.88
22	兖州东滩矿	石灰岩	300.88
23	兖州东滩矿	石灰岩	310.20
24	兖州东滩矿	石灰岩	319.54

1.3 试验设备

主要试验装置设计如图 1。

a. 碳酸水制备装置

包括水源、压缩 CO_2 钢瓶、水气混合装置等 3 部分。

试验仪器各部分连接如下：蒸馏水置于下口瓶(5)中，压缩 CO_2 钢瓶(1)通过气体减压器及气体流量计(2)控制 CO_2 气体流量。水气混合装置由砂心过滤板(3)及水气混合管(4)组成。过滤板的作用是使从钢

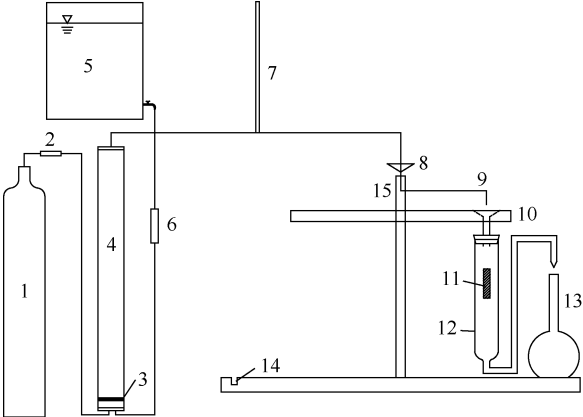


图 1 溶蚀试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of dissolution experiment device
1—压缩 CO_2 钢瓶；2—气体减压器及气体流量计；3—砂心过滤板；4—水气混合管；5—下口瓶；6—液体流量计；7—玻璃管；8—塑胶软管；9—异形玻璃漏斗；10—溶液分配盘；11—试样；12—溶蚀管；13—容量瓶；14—底盘环形水槽；15—微电机

瓶输入的 CO_2 气体得以充分的分散成密集的气泡与蒸馏水混合，在水气混合管内运动促进大量 CO_2 的溶解。被制成的碳酸水由液体流量计(6)调节流量流至溶液分配盘。为防止未被溶解的 CO_2 气泡堵塞管道而影响碳酸水的流速，可在水气混合管与塑胶管之间安装一支供 CO_2 气泡逸出的玻璃管(7)。上述 4 个部分之间均由乳胶管连接。

b. 溶蚀试验盘

由溶液分配盘(10)、带有环形水槽的底盘及转动轴组成，转动轴由微电机(15)带动，借以使固定于转动轴中心的玻璃漏斗(9)及塑胶软管(8)所流出的碳酸水能供给各溶蚀管。环形溶液分配装置装有 24 支溶蚀管(12)，试样(11)即悬置于溶蚀管中，溶蚀管上部与设于分配盘上的 24 个大小相等的漏斗状分配槽相连，保证碳酸水能均匀地分配给各溶蚀管，溶蚀管的末端通过虹吸管使溶蚀液流出，用容量瓶(13)接收溶蚀液，以便取样，进行化学分析。在溶蚀过程中若有物理破坏部分的残渣，将沉积于溶蚀管底部。当不取累积溶蚀液样品进行分析时，可直接滴入底盘环形水槽(14)排泄出去。

1.4 试验步骤

a. 将碳酸盐岩(每组 24 个样)切成 $5\text{ m} \times 10\text{ m} \times 40\text{ m}$ 的长方块体，用微分卡尺测量后，用蒸馏水冲洗、烘干、称重得 W_1 。再用棉线将试样悬置于溶蚀管中部，将溶蚀管固定并与分配槽连通。

b. 连通水源并打开 CO_2 钢瓶阀门，调节 CO_2 的流量，使水、气混合制备碳酸水。

c. 接通电源以启动转动轴，开始调节液体流量计控制水的流速并进行溶蚀。

d. 实验过程中注意记录溶蚀试验细节，如温

度、碳酸水 pH 值及各溶蚀管的异常状况，如连接的乳胶管掉落导致溶蚀液外流等。

e. 溶蚀试验结束后，冲洗试样、烘干、称重得 W_2 ，并记录试样溶蚀后的特征。

f. 试样溶蚀前后的重量差($W_1 - W_2$)即为其溶蚀量，为消除试样体积差异的影响，可以求出单位体积或单位面积的溶蚀量。

1.5 试验条件

试验条件见表 2。

表 2 4 批试样溶蚀条件
Table 2 The dissolution conditions for four sets of test sample

试样批号	溶蚀时间 /d	温度 /℃	流量 /(mL·min ⁻¹)	CO ₂ 压力 /MPa
2	6	24	16.67	0.06
3	6	15	16.67	0.06
4	6	15	60	0.06
5	6	24	60	0.06

2 试验结果数据分析

试验所得单位面积溶蚀量数据见表 3。

在溶蚀液流速相同的情况下，对不同温度条件

下进行的两组试验数据进行对比。相同流速不同温度条件下试样的单位溶蚀量对比如图 2、图 3 所示。

由图 2 可以看出，流量 16.67 mL/min 时，温度 15℃ 时与 24℃ 时的单位面积溶蚀量无明显差别(24 个样平均溶蚀变化量为 0.000 6 g/cm²)，但总体上还是 24℃ 时溶蚀量稍大。24℃ 时数据大于 15℃ 时数据的个数为 17 个(共 24 个)，且各试样溶蚀量之和亦为 24℃ 大于 15℃。分析原因，应该是此流量下供气量相对于蒸馏水流速来说较为充足，碳酸水处于过饱和状态，但是由于流速较小，因此试块表面的微粒进出表面边界层的速率成为控制试块溶解总体反应速率的因素，即溶蚀速度为质量传输所控制，因此两种条件下的试块溶蚀速度比较接近。

由此可以推断，在地下水流速缓慢的情况下，水温对溶蚀速度的影响是很微小的。

由图 3 可以看出，当流量为 60 mL/min 时，温度的改变对溶蚀速度影响较大(24 个样平均溶蚀变化量为 0.0038 g/cm²)。这是由于 CO₂ 在不同温度下的溶解度有区别，造成溶蚀液的 pH 值不同，由此产生的温度对单位面积溶蚀量的影响是比较明显的。

表 3 试样单位面积溶蚀量数据
Table 3 The unit area dissolution data of test sample

批号-编号	单位面积溶蚀量 /(g·cm ⁻²)	批号-编号	单位面积溶蚀量 /(g·cm ⁻²)	批号-编号	单位面积溶蚀量 /(g·cm ⁻²)	批号-编号	单位面积溶蚀量 /(g·cm ⁻²)
2-1	0.011 7	3-1	0.010 4	4-1	0.015 1	5-1	0.019 1
2-2	0.010 3	3-2	0.012 5	4-2	0.015 7	5-2	0.020 5
2-3	0.011 7	3-3	0.009 6	4-3	0.011 2	5-3	0.014 5
2-4	0.009 4	3-4	0.005 7	4-4	0.008 9	5-4	0.012 0
2-5	0.007 1	3-5	0.004 0	4-5	0.006 1	5-5	0.009 5
2-6	0.005 4	3-6	0.002 8	4-6	0.004 9	5-6	0.008 3
2-7	0.000 9	3-7	0.000 9	4-7	0.002 8	5-7	0.003 8
2-8	0.002 5	3-8	0.002 6	4-8	0.003 7	5-8	0.005 6
2-9	0.011 5	3-9	0.011 5	4-9	0.013 5	5-9	0.020 9
2-10	0.011 2	3-10	0.012 1	4-10	0.014 4	5-10	0.019 3
2-11	0.011 7	3-11	0.011 4	4-11	0.016 1	5-11	0.021 1
2-12	0.015 0	3-12	0.012 4	4-12	0.016 2	5-12	0.019 5
2-13	0.009 1	3-13	0.010 7	4-13	0.015 2	5-13	0.018 5
2-14	0.011 4	3-14	0.011 2	4-14	0.016 9	5-14	0.016 1
2-15	0.011 2	3-15	0.009 9	4-15	0.014 8	5-15	0.019 5
2-16	0.014 2	3-16	0.008 0	4-16	0.016 1	5-16	0.021 5
2-17	0.011 2	3-17	0.014 3	4-17	0.018 9	5-17	0.022 5
2-18	0.014 3	3-18	0.011 6	4-18	0.017 1	5-18	0.022 0
2-19	0.010 4	3-19	0.011 6	4-19	0.014 4	5-19	0.020 4
2-20	0.013 4	3-20	0.012 9	4-20	0.016 7	5-20	0.020 7
2-21	0.013 4	3-21	0.012 8	4-21	0.016 8	5-21	0.019 8
2-22	0.008 0	3-22	0.012 4	4-22	0.017 5	5-22	0.020 9
2-23	0.012 1	3-23	0.011 9	4-23	0.017 2	5-23	0.020 5
2-24	0.012 6	3-24	0.012 7	4-24	0.016 4	5-24	0.021 1

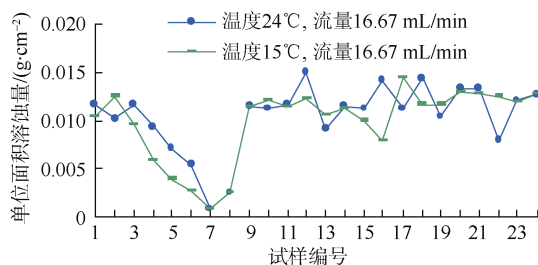


图 2 水流速度 16.67 mL/min 时单位面积溶蚀量对比

Fig. 2 The unit area dissolution volume contrast in low flow rate

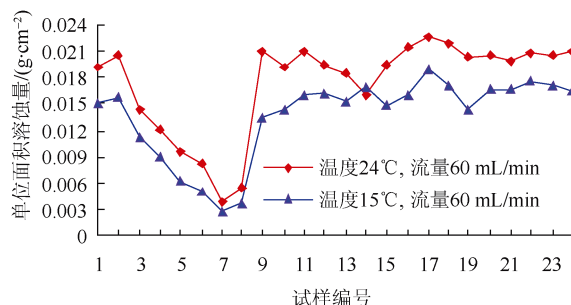


图 3 水流速度 60 mL/min 时单位面积溶蚀量对比

Fig. 3 The unit area dissolution volume contrast by in high flow rate

3 结 论

由试验可知，水流速度较低时(16.67 mL/min)，环境温度的变化对溶蚀速度的影响比较微小(24 个样平均溶蚀变化量为 0.0006 g/cm^2)；水流速较大时(60 mL/min)，温度的改变对溶蚀速度影响较大(平均溶蚀变化量为 0.0038 g/cm^2)。也就是说，在地下水的强径流带，温度对溶蚀速度的影响相对较大，溶蚀速度较高，所以岩溶较发育。对于不同地下水流

速下，环境温度变化对溶蚀速度的影响，有待今后进行更加细致的试验予以确定，并对其规律进行研究。

参考文献

- [1] 煤炭科学研究总院西安分院，峰峰矿务局，鹤壁矿务局，等. 华北型煤矿奥灰水防治研究[M]. 西安：陕西人民出版社，1990.
- [2] 黄尚瑜，宋崇荣. 碳酸盐岩的溶蚀与环境温度[J]. 中国岩溶，1987，6(4)：287-296.
- [3] 王洪涛，曹以临. 碳酸盐岩溶蚀动力学模拟实验[J]. 中国岩溶，1988，7(1)：63-72.
- [4] 祝凤君. 碳酸盐岩断层岩的溶蚀作用及其在岩溶研究中的应用[J]. 中国岩溶，1989，8(2)：163-176.
- [5] 刘再华. 桂林岩溶水文地质试验场岩溶水文地球化学研究[J]. 中国岩溶，1992，11(3)：209-219.
- [6] 袁道先，刘再华，林玉石，等. 中国岩溶动力系统[M]. 北京：地质出版社，2002.
- [7] 刘再华，DREYBRODT W. 流动 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系统中方解石溶蚀动力学机制-扩散边界层效应和 CO_2 转换控制[J]. 地质学报，1998，72(4)：340-348.
- [8] 刘再华，DREYBRODT W. 不同 CO_2 分压条件下的白云岩溶蚀动力学机理[J]. 中国科学(B 辑)，2001，31(4)：377-384.
- [9] 刘再华，DREYBRODT W. 方解石沉积速率控制的物理化学机制及其古环境重建意义[J]. 中国岩溶，2002，21(4)：252-257.
- [10] 刘再华，GROVES C，袁道先，等. 水-岩-气相互作用引起的水化学动态变化研究—以桂林岩溶试验为例[J]. 水文地质工程地质，2003，30(4)：13-18.
- [11] 刘再华，DREYBRODT W，韩军，等. $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 岩溶系统的平衡化学及其分析[J]. 中国岩溶，2005，24(1)：1-14.

(上接第 61 页)

3 结 语

本文通过研究概率积分模型的原理和实现方法，基于 Irgis3.0 平台，结合计算机图形学、数据库技术设计并实现了开采沉陷预计系统。系统具有对单点、多(单)工作面进行预计的功能，针对淮南矿区复杂的情况，进行了实例测试，具有很好的效果和应用前景。

参考文献

- [1] 邹友峰，邓喀中，马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2003：181-196.

- [2] 黄乐亭. 开采沉陷力学的研究与发展[J]. 煤炭科学技术，2003，31(2)：54-56.
- [3] 刘宝琛，廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 中国工业出版社，1965.
- [4] 吴侃，葛家新. 开采沉陷预计一体化方法[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1998.
- [5] 朱刘娟. 基于 GIS 的开采沉陷预计分析系统[D]. 焦作：河南理工大学，2003.
- [6] 朱刘娟，陈俊杰，邹友峰. 任意形状工作面开采地表移动变形预计的算法实现[J]. 辽宁工程技术大学学报，2005，24(3)：337-339.
- [7] 路璐，刘胜富. 地表沉陷的概率积分法预计参数的回归分析[J]. 矿业快报，2008(12)：43-47.
- [8] 戴仔强，郭广礼，王卷乐. 极小工作面预计参数问题的探讨[J]. 江苏煤炭，2001(3)：15-18.