伊朗霍尔木兹海峡沿岸钾盐矿地质特征、成因 分析及提取技术

胡刚, 刘爽, 周宾, 王永生, 缪向亮, 钟豫

(江西省地质局生态地质大队,江西省地矿资源勘查开发有限公司,江西 南昌 330030)

摘要:这是一篇地球科学及矿物加工工程领域的论文。伊朗霍尔木兹海峡沿岸钾盐矿赋存于寒武系 Hormuz 组盐层内,矿体受褶皱构造控制,形态复杂,形成的"S"形、顶厚、平卧等褶皱形态,矿石类型为氯 化物型钾石盐矿石,主要矿石矿物为钾石盐,KCl含量2.5%~35.20%。研究区寒武系为泻湖相沉积,波斯湾含 钾卤水持续蒸发形成一套含钾石盐海相蒸发岩序列,受阿尔卑斯早期构造活动影响,含钾盐层受挤压作用,形 成盐底辟构造。采用一次粗选一次扫选二次精选及浮选精矿加洗涤的实验流程,可以获得了含KCl(湿基 87.44%,干基91.14%)或KCl(湿基88.97%,干基93.69%)两种的氯化钾产品,KCl回收率分别为85.93%、 81.70%,钾盐选矿指标良好。

关键词:地球科学及矿物加工工程;伊朗;霍尔木兹海峡;钾盐;地质特征;成因分析;提取技术 doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.01.002

中图分类号: TD983; F409.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 01-0008-07

引用格式: 胡刚, 刘爽, 周宾, 等. 伊朗霍尔木兹海峡沿岸钾盐矿地质特征、成因分析及提取技术[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(1): 8-14.

HU Gang, LIU Shuang, ZHOU Bin, et al. Geological characteristics, genetic analysis and extraction technology of potassium salt deposits along Hormuz Strait, Iran[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(1): 8-14.

钾盐是一种重要的工农业矿物原料,世界钾 盐产量的 90% 以上用作钾肥,是重要的农肥资 源^[1-2]。在化学工业领域,主要有氯化钾、氢氧化 钾、硫酸钾、碘化钾等 30 余种钾制品^[1]。我国是 农业大国,是全球最大的钾盐及钾肥消费国,占 全球钾盐消费的 20% 左右^[3-5]。但我国钾肥长期短 缺,大量钾肥依靠进口,钾盐对外依存度一直在 50% 左右^[1,5-7]。世界制钾工业原料 98% 来自层状 矿床中可溶性钾盐,2% 来自盐湖卤水和地下卤 水^[8]。我国钾盐资源以陆相盐湖钾盐为主,主要分 布在青海柴达木盆地和新疆罗布泊等现代盐湖 中^[9]。近年来,我国钾盐找矿虽取得一定成果,但 沉积型可溶性钾盐找矿任务仍然艰巨,大型海相 钾盐矿床是我国钾盐找矿的重点与难点^[7,9-11]。从 长期来看,钾盐资源安全供应仍是我国面临的重 要战略任务,开发境外钾盐资源,有利于增加我 国战略主动和抗风险能力。

伊朗扎格罗斯褶皱带东南段,霍尔木兹海峡沿岸地区有大量含钾盐丘,地表钾盐露头品位高,极具找矿潜力^[5,12]。区内勘查工作程度低,钾盐矿床成因及选矿研究薄弱。本文对伊朗霍尔木兹海峡沿岸含钾盐丘地质特征及矿床特征进行了详细分析,对矿床成因进行了研究,选取研究区代表性钾盐矿石进行了实验室选矿流程实验,为我国企业"走出去"提供钾盐资源信息,对解决国内钾盐供需紧张态势有重要意义。

1 区域地质特征

伊朗地质构造可分为三个单元:即南西部的 扎格罗斯褶皱带,北东部科佩特褶皱带和中—东

作者简介:胡刚(1989-),男,高级工程师,从事地质勘查、构造地质学与岩石学研究。

收稿日期: 2023-01-18

基金项目: 国外矿产资源风险勘查项目(101014B017)

部伊朗新生代活动带,扎格罗斯褶皱带与伊北部 新生代活动带以扎格罗斯蛇绿岩带为界,两者呈 推覆关系(图1)^[12-13]。伊朗南部霍尔木兹海峡位 于阿拉伯板块和图兰板块碰撞带—扎格罗斯褶皱 带南东部,偏阿拉伯板块一侧,喜马拉雅成矿域 中段。



1.1 地层

区域范围内主要出露前寒武—寒武系、侏罗 系、白垩系、古近系、第四系地层。基底地层为 前寒武系—寒武系。其中前寒武纪主要发生了火 山沉积作用以及随后的区域变质作用,形成了一 套以片麻岩、浅粒岩和混合岩为主的深变质岩 系; 寒武纪处于相对平静的时期, 形成了一套以 岩盐、石膏、钾石盐、冰川沉积物、火成岩碎屑 为主的含钾盐泻湖相沉积,受底辟作用影响,地 表上表现为大小不一的底辟盐丘,其中寒武系 Hormuz 组为区内主要含钾盐层,因含盐层长期暴 露地表,地表钾盐露头经过了多次溶解—沉 淀-溶解的过程,富钾卤水在山谷间低洼处不断 迁移沉淀,导致露头范围不断扩大,钾盐品位升 高,钾盐露头主要为富铁型(钾铁盐、红钾铁 盐、钾盐、岩盐)和高品位黄钾(钾盐、岩 盐),是重要找矿标志。盖层为巨厚的中新生代 沉积,以古近系为主,为一套浅海相碎屑岩与碳酸盐沉积,主要岩性为砂页岩、砂岩、砂砾岩、泥质灰岩、白云岩、灰岩、泥灰岩、白云质灰岩、石膏、少量岩盐等。侏罗系与白垩系多零星分布于近褶皱带区域,为浅海相碎屑岩与碳酸盐沉积。

1.2 构造

区内地层构造变形复杂,以褶皱为主,由一 系列近东西向宽缓背斜构成,褶皱核部地层为前 寒武系—寒武系地层,两翼为中新生代地层。在 多期应力作用下,寒武系盐层向上挤入流动的过 程中,内部形成了复杂的次级褶皱,主要有顶厚 褶皱、S型褶皱、鞘褶皱、平卧褶皱等,控制着区 内钾盐矿体形态(图2),研究区地质简图见图3。

断裂构造主要为北西向断裂,分布在区域北 东角,为一推覆断层,总长超过60km,断裂带上 偶有破碎角砾岩、次级小褶皱、挤压带出现。北 东向断裂多为隐伏断裂,呈张扭性特征。



(a: S 型褶皱; b: 顶厚褶皱; c: 鞘褶皱; d: 平卧褶皱)

(a: S-shaped fold; b: top thick fold; c: sheath fold; d: recumbent fold) 图 2 寒武系 Hormuz 组盐层内不同形态的次级褶皱 Fig.2 Different secondary folds in the Cambrian Hormuz Formation salt layer



图 3 研究区地质简图 Fig.3 Geological sketch of the study area

2 矿床地质特征

2.1 矿体特征

钾盐矿体总体呈穹窿状,走向为近南北向, 略向西倾,总体倾角 20~35°,矿体受褶皱构造控 制,形态复杂,形成的"S"形、顶厚、平卧等褶皱 形态。矿层垂向上褶皱构造复杂程度不一,导致 矿体形态有所差异,具浅繁深简的特点。矿层厚 度一般 0.62~11.06 m,厚度变化大,褶皱构造是 矿体厚度发生变化的关键因素,转折端矿体厚度大。

2.2 矿石质量

区内矿石类型为氯化物型钾石盐矿石,矿石 一般为青灰色、橙红、红褐色到褐色,半透明至 不透明,块状构造,粒状镶嵌结构,主要矿物为 石盐、钾石盐、钾铁盐、硬石膏、火山玻璃、石 英、黄绿石、磁铁矿、粘土等,钾石盐、钾铁盐、石膏等矿物颗粒镶嵌于石盐晶体中,盐类晶体晶面清晰。主要矿石矿物为钾石盐,呈它形粒状晶体,0.5 mm 左右,负突起,在正交偏光下呈均质性,常以不规则形态集合体赋存于石盐中。矿石主要化学成分为 NaCl、KCl,含少量 CaSO₄、MgSO₄。矿石 KCl含量 2.5%~35.20%。

3 成因探讨

钾盐矿床是蒸发岩矿床的一种,钾盐矿床形 成受构造与气候影响。世界上重要成钾时期是寒 武纪、泥盆纪、二叠纪和三叠纪,大型、超大型 钾盐矿床的形成与地壳运动与板块活动有关[14], 地壳运动形成大型断陷盆地、裂谷与地堑,为钾 盐形成提供条件,并且地壳运动末期产生了对钾 盐形成有利的干旱气候和海退环境[14-15]。研究区位 于扎格罗斯褶皱带南东部,靠近波斯湾一侧,寒 武纪为泻湖相沉积环境,"波斯湾"含钾的卤水持 续干旱蒸发为钾盐形成提供了较好条件。成盐成 钾卤水在封闭环境持续蒸发,盐类物质按溶解度 而先后沉积,钾盐是卤水演化的最后阶段[15],最 终形成一套含钾石盐海相蒸发岩序列。钾石盐多 分布在中上部和顶部,平面上则由盆地边缘到中 心,按溶解度从小至大分布,分别为碳酸盐---硫 酸盐—石盐—钾石盐。晚三叠世伊朗板块与阿拉 伯板块分离,现今的波斯湾和阿曼湾及沿岸为阿 拉伯板块北缘,连续沉积了中生代-新生代地层, 以碳酸盐为主,晚白垩世阿拉伯板块北移,形成 扎格罗山 NW-SE 向大型推覆构造带,受阿尔卑斯 早期构造活动影响,寒武纪盐类沉积被挤压,穿 入上覆地层形成了一系列盐丘底辟构造,在霍尔 木兹海峡沿岸,大小不等的含钾盐丘出露于地表。

4 选矿实验研究

采取代表性深部原生岩芯样进行实验室选矿 实验研究,原矿 KCl 9.00%、NaCl 76.06%、水不 溶物 6.66%。

4.1 饱和卤水配制

实验室室内温度为 10 ℃,根据 NaCl-KCl-H₂O 多温相图,得出 10 ℃ 的饱和卤水中 NaCl、KCl、H₂O 含量分别为 21.5%、8.9%、69.6%。根

据原矿化学成分,为保证饱和卤水中 KCl、NaCl全部饱和,配制饱和卤水时采用原矿与水比例为 1.3:1,配制后卤水组分分析结果为 KCl 8.31%、NaCl 21.82%、FeCl₂ 1.66%、H₂O 68.21% 卤水比重 1.244。

4.2 粗选条件实验

目前世界上 80% 的氯化钾都是通过正浮选方 法生产的^[11]。根据矿石性质,本次采用正浮选直 接浮选 KCl。粗选条件实验分别进行了磨矿细度、 浮选温度、药剂条件实验(包括调整剂用量实 验、捕收无安全和质量事故剂用量实验、起泡剂 用量实验、扫选捕收剂用量)。实验结果表明, 合适的粗选条件为磨矿-0.25 mm 78.4%,浮选温 度,调整剂用量 50 g/t,捕收剂用量 100 g/t,起泡 剂用量 24 g/t,扫选捕收剂用量 25 g/t,各实验数 据对比见图 4。

4.3 开路流程实验

根据条件实验得出的较佳实验条件,采用一 粗一扫二精工艺流程进行开路流程实验,见图 5, 实验结果见表 1。

从全开路流程实验结果看出,实验重现性、 稳定性都较好,说明正浮选钾石盐工艺适合伊朗 霍尔木兹寒武纪钾盐矿选矿,且利于将来生产操作。

4.4 闭路流程实验

根据开路流程实验,采用中矿顺序返回方式 进行闭路实验,闭路流程实验结果见表2。

闭路流程实验得到的 KCl 品位为 83.55% 其中 杂质 NaCl 含量为 11.34%。为减少杂质含量,提 高精矿品质,开展精矿洗涤实验,进行洗涤水量 与洗涤时间实验,确定洗涤水量与时间。由图 6 可以看出,要得到 90% KCl 产品需要洗涤水量为 15%,要得到 93% KCl 产品需要洗涤水量为 25%, 洗涤较佳时间为 20 min。根据以上实验,最终确 定采用一次粗选一次扫选二次精选及浮选精矿加洗 涤实验流程(见图 7),各产品实验结果见表 3。

5 结 论

(1)伊朗霍尔木兹海峡沿岸钾盐矿赋存于寒 武系上段 Hormuz 组盐层内,矿体受褶皱构造控 制,形态复杂,形成的"S"形、顶厚、平卧等褶皱 形态,矿体厚度一般 0.62~11.06 m,厚度变化





大,褶皱转折端矿层厚度大。主要矿石矿物为钾石盐,矿石主要化学成分为 NaCl、KCl,含少量CaSO₄、MgSO₄。矿石中 KCl含量 2.5%~35.20%。 (2)研究区寒武系为泻湖相沉积,"波斯湾"

含钾的卤水持续干旱蒸发为钾盐形成提供了较好 条件,成盐成钾卤水在封闭环境持续蒸发形成一 套含钾石盐海相蒸发岩序列。受阿尔卑斯早期构 造活动影响,寒武纪盐类沉积被挤压,穿入上覆 地层形成了一系列盐丘底辟构造,在霍尔木兹海 峡沿岸,大小不等的含钾盐丘出露于地表。

(3)选取研究区代表性矿石,原矿 KCl 9.00%、 NaCl 76.06%、水不溶物 6.66%。采用一次粗选一次扫选二次精选及浮选精矿加洗涤的实验流程,可以获得 KCl 87.44%(湿基)(干基为 91.14%)或



图 5 开路实验流程

Fig.5 Flow chart of open circuit test

Table 1 Open-circuit process test results					
产品名称	产率/%	KCl品位/%	KCl回收率/%		
精矿	9.19	84.71	87.36		
中矿2	1.33	14.57	2.17		
中矿1	6.92	2.71	2.11		
扫选精矿	1.36	3.98	0.61		
尾矿	81.2	0.85	7.76		

表 2 闭路流程实验结果 Table 2 Close-circuit process test results

		1	
产品名称	产率/%	KCl品位/%	KCl回收率/%
原矿	100.00	8.75	100.00
精矿	9.39	83.55	89.37
尾矿	90.61	0.99	10.27

KCl 88.97%(湿基)(干基为 93.69%)两种的氯化 钾产品, KCl 回收率分别为 85.93%、81.70%。





图 6 精矿洗涤实验数据对比 Fig.6 Comparison of concentrate washing test data





图 7 一次粗选一次扫选二次精选及浮选精矿加洗涤闭 路实验流程

Fig.7 Flow chart of one roughing, one scavenger, two concentrating and Coarse ore washing test

表 3 一次粗选一次扫选二次精选及浮选精矿加洗涤流 程实验结果

 Table 3
 One roughing, one scavenger, two concentrating and coarse ore washing test results

产品	KCl品位/%		VC1台同收变/0/
	湿基	干基	KUI芯凹収平/%
90% KCl	87.44	91.14	85.93
93% KCl	88.97	93.69	81.70

参考文献:

[1] 王松, 赵元芝, 汪傲, 等. "一带一路" 国家钾盐及硼资源 分布规律与开采技术[J]. 地质通报, 2017, 36(1):35-49.

WANG S, ZHAO Y Z, WANG A, et al. A study of distribution regularity and exploitation techniques of potash and

boronresources in countries of "One Belt, One Road"a[J]. Geological Bulletin of Chin, 2017, 36(1):35-49.

[2] 马鸿文, 苏双青, 刘浩, 等. 中国钾资源与钾盐工业可持续 发展[J]. 地学前缘, 2010, 17(1):294-310.

MA H W, SU S Q, LIU H, et al. Potassium resource and sustainable development of potash salt industry in China[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1):294-310.

[3] 李萌, 刘正阳, 王建平, 等. 我国钾盐资源现状分析及可持续发展建议[J]. 中国矿业, 2016, 25(9):1-7.

LI M, LIU Z Y, WANG J P, et al. Current status and sustainable development of potash resources in China[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(9):1-7.

[4] 刘佳. 我国钾盐资源供需态势与国内外供矿前景分析[J]. 中国矿业, 2011, 20(SI):24-27.

LIU J. Analysis on China's demand-supply status and world potentials of potash resource[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(SI):24-27.

[5] 郑厚义, 陆渝霞, 焦森, 等. "一带一路"沿线地区钾盐资源分布与战略选区分析[J]. 中国矿业, 2017, 26(11):42-46,52. ZHENG H Y, LU Y X, JIAO S, et al. Discussion on investment strategy layout of potash resources along "Belt and Road" [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(11):42-46,52.

[6] 邢万里, 陈其慎. 中国钾盐资源安全简析[J]. 中国矿业, 2013, 22(12):11-14.

XING W L, CHEN Q S. Analysis of potash resource security in China[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(12):11-14.

[7] 罗婷, 张永庆, 郑明贵, 等. 中国钾盐资源安全评估与预警 研究[J]. 地球科学进展, 2022, 37(6):575-587.

LUO T, ZHANG Y Q, ZHENG M G, et al. Security assessment and early warning of potash resources in China[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(6):575-587.

[8] 曹文虎, 吴蝉, 等. 卤水资源及其综合利用技术[M]. 北京: 地质出版社, 2004.

CAO W H, WU C, et al. Brine resources and its comprehensive utilization technology[M]. Beijing: Geological Publishing

House, 2004.

[9] 乜贞, 卜令忠, 刘建华, 等. 我国盐湖钾盐资源现状及提钾 工艺技术进展[J]. 地球学报, 2010, 31(6):869-874.

NIE Z, BU L Z, LIU J H, et al. Status of potash resources in salt lakes and progress in potash technologies in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(6):869-874.

[10] 商朋强, 祁才吉, 焦森, 等. 中国钾盐矿产预测评价模型 和资源潜力分析[J]. 地质通报, 2019, 38(10):1758-1767.

SHANG P Q, QI C J, JIAO S, et al. Potash assessment models and resource potential analysis in China[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(10):1758-1767.

[11] 贺令邦,杨绍祥.湘西地区钾、镁、钒矿资源特点及开发利用现状[J].矿产综合利用,2021(2):125-131.

HE L B, YANG S X. Characteristics and status of developing and utilizing potassium, magnesium, and vanadium resources in Western Hunan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(2):125-131.

[12] 孙小虹, 王春连, 马黎春. 伊朗蒸发岩、钾盐矿床及开发 利用现状[J]. 矿床地质, 2010, 29(4):725-726.

SUN X H, WANG C L, MAO L C. Evaporite and potash deposits in Iran and their development and utilization status[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(4):725-726.

[13] 李锦平, 吴良士. 伊朗地质构造及其区域成矿[J]. 矿床 地质, 2008, 27(1):120-121.

LI J P, WU L S. Geological structure and regional mineralization in Iran[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(1):120-121.

[14] 魏东岩. 试论钾盐矿床成矿条件[J]. 化工矿产地质, 1999, 21(1):1-6,14.

WEI D Y. Deal with metallogenic conditions of potash deposits[J]. Geology of Chemical Minerals, 1999, 21(1):1-6,14. [15] 唐敏, 刘成林, 焦鹏程, 等. 世界海相钾盐矿床特征定量 化分析及其意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(2):326-333.

TANG M, LIU C L, JIAO P C, et al. Quantitative analysis and significance of the marine potash deposits in the world[J]. Acta Sedmentologica Sinica, 2009, 27(2):326-333.

Geological Characteristics, Genetic Analysis and Extraction Technology of Potassium Salt Deposits along Hormuz Strait, Iran

HU Gang, LIU Shuang, ZHOU Bin, WANG Yongsheng, MIAO Xiangliang, ZHONG Yu

(Ecological Geology Brigade of Jiangxi Geological Bureau, Jiangxi Geological and Mineral Resources

Exploration and Development Co., Ltd., Nanchang 330030, Jiangxi, China)

Abstract: This is an article in the field of earth sciences and mining processing engineering. Potash ore occurs in the salt layer of Cambrian Hormuz Formation, The ore body is in dancing band with great thickness variation. The ore type is chloride-type sylvite ore, the main ore mineral is sylvite, with KCl content of $2.5\% \sim 35.20\%$. The Cambrian is a lagoon facies deposit. The continuous evaporation of potassium-bearing brine in the Persian Gulf formed a series of marine evaporite sequence containing potassium salt. Affected by the early Alpine structure activity, the salt layer was compressed to form a salt diapir structure. Using the test flow of one roughing, one scavenger, two concentrating and Coarse ore washing, good test indexes have been achieved, and potassium chloride products containing 87.44% KCl (wet basis) (91.14% dry basis) or 88.97% KCl (wet basis) (93.69% dry basis) can be obtained, with KCl recovery rates of 85.93% and 81.70%, respectively.

Keywords: Earth sciences and mining processing engineering; Iran; Hormuz Strait; Potassium salt; Geological characteristics; Genetic analysis; Extraction technology