靳芳,贾建团,郭敏

(青海省柴达木综合地质矿产勘查院,青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室, 青海 海西 816099)

摘要:这是一篇矿业工程领域的论文。柴达木盆地深层砂砾型孔隙卤水属高钙、高钠、低钾的不饱和氯 化物型卤水,尚未开发。选取大浪滩矿区地下1000~2000m处砂砾型孔隙卤水 480 kg,在夏季自然状态下蒸 发结晶,分析各离子在固、液相中的分布规律及盐类结晶规律、结晶形态,研究钾的主要析出特点。结果表 明:在室外自然状态下蒸发时,析盐过程主要分为石盐→光卤石→水氯镁石→溢晶石四个阶段,其中石盐阶段 析盐规律符合 Na⁺, K⁺, Mg²⁺//Cl⁻—H₂O 体系 25 ℃ 相图,光卤石、水氯镁石阶段符合 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺//Cl⁻— H₂O 体系 25 ℃ 相图:钾有单独的析出阶段,该阶段钾主要以光卤石形态析出,钾的回收率达 85.76%,钾混盐 中 K⁺含量 9.27%,是生产钾肥的优质原料;钙在水氯镁石阶段之后析出。实验结果可为该类型卤水的开发利用 提供参考。

关键词: 矿业工程; 砂砾型孔隙卤水; 自然蒸发实验; 光卤石; K^+ ; Ca^{2+} ; $Mg^{2+}//Cl^-$ — H_2O 相图

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.04.024

中图分类号: TD953 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)04-0161-07

引用格式: 靳芳, 贾建团, 郭敏. 柴达木盆地砂砾型孔隙卤水夏季自然蒸发实验[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 161-167.

JIN Fang, JIA Jiantuan, GUO Min. Natural evaporation experiment of sand gravel type pore brine in qaidam basin in summer[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 161-167.

2008年至今,以青海省柴达木综合地质矿产 勘查院为主,中国地质科学院矿产资源研究所、 青海油田公司等多家单位参与,在柴达木盆地西 部大浪滩-黑北凹地、察汗斯拉图凹地、昆特依凹 地、马海凹地等矿区施工多个深孔(单孔孔深 1000~2000 m),新发现了储量巨大的深层砂砾 型孔隙卤水钾矿^[1-2],目前估算 333+334级 KCl 孔隙度资源量达 8 亿多 t,该类型卤水钾矿尚未开 发利用^[3]。关于深层卤水钾矿的研究资料主要是 对其形成条件、分布规律及三种类型深层卤水矿 (盐类晶间卤水钾盐矿床、深层砂砾石孔隙卤水 钾盐矿床和深层构造裂隙孔隙卤水钾盐矿床) 之间的内在联系、成因等方面^[4-5],关于开发利用 方面的研究以背斜构造区卤水的研究居多^[6-7],彭 玲等对黑北凹地深层砂砾孔隙卤水进行了蒸发 实验研究¹⁸,其他相关研究少见。为了对深层砂砾型孔隙卤水的开发利用技术进一步开展探索研究,取480kg该类型卤水进行了夏季自然蒸发小型实验。

1 实 验

1.1 实验原料

实验卤水取自柴达木盆地西部大浪滩矿区梁 ZK2401 孔地下1000 m 以下,卤水密度1.188 g/cm³ (18.6 ℃),矿化度286.0 g/L,邻近饱和,原始卤水 化学组成见表1。按瓦里亚什科水化学分类法,该 卤水为氯化物型。卤水中 KCl 0.63%、NaCl 18.73% 达到最低工业品位指标,MgCl₂3.52% 达边界品位 指标,微量元素 B₂O₃、Li⁺、Br⁻、Γ、Rb⁺、Cs⁺均 未达到 DZ/T 0212.4-2020 矿产地质勘查规范盐类

收稿日期: 2023-03-11

基金项目: 青海省科学技术厅应用基础研究项目 (2022-ZJ-734)

作者简介: 靳芳(1973-), 女, 高级工程师, 研究方向为盐湖资源开发利用。

第四部分: 深藏卤水盐类的综合评价指标。相比 于柴达木盆地东部的氯化物型浅层卤水,该卤水 有高钠、高钙、低钾的特点。

表 1	「百姓齿水化学组成/(mg/Ⅰ)
1 2 1	

					Table 1	Chemical composition of original brines										
	K^{+*}	Na ^{+*}	Ca ^{2+*}	Mg^{2+*}	Cl^{+*}	SO4 ^{2-*}	B_2O_3	Li ⁺	Sr^{2+}	Rb^+	Cs^+	Br⁻	I-			
	3.95	87.06	4.57	10.65	177.7	1.90	103.6	5.06	64.34	0.44	0.037	45.57	2.72			
_																

*单位为g/L。

1.2 实验器材

Φ60 cm 塑料盆 9 个, Φ30 cm 塑料盆 1 个, 20 cm×30 cm 的白瓷盘 1 个, 酒精温度计 2 支, 比重 瓶 1 个, 300 kg 磅秤(精密度 0.1 kg) 1 台, 电子 台秤(精密度 0.01 kg) 1 台, 分析天平(精密度 0.01 g) 1 台。

1.3 实验方法

实验自 2022 年 4 月 6 日开始至 11 月 25 日结 束。取原卤 480 kg, 平均分装在 8 个 Φ60 m、深 度 25 cm 的塑料盆中置于户外通风、无遮光处进 行自然条件下蒸发, 盆中放一 20 cm×30 cm 的白 瓷盘用于接当日析出新盐。每天固定时间 (上午 9:00)观测,观测气温、卤温、蒸失水量、密度 及析盐情况;视卤水比重、析出盐变化情况取样 分析,化学分析结果结合相图分析,快有新盐析 出时,增加观测次数;析出盐通过晶型特点判 断、分析结果配盐及 X 衍射鉴定方式确定其类 型: 当有新盐析出或累计析出盐量较多时, 及时 固液分离,固体盐采用堆控方式尽量控出夹带的 液体,以减少母液夹带损失量,每次固液分离后 分别记录固液相质量及析出盐类晶型特点,并分 别取固液相样品进行化学分析,并进行分离前后 的物料平衡计算: 蒸发过程中母液量较少时, 合 并大盆、换小盆以保证卤水深度,控制蒸发速 度;至蒸发后期,气温在晚间处于0℃以下,卤 水出现了夜间低温结晶析盐,白天回溶现象。当 地户外风沙大,盆中带入的杂质较多,至母液剩 余 4.04 kg 时,液体表面易形成较厚盐壳,蒸发很 慢,结束了实验。

1.4 样品分析及质量控制措施

化学分析样品的制备方法如下:液体用一次 性塑料滴管吸取样品缓缓滴入小烧杯中,准确称 取一定质量(一般 20.00 g)的样品,移入 250 mL 容量瓶中定容;固体混匀后直接称取一定质量(一 般 20.00 g)的样品,溶解后移入 250 mL 容量瓶中 定容。检测方法:K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²、 B₂O₃、Li⁺、Sr²⁺电感耦合等离子体发射光谱法; CI容量法;Rb⁺、Cs⁺、Br、Γ电感耦合等离子体质 谱法;密度比重瓶法;pH 值酸度计法。样品化学 分析由青海省柴达木综合地质矿产勘查院完成, 检测方法均通过国家级实验室认可评审,检测质 量均满足《地质矿产实验室测试质量管理规范》 DZ/T 0130-2006 的相关要求。盐类物相分析用 X-射线衍射法,化学分析外检及物相分析由中国科 学院青海盐湖研究所完成。

为保证实验结果的准确性,实验过程每步都 采取了严格的质量控制措施,所用量具均经过校 准。主量元素物料平衡总回收率控制在 100%±5% 以内,低含量元素总收率控制在 100%±10% 以内。

1.5 实验结果

实验共进行 10 次固液分离,采卤水样品 40 件,固体盐样品 39 件,对部分化学组成相近样品 做了删减,实验过程卤水化学组成见表 2,析出固 体配盐后矿物组成见表 3。

表 2 卤水化学组成 Table 2 Chemical composition of brine

						1 4010 2	Chenny	car con	iposition (51 UTINC					
编号	离子浓度/(g/L)						密度	卤温	矿化度	相图	指数(g/10	00g S)	相图指数(g/100g S)		
	K^+	Na^+	Ca ²⁺	Mg^{2+}	Cl	pm但	/(g/cm ³⁾	/°C	/(g/L)	NaCl	KCl	$MgCl_2$	KCl	$CaCl_2$	$MgCl_2$
L0	3.95	87.06	4.57	10.65	177.7	6.82	1.188	18.6	286.0	81.80	2.78	15.42	12.17	20.44	67.39
L1	4.91	94.4	5.13	12.17	197.6	6.39	1.207	28.1	315.9	80.80	3.15	16.05	13.14	19.94	66.92
L3 ₋₁	8.25	74.72	7.88	22.56	203.8	6.28	1.213	12.0	319.2	64.60	5.35	30.06	12.49	17.34	70.18
L5_2	12.90	53.44	11.79	36.00	221.7	5.91	1.229	12.0	344.4	45.07	8.16	46.78	12.41	16.47	71.12
L7_3	18.55	31.13	16.44	52.30	248.6	5.56	1.245	39.5	379.7	24.78	11.08	64.15	12.38	15.93	71.69

第4期 2024年8月

_

靳 芳等:柴达木盆地砂砾型孔隙卤水夏季自然蒸发实验

٠	163	٠
---	-----	---

	离子浓度/(g/L)						密度	卤温	矿化度	相图	告数(σ/1()() g S)	相图	指数(g/1()()g S)
编号	K^+ Na ⁺ Ca ²⁺ Ma ²⁺ Cl ⁻			pH值	$/(g/cm^{3})$	/°C	/(g/L)	NoCl	KCl	MoCl	KCI	CaCl	MoCl		
T 11	12 10	15.10	10.10	66.17	270.6	5.05	1 272	22.0	-/(g/L) 	11 20	12.40	76.22	11.09	14.02	72.10
	22.20	13.10	19.10	00.17	270.0	5.05	1.275	25.0	394.3	11.29	12.49	70.22	11.96	14.92	/5.10
L12 ₋₄	23.37	15.20	20.44	66.93	272.3	5.05	1.277	21.3	398.9	11.19	12.90	75.91	12.27	15.57	72.16
L13	22.88	14.23	20.84	69.55	276.9	5.00	1.284	19.0	405.6	10.27	12.39	77.35	11.67	15.44	72.89
L14	21.07	11.03	21.61	72.10	284.3	4.88	1.285	25.0	411.3	8.00	11.46	80.55	10.50	15.65	73.85
L15	18.63	10.31	23.02	74.31	287.0	4.82	1.290	16.0	414.6	7.43	10.07	82.50	9.10	16.33	74.57
L16	15.12	9.68	24.8	75.89	292.7	4.78	1.291	16.0	419.5	7.02	8.22	84.76	7.30	17.40	75.30
L18_5	9.70	7.11	27.80	79.38	292.9	4.62	1.293	20.9	423.5	5.20	5.32	89.48	4.55	18.94	76.51
L19	7.08	6.78	29.38	83.55	306.8	4.47	1.306	15.0	435.0	4.81	3.77	91.42	3.20	19.27	77.53
L22	2.46	3.81	34.23	91.48	336.5	3.97	1.330	18.0	470.1	2.60	1.26	96.14	1.02	20.70	78.27
L24	1.51	2.19	37.12	98.61	356.1	3.52	1.346	21.0	497.3	1.41	0.73	97.86	0.59	20.89	78.52
L25_6	1.35	2.43	37.77	98.47	360.4	3.59	1.349	21.0	504.8	1.56	0.65	97.78	0.52	21.22	78.26
L27_7	1.20	2.22	37.20	100.2	375.4	3.49	1.354	22.0	518.4	1.41	0.58	98.01	0.47	20.70	78.83
L30	1.01	2.23	45.31	102.5	384.9	3.22	1.368	21.0	538.3	1.39	0.47	98.14	0.36	23.73	75.91
L33 ₋₈	0.75	8.92	60.72	89.89	393.5	2.96	1.377	30.0	557.0	6.03	0.38	93.59	0.27	32.23	67.50
L35_9	0.52	2.48	63.48	86.60	380.5	2.63	1.378	17.0	538.4	1.82	0.29	97.89	0.19	34.07	65.74
L36	0.68	1.44	69.58	77.87	355.1	3.20	1.367	-1.0	508.6	1.18	0.42	98.40	0.26	38.61	61.13
L39- ₁₀	0.96	1.19	89.46	75.16	383.4	2.49	1.399	18.0	552.1	2.48	0.60	96.92	0.34	45.54	54.13

注:编号中带"-n"样为第n次固液分离时的卤水样。

Table 3 Precipitated mineral composition													
护旦	卤水密度						盐含量/%						
细与	$/ (g/cm^3)$	NaCl	$CaCl_2$	KCl	$MgCl_2$	$\mathrm{CaSO_4}{\bullet}\mathrm{2H_2O}$	KCl•MgCl ₂ •6H ₂ O	$MgCl_2 \bullet 6H_2O$	$CaCl_2 \bullet 6H_2O$	合计			
S1	1.207	81.59	0.37	0.31	0.82	2.47	-	-	-	85.56			
S3 ₋₁	1.213	92.83	0.68	0.17	0.67	1.61	-	-	-	95.95			
S5_2	1.229	95.46	0.28	0.44	1.25	0.77	-	-	-	98.20			
S7_3	1.245	89.68	0.41	0.55	2.43	0.65	-	-	-	93.72			
S11	1.273	83.69	0.69	0.61	3.21	0.22	-	-	-	88.41			
S12_4	1.277	87.55	0.75	1.07	5.01	0.95	-	-	-	95.33			
S13	1.284	70.68	1.27	10.43	4.27	0.18	-	-	-	86.83			
S14	1.285	28.74	2.26	30.07	9.75	0.15	-	-	-	70.97			
S15	1.290	10.18	0.83	-	5.35	0.041	75.97	-	-	92.37			
S18_5	1.293	19.64	0.97	-	2.40	0.26	70.85	-	-	94.12			
S22	1.306	10.58	2.40	-	10.72	0.054	55.93	-	-	79.69			
S23	1.330	11.31	2.90	-	12.68	0.059	47.26	-	-	74.20			
S24	1.346	13.02	4.23	-	16.50	0.054	31.41	-	-	65.21			
S25_6	1.349	13.15	2.30	-	10.21	0.22	55.36	-	-	81.24			
S27_7	1.354	22.93	3.16	-	12.22	0.41	38.53	-	-	77.25			
S32	1.368	3.33	2.35	-	-	0.005	0.30	92.11	-	98.10			
S33 ₋₈	1.377	4.04	2.14	-	-	0.033	0.65	90.89	-	97.74			
S35_9	1.378	0.68	7.43	-	-	0.020	0.61	83.83	-	92.57			
S36	1.367	1.13	-	-	-	0.004	0.29	5.32	93.21	99.95			
S39 ₋₁₀	1.399	1.74	4.56	-	-	0.018	0.25	88.15	-	94.72			

表 3 析出矿物组成 Precipitated mineral compositio

注: Sx为和前一样品取样间隔内析出盐; Sx.,为第n次固液分离出的混合盐。

2 结果分析

2.1 离子分布规律

根据各组分在固、液相中的浓度变化绘制图 1。 由图 1a 可见,蒸发过程中卤水饱和后 Na⁺先在固 相中析出,至卤水密度在 1.290 g/cm³时固相中含 量回落,钠盐阶段结束;图 1b 中,K⁺在液相中浓 度先升后降低,随着液相中浓度降低,固相中含 量出现升高再回落的趋势,说明 K⁺有明显的析出 阶段,且在固相中析出较集中和完全,K⁺在卤水 密度 1.277 g/cm³ (L12_{.4})开始在固相中有析出, 至密度 1.354 g/cm³ (L27_{.7})析出较完全;图 1c 中 Mg²⁺在卤水密度 1.285 g/cm³ (L14)开始在固相中 一直有析出,液相中的浓度逐步升高至卤水密度 在 1.368 g/cm³ (L30)时有所回落;至卤水密度 1.378 g/mL(17.0℃),Ca²⁺一直无明显析出,见图 1d。





2.2 相图分析

从表 1 看出,实验卤水主要为 K₂²⁺, Na₂²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺//Cl₂²⁻—H₂O 五元水盐体系,在蒸发析 盐过程中,氯化钠一直处于饱和状态并且与其他 盐类不形成复盐,因此可用简化后的 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺//Cl⁻—H₂O 四元相图^[9]。为了便于和柴达木盆 地东部的卤化物型浅层晶间卤水相比较,在此也 用 Na⁺, K⁺, Mg²⁺//Cl⁻—H₂O 四元相图分析二者结 晶路线的区别。

陈敬清等从相化学的角度对柴达木盆地东部 察尔汗的晶间卤水研究发现,该处氯化物型的卤 水介稳程度微弱,在 Na⁺, K⁺, Mg²⁺//Cl⁻—H₂O 四 元相图中没有相区的差别^[10],说明在温度相差不 太大时,其结晶路线沿共饱线运动。图 2 中, O→P→Q→R 为砂砾型孔隙卤水在 Na⁺, K⁺, Mg²⁺// Cl⁻—H₂O(25 ℃)四元相图中的结晶路线,忽略 温度影响的小幅偏离,O→P 石盐(NaCl)阶段, 结晶路线与相图的理论路线相符,固相石盐;P→Q 钾石盐(KCl)阶段,析出固相为石盐+钾石盐, 结晶路线很短;Q→R 光卤石(KCl•MgCl₂•6H₂O) 阶段,析出石盐+光卤石,光卤石析出较早,结晶 路线与共饱线有偏离,原因是液相中钙含量较高 (质量浓度比 Ca/Mg=0.43:1),钙镁的物化性质 相近所致。光卤石阶段后,有很长的水氯镁石+光 卤石析出阶段和溢晶石+光卤石共析阶段,此图无 法直观显示。在盐田生产中,石盐阶段可用此相 图指导工艺,在钾盐及以后镁盐阶段实际结晶路 线该和相图中的理论路线偏离较大。





实验卤水在 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺//Cl⁻—H₂O 四元相 图^[11]中的结晶路线见图 3,系统点 O'落在钾石盐 区,结晶路线 O'→P'→Q'→R'→S'图中简化了氯 化钠,实际上石盐在每个阶段都有析出。O'→P' 石盐阶段,此阶段因为原卤中含有 SO42-1.90 g/L (摩尔比 SO42-/ Ca2+=1:5.76), 卤水饱和后部分钙以 石膏(CaCl,•2H,O)形式先析出,在液相中钙含 量有所降低,液相点从 O'→P',固相石盐+石膏; 卤水对 K⁺饱和后,先有个很短的钾石盐阶段 P'→ Q', 固相石盐+钾石盐; 再沿向量 Car-Q'的方向 从 Q'→R'运动,固相光卤石+石盐;到达光卤石和 水氯镁石 (MgCl,•6H,O) 共饱点 R'点后,液相点沿 二者的共饱线从 R'向光卤石、水氯镁石、溢晶石 (2MgCl₂•CaCl₂•12H₂O) 三相共饱点 Z' 的方向运动,

至 S'点实验结束,固相水氯镁石+光卤石+石盐。 根据相图分析,在到达 Z'点后会出现水氯镁石回 溶,溢晶石和光卤石析出至蒸干。虽然在蒸发过 程中昼夜温差较大(11℃),但结晶路线和相图 共饱线相符合,可用此相图指导结晶路线。



图 3 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺//Cl⁻—H₂O 25 °C 相图 Fig.3 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺//Cl⁻-H₂O (25° C) phase diagram

与实验卤水相比,南翼山背斜构造区高钙深 层卤水中钙镁比更高(Ca/Mg=10.59:1),原卤在 相图(图3)中的位置在△HKC中的M点,其蒸 发过程是钾盐阶段结束后,直接进入南极石阶 段,钙饱和液中高达1.00%的K⁺被带入到南极石 阶段无法回收,钾的回收率较低¹⁹。根据本次实验 结果结合相图分析,降低钙镁比值,使系统点落 在相图中的 AZHC 区域内时, 钾盐阶段结束后进 入水氯镁石阶段,钾的析出会更完全,回收率更理想。

2.3 析盐规律及物料计算

钠盐及钾盐阶段固液分离物料及各组分在固 液相中的分布率见物料汇见表4。

Table 4 Material summary															
포기 보다	长口	立日日初	重量	产率		组	1分含量	/%		分布率/%					
科别	件写	厂面名称	/kg	/%	\mathbf{K}^{+}	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO4 ²⁻	\mathbf{K}^+	Na^+	Ca ²⁺	Mg^{2+}	SO4 ²⁻	
入	L0	原卤	480.00	100	0.33	7.33	0.38	0.90	0.16	100	100	100	100	100	
出(入)	L12-4	卤水	78.88	16.43	1.83	1.19	1.60	5.24	0.035	90.35	2.67	68.39	96.04	3.60	
出		石盐	91.83	19.13	0.16	36.40	0.51	0.30	0.73	9.21	95.00	25.32	6.41	87.00	
		失水与损失	309.29	64.44											
出(入)	L25-6	卤水	41.43	8.63	0.10	0.18	2.80	7.30	0.008	2.59	0.21	62.86	70.28	0.43	
出		光卤石	14.78	3.08	9.27	5.94	0.56	7.02	0.15	85.76	2.49	4.49	24.09	2.89	
		失水与损失	22.67	4.72											
		合计					_			97.56	97.71	92.67	100.78	90.32	

表 4 物料汇总

由表2结果结合相图分析,蒸发过程的析盐 顺序为石盐+少量石膏→光卤石+少量钾石盐→ 水氯镁石三个阶段,石盐在每个阶段均有析出, 只是析出量不同。因实验卤水量少,时间有限, 没有将卤水蒸干,根据相图理论分析在水氯镁石 析出结束后会有溢晶石的大量析出。忽略析出的 极少量石膏和钾石盐后,该类型卤水的析盐顺序 主要为石盐→光卤石→水氯镁石→溢晶石四个阶 段。其中石盐阶段初期因卤水中含有硫酸根,卤 水首先对硫酸钙饱和,析出少量石膏后开始析出 石盐,因卤水中钠含量高,石盐阶段很长,期间 为了减少析出的大量石盐对母液的夹带损失,共 进行 4 次固液分离。此阶段共析出石盐 91.83 kg, 对原卤的产率 19.13%, Na⁺的析出率为 95.77%, 内含石膏 1.30%,石盐 93.37%,钾饱和液中 K+ 1.83%; 钾盐阶段之初析出少量钾石盐和石盐 (S13、S14),因析出过程只有1天时间,析盐 量很少没有单独分离,后开始析出大量光卤石, 共进行两次固、液分离。分离出钾混盐 14.78 kg, 对原卤产率 3.08%, K⁺回收率为 85.76%, 内含石 盐 17.56%, 光卤石 65.87%, 析完钾后的母液中 K⁺0.10%, 钾的分离效果好, 析出的钾混盐适合用 于冷分解-浮选工艺生产氯化钾的原料矿;钾盐阶 段结束后, 析盐主要为水氯镁石, 此阶段很长, 至母液密度为 1.399 g/cm³(18.0 ℃) 母液剩余 4.04 kg时,还在析出水氯镁石,但当夜间温度降至 -8.0 ℃ 左右时观察到有南极石 (CaCl,•6H,O) 析 出, 白天升温后又回溶。根据相图分析, 水氯镁 石阶段结束后会有溢晶石和极少量的光卤石析 出、水氯镁石溶解过程。

在析出矿物组成中,除了物相分析有含量显示且能观察到晶型的盐矿物外,还有部分矿物组分在物相分析中没有含量显示,其组分含量很低,在析盐规律分析时,将其视为夹带的母液中所含的单盐。实验共进行了10次固、液分离,其中石盐阶段分离4次,光卤石阶段分离2次,水氯镁石阶段分离4次。钠盐阶段析出的石盐+石膏、钾盐阶段析出的光卤石的XRD见图4、5。该卤水结晶路线简单,钾的析出集中,分离效果好。

3 结 论

(1)该砂砾型孔隙卤水蒸发路线钠盐阶段符
 合 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O四元体系相图,后部分
 符合 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O四元体系相图,在



实际生产中可二者结合指导蒸发过程。

(2)通过盐田工艺控制后分离出了质量较好的钾混盐,其中钾主要以光卤石形态存在,光卤石含量达 65.87%,是生产氯化钾成品的优质原材料,钾对原卤的回收率达 85.76%。

(3)蒸发过程钠盐及钾盐阶段析盐集中,分 离点易控制,适合工业化生产,通过和高钙镁比 的背斜构造区卤水的蒸发路线比较后认为,高钙 型卤水通过前期兑卤或化学处理控制卤水中的钙 镁比,可提高钾的盐田收率。

参考文献:

[1] 李洪普, 郭廷峰, 高松, 等. 柴达木西部新近纪以来固液相 钾盐资源调查评价报告 [R]. 格尔木: 青海省柴达木综合地 质矿产勘查院, 2013.

LI H P, GUO T F, GAO S, et al. Investigation and evaluation report on solid and liquid potash resources in western qaidam since neogene [R]. Golmud: Qinghai Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute, 2013.

[2] 李洪普, 刘国泰, 马宏涛, 等. 青海省茫崖行委黑北凹地液 体钾矿详查报告[R]. 格尔木: 青海省柴达木综合地质矿产 勘院, 2013.

LI H P, LIU G T, MA H T, et al. Detailed investigation report on the liquid potassium mine in Heibei depression of Mangyaxing Commission, Qinghai Province [R]. Golmud: Qinghai Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute, 2013.

[3] 李洪普, 侯献华, 潘彤, 等. 柴达木盆地深层含钾卤水成矿 与利用研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.10: 6-7.

LI H P, HOU X H, PAN T, et al. Mineralization and utilization of deep potassium-bearing brine in the Qaidam Basin [M]. Wuhan: ChinaUniversity of Geosciences , 2021.10: 6-7.

[4] 李洪普, 郑绵平, 侯献华, 等. 柴达木黑北凹地早更新世新型砂砾层卤水水化学特征与成因[J]. 地球科学, 2014, 39(10):1333-1342.

LI H P, ZHENG M P, HOU X H, et al. Chemical characteristics and genesis of the brine in the early Pleistocene new gravel layer in the Heibei depression of Qaidam[J]. Earth Science, 2014, 39(10):1333-1342.

[5] 李建森, 李廷伟, 彭喜明, 等. 柴达木盆地西部第三系油田 水水文地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 50-55.

LI J S, LI T W, PENG X M, et al. Hydrogeochemical characteristics of tertiary oilfield water in western Qaidam Basin[J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2014, 35(1):50-55. [6] 靳芳, 李洪普, 常东海. 柴达木盆地南翼山背斜构造区卤 水自然蒸发实验[J]. 无机盐工业, 2021, 53(11):86-91.

JIN F, LI H P, CHANG D H. Natural evaporation experiment of brine in the south wing mountain anticlinal structural area of Qaidam Basin[J]. Inorganic Salt Industry, 2021, 53(11):86-91. [7] 刘颖, 王云生, 乜贞, 等. 柴西深层地下卤水资源及其综 合利用研究进展[J]. 无机盐工业, 2018, 50(1): 12-18.

LIU Y, WANG Y S, NIE Z, et al. Research progress in deep underground brine resources and comprehensive utilization in western Qaidam [J]. Inorganic Salt Industry, 2018, 50 (1): 12-18.

[8] 彭玲玲,魏学斌,赵为永,等.黑北凹地富钾地下卤水自然 蒸发实验研究[J].无机盐工业,2019,51(6):11-16.

PENG L L, WEI X B, ZAO W Y, et al. Experimental study on natural evaporation of potassium-rich underground brine in Heibei depression[J]. Inorganic Salt Industry, 2019, 51(6):11-16.

[9] 牛自得, 陈芳琴, 李宝存, 等. 水盐体系相图及应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.

NIU Z D, CHEN F Q, LI B C, et al. Phase diagram of watersalt system and its application [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002.

[10] 陈敬清, 刘子琴, 房春晖, 等. 盐湖卤水的蒸发结晶过 程[J]. 盐湖研究, 1994, 2(1):43-51.

CHEN J Q, LIU Z Q, FANG C H, et al. Evaporative crystallization process of salt lake brine[J]. Salt Lake Research, 1994, 2(1):43-51.

[11] 杨国彬,杨建元,李陇岗,等. 智利 Maricunga 盐湖模拟 卤水 25 ℃等温蒸发实验研究 [J]. 盐业与化工, 2012, 41(6):4-8.

YANG G B, YANG J Y, LI L G, et al. Experimental study on 25 °C isothermal evaporation of simulated brine from Maricunga salt lake in Chile[J]. Salt and Chemical Industry, 2012, 41(6):4-8.

Natural Evaporation Experiment of Sand Gravel Type Pore Brine in Qaidam Basin in Summer

JIN Fang, JIA Jiantuan, GUO Min

(Qinghai Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute, Qinghai Provincial Key

Laboratory of Exploration Research of Salt Lake Resources in Qaidam, Haixi 816099, Qinghai, China) **Abstract:** This is an article in the field of mining engineering. The deep sand gravel type pore brine in Qaidam Basin belongs to the unsaturated chloride type brine with high calcium, high sodium and low potassium. 480 kg of gravel-type pore brine at $1000 \sim 2000$ meters underground in Dalangtan mining area was selected for the test, and evaporated and crysta-llized in the natural state in summer. The distribution law of ions in the solid and liquid phases, the salt crystallization law and crystal morphology were analyzed, and the main precipitation characteristics of potassium were studied. The results show when evaporating in the outdoor natural state, the salt precipitation process is mainly divided into four stages: halite→ carnallite→bischofite→tachyhydrite. The salt evolution law in the halite stage conforms to the phase diagram of Na⁺, K⁺, Mg²⁺//Cl⁻—H₂O system at 25 °C. There is a separate precipitation stage of potassium, at which potassium is mainly precipitated in the form of carnallite, and the recovery rate of potassium is 85.76%. The K⁺content in the potassium mixed salt can reach 9.27%, which is a high quality raw material for the production of potassium fertilizer. Calcium precipitates after the brucite stage. The experimental results can provide references for the development and utilization of this type of brine.

Keywords: Mining engineering; Sand gravel type pore brine; Natural evaporation experiment; Carnallite; K^+ ; Ca^{2+} ; Mg^{2+} // Cl^- — H_2O system dry diagram