

# 西加拿大盆地油砂储层中的泥夹层特征

胡元现, M. Chan, S. Bharatha, G. Gurba, D. Lee, S. Papadimitrio

加拿大石油公司, 加拿大阿尔伯达省

**摘要:** 西加拿大盆地含有丰富的油砂资源, 主要产于阿尔伯达省东北部的下白垩统马克马里组 (McMurray Formation)。该组含有不等的砂泥斜互层。这些砂泥斜互层 (IHS) 在局部很发育。描述其中的泥夹层为建立客观的储层模型提供了的重要数据。试图从 6 个方面对泥夹层进行描述并简要讨论如何利用这些描述结果去建立客观有效的储层模型。

**关键词:** 油砂; 砂泥斜互层; 储层描述; 原地开采; 垂向渗透率。

中图分类号: P618.130.2

文章编号: 1000-2383(2004)05-0550-05

收稿日期: 2004-06-20

## Mudstone Interbeds in McMurray Oil Sand Reservoirs in Alberta, Canada

HU Yuan-xian, M. Chan, S. Bharatha, G. Gurba, D. Lee, S. Papadimitrio

*Oil Sand Development, Petro-Canada Oil and Gas, 150-5th Avenue SW, Calgary, Alberta, Canada T2P3E3*

**Abstract:** The Lower Cretaceous McMurray Formation in northeastern Alberta, Canada, hosts about 800 billion barrels (137 billion cubic meters) of bitumen in place. Interbeds of sand and mud (often called inclined heterolithic stratification, or IHS) exist in virtually every McMurray oil sand deposit. They may even be the dominant component in some oil sand successions. Their sedimentary characteristics and distribution in a reservoir for in-situ extraction using steam assisted gravity drainage (SAGD) technology, are important factors that determine SAGD performance and strategies of positioning horizontal well pairs. Therefore, characterization of IHS in an SAGD reservoir is a very important and valuable exercise to evaluate SAGD performance. To improve 3-D modeling on SAGD performance, mudstone interbeds are studied using several different approaches: variable resolution volume of shale ( $V_{sh}$ ) qualification; grain size and fine analyses; mudstone interbed "types" classification; borehole image interpretation; vertical permeability ( $K_v$ ) quantification of individual mudstone interbeds, using flow simulation techniques from core-based micro-models, core CT-scan image analyses, the study of connectivity between the sand beds that are separated by mudstone, and quantification of steam rise rates through or around mudstone interbeds. These studies confirm that mudstone interbeds in IHS can be very sandy and they can be discontinuous because of bioturbation, dewatering and/or erosion. Their  $K_v$  is highly variable. Some "mudstone interbeds" are actually mud-filled burrows that penetrated into sands from the top surface of the sands. All of these characteristics indicate that mudstone interbeds in IHS can be very leaky and are expected to be permeable to variable degrees during SAGD operations. This is especially true for those mudstone interbeds associated with sand-dominated IHS. SAGD reservoirs with IHS may behave quite differently, depending on IHS thickness and occurrence, individual mudstone interbed thickness, their  $K_v$ , and more importantly, their lateral extent.

**Key words:** oil sand; inclined heterolithic stratification; reservoir description; in-situ extraction; vertical permeability.

西加拿大沉积盆地含有丰富的油砂资源, 它们主要分布于阿尔伯达省东北部 (图 1)。根据阿尔伯达省能源局计算, 其地质储量约为 8 000 亿桶 (约  $1.330 \times 10^9$  t)。在现有开采技术下, 可采储量一般估

计为 3 000~3 500 亿桶, 比沙特阿拉伯的可采储量还大。

加拿大这些丰富的油砂资源, 要把它们开采出来并非一件容易的事, 尤其是绝大部分油砂因埋深



图1 加拿大油砂分布

Fig. 1 Oil sands distribution, Canada

较大,无法露头开采,而需借助原地开采法才有可能达到所要求的经济效益。原地开采项目因投资大且不确定因素较多(如储层的日产能力),因而风险较大。要减小风险,客观地认识和了解储层是关键,而这往往要借助于储层模拟计算与产量预测。预测得准确与否在很大程度上取决于是否对储层有了客观的描述,尤其是其中的泥夹层。

## 1 油砂开采技术

油砂开采技术大致可以分为两大类:露天开采与原地开采。露天开采技术只适用于埋藏较浅的近地表油砂,其埋深一般要求在75 m以内。对于埋藏较深的油砂,因需剥离的盖层过大,成本过高,而无法应用该技术。这些埋深较大的油砂,约占油砂储量的85%以上,需采用原地开采技术。

原地开采技术即在原地改变沥青的物性后将其开采出来。改变沥青物性的方法可以是物理的,也可以是化学的,或两者兼有。这些方法把原本处于固定状态的沥青质变成可流动的流体。在这些方法中,蒸气助流法(SAGD, steam-assisted gravity drainage)即为其中之一(Bulter, 1991; Butler and Yee, 2000)。该技术经20多年来的理论论证、实验研究及小规模实地生产,已被证实是目前为止最为有效的原地开采技术。该方法的采油率可以高达70%~80%。在加拿大已有数个利用该技术的油砂项目正式投入商业性开采。

蒸气助流技术的核心是沿着油砂储层底界面布

设两口水平井。上水平井用于注蒸气,下水平井用于产油。上水平井注入的蒸气一般是200℃左右的高温蒸气。固体沥青在加热到60℃左右就会开始流动,而加热到200℃以上时,其粘度大大降低,流动性明显加强。因此熔化的沥青在蒸气(仓)与储层的交界面上流动性最强,在重力和蒸气压力的驱动下,就会沿着此界面流向下水平井。该采油技术称为蒸气助流法。

沥青质热溶流走后,其原来所占有的孔隙即被蒸气充填。这一过程不断进行,结果就在上水平井的两侧及上方形成蒸气仓。随着蒸气的不断注入,蒸气仓会越来越大,沥青就会不断地从储层中生产出来。

## 2 油砂地质

加拿大的油砂产于西加拿大盆地的东北部。该区能形成如此大型的油砂矿,与该区特有的构造与沉积背景密不可分。

油砂产于下白垩统马克马里组。在白垩纪时,由于西太平洋板块向北美板块俯冲,导致落基山脉的前身不断隆起。在这一不断隆起的山脉的重荷下,北美板块的西部形成了一个大型的前陆盆地。西加拿大盆地为该前陆盆地的北段。在加拿大境内,太平洋板块向东北方向俯冲到加拿大地盾之下,所造成的前陆及相伴生的前渊(同时为沉降与沉积中心)为北西南东走向,而油砂分布区位于盆地东北缘,远离前陆与前渊。因此盆地基底与所沉积的地层均是向该区缓缓上扬,造成马克马里组从未深埋过(埋深一般在450 m之内)。该组至今仍为未固结的松散砂,砂的孔隙度一般在30%~35%,水平渗透率为 $(3\sim 6)\times 10^{-13} \text{ m}^2$ 。

该区有利的沉积背景为沉积巨厚的储层砂提供了条件。马克马里组充填于二级层序界面上的一超大型下切河谷内。该超大型下切河谷长逾千 km,宽200~250 km,深50~80 m。马克马里组沉积时,相对海平面总体是上升的,因此该组从下往上为一套从河流/潮道向港湾充填过渡的地层。

然而,这一相对海平面总体不断上升的趋势是螺旋式的。事实上,在总体上升过程中,有多期与三四级甚至五级层序相关的高频相对海平面升降,因而出现多期下切河谷(Ranger and Pemberton, 1997)。如前所述,该区远离沉降中心,沉积空间相对有限,年轻下切河谷经常下切到较老的下切河谷,结

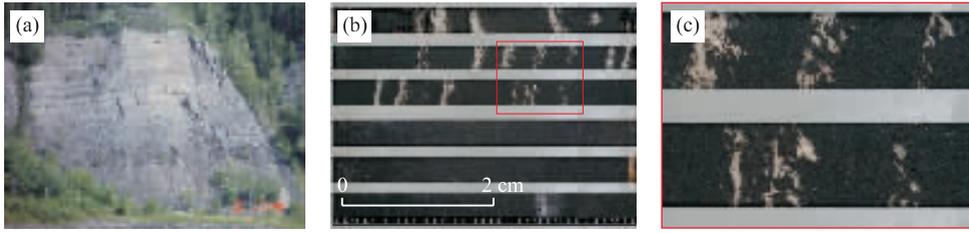


图 2 马克马里组沉积特征

Fig. 2 Sedimentary characteristics of the McMurray Formation

露头约 60 m 高。a. 该组由多期互相切割的河道砂(实为下切河谷充填)组成, 砂泥斜互层向左边低角倾斜(约  $6^{\circ}\sim 8^{\circ}$ ); b. 马克马里组岩心切面数码照片(底部的尺子为 0.75 m 长), 砂因含沥青为黑色, 泥为灰—深灰色, 下部 2.25 m 为纯砂岩; 上部的 2.25 m 为砂泥斜互层, 泥夹层的倾角约  $8^{\circ}$ ; c. 为 b 中框内近照

果沉积了一套多期下切河谷叠置的连续厚砂体。这些叠置的厚砂体(20~60 m 厚)成为主要的油砂储层(Hu and Lee, 2002)。

这些特殊的地质条件(浅埋、高孔渗厚砂岩及位于构造高部位)使得盆地深部生成的石油源源不断地运移到该高孔渗储层里, 并经受生物降解作用后形成油砂。

值得指出的是, 虽然叠置的下切河谷充填砂厚度较大, 但其并非均为纯净砂岩, 而是砂泥斜互层(IHS, inclined heterolithic stratification)岩石。这些砂泥斜互层岩石中的相当一部分为点砂坝沉积(图 2)。点砂坝的存在反映出当时下切河谷充填中潮汐作用强烈, 这也可以从这些点砂坝沉积中大量出现的生物钻孔得到验证(Wightman and Pemberton, 1997)。这些由砂泥互层构成的点砂坝, 因其中的泥夹层渗透率明显变低, 且近于水平产状, 所以, 对蒸气仓的垂向上升和扩大是不利的。要想有效地预测含有点砂坝储层的产油能力, 对其中泥夹层的准确描述是关键。

### 3 泥夹层、储层描述与油砂项目管理

原地开采的油砂项目投产后一般要生产 20~30 年, 开采几亿到几十亿桶的沥青质。所需的前期投资也是巨额的, 为几亿到几十亿加元。如此投资规模的项目, 要确保项目既顺利进行又有一定的投资回报, 对风险的估计及有效管理是很重要的, 而对风险的客观估计是实现对其有效管理的前提。

风险来自各个方面, 而通过地质模型的建立, 进而进行储层模拟计算与预测, 对单井及整个油田的日产量的预测, 其正确与否是至关重要的一方面。因

为这一预测直接决定生产配套设施的设计, 如蒸气生产厂的规模、油及蒸气管道线的布设、用于生产蒸气的水源补给、废水处理设施的设计与安装等。

对油田日生产能力的正确预测来源于对储层的客观描述。在客观正确的储层描述基础上, 既可以较客观地预测油田生产力(油田日产量及单井日产量), 又可优化水平井的井位与井距, 结合优化其他生产条件即可达到既能节省蒸气又可保证取得最佳的采收率, 从而使整个项目取得最高的投资回报。正因为这些收益, 每个油砂项目都会投入大量的人力、物力和财力去做储层描述工作。

在油砂储层描述中, 对泥夹层的描述是最难但却是最重要的一环, 尤其是那些含有泥砂夹层相当比例的储层。其原因在于: (1) 马克马里组埋藏浅, 主要是松散砂。在这种状态下, 不同砂类之间的孔渗差异远远小于泥砂之间的孔渗差异。砂的水平渗透率一般高于  $1\times 10^{-13} \text{ m}^2$ , 大部分高于  $3\times 10^{-13} \text{ m}^2$ 。其垂向渗透率大约是水平渗透率的 50%~90%, 而纯泥岩的水平与垂向渗透率均约为零。(2) 在蒸气助流采油过程中, 热熔化的沥青主要是在重力作用下垂向流向下水平井的, 而泥夹层则是缓缓倾斜的, 与油的流向有较大的交角。因而油需穿过或绕过泥夹层才能流向下产油水平井。(3) 绝大多数油砂储层均含有一定的泥夹层。

### 4 泥夹层的描述

加拿大油砂油田有很密集的垂直钻井控制, 井距一般在 300~500 m, 这些钻井绝大部分是取心的。因为在储层条件下, 沥青质为固体, 取心是获得沥青样的最直接有效的途径。此外, 有的油砂井还有

定向测井. 本文根据岩心数码照片及测井资料, 并结合模拟计算与统计, 试图从下面 6 个方面对泥夹层进行描述.

(1)泥夹层类型:泥夹层可分为真泥夹层与伪泥夹层两大类. 真泥夹层是由物理沉积作用形成的泥夹层. 这些泥夹层沉积后可经过物理或生物作用而遭受不同程度的破坏(图 3a, 3b, 3c). 破坏作用包括流水冲蚀(图 3a, 3b), 虫孔穿透(图 3c)或干裂. 这些作用的结果是在泥夹层中形成间隙. 间隙往往被砂充填而成为穿层通道, 从而降低泥夹层的横向连续性. 伪泥夹层实为位于砂层内的泥充填虫孔. 这些虫孔从砂层顶面往下延伸, 当其达到一定的密度时, 显示出“层”的假像(图 3d).

(2)泥夹层的厚度分布:图 4 为某油砂储层的厚度分布图, 根据 28 口井近 3 000 层泥夹层的厚度统计结果可以看出, 近 60%的泥夹层其厚度小于 6 cm, 42%为 4~6 cm, 很少泥夹层厚度 20 cm.

(3)泥夹层含砂量:泥夹层的含砂量变化较大, 可以从 0%~95%(或泥含量 5%~100%, 图 5)统计结果显示, 50%以上的泥夹层含砂量高于 50%. 含砂量也与泥夹层类型有密切关系, 含砂量高于 90%的泥夹层往往为伪泥夹层. 在真泥夹层中, 冲蚀作用与虫孔会导致含砂量增加, 这些作用的强度, 尤其是虫孔的密度决定含砂量的高低. 因此, 真泥夹层含砂量变化较大.

(4)泥夹层的淋滤性:泥夹层的淋滤性是指蒸气与油是否可以穿层而过. 如果泥夹层内有砂充填的通道且与上下砂层直接接触, 该泥层即认为是淋滤的泥层. 单井统计结果显示, 7%~65%的泥夹层是

有淋滤性的, 而它们的平均值为 32%(图 6).

(5)泥夹层的垂向渗透率:泥夹层的重要性在于它夹杂在储层中. 在蒸气助流技术的应用中, 泥夹层一方面阻止或减缓热熔化的沥青往下流动, 另一方面也阻止或减缓蒸气往上扩展. 事实上, 当泥夹层含量达到一定值时, 这部分砂泥互层沉积就不再作为

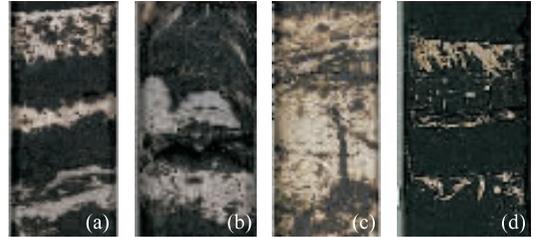


图 3 泥夹层类型

Fig. 3 Types of mudstone interbeds

a, b 和 c 为真泥夹层; a 与 b, 泥夹层遭受不同程度的侵蚀; a. 顶泥夹层中可见大量的砂充填虫孔; b. 上泥夹层被砂层切穿; c. 砂充填的垂直虫孔穿透整个泥夹层(在顶部虫孔弯曲); d. 泥虫孔形成伪泥夹层. 泥虫孔从砂层顶面往下延伸, 其密度亦往下降低

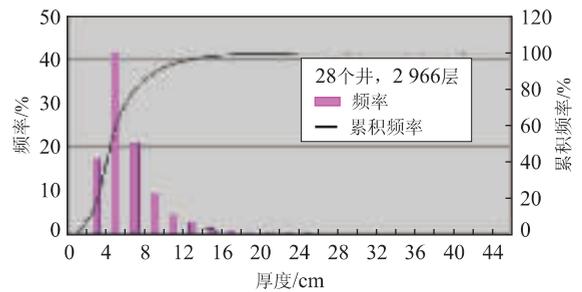


图 4 泥夹层厚度分布

Fig. 4 Thickness distribution of mudstone interbed

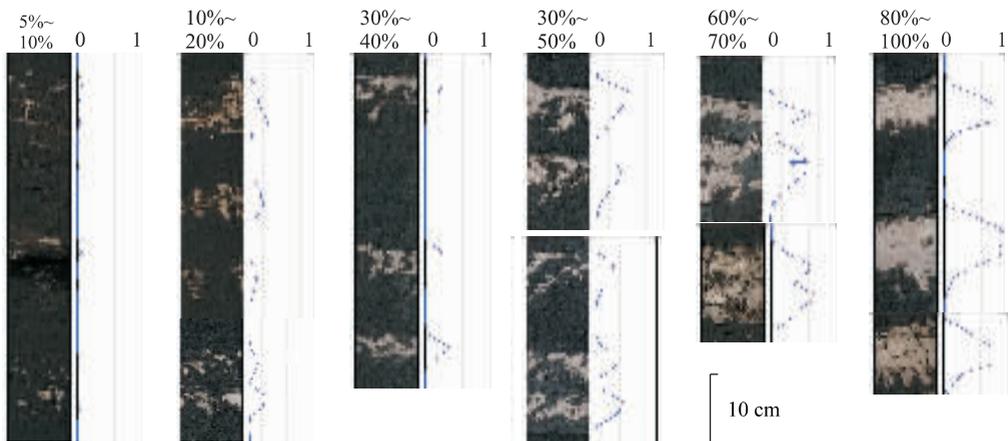


图 5 泥夹层含砂度, 岩心右边的曲线为泥含量曲线(0—1)

Fig. 5 Shale volume ( $V_{sh}$ , 0—1) of mudstone interbeds

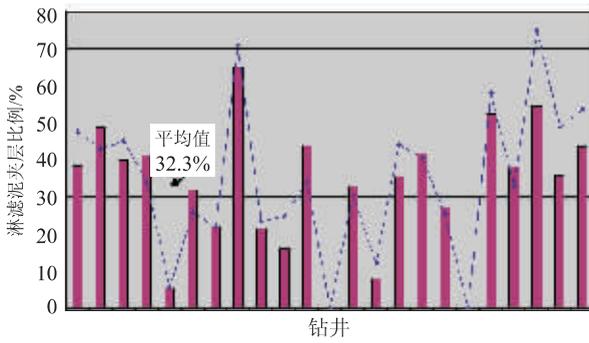


图 6 泥夹层的淋滤性

Fig. 6 Ratio of leaky mudstone interbeds

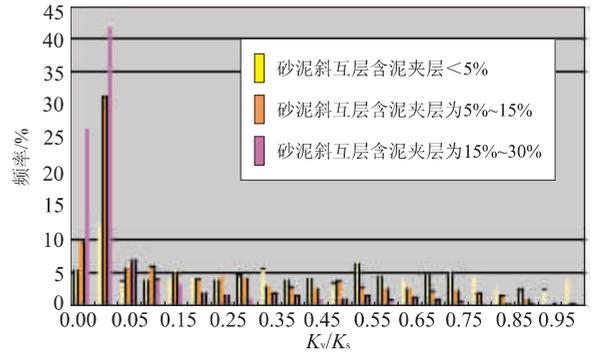


图 7 泥夹层的垂向渗透率

Fig. 7 Vertical permeability of mudstone interbeds

储层, 尽管其中砂层的沥青质的含量仍然相当高。很显然, 含有泥夹层的油砂储层, 泥夹层的垂向渗透率 ( $K_v$ ) 直接影响着蒸气仓的发育及其形状以及融化沥青的向下流速。这些都直接控制着产油井的日产量及整个项目的经济效益。

泥夹层  $K_v$  是通过流体模拟计算出来的。泥夹层的数码照片的色素转化为二维模拟网格的网元。基于一定的颜色临界值可以把所有的网元划分为砂网元与泥网元。前面我们注意到, 砂之间的孔渗差异远远小于砂泥之间的孔渗差异。所以, 这一处理虽不是很精确, 但其实用价值是显而易见的。模拟计算后, 整个泥夹层的  $K_v$  表示为  $K_v/K_s = K$  ( $K$  为计算结果;  $K_v$  为整个泥夹层的垂向渗透率;  $K_s$  为砂网元的垂向渗透率)。如果  $K_s$  可以确定或假定, 泥夹层的  $K_v$  即可计算出来 ( $K_v = K \times K_s$ )。

图 7 为近 3 000 个泥夹层的  $K_v/K_s$  计算结果。可以看出, 大约 42% 的泥夹层, 其  $K_v/K_s$  近于零 ( $< 0.01$ ), 其余的泥夹层  $K_v/K_s$  介于 0.01~0.9 之间。

(6) 泥夹层的产状: 不难看出, 以上 5 个方面是从研究泥夹层最重要物性——垂直渗透率有关的不同方面来描述泥夹层。具体到某个油田, 泥夹层的产状, 即倾向与倾角, 在优化水平井的定向时是需要考虑的很重要的因素。泥夹层的产状可以根据定向测井资料解释出来。

## 6 泥夹层描述的应用

上述泥夹层描述很重要, 且具有实用价值, 尤其

是其中的含砂量、 $K_v/K_s$  及泥夹层产状, 在建模中是很重要的参数。如果能配合一定数量的、有代表性的岩心进行实验室全岩心测试来确定  $K_v/K_s$ , 进而对模拟计算出来的  $K_v/K_s$  进行校正, 这样  $K_v/K_s$  的价值就会得到充分的利用。因这些计算出来的  $K_v/K_s$  数量大, 所以, 可以用来建立更接近实际的储层模型。在这样的模型基础上所作的储层模拟计算与预测, 对水平井的优化定位与日产量预测就会更接近于现实, 从而作出更合理的项目决策, 大大地降低巨额投资的风险。

## References

- Butler, R. M., Yee, C. T., 2000. Progress in the in-situ recovery of heavy oils and bitumen. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 41(1): 18–29.
- Bulter, R. M., 1991. Thermal recovery of oil and bitumen. Englewood Cliffs, N. J. Prentice Hall. Available in paperback from GravDrain Inc., 7 Bayview Drive SW, Calgary, Alberta, Canada.
- Ranger, M. J., Pemberton, S. G., 1997. Elements of a stratigraphic framework for the McMurray Formation in South Athabasca Area, Alberta. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, Memoir 18: 263–291.
- Hu, Y. G., Lee, D., 2002. Incised valleys vs. channels; Implications for McMurray bitumen exploration. Canadian Society of Petroleum Geologists, 2002 Annual Meeting Abstract.
- Wightman, D. M., Pemberton, S. G., 1997. The lower Cretaceous (Aptian) McMurray Formation: An overview of the Fort McMurray area, northeastern Alberta. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, Memoir 18: 312–344.