

蔡希斯坦盆地二叠纪钾盐成矿条件和 资源开发利用

罗晓峰^{1,2}, 郑绵平^{3,4,5}, 齐文^{3,4,5}, 陈文西^{3,4,5}

(1. 中国矿业大学, 北京 100083; 2. 中川国际矿业控股有限公司, 北京 100012; 3. 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 北京 100037; 4. 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037; 5. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要: 笔者对德国几个在产钾盐矿山实地考察以及与德国钾盐研究机构的技术交流, 并结合大量文献资料, 对德国钾盐地质条件、开发现状以及开采技术的发展进行综述, 为国内找钾和钾盐的综合开发利用提供借鉴。德国钾盐产于上二叠纪蔡希斯坦盆地(Zechstein Basin), 位于相对稳定的陆块浅海陆架区, 主要通过浅陆棚阶段和次深陆棚阶段形成。蔡希斯坦盆地已识别出 8 个盐沉积旋回(Z_1-Z_8), 每个旋回的沉积方式大致相同, 沉积层序自下而上通常为: 碎屑岩→碳酸盐→硬石膏→岩盐→钾盐层→硬石膏顶板。德国二叠纪超大型钾盐盆地的发现, 表明海相沉积盆地是地球的可溶性钾盐主要储存库, 印证了海相钾盐常形成于次盆地中。同时, 通过对钾盐层顶底板和钾盐样品的化学分析, 研究特定元素(Br、Rb)的变化, 作为国内找钾的指标。钾盐的开采主要分为旱采法和水采法 2 种, 传统上以旱采法为主, 但随着技术的进步, 水采法相对旱采法有诸多优势。

关键词: 德国钾盐; 蔡希斯坦盆地; 水采法; 综合利用

中图分类号: P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6248(2014)02-0231-07

An the Overview in on Geologic Setting and Exploitation of Permian Potash in Zechstein Basin

LUO Xiao-feng^{1,2}, ZHENG Mian-ping^{3,4,5}, QI Wen^{3,4,5}, CHEN Wen-xi^{3,4,5}

(1. China University of Mining and Technology (Beijing Campus), Beijing 100083, China; 2. Zhongchuan International Mining Holdings Ltd., Beijing 100012, China; 3. Research and Development Center of Saline Lakes and Epithermal Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China; 5. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The paper is written based on the basis of the author's substantive experience on potash exploration and exploitation overseas, personal visits at operating potash mines in Germany, face-to-face communication with German potash institutes and abundant historic data. It is with an overview for on geologic setting, current status of exploitation and mining technologies of German potash. Meanwhile, it this paper aims at providing a reference for domestic potash exploration and as well as its integrated exploitation through the research in geological setting, history of formation and mining technologies of Germany martial-face potash. German potash was formed in Zechstein Basin in Permian period, which was situated relatively

收稿日期: 2014-02-17; **修回日期:** 2014-03-31

基金项目: 中国地质调查局“钾盐资源调查评价”计划项目中工作项目“油钾兼探实施方案和调查评价综合研究”(1212011085524)和 NSFC-云南联合重点基金项目(U0833601)联合资助

作者简介: 罗晓峰(1983-), 男, 工程师, 博士生。主要从事钾盐矿床的研究与开发。E-mail: 346504723@qq.com

steadily in shallow continental shelf area of continental block. Eight cycles have been found in Zechstein Basin ($Z_1 - Z_8$) and each cycle was deposited in similar sequence. The sequence of deposit from bottom to top is: clastic rock $\rightarrow$ carbonate $\rightarrow$ anhydrite $\rightarrow$ halite $\rightarrow$ sylvite $\rightarrow$ roof of anhydrite. The discovery of super large-scale Permian potash basin displays that most potash resource in the world, which is normally contained in sub-basin, comes from martial-face. Meanwhile, the change of some specific elements, such as bromine and rubidium, could be indication of potash deposit. The method should be used in the potash exploration in China. Potash could be mined by either conventional mining or solution mining. Conventional mining was more popular in past many years. However, solution mining has been improving and it has more advantages compared with conventional mining.

Key words: German potash; Zechstein Basin; solution mining; Integrated utilization

1 德国钾盐地质条件

德国是发现钾盐最早的国家,早在 1839 年德国就首次在施塔斯富特生产石盐的矿山中发现钾盐(钱自强等,2010)。德国也是最早生产钾盐的国家,从 1862 年开始生产钾盐以来,迄今已有 150 年的历史。

德国钾盐产于上二叠纪蔡希斯坦盆地(Zechstein Basin),位于相对稳定的陆块浅海陆架区,由 2 个大盐盆系组成,两者之间为稳定的克拉通构成的隆起区所分隔:北部盐盆地为稳定的陆块,主要为岩盐沉积;南部盐盆地为主要钾盐分布区,其主体盆地的北中部汉诺威-马格登堡呈北西西向延伸,其南部还分布有小的边缘成钾盆地,再南部为较活动的华力西褶皱山脉(Hermann Borchert, et al, 1964)。

蔡希斯坦盆地北侧有一个海峡与大海相连(梅燕雄等,2009),南侧为前二叠系和华力西褶皱山系与地中海相隔,西南为中央英格兰稳定地块构成相对闭沉积环境,而发育膏盐沉积广,达 1 000 万 km^2 以上(USGS,2012),是名符其实的超大型盐盆地。

该盆地早二叠世为红色陆源碎屑层(马文等,2013),其后期为赤底统红色砂泥岩,赤底统中部为厚层岩盐,但无钾盐沉积;晚二叠世发育海相含盐层序,其上为早三叠世彩色砂岩,又称斑砂岩统,为陆相红色砂层和砾岩层;中三叠世为浅海相蒸发岩系,晚三叠世为泥灰岩和岩盐。在侏罗纪早期为灰岩沉积,晚侏罗世在德国西北部沉积厚 200 m 的膏盐,但未发现钾盐层。该盆地似乎缺失白垩系,而第三

系—第四纪为陆相砂土沉积,缺少蒸发岩沉积。蔡希斯坦统盆地的晚二叠世苦灰统,最初被认为有 4 个盐沉积旋回。据近期工作,已识别出 8 个盐沉积旋回($Z_1 - Z_8$),每个旋回的沉积方式大致相同^①。沉积层序自下而上通常为:碎屑岩 $\rightarrow$ 碳酸盐 $\rightarrow$ 硬石膏 $\rightarrow$ 岩盐 $\rightarrow$ 钾盐层 $\rightarrow$ 硬石膏顶板。盐类矿物有溢晶石、光卤石、钾石盐、石盐、硬石膏、硫镁盐、无水钾镁矾、钾芒硝、钾石膏、杂卤石、钾盐镁矾等,钾矿层主要由钾石盐、光卤石、岩盐组成。但在德国境内主要仍以过去文献介绍 $Z_1 - Z_4$ 4 个旋回为主,而且只有 $Z_1 - Z_3$ 才赋存钾矿层。 Z_1 主要分布于盆地边缘, Z_2 分布于盆地内部广大区域, Z_3 分布于盆地中心(钱自强等,1994)^②。

蔡希斯坦第 1 旋回——韦拉组(Werra Z_1):盆地中北部 Z_1 大面积为硫酸盐沉积,主要仅分布在韦拉盆地西南,在石盐盆地集中区韦拉-富尔达盆地和下莱茵盆地(矿集区)盐层中产 2 层钾盐。例如,Merkers-kieselbach 矿山所见,波兰北部盐盆地也有少量钾盐矿层。

蔡希斯坦第 2 旋回——施塔斯孚特组(Stassfurt Z_2):该旋回盐层分布最广,往东至波兰、往西至英国均有产出,是南哈茨矿集区和施塔斯孚特矿集区主要钾盐开采矿区,其分布面积大于 10 万 km^2 ,产硬盐(K_2H)和钾石盐、光卤石(K_2C)。

蔡希斯坦第 3 旋回——拉因奈组(Leine Z_3):产 2 层钾盐,主要分布于北中部马格登堡-汉诺威矿集区以及波兰矿集区,为该区主要开采含钾层位。在英格兰也有该钾矿层分布。此外,在伦敦西北、波

① K-U TEC 盐技术股份有限公司. Activities of the Engineering Department, 2012,090505.

② K-U TEC 盐技术股份有限公司. Solution Mining,2012.

恩东南和华沙周围也有钾盐层不发育的钾盐盆地。

蔡希斯坦第4旋回——阿勒尔组(Aller Z₄):其分布面积较小,虽含有钾盐,但大多不具工业意义。赋钾较差的盐盆地分布在蔡希斯坦盐盆地周围。在汉诺威地区还赋存规模较小的钾盐盆地,第5~8旋回亦含膏盐,但不含钾盐。

在蔡希斯坦盐盆地发现的蒸发岩矿物,包括氯化物、硫酸盐、碳酸盐和硼酸盐等,大致将近40种(Ziegler P. A, et al, 1996)。此外,还有氟化物(MgF₂, CaF₂)、含氧氯化物(氯氧镁铝石和铁镁氯铝石)、磷酸盐(氟磷钙镁石、磷灰石)和硅酸盐(钾长石、钠长石、白云石、绢云母、绿泥石、柯绿泥石)等。在德国上二叠纪的钾盐矿物组合主要为光卤石-石盐组合,钾石盐-石盐组合和硬盐组合3种。光卤石-石盐矿物组合还常共生溢晶石、硬石膏、水镁矾等;钾盐组合也会有少量硬石膏等;钾石盐组合主要由钾石盐和石盐组成;硬盐组合主要是硬盐,是因德国产出的钾盐矿物的特殊而命名,由钾石盐和其他硫酸盐。例如,硬石膏和(或)硫酸盐(或杂卤石)组合而成。

钾石盐和光卤石以及硬盐成因历来有争论,此次Dr Christian Döhner认为德国的钾盐成因同加拿大萨斯喀彻温钾盐矿床不同,加拿大钾盐被认为是原生的;而德国钾盐是次生成因,在施塔斯孚特钾盐矿层光卤石层,由于受其底部上升溶液交代和岩石溶解,依次发生一系列的盐类矿物组合变化:由光卤石层-水镁矾-硫酸盐-杂卤石-无水钾镁矾组合,直至贫化区(Verfanburg)钾盐矿物消失^①。从Z₁—Z₃钾矿层盐矿物相关性可知,光卤石层矿物组合为光卤石-石盐,其次是溢晶石、水镁矾和少量硬石膏;硬盐层为钾石盐-石盐,其次是硬石膏、水镁矾、无水钾镁矾、钾芒硝、杂卤石、少量的钾石膏和钾盐镁矾;钾盐层为钾石盐-石盐为主;石盐层为石盐,其次为硬石膏,水镁矾,无水钾镁矾,杂卤石,少量钾石盐和钾芒硝;在Z₂旋回,由于地下侵蚀作用,还出现钾盐镁矾组合,并以钾盐镁矾和石盐为绝对优势(张彭熹, 1993)。但是,应指出据已有资料,有的德国学者据马格登堡光卤石和钾石盐都成层出现,认为那些钾石盐是原生的。

关于硬盐德国学者认为是次生的,是由于水变质作用形成的,而俄罗斯学者则认为是除局部在地表受水体影响而成盐帽外,均为原生成因。德国

Döhner认为硬盐是次生的。由于光卤石中的MgCl₂被水溶失而成钾石盐(类似我国察尔汗盐湖用淡水分解光卤石矿生产KCl)。因此硬盐钾矿物主要为KCl,而且其往往分布于盆地边缘,光卤石则在盆地中心。在德国一些钾矿区,光卤石和硬盐在小范围内相互替换,有的地区只有岩盐,认为钾盐已全部被溶失,称为“贫化区”。在贫化区黏土含量最多,硬盐区含量低些,光卤石最低,认为是盐类被溶而残留黏土的结果,也是硬盐次生成因的论据。还有在硬盐矿物组合中许多次生矿物(钾盐镁矾,钾石膏,杂卤石,无水钾镁矾)等论据,说明硬盐是次生作用形成的,一些地球化学研究表明,硬盐(包括钾石盐组合)中Br含量降低而Cu、Pb、Zn等痕量元素增多,都说明德国硬盐是次生成因的。

2 蔡希斯坦盆地成矿构造背景

蔡希斯坦盐盆地面积达1 000万km²,是世界上最大盐盆地之一,其形成于较稳定且缓慢沉降的长期沉积构造背景下。其北部和东北部为长期稳定的波罗的地盾(Baltic shield)或称克拉通。西部为未分的前寒武系台地-克拉通和加里东构造带(陆块)(500~400 Ma),南部为构造活动的阿尔卑斯褶皱带。盐盆地大体上位于加里东和华力西构造带(陆块)之上,晚二叠世海水通道与中央地堑(Center graben)相一致。

大的蔡希斯坦盆地由不同时代的地块构造,构成一系列次级盐盆地。古海水沿中央地堑由北部进入广大陆棚后,通过:①浅陆棚阶段。化学分异,由海区到内陆依次达到CaCO₃饱和-CaSO₄饱和-石盐饱和。②次深陆棚阶段。基底活动、礁滩和沙堤发育,而形成一系列次级盐盆地,而在近陆未封闭的次盆地形成众多钾镁盐沉积。

3 德国钾盐现状

德国实际赋存钾盐资源潜力巨大,根据Global Potash deposits在2010年的统计数据,德国可采钾盐(K₂O)储量为8亿t。据统计,德国钾盐近年实际生产量年均约300万t,约占世界总产量7%。

东德、西德合并后,东德的多数优质钾矿山被西德

① Christian Döhner, 2012

K+S 公司收购,开采条件差的钾矿破产关闭,仅个别钾矿在独立经营。德国是世界上最早发现和开采钾盐的国家。目前,既有传统地下开采,也有水溶开采;既开采钾石盐,也在开采光卤石矿。一些传统的钾矿钾资源耗尽,已经闭坑或转产石盐。废弃的地下矿井被

用于垃圾填埋或开发为博物馆和旅游地等。

由图 1 可见,德国主要的工业采钾区域集中在中北部,南起富尔达、埃尔福特,北至不莱梅,东到马格登堡。而这一区域主要是蔡希斯坦盆地第二旋回覆盖的地区,第三旋回也覆盖了部分地区^①。

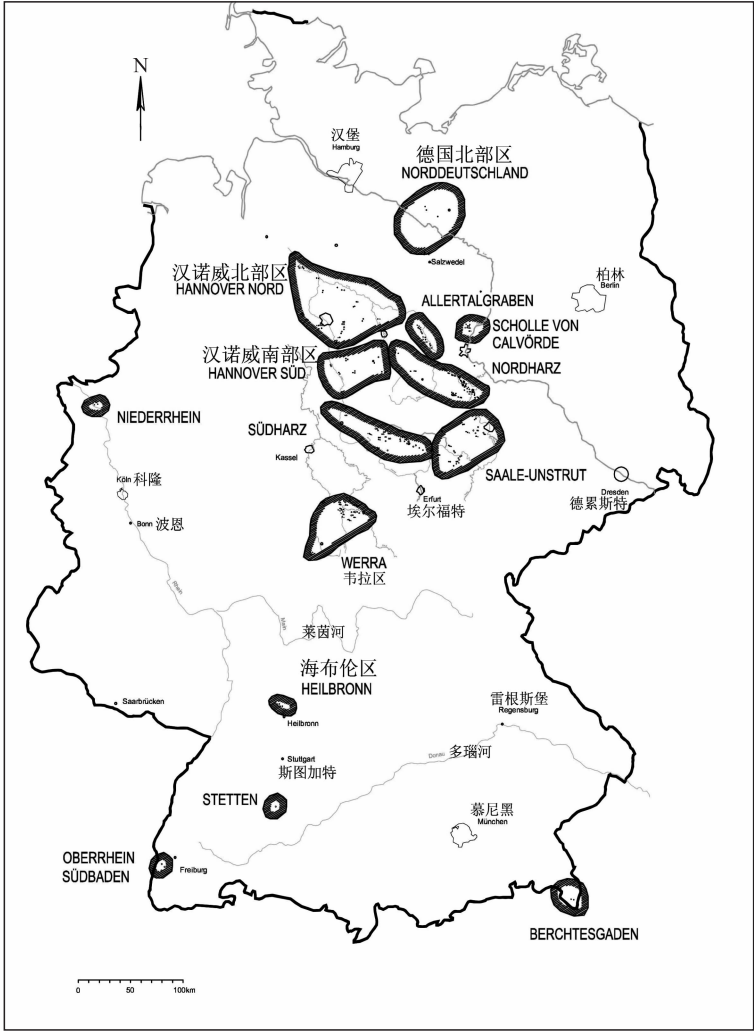


图 1 德国工业采盐区域图(据德国 K-UTEC 盐矿地质公司地质专家 Volker Asemann 内部资料)

Fig. 1 Salts mining area of Germany

(From Volker Asemann, Potash Expert of K-UTEC, a Germanic Geology Firm specialized in salts)

德国有工业意义的钾盐矿床主要分布在易北河以西和威悉河以东地区。德国东部可供开发的钾盐矿分布在 4 个矿集区,它们是马格德堡地区、施塔斯富特、南哈茨地区和韦拉地区;而德国西部钾盐矿主

要分布在汉诺威地区和韦拉-富尔达地区。南部钾盐层埋藏深度较浅,北德盆地钾盐沉积分布很广,但由于矿层埋藏太深和构造条件复杂,且形成了众多的盐底辟,很多地区目前尚未开发利用^②。

① Volker Asemann. K-U TEC 盐技术股份有限公司. 交流材料,2012.
② 地质部钾盐地质考察团. 苏联和德意志民主共和国钾盐矿床地质工作参考察报告,1963.

4 德国钾盐的开采

目前,世界上主要开采的固体钾盐类型有钾石盐和光卤石2种。钾石盐的主要成分为氯化钾和氯化钠,另有少量的不溶物及其他矿物(袁见齐,1963)。而光卤石为 $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,此类矿床的主要成分除了氯化钾和氯化钠,还有氯化镁。由于德国二叠系钾盐资源具有硬盐这种特殊组分,与世界上一般氯化物型钾盐矿床不同,其特点是在矿层中赋存硫酸钾和硫酸镁。因此,K+S公司还生产各种工业和农业用的标准产品和高价值的特殊产品(Global potash deposits, 2010)。钾盐开采主要使用的开采方法有旱采法和水采法2种。

旱采法是从地表打竖井进入矿床,以巷道掘进和定向爆破的方式采取矿石,通常将采出的矿石在地下进行初步破碎,再用机械方式将矿石提升到地面。此采矿方法与传统的其他固体矿产(不只是煤矿)相似。提升到地面的矿石被再次破碎,然后进入加工厂,调浆加入浮选药剂,然后进行浮选,将氯化钾从氯化钠和不溶物中分离出来。

水采法通常是打一对竖井进入矿床下部,2个井先各自分别形成溶腔。打井的同时插入外套管,直至矿床下部,用水泥将外套管固定,再嵌入内套管,注入清水在内外套管中形成环流,溶解矿体。然后逐渐将2个溶腔扩大,用油垫或气垫控制溶解的方向,同时利用清水和卤水的密度差,使溶解的方向沿水平方向展开,最终使一对竖井在地下溶通。这时,就可以将一个井注水,一个井回卤,形成环流,从而进入大规模生产阶段,建议补充钾盐溶解采出后的加工工艺。

注水井在钾盐层中的井口较浅,这是为了让注入的清水能迅速溶解两侧的钾盐。溶解了钾盐后的卤水密度变大,从而沉向溶腔的底部,这时经过充分溶解的卤水达到饱和状态,难以再溶解底部的钾盐和钠盐,从而防止溶腔向下扩展。这样,保证溶解钾盐层的顺序是从钾盐层的底部逐渐向顶部发展。而回卤井则插入较深,这样方便采收在溶腔底部的饱和卤水。一段时间之后,则将注水井和回卤井对调,之前的回卤井变成注水井,这是为了保证两边溶解速度的平衡。

气垫/油垫技术的运用是为了控制溶解的方向,

防止注水井过于迅速的在进口附件的位置向上溶解。用气垫/油垫将从注水井出来的清水适当与进口附件的上覆钾盐层隔离,使清水向两侧流动,均匀地溶解钾盐层。气垫/油垫的强度是运用的难点。德国通常用气垫,这样避免了排污,更加环保,这也是得益于德国对环保的高度要求。而在北美,通常则采用油垫,其主要成分为柴油。油垫技术在实际操作中更容易掌握。

水采法要注意:①一对井在矿体中位置要处于同一条走向线上,以保证溶通的深度一致。②用声纳监测溶腔的变化,调整溶解的方向和速度。③油垫或气垫是溶解技术的关键。溶腔中靠近井口的位置压力最大,往两边压力逐渐减小。监测溶腔的变化来对油垫或气垫的厚度做出调整。

矿物被提取到地面时,要将氯化钾(KCl)和氯化钠(NaCl)进行分离,2种矿物溶解度的变化与温度的相关性不同,氯化钾(KCl)的溶解度随温度的升高显著升高(Robert H. Perry, et al, 2001),而氯化钠(NaCl)的溶解度随温度的升高缓慢降低(图2)。因此,卤水在地下溶解时温度越高,到达地面冷却池后温度越低,越有利于氯化钾(KCl)的结晶分离。

5 水采法相对旱采法的利弊比较

优势:相对更低的矿山固定投资成本;更短的矿山建设周期;更少的地表设施;更少的尾矿排放,对环境的影响更小;更少的劳动力需求;工人安全系数更高;杜绝矿井渗水危害;因残留物多留在溶腔内,造成的地表沉降更小;更有利于开采深部的资源。

弊端:用水量更大,需要有足够的地表水;不适用于地质结构复杂的地区,如较多的裂隙和破碎带;不适用倾角太大的矿床;矿床埋藏浅时经济效益不好。

6 钾矿的综合开发

德国钾矿开发的收入来自几个方面:①钾盐的生产,这是主要的收入。②光卤石矿中,采钾盐的同时将氯化镁(MgCl_2)作为副产品。氯化镁的主要用途是除雪剂,市面上常用的除雪剂有氯化镁(MgCl_2)和氯化钠(NaCl),氯化钠为原料的除雪剂

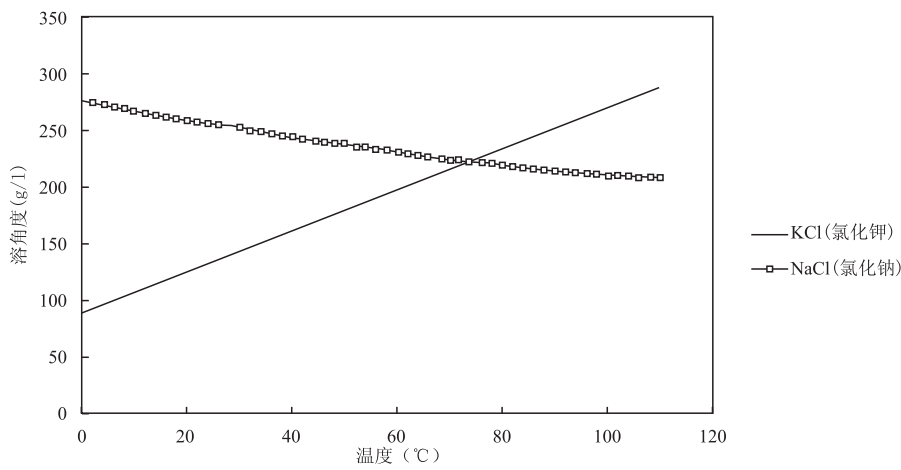


图 2 氯化钾(KCl)和氯化钠(NaCl)的溶解度曲线图

Fig. 2 The graph of the solubility of KCl and NaCl

(据 Robert H. Perry, Don W. Green, 2001. Perry’s chemical engineers’ handbook, McGraw-Hill Companies, Inc.)

适用的温度约为零下 10℃ 以上 ($\geq -10^{\circ}\text{C}$), 在更低温的环境下难以达到除雪的效果, 而氯化镁为原料的除雪剂适用的温度可以达到 -29°C 左右 ($\geq -29^{\circ}\text{C}$)。③废弃的矿坑用作垃圾回填的储存室或油气储藏室。垃圾被焚烧后, 用粘合剂将灰烬处理成糊状, 注入废弃的矿坑。或者将石油或天然气注入矿坑进行储藏。④将废弃矿坑做成旅游项目。钾矿没有瓦斯问题, 在没有渗水的情况下, 安全系数高。在深达几百米甚至上千米的废弃矿坑中设置矿业博物馆, 介绍钾矿开发的历史, 展示采矿器械和样品, 还原地下休息室、茶座、甚至还有电影院、保龄球馆和表演舞台, 当看到在矿井中表演过的明星海报时, 仿佛进入了另一个世界。甚至很多人在地下巷道中进行马拉松比赛。

7 对中国钾盐找矿和开发的借鉴意义

德国钾盐由浅陆棚和次深陆棚盐类分级沉积作用生成, 同时, 很多钾石盐是由光卤石在交代作用下次生而成, 再次印证了海相钾盐常形成于次盆地中。同时, 通过对钾盐层顶底板和钾盐样品的化学分析, 研究特定元素 (Br、Rb) 的变化, 作为国内找钾的指标。

德国二叠纪超大型钾盐盆地的发现, 也表明海相沉积盆地是地球的可溶性钾盐主要储存库。中国地质条件虽然有所不同, 既有中小型海相盆地, 又有陆相盆地。钾盐计划项目以海相为主, 海陆相兼顾,

也是符合中国地质实际, 应当坚持进行 (郑绵平, 2006)。

生产工艺上, 德国在水采法技术成熟稳定, 其卤水循环利用和尾矿回填可以显著降低尾矿的排放, 甚至做到地表零排放, 将其对环境的影响降到最低。光卤石矿加工钾石盐, 尾卤中富含 MgCl_2 等有害环境的组分。德国光卤石矿山将部分尾卤回填, 部分用于加工生产融雪剂。尾卤处理能力限制了钾盐产量的扩张。注意在矿业开发过程中对环境的保护, 值得我国相关企业借鉴

德国由于钾盐资源丰富, 其开采利用的多为高经济附加值的资源。中国钾盐资源贫乏, 体量小、埋藏深且地质结构复杂, 需要进行更深入的工作方能弥补自身资源的不足。

另外, 德国将科学技术紧密结合到商业生产上, 将技术服务形成公司化运作的经验值得借鉴。一个规模不大的 K-U TEC 公司, 目前在几大洲都有他们的客户。K-U TEC 公司实际上是承担工业设计任务, 为此, 他们配套相应齐全的实验室和自行研制大型蒸发和实验车间, 设计的内容既注重基础理论运用, 包括质量守恒、控制理论及其相应设备, 又有实际具体的工艺描述, 化学分析监控流程和质量分析。在研究人才, 内容和机构设置上, 国内研究机构应超前考量, 把地质和化学、物理工艺, 以至设计逐步结合起来, 让科学技术更好的为商业生产服务。在服务对象上也不要局限于中国, 现在和将来都会有国际需求。

参考文献(References):

- 钱自强, 曲一华, 刘群. 钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 104-118.
- Qian Ziqiang, Qu Yihua, Liu Qun. Sylvite Deposit [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2010: 104-118.
- 袁见齐. 含钾沉积形成条件的几个问题[A]. 钾磷矿床研究[C]. 北京: 科学出版社, 1963: 1-16.
- Yuan Jianqi. Some Problems of the Formation of Potash Sediment[A]. The Research of Potash and Phosphor Deposit[C]. Science Press, Beijing, 1963: 1-16.
- 马万栋, 马海州. 塔里木盆地地质环境演化及钾矿寻找研究进展[J]. 西北地质, 2008, 41(2): 1-26.
- Ma Wandong, Ma Haizhou. Geological Evolution and Advance of Seeking Potash in Tarim Basin[J]. Northwestern Geology, 2008, 41(2): 1-26.
- 马文, 丁玉进. 祁漫塔格中部元古代高钾(变质)侵入岩体的发现及其地质意义[J]. 西北地质, 2013, 46(1): 32-39.
- Ma Wen, Ding Yujin. The Discovery and Geological Significance of Proterozoic Intrusive Rock with High-K in the Central of Qimantage Area[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(1): 32-39.
- 梅燕雄, 裴荣富, 杨德凤, 等. 全球成矿域和成矿区带[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 383-389.
- Mei Yanxiong, Pei Rongfu, Yang Defeng, et al. Global Metallogenic Domains and Districts[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 383-389.
- 王春宁, 余俊清, 陈良, 等. 钾盐资源全球分布和我国找钾实践及方法探究[J]. 盐湖研究, 2007, 15(3): 10-25.
- Wang Chuning, Yu Junqing, Chen Liang, et al. A Review on the Exploration of Global Potash Resources with an Emphasis on the Past and Present Status of China with a Methodological Perspective[J]. Journal of Salt Lake Research, 2007, 15(3): 10-25.
- 张彭熹, 张宝珍, T. K. 洛温斯坦, 等. 古代异常钾盐蒸发岩的成因——以柴达木盆地察尔汗盐湖钾盐的形成为例[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-126.
- Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, T. K. Lowenstein, et al. The Formation of Ancient Abnormal Potash Evaporite—Take the Formation of Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin as Example [M]. Science Press, Beijing, 1993: 1-126.
- 钱自强, 曲一华, 刘群, 等. 钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 148-158.
- Qian Ziqiang, Qu Yihua, Liu Qun, et al. Sylvite Deposit [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1994: 148-158.
- 郑绵平, 齐文, 张永生. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析[J]. 地质通报. 2006, 25 (11): 1239-1246.
- Zheng Mianping, Qi Wen, Zhang Yongsheng. Present Situation of Potash Resources and Direction of Potash Search in China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25 (11): 1239-1246.
- British Sulphur Corporation. World Survey of Potash Resource [M]. The British Sulphur Corporation Limited, 1979: 114-123.
- Hermann Borchert, Richard O. Muir. Salt Deposits, The Origin Metamorphism and Deformation of Evaporites[M]. 1964: 37-57.
- P. J. Burek, A. E. M. Nairn. Salt deposits Their Origin and Composition[M]. 1971: 4-26.
- U. S. Geological Survey. Minerals Yearbook [R]. 2010: 58-59
- USGS. Mineral Commodity Summaries[R]. 2012: 122-123
- Ziegler P. A. Geological Atlas of Western and Central Europe[R]. 1982
- Elsevier, Amsterdam Strohmenger C., Voigt E., et al. Sequence stratigraphy and cyclic development of Basal Zechstein carbonate-evaporite deposits[J]. Sedimentary Geology, 1996, 102: 33-54
- Robert H. Perry, Don W. Green. Perry's chemical engineers' handbook[M]. McGraw-Hill Companies, Inc., 2001: 2-123