

文章编号: 1000-582X(2012)09-126-05

岩盐溶解速率影响因素的实验

姜德义¹, 王春荣², 任松¹, 陈结¹, 张艺¹

(1. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 北京达飞安评管理顾问有限公司, 北京 100101)

摘要: 围绕岩盐溶解速率影响因素这一关键问题开展了系列实验, 研究了溶解面积、溶解面倾角、溶液浓度、溶液温度、水流速对岩盐溶解速率的影响规律。规律如下: 随着溶解面面积增大溶解速率逐渐趋于一个稳定值; 温度、倾角、流速与溶解速率成指数关系; 随着溶液浓度的增大岩盐溶解速率逐渐减小。并应用灰色关联度分析方法, 分析了溶解面倾角、溶液浓度、溶液温度及水流速主要影响因素的主次顺序, 得出溶液温度 > 溶解面倾角 > 溶解流速 > 溶液浓度。研究结果对岩盐油气储库的安全、快捷建腔提供基础理论和实验基础。

关键词: 岩盐; 溶解速率; 室内实验; 灰色关联分析

中图分类号: TU 452

文献标志码: A

Experiments of the influencing factors on dissolution rate of rock salt

JIANG Deyi¹, WANG Chunrong², REN Song¹, CHEN Jie¹, ZHANG Yi¹

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400044, China;

2. Beijing Defei Safety Evaluation Management Consulting Co. Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: The influence of different factors on dissolution rate of rock salt is studied by a series of experiments, such as dissolution obliquity, solution concentrations, solution temperatures and solution flows. The laws of rock salt dissolution shown in the experiments are as follows: it isn't obvious that the effect of the dissolution rate on different dissolution area. Temperature, velocity of flow and dissolution obliquity is in an exponential relationship with rock salt dissolution. Dissolution rate decreases with the increase of solution concentration of rock salt. Gray correlation analysis is adopted to study the dissolution obliquity, solution concentration, temperature and solution flow rate. It is found that solution temperature is the main factor, followed by dissolution obliquity, solution flow rate, and solution concentration. The findings can provide theoretical foundation and experimental basis for rapidly create cavity.

Key words: salt rock; dissolving rate; laboratory experiment; grey correlation analysis

国外早在六、七十年代就开始对岩盐溶解特性进行研究^[1-2], 对美国西部地区盐岩矿层的盐岩进行

了相关溶解试验, 获得了一些基本因素对岩盐溶蚀速度的影响特征。但是国内岩盐层数多, 单层厚度

收稿日期: 2012-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50674108); 国家创新研究群体基金资助项目(50621430); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724606)

作者简介: 姜德义(1962-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 研究方向主要为岩土工程稳定性、安全技术与工程。

王春荣(联系人), 女, 北京达飞安评管理顾问有限公司, 主要从事矿山安全评价方面的研究, (E-mail) aqgc2006@163.com。

薄,含岩盐地层中的不可溶性夹层众多,国外的研究结论不能直接用来指导中国的工程实践。国内学者近几十年针对中国地下盐矿水溶开采过程中盐岩的溶解特性进行了部分研究,重庆大学的肖长富等^[3-4],刘成伦等^[5]及四川大学的杨骏六等^[6]研究了氯化钠含量较低(50%和75%)的岩盐在常温条件下溶解特性;原理工大学的梁卫国等^[7-10]研究了钙芒硝在常温条件下溶解速率的变化规律,对盐矿开采提供了有益的指导。武汉岩土所的汤艳春等^[11]进行了岩盐单轴应力条件下溶解试验,并得出了应力对盐岩溶解速率的影响特征。虽然国内学者在盐岩的溶解研究方面取得了部分成果,但并没有就针对当前盐岩能源储库造腔方面盐岩的溶解特性进行完整系统的研究,另外,深地层盐岩溶解过程中地温、水流速度等关键因素对盐岩溶解速率的影响还未涉及,需要进一步开展研究。笔者通过室内实验对岩盐试件进行一些基础的溶解实验,对影响岩盐溶解特性的几个最主要因素——溶解面倾角、溶液浓度、温度及水流速对岩盐溶解速率的影响进行了实验研究。并建立不同溶解面倾角、不同溶液中盐的质量分数、不同温度下、不同流速岩盐溶解速率相关关系方程,其研究成果将有助于盐岩能源储库建造工程。

1 实验研究

1.1 实验试件及方法

实验试件采用巴基斯坦喜马拉雅山区天然岩盐,埋深2 000~3 000 m。盐岩试样为米黄色,其组成成分和质量分数见表1,其中可溶物含量达99.8%,密度为2 338 kg/m³。岩盐试样的标准尺寸为50 mm×50 mm×50 mm,所加工出来的岩盐试样如图1所示。由于岩盐质脆、遇水易溶,因此,岩盐试样是通过手工切割、磨制加工而成。取样过程和试件加工均严格按照实验规范进行。实验时,对方块试样的5个表面进行密封处理,以使溶解仅在一个面上发生,在5 L大烧杯中进行,采用蒸馏水作为溶剂。实验是在溶解面朝上条件下进行的,分别测出溶液中初始及终了时试件的质量。描述岩盐溶解特性的重要参量是岩盐溶解速率,即矿石释放目标矿物的速率。以单位面积单位时间上释放出的盐量来表示溶解速率,见式(1)。

$$v = \frac{dm}{dS \cdot dt} = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot t}, \quad (1)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为实验前后岩盐试件的质量, S 为溶解面面积, t 为实验时间,溶解速率的单位为g/(cm²·h)。

表1 岩盐试样的成分 %

可溶物		不溶物
NaCl	K ₂ SO ₃	少量泥质
99.4	0.4	0.2

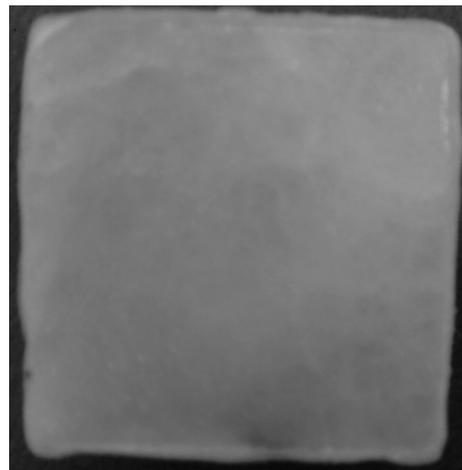


图1 实验用的岩盐试样照片

1.2 溶解面积对溶解速率的影响

由于盐类矿物溶解主要在岩盐与水溶液的接触表面进行,在相同的一定量溶剂的情况下,溶解面积不同,盐矿物的溶解特性会有所不同。本次实验分别进行了溶解面积25、16、9 cm² 3种不同情况下的岩盐溶解特性实验。从图2中看出,随着溶解面积逐渐增加,溶解速率逐渐趋于稳定,溶解面积为9、16、25 cm²的3个试件溶解速率基本一致,说明面积对溶解速率不影响或者影响较小的参数,毕竟溶解速率是单位面积单位时间岩盐试件溶解的质量。岩盐溶解速率随溶解面积的增加趋于一个稳定值。但是溶解面积越大,矿物溶解越多,越利于造腔。

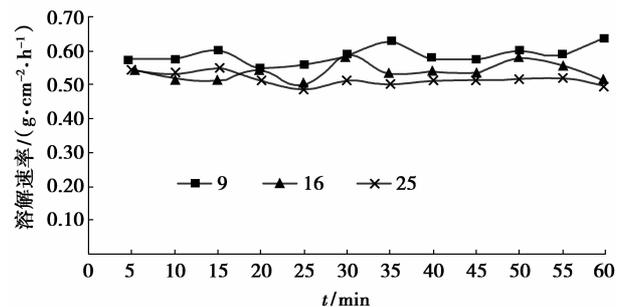


图2 不同溶解面积下岩盐速率变化曲线

1.3 溶解面倾角对溶解速率的影响

按溶解面与水平面夹角情况进行区分倾角对溶解的影响,盐面与水平面平行且水在溶解面上方为 0° 计,以此试件溶解面按顺时针方向旋转,与水平面夹角成 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 及 180° 。将试件加工成呈上述角度的试样进行溶解实验。岩盐溶解速率随着溶解面的倾角增大而增大如图3所示。岩盐矿石的溶解过程是矿石中的氯化钠与溶液水的接触并在其诱导下离开矿石界面的过程。要实现这一过程,溶液的氯化钠分子必须克服岩盐对氯化钠分子的引力与岩盐界面垂直且指向岩盐体内部的重力分力,这种分力与矿石界面倾角有关。因溶解盐面空间位置的不同,粒子受到垂直向下的重力和不同方向(相对溶解盐面)水体水分子和岩盐吸引力的作用是不相同的,即粒子受到的合力大小、方向对应于溶解盐面空间位置的不同而不同。使转入水中的粒子离开晶体表面及其附近区域的速度-岩盐矿石溶解速率-也是不相同的。采用1stOpt进行曲线拟合,采用麦夸特法(Levenberg-Marquardt)+通用全局优化法,对溶解速率和温度的关系进行拟合,拟合方程为 $y=0.7508e^{0.0099x}$,相关系数 $R^2=0.9669$ 。这就揭示出了岩盐矿石一般正常的溶解规律是上溶>侧溶>底溶。因此,研究溶解速率的这种倾角效应对预测和控制溶腔形态的发展也是极其有用的。

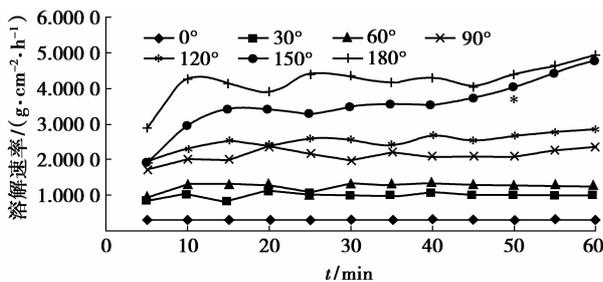


图3 不同溶解面倾角下岩盐速率变化曲线

1.4 溶液浓度对溶解速率的影响

实验研究岩盐试件在一定氯化钠水溶液中的溶解情况,在不同的浓度下岩盐溶解质量变化,及对溶解速率的影响。溶液质量分数分别是0%、5%、10%、20%,饱和实验(在1L烧杯中加水600mL,把烧杯放到铁架台上酒精灯加热至水沸腾,加入氯化钠直到不再溶解为止,充分搅拌,以此制成饱和溶液)。由图4可知溶解速率随着浓度的增加逐渐降低,在饱和溶液中岩盐试件不再溶解。从化学动力学观点看,溶液浓度与饱和溶液浓度之差是岩盐发生溶解反应的化学势之一。两者差值越大其溶解速率就越

大,当溶液浓度为0,差值最大,岩盐溶解速率达到最大值;当溶液浓度等于溶液饱和浓度,差值为零,岩盐溶解速率为零。对溶解速率和溶液质量分数的关系采用1stOpt进行曲线拟合,拟合方程为 $y=-0.0002x^2-0.0027x+0.3022$,相关系数 $R^2=0.9863$ 。在岩盐开采过程中,要想达到高的出卤量与出卤浓度,就是要协调好溶解速率与溶液浓度的关系。

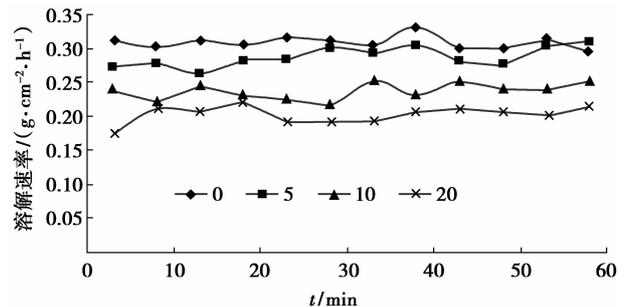


图4 不同溶液浓度下岩盐速率变化曲线

1.5 温度对溶解速率影响

温度实验是研究温度对岩盐溶解的影响,试件的5个面先用环氧树脂和乙二胺密封,放在干燥箱干燥48h,然后用硅胶密封,剩余一个面溶解。本次实验分别进行了溶液温度是20、40、45、50、55、60 $^\circ\text{C}$ 。实验是在恒温水浴中完成,温度上下波动为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。由图5可知岩盐溶解速率随温度的升高,逐渐增大。溶解速率的这种温度效应的内在机理可从热力学的观点得到很好的解释。随着溶液温度的升高,溶剂分子与岩盐中分子的活性增强,发生相互碰撞的机率增大,使溶解速率增大。采用1stOpt进行曲线拟合,对溶解速率和温度的关系进行拟合,拟合方程为 $y=0.114e^{0.043x}$,相关系数 $R^2=0.9820$ 。

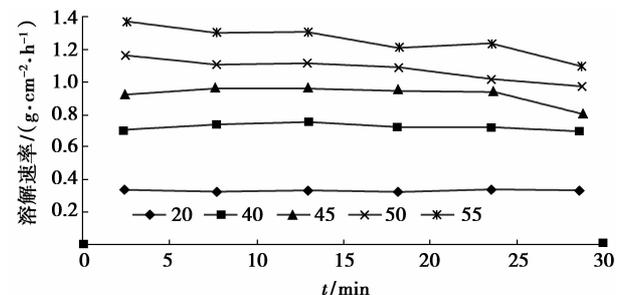


图5 不同溶液温度下岩盐速率变化曲线

1.6 水流速对溶解速率的影响

实验是研究岩盐试件在一定水溶液流动状态下

模拟动态溶解下的溶解情况,在不同的流量下岩盐溶解质量变化、对溶解速率的影响。实验设备是由有机玻璃用硅胶粘滞而成。实验时由6~60 L/h流量计分别测定了流量为10、15、20、25、30 L/h时的岩盐溶解特性。图6曲线表明,岩盐溶解速率与溶液内溶液流速存在如下关系:即在一定的流速范围内,岩盐的溶解速率随流速的增大而增大。岩盐在造腔过程中腔体内是浓度场和流场的叠加,溶液的运动加速了盐溶液及溶液中盐粒子的对流与扩散,由此可在一定程度上加快矿物的溶解速率,不同流速下矿物的溶解速率会有所不同。对溶解速率与溶液的流速采用1 stOpt进行曲线拟合,拟合结果为 $y=0.5832e^{0.0086x}$,相关系数 $R^2=0.9873$ 。据此,在生产实践中,要适当控制注入水的速度,使岩盐矿物的溶解效果最好。

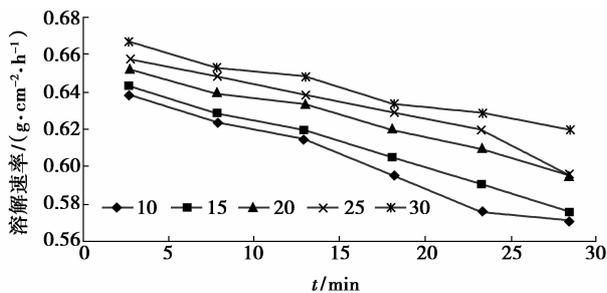


图6 不同流量下岩盐速率变化曲线

2 岩盐溶解速率灰色关联度分析

灰色关联分析法是对各影响因素作用程度进行量化比较的有效工具,因此运用灰色关联分析法来分析影响因素的重要度。运用VB6.0编制一个用于灰色关联度计算的程序。其思路为:首先将作比较的母因素确定为参考序列,与参考序列作关联程度比较的子因素作为比较序列,然后计算它们之间的灰色关联度,其值越大,子因素与母因素的关系越密切^[12](或影响越大)。对表2中的灰色绝对关联度进行分析,可以得出以下结论:通过溶解面倾角、溶液浓度、温度和水流速4因素(因为溶解面积对溶解速率影响较小,所以不予考虑)对岩盐溶解速率影响的灰色关联分析可以发现,尽管它们的影响是相互制约的,但仍显示出影响程度的不同,即溶液温度>溶解面倾角>溶解流速>溶液浓度。通过表3,可知这4个灰关联度都大于0.85,属于高范围,因此这4个因素对溶解速率影响都比较大。这种对比

分析对水溶法采矿的最优化作业控制有着极其重要的意义。

除上述主要影响因素外,岩盐矿床的结构构造、矿石胶结特征、渗透性、压力等也会对溶解产生影响,但对于具体的开采矿山或实验系统而言,前3个因素以及矿石品位均可视作常量。

表2 灰色绝对关联度统计表

	溶解面 倾角/(°)	溶液 浓度/%	溶液 温度/°C	溶液流速/ (cm·min ⁻¹)
关联度	0.956	0.855	0.979	0.955

表3 关联度评价标准表^[13]

关联程度	评价值范围
高	$0.85 \leq D < 1$
较高	$0.65 \leq D < 0.85$
一般	$0.50 \leq D < 0.65$
较低	$0.30 \leq D < 0.50$
低	$0 \leq D < 0.30$

3 结论

通过对岩盐溶解速率的影响因素进行实验研究,得到如下结论:

1)溶解面的面积对溶解速率的影响不明显,随着面积的增大岩盐溶解速率逐渐趋于一个稳定值,但是溶解面积越大,矿物溶解越多,越利于造腔。

2)岩盐溶解速率随着溶解面的倾角增大而增大,呈指数关系。

3)随着溶液浓度的增大岩盐溶解速率逐渐减小,而在饱和氯化钠溶液下岩盐基本不再溶解,其溶液浓度与溶解速率是二次曲线关系。

4)溶液温度对溶解速率影响很大,随着温度的升高,岩盐溶解速率逐渐增大,呈指数关系。

5)在一定的流速范围内,岩盐的溶解速率随流速的增大而增大,其变化呈指数关系。

6)对溶解面倾角、溶液浓度、温度和溶液流速4个因素对岩盐溶解速率影响的灰色关联分析可以发现,溶液温度>溶解面倾角>溶解流速>溶液浓度。四个参数的灰色关联度都大于0.85,对溶解速率影响都比较大。

参考文献:

- [1] Durie R W, Jessen F W. Mechanism of dissolution of salt in the formation of underground salt cavities[J]. SPE Journal, 1964, 4(2): 183-190.
- [2] Durie R W, Jessen F W. The influence of surface features in the salt dissolution process [J]. SPE Journal, 1964, 4(3): 275-281.
- [3] 肖长富, 阳友奎, 吴刚, 等. 岩盐溶解特性及其传质过程的研究[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1993, 16(2): 51-57.
XIAO Changfu, YANG Youkui, WU Gang. The dissolution characteristics of rock salt and mass transmission process [J]. Journal of Chongqing University, 1993, 16(2): 51-57.
- [4] 吴刚, 肖长富, 邱贤德. 岩盐溶解速率的研究[J]. 化工矿山技术, 1992, 21(1): 19-24.
WU Gang, XIAO Changfu, QIU Xiande. Study on the dissolution rate of rock salt [J]. Chemical Mine Technology, 1992, 21(1): 19-24.
- [5] 刘成伦, 徐龙君, 鲜学福. 长山岩盐动溶的动力学特征[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(4): 58-71.
LIU Chenglun, XU Longjun, XIAN Xuefu. Kinetics characteristics of dissolving of rock salt of changshan in dynamic state [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(4): 58-71.
- [6] 杨骏六, 杨进春, 邹玉书. 岩盐水溶特性的试验研究[J]. 四川联合大学学报: 工程科学版, 1997, 1(2): 74-80.
YANG Junliu, YANG Jinchun, ZHOU Yushu. The study on experiments of solution mining properties of salt [J]. Journal of Sichuan Union University: Engineering Science Edition, 1997, 1(2): 74-80.
- [7] 梁卫国, 李志萍, 赵阳升. 盐矿水溶开采室内试验的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(1): 54-57.
LI ANG Weiguo, LI Zhiping, ZHAO Yangsheng. Experimental study on solution mining of salt deposit [J]. Journal of Liaoning University, 2003, 22(1): 54-57.
- [8] 李志萍, 赵阳升. 芒硝溶解特性的实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(3): 329-312.
LI Zhiping, ZHAO Yang-sheng. The experimental research of the dissolution characteristics of rock salt [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(3): 329-312.
- [9] 徐素国, 梁卫国, 赵阳升. 钙芒硝岩盐溶解特性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(6): 253-255.
Xu Suguo, LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng. Experimental study on dissolution characteristics of glauberite of rock salt [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(6): 253-255.
- [10] 徐素国, 梁卫国, 赵阳升. 钙芒硝岩盐水溶特性试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(1): 5-7.
XU Suguo, LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng. Experimental study on dissolution characteristic of glauberite rock salt [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(1): 5-7.
- [11] 汤艳春. 考虑岩盐应力与溶解耦合效应的盐腔溶腔机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.
- [12] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 6-7.
- [13] 黄茂生. 基于企业产业选择的产业关联度分析与评价研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006.

(编辑 郑洁)