

察尔汗盐湖单级与增程驱动溶解 固体钾矿试验对比研究

王文祥¹⁾, 李文鹏¹⁾, 安永会¹⁾, 郝爱兵²⁾, 焦鹏程³⁾, 刘成林³⁾, 刘振英⁴⁾

1) 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定, 071051;

2) 中国地质调查局, 北京, 100037; 3) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037;

4) 石家庄经济学院, 石家庄, 050031

内容提要: 钾盐是一种重要的战略矿产资源, 为了合理开发利用察尔汗盐湖的低品位钾矿, 在察尔汗盐湖开展了两次野外现场溶矿试验。本文以两次野外现场试验监测数据为基础, 对比分析了两次野外溶矿试验的等水位线图、水位剖面曲线、典型孔位与典型剖面的 K^+ 浓度变化, 各项指标表明, 增程驱动溶矿模式达到了预期试验目的, 其溶矿效果优于单级驱动溶矿模式。

关键词: 察尔汗盐湖; 驱动溶解; 钾盐; 开采

钾盐是农用钾肥的生产原料, 在我国属大宗紧缺矿种。我国是个农业大国, 但目前我国钾肥的对外依存度高达 70% 以上。受资源贫乏制约及国际钾肥垄断联盟的控制, 我国钾肥的价格近年来不断飙升, 大大增加了农民种粮成本, 影响到了我国粮食安全。

察尔汗盐湖中含有 2.96 亿吨低品位固体钾资源, 这些资源就相当于一个超大型钾矿。察尔汗盐湖首采区的采卤实践证明, 随着抽卤的不断进行, 晶间卤水的水位不断下降, 如果继续发展下去, 上层的固体钾矿势必成为“呆矿”(郝爱兵, 1995)。已有资料显示(王石军, 2005), 察尔汗矿区部分固体钾盐因 1989 年特大洪水已被溶解转化为液体矿, 即天然的低品位固体钾盐发生液化, 进入了卤水中。一些研究者曾对溶解驱动进行了室内外试验研究和数值模拟(青海盐湖勘查开发研究院^①, 1990; 李文鹏, 1994; 郝爱兵, 1997; 郝爱兵, 2003; 李文鹏, 2008), 并得到了一些重要认识。

为了开采固体钾盐, 2007 年在青海察尔汗盐湖别勒滩区段开展了单级驱动溶矿试验, 利用涩聂湖的湖水驱动溶解地层中的固体钾盐, 研究结果表明溶矿效果明显(王文祥, 2010)。但是同时存在 2 个问题: 地层中水位抬升不明显和存在盐溶流。为了

解决这一问题, 2011 年开展了增程驱动溶矿试验, 即在原补水渠的下游开挖第二级补水渠, 以期解决这两个问题。

1 研究区概况

察尔汗盐湖位于柴达木盆地的中东部, 地理坐标东经 $94^{\circ} \sim 96^{\circ}$, 北纬 $36^{\circ} \sim 38^{\circ}$, 东西长 168 km, 南北宽 20 ~ 40 km, 面积 4704.8 km²。研究区目标盐层赋存卤水, 为潜水, 水位埋深 3 ~ 4 m。卤水密度 1.23 ~ 1.26 g/cm³, 矿化度 337.76 ~ 379.19 g/L, K^+ 含量可达 14.3 g/L, 已浓缩演化为石盐结晶析出后的饱和卤水, 属于石盐水及富钾石盐水、富钾光卤石水, 为氯化物型水和硫酸镁亚型水。别勒滩区段晶间卤水的补给来源主要是大气降水入渗、外围松散层孔隙水的侧向补给、来自下部的越流补给和大别勒湖、涩聂湖湖水的补给。天然条件下晶间卤水的排泄方式主要是蒸发和向湖泊排泄。近年来, 在别勒滩区段开挖若干条渠道, 在渠道的一端抽取晶间卤水, 已成为盐层晶间卤水的重要排泄方式(中国地质科学院矿产资源研究所, 2010)。

试验区地层中的矿物主要是石盐, 也含有光卤石、钾石盐、石膏、芒硝、水氯镁石及碎屑沉积物。盐层中石盐晶体之间孔隙较均匀、连通性较好, 钻孔岩

注: 本文为 863 计划(“青海盐湖低品位钾盐增程驱动溶矿开采技术”, 课题编号 2009AA06Z107) 及地质调查项目“黑河流域重点地区水文地质调查(编号 12120114018401)”的成果。

收稿日期: 2013-11-01; 改回日期: 2015-08-11。责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2015.05.019

作者简介: 王文祥, 男, 1985 年生。博士, 工程师。主要从事水文地质及水文地球化学研究。Email: hiwangwenxiang@126.com。

心常见蜂窝状孔隙,盐层孔隙度大者达 15% ~ 35%,水平渗透系数为 390 m/d,埋深 30 m 以浅(周训,2006;王文祥,2010)。试验区地层中 KCl、NaCl、MgCl₂ 的平均含量为分别为 2.15%、60.91%、5.36%^②。

2 两次试验简介

两次野外驱动溶解固体钾矿的试验时间分别为 2007 年 6 月~2007 年 9 月、2011 年 11 月~2012 年 3 月。第一次溶矿试验称为单级驱动溶矿试验,试验区内设有一条补水渠,第二次溶矿试验称为增程驱动溶矿试验,试验区内设有两条补水渠。

两次试验所用的溶剂均为涩聂湖的湖水,是老卤、乌图美仁河河水与盐层混合的溶液,但是由于不同年份汇入的淡水量不同,其湖水成分也有变化,溶剂成分如表 1。两次试验场地位于别勒滩西部,如图 1。两次试验都位于图 1 中的试验区,但两次试验场地相隔 5 km 以上,第二次试验的区域也未受第一次试验影响。

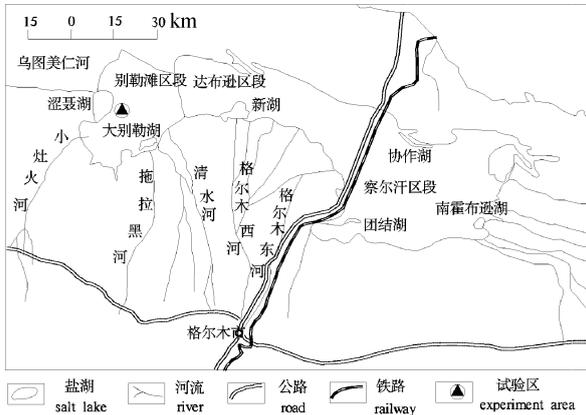


图 1 察尔汗盐湖试验区位置示意图

Fig. 1 Locations of test area in Qarhan salt lake

单级驱动溶矿试验共设置了 4 列 × 5 排共 20

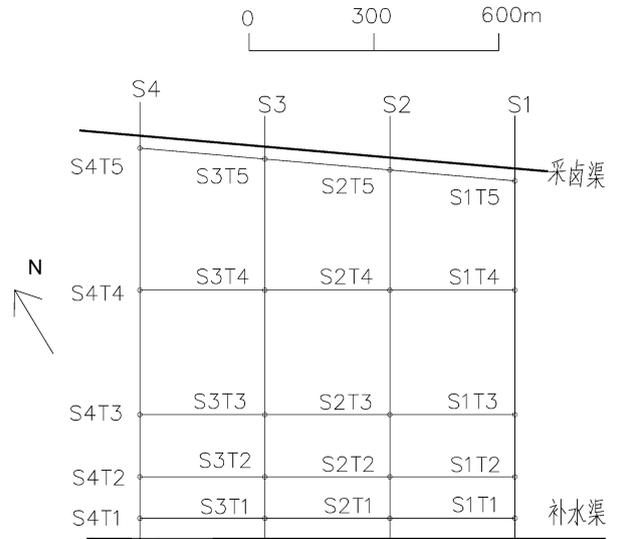


图 2 单级驱动溶矿试验监测孔布设示意图

Fig. 2 Monitoring wells locations of one channel dissolving and driving test

个位置的监测孔,如图 2,试验区的上下游分别设有补水渠和采卤渠。补水渠的作用是向地层中补给溶剂,渠水的水位较高,所以溶剂会不断的向地层中补给。采卤渠的水位较低,并且低于晶间卤水水位,其作用是采集地层中排泄出来的卤水,并将卤水输送到盐田中晒取钾盐。补水渠与采卤渠使试验区中的晶间卤水有了水头差,从而使得低钾的溶剂在地层中流动,并溶解固体钾盐,最后排泄到采卤渠中。

增程驱动溶矿试验设有 2 列 × 6 排共 12 个位置的监测孔,如图 3。试验区设有两条补水渠,两补水渠的距离为 500m,试验区的下游设有一条排水渠。增程驱动试验中补水渠和采卤渠的作用与单级驱动试验相同,都是为了使地层中形成水头差。不同的是增程驱动溶矿试验设有两条补水渠,这两条补水渠通过其他渠道相互连通,并向地层中补给溶剂。

对比两次野外试验的现场布置可以看出,单级驱动溶矿试验试验区的水动力条件与增程驱动溶矿试验第二级补水渠下游试验区的水动力条件相似,所以在下文的分析中,会将这两个相似区域的水动力场和水化学场进行对比。

表 1 两次试验溶剂对比

Table 1 Comparison of solvent of two tests

溶剂	密度 (kg/m ³)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS
		(g/L)						
单级驱动试验	1210	2.55	119.35	0.88	7.09	186.50	9.73	326.09
增程驱动试验	1229	1.58	13.44	0.45	65.39	211.18	3.43	295.47

注:TDS 指总溶解固体。

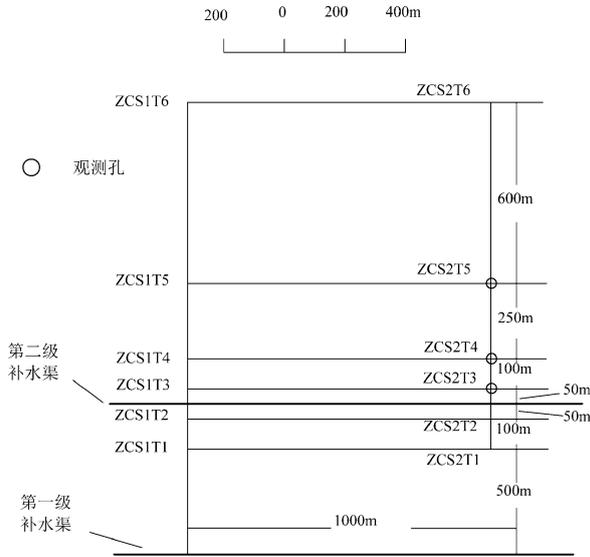


图 3 增程驱动溶矿试验监测点布设示意图
Fig. 3 Monitoring wells locations of multiple channel dissolving and driving test

游方向,靠近补水渠的区域水力坡度较大,等水位线比较密集,远离补水渠的区域,水力坡度减小,等水位线分散。由于受到两级补水渠的影响,靠近补水渠的区域等水位线近似平行于补水渠。远离补水渠的区域,由于受到支渠的影响,S1 列的水位高于 S2 列的水位,等水位线不平行于补水渠。

对比以上两图中的试验区水位可以看出,增程驱动溶矿模式下晶间卤水水位明显高于单级驱动溶矿模式,说明增程驱动溶矿模式明显提高了晶间卤水水位。

表 3 增程驱动溶矿试验开始 8 天后水位埋深表
Table 3 The eighth day's water level depth table of multiple channel dissolving and driving test

位置	埋深(m)	位置	埋深(m)
ZCS1T1	0.89	ZCS2T1	0.73
ZCS1T2	0.57	ZCS2T2	0.63
ZCS1T3	0.50	ZCS2T3	0.57
ZCS1T4	1.11	ZCS2T4	1.05
ZCS1T5	1.62	ZCS2T5	2.15
ZCS1T6	1.90	ZCS2T6	2.53
渠道	0.40		

3 水位对比

3.1 等水位线对比

如图 4 为单级驱动溶矿试验开始 7 天后等水位线图,从图中可以看出,试验进行 7 天后,供卤渠附近等水位线较密,水力坡度较大,表明水位变化较大,远离供卤渠,等水位线变稀,水力坡度较小,表明水位变化不大。受补水渠和采卤渠的控制,试验区内等水位线相对较平行。

表 2 单级驱动溶矿试验开始 7 天后水位埋深表
Table 2 The seventh day's water level depth table of one channel dissolving and driving test

孔位	埋深(m)	孔位	埋深(m)
S1T1	4.05	S3T1	3.31
S1T2	5.53	S3T2	5.55
S1T3	5.70	S3T3	5.60
S1T4	6.02	S3T4	5.81
S1T5	6.18	S3T5	6.06
S2T1	4.69	S4T1	3.81
S2T2	5.51	S4T2	5.54
S2T3	5.65	S4T3	5.61
S2T4	5.87	S4T4	5.71
S2T5	6.12	S4T5	6.00

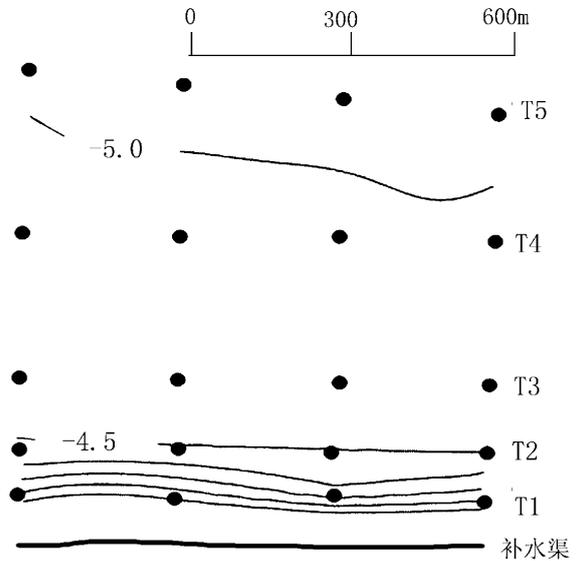


图 4 单级驱动溶矿试验开始 7 天后等水位线图
(水位值的计算以地表为 0 基准面,等高距 0.5m)
Fig. 4 The seventh day's water level contour map of one channel dissolving and driving test (The water level value was calculated with ground surface as the 0 datum plane, contour interval in 0.5m)

如图 5 为增程驱动溶矿试验第 8 天时的等水位线图,从图中可以看出,在两补水渠之间的区域,晶间卤水水位低于补水渠的水位。在第二级补水渠下

3.2 剖面水位变化对比

如图 6 为单级驱动溶矿试验与增程驱动溶矿试

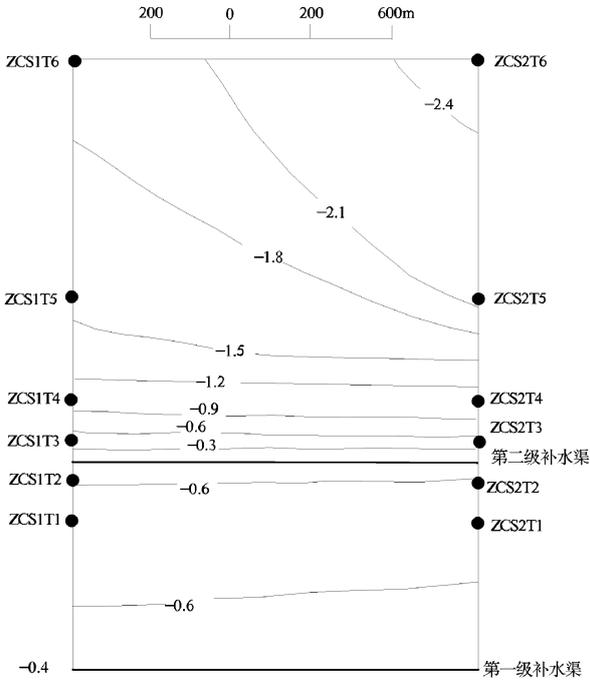


图5 增程驱动溶矿试验第8天时的等水位线图
(水位值的计算以地表为0基准面,等高距0.3m)

Fig. 5 The eighth day's water level contour map of multiple channel dissolving and driving test (The water level value was calculated with ground surface as the 0 datum plane, contour interval in 0.3m)

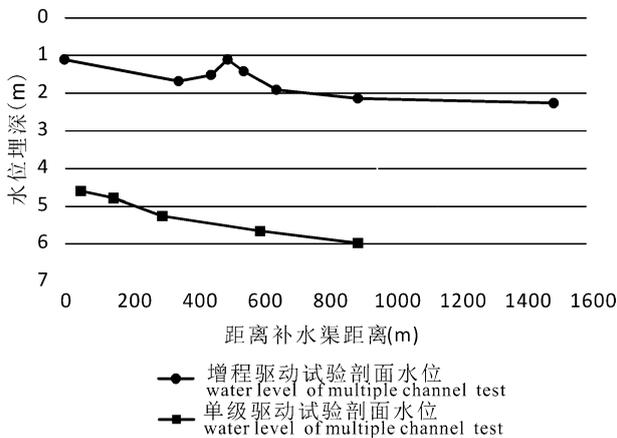


图6 单级与增程驱动溶矿试验末期剖面水位对比图
Fig. 6 Comparison of profile water level in final phase of two tests

验末期剖面水位对比图,图中单级驱动溶矿试验剖面水位曲线的横坐标为距离补水渠的距离,增程驱动溶矿试验剖面水位曲线的横坐标为距离第一级补水渠的距离。对比横坐标为0 m 附近的水位,增程

驱动溶矿模式下试验区晶间卤水水位明显高于单级驱动溶矿的晶间卤水水位,这一点可能是由于单级驱动试验补水渠析盐造成渗透性降低造成的;对比横坐标500 m 附近的水位,由于第二级补水渠的存在,使得第二级补水渠附近的水位较单级驱动溶矿试验的水位有了明显的升高,说明在增程驱动溶矿模式下,地层中晶间卤水的水位得到了提高,有效增大了溶矿空间。表4 为两次溶矿试验水位数据表。

4 水化学对比

4.1 K⁺ 浓度历时变化对比

在单级驱动溶矿试验中,T1 排的监测孔与补水渠的距离是50 m,在增程驱动溶矿试验中,T3 排的监测孔与第二级补水渠的距离是50 m,因此,在本节分析中对比这两排区域的代表性孔位离子浓度的变化。表5 为典型孔位的K⁺ 浓度表。

表4 单级与增程驱动溶矿试验末期剖面水位数据表 (单位:m)

Table 4 Water level of two tests (unit: m)

增程驱动溶矿试验		单级驱动溶矿试验	
距离	埋深	距离	埋深
0	1.10	50	4.60
350	1.68	150	4.78
450	1.52	300	5.26
500	1.10	600	5.66
550	1.41	900	5.99
650	1.91		
900	2.14		
1500	2.26		

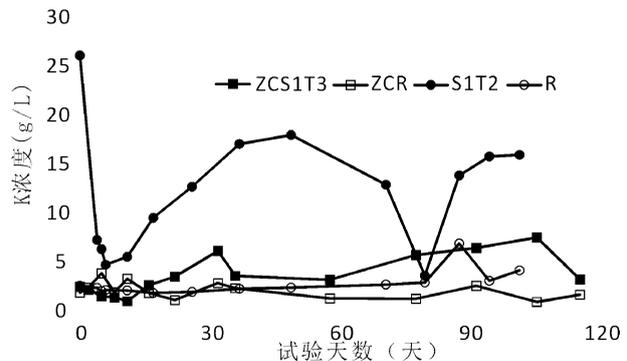


图7 两次溶矿试验典型孔位K⁺ 浓度对比历时曲线
Fig. 7 Typical wells K⁺ concentration duration curve of two tests

如图7 为两次溶矿试验K⁺ 浓度对比历时曲线,空心和实心圆分别为单级驱动溶矿试验的溶剂和S2T1 孔K⁺ 浓度变化曲线,空心和实心方块分别为

增程驱动溶矿试验的溶剂和 ZCS1T3 孔 K^+ 浓度变化曲线。从图中可以看出,单级驱动溶矿试验所用溶剂中 K^+ 浓度略高于增程驱动溶矿试验中所用溶剂的 K^+ 浓度。溶剂流经 50m 地层,在单级驱动溶矿试验中, K^+ 浓度最高达到了 18g/L,在增程驱动溶矿试验中, K^+ 浓度最高达到了 8g/L,从图中也可以看出,单级驱动溶矿试验中 S2T1 孔 K^+ 浓度历时曲线位于增程驱动溶矿试验中 ZCS1T3 孔 K^+ 浓度历时曲线的上方,产生这种差距的原因可能有两方面:(1)单级驱动溶矿试验的试验区离涩聂湖较远,基本处于天然状态下,固体中 K 品位比较高,而增程驱动溶矿试验区上游的第一级补水渠在试验开始之前原本就是存在的,是盐湖集团进行工业生产的补水渠,并且一直在使用中,即在试验开始之前,该处区域的地层就被溶解了一段时间,所以增程驱动溶矿试验的试验区中固相 K 的品位比单级驱动溶矿试验试验区固相中 K 的品位低;(2)单级驱动溶矿试验的供卤渠在试验进行一段时间后渠壁析盐,使供卤渠的渗透能力下降,溶剂下渗到地层中的速度较慢,从而使溶剂在地层中流动的速度较慢,可以与地层发生较充分的固液转化反应,增程驱动溶矿试验所使用的溶剂仍为涩聂湖的湖水,但是湖水的 TDS 降低,所以在试验时渠壁没有结盐,甚至溶塌,这使得溶剂在地层中运动的速度较快,发生固液反应的时间相对较短,从而溶出固体 K 的量较少。

表 5 单级与增程驱动溶矿试验典型孔位 K^+ 浓度表(单位:g/L)

Table 5 Typical well K^+ concentration of two tests (unit: g/L)

增程驱动溶矿试验			单级驱动溶矿试验		
试验天数	ZCS1T3	渠道	试验天数	S1T2	渠道
0	2.60	2.01	0	26.25	2.72
2	2.32	2.54	4	7.40	2.52
5	1.68	4.00	5	6.47	2.18
8	1.54	2.06	6	4.87	2.28
11	1.14	3.44	11	5.67	2.25
16	2.77	1.99	17	9.66	2.00
22	3.66	1.26	26	12.83	2.10
32	6.28	3.00	37	17.20	2.42
36	3.73	2.47	49	18.12	2.55
58	3.33	1.43	71	13.04	2.85
78	5.86	1.39	80	3.76	3.05
92	6.59	2.72	88	13.98	7.05
106	7.65	1.07	95	15.93	3.23
116	3.38	1.82	102	16.10	4.30

4.2 剖面对比

如图 8 为单级驱动溶矿试验进行 20 天后 K^+ 浓

度剖面曲线与增程驱动溶矿试验进行 26 天后 K^+ 浓度剖面曲线。对于增程驱动溶矿试验,横坐标为 0 和 500 处是溶剂的 K^+ 浓度;对于单级驱动溶矿试验,横坐标为 500 处是溶剂中 K^+ 浓度。从图中可以看出,两次试验地层中 K^+ 浓度较高,普遍高于溶剂的 K^+ 浓度。观察从 500m 以后的地层中的 K^+ 浓度,两条曲线呈现出相同的规律:远离补水渠, K^+ 浓度越高,达到一定程度, K^+ 浓度开始降低。

对比以上两条曲线可以看出,总体来讲,单级驱动溶矿试验地层中 K^+ 浓度高于增程驱动溶矿试验地层中 K^+ 浓度,原因可能是单级驱动溶矿试验补水渠结盐,低钾溶剂渗入地层的量比较少,使溶剂有较长的时间发生固液转化反应而升高。同时,对于平行渠系注采驱动溶矿过程, K^+ 浓度有一个相同的变化趋势:远离补水渠, K^+ 浓度越高,达到一定程度, K^+ 浓度开始降低。两次溶矿试验典型剖面 K^+ 浓度表如表 6。

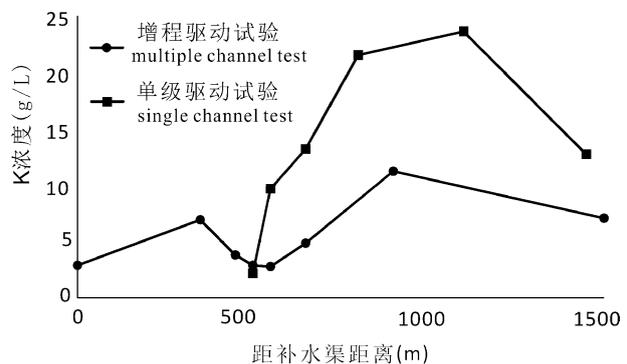


图 8 单级与增程驱动溶矿试验 K^+ 浓度典型剖面图
Fig. 8 Typical profile of K^+ concentration of two tests

表 6 单级与增程驱动溶矿试验典型剖面 K^+ 浓度表

Table 6 Typical profile K^+ concentration of two tests

增程驱动溶矿试验		单级驱动溶矿试验	
距离(m)	K^+ 浓度(g/L)	距离(m)	K^+ 浓度(g/L)
0	2.88	500	2.17
350	6.92	550	9.66
450	3.80	650	13.18
500	2.88	800	21.51
550	2.77	1100	23.60
650	4.84	1450	12.71
900	11.22		
1500	7.05		

4.3 溶剂对比

两次试验的溶剂的离子浓度含量如表 1。

通过表1中的数据可以看出,单级驱动溶矿试验所用溶剂 TDS 大于增程驱动溶矿试验所用溶剂,说明增程驱动溶矿试验所用溶剂较淡,这也说明了两次试验在进行过程中,单级驱动溶矿试验渠壁结盐,而增程驱动溶矿试验渠壁被溶塌。

同时对比表中 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量可以看出,2007年试验所用溶剂中 Na^+ 浓度较高, Mg^{2+} 浓度较低,而2011年试验所用溶剂中 Na^+ 浓度较低, Mg^{2+} 较高,这同样也可以解释两次试验中补水渠的不同现象。

5 结论

(1)增程驱动溶矿模式提高了晶间卤水的水位,水位升幅为1~2m,增大了溶矿空间,有利于开发地表的固体钾矿;

(2)验证了晶间卤水中的 K^+ 在驱动溶解的方向上会有所累积,并且 K^+ 浓度会不断升高,升幅可达10g/L;

(3)利用水溶法开采固体钾盐的方法是可行的。

致谢:感谢在野外取样过程中青海盐湖集团给予的大力协助,感谢审稿专家和编辑的辛苦工作,同时为本文的完成做出贡献的其他工作者,在此一并表示感谢。

注释 / Notes

- ① 青海盐湖勘查开发研究院. 1990. 青海省察尔汗盐湖淡卤水回灌溶解驱动试验报告. 西宁:青海盐湖勘查开发研究院.
- ② 中国地质科学院矿产资源研究所. 2010. 青海别勒滩低品位固体钾盐液化开发的关键技术. 北京:中国地质科学院矿产资源研究所.

参考文献 / References

- 郝爱兵. 1995. 溶解驱动开采察尔汗盐湖固体钾矿的室内试验研究. 北京:中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 郝爱兵,李文鹏. 2003. Pitzer 理论在变温高浓卤水体系地球化学平衡研究中的应用. 盐湖研究,11(3):24~30.
- 李文鹏. 1991. 察尔汗盐湖溶矿驱动开采模型及其软件开发. 北京:中国地质科学院博士学位论文.
- 李文鹏,刘振英. 1994. 察尔汗盐湖溶解驱动开采钾盐的数值模型研究——多组分地下水系统反应溶质运输和平衡化学耦合模型研究. 见:第六届国际盐湖会议论文集. 北京:地质出版社.
- 王石军. 2005. 察尔汗盐湖钾镁盐矿床可采储量特征及其开采探讨. 化工矿物与加工,34(1):30~32.
- 王文祥,李文鹏. 2010. 察尔汗盐湖低品位固体钾矿液化的现场试验研究探讨. 矿床地质,2010,29(4):697~703.
- 王文祥,李文鹏. 2013. 别勒滩低品位钾盐固液转化试验水动力与水化学条件分析. 中国矿业,22(7):114~119.
- 周训,方斌,陈明佑,张华,赵亮,沈晔. 2006. 青海省察尔汗盐湖别勒滩区段晶间卤水数值模拟. 干旱区研究,23(2):258~263.
- Li Wenpeng. 2008. Numerical modelling of dissolving and driving exploitation of potash salt in the Qarhan Playa——A coupled model of reactive sloute transport and chemical equilibrium in a multi-component underground brine system. Acta Geologica Sinica (English edition), 82(5):1070~1082.

Research on Comparision of One Channel and Multiple Channel Dissolving and Driving Solid Potassium in Qarhan Salt Lake

WANG Wenxiang, LI Wenpeng, AN Yonghui,HAO Aibing, JIAO Pengcheng, LIU Chenglin, LIU Zhenying

1)Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding, 071051;

2) China Geological Survey, Beijing, 100037;

3)Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

4) Shijiazhuang College of Economy, Shijiazhuang, 050031

Abstract: Potash is an important strategic mineral resources. In order to exploit low-grade potash, the author carried out two field experiments in Qarhan Salt Lake. Based on monitoring data of two field tests, the article comparied water level contour maps, water level cross-section curves, K^+ concentration in typical profiles and typical holes of two field tests. Indicators show that the multiple-channel mode has achieved the desired test purposes, and it is better than the single-channel mode.

Keywords:Qarhan Salt Lake; dissolving and driving; potassium deposit; exploitation