

江陵凹陷深层富钾卤水井内降温析盐情况探讨

李瑞琴^{1,2}, 刘成林², 陈 侠¹, 陈永志², 王春连²

(1. 天津科技大学, 天津 300457; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 江陵凹陷位于湖北省江汉盆地西南部, 其赋存有高温高压深层富钾卤水, 该卤水资源在开发过程中遇到的主要问题是采卤过程中的结盐堵井。不考虑压力等其它因素, 只探讨单一因素温度对氯化钠溶解度的影响, 资料分析显示在 50~150℃ 之间时, 温度与溶解度线性关系较好; 探索了岗钾 1 井井内析盐规律, 发现在井深为 1 600~2 400 m 时析盐量最大。根据此规律, 建议采用注入淡水法, 使井内卤水得到稀释, 以达到防止结盐的目的; 建议稀释到对氯化钠溶液浓度略小于 28.3%, 注水井深 2 400 m。

关键词: 江陵凹陷; 岗钾 1 井; 卤水; 降温析盐; 结盐堵井

中图分类号: P619.211

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2013)01-0001-06

前 言

我国是钾肥消费大国, 但我国钾盐矿产资源贫乏, 每年进口钾盐和钾肥高达数百万吨。截至 2001 年底全国查明钾盐资源储量达数亿吨, 从矿床类型看, 90% 以上来自液相矿床^[1]。液相矿床包括盐湖晶间卤水及地下卤水。地下卤水开采遇到的主要问题是采卤过程中井内结盐堵井, 特别是深层高温高压卤水的结盐堵井现象尤为严重, 该问题在四川地下卤水的开采过程中较为普遍^[2-4]。许多专家对此进行了相关研究, 对于井内结盐堵井的解决方案主要有以下 5 种。1) 注入淡水稀释井内卤水浓度^[1-3, 5-6] 2) 优化井身结构^[4, 6] 3) 酸洗除垢^[7-8] 4) 机械洗井阀管柱^[9] 5) 化学清洗剂^[10-11]。地下液相卤水资源开采过程中普遍会遇到结盐堵井问题, 这种现象在深层油气开采过程中也普遍存在, 相应的解决方案主要有以下几种。1) 使用抑盐剂 2) 注入清(热)水洗盐 3) 使用一些特殊材料^[12-14] 4) 泡沫洗盐^[15]。

江陵凹陷位于湖北省荆州市, 面积 8 380 km², 是江汉盆地最大的凹陷^[16]。荆州岗钾 1 井位于湖北省松滋市涪市镇红星村六组, 距 9 井东北约 20 m, 鄂深 9 井西南约 100 m, 属于江陵凹陷涪市断裂带南岗 1 号断鼻构造, 由锦辉(荆州)精细化工有限公司出资勘探。江陵凹陷与岗钾 1 井的地理位置见图 1。荆州岗钾 1 井于 2010 年 11 月 25 日开钻, 2011 年 1 月 25 日钻至井深 3 581.40 m 遇高压卤水, 发生喷流, 在排放降压一段时间后, 发生结盐堵井现象。在此笔者对荆州岗钾 1 井深层高温富钾卤水在自然喷发过程中的析盐情况及规律进行探讨, 同时借鉴国内外经验, 探讨可行、低成本的解除析盐的解决方案。

1 水盐体系中盐类析出规律及影响因素

水盐体系就是水和盐类组成的体系, 在水盐体系中物质在水中的溶解度是物质的一个重要属性。溶解度是指在一定温度下溶质在溶剂中溶解能力的大小。以饱和溶液为例, 饱和溶

收稿日期: 2012-08-29; 修回日期: 2012-09-19

基金项目: 江陵凹陷深层富钾卤水勘查与开发利用(锦辉公司出资, 中国地质科学院矿产资源研究所负责勘查)

作者简介: 李瑞琴(1987-), 女, 在读研究生, 主要研究方向为卤水的综合利用。

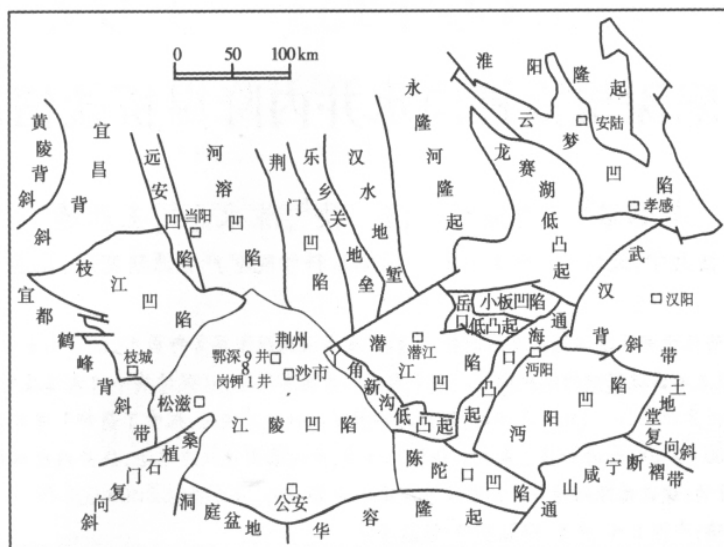
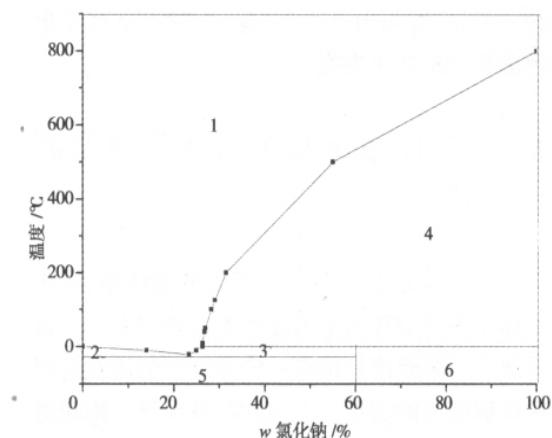


图 1 江陵凹陷与岗钾 1 井的地理位置图

Fig. 1 Geographic location of Jiangling depression and Gangjia 1 well

液中溶质的固相和它的饱和液相建立了一种平衡关系,这种平衡关系是有条件的,当条件改变时,平衡就被破坏,系统出现物质固液相间的转化,此时会有固相析出或溶解,最终导致新条件下的平衡。各种盐的溶解度不同,影响盐类溶解度的因素有温度、压力、pH、化学反应、同离子效应、盐效应等。一般情况下影响盐类溶解度的主要因素是温度。对某一饱和溶液来说,当温度升高或降低时,溶解度会增大或减少,当溶解度增大时溶液由饱和变为不饱和,当溶解度减少时,会有固相析出以达到新的平衡^[16]。

图 2 NaCl-H₂O 体系相图Fig. 2 Phase diagram of NaCl-H₂O system

在图 2 中,1 区为未饱和溶液区,若系统处于该区,则没有固相;2 区为冰的结晶区;3 区是 NaCl·2H₂O 的结晶区;4 区是 NaCl 的结晶区,这 3 个区域称为固液平衡两相区,也称为结晶区。在结晶区内固相会从溶液中结晶出来,通常采用改变温度的方法,降低温度会有固相析出;5 区、6 区为全固相区^[17]。

2 岗钾 1 井卤水化学特征

常温下荆州岗钾 1 井卤水的主要组成成分见表 1,卤水矿化度达 336.98 g/L,其中 Cl⁻ 为主要阴离子;阳离子中 Na⁺ 含量最高,其次为 K⁺,再者为 Ca²⁺,这 3 种离子为卤水中的主要组分。该富钾卤水为对氯化钠饱和卤水。

3 江陵凹陷地区地温变化规律

地温梯度用来表示地球内部温度分布不均匀的程度。江陵凹陷地温梯度随深度变化关系如下: 3.4℃/100m (埋深 < 2 200 m); 2.7℃/100m (埋深 > 2 200 m)^[20]。利用遥感反演计算可得出湖北省地表温度平均值为 14.24℃^[21]。

表 1 荆州岗钾 1 井深层富钾卤水化学组成^[19]
Table 1 Chemical composition of birne in GangJia 1 well
in Jingzhou g/L

资料来源	岗钾 1 井
Na ⁺	119.36
K ⁺	9.15
Ca ⁺	4.14
Mg ²⁺	0.17
Li ⁺	0.051 5
Rb ⁺	0.06
Cs ⁺	0.032
Cl ⁻	200.00
SO ₄ ²⁻	0.784
Br ⁻	0.228 8
I ⁻	0.031
B ₂ O ₃	2.877
矿化度	336.98

根据江陵凹陷地温梯度变化规律及湖北省地表温度平均值可以推测出江陵凹陷不同深度的温度,深度与温度的关系见图 3、图 4。由图 3 可以看出,两者的线性关系较好。

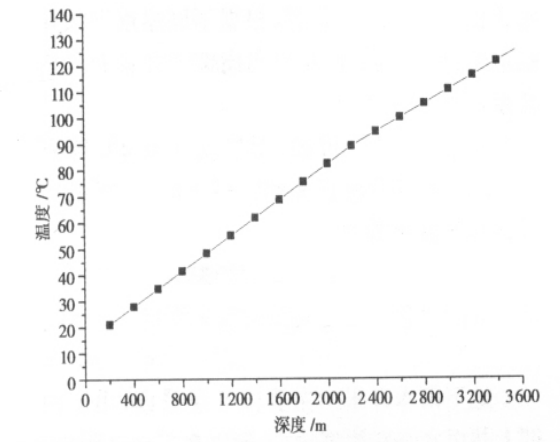


图 3 江陵凹陷地区地热增温曲线
Fig.3 Geothermal gradient curve in Jiangling depression

4 岗钾 1 井深层富钾卤水温度

据现场勘测^[22],岗钾 1 井自喷高温富钾卤水井口温度为 97℃,由于井底 3 581.4 m 处没有实测卤温,只有根据图 3、图 4 推算出荆州岗钾 1 井高温富钾卤水在井底 3 851.4 m 处温度为 126℃左右,由此可以推断岗钾 1 井深度与温度的关系为 0.8℃/100m,推算出井深与温度的变化关系见图 5。

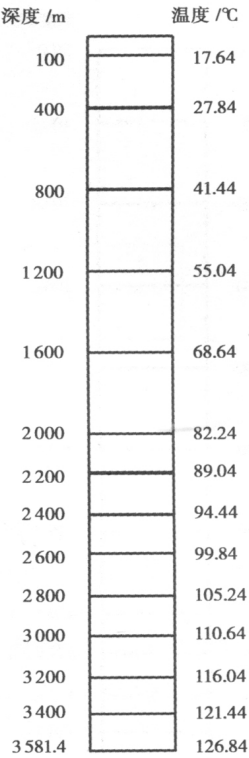


图 4 江陵凹陷深度与温度推算关系图
Fig.4 The predicted relationship between depth and temperature in Jiangling depression

5 氯化钠溶解度与温度关系

荆州岗钾 1 井卤水井口温度为 97℃,因此只需考虑温度在 50 ~ 150℃ 之间变化时氯化钠溶解度变化规律,该温度段氯化钠在水中溶解度变化情况见图 6。

溶解度曲线表示某物质在不同温度下的溶解度随温度变化情况,曲线的坡度越大,说明溶解度受温度影响越大,反之,受温度影响较小。由图 6 可知,温度为 125℃ 氯化钠溶解度为 41.844 g 的点为该溶解度曲线的拐点,温度在 50 ~ 125℃ 之间变化时,溶解度曲线较陡,说明此阶段溶解度易受温度影响;温度在 125 ~ 150℃ 之间变化时,溶解度曲线较平缓,说明此阶段溶解度受温度影响相对较小。

6 岗钾 1 井降温析盐规律探讨

荆州岗钾 1 井富钾卤水在井底温度为

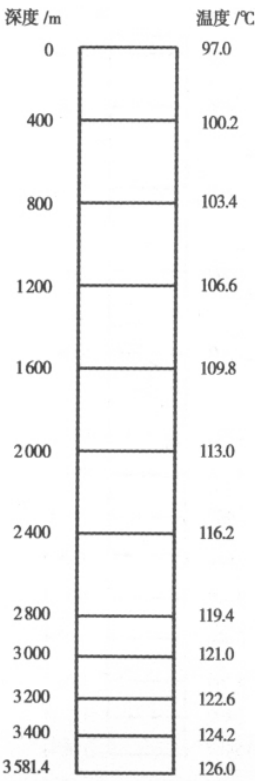


图 5 荆州岗钾 1 井深度与温度推算关系图
Fig. 5 The predicted relationship between depth and temperature in Gangjia 1 well in Jingzhou

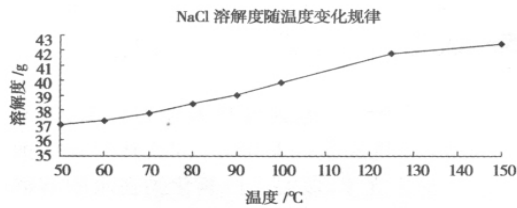


图 6 NaCl 溶解度随温度变化规律^[23]
Fig. 6 The solubility change rule of NaCl with temperature

126℃左右 ,井口温度为 97℃ ,该高温富钾卤水为对 NaCl 饱和卤水。据现场勘测^[22] ,岗钾 1 井卤水层压力高达 80 MPa ,属于异常高压 ,井口压力高达 30 MPa ,在此高压作用下卤水以很高的速度喷出。有研究指出当地温梯度高于 15℃ /km 时会产生异常高压 ,沉积盆地一般具有两个或两个以上温 - 压体系 ,通常包括一个浅层温 - 压体系和至少一个深层温 - 压体系; 在每一个温压体系中 ,地温与地压保持直线关系 ,但在不同的温 - 压体系中 ,地温 - 地层压力直线的斜率不同 ,一般是地层越深温度越高压力越大^[24] ,岗钾 1 井富钾卤水层属于深层温压体系。当岗钾 1 井卤水在异常高压作用下喷出时 ,因压力的下降致使温度降低。据现场观测 ,在高压及很大流速作用下 ,卤水中的氯化钠几乎没有析出; 随着压力的释放 ,流速的减少 ,此时开始析出氯化钠。

实验室测得该卤水的密度为 1. 2 kg/L ,按每天出卤 1 000 m³ 估算 ,根据不同温度下氯化钠溶解度的不同 ,计算得出岗钾 1 井各井段析盐量如表 2、图 7。

由表 2、图 7 可知 ,温度由 116. 2℃ 降到 109. 8℃ 相应深度在 2 400 ~ 1 600 m 之间 ,此段卤水析盐量最大。

7 结 论

地下卤水开采的主要任务是采卤 ,由于岗钾 1 井卤水是高浓度盐水 ,所以在采卤过程中 ,由于卤水的温度变化或采卤过程中饱和卤水的流动和搅动 ,便有细晶析出并附着于设备与卤

表 2 岗钾 1 井各井段析盐量
Table 2 Salting amount in each section of Gangjia 1 well

钻井深度/m	3 581. 4 ~ 3 000	3 000 ~ 2 400	2 400 ~ 1 600	1 600 ~ 井口
卤水温度/℃	126→121	121→116. 2	116. 2→109. 8	109. 8→97
下降温度/℃	5	4. 8	6. 4	12. 8
析盐量/kg × 10 ³	2. 06	3	7. 31	1. 85
析盐量/(kg/m)	3. 543	5	9. 138	1. 156

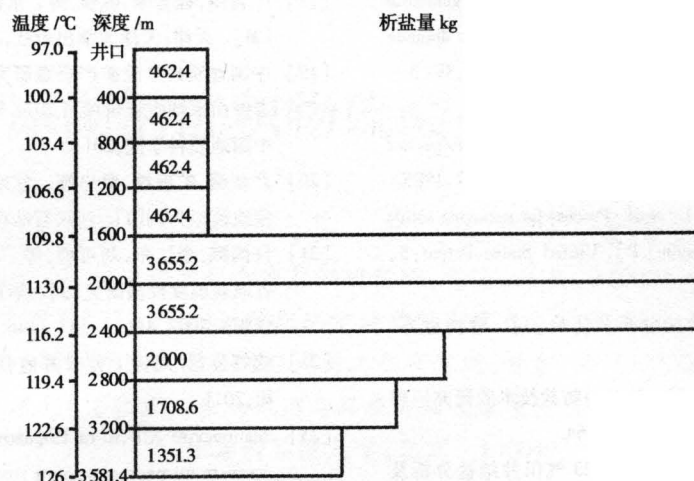


图 7 岗钾 1 井深度与析盐量关系图

Fig. 7 The relationship graph between depth and salting amount in Gangjia 1 well

水接触的表面,晶体不断生长,造成设备严重结盐而降低功效,甚至会使得采卤工作不能正常进行,故在采卤过程中必须采取防结盐措施。

在我国的卤水开采中用过许多防结盐方法。如化学防结盐法,以及超声波、静电、磁力法等,但由于化学防结盐法的抑制剂价格昂贵且含有一定的毒性,因此应用受到一定的限制。而超声波、静电、磁力法又因设备复杂,耗能较大而很少采用,目前国内外厂家多采用加淡水防止结盐的方法^[25]。因此建议岗钾 1 井采卤过程采用加淡水防止结盐的方法,该方法不仅可行而且成本较低。

岗钾 1 井深度在 2 400 ~ 1 600 m 之间时,析盐量最大,这是根据温度变化推算出来的结果。湖北沙隆达公司盐矿在深井采卤的修井总结中,指出为清除中心管内水垢,中心管下深基本在 2 500 m 左右^[26],这与我们推算出来的结果基本相符。因此为防止岗钾 1 井采卤过程中结盐堵井,需设计一淡水输入管下至井深 2 400 m 左右处,由地表将淡水压入管道中,防止采卤过程中结盐。岗钾 1 井为对氯化钠饱和卤水,井底处温度为 126℃(最新的江陵凹陷富钾卤水成因研究指出该卤水层位的卤水是由更深处断裂带补给上来的,所以实际温度可能要大于此温度),由图 6 可以推算出,此时氯化钠溶解度为 41.844 g,因此该温度下氯化钠饱和溶液的浓度为 29.5%;井口处温度为 97℃,由

图 6 推算出此温度下氯化钠溶解度为 39.5 g,因此该温度下氯化钠饱和溶液的浓度为 28.3%。也即,岗钾 1 井内氯化钠饱和溶液浓度最大值为 39.5%,最小值为 28.3%,当注入的淡水使岗钾 1 井卤水对饱和氯化钠溶液的浓度略小于最小值 28.3% 时,可以缓解或防止结盐堵井。

致谢: 本论文得到中国地质科学院矿产资源所 973 钾盐项目组人员的大力帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 江梅. 我国盐湖地下卤水开采和采输卤设备[J]. 化工矿物与加工, 2003(9): 25-27.
- [2] 罗安民, 曹均录, 等. 浅析采卤井卤水盐结晶堵管因素及预防措施[J]. 中国井矿盐, 1995(4): 20-21.
- [3] 任德能. 对南充蓬莱等地深层岩盐开采问题的探讨[J]. 井矿盐技术, 1983(3): 24-25.
- [4] 肖思和, 胡秀玲, 胡永章. 高温高压高含硫地区超深井钻井难点及对策—以通南巴构造带为例[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 70-73.
- [5] 蔡少武, 杨吉, 杨书雄, 等. 浅谈超深盐井水平定向连通与开采[J]. 中国井矿盐, 2005, 36(6): 21-22.
- [6] 江梅. 罗布泊钾肥工程地下卤水采输方案探讨[J]. 海湖盐与化工, 2005, 34(2): 29-32.
- [7] 蔡少武, 胡望水. 陆相超深盐井酸洗除垢工艺方案及效果对比[J]. 中国井矿盐, 2007, 38(1): 33-34.
- [8] 向健, 杨吉. 陆相深井酸化除垢工艺[J]. 中国井矿盐, 2003, 34(3): 28-29.
- [9] Rufus A L, Sathyaseelan V S, Srinivasan M P, et al. Chem-

- istry aspects pertaining to the application of steam generator chemical cleaning formulation based on ethylene diamine tetra acetic acid [J]. *Progr Nuclear Energy* 2001 39(3~4): 285-303.
- [10] Oliver Jr. Chemically cleaning drilling/completion/packer brines [P]. United States Patent: 4 515 699. May 7, 1985.
- [11] Salisbury S L, Sloan R L, *et al.* Process for removing solids from a well drilling system [P]. United States Patent: 5, 678 631. Oct 21, 1997.
- [12] 杨建华. 特殊油井结盐分析及防治 [J]. *清洗世界*, 2006 22(6): 19-22.
- [13] 周长军, 赵伟, 王卫国, 等. 油井清防盐技术的研究应用 [J]. *中外能源* 2008 13(2): 61-64.
- [14] 李运鸽, 党延磊, 王振华, 等. 文 23 气井结盐分析及防治技术 [J]. *内蒙古石油化工* 2010(8): 185-187.
- [15] 尹伊娜, 唐祖友, 黄雪松, 等. 油井自生泡沫洗盐技术及其应用 [J]. *油田化学* 2008 25(2): 115-117.
- [16] 潘源敦, 刘成林, 徐海明. 湖北江陵凹陷深层高温富钾卤水特征及其成因探讨 [J]. *化工矿产地质*, 2011 33(2): 65-71.
- [17] 中国地质科学院矿产资源研究所. 江陵古近纪盐盆地富钾卤水调查评价 [R]. 北京: 中国地质科学院, 2011.
- [18] 牛自得, 程芳琴, 陈侠, 等. 水盐体系相图原理及其应用 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- [19] 中国地质科学院矿产资源研究所. 江陵古近纪盐盆地富钾卤水调查评价项目 2011 年度工作总结 [R]. 北京: 中国地质科学院, 2011.
- [20] 严叔澜, 旷理雄, 罗忠辉. 盆地模拟进展—以江汉盐湖盆地模拟为例 [J]. *江汉石油科技*, 1993 3(1): 1-5.
- [21] 许国鹏, 李仁东, 刘可群, 等. 基于 MODIS 数据的湖北省地表温度反演研究 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)* 2007 41(1): 143-146.
- [22] 锦辉公司. 岗钾 1 井录井监督报告 [R]. 荆州: 锦辉公司, 2011.
- [23] Здановский А Б и. тд. Справочник экспериментальных данных по растворимости многокомпонентных водно-солевых систем, Том III, 1961, Госхимздат, Ленинград: 267-270.
- [24] 刘震, 曾宪斌, 张万选. 沉积盆地地温与地层压力关系研究 [J]. *地质学报*, 1997 71(2): 180-184.
- [25] 江梅. 盐湖卤水输送设备的防结盐及防腐蚀 [J]. *化学矿物与加工* 2006(7): 33-34.
- [26] 蔡少武. 深井采卤的修井总结 [J]. *中国井矿盐* 2001, 32(1): 33-35.

Salting Law by Cooling Deep Potassium-bearing Brine in Jiangling Depression

LI Rui-qin¹, LIU Cheng-lin², CHEN Xia², CHEN Yong-zhi², WANG Chun-lian²

(1. *Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;*

2. *Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037, China)*

Abstract: Jiangling depression is located in the southwest of Jiangnan basin in Hubei province. The potassium-bearing brine with higher temperature and pressure had been discovered in Jiangling depression. The main problem is that salt plugs the well when the brine is mined. By consulting related materials, the geothermal temperature and depth in Jiangling depression is in a linear relationship. The paper focused on the influence of temperature on the solubility of NaCl. Data reveals that when the temperature is between 50°C and 150°C, the temperature is in good linear relationship with depth, only having a inflection point at 125°C. The research preliminarily explores the salting law in Gangjia 1 well, discovering that in the depth between 1 600 m and 2 400 m, the maximum salt separates out. According to the salting law, it's suggested to inject fresh water to the well in order to dilute brine and prevent salt plugging the well. The solubility of NaCl should be less than 28.3% and the fresh water should be injected to the depth of 2 400 m.

Key words: Jiangling depression; Gangjia 1 well; Brine; Salting law by cooling; Salt plugging the well