

岩性因素对油砂热碱水分离效率的影响 ——以四川厚坝及内蒙古图牧吉油砂为例

何嘉健^{1,2} 耿安松^{1*} 吴亮亮¹

1. 中国科学院 广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 油砂是一种重要的非常规石油资源, 目前较为常用的沥青回收方式是热碱水分离法。本文运用热碱水分离法处理了四川厚坝与内蒙古图牧吉两地的油砂样品, 并对上述两地的油砂样品进行了镜下薄片观察、XRD 分析以及比表面积和总孔容测定, 对比分析了两者的岩性特征和油砂热碱水分离实验的数据。结果表明, 油砂中黏土矿物的含量、油砂岩的胶结程度及胶结方式、油砂的砂颗粒粒径、油砂层遭受风化作用的程度等因素都会影响油砂沥青热碱水分离的效率, 在设计油砂开采工艺流程时, 应该综合考虑这些因素。

关键词: 油砂; 岩性因素; 热碱水分离; 沥青回收

中图分类号: TE626.6 P618.13 文章编号: 1007-2802(2015)02-0379-08 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2015.02.021

Effect of Lithology on the Efficiency of the Hot Water-Based Extraction for Oil Sand Bitumen: A Case Study on Oil Sands from Houba, Sichuan and Tumuji, Inner Mongolia

HE Jia-jian^{1,2}, GENG An-song^{1*}, WU Liang-liang¹

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Oil sand is a kind of unconventional fuel resource. The hot water-based extraction is the most common way to recover bitumen from oil sands. In this research, the oil sand samples from Houba, Sichuan, and Tumuji, Inner Mongolia, were conducted using the hot water-based extraction method. Microscope observation, XDR analyses, specific surface area and pore volume of oil sands were applied to qualify the lithology of different samples. The bitumen recoveries of the hot water-based extraction were correlated to the lithologic characters of the oil sands. The result shows that factors, such as contents of clay minerals, cementation manner and degree, grain sizes of minerals, and the degree of weathering, may affect the bitumen recovery efficiency from oil sands using the hot water-based extraction. These factors should be taken into account in process design for bitumen recovery from oil sands.

Key words: oil sands; lithology; hot water-based extraction; bitumen recovery

油砂外观似棕黑色蜜糖, 是一种含沥青、砂、黏土和水的砂岩或其他岩石。全球目前探明的油砂总储量(3.7~3.8) × 10¹² 桶(李莉, 2005; 孙微微等, 2007), 主要分布在加拿大、俄罗斯、委内瑞拉、美国等国家(许修强等, 2010)。其中加拿大开采油砂的技术最为成熟, 2004 年加拿大油砂油产量已达 100 × 10⁴ 桶/日, 预计 2015 年可达 270 × 10⁴ 桶/日(王梦

圆和李文, 2006)。因为世界经济对能源的依赖和不断上涨的原油价格, 所以油砂作为一种重要的非常规石油资源所受到的关注日益上升。

中国的油砂资源广泛分布于新疆、青海、内蒙古、四川、西藏等大型盆地中(刘人和等, 2009)。不同地区的油砂, 其资源量大小、油砂品位及岩性特征均有所差异(贾承造, 2007)。已有的开发经验表

收稿日期: 2014-02-17 收到 2014-03-13 改回
基金项目: 国家自然科学基金项目(41272148)

第一作者简介: 何嘉健(1988-) 男, 硕士研究生, 研究方向: 有机地球化学. E-mail: hejiajian@gig.ac.cn.

* 通讯作者简介: 耿安松(1958-) 男, 研究员, 研究方向: 有机地球化学. E-mail: asgeng@gzb.ac.cn.

明,油砂矿的埋深、油砂自身性质等因素决定了使用何种开采方式来回收沥青更为经济合理。通常露天开采法一般应用于埋深小于 75 m 的油砂矿,而埋深大于 75 m 的油砂矿则采用就地开采法(郑德温等,2008)。根据油砂中沥青和矿物颗粒之间是否存在水膜,可以将其分为水润性油砂(砂颗粒与沥青间存在水膜)和油润性油砂(砂颗粒与沥青间没有水膜)。针对油润性油砂,目前通常采用溶剂萃取法或热解干馏法回收沥青(Darcovich *et al.*, 1989; 何泽能等,2006)。溶剂萃取法是使用有机溶剂萃取油砂中的沥青,然后通过蒸馏将沥青从有机溶剂中分离出来(许修强等,2010)。热解干馏分离法采用 250℃ 以上的高温裂解油砂,使油砂沥青的分子量变小、胶质减少,从而使沥青易于从油砂矿体系中分离出来。裂解后的轻质油砂油品质较好,但该方法所需温度较高、能耗较大(孙楠等,2007)。而针对水润性油砂,热碱水分离法是目前最为常用的沥青回收方式(接维强和魏春光,2005)。该方法的主要原理是将油砂放置在热水中,加入表面活性剂、碱、破乳剂等试剂,并在通入空气的条件下搅拌,使油砂中沥青与固体矿物分离,从而达到回收利用油砂资源的目的。

大量研究表明(Dai and Chung, 1996; Masliyah *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005; Long *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2006),热碱水分离法处理油砂的过程受温度、加碱量、通气量以及添加剂等多种因素影响。温度一直是油砂处理过程中的重要因素。温度的影响表现在 3 个方面:(1) 温度升高可以降低油砂沥青的黏性,使沥青更容易从砂粒的表面脱离;(2) 温度升高,令沥青和砂粒表面产生负电荷,因此沥青与砂粒间的斥力变大;(3) 温度升高亦会令沥青和黏土间的吸附力变小甚至消失(Long *et al.*, 2005)。回收油砂沥青应在碱性环境进行,比如加拿大 Athabasca 油砂工业生产中矿浆的 pH 值为 8.2 (Basu *et al.*, 1998)。这是由于碱的加入能同沥青中酸性大分子组分结合生成表面活性剂,降低了油水界面的张力,令沥青更易于与砂颗粒分离。此外根据静电双电层理论(Lyklema *et al.*, 1999),碱性环境下沥青与砂粒间的斥力变强,吸附力降低。通气条件则是影响沥青浮选效果的关键因素,鼓入的空气通过与已经从油砂颗粒上分离出来的沥青相结合,形成沥青空气囊,有利于沥青油上浮到矿浆表面形成沥青泡沫。这一过程的关键是控制空气的流量,通气量过大产生的气泡也随之变大,而过大的气泡容易被附着在气泡上的砂粒撕裂,造成一部分沥青

无法上浮,影响沥青收集率(Dai and Chung, 1996)。

前人的研究主要是从纯化学的角度来探讨油砂热碱水分离法的分离效率,而对于油砂自身岩性特征对分离效果的影响研究则鲜见报道。本文运用 X 射线衍射仪、光学显微镜、ASAP 2020 全自动快速比表面积分析仪等分析方法和手段,研究内蒙古图牧吉和四川厚坝油砂岩性特征的差异,并结合罗茂等(2011)的实验结果综合分析各类岩性特征的差异对沥青回收率造成的影响。

1 样品与实验

本次实验的样品采自内蒙古图牧吉镇和四川省厚坝镇。图牧吉样品采自内蒙古自治区兴安盟扎赉特旗图牧吉镇,属于松辽盆地西部的斜坡区。野外观察发现,图牧吉油砂埋藏较浅,而且含油量高,油砂层样品均为黑色砂糖状固体,胶结疏松,接触后污手。根据油砂矿层的分布,选取一处纵向剖面,采集了从河床冲刷层到油砂层一系列样品 12 块。其中 NMG-6 至 NMG-8 为油砂层上部黏土、砂岩覆盖层,NMG-1 至 NMG-5 号样品为下部油砂层,NMG-1 位于油砂层的顶部,NMG-5 位于油砂层底部(图 1)。厚坝样品采自四川省江油市附近的厚坝—雷家河一带。厚坝地区采集了油砂露头样品 20 块和岩心样 34 块,均为胶结致密的砂岩。

为了更好地说明岩性的差异对油砂分离效果的影响,本文在罗茂等(2011)进行的实验的基础上又选取了同 NMG-4 号样品的矿物成分存在一定差异的 NMG-1 号样品,在相同的实验条件下进行了油砂热碱水分离实验。具体实验流程见罗茂等。

将油砂样品制备成光薄片,因图牧吉样品为含油疏松的砂岩,为了更好的观察沥青与矿物之间的结构,采用煮胶法制得铸体薄片 3 块。此外还将部分索式抽提后的油砂样品制成光薄片 79 块,以便观察油砂矿中砂颗粒的岩性特征。镜下观察使用的是徕卡 DMRX 显微镜,并对观测结果进行照相。

选取已进行过分选实验研究的样品 NMG-1、NMG-4、HB-DH-02、HB-DH-48 进行孔容及比表面积测定。送样前先用索式抽提,以二氯甲烷:甲醇(体积比 93:7)的混合溶液抽提样品,水浴温度 50℃。用滤纸包裹 1 g 左右样品,抽提 72 h 左右直至抽提器中溶剂无色。测定总孔容和比表面积使用的是运用美国 Micromeritics 公司 ASAP 2020 全自动快速比表面积分析仪。吸附质为氮气,比表面积以 BET 方程计算得出,孔隙分布特征采用 BJH 法计算。

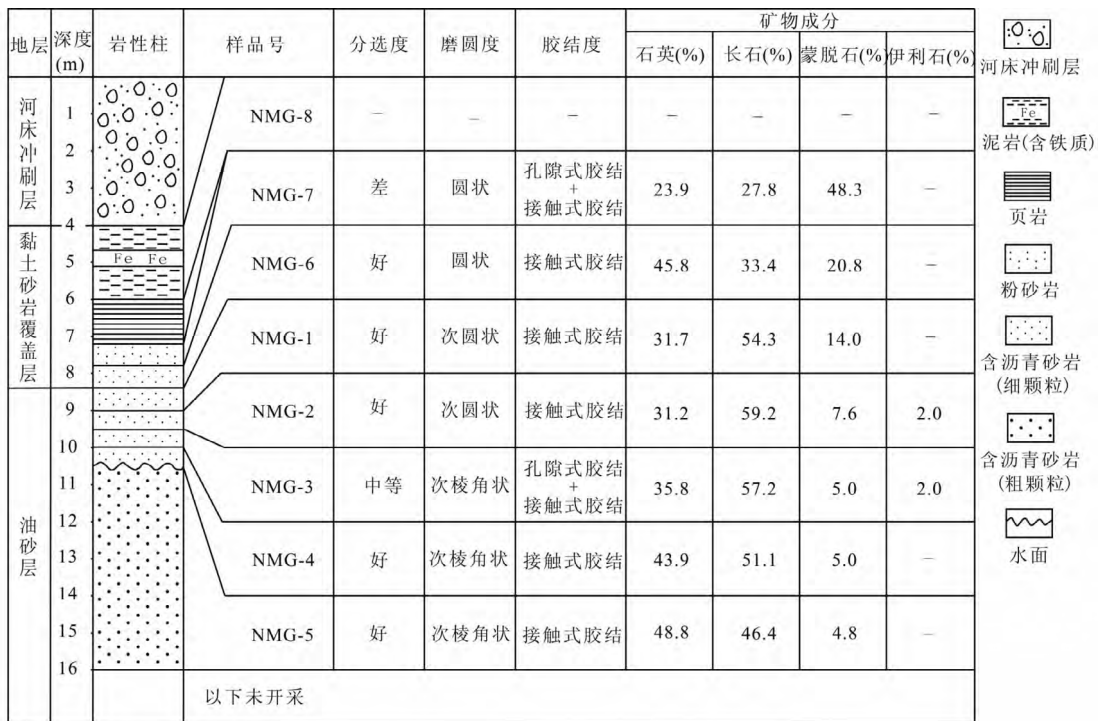


图1 内蒙古图牧吉油砂剖面岩性特征图

Fig.1 Lithologic profile of the oil sands at Tumuji, Inner Mongolia

测定矿物成分和含量使用的是德国 BRUKER D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪 Cu(单色)。测试条件为工作电压 40 kV; 工作电流 30 mA; 扫描范围 $2\theta=3^{\circ}\sim 85^{\circ}$; 狭缝 1 mm; 扫描速度 $4(^{\circ})/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 油砂热碱水分离实验结果对比

表 1 为内蒙古图牧吉及四川厚坝 2 个地区油砂的含油率及热碱水分离实验的沥青回收率统计表。4 个油砂样品都是在相同的实验条件下进行处理的, 即均称取 100 g 油砂, 在水温 80°C 、加入 1.6 g 氢氧化钠、浮选时间为 115 min。其中, 图牧吉地区

表 1 油砂样品的含油率和回收率

Table 1 Oil content and bitumen recovery of oil sand samples

地区	样号	含油率 (%)	沥青 1 收率 (%)	沥青 2 收率 (%)	沥青 3 收率 (%)	总回收率 (%)
内蒙古	NMG-1	5.16	22.8	0.13	3.7	26.6
图牧吉	NMG-4*	15.39	57.2	2.11	18.3	77.6
四川	HB-DH-02*	2.9	—	—	3.1	3.1
厚坝	HB-DH-48*	1.8	—	—	20.6	20.6

注: 沥青 1: 实验中浮选到矿浆水表面的沥青; 沥青 2: 分离实验结束后矿浆水中乳化沥青; 沥青 3: 在矿浆水中分散状悬浮沥青。
*: 数据来自罗茂等(2011)。

NMG-1 号样品的沥青总回收率为 26.6%, 而 NMG-4 号样品则达 77.6%; 厚坝地区 HB-DH-02 号样品的总回收率仅 3.1%, HB-DH-48 号样的总回收率也不高, 为 20.6%。即上述 2 个地区的油砂回收率存在很大差异, 且图牧吉地区 2 个不同样品之间的回收率同样存在差异。影响油砂热碱水分离效果的因素有温度、加碱量、通气、油砂本身的性质等。研究表明, 80°C 的水温及通气属于两地油砂样品最优的实验条件, 而 100 g 油砂样品中加入 1.6 g 氢氧化钠是图牧吉油砂的最优加碱量(罗茂等, 2011)。由于厚坝油砂含油量明显低于图牧吉油砂, 因此图牧吉油砂的最优加碱量应高于厚坝油砂样品。加碱量超过最优值后并不会对回收效率再产生明显影响, 因此温度、加碱量及通气等条件可能不是造成上述分离效果差异的主要原因。而导致上述分离效果不同最有可能的原因是两地油砂自身性质的差异。下面将从两地油砂岩性特征差异的角度来探讨岩性因素对油砂热碱水分离的影响机制。

2.2 油砂岩性特征对比

2.2.1 显微镜下油砂薄片观测结果 通过对样品薄片在单偏光、正交偏光镜下的观察, 发现不同油砂样品在矿物成分、胶结程度、磨圆度和分选度等方面均存在一定差异(表 2)。图 2 是图牧吉和厚坝油砂样品显微镜下的照片。图牧吉油砂样品矿

表 2 图牧吉和厚坝油砂岩性特征对比
Table 2 Lithology of the oil sands from Tumuji and Houba

油砂特征	图牧吉油砂	厚坝油砂
分选度	分选性中等: 主要粒级成分含量 50%~75%	分选性差: 主要粒级成分含量小于 50%
磨圆度	次棱角状一次圆状	棱角状一次棱角状
胶结程度	接触式胶结	基底式胶结或孔隙式胶结
矿物成分	主要矿物为石英、长石(钾长石、钠长石), 少量蒙脱石	主要矿物为长石(钾长石、钠长石)、石英和绿泥石

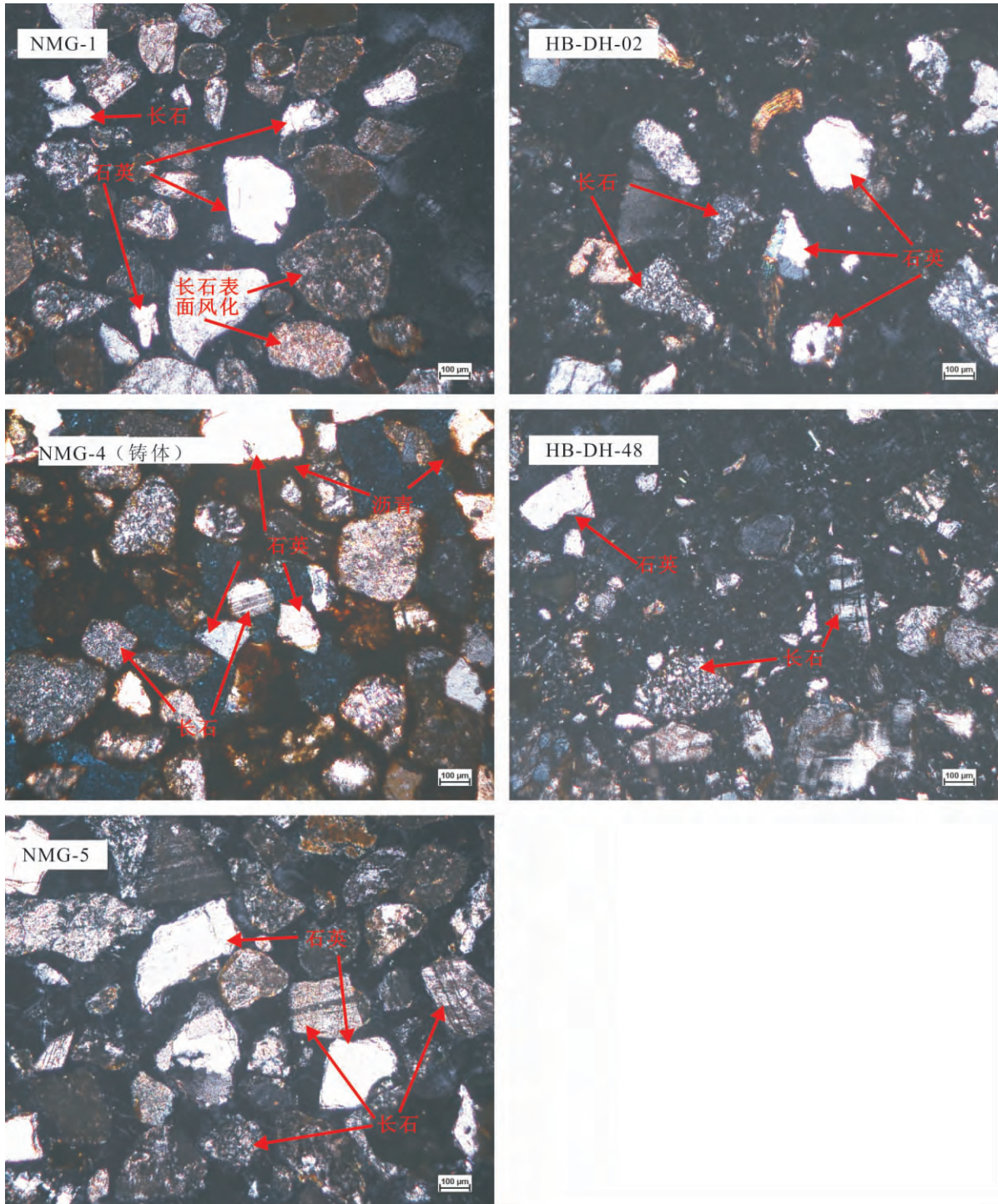


图 2 图牧吉(左)、厚坝(右)油砂样品正交偏光镜下照片
Fig.2 Photographs of the oil sands: under crossed polarizers (Left column is for Tumuji ,right is for Houba)

物分布疏松,矿物颗粒大小接近,孔隙度大,镜下可见主要矿物成分包括石英以及长石,其固体矿物颗粒粒径范围为 100~300 μm。从 NMG-4 的铸体薄片可以看到沥青环绕矿物分布,棕色区域面积较大,表明其含油程度高。而位于采样地点上部的 NMG-1 样品,则由于靠近地面受到强烈风化作用的影响,其长石透明度降级,表面浑浊不清。而厚坝油砂样品矿物颗粒胶结紧密,成分除长石族、石英外,还含少量白云母、黑云母等,沥青含量亦明显少于图牧吉祥样品。厚坝油砂中黏土以胶结物的形式存在于矿物颗粒之间,矿物间存在大量的小于 100 μm 的碎屑矿物(图 2)。图牧吉油砂样品的造岩碎屑颗粒的磨圆度高于厚坝油砂。

2.2.2 油砂的矿物成分及含量 使用 X 射线衍射测试了两地油砂的矿物成分和含量,测试结果如表 3 所示。图牧吉油砂固体矿物主要成分为石英(31.7%~48.8%)、钠长石(27.4%~51.1%)、蒙脱石(4.8%~14%)。其中 NMG-1 号样品中蒙脱石含量较高为 14.0%,而 NMG-4 及 NMG-5 号样的蒙脱石含量均在 5%左右。厚坝油砂样品的固体矿物主要成分为长石、石英和绿泥石。HB-DH-02 和 HB-DH-48 都不含蒙脱石,石英含量较低,绿泥石的含量都在 20%以上。数据显示(图 3),2 个厚坝样品 HB-DH-02、HB-DH-48 和 1 个图牧吉祥样品 NMG-1 的黏土矿物含量(21.1%、28.1%和 14%)高于另外 2 个图牧吉油砂样品 NMG-4 和 NMG-5(5.0%和 4.8%)。已有研究表明,长石在自然条件下风化会形成蒙脱石、高岭石、伊利石及绢云母等黏土矿物(马毅杰等,1999)。根据野外采样情况,NMG-1 号样品在顶层,遭受到强烈的风化作用。因此导致 NMG-1 号样品较 NMG-4 及 NMG-5 号样品的蒙脱石含量不同的原因可能是样品风化程度的差异。

表 3 图牧吉和厚坝油砂矿物成分

Table 3 Mineral composition of the oil sands from Tumuji and Houba (%)

样品号	石英	钠长石	钾长石	蒙脱石	伊利石	绿泥石
NMG-1	31.7	27.4	26.9	14.0	—	—
NMG-4	43.9	51.1	—	5.0	—	—
NMG-5	48.8	43.4	3.0	4.8	—	—
HB-DH-02	30.6	25.2	23.2	—	—	21.1
HB-DH-48	15.1	38.9	17	—	5.1	23

注:“—”表示极微量或未检出。

2.3 油砂的比表面积及总孔隙

比表面积是指多孔固体物质单位质量所具有

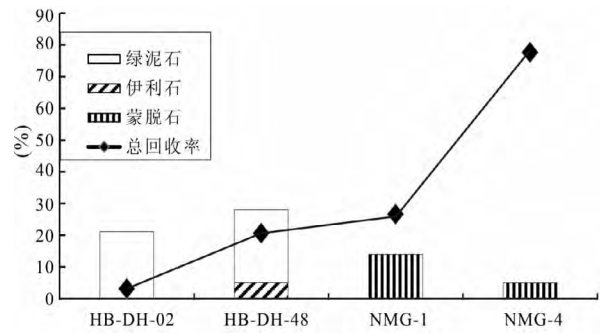


图 3 黏土矿物含量与总回收率关系

Fig.3 Relation between clay minerals contents and gross recovery of bitumen

的表面积。比表面积又分为内表面积和外表面积,由于固体物质外表面积相对内表面积而言很小,基本可以忽略不计(徐如人等,2004),本文测得的比表面积指内表面积。孔容又称孔体积,是单位质量多孔固体所具有的细孔总容积(徐如人等,2004)。总孔容和比表面积表征的是岩石的吸附能力的大小,总孔容和比表面积越大,吸附能力越强。

吸附-脱附等温线是指在一定温度下溶质分子在两相界面上进行的吸附过程达到平衡时溶质分子在两相中浓度之间的关系曲线,其形状与样品的孔组织结构有关。图 4 为两地样品的氮气吸附-脱附等温线,所有样品的吸附-脱附等温线在相对压力为 0.1 时出现拐点,吸附曲线的吸附量平稳上升,直到相对压力为 0.9 左右开始出现突变,脱附曲线与吸附曲线在相对压力为 0.5~1.0 处不重合。这些样品的吸附-脱附等温线均与国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)定义的 IV 型吸附等温线(图 5)类似(Sing et al.,1985; Rouquerol et al.,1994)。IV 型等温线反映了样品中存在介孔,介孔中气体分子发生多层吸附时能产生毛细凝聚现象,表现为等温线相对压力在 0.9 左右产生突跃(徐如人等,2004)。另外,在相对压力为 0.5 时吸附-脱附等温线开始出现滞后环,滞后环在相对压力为 0.5~0.8 时平缓,而在 0.8~1.0 时则明显变陡。这是典型的 IUPAC 定义的 H3 滞后环特征,表明样品的孔隙为狭缝结构(徐如人等,2004)。图牧吉、厚坝两地样品饱和压力下的最大吸附量有差异,3 个图牧吉祥品的最大吸附量均比厚坝样品低。但 NMG-1 号样品的最大吸附量明显高于 NMG-4 及 NMG-5 号样品。

图 6 是样品的孔径分布图。由图 6 右可见,HB-DH-02 的孔径分布曲线呈双介孔结构。其第一类孔分布较窄,位于 4 nm 处,第二类孔分布在 8~

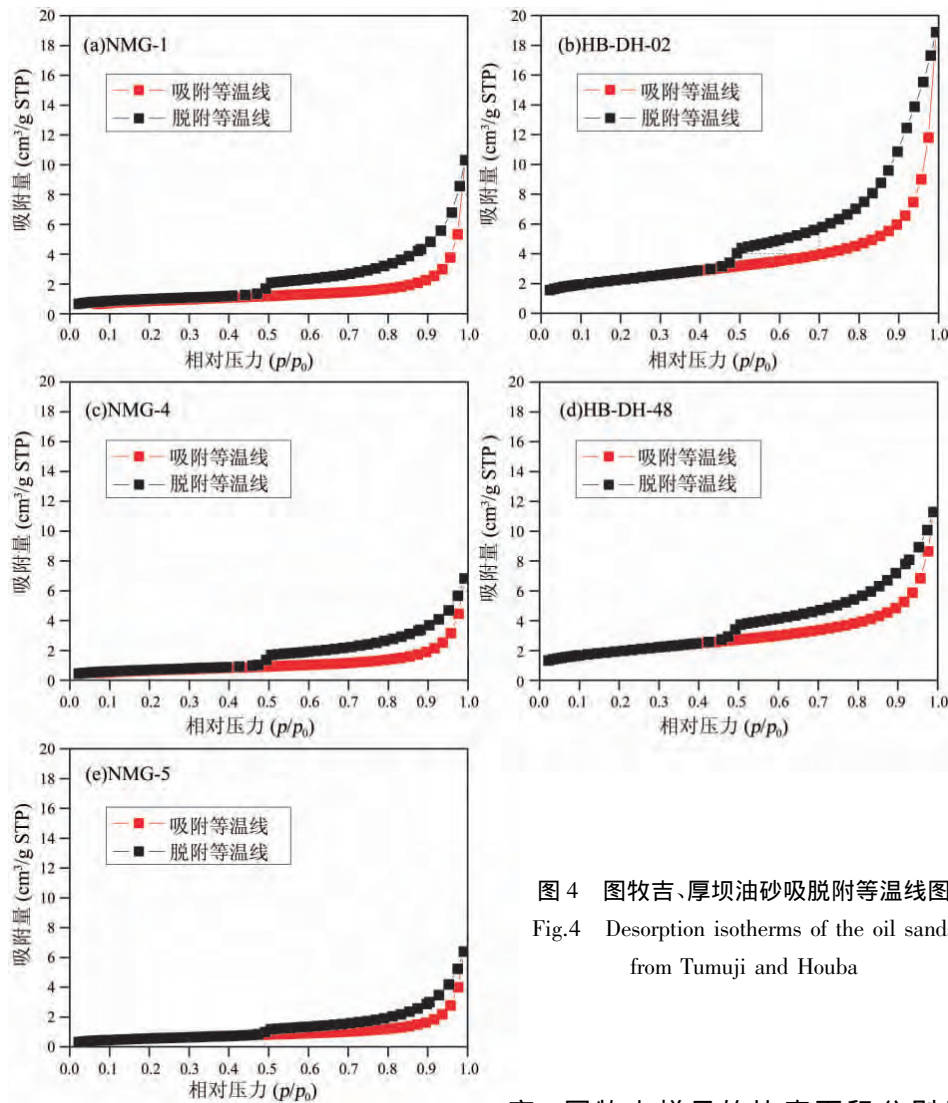


图4 图牧吉、厚坝油砂吸脱附等温线图
Fig.4 Desorption isotherms of the oil sands from Tumuji and Houba

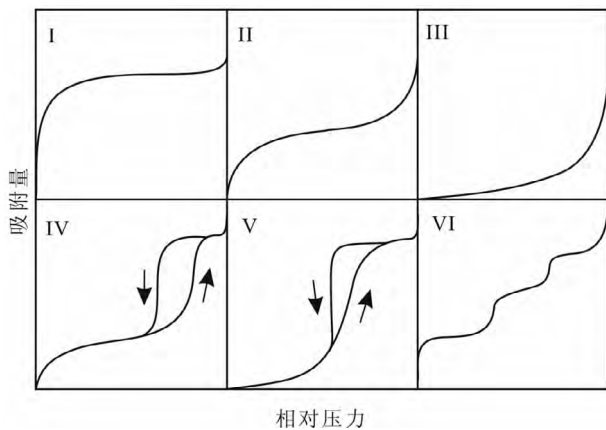


图5 IUPAC定义的吸附-脱附等温线类型(Sing et al., 1985)
Fig.5 Types of sorption/desorption isotherms defined by IUPAC (Sing et al., 1985)

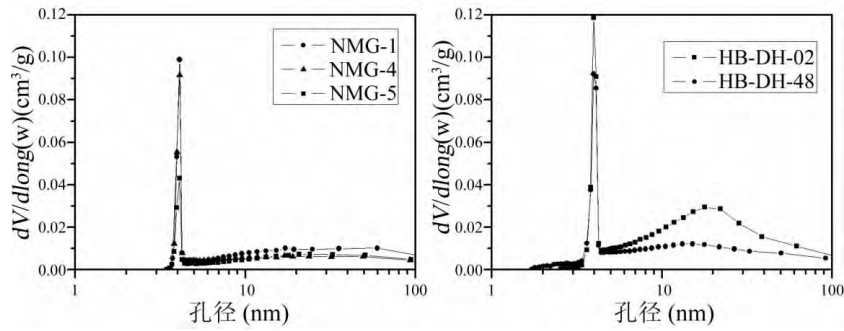
40 nm 之间。其余 4 个样品主要存在一类介孔,孔径分布在 4 nm 处。其中 HB-DH-48 在 10~11 nm 处存在轻微突起,说明此处发育少量孔径为 10~11 nm 的介孔。

表 4 列出了两地油砂样品的比表面积和总孔

容。图牧吉样品的比表面积分别为 3.15 m²/g、2.37 m²/g、2.15 m²/g,而厚坝样品则为 8.08 m²/g、6.98 m²/g。图牧吉样品的总孔容为 0.82×10⁻² cm³/g、0.69×10⁻² cm³/g、0.62×10⁻² cm³/g,厚坝样品的总孔容为 1.82×10⁻² cm³/g 和 1.34×10⁻² cm³/g。厚坝样品具有较大的比表面积和总孔容,明显高于图牧吉样品。

2.4 综合分析

2.4.1 黏土矿物对回收率的影响 研究表明,黏土矿物含量仅为 5% 的 NMG-4 号样,油砂热碱水分离的效率能达到 77.6%,而黏土矿物含量达 14% 的 NMG-1 号样,油砂热碱水分离的效率则迅速下降为 26.6%。与此同时,黏土矿物含量更高的 2 个厚坝油砂矿样品的热碱水分离的效率都不到 25%。这说明黏土矿物的含量对油砂热碱水分离的效果有显著影响,这种影响包括物理吸附和化学吸附 2 个方面。通常黏土矿物相对于造岩矿物的比表面积更大(朱晓军和蔡进功,2012),即黏土矿物较造岩矿物的物理吸附能力更强。因此油砂矿中黏土矿



左: 图牧吉样品; 右: 厚坝样品

图6 图牧吉、厚坝油砂孔径分布图

Fig.6 Distributions of pore volumes in the oil sands from Tumuji and Houba ,Tumuji (left); Houba (right)

表4 图牧吉和厚坝油砂样品总孔容和比表面积
Table 4 Total pore volume and specific surface area of the oil sands from Tumuji and Houba

油砂来源 及编号	图牧吉			厚坝	
	NMG-1	NMG-4	NMG-5	HB-DH-02	HB-DH-48
总孔容 (cm^3/g)	0.82×10^{-2}	0.69×10^{-2}	0.62×10^{-2}	1.82×10^{-2}	1.34×10^{-2}
比表面积 (m^2/g)	3.15	2.37	2.15	8.08	6.98

物含量越高,其吸附能力就越强。这一点由图牧吉油砂的比表面积及总孔容的测定结果可以得到印证,即随着黏土矿物含量的增加,油砂样品的比表面积及总孔容值也明显上升。受风化作用影响蒙脱石含量更高的图牧吉油砂 NMG-1 号样品比 NMG-4 及 NMG-5 号样品具有更高的比表面积及总孔容。这说明,风化作用影响了油砂矿的吸附能力,即遭受强烈风化作用改造的表层油砂矿层其油砂和沥青之间的相互作用力比下部油砂矿层更强,导致运用热碱水法进行油砂分离的沥青回收率大幅下降。

黏土矿物与沥青之间也存在复杂的化学相互作用,从而影响油砂热碱水分离的效果。研究表明黏土矿物可与可溶有机质在其微孔隙、表面和层间以非共价键形式(氢键、离子偶极力、阳离子交换和范德华力等)结合,形成难以分离、结构复杂的有机质-黏土复合物(蔡进功等,2009)。此外,当有二价离子(如 Mg^{2+} 和 Ca^{2+}) 存在时,油砂矿物中的黏土矿物会与之产生协同效应(Liu et al., 2005),导致沥青和矿物的 Zeta 电位相互靠近,从而使沥青更难于从矿物表面分离(Zhao et al., 2006)。研究蒙脱石对沥青-二氧化硅分离的影响(Basu et al., 2004),发现当不存在蒙脱石时,沥青和二氧化硅基本能够完全分离,静态接触角接近 180° ; 但当存在蒙脱石时,即使其含量仅为 500 ppm,沥青的分离速度和效果都

有明显降低。

2.4.2 胶结程度对回收率的影响 油砂岩的胶结程度同样会对其吸附能力产生影响。尽管绿泥石的比表面积($15 \text{ m}^2/\text{g}$)比蒙脱石($800 \text{ m}^2/\text{g}$)要低很多(朱晓军和蔡进功,2012),但本研究中黏土矿物含量以绿泥石为主的厚坝油砂样品的比表面积和总孔容却明显大于以蒙脱石为主的图牧吉油砂样品。上述结果表明,对岩性特征差别较大的油砂而言,其黏土矿物的成分和含量不一定是决定油砂岩吸附能力的最主要因素,油砂岩的胶结程度及胶结方式的差异也可能是影响油砂岩吸附能力的一个重要因素,罗茂等也认为油砂胶结致密会对沥青的分离构成障碍(罗茂等,2011)。从两地油砂的孔径分布图(图6)中可知,厚坝油砂矿孔径为 4 nm 微孔的总体积相比图牧吉油砂更大,且介孔(孔径在 2~50 nm 之间的孔)也明显比图牧吉油砂发育的更好。图牧吉油砂属于接触式胶结,胶结程度疏松;相比之下厚坝油砂属于基底式胶结或孔隙式胶结,胶结程度较致密,微孔及介孔比图牧吉油砂更发育,导致尽管厚坝油砂固体矿物组成以绿泥石为主,但其吸附能力仍远大于图牧吉油砂。

2.4.3 矿物粒径对回收率的影响 图牧吉油砂样品同厚坝油砂样品的热碱水分离获取的各沥青组分比例也存在明显差异。图牧吉油砂样品分离出的沥青以浮选沥青(沥青1)为主,而2个厚坝油砂样品分离出的沥青则以在矿浆水中分散的悬浮沥青(沥青3)为主(表1)。厚坝油砂的热碱水分离的浮选效果远逊于图牧吉油砂,除了与油砂的黏土矿物成分和含量、胶结程度等有关以外,可能还与两地油砂的砂颗粒粒径不同有关。研究表明(Sanford et al., 1983; Chong et al., 2003),对于细粒矿尘含量高的油砂(比如直径小于 $44 \mu\text{m}$ 的固体矿尘含量大于 20%),矿尘与沥青及水之间可以形成稳

定的乳液体系。矿尘含量越大,乳液的强度越大,稳定性越高,沥青的浮选效果就越差。矿尘含量愈高,沥青的回收率愈低。

2.4.4 小结 综上所述,油砂矿的岩性特征的差异很大程度上影响了其热碱水分离的效果。其中黏土矿物的含量(特别是蒙脱石的含量)、风化程度、油砂岩的胶结程度及矿物颗粒的粒径都是影响分离效果的重要因素。当油砂矿中黏土矿物含量低于10%,且蒙脱石含量较低,风化程度不高、胶结程度不太紧密,同时大部分矿物颗粒的粒径大于100 μm 时,对其进行热碱水分离往往能获得较好的分离效果。

3 结论

(1) 黏土矿物的含量对油砂热碱水分离的效果有显著影响,当黏土矿物含量小于5%时,黏土矿物的含量对油砂热碱水分离的效果没有显著影响,但当黏土矿物含量大于15%时(特别是有蒙脱石的存在)油砂热碱水分离的效率则明显降低。

(2) 油砂矿表层遭受强烈风化作用的油砂层在运用热碱水法进行分离时,沥青的回收率会大幅下降。因为风化作用会改变油砂矿的矿物成分组成及含量,影响油砂矿的吸附能力,从而使油砂热碱水分离的效率显著降低。

(3) 油砂岩的胶结程度及胶结方式能影响油砂分离效率。油砂岩胶结越致密,影响吸附能力的微孔及介孔的数量越多,其吸附能力也就越强,热碱水分离的效率也就越低。

(4) 油砂的砂颗粒粒径越小,沥青的浮选效果越差。当油砂矿中存在大量粒径小于44 μm 的矿尘时,会导致其热碱水分离的浮选效果非常差,不利于油砂热碱水分离。

致谢: 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室的廖泽文研究员参与了前期野外采样工作,在此表示感谢。

参考文献 (References):

Basu S, Kanda W, Nandakumar K, Masliyah J. 1998. Effect of hydrophobic and hydrophilic clays on bitumen displacement by water on a glass surface. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 37(3): 959-965

Basu S, Nandakumar K, Lawrence S, Masliyah J. 2004. Effect of calcium ion and montmorillonite clay on bitumen displacement by water on a glass surface. *Fuel*, 83: 17-22

Chong J, Ng S, Chung K, Sparks B, Kotlyar L. 2003. Impact of fines content on a warm slurry extraction process using model oilsands. *Fuel*, 82: 425-438

Dai Q, Chung K. 1996. Hot water extraction process mechanism using model oil sands. *Fuel*, 16(2): 220-226

Darcovich K, Kotlyar L, Tse W, Ripmeester J, Capes C, Sparks B. 1989. Wettability study of organic-rich solids separated from athabasca oil sands. *Energy & Fuels*, 3(3): 386-391

Liu J, Xu Z, Masliyah J. 2005. Processability of oil sand ores in Alberta. *Energy & Fuels*, 19(5): 2056-2063

Long J, Xu Z, Masliyah J. 2005. On the role of temperature in oil sands processing. *Energy & Fuels*, 19(4): 1440-1446

Lyklema J, van Leeuwen H, Minor M. 1999. DLVO-theory, a dynamic re-interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 83(1-3): 33-69

Masliyah J, Zhou Z, Xu Z, Czarnecki J, Hamza H. 2004. Understanding water-based bitumen extraction from athabasca oil sands. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82: 628-654

Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C, Everett D, Haynes J, Pernicone N, Ramsay J, Sing K, Unger K. 1994. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report). *Pure & Applied Chemistry*, 66(8): 1739-1758

Sanford E. 1983. Processability of Athabasca oil sand: Interrelationship between oil sand fine solids, process aids, mechanical energy and oil sand age after mining. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(4): 554-567

Sing K, Everett D, Haul R, Moscou L, Pierotti R, Rouquerol J, Siemieniowska T. 1985. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure & Applied Chemistry*, 57(4): 603-619

Zhao H, Long J, Masliyah J, Xu Z. 2006. Effect of divalent cations and surfactants on silica-bitumen interactions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45: 7482-7490

蔡进功, 卢龙飞, 丁飞, 樊龑. 2009. 烃源岩中黏土与可溶有机质相互作用研究展望. *同济大学学报(自然科学版)*, 37(12): 1679-1684

何泽能, 李振山, 籍国东. 2006. 沥青砂开采方法综述. *特种油气藏*, 13(1): 1-15

贾承造. 2007. 油砂资源状况与储量评估方法. 北京: 石油工业出版社, 1-157

接维强, 魏春光. 2005. 加拿大油砂资源利用的主要技术及投资效益. *石油科技论坛*, 12: 39-42

李莉. 2005. 油砂: 一种新的替代能源. *当代石油化工*, 13(12): 28-30

刘人和, 王红岩, 王广俊, 拜文华, 赵群. 2009. 中国油砂矿资源开发利用潜力及前景. *天然气工业*, 29(9): 126-128

罗茂, 耿安松, 廖泽文. 2011. 油砂中沥青的热碱水萃取分离及其影响因素. *油气地质与采收率*, 18(3): 94-97

马毅杰, 罗家贤, 蒋梅茵, 杨德涌. 1999. 我国南方铁铝土矿物组成及其风化和演变. *沉积学报*, 17(S1): 681-686

孙楠, 张秋民, 关珺, 何德民. 2007. 扎费特旗油砂在氮气气氛下的热解制油研究. *燃料化学学报*, 35(2): 241-244

孙微微, 赵德智, 孙明珠. 2007. 油砂及其分离方法. *化工文摘*, 5: 41-43

王梦圆, 李文. 2006. 加拿大油砂开发带动出口管道建设大发展. *国际石油经济*, 14(3): 37-43

许修强, 郑德温, 徐金明, 詹益民, 曹祖宾, 王红岩. 2010. 我国油砂分离技术研究进展. *现代化工*, 30(8): 12-17

徐如人, 庞文琴, 于吉红, 霍启升, 陈接胜. 2004. 分子筛与多孔材料化学. 北京: 科学出版社, 1-742

郑德温, 方朝合, 李剑, 葛稚新, 王义凤. 2008. 油砂开采技术和方法综述. *西南石油大学学报*, 30(6): 105-108

朱晓军, 蔡进功. 2012. 泥质烃源岩的比表面与有机质关系研究进展及意义. *石油与天然气地质*, 33(3): 375-384