

江汉盆地西南缘南湖峪矿区石盐矿水溶性能试验研究

罗 敏, 曾 彬, 邓德虎

湖南省生态地质调查监测所, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年9月8日; 录用日期: 2026年10月13日; 发布日期: 2026年10月26日

摘 要

南湖峪矿区石盐矿层赋存于古近系新沟嘴组含盐岩段, 首采层K1 (III、IV、V盐层合并) 纯盐平均真厚8.62 m、NaCl平均品位79%。依据DZ/T 0212.3-2020, 对ZK1002钻孔16组(32件)试样进行水溶性能试验。结果表明: 溶蚀速度随卤水浓度升高而下降; 低浓度下上溶速度明显高于侧溶, 侧溶达饱和平均46.7 h, 快于上溶的59.3 h; 饱和卤水膨胀率平均11.39%, 产1 m³饱和卤水耗淡水约0.90 m³; 残渣膨胀率仅0.05%~0.18%; 饱和卤水以NaCl为主(298~340 g/L), 品质纯。矿石溶解性能良好, 适宜钻井水溶法开采, 成果可为水溶开采设计与盐穴选划提供基础数据。

关键词

石盐矿, 地质特征, 水溶性能, 钻井水溶开采, 南湖峪矿区, 湖北松滋

Experimental Study on the Water-Solubility Properties of Rock Salt Deposits in the Nanhuyu Mining Area, Southwestern Margin of the Jiangnan Basin

Min Luo, Bin Zeng, Dehu Deng

Ecology Geological Survey and Monitoring Institute of Hunan Province, Changsha Hunan

Received: September 8, 2026; accepted: October 13, 2026; published: October 26, 2026

Abstract

The rock salt seams in the Nanhuyu mining area occur in the salt-bearing member of the Paleogene Xingou Formation. The primary mining horizon K1 (merged from seams III, IV and V) has an average

pure-salt thickness of 8.62 m and an average NaCl grade of 79%. According to DZ/T 0212.3-2020, water-solubility tests were carried out on 16 groups (32 specimens) from borehole ZK1002. The results show that the dissolution rate decreases with rising brine concentration; at low concentrations the top dissolution rate is clearly higher than the lateral one. The lateral brine reaches saturation in 46.7 h on average, faster than the top test (59.3 h). The saturated brine has an average expansion ratio of 11.39%, i.e. about 0.90 m³ of fresh water is consumed per 1 m³ of saturated brine. The residue expansion ratio is only 0.05%~0.18%. The saturated brine is dominated by NaCl (298~340 g/L) and is of high purity. The ore has good solution properties and is suitable for drilling solution mining. The results provide basic data for solution mining design and salt cavern siting.

Keywords

Rock Salt Deposit, Geological Characteristics, Water-Solubility Property, Drilling Solution Mining, Nanhuyu Mining Area, Songzi, Hubei

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钻井水溶法开采是岩盐矿最常用的开采方式,利用了岩盐易溶于水的特性,通过钻井将水作为溶剂注入矿层,使矿层中的岩盐溶解为盐溶液,得以开采出地面[1]。岩盐矿水溶性能试验研究对于开采阶段控制溶腔形态、估算日产卤量、淡水消耗量、损失盐量等具有重要的指导意义[2]。随着“西气东输”等天然气储备工程的实施,盐穴因其密封性好、蠕变自修复、运行成本低,已成为大规模地下油气储备的首选场所,而矿石水溶性能参数正是盐穴造腔设计与运行的基础输入[3]。南湖峪矿区是江汉盆地西南缘近年来重新评价的大型盐类资源地,盐类矿产勘查中钻探与综合物探方法的联合应用为该区资源潜力论证提供了依据[4]。本文通过在矿区首采开采层内有代表性地取样并进行水溶性能实验室试验研究,对矿区石盐矿水溶性能作出初步评价,以期对矿区岩盐矿水溶开采及未来盐穴储气库选划提供基础数据。

2. 矿区概况

南湖峪矿区位于湖北省松滋市市区东南 170°方向约 27 km 的南湖峪一带,行政区划属松滋市杨林市镇管辖,地处松滋市与公安市交界地带,并与湖南省澧县相邻,面积 13.11 km²。区内有 S254 省道穿过,往西南约 6 km 与 G207 国道、二广高速(G55)相连,交通较为便利。

勘查区大地构造位置处于新华夏系第二沉降带中段的大型中新生代盆地——江汉盆地的西南部,属江汉拗陷西南部中新生代断陷盆地盐井—申津渡盆地的南西部。该次级盆地呈北北东向展布,南隔亘山—双龙凸起与澧县盆地相望。盆地内为中新生代红层,主要为巨厚层红色碎屑岩夹灰色碳酸盐岩及硫酸盐、氯化物等盐类矿产,具备形成蒸发岩盐类矿床的良好物质条件。

矿区矿层埋深 508.75~817.36 m,资源储量丰富,须用钻井水溶法进行开采。矿区潜在经济和社会效益显著,是湖北省“十四五”矿产资源规划重点项目之一。

3. 矿层地质

3.1. 矿层特征

勘查证明,区内古近系始新统新沟嘴组含盐岩段(E₂x³)为石盐赋存层位,全区有分布,厚度 165.04~196.66

m, 岩性为青灰-深灰色云质泥岩、泥质云岩、含云泥质钙芒硝岩夹石盐, 中下部含团块状硬石膏。含盐岩段内自下而上共划分 I、IIc、IIb、IIa、II、III、IV、V、VI 共 9 个盐层, 其中 I~VI 6 个为主要石盐矿层, IIc、IIb、IIa 为 3 个副盐层。按工业指标在 I、II、III、IV、V 5 个盐层各圈定出一个石盐工业矿体。

矿层赋存形态简单, 呈层状、似层状产出, 部分呈透镜体状; 单斜构造, 产状平缓, 倾角 2°~10°, 区内未见断裂构造。矿体(层)埋深总体南西部较浅, 往东北部变深。各主要盐层特征见表 1。

Table 1. Characteristics of the rock salt seams in the Nanhuyu mining area

表 1. 南湖峪矿区各石盐矿层特征一览表

盐层	结构	形态	倾角(°)	埋深(m)	厚度(m)最小~最大(平均)	NaCl 品位(%)最小~最大(平均)	工业矿体
VI	单盐层	透镜体	2~8	508.75~670.13	0.80~1.77 (1.31)	50~94 (77)	-
V	复盐层	层状	2~8	513.48~721.25	2.62~7.38 (4.14)	30~92 (75)	1 个
IV	复盐层	层状	2~10	519.23~726.34	1.20~5.30 (3.92)	40~97 (76)	1 个
III	单盐层	层状	2~8	530.03~736.39	1.15~2.35 (1.80)	81~92 (88)	1 个
II	单盐层	层状	2~10	541.93~749.72	1.75~4.09 (2.92)	38~96 (81)	1 个
I	单盐层	似层状	2~10	624.98~817.36	0.86~2.99 (1.70)	82~97 (90)	1 个

3.2. 首采开采层特征

按水溶开采工业指标要求(开采层段高度 30~50 m、经济可采纯盐厚度 ≥ 4 m、含矿率 $\geq 40\%$ 等), 区内 III、IV、V 盐层合并划分为 1 个开采层(K1)。K1 开采层埋藏深度 513.48~734.03 m, 赋存标高 -454.19~-690.14 m, 由厚度 0.10~3.88 m 的 3~7 层单盐层联合组成, 其间夹 2~6 层含盐钙芒硝夹矸。开采层高度 13.59~21.52 m, 纯盐真厚度 6.45~12.56 m, 平均 8.62 m, 含矿率 40.61%~58.36%, NaCl 含量 73%~87%、平均 79%, 开采层的厚度、品位均较稳定, 为本次水溶性能试验的目的层段, 也是矿床后期开发的首采层段。

3.3. 矿石质量与矿石类型

区内石盐矿石矿物成分为石盐, 脉石矿物主要有钙芒硝及少量白云石、石英、泥云质和微量有机质、铁质等。按离子组合计算, 石盐含量约 86%、钙芒硝约 11%、其他矿物共约 3%。

矿石结构以自形粒状、半自形-他形不等粒结构为主, 晶粒一般 1~5 mm, 最大 12 mm; 矿石构造主要为块状构造, 次为条带状构造(石盐与钙芒硝互为条带)。

矿石主要化学组分为 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 及水不溶物等, 少量 K^+ 、 Mg^{2+} 。其中 Na^+ 平均 30.86%、 Cl^- 平均 46.74%、 SO_4^{2-} 平均 8.66%、 Ca^{2+} 平均 1.98%、水不溶物平均 10.37%(表 2)。矿石自然类型以块状石盐矿石为主(约占 92%), 次为条带状含钙芒硝石盐矿石; 工业类型为石盐、含钙芒硝石盐两种。单样品位(NaCl 含量) 30.28%~96.61%, 全区矿石品位均匀, 南西部稍高。

Table 2. Statistics of chemical compositions of the rock salt ores (%)

表 2. 石盐矿石化学成分含量统计表(%)

成分	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	H_2O	水不溶物
最小值	15.70	22.84	1.12	0.03	0.004	0.009	0.01	0.36
最大值	40.31	59.04	34.30	7.42	0.106	0.067	1.09	43.41
平均值	30.86	46.74	8.66	1.98	0.031	0.026	0.12	10.37

4. 水溶性试验方法

4.1. 试验依据与项目

考虑到 K1 开采层(III、IV、V 盐层)为矿床后期开发的首采层段,本次水溶性能试验重点针对该层段进行。试验依据自然资源部 2020 年发布的《矿产地质勘查规范盐类第三部分:古代固体盐类》(DZ/T 0212.3-2020)附录 C “古代固体盐类矿石水溶性能实验室试验方法及要求”设计[5],由具备相应资质的第三方检测单位承担(2025 年 10 月 23 日~12 月 3 日)。试验测定矿石的溶蚀速度与溶解速度、卤水膨胀率、水不溶物残渣膨胀率、水不溶残渣湿体积及含盐量、水不溶物残渣粒度及颗粒沉降速度、卤水主要化学成分等 7 个项目。

4.2. 试样采集与制备

根据规范要求,在勘探区选择具有代表性的勘探钻孔 ZK1002,于 K1 开采层段系统采取直径 90 mm 的岩矿心样共 16 组,每组 2 件,分别用于侧溶与上溶试验,总计 32 件试样(表 3)。试样主要矿石矿物为石盐,不溶组分以泥质、钙芒硝及硬石膏为主,取样层位矿体厚度稳定、品位均匀,样品具有代表性。

将 32 件试样按溶解试验类别排列后,先切平矿心试样顶、底板,保留长度 20 cm,并标出试样顶、底方向,再按类别分别制备:

侧溶试样:每件试样切出宽度 7 cm 的测试侧面,将 15 cm × 7 cm 薄纸贴于切平侧面(纸上端距试样顶端 3 cm、下端距试样底端 2 cm),固定后涂覆 1:1 石蜡、沥青煮沸混合液密封,使试样仅测试侧面参与溶蚀;待密封层干涸后称量试样质量,并用排水法测定试样体积。

上溶试样:测量试样底端面面积,用相应大小薄纸覆盖底端后涂覆 1:1 石蜡、沥青煮沸混合液密封,使试样仅底端面参与溶蚀;顶部用小钻机钻孔后嵌入带挂钩的膨胀螺丝用于悬吊;称量试样质量并用排水法测定体积。

Table 3. Information of the water-solubility test samples
表 3. 取样情况一览表

送样号	样品编号(侧溶/上溶)	钻孔	取样层位	试样规格	试验类别
ZK1002-SL1~SL16	每组 2 件(侧溶样-1、上溶样-2)	ZK1002	K1 开采层(III、IV、V 盐层)	φ90 mm × 20 cm	侧溶、上溶各 16 件

4.3. 溶蚀试验方法

试验在常温、常压静水状态下进行,室温与溶解池水温控制在 10℃~25℃。试验前根据试样平均品位计算测试面高度内样品侧溶溶解量约 1/2 (约为整个样品体积的 3/8)、卤水达饱和时所需的预计溶解水量,作为选择溶解池(槽)规格的依据,预计溶解水量计算系数 K 取 1.1 [6]。

侧溶试验:将加工好的侧溶试样直接置于预定体积溶解水的溶解池底部,静水浸泡测试面进行溶蚀,同时放入波美度计随时观测溶液浓度变化。自 0°Bé 起,浸泡初期溶蚀速度快,每 15 min 观测 1 次;随溶液浓度升高溶蚀速度减弱,约每 30 min 观测 1 次;试验后期溶解速度明显下降,视溶解情况延长观测间隔。主要测定测试面溶蚀平均进尺(将试样分为上、中、下三部分,每部分平均测量 3 次,取算术平均值),同时记录溶蚀时间(h),据此计算侧溶溶蚀速度(mm/h);并测定侧溶角、卤水温度、质量密度(比重)与试样质量,直至卤水浓度达 24°Bé (饱和卤水、上下层浓度一致)为止。

上溶试验:将加工好的上溶试样悬垂于预定体积的溶解水中,裸露底面测试面进行静水浸泡,观测

频率同侧溶试验。主要测定测试面溶蚀平均进尺(将溶蚀面划分为若干等份,用游标卡尺量取 10 个以上进尺数据,取算术平均值),同时称量试样质量,据此计算上溶溶蚀速度(mm/h)与上溶溶解速度[g/(cm²·h)];并观测溶液浓度、温度和质量密度,直至卤水浓度达 24°Bé 为止。

4.4. 其他项目测定方法

卤水膨胀率:采用溶蚀试验切下的矿心碎片,于 1000 mL 量筒中加入适量淡水,记录体积和水温,徐徐加入试样并搅拌使之溶解、上下浓度均匀,测定卤水浓度(波美度);卤水浓度每升高 5°Bé 测定一次所增加的体积,计算卤水膨胀率。

水不溶残渣膨胀率、湿体积及含盐量:在各试样卤水达 24°Bé 时,将卤水中水不溶残渣用快速定性滤纸过滤,转入烧杯静放三天,吸去清卤后测定残渣湿体积与质量,用排水法测剩余体积,计算残渣膨胀率与湿体积质量。残渣含盐量按残渣:水约 1:5 混合振荡 3 min、浸出液水浴蒸干、105℃~110℃烘干恒重法测定。

残渣粒度及颗粒沉降速度:将未溶解完矿石切取部分,用水使可溶盐完全溶解后,对残渣进行粒度分析与沉降速度测定。粒度分析:测出残渣湿总体积,淘洗去泥(<0.1 mm),将残留砂砾干燥后过 2 mm、10 mm 两级筛,分为 >10 mm、2~10 mm、0.1~2 mm、≤0.1 mm 四级,排水法测各粒级体积并计算体积分数。沉降速度测定:用 1000 mL 玻璃量筒分别盛满 0°、5°、10°、15°、20°、24°Bé 卤水,将 1~10 mm 各粒级残渣颗粒逐一放入,测定沉降时间并计算沉降速度(cm/s),每一粒度-浓度组合测定 10 次取平均值。

卤水化学成分:按送样号将溶蚀试验(侧溶、上溶)溶解后的卤水,在浓度每升高 5°Bé (5°, 10°, 15°, 20°, 24°Bé)时各取样 1 次,分析 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻ 八项成分。

5. 试验结果分析

试样在溶解过程中不断有小块夹石沉落于溶池底部,当卤水达到饱和(24°Bé)后试样几乎不再被溶蚀。溶蚀后的岩盐试样可见:块状石盐试样被溶蚀后形成单一溶腔,无明显隔层;含钙芒硝条带的试样溶蚀后条带状夹石留于残留样中,小块夹石随溶蚀散落于容器中。

5.1. 溶蚀时间与卤水浓度变化关系

按侧溶、上溶试验分别整理不同累计溶蚀时间对应的卤水浓度,结果见表 4、表 5,并绘制关系曲线(图 1)。

Table 4. Brine concentration at different cumulative dissolution times in the lateral dissolution tests (°Bé)
表 4. 侧溶实验不同累计时间卤水浓度表(°Bé)

送样号	5 h	10 h	15 h	20 h	30 h	40 h	送样号	5 h	10 h	15 h	20 h	30 h	40 h
SL1	15.0	19.5	22.0	22.0	22.0	22.0	SL9	19.0	22.0	23.0	23.5	23.5	24.0
SL2	17.0	20.0	20.0	22.0	22.5	22.5	SL10	19.0	21.0	22.5	22.5	23.0	24.0
SL3	18.0	20.0	22.0	22.0	22.5	22.5	SL11	19.0	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0
SL4	18.0	20.0	21.0	22.0	23.0	23.0	SL12	19.0	22.0	23.0	23.0	23.5	24.0
SL5	19.0	21.0	22.0	22.0	22.5	22.5	SL13	20.0	21.0	22.0	22.5	23.0	24.0
SL6	19.0	20.5	21.5	21.5	23.0	23.0	SL14	20.0	21.0	22.5	22.5	23.0	24.0
SL7	18.0	21.0	22.0	22.5	24.0	24.0	SL15	21.0	21.5	22.5	23.0	23.5	24.0
SL8	18.0	21.0	22.0	22.0	23.0	23.0	SL16	19.5	20.5	22.0	22.5	23.0	24.0

Table 5. Brine concentration at different cumulative dissolution times in the top dissolution tests (°Bé)
表 5. 上溶实验不同累计时间卤水浓度表(°Bé)

送样号	5 h	10 h	15 h	20 h	30 h	40 h	送样号	5 h	10 h	15 h	20 h	30 h	40 h
SL1	15.0	18.0	20.0	20.0	22.0	22.0	SL9	10.0	15.0	19.0	21.0	23.0	23.5
SL2	16.0	18.5	20.0	21.0	22.0	22.0	SL10	11.0	16.5	21.0	21.0	23.0	23.5
SL3	15.5	18.5	20.5	21.0	22.5	22.5	SL11	13.0	17.0	18.5	20.0	22.5	23.0
SL4	14.0	18.0	20.0	22.0	23.0	23.0	SL12	13.0	17.0	18.0	19.0	22.0	23.0
SL5	13.0	17.0	19.0	21.0	22.5	22.5	SL13	14.0	15.0	18.0	19.0	21.5	23.0
SL6	15.0	20.0	22.0	22.5	23.0	23.0	SL14	14.0	15.0	17.0	18.0	22.0	23.5
SL7	14.0	18.0	21.5	22.0	23.0	23.0	SL15	14.0	15.0	18.0	19.0	21.0	23.0
SL8	15.0	19.5	20.5	22.5	23.5	23.5	SL16	13.5	15.0	17.0	18.0	21.0	23.0

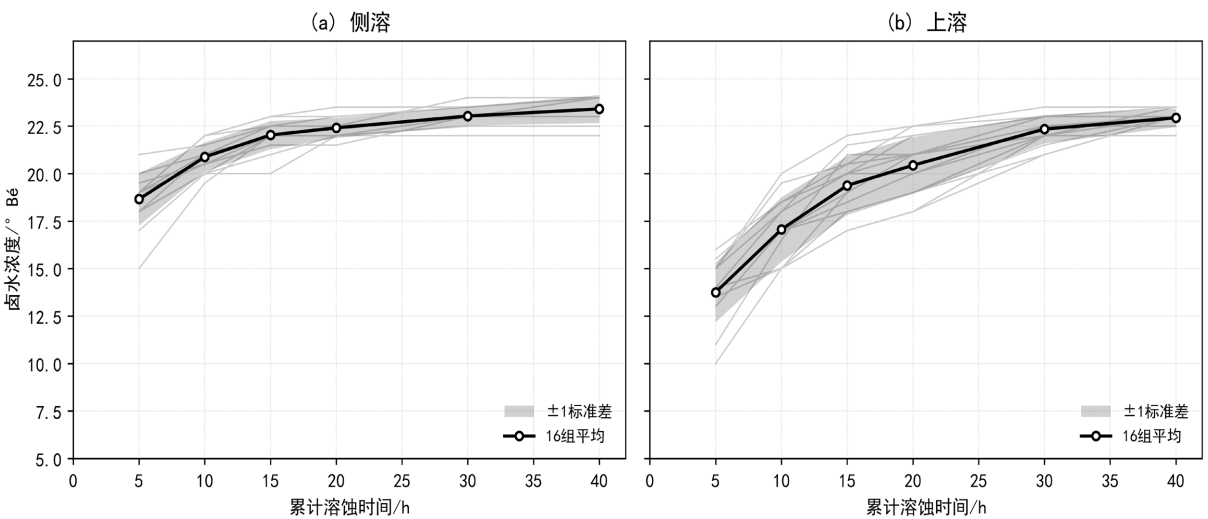


Figure 1. Relationship between brine concentration and cumulative dissolution time
图 1. 卤水浓度 - 累计溶蚀时间关系曲线

结果表明，侧溶试验初期(0~5 h)卤水浓度普遍快速升至 15~21°Bé，随后增速逐渐放缓；上溶试验同期浓度仅 10~16°Bé，整体低于侧溶。试样卤水浓度达饱和(24°Bé)所需时间，侧溶为 26.5~93.2 h(平均 46.7 h)，上溶为 46.2~125.5 h(平均 59.3 h)，侧溶显著短于上溶。

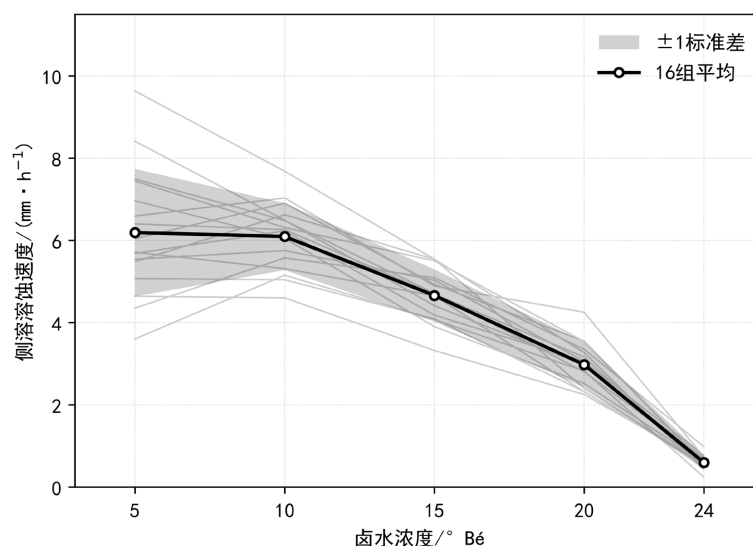
分析认为：侧溶初期试样侧向测试面与淡水全面接触，溶解面积大，且随溶蚀进行溶腔不断横向扩展、持续形成新的溶解面，溶液混合均匀性高，卤水浓度上升快、达饱和早；上溶虽初期垂向溶解面集中、浓度增速亦快，但中后期溶腔垂向扩展受限，残渣易在有限的垂向空间内堆积并覆盖盐矿表面，阻碍水流渗透，卤水浓度垂向分布不均，导致达饱和时间显著延长。因此在造腔建槽阶段宜充分利用侧溶高效的特点。

5.2. 侧溶试验

侧溶试验主要测定侧溶溶蚀速度和侧溶角。侧溶溶蚀速度的测定是确定盐槽形态和形成速度的依据；侧溶角的测定，在建槽阶段用于控制盐槽的底角，在生产阶段用于控制溶腔的形态。试验结果见表 6、图 2。

Table 6. Results of lateral dissolution rates (mm/h)**表 6.** 侧溶溶蚀速度试验结果表(mm/h)

送样号	5°Bé	10°Bé	15°Bé	20°Bé	24°Bé	送样号	5°Bé	10°Bé	15°Bé	20°Bé	24°Bé
SL1	9.63	7.68	5.54	2.40	0.53	SL9	7.49	6.48	4.71	2.80	0.67
SL2	5.48	6.62	5.54	3.27	0.42	SL10	6.96	6.05	3.90	2.52	0.60
SL3	3.60	5.15	4.07	2.82	0.24	SL11	4.64	4.60	3.32	2.25	0.59
SL4	5.07	5.04	4.09	2.32	0.52	SL12	5.71	5.31	4.65	2.32	0.58
SL5	6.04	6.90	4.93	3.55	0.58	SL13	6.59	7.03	4.89	4.25	0.73
SL6	7.44	6.31	5.50	3.54	0.57	SL14	5.54	5.75	5.03	3.06	0.48
SL7	4.35	5.57	5.09	3.35	0.98	SL15	6.40	6.26	4.69	3.16	0.53
SL8	5.68	6.23	4.18	3.05	0.77	SL16	8.41	6.49	4.41	2.96	0.70
平均值	6.19	6.09	4.66	2.98	0.59						

**Figure 2.** Lateral dissolution rate vs. brine concentration**图 2.** 侧溶溶蚀速度随卤水浓度变化曲线

可以看出,随着卤水浓度的增高,侧溶溶蚀速度总体呈下降趋势。卤水浓度 5~10°Bé 时溶蚀速度最高(平均 6.19~6.09 mm/h),其后下降趋势明显,至 24°Bé 仅平均 0.59 mm/h,降幅达 90%以上。这一规律符合溶解动力学原理:随卤水接近饱和,溶液盐离子浓度升高,溶解浓度梯度趋近于零,溶解动力大幅减弱。部分试样(如 SL2、SL5、SL13)在 10°Bé 附近出现略高于 5°Bé 的峰值,系初期试样表面易溶部分快速溶解、测试面糙化使有效接触面积增大所致。因此,建槽初期应尽量降低注入溶液的浓度,以加快成槽速度。侧溶角随卤水浓度增高变化不大,一般 10°左右,建槽阶段可按此控制盐槽底角。

为便于掌握逐样数据的波动范围,将 16 件侧溶试样的测试面初始尺寸、达饱和时的累计溶蚀进尺,以及侧溶、上溶卤水达饱和时间逐样统计于表 7。侧溶达饱和时间 26.5~93.2 h、上溶 46.2~125.5 h,试样间差异主要受不溶物含量与条带构造差异控制:块状构造试样(SL7, SL5)最快 26.5~44.5 h 即达饱和,而含钙芒硝条带的 SL3 长达 93.2 h,约为 SL7 的 3.5 倍,且其测试面累计进尺(22.73 mm)为 16 件中最小之一,反映条带夹层对溶蚀的阻滞作用。

Table 7. Raw single-specimen measurement data of the dissolution tests
表 7. 溶蚀试验逐样原始测定数据表

送样号	测试面初始 尺寸(mm)	达饱和累计 进尺(mm)	侧溶达饱 和时间(h)	上溶达饱 和时间(h)	送样号	测试面初始 尺寸(mm)	达饱和累计 进尺(mm)	侧溶达饱 和时间(h)	上溶达饱 和时间(h)
SL1	65.37	36.67	69.5	125.5	SL9	62.07	25.84	38.5	48.5
SL2	66.79	29.59	70.2	122.8	SL10	62.24	23.24	38.5	48.5
SL3	64.32	22.73	93.2	70.0	SL11	62.06	22.86	38.5	50.0
SL4	63.28	24.43	46.8	46.2	SL12	62.39	22.39	38.5	50.0
SL5	59.82	25.86	44.5	47.8	SL13	61.89	28.13	38.5	50.0
SL6	65.94	25.25	44.5	47.8	SL14	61.81	18.59	38.5	50.0
SL7	65.59	25.85	26.5	46.2	SL15	62.57	20.25	38.5	50.0
SL8	63.59	34.15	44.5	46.2	SL16	62.56	27.08	38.5	50.0

5.3. 上溶试验

上溶试验主要测定上溶溶蚀速度和上溶溶解速度。上溶溶蚀速度用于测算水溶生产阶段单位时间的上回采矿量；上溶溶解速度则用以确定单位面积的卤水回采量、估算卤井的日产卤水能力。试验结果见表 8、表 9、图 3。

Table 8. Results of top dissolution rates (mm/h)
表 8. 上溶溶蚀速度试验结果表(mm/h)

送样号	5°Bé	10°Bé	15°Bé	20°Bé	24°Bé	送样号	5°Bé	10°Bé	15°Bé	20°Bé	24°Bé
SL1	12.76	10.70	7.04	3.48	0.46	SL9	9.38	7.82	5.35	3.24	1.53
SL2	15.81	11.39	8.70	4.15	0.48	SL10	9.75	7.45	5.47	4.06	1.46
SL3	13.32	11.33	7.02	4.25	0.89	SL11	7.56	6.35	4.75	3.51	1.44
SL4	12.68	11.94	7.03	4.15	1.37	SL12	6.21	3.77	4.39	2.39	1.20
SL5	15.40	6.13	6.03	3.38	1.36	SL13	10.31	9.55	6.33	3.35	1.71
SL6	11.71	8.78	6.23	4.06	1.20	SL14	11.44	8.40	6.15	3.21	1.54
SL7	10.43	9.11	5.63	3.73	1.29	SL15	11.92	8.03	6.00	2.97	1.41
SL8	11.77	9.19	7.17	3.62	1.19	SL16	8.48	6.46	4.83	2.39	1.40
平均值	11.18	8.53	6.13	3.50	1.25						

Table 9. Results of dissolving rates in the top dissolution tests [g/(cm²·h)]
表 9. 上溶溶解速度试验结果表[g/(cm²·h)]

送样号	5°Bé	10°Bé	15°Bé	20°Bé	24°Bé	送样号	5°Bé	10°Bé	15°Bé	20°Bé	24°Bé
SL1	2.79	2.40	1.68	0.78	0.10	SL9	2.18	1.65	1.13	0.78	0.28
SL2	3.36	2.46	1.92	0.96	0.10	SL10	3.12	2.35	1.36	0.87	0.29
SL3	3.07	2.50	1.59	0.86	0.17	SL11	2.41	1.93	1.15	0.69	0.28
SL4	2.84	2.54	1.50	0.83	0.26	SL12	2.43	1.97	1.20	0.58	0.28
SL5	3.51	2.26	1.37	0.69	0.27	SL13	2.55	2.10	1.08	0.61	0.32

续表

SL6	2.95	2.18	1.57	1.01	0.30	SL14	2.82	2.27	1.36	0.74	0.35
SL7	2.78	2.20	1.43	0.90	0.29	SL15	2.92	2.26	1.36	0.74	0.36
SL8	2.93	2.26	1.62	0.83	0.29	SL16	2.23	1.94	1.15	0.64	0.31

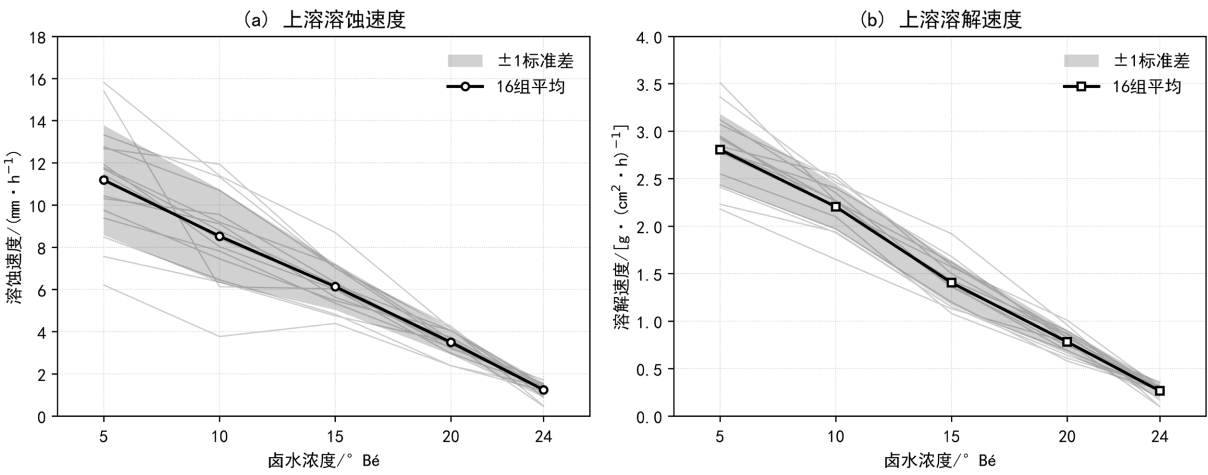


Figure 3. Top dissolution rate (a) and dissolving rate (b) vs. brine concentration
图 3. 上溶溶蚀速度(a)与溶解速度(b)随卤水浓度变化曲线

可以看出，上溶溶蚀速度与溶解速度的变化趋势大体一致，与卤水浓度均呈负相关关系。上溶溶蚀速度在 5~10°Bé 浓度区间下降最快(平均由 11.18 降至 8.53 mm/h)，10°Bé 之后呈慢速平稳下降；试样初始阶段溶蚀速度最高达 20.92 mm/h (SL5, 15 min 观测值)，反映静水条件下低浓度时上溶溶解动力极强。溶液浓度差是岩盐溶解的动力[7]，生产阶段可通过调节井内循环注入水溶液的浓度来调节卤井产能。

对比侧溶试验结果：卤水浓度较低时(≤10°Bé)，上溶溶蚀速度(平均 8.53~11.18 mm/h)明显高于侧溶(平均 6.09~6.19 mm/h)；随浓度增高(20°Bé 及以后)，二者差距明显缩小(20°Bé 时侧溶平均 2.98 mm/h、上溶 3.50 mm/h，24°Bé 时侧溶 0.59 mm/h、上溶 1.25 mm/h)。因此在建槽阶段通过调整卤水浓度，可在一定程度上控制溶腔的形态——欲扩大槽腔直径宜提高侧溶比重，欲加快竖向开采回采矿量则利用低浓度上溶的高效性。

5.4. 卤水膨胀率分析

测定卤水膨胀率的目的是预算水溶开采过程中的淡水消耗量。试验结果见表 10、图 4。

Table 10. Statistics of brine expansion ratios (%)
表 10. 卤水膨胀率试验结果统计表(%)

卤水浓度	5°Bé	10°Bé	15°Bé	20°Bé	24°Bé
最小值	1.11	2.22	4.44	6.67	8.89
最大值	3.33	5.56	8.89	10.11	13.33
平均值	1.56	3.96	6.32	8.70	11.39

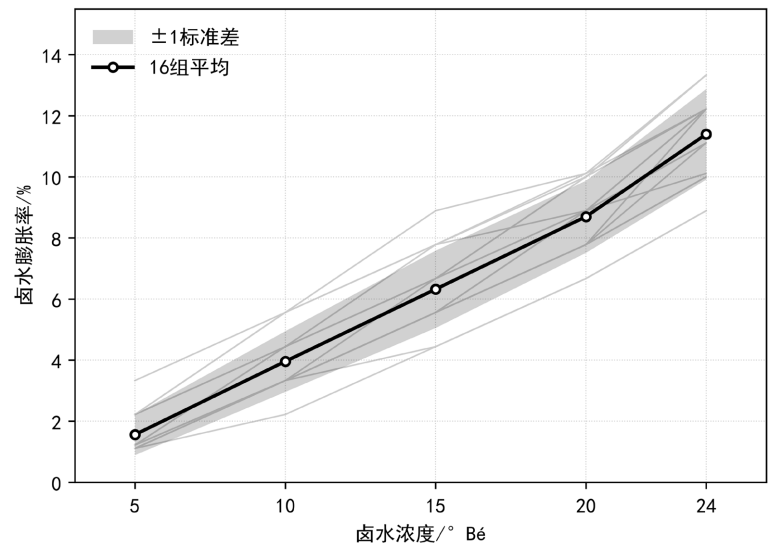


Figure 4. Brine expansion ratio vs. brine concentration
图 4. 卤水膨胀率随卤水浓度变化曲线

可以看出，各试样卤水膨胀率均随卤水浓度增高呈近线性增大，且变化趋势大体一致，样本间波动小(同浓度下极差 ≤ 2.5 个百分点)，反映矿区矿石溶解行为高度均一。当卤水浓度达到 24°Bé (饱和状态) 时，卤水膨胀率为 8.89%~13.33%，平均 11.39%，表明主矿层水溶法开采过程中，每生产 1 m³ 饱和卤水，淡水消耗量为 $1/(1 + 11.39\%) = 0.90$ m³。

5.5. 水不溶残渣分析

水不溶残渣分析包括残渣膨胀率、湿体积质量及含盐量的测定和粒度分析。残渣膨胀率用于评价钻井水溶法开采的可行性；湿体积质量与含盐量用于计算开采过程中的损失盐量；粒度分析用于评价残渣从中心管排出的可能性。测试结果见表 11、表 12。

Table 11. Statistics of expansion ratio, wet density and salt content of water-insoluble residues
表 11. 水不溶残渣膨胀率、湿体积质量及含盐量统计表

项目	侧溶试样	上溶试样
残渣膨胀率(%)	0.05~0.15 (均 0.10)	0.06~0.18 (均 0.10)
湿体积质量(g/cm ³)	0.72~1.19 (均 0.92)	0.72~1.18 (均 0.89)
残渣含盐量 NaCl(%)	6.30~29.20 (均 13.70)	4.25~28.20 (均 14.32)
24°Bé 溶解矿石体积(cm ³)	300~350 (均 326)	300~440 (均 356)

Table 12. Grain-size composition of water-insoluble residues (volume fraction, %)
表 12. 水不溶残渣粒度组成统计表(体积分数，%)

项目	>10 mm	2~10 mm	0.1~2 mm	≤0.1 mm
范围	34.8~52.2	24.3~36.1	10.8~23.0	6.5~14.6
平均值	43.3	29.3	17.1	10.3

可以看出：① 矿石溶解后水不溶残渣膨胀率仅 0.05%~0.18%，远小于 1，溶腔被残渣充填的范围极小，说明矿层适宜采用钻井水溶法开采；② 残渣湿体积质量 0.72~1.19 g/cm³，平均约 0.91 g/cm³，明显

小于石盐密度,残渣将以缓慢沉降为主;③ 残渣粒度以 > 10 mm、2~10 mm 两级为主(合计平均占 72.6%),粗颗粒占比高,水采时需结合颗粒沉降速度控制排卤流速,防止残渣堵管与在盐槽底部过度堆积;④ 残渣中 NaCl 含量平均约 14.0%,开采过程中将随残渣滞留于腔底造成一定盐损,生产设计上应计入损失盐量指标。

不同浓度卤水中各粒级残渣颗粒沉降速度平均值见表 13、图 5。

Table 13. Measured settling velocities of water-insoluble residue particles (cm/s)

表 13. 水不溶残渣颗粒沉降速度测定结果统计表(cm/s)

粒度	0°Bé	5°Bé	10°Bé	15°Bé	20°Bé	24°Bé
1 mm	11.01	10.19	9.65	9.44	8.91	8.55
2 mm	17.42	16.71	15.77	15.07	12.40	11.76
3 mm	19.91	19.16	18.08	17.11	15.50	14.89
4 mm	22.75	22.09	20.51	19.30	18.19	17.01
5 mm	27.32	26.32	22.92	21.73	19.38	18.18
6 mm	28.94	27.41	25.14	23.30	21.28	19.68
7 mm	30.70	29.27	26.72	24.80	22.63	21.02
8 mm	33.68	31.61	28.61	27.51	24.09	22.21
9 mm	37.73	34.84	30.82	29.01	26.65	25.56
10 mm	44.34	41.34	37.17	34.31	30.84	29.28

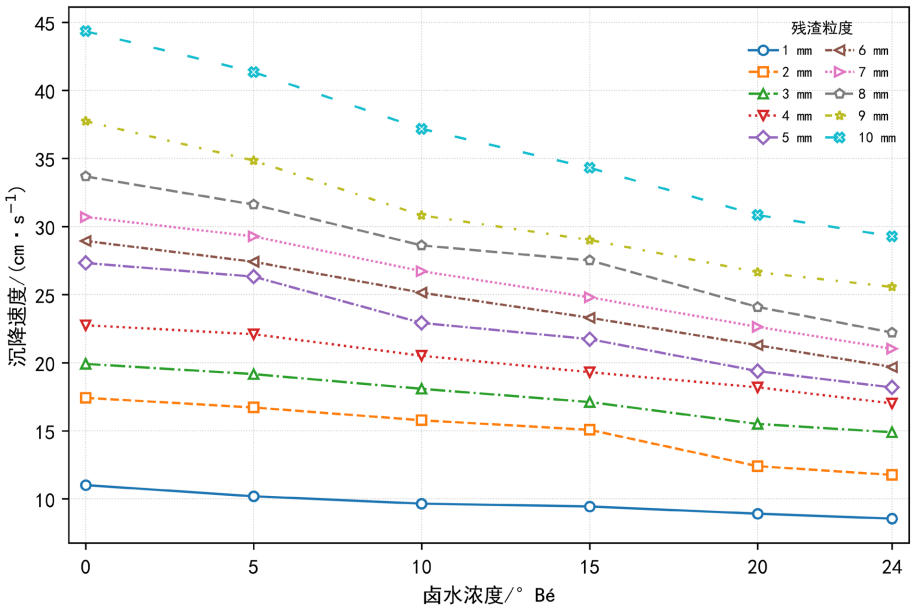


Figure 5. Settling velocities of residue particles with different sizes vs. brine concentration

图 5. 不同粒径残渣颗粒沉降速度 - 卤水浓度关系曲线

结果表明,残渣颗粒沉降速度随卤水浓度升高而降低、随粒度增大而加快。由 0°Bé 升至 24°Bé,各粒级沉降速度平均降幅约 25%~30%,且粒度越小降幅越大——卤水浓度升高使密度与黏度增大、颗粒有效重力减小,对细颗粒沉降阻力影响更为显著(斯托克斯定律)。1~10 mm 颗粒在饱和卤水中的沉降速度

为 8.55~29.28 cm/s，沉降总体不快，在合理的采卤上返流速下残渣可顺利从中心管排出，不易在溶腔内堆积，有利于维持溶腔有效空间。

5.6. 卤水成分分析

按送样号对溶蚀试验卤水在 5°、10°、15°、20°、24°Bé 时的主要化学成分进行分析，16 组试样统计结果见表 14。

Table 14. Statistics of main chemical compositions of brine at different concentrations (averages)

表 14. 不同浓度卤水主要化学成分分析结果统计表(平均值)

浓度	Cl ⁻ (g/L)	SO ₄ ²⁻ (g/L)	Na ⁺ (g/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)
5°Bé	34.56	0.89	23.62	0.99	0.20	53.27
10°Bé	62.96	1.62	40.35	2.07	0.60	101.54
15°Bé	105.13	3.65	70.74	4.14	1.00	153.94
20°Bé	153.44	5.25	101.93	5.92	1.41	194.09
24°Bé	188.69	7.96	125.88	11.92	2.28	278.00

可以看出，各离子含量随卤水浓度升高总体呈增大趋势。饱和(24°Bé)卤水以 NaCl 为主，按 Na⁺、Cl⁻ 折算 NaCl 含量约 298~340 g/L，其它组分含量甚微：CO₃²⁻、HCO₃⁻ 未检出，K⁺、Mg²⁺仅 mg/L 级。SO₄²⁻、Ca²⁺含量随浓度升高增幅相对明显(SO₄²⁻ 饱和时平均 7.96 g/L)，与矿石中含少量钙芒硝、硬石膏逐渐溶出有关，但相对于 NaCl 仍属微量。说明本区矿石溶解后采出的卤水品质较纯，无需大规模脱钙、脱硝即可用于制盐，后续加工工艺简单；对 Ba²⁺、F⁻等个别矿石超标组分，邻区湘澧盐矿生产实践表明其在原卤中含量达标，不影响生产利用。

6. 讨论

6.1. 与同类矿区水溶性能的量化对比

将本区(南湖峪 K1 开采层)与文献已刊出的山东夏庄矿区[8]、江苏朱桥矿区石塘块段[9]两类同处东部盆地、同样以钻井水溶法为设计开采方式的老第三系湖相石盐矿的试验结果进行汇总，主要指标对比见表 15。三矿区试样规格、试验方法与项目设置相近(均参照现行盐类勘查规范附录执行)，指标具有可比性。

Table 15. Comparison of key water-solubility parameters between the Nanhuyu, Xiazhuang and Zhuqiao mining areas

表 15. 南湖峪矿区与夏庄、朱桥矿区石盐矿水溶性能关键指标对比表

指标项目	南湖峪矿区(本研究)	夏庄矿区[8]	朱桥矿区石塘块段[9]
地质时代/层位	古近系新沟嘴组	古近系沙河街组	古近系
侧溶达饱和膨胀率(%)	11.39 (8.89~13.33)	12.42 (10.61~13.16)	18.37 (4.5~23.33)
每产 1 m ³ 饱和卤水耗淡水(m ³)	0.90	0.89	≈0.85 (换算)
侧溶溶蚀速度峰值(mm/h)	6.19 (5°Bé 均值)	5~10°Bé 时最高	6.20 (初始阶段最高)
水不溶残渣体积膨胀率(%)	0.05~0.18	0.72~4.16	13.53
残渣湿体积质量(g/cm ³)	0.91	1.39~1.52	1.64
残渣 NaCl 含量(%)	14.0	5.46~41.09	12.64
饱和卤水 NaCl(g/L)	298~340	310.50~324.66	-

对比可见：① **残渣体积膨胀率是本区最突出的优势指标**，仅 0.05%~0.18%，远低于夏庄矿区(0.72%~4.16%)和朱桥矿区石塘块段(平均 13.53%)，三者相差 1~2 个数量级。残渣膨胀率越小，造腔后被沉渣充填的有效腔体比例越低、可形成腔容越大，对以建库为目的的盐穴选址尤为有利。② 本区残渣湿体积质量(平均 0.91 g/cm³)亦明显低于夏庄(1.39~1.52 g/cm³)和朱桥(1.64 g/cm³)，且残渣粒度以 > 10 mm、2~10 mm 粗粒级为主(合计约 72.6%)，沉降-排出特性与朱桥区“细粒占比高(<0.1 mm 达 38.22%)、易堵管”的情况明显不同，反映本区不溶物以重力沉降为主、排卤携带相对容易。③ 本区饱和卤水膨胀率(11.39%)介于夏庄与朱桥之间，淡水单耗(0.90 m³/m³)与夏庄(0.89 m³/m³)相当而低于按朱桥膨胀率换算值，说明造腔淡水消耗处于同类矿区的正常水平。④ 溶蚀速度峰值(5°Bé 时 6.19 mm/h)与朱桥石塘块段初始阶段(6.20 mm/h)基本相当，属东部湖相石盐的典型量级。

6.2. 水溶性能差异的内在机理

上述指标差异可从矿物组分与结构构造两方面解释。

残渣特性差异的矿物学根源。水不溶残渣的膨胀率、湿体积质量与粒度取决于不溶矿物种类及其与石盐的结合方式。本区矿石脉石矿物以钙芒硝(约 11%)及少量白云石、石英、泥质为主，其中钙芒硝属微溶性硫酸盐，在饱和 NaCl 卤水中基本不溶但遇水易沿解理崩解为较粗的碎块，且与石盐呈条带-薄互层接触，溶解后多以块状散落于腔底，故残渣粗粒占比高、亲水性弱、体积膨胀率极低(<0.18%)。反观朱桥石塘块段，其残渣石膏(CaSO₄)含量达 20.17% [9]，石膏质轻多孔、比表面积大、吸附卤水能力强，加之矿区泥岩夹层发育、黏土质不溶物占比高，黏土矿物(蒙脱石-伊利石类)遇水水化膨胀，导致残渣湿体积质量(1.64 g/cm³)与体积膨胀率(13.53%)均显著偏高[10]。夏庄矿区残渣膨胀率介于二者之间，与其不溶物含量偏低、以泥砂质为主的特征相符。这说明残渣膨胀率本质上是矿区不溶矿物“水化膨胀性-孔隙吸附性”的综合反映，是决定造腔腔体利用率的关键内生因素。

溶蚀动力学的传质理论解释。岩盐溶解是固-液界面处 Na⁺、Cl⁻脱离晶格、穿过扩散边界层向溶液主体传质的过程[7]。根据扩散边界层理论，溶解速率 R 可表示为 $R = k(C_s - C) = (D/\delta)(C_s - C)$ ，其中 C_s 为界面饱和浓度、 C 为溶液主体浓度、 D 为扩散系数、 δ 为边界层厚度。试验初期卤水浓度低(5°Bé)，浓度差($C_s - C$)大，侧溶、上溶平均溶蚀速度最高，分别为 6.19 mm/h、11.18 mm/h；随卤水浓度升高，($C_s - C$)趋于 0，加之溶液密度增大抑制自然对流、边界层 δ 增厚，溶蚀速度呈非线性快速衰减，至 24°Bé 侧溶、上溶分别降至 0.59 mm/h、1.25 mm/h，降幅达 88.8%~90.5%(图 2、图 3)。这一“高浓度端急剧下弯”的非线性特征，正是扩散-对流耦合传质控制的典型表现[7] [11]。上溶溶蚀速度在各浓度下均高于侧溶，但二者绝对差距随浓度升高明显缩小(由 5°Bé 的 4.99 mm/h 降至 20°Bé 的 0.52 mm/h、24°Bé 的 0.66 mm/h)。低浓度阶段上溶仅一个底面朝上、传质路径短且新鲜水持续补给，浓度边界层易被浮力对流破坏，故速度高；随浓度升高，溶液密度增大、自然对流减弱，上溶底面又逐渐被散落残渣覆盖，其速度优势随之减小，二者趋于接近[11]。

6.3. 常温常压试验的局限性与高温高压修正方向

本试验依据规范附录在常温(10℃~25℃)、常压、静水条件下进行，所得参数是矿层水溶开采设计与盐穴选划的基础数据，但直接外推至地下深部实际工况存在以下局限，需作相应修正。

其一，**温度效应**。矿区 K1 开采层埋深 513~734 m，据区域地温梯度估算井底原岩温度约 30℃~55℃，高于室温。NaCl 溶解度随温度升高略有增大(饱和卤水浓度由 25℃的约 26.3%升至 60℃的约 26.8%，质量分数增幅约 2 个百分点)，扩散系数 D 随温度按 Arrhenius 关系增大，且高温降低卤水黏度、减薄边界层 δ ，故深部实际溶蚀速度较常温试验值预计提高 10%~25%；同时常温下确定的 24°Bé 饱和判据在深部

应结合温压条件下探至更高浓度,本试验按室温饱和值终止观测,对溶蚀速度高潮段(低浓度区)刻画充分,对接近饱和段可能略有低估。工程设计宜按实测速度乘以温度修正系数(建议取 1.10~1.25),并以现场试采单井试验率定。

其二, **压力与动水流动效应**。井下水溶开采为循环动水、井筒附加压力工况,与室内静水差异显著。生产井中强制对流使边界层 δ 大幅减薄,溶蚀速度较静水试验成倍提高,即室内静水速度是现场对流开采速度的保守下限;造腔设计中上溶主导的垂向开采阶段,应以现场实测溶腔扩径速率反演校正。

其三, **尺度与夹层效应**。室内为单一样品、单一测试面,无法反映矿层夹矸、夹层不溶物在三维腔体中垮塌堆积对腔形的控制[12],也难体现沉渣在腔底长期压实-水化对可用腔容的动态影响。朱桥、樟树等矿区实践表明,实际造腔须结合声呐/三维地震测腔监测腔形演化[13]。建议后续开展高温高压动水溶蚀试验与三维造腔数值模拟,并将残渣对溶腔稳定性、隔层长期蠕变的耦合影响纳入评价[12]。

综上,本试验成果作为常温常压条件下的相对评价指标与选划初判依据是可靠的;用于生产设计时,应结合温压、动水与现场监测数据进行系统修正。

7. 结论

湖北省松滋市南湖峪矿区古近系始新统新沟嘴组含盐岩段赋存石盐矿层 6 个(另含 3 个副盐层), III、IV、V 盐层合并圈定的 K1 开采层厚度大、品位较均匀,为后期开发首采层段。依据 DZ/T 0212.3-2020 对该层段 16 组(32 件)试样进行了室内水溶性能试验,并与夏庄、朱桥等同类矿区对比,主要结论如下:

1) 矿石侧溶、上溶溶蚀速度随卤水浓度升高呈非线性衰减,符合扩散边界层传质控制特征,溶蚀动力源于溶液浓度差($C_s - C$): 低浓度区间上溶溶蚀速度明显高于侧溶(5~10 $^{\circ}$ Bé 时平均高 40%~81%),而侧溶卤水达饱和平均 46.7 h、较上溶(59.3 h)快约 21%。据此提出“建槽期侧溶主导、低浓度启动,生产期按目标腔形调节注水浓度”的分阶段工艺对策。

2) 矿层适宜钻井水溶法开采且造腔潜势突出:水不溶残渣体积膨胀率仅 0.05%~0.18%,较夏庄矿区(0.72%~4.16%)与朱桥矿区(13.53%)低 1~2 个数量级;残渣湿体积质量平均 0.91 g/cm³、粗粒级(>2 mm)占比约 72.6%,沉渣充填腔容小、排卤携带相对容易。饱和卤水膨胀率平均 11.39%,产 1 m³ 饱和卤水耗淡水约 0.90 m³;卤水以 NaCl 为主(298~340 g/L),品质纯、加工简单,属制盐与建库兼宜的优质矿层。

3) 区域成矿特色鲜明:K1 矿体以块状石盐为主、夹钙芒硝条带,条带不溶物溶解后整体崩解散落,造就本区“残渣粗而轻、腔底堆积疏松”的特征;与朱桥区细粒高占比、石膏质残渣形成鲜明对比。但残渣滞留盐分(NaCl 平均约 14.0%)应计入损失盐量设计指标,矿石中钙芒硝溶出的 SO₄²⁻、Ca²⁺ (饱和时平均 7.96、278 mg/L)需纳入卤水监测。

4) 本研究为常温常压静水试验,所得溶蚀速度可视为深部动水开采的保守下限。后续工作建议:① 开展高温高压动水溶蚀试验,并以现场试开采腔率定速度-温度-流态耦合修正系数;② 将声呐、三维地震测腔[13]与气密封检测[14]技术用于腔形演化与侧溶角的动态校核;③ 深入研究残渣堆积与夹(隔)层垮塌对盐腔储油气长期稳定性的影响[12],服务于矿区“制盐-深地储能”一体化开发论证[3][15]。

参考文献

- [1] 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(1): 54-57.
- [2] 王清明. 试论盐类矿床水溶采矿的理论基础[J]. 中国井矿盐, 1997(2): 17-24.
- [3] 张博,吕柏霖,吴宇航,等. 国内外盐穴储气库发展概况及趋势[J]. 中国井矿盐, 2021, 52(1): 21-24.
- [4] 彭立勇,吴晓蔓,韩虎. 综合物探技术在盐类矿床勘查中的应用[J]. 资源信息与工程, 2025, 40(5): 40-43.
- [5] 邓小林,李博昀,王凡,等. DZ/T 0212.3-2020 矿产地质勘查规范 盐类 第 3 部分: 古代固体盐类[S/OL].

<http://www.nrsis.org.cn/portal/stdDetail/240763>, 2020-04-30.

- [6] 张立, 徐辉, 周沈勇, 等. 井矿盐类矿石水溶性能系列试验要点探究[J]. 中国井矿盐, 2023, 54(1): 25-27.
- [7] 肖长富, 阳友奎, 吴刚, 等. 盐岩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.
- [8] 唐璐璐, 罗文强, 马祥县, 等. 山东省鄄城县夏庄盐矿区岩盐矿水溶性能试验研究[J]. 中国井矿盐, 2017, 48(4): 21-24.
- [9] 宋佳遥, 吴进飞, 何金先, 等. 淮南市朱桥矿区石塘块段岩盐矿溶解性特征研究[J]. 矿产与地质, 2025, 39(4): 714-722.
- [10] 垢艳侠, 完颜祺琪, 李康, 等. 不同盐岩组成含量对盐岩溶解速率影响规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S1): 108-113.
- [11] 王进超, 汪志明, 曾泉树, 等. 盐穴储气库多步造腔流场浓度场规律[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24): 10268-10279.
- [12] 葛鑫博, 李银平, 李金龙, 等. 盐穴储库水溶造腔夹层垮塌块体下落性态及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(4): 918-929.
- [13] 祝龙, 单嘉祺. 江西清江盆地岩盐溶腔的地震识别与特征分析——以樟树盐矿为例[J]. 中国井矿盐, 2024, 55(6): 10-12.
- [14] 李建中, 李奇, 胥洪成. 盐穴地下储气库气密封检测技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 90-92+95+123-124.
- [15] 姚威, 肖恩山. 我国盐穴储气库建设技术发展现状及趋势[J]. 中国井矿盐, 2024, 55(4): 7-10.