

# 岩石矿物成分对酸岩反应速率影响规律分析

陈旭

吉林省第四地质调查所

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2321

**[摘要]** 为探究岩石矿物成分对酸岩反应速率的影响规律,本文以灰岩和白云岩为研究对象,经酸岩反应实验,分析不同岩石样品矿物组成及与酸液反应的速率差异。实验采用X射线衍射仪分析岩石矿物成分,利用反应釜模拟地质样品分析常见反应环境,测定不同时间节点的酸液浓度变化以计算反应速率,为地质样品分析中酸岩反应研究及应用提供理论依据。

**[关键词]** 岩石矿物成分; 酸岩反应速率; 灰岩; 白云岩; 方解石; 白云石

**中图分类号:** P619.23+4 **文献标识码:** A

## Analysis of the Influence of Rock Mineral Composition on the Reaction Rate of Acid Rocks

Xu Chen

Fourth Geological Survey of Jilin Province

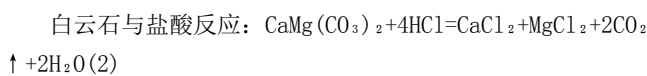
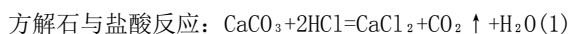
**[Abstract]** To explore the influence of rock mineral composition on the reaction rate of acid rocks, this paper takes limestone and dolomite as research objects. Through acid-rock reaction experiments, the study analyzes the mineral composition of different rock samples and their rate differences in reaction with acid solutions. The experiment uses X-ray diffraction to analyze rock mineral composition and simulates common reaction environments of geological samples using a reaction kettle, measuring the changes in acid solution concentration at different time points to calculate the reaction rate, providing a theoretical basis for related research and applications of acid-rock reactions in geological sample analysis.

**[Key words]** rock mineral composition; acid-rock reaction rate; limestone; dolomite; calcite; dolomite

酸化压裂是提升储层渗透性的关键技术,其核心是通过酸液溶蚀岩石矿物形成、扩大渗流通道以增产。酸岩反应速率直接决定酸化效果:过快易形成短路通道,无法深部改造;过慢则溶蚀不充分。碳酸盐岩(灰岩、白云岩)中,方解石、白云石的酸反应特性差异显著,且同类岩石矿物含量变化也会影响反应速率<sup>[1]</sup>。研究矿物成分对酸岩反应速率的影响规律,对优化酸液配方至关重要。本文通过室内实验结合矿物成分分析,探究灰岩、白云岩矿物含量与酸岩反应速率的关联,为酸化工艺设计提供数据支撑。

### 1 酸岩反应原理

酸岩反应本质上是酸液中的 $H^+$ 与岩石中碳酸盐矿物的化学反应过程,主要涉及方解石和白云石与盐酸(酸化常用酸液)的反应,反应方程式如下:



从反应方程式可以看出,1mol方解石需消耗2mol $H^+$ ,而1mol白云石需消耗4mol $H^+$ ,这意味着在相同酸液浓度下,白云石与酸的反应需要更多的 $H^+$ 参与,反应过程相对更复杂<sup>[2]</sup>。同时,反应

产物的溶解性也会影响反应速率:方解石反应产物 $CaCl_2$ 易溶于水,不会在岩石表面形成沉淀;白云石反应产物除 $CaCl_2$ 外,还生成 $MgCl_2$ ,虽同样易溶,但反应过程中离子扩散速率较方解石反应体系更慢,导致整体反应速率较低。

酸岩反应速率受多种因素影响,如岩石矿物成分、酸液浓度、反应温度、压力、岩石比表面积等。其中,岩石矿物成分是基础因素,不同矿物化学活性差异决定反应难易,同一矿物含量变化影响反应整体强度和速率变化趋势。

### 2 酸岩反应实验

#### 2.1 岩石样品

实验选取典型的灰岩和白云岩样品,均取自天然地质剖面。将岩石样品破碎后,筛选出粒径为2-5mm的岩屑颗粒,经去离子水清洗、105℃烘干至恒重,备用。为分析不同矿物含量的影响,通过人工配比的方式,制备了方解石含量分别为70%、80%、90%、100%的灰岩样品(其余成分为石英等惰性矿物),以及白云石含量分别为70%、80%、90%、100%的白云岩样品(其余成分为石英等惰性矿物)。采用X射线衍射仪(XRD)对所有样品进行矿物成分分析,确定实际矿物含量,分析结果如表1所示。

表1 岩石样品矿物成分分析结果

样品类型	设计矿物含量(%)	实际矿物含量(%)	惰性矿物含量(%)
灰岩1	方解石70	方解石69.2	10.8
灰岩2	方解石80	方解石79.5	10.5
灰岩3	方解石90	方解石89.8	10.2
灰岩4	方解石100	方解石99.1	0.9
白云岩1	白云石70	白云石68.7	11.3
白云岩2	白云石80	白云石79.3	10.7
白云岩3	白云石90	白云石89.5	10.5
白云岩4	白云石100	白云石98.8	1.2

2.2 酸液特征

实验采用质量分数为15%的盐酸溶液作为反应酸液,该浓度为地质样品酸岩反应分析常用浓度。酸液由分析纯盐酸(质量分数36%~38%)与去离子水配制而成,配制过程中搅拌均匀,确保浓度稳定<sup>[3]</sup>。酸液初始pH值约为0.5,密度为1.07g/cm<sup>3</sup>。

2.3 实验仪器

实验主要仪器包括:X射线衍射仪(型号X'PertPRO),用于岩石矿物成分分析;高温高压反应釜(型号GSHA-10),容积1000mL,最高工作温度300℃、压力30MPa,用于模拟地质样品酸岩反应环境;电子天平(精度0.0001g),用于称量岩石样品质量;pH计(型号PHS-3C),用于测定酸液pH值变化;滴定管(精度0.01mL),用于通过酸碱滴定法测定酸液浓度<sup>[4]</sup>。

3 岩石矿物成分对酸岩反应速率实验分析

3.1 岩石矿物成分分析

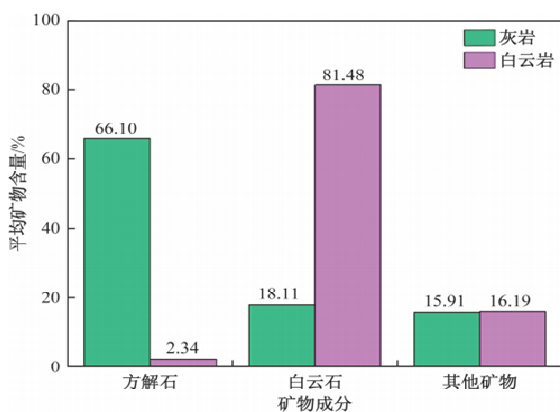


图1 不同岩性平均矿物含量分布

对21件代表性岩样开展X射线衍射实验,分析矿物成分,结果见图1。其中方解石含量0%~78.07%,均值38.78%;白云石含量7.29%~92.34%,波动显著,均值45.27%;其余矿物含量2.68%~34.34%,均值16.03%。细分来看,硅质含量0.52%~14.8%,均值

3.78%;方铅矿含量0.12%~8.91%,均值1.89%;黏土矿物含量0.12%~19.5%,均值6.75%;云母含量0.72%~7.57%,均值3.62%。

3.2 白云岩与灰岩的反应速率对比

灰岩中方解石含量48%~79%、白云石7%~32%、其他矿物7%~28%,反应速度 $0.89 \times 10^{-6} \sim 4.98 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,均值 $2.91 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。白云岩与之不同,方解石含量0%~8%、白云石80%~93%、其他矿物2%~21%,反应速度 $1.59 \times 10^{-6} \sim 4.32 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,均值 $0.86 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

方解石或白云石含量极高时,岩石反应速度趋于稳定,波动幅度小<sup>[5]</sup>。整体来看,灰岩反应速度显著快于白云岩,平均约为后者的4倍。这表明碳酸盐岩溶蚀具有成分选择性:方解石遇酸反应剧烈,白云石反应较缓,石英、黏土等基本不参与反应<sup>[6]</sup>。

3.3 不同矿物成分含量对酸岩反应速率的影响规律

3.3.1 灰岩

为明确灰岩酸岩反应特性,采用直线拟合法分析白云石含量0%~15%、15%~40%区间内,反应速率与方解石含量的关系。结果表明,方解石含量升高可加快反应速率,且增幅随白云石含量上升而降低:白云石含量0%~15%时,方解石每增1%,速率提升 $0.155 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ;15%~40%时,增幅降至 $0.075 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,降幅达51.4%,表明白云石会降低反应速率对方解石含量的敏感度。

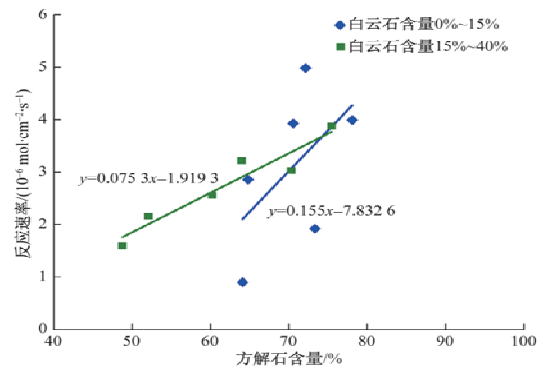


图2 不同白云石含量下反应速率与方解石含量关系

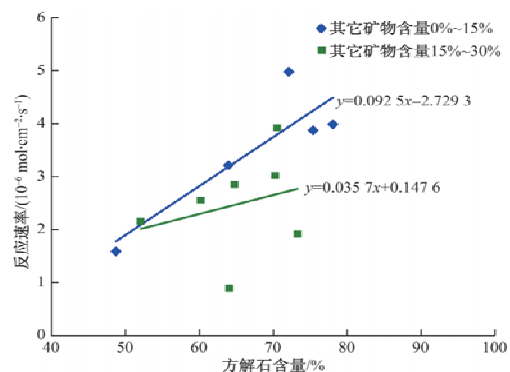


图3 不同其他矿物含量下反应速率与方解石含量关系

同时探究其他矿物含量对灰岩酸岩反应速率与方解石含量

关系的影响,发现方解石含量升高同样会加快反应速率,且增幅与其他矿物含量负相关:其他矿物含量0%–15%时,方解石每增1%,速率提升 $0.0925 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ; 15%–30%时,增幅降至 $0.0357 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。其他矿物因不与酸反应,对反应速率的抑制作用强于白云石。白云石、其他矿物不同含量下反应速率与方解石含量的关系见图2、图3。

### 3.3.2 白云岩

在实际研究工作中,需精准统计白云岩在不同方解石含量条件下,酸岩反应速率与白云石含量之间的具体关系。为清晰呈现此关系,用直线拟合处理方解石含量0%–4%和4%–8%区间反应速率与白云石含量关联(见图4)。发现酸岩反应速率随白云石含量增加而加快,不同方解石含量下变化规律有差异。量化分析显示,方解石含量从0%–4%提升到4%–8%,白云石每增加1%,反应速率增幅提升23%。综上,酸岩反应对白云石含量变化敏感,方解石含量增多使反应速率增加。

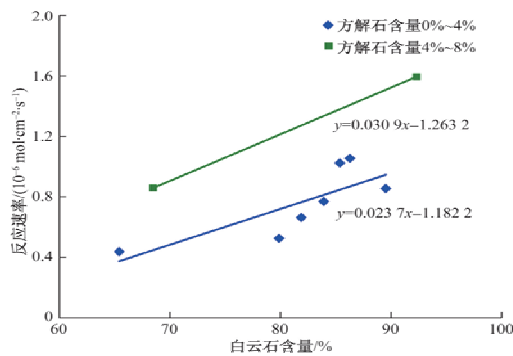


图4 不同方解石含量下反应速率与白云石含量关系

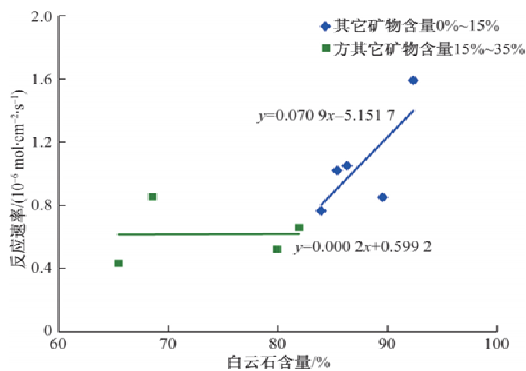


图5 不同其他矿物含量下反应速率与白云石含量关系

统计白云岩在不同杂质含量情形下,岩石的反应速率和白云石含量之间所存在的紧密关联将杂质含量科学划分为两个区间,即0%至15%以及15%至35%,并分别运用直线拟合方法,展现反应速率与白云石含量联系,结果如图5所示。

白云石含量与酸岩反应速率正相关,且受其他矿物含量影响:其他矿物含量0%–15%时,白云石每增1%,速率提升 $0.0002 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ; 15%–35%时,增幅降至 $0.0709 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,降幅达99%。其他矿物含量越高,该正相关关系越弱,其抑制作用强于石灰石,因难溶矿物显著降速,而灰岩含量低,难以对加快反应速度产生较大作用。

## 4 结语

综上所述,明确岩石矿物组成与酸岩反应速率关联,为地质样品酸岩反应分析方案优化提供数据支撑。地质样品分析时,检测储层岩石矿物成分,可判断不同矿物与酸液反应活性差异。方解石含量高的储层,用缓速酸或加抑制剂,实现深部改造;白云石含量高或惰性矿物占比大的储层,提高酸液浓度或延长反应时间,保障酸化效果。

## [参考文献]

- [1]张海龙,杨玉才,范立华,等.岩石矿物成分对酸岩反应速率影响规律研究[J].科技和产业,2024,24(10):233–240.
- [2]马思远.电感耦合等离子质谱法在岩石矿物金属成分分析中的应用[J].当代化工研究,2025(16):61–63.
- [3]贾文婷,牟建业,王贵富.玛湖非均质砂砾岩储层酸岩反应数值模拟及工程设计建议[J].钻采工艺,2024,47(3):108–114.
- [4]李小刚,李坤阳,杨兆中,等.超临界 CO<sub>2</sub>与黏土矿物的化学反应动力学特征[J].断块油气田,2025,32(2):331–338.
- [5]罗攀登,张士诚,张雄,等.高温碳酸盐岩储层酸压固态延迟酸在裂缝中作用规律数值模拟[J].大庆石油地质与开发,2025,44(2):79–88.
- [6]李伟.酸岩反应过程模拟实验及残酸离子变化规律——以大庆油田为例[J].石油地质与工程,2024,38(5):100–104.

## 作者简介:

陈旭(1983—),女,汉族,吉林通化人,在职研究生、职称:高级工程师,单位全称:吉林省第四地质调查所,从事的研究方向:岩矿测试。