

宁晋石盐田水平连通井堵塞成因分析与认识

张旭, 郭家轩

(河北省煤田地质局第二地质队, 河北 邢台 054001)

摘要: 经过20多年的发展, 定向水平井连通法开采技术虽已日渐成熟, 被广泛应用到采卤、采碱等水溶开采领域, 但在开采生产过程中经常出现由各种原因引起的井堵现象。宁晋石盐田4对卤井, 自连通投产后多次发生堵塞, 经过修治后运行一段时间再次出现井堵, 频繁井堵致使卤井采卤周期短、经济效益差。针对该区采卤井频繁堵塞情况, 结合钻修井过程遇到的各种事故和采卤车间提供的相关数据, 经过认真分析总结, 主要从盐层蠕变挤破套管、夹石岩粉等杂物沉淀和盐结晶堵塞通道3个方面, 阐述了宁晋石盐田的井堵原因及预防措施, 可为以后卤井修井及新建卤井提供参考。

关键词: 定向水平连通井; 井堵; 盐层蠕变; 盐结晶; 卤井修井

中图分类号: P634.7 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)11-0065-06

Analysis and understanding of the clogging causes of horizontal connected well sets in Ningjin rock salt field

ZHANG Xu, GUO Jiakuan

(The Second Geological Team of Hebei Coal Geology Bureau, Xingtai Hebei 054001, China)

Abstract: Over more than 20 years of development, the well intersection method has been widely used in solution mining, such as salt extraction, soda extraction; however, in the production process of brine extraction well sets, well clogging often occurs due to various causes. Four pairs of brine well sets in Ningjin salt field have been blocked for many times since they were put into production. In view of the frequent blockage, in reference to various accidents encountered in the drilling and workover processes and the relevant data from brine extraction, and with careful analysis and summary, the causes of well clogging and the preventive measures for Ningjinshi salt field are expounded in terms of squeeze-breaking of casing due to salt bed creeping, sedimentation of insolubles and salt crystallization, so as to provide guidance and suggestions for well workover and new brine well construction in the future.

Key words: horizontal connected well; well clogging; salt creep; salt crystallization; brine well workover

随着钻井设备和钻井技术、测井仪器和测井技术的不断发展与进步, 定向水平井连通法采卤成为目前最先进的钻井水溶开采方法^[1]。该方法较单井对流法采卤有明显的“三高一低”特点, 即卤水产量高、浓度高、矿石采收率高、投资成本低。另外, 对接点不受地层条件限制, 适用于各种构造和不同埋深、厚度、品位盐矿的开采。

河北宁晋石盐田采卤生产均采用定向水平井连通水溶开采法, 自连通投产后多次发生卤井堵塞

情况。针对本区卤井生产过程中多次出现的井堵问题, 分析总结了堵塞成因, 提出了合理化建议, 期许对本区后续的钻修井工程提供指导^[2]。

1 矿区盐层、构造概况

1.1 盐矿层

本矿区盐矿层主要赋存在古近系沙河街组一段地层中, 埋深在2600~2885 m。中上部地层岩性为暗紫红、棕红、灰绿色泥岩、砂质泥岩与紫红、灰

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-06-09 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.11.010

作者简介: 张旭, 男, 汉族, 1987年生, 工程师, 勘查技术与工程专业, 主要从事矿产资源勘查工作, 河北省邢台市高开区河北工业大学科技园, mtedzhangxu@163.com。

引用格式: 张旭, 郭家轩. 宁晋石盐田水平连通井堵塞成因分析与认识[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 65-70.

ZHANG Xu, GUO Jiakuan. Analysis and understanding of the clogging causes of horizontal connected well sets in Ningjin rock salt field [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 65-70.

绿、灰白色粉细砂岩互层,间夹若干层泥灰岩、灰白色硬石膏薄层;下部主要为灰、灰白色泥质灰岩、膏质、灰质泥岩与石盐互层;底部岩性主要为褐红色白云质泥岩、灰色灰质泥岩。盐矿层结构较简单,顶板为泥灰岩夹硬石膏薄层,底板为灰色泥灰岩、泥质白云岩。

1.2 构造

本区位于华北断凹之临清台陷之束鹿断凹之中部,向西为晋县断凹,向东为新河断凸,向南为南和断凸,向北为冀中台陷^[3]。区内盐矿层总体走向北东,倾向南东,地层倾角近似 $1^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 。在以往钻井施工过程中未遇到断层,盐矿层呈缓倾斜的单斜发育,断层稀少,对盐矿层影响不大。

2 矿区卤井概况

目前矿区内共有4对卤井,Y1、Y2、Y6、Y10井为2008年到2012年完工的直井,Y3井为2014年底完工的定向水平井,与Y1井组成一对采卤井;Y4、Y5、Y9井为2018年完工的定向水平井,分别与Y2、Y6、Y10井组成采卤井组,对接连通一段时间后4对井组先后堵塞,又分别对其进行修井,通过通井、开窗侧钻等方法使其重新连通。对接连通井井身结构示意图见图1。

3 卤井堵塞原因分析

3.1 盐层蠕变挤破套管

在深井、超深井中,盐岩层在上覆岩层压力和地温作用下会产生蠕变。由于非均匀地应力的作用^[4],更加剧了盐岩层蠕变,导致套管破损,卤水过流面积变小,破损严重时甚至直接造成通道闭合,导致井组堵塞。

矿区内直井均出现技术套管被挤破现象(见表1),具体说明本区地应力大于套管抗挤强度。假设盐层的水平应力^[5]与垂直应力接近,上覆地层岩石平均密度为 2.2 g/cm^3 ,以Y10井套管变形位置2710 m计算,则水平应力为59.62 MPa,而所用 $\text{O}177.8\text{ mm}\times 10.36\text{ mm}$ (N80)技术套管最大抗挤强度为48.4 MPa,所以出现了矿区内直井套管被挤破现象。

另外,套管在卤水中长时间使用极易被腐蚀,腐蚀形式包括酸腐蚀、电化学腐蚀和氧化腐蚀等^[6-7]。本区盐井返出的卤水浓度高,达到 300 g/L 以上,通

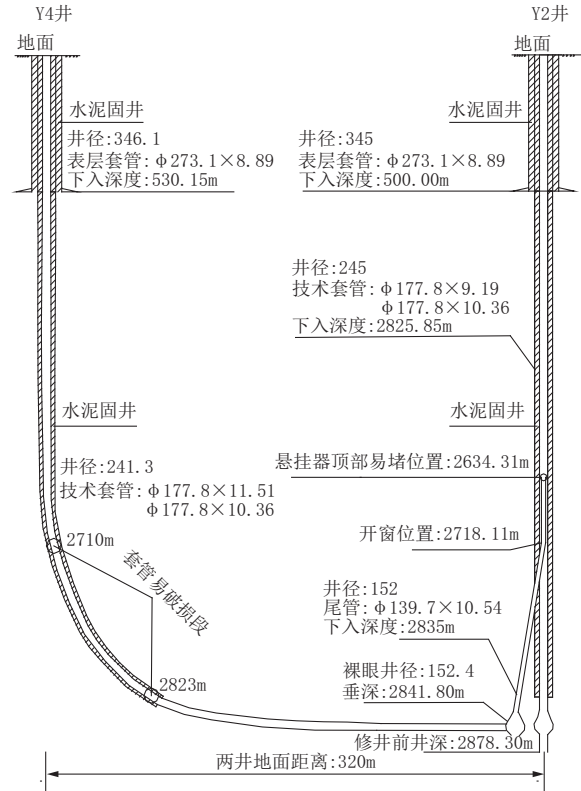


图1 对接连通井井身结构示意图

Fig.1 Structure of the intersected well set

表1 各直井技术套管变形位置统计

Table 1 Casing damage depth in vertical wells

井号	完井时间	修井时间	终孔深度/m	变形位置/ m
Y1井	2008年4月	2012年10月	2925.0	2735
				2716~2720
				2725~2730
Y2井	2008年10月	2018年1月	2878.3	2740~2747
				2809~2814
				2816~2823
Y6井	2012年2月	2019年3月	2894.19	2797~2803
Y10井	2011年9月	2019年12月	2893.79	2710

过图2钻具和配水管的腐蚀情况判断长时间浸泡的套管受腐蚀的可能性也比较大,腐蚀后的套管更容易被挤破。

多年以来深层盐层钻井一直是钻井工程重大难题之一,能否顺利完井更是后期顺利采卤的重要保障。盐层的蠕变特性^[8]在施工过程中经常造成井眼失稳、卡钻、挤破套管^[9]等事故,给钻修井工作和后期采卤造成重大经济损失。

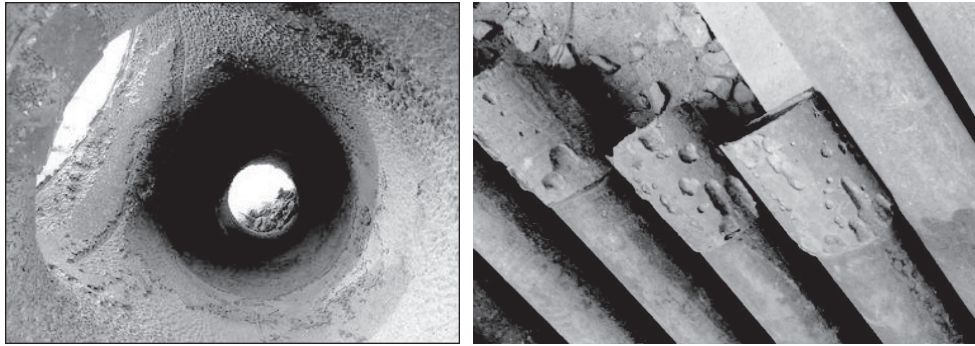


图2 钻杆和配水管腐蚀情况

Fig.2 Corrosion of drill pipe and water supply pipe

3.2 夹石、岩粉等杂物沉淀

本区各石盐矿层均含有大于0.1 m的夹石,主要岩性为灰质泥岩、石膏质泥岩和泥灰岩,呈不等厚

状分布于各石盐矿层中。通过对部分采样样品进行力学性能测试结果分析,本区夹石厚度较薄,抗压强度较低,具体测试结果见表2。

表2 石盐矿层夹石岩石力学性能测试结果

Table 2 Test results of mechanical properties of rock inclusions in the rock salt layer

采样钻孔	采样位置	岩性	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa
Y1	3号石盐矿层夹石	石膏质泥岩	15.2	0.59	2.64
	8号石盐矿层夹石	灰质泥岩	18.4	1.76	4.9
	8号石盐矿层夹石	泥灰岩	20.7	1.84	6.62
Y2	4号石盐矿层夹石	石膏质泥岩	20.4	0.9	3.8

本区对接井井距都在300 m左右,在水溶开采过程中,由于石盐矿层力学性能差,形成一定的溶腔后,石盐矿层及薄层夹石层因跨度过大逐渐垮落,矿石被溶解,而部分夹石则成为矿渣沉至溶腔或连通道内,夹石矿渣量会随着开采的不断进行而逐渐沉积增多,聚积到一定量时,造成连通通道的堵塞。

3.3 盐结晶堵塞通道

目前国内外盐井开采时造成井堵的重要原因由盐结晶引起的。饱和卤水由溶腔返至地面过程中,随着地温梯度的变化,温度逐渐降低,盐的溶解度也不断减小,并形成晶体析出,附着在管道、阀门等不光滑的位置或变径处^[10],久而久之,盐结晶使通道逐渐变小甚至堵塞(见图3),最终导致井堵。

本区石盐矿层主要矿物以NaCl为主,CaSO₄次之,还有KCl、Na₂SO₄、MgCl₂等少量其它矿物。根据几种单盐矿物溶解度曲线可知,NaCl溶解度随温度升高变化较小,CaSO₄微溶于水,溶解度随温度升高变化不大;KCl和MgCl₂溶解度随温度升高而增大;Na₂SO₄在40℃前溶解度随温度升高逐渐增大,

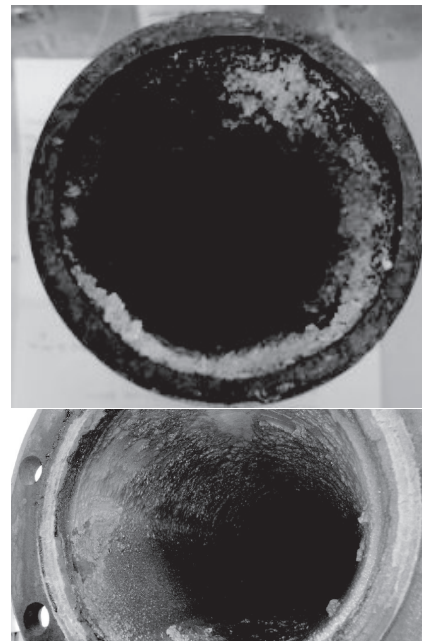


图3 钻具内和阀门处盐结晶情况

Fig.3 Salt crystallization in the drill pipe and the valve

40℃之后随温度升高缓慢降低。具体情况见图4。

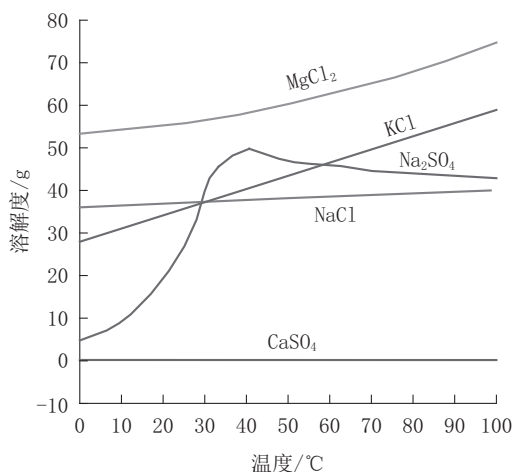


图4 几种单盐矿物溶解度曲线

Fig.4 Solubility curves of several single salt minerals

本区采卤位置在埋深2700~2850 m,溶腔温度86~96℃,除CaSO₄外各矿物溶解度均较高,很容易形成饱和甚至过饱和溶液,在卤水返至地面过程中,温度能达到60℃左右,随温度的逐渐降低,各矿物溶解度均降低(Na₂SO₄除外),析出晶体后很容易造成通道的堵塞。

4 卤井堵塞预防措施

4.1 使用高强度抗挤毁套管、减缓套管腐蚀

随着本区卤井后期开发与生产的需要,已认识到使用高强度抗挤毁套管的重要性及必要性,修井过程中发现前期施工直井均有技术套管被挤破的现象,因此,后续施工的斜井在盐系地层均使用高强度抗挤毁套管。具体情况见表3。

表3 后续施工卤井情况

Table 3 Casing for later drilled brine wells

井号	Y4井	Y5井	Y9井
完井时间	2018年7月	2018年6月	2018年6月
终孔深度/m	3080.5	3071.4	3101.83
技术套管规格/mm	Ø177.8×10.36(N80Q)	Ø177.8×10.36(N80Q)	Ø177.8×10.36(N80Q)
技术套管下深/m	0~2361.2	0~2171.65	0~2159.73
技术套管规格/mm	Ø177.8×11.51(TP125TT)	Ø177.8×11.51(TP125TT)	Ø177.8×11.51(TP125TT)
技术套管下深/m	2361.2~2873.64	2171.65~2873.77	2159.73~2872.28
修井时间	2019年4月	2019年1月	2018年8月
尾管规格/mm	Ø139.7×10.54(P110)	Ø139.7×10.54(P110)	Ø139.7×10.54(P110)
尾管下深/m	2629.05~2743.75	2723.95~2917.4	2762.63~2898

盐系地层使用的TP125TT型技术套管的抗外挤强度>80.7 MPa,修井后所下P110型尾管最大抗外挤强度100.3 MPa,适用于本区复杂地质条件下的盐岩开采。后期修井过程中,尚未发现高强度套管损坏情况。

虽然所用高强度抗外挤套管,但也存在套管服务年限的问题,长时间卤水腐蚀和高强度开采也会加剧套管的腐蚀和磨损,也应注意套管使用寿命。

对于套管的腐蚀现象,应采取相应的措施,一是采取合理的除氯工艺,调整、控制pH值和游离氯含量;二是对管柱进行涂层防腐,如无溶剂环氧液体涂料具有较好的耐盐卤腐蚀性,可采用喷涂工艺、单管预制、一次喷涂成膜等方式提高管柱防腐性能^[11]。

4.2 预防盐结晶

卤水在开采过程中形成结晶是一个普遍的问题,也是影响卤井生产的一个主要原因,如果预防和处理不当,就会发生井堵事故。结晶的形成与卤水温度、饱和度和流速等多种因素相关,因此预防盐结晶主要从3方面入手。

4.2.1 降低卤水饱和度

为防止盐结晶,最直接有效的方法是降低卤水饱和度^[12],即从卤水饱和度数据计算配兑淡水量,使返至地面的卤水在地表温度压力条件下达到亚饱和状态,以保证卤水质量。配兑淡水量计算公式为:

$$m = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1} \right) M \quad (1)$$

式中: m ——配兑淡水量, m³/h; C_1 ——井下卤水温

度 T_1 时的饱和度; C_2 ——返至地面卤水温度 T_2 时的饱和度; M ——采卤管出口出卤量, m^3/h 。

不同温度下 NaCl 的溶解度和饱和度见表 4。

表 4 不同温度下 NaCl 的溶解度和饱和度
Table 4 NaCl solubility and saturation at different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	溶解度/ $[\text{g}\cdot(100\text{g})^{-1}]$	饱和度/ $\%$
0	35.7	26.31
10	35.8	26.36
20	36.0	26.47
30	36.3	26.63
40	36.6	26.79
50	37.0	27.01
60	37.3	27.17
70	37.8	27.43
80	38.4	27.75
90	39.0	28.06
100	39.8	28.47

本区 2850 m 处矿层温度 $96\text{ }^{\circ}\text{C}$, 采卤管出口温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出卤量为 $100\text{ m}^3/\text{h}$, 根据表 4 数据, 插值估算得到 $96\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的饱和度为 28.31% , 根据公式(1)计算可得, 需要配兑淡水 $4.02\text{ m}^3/\text{h}$, 地面卤水温度越低需要配兑淡水量越多。在采卤生产过程中, 为防止技术套管内出现盐结晶, 通过给反卤井下配水管降低反卤浓度^[13], 预防结晶的产生, 本区配水流量控制在 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 左右, 配水管采用 $\text{O}60.32\text{ mm}\times 6.45\text{ mm}$ (N80Q) 油管, 下入深度距技术套管底端 $3\sim 5\text{ m}$ 。

4.2.2 控制出卤流速

在采卤水过程中, 通过控制卤水流速, 能起到预防或减少盐结晶现象。采卤管内卤水的流动会对管壁上附着的晶体产生流体剪切力^[14], 可以使晶体脱离管内壁或分解成许多小晶粒, 起到抑制晶体生长的作用。

根据相关实验数据可知, 通过模拟管柱内出现内壁结晶现象, 当泵流量在 0 和 $3\text{ m}^3/\text{h}$ 时, 管内壁结晶盐厚度为 9 m ; 当泵流量在 5 、 10 、 20 和 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 时, 管内壁未形成明显结晶。

饱和卤水在上返过程中, 流体剪切力的作用能减缓晶体的生长速度, 且流速越大, 晶体生长越不明显。在实际采卤工作中, 应尽量避免排卤管道内饱

和卤水缓慢上升, 应合理提高出卤流速。若确实需要停井时, 应向排卤管内注入淡水, 降低卤水浓度, 防止晶体在过饱和卤水中迅速生长而造成井堵。

根据图 3 室内实验数据^[15]可知, 在一定范围内, 岩盐的溶解速度随卤水流速的增大而增大, 当流速达到一定值后, 溶解速率开始下降, 因此在生产过程中要适当控制淡水注入流速。正常采卤时, 淡水注入流速一般控制在 $100\sim 120\text{ m}^3/\text{h}$, 使岩盐矿物的溶解效果达到最佳, 预防岩盐结晶堵塞。

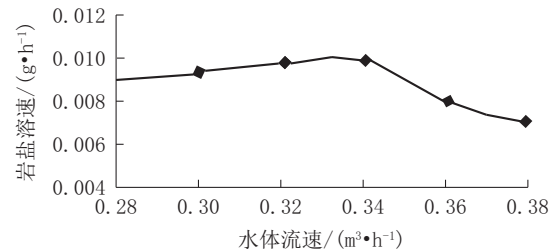


图 3 岩盐溶速与水体流速的关系

Fig.3 Relationship between dissolution rate of rock salt and solvent flow rate

5 结语

宁晋盐井连通后又井堵的主要原因是盐层蠕变挤毁套管、岩粉夹石沉淀堵塞通道和盐结晶堵塞通道 3 个方面。

高强度抗挤毁套管已在本区广泛使用, 能从根本上抵抗盐层蠕变对套管造成的伤害, 有效地保护好连通通道。盐层蠕变到底能产生多大的地应力是未知的, 建议在本区进行地应力测量工作, 掌握本区 3000 m 深的地应力情况, 根据测得的地应力数据来选择适合本区的套管。

后续新建工程要慎重考虑井距, 井距过大, 建井周期长, 还会造成溶腔因跨度大失稳造成顶板垮塌; 井距过小, 淡水与盐层的接触面过小, 溶解盐的时间短, 卤井不可能较长时间保持产出高浓卤水, 因此应根据盐层的埋深、品位、夹矸、溶解特性等相关数据设计适合本区的合理井距。

采卤过程中要根据实际情况来决定配水管的深浅, 另外要实时准确监测出卤水温度和饱和度, 适时调整卤水流速和配水量, 达到最有效地降低卤水浓度, 尽可能防止盐结晶的产生。

参考文献(References):

- [1] 岳盈括. 大汶口盆地岩盐对接井钻探施工工艺研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(3): 31-37, 43.
YUE Yingkuo. Study on drilling technology for rock-salt solution well intersection in Dawenkou Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(3): 31-37, 43.
- [2] 涂运中, 张正元, 刘海翔, 等. 土耳其卡赞天然碱溶采对接井堵井原因分析及修复[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(8): 64-71.
TU Yunzhong, ZHANG Zhengyuan, LIU Haixiang, et al. Blockage in intersected solution mining well sets and workover techniques of Kazan Trona Mine in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(8): 64-71.
- [3] 张旭. 宁晋石盐田Y9-Y10井组对接连通钻修井技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(9): 69-73.
ZHANG Xu. Intersection drilling and workover of the well pair Y9-Y10 in Ningjin Rock Salt Field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(9): 69-73.
- [4] 刘一帆, 苏醒, 范垂言, 等. 土耳其天然碱矿水平对接井井下事故预防与处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(8): 72-76.
LIU Yifeng, SU Xing, FAN Chuiyan, et al. Prevention and treatment of downhole incidents in drilling horizontal intersected well sets at trona mines in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(8): 72-76.
- [5] 王炳印, 邓金根, 蔚宝华. 盐层套管外载的有限元计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2741-2745.
WANG Bingyin, DENG Jingen, WEI Baohua. Calculation of the external load acted on casing due to salt formation creep with finite element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2741-2745.
- [6] 张登庆, 胡红萍, 宫敬, 等. 碳钢在卤水环境中的腐蚀行为研究[J]. 化工机械, 2005(3): 186-189.
ZHANG Dengqing, HU Hongping, GONG Jing, et al. Researches on the corrosion behavior of carbon steel in bitter[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2005(3): 186-189.
- [7] 庄贵涛, 于勇, 董磊, 等. 高矿化度油田卤水中pH值对20碳钢在硫酸盐还原菌作用下腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2015, 48(4): 59-62.
ZHUANG Guitao, YU Yong, DONG Lei, et al. Effect of pH value of high salinity oilfield brine on corrosion behavior of low carbon steel in the presence of sulfate reducing bacteria[J]. Materials Protection, 2015, 48(4): 59-62.
- [8] 曾义金, 陈勉. 深层盐膏岩蠕动规律研究[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(6): 1-3.
ZENG Yijin, CHEN Mian. Laws study on deep salt-bed creeping[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 24(6): 1-3.
- [9] 赵金洲. 深井蠕变地层钻井液密度优化技术[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 915-919.
ZHAO Jinzhou. Drilling mud density optimum technique of creep stratum in deep borehole[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 915-919.
- [10] 杨正凯, 徐卫华, 胡晓亮. 水溶开采盐井生产防结晶措施及认识[J]. 中国井矿盐, 2015, 46(5): 29-30.
YANG Zhengkai, XU Weihua, HU Xiaoliang. Crystallization prevention measures and understanding of water soluble salt mining well production[J]. China Well and Rock Salt, 2015, 46(5): 29-30.
- [11] 隆东, 涂运中, 林修阔, 等. 土耳其贝帕扎里矿区边缘对接井施工中的问题分析与处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(8): 35-42.
LONG Dong, TU Yunzhong, LIN Xiukuo, et al. Analysis and solutions for the problems in drilling of horizontal intersected well sets at the boundary of Beypazari Trona Mine in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(8): 35-42.
- [12] 樊传忠. 采卤深井预防结晶堵塞的措施[J]. 中国井矿盐, 2017, 48(3): 16-19.
FAN Chuazhong. Preventive measures of crystallization blockage in deep well mining[J]. China Well and Rock Salt, 2017, 48(3): 16-19.
- [13] 王会林, 魏自强. 浅谈盐井结晶堵的预防及解堵措施[J]. 中国井矿盐, 2019, 50(2): 28-30.
WANG Huilin, WEI Ziqiang. Brief discussion on the prevention and solution measures of crystallization plug in salt well[J]. China Well and Rock Salt, 2019, 50(2): 28-30.
- [14] 金虢. 盐穴储气库排卤管管柱晶堵规律研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
JIN Xiao. Study on crystallization of brine drainage pipe in the salt cavern gas-storage[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [15] 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.
LIANG Weiguo, LI Zhiping, ZHAO Yangsheng. Experimental study on solution mining of salt deposit[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(1): 54-57.

(编辑 荐华)