

AOSTRA

油砂、沥青、重质油技术手册

L·G·Hepler, Chu Hsi 主编

梁文杰 等译

李奉孝 等校



石油大学出版社

TE345/031

0570793

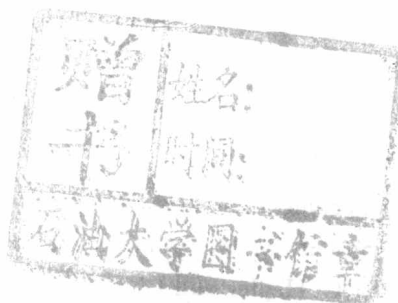
TE345
031

AOSTRA

油砂、沥青、重质油技术手册

L. G. Hepler and Chu Hsi 主编

梁文杰 等译
李奉孝 等校



石油大学

0618603

石油大学出版社

鲁新登字 10 号

内 容 简 介

本书是根据加拿大阿尔伯达省油砂技术研究局组织编写的“AOSTRA 油砂、沥青、重质油技术手册”翻译的,全书共十三章,包括油砂矿床地质、油砂、沥青取样分析;沥青、重质油化学;沥青、重质油物性(表面性质、粘度等);沥青、重质油热化学和热力学;相平衡基础资料和方法;同油砂、沥青、重质油开采有关的岩心力学、无机地球化学、传热、传质现象;多孔介质内流体流动以及油砂电热开采新技术的基础资料和研究方法。每章均附有范围广泛的有关问题参考文献目录,把大量分散在各处的资料、研究方法、关联式、表格数据汇集于一体。这在油砂、沥青、重质油研究领域里尚属首次。本书可供从事油砂、沥青、稠油、重质油开采、加工及使用等方面工作的科技人员,以及油田研究院和生产单位的科技人员使用,更可供从事常规原油二次开采工作的技术人员参考,亦可供石油院校教师、研究生、高年级学生阅读。

AOSTRA

Technical Handbook

on Oil Sands, Bitumens and Heavy Oils

L. G. Hepler and Chu Hsi

AOSTRA 油砂、沥青、重质油技术手册

梁文杰等译

李奉孝等校

*

石油大学出版社出版

山东省东营市

新华书店发行

石油大学出版社照排室排版

山东省东营新华印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 24 印张 610 千字

1992 年 4 月第 1 版 1992 年 4 月第 1 次印刷

印数精 1—200 册 平 1—3800 册

ISBN 7-5636-0226-7/TE·47

精装 23.50 元
定价: 平装 18.50 元

译 序

加拿大阿尔伯达省油砂局 L. G. 海卜勒博士 (Dr L. G. Hepler) 同习助博士 (Dr Chu Hsi) 共同编纂的“AOSTRA 油砂、沥青、重质油技术手册”经石油大学几名教授的共同努力, 现已译成中文, 交由石油大学出版社公开出版, 终于和国内从事这方面工作的学者、工程师见面了。它将对我国稠油油藏和油砂沥青矿藏的开发利用有很大的借鉴意义。

加拿大阿尔伯达省有当今国际上储量最丰富的油砂矿藏, 又有世界上最大的油砂采掘提炼和加工工业。随着这一巨大工业的兴起, 有关油砂、沥青矿的技术也取得很大发展, 并在国际上公认处于领先地位。本书的作者海卜勒和习助两位博士都长期从事这方面的工作, 本书是他们在这方面的力作, 具有很高的权威性。

本书是一本内容涉及油砂矿地质学、沥青地球化学、重质油化学、热力学、表面化学、渗流力学, 无机地球化学和化学工程等诸多学科的一部著作。每章的作者都是长期从事该方面工作的专家和教授。对其所论述的研究方向即有丰富的实践经验, 又有深湛的理论造诣。因此能把读者带到每一题目的国际发展前沿, 使读者能得到有益的信息。

为了加强中国石油天然气总公司所属各高等学校、科研院所和石油厂矿和加拿大阿尔伯达省油砂局的同行间的学术交流和友好往来, 石油大学从事这方面的同行专家将陆续将加拿大阿尔伯达省油砂局提供的其它研究报告和论文翻译出版以飨读者。

本书承加拿大阿尔伯达省油砂局和原作者本人同意翻译此书, 并授权石油大学出版社出版, 特此表示谢意, 本书中文版的出版发行标志着中、加两国石油科技工作者互相合作的进一步加强和发展。

在翻译过程中, 该书原编者之一习助先生曾提供一些补充资料并提出许多宝贵意见, 在此表示感谢, 所有这些资料和意见都在中文版中得到反映。

石油大学炼制系李奉孝教授对全书中文稿做了最后审校, 并且为使此书尽早同读者见面作了许多组织工作。相信这本译著能受到读者欢迎。

在翻译出版过程中, 译者不断受到中国石油天然气总公司李天相副总经理的赞助和鼓励, 在此表示诚挚的感谢。

杨光华

教授 石油大学校长

1991 年 11 月

前 言

加拿大阿尔伯达省油砂技术研究局(AOSTRA)于1984年曾发表一篇题为“沥青和重质油热力学及传递性质”的技术报告,有时非正式地称为“Robinson 汇编”。这篇报告作为沥青和重质油热力学和传递性质的基础数据来源,给工业和大学以及政府研究室带来许多好处。然而,报告的作者及其使用者都意识到,编写出更全面的报告或许更为有益。

几年以前我们开始认识到,由于受 AOSTRA 赞助的大学研究项目和专业研究项目以及工业研究结果,现已有许多新的实验数据可以编入最新修订的技术手册中。此外,许多提供新实验数据的研究人员,同时也开发出一些关联模型和预测模型,利用这些模型,以现有数据作为基础就可以估算出其它数据。因为我们都曾参加过某些 AOSTRA 研究项目,并且愿提高这些研究项目所得结果的使用效果,我们建议 AOSTRA 能够赞助编写一本手册,把范围广泛的实验数据和对有实用意义的关联和预测方法的适当论述,一起编入该手册之中,同时还希望专家著者提供取得表格数据方法的资料以及这些数据的某些使用方法的总结。最后还希望专家著者提供其它数据来源的主要参考文献,以及进一步论述实验方法、理论背景和实际应用的主要参考文献。

我们非常高兴获悉,AOSTRA 决定支持计划中的手册编写工作并给予赞助,而且指定编委会协助我们制订详细计划和选择著作者,这项工作从1986年着手进行。在此我们愉快地对 AOSTRA 的支持和赞助表示感谢,也感谢编委会成员提出的有益建议,特别要向专家著者们致以谢意,没有他们的劳动,这本手册就不能与读者见面。

L. G. Hepler, Chu Hsi
Edmonton, Alberta

AOSTRA 油砂、沥青、重质油技术手册

编委会名单

主编:

L. G. Hepler, Alberta 大学

Chu Hsi, AOSTRA

编委:

R. G. Bentsen

T. R. Heidrick

J. W. Kramers

P. R. Kry

J. K. Liu 刘克炯

D. A. Redford

J. D. Scott

P. R. Tremaine

Alberta 大学

Alberta 研究院

Alberta 研究院

加拿大埃索资源有限公司

加拿大 Syncrude 有限公司

AOSTRA

Alberta 大学

Alberta 研究院

出版

D. P. Teppan

AOSTRA

编辑校对

C. W. Gietz

发行

H. Petri

AOSTRA 图书情报服务部

译校人员名单:

梁文杰, 陆克政, 杨继涛, 邓春森,

严昭信, 苏君雅, 朱德一, 赵兰玉,

俞康胤, 王贤清,

总校审

李奉孝

出版发行

石油大学出版社

目 录

第一章 Alberta 油砂矿床地质	(1)
引言	(1)
第一节 Athabasca 油砂区	(3)
第二节 Peace River 油砂区	(4)
第三节 Cold Lake 油砂区	(5)
第四节 碳酸盐岩矿床	(5)
总结	(6)
参考文献	(6)
第二章 分析方法	(9)
引言	(9)
第一节 油砂的子样采取方法	(9)
第二节 油、水、固体	(12)
第三节 颗粒大小分布的测定	(15)
第四节 油砂中含油量的连续监测	(17)
第五节 沥青分析	(19)
第六节 密度的测定	(20)
第七节 残炭	(21)
第八节 蒸馏	(21)
第九节 过滤	(22)
第十节 水分析	(23)
第十一节 油砂和沥青的金属(含量)分析	(25)
参考文献	(27)
第三章 沥青和重质油化学	(29)
引言	(29)
第一节 Alberta 油砂沥青的性质	(30)
第二节 Athabasca 油砂中有机不溶物化学	(31)
第三节 Alberta 油砂中的气体和挥发物	(32)
第四节 超重原油的族组成分析	(34)
第五节 分子的聚集	(53)
第六节 油砂沥青的化学变化	(55)
第七节 沥青的地下燃烧和低温氧化	(60)
参考文献	(61)
附录	(67)
第四章 热化学和热力学性质	(69)
引言	(69)

第一节	热化学和热力学数据的应用	(69)
第二节	燃烧热	(71)
第三节	有机化合物的热力学性质	(73)
第四节	热容和比热	(74)
第五节	冰、水、蒸汽的热力学性质	(80)
第六节	水溶液的热力学性质	(81)
第七节	热力学数据的其它来源	(82)
	参考文献	(83)
第五章	界面性质	(97)
第一节	界面张力	(97)
第二节	电性质	(102)
第三节	电动电势的测量	(105)
第四节	油砂中物质的电性质	(108)
第五节	润湿行为	(118)
第六节	毛细压力	(120)
	参考文献	(123)
第六章	相平衡和PVT性质	(127)
第一节	平衡条件	(127)
第二节	测定相平衡的实验方法	(127)
第三节	实验结果的现有资料来源	(128)
第四节	状态方程在相平衡计算中的应用	(132)
第五节	状态方程用于PVT计算	(149)
	参考文献	(151)
第七章	粘度	(154)
	引言	(154)
第一节	不同产区原油的粘度同温度和压力的关系	(162)
第二节	纯组分和重质油衍生物的粘度	(168)
第三节	粘度的调整	(173)
第四节	物理混合物的粘度	(182)
	参考文献	(185)
第八章	岩石的力学性质	(188)
	引言	(188)
第一节	密度和孔隙度	(191)
第二节	强度特征	(192)
第三节	变形特征	(195)
第四节	原地应力	(198)
	参考文献	(201)
第九章	无机地球化学	(203)
	引言	(203)
第一节	矿物学	(205)

第二节	实验技术	(206)
第三节	野外技术	(208)
第四节	地球化学计算机模拟和相平衡	(214)
第五节	SOLMINEQ 程序	(215)
第六节	水化学	(229)
第七节	矿物-水反应	(237)
第八节	地层(生产层)的损害	(241)
	参考文献	(248)
第十章	多孔介质中的流体流动	(256)
第一节	单相液流的运动方程(达西定律)	(256)
第二节	渗透率	(259)
第三节	多相流	(260)
第四节	油的驱替	(266)
第五节	蒸汽驱替前缘	(270)
	参考文献	(274)
第十一章	传热	(278)
	引言	(278)
第一节	热性质的影响因素	(278)
第二节	热传导	(279)
第三节	对流传热	(296)
	参考文献	(303)
第十二章	扩散传质	(306)
	引言	(306)
第一节	基本原理	(307)
第二节	数据和关联式	(315)
	参考文献	(330)
第十三章	电热油藏	(333)
第一节	油砂中的电热过程	(333)
第二节	油砂的电学性质	(344)
第三节	电热采油过程的物理模型和数值模拟	(359)
	参考文献	(366)

第一章 Alberta 油砂矿床地质

D. Wightman

陆克政 译

B. Rottenfusser 编

俞康胤 校

J. Kramers

R. Harrison

引言

加拿大阿尔伯达(Alberta)各油砂矿床总体代表了世界上最大的烃类聚集^[1]。油含于下白垩统砂岩和上泥盆统至密西西比统灰岩和白云岩中。阿尔伯达能源保护委员会现将这些矿床划为三个地理区:阿萨巴斯卡(Athabasca)、和平河(Peace River)和冷湖区(Cold Lake)(图 1-1)。表 1-1 提供了每个矿区的面积、平均产层厚度和沥青地质储量,表 1-2 表示了白垩系地层序中主要的含沥青层位。

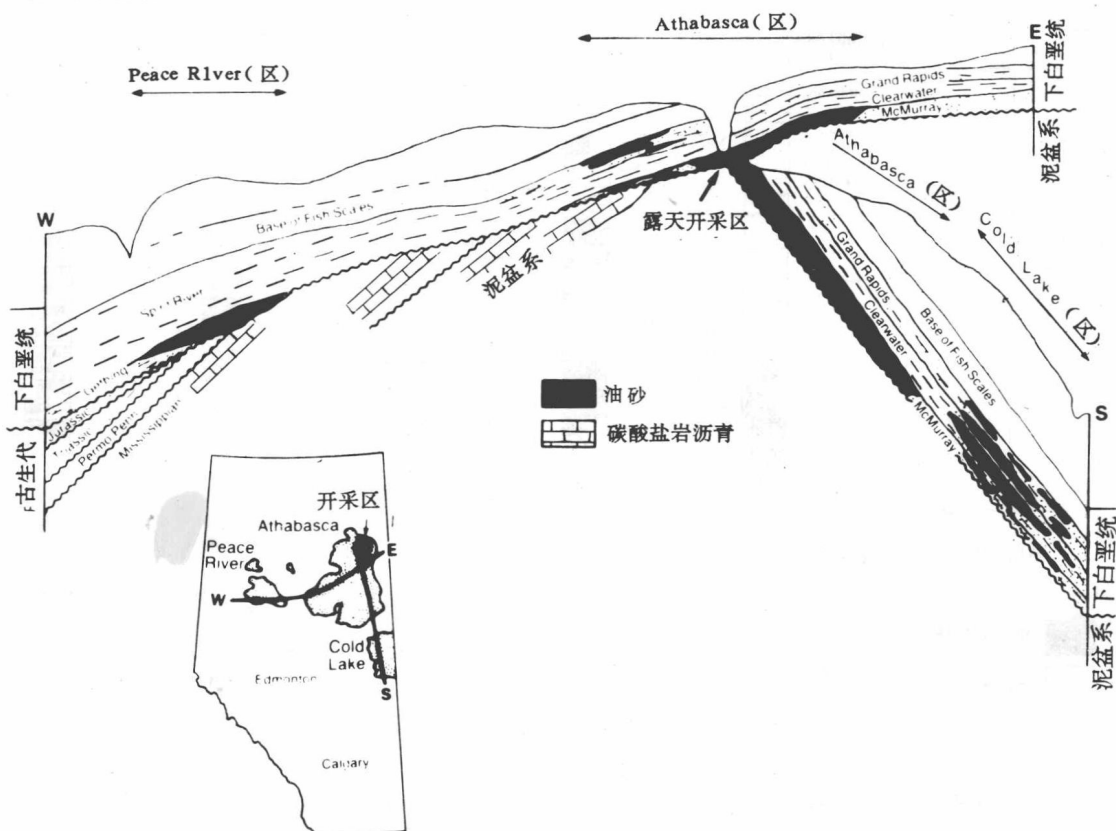


图 1-1 概略位置图和三个油砂矿区间的地层关系

表 1-1 Alberta 沥青储量概表(阿尔伯达能源保护委员会所定)

矿区	矿床	面积 (10 ³ 公顷)	平均产层 厚度(m)	沥青地质储量	
				(10 ⁹ m ³)	(10 ⁹ bb1)
阿萨巴斯卡 Athabasca	McMurray/Wabiskaw	4680	34	144	906
	Grand Rapids	689	7	7	44
	Grosmont/Nisku	4666	10	61	384
				212	1334
冷湖 Cold lake	Grand Rapids	1603	7	20	126
	Clearwater	561	12	11	69
	McMurray/Wabiskaw	666	5	4	25
				35	220
和平河 Peace River	Bluesky/Gething	987	14	12	76
	Debolt/Shunda	228	20	7	44
				19	120

表 1-2 Alberta 主要油砂和重质油层位的地层表

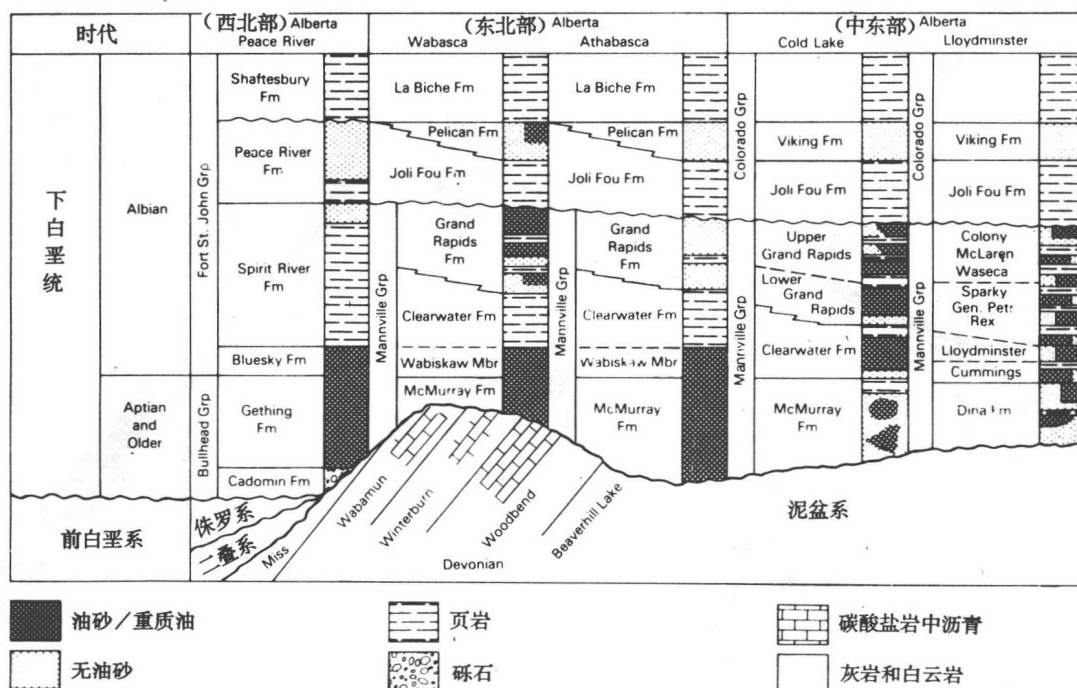


表 1-3 列出了油砂矿床的主要地质特征。在所有这些矿床中,只有不到 5%的资源被认为是可以露天开采的。根据经济的剥离比率标准而确定的露天可开采区位于 Athabasca 油砂区的北部。因此,极大部分阿尔伯达油砂沉积只能通过地下开采工艺来发掘。

表 1-3 油砂矿床的一般地质特征

矿区	地层		深度范围 (m)	产层平均 厚度(m)	API°	平均孔 隙度(%)	沉积环境	主要颗 粒成分	主要粘 土矿物
Athabasca (区)	Grand Rapids	上部	200~400	9	8	30	岸线 和 浅海	石英 燧石 长石 岩屑	高岭土 绿泥石 伊利石 蒙脱石 含水 伊利石 砂层
		中部	230~430	5	8	30			
		下部	270~470	6	8	30			
	Wabiskaw	可采的	0~120	38	8~10	29	大陆至 大陆架	石英	高岭土 伊利石
	McMurray	原地的	80~750	19	8~10	28			
Cold Lake	Grand Rapids	上部	275~500	6	11~15	30	大陆至 海岸线	石英 岩屑 长石	高岭土 伊利石 蒙脱石
		下部	325~525	12	9~12	31			
	Clearwater		375~500	12	10~11	30	海岸线	石英、长石、 岩屑、交代颗粒	高岭土 伊利石 蒙脱石
	Wabiskaw/McMurray		425~600	5	10~12	25	大陆架/大陆	石英 海绿石/石英	高岭土 伊利石
Peace River	Blue sky/Gething		460~760	14	9	24	河口湾 至浅海	石英 燧石 岩屑	高岭土 伊利石
碳酸盐岩 矿床区	Debolt		500~800	32	8~10	18	开阔海	石灰岩 白云岩	不重要
	Shunda		500~800	14	8~10	20	潮坪至 开阔海	石灰岩 白云岩	
	Grosmont		260~350	16	7	16	潮坪至 开阔海	白云岩	

油砂烃类成因问题已是多年来争议的热门课题,但通常接受的观点认为,沥青本为较轻烃,在从生油区移开一定距离后,经受了显著的原地降解作用而形成的。盆地最西部生烃区已下倾至深处。这一点是很少有争议的。但要明确地定出一个或几个特定生烃层是不可能的。在盆地西部晚白垩世至第三纪的变形、造山作用及其后的侵蚀使生烃岩的鉴定问题复杂化。较早期的一些研究者曾设想烃原本来自白垩系层序,但其它研究则强烈认为有可能包含泥盆系至白垩系岩层的几个生油层位。加拿大沉积和石油地质研究院地质调查所正在进行的生物标志化合物最新研究已提出了这样一种可能性,即白垩系油砂有一个生烃层位,而古生代碳酸盐岩则含有来自两个生烃层位的沥青(Brook 等,1989)^[2]。

第一节 Athabasca 油砂区

一、Mc Murray 矿床

Mc Murray 组是 Athabasca 区内主要的白垩系储集层。该组直覆于下伏古生代(泥盆纪)碳酸盐岩之上,在其沉积初始期,强烈地受古生界地形的影响^[3-5]。总的来看,其垂直沉积层次代表了由大陆河流和泛滥平原为主的环境演变为海平面上形成的海岸河口复合体。一个侵蚀接触面将 Mc Murray 组和上伏的 Wabiskaw 段(Clearwater)海绿石砂分开,后者是北方海

侵时沉积的^[6-8]。Mc Murray 组的厚度一般为 40~80m^[9],分成三个不正式的地层单位(Mc Murray 组下、中和上段)。在其近现今地表地区,该组构成矿体,正在由 Syncrude 和 Suncor 采矿企业开采。

与其它油矿床相比,Athabasca 区 Mc Murray 组沉积的矿物有很均匀和成熟的成分^[10]。沉积物由未胶结的、很细至粗粒石英砂(石英砂质和亚岩屑砂)组成,伴有页岩、粉砂和煤层。该组的大陆性质造成不连续的储集层。与其它下白垩统储层组如 Grand Rapids 组的连续的岸线沉积不同。在 Mc Murray 组砂分选好、粘土成分少的地方,有极好的储集性能,孔隙度在 30~40%间,含油饱和率可达 10~18wt%。这些储集岩通常分布较窄,但由于垂直叠加(河道沙的合并),厚度可达 70m,产层带净厚度约 20~40m^[11,12]。

二、Wabiskaw 矿床

Wabiskaw 段沉积物是更均匀的海相,通常由临滨下部至上部和滨外砂、粉砂和页岩所组成。未胶结的石英砂(石英砂质和亚岩屑砂)通常是细粒和很细粒,横向稳定但较薄的储集层。

三、Grand Rapids 矿床

Grand Rapids 组三个砂层组(Grand Rapids A、B、C 砂层组)的储层砂沉积于高能、以波浪为主的沿低地形海岸平原的岸线环境,其方向大致呈北东至南西^[13]。这三个砂层组向西北部盆地方向彼此超覆。储集岩沉积环境包括近岸浅海(至平均风暴波基面)和有小型障壁岛和泻湖的海岸-附属滩复合体。这种环境下的沉积可使储集层有极好的连续性,平行于北东至南西的区域沉积走向分布。储集层可能局部被与区域走向呈高角度相交的切穿岸线的砂质岩充填沟道沉积所中断。由于原来的高能沉积环境,储集层多是干净的,并有好的渗透率和孔隙度。在 Grand Rapids 组三个砂层组的每一层组中,储集层垂直连续性是好的,但可能局部地被薄而广的方解石或菱铁矿胶结层或钙质结核带所中断。沥青孔隙空间饱和率为 40~70%,分布于厚度为 5~25m,深度为 200~470m 的净产层带中。

与 Athabasca 区 Mc Murray 组不同,Grand Rapids 砂的矿物成分是复杂的。骨架颗粒组分是石英、燧石、长石、火山和沉积成因为主的岩屑。胶结物主要是各种粘土:在油饱和砂层中的高岭石、绿泥石,在含水砂层中的蒙脱石和层间粘土,伊利石在油饱和砂层和含水砂层中都有。

第二节 Peace River 油砂区

在 Peace River 区内的沥青圈闭于靠近密西西比系碳酸盐岩的白垩系 Gething 组和 Bluesky 组的上倾尖灭中,碳酸盐岩形成亚白垩系不整合面上的一个高地^[14]。这些沉积物沉积于沿海道东南边缘的大陆和边缘海环境,海侵来自北和西北方向。特定的沉积环境包括有岸线和浅海、潮坪和潮水道至河湖相。首先沉积的是陆相沉积,充填于亚白垩系的不整合面的地形。随着海侵,含盐潮坪沉积及继之而来的岸线沉积逐渐覆盖该区。潮水道沉积上叠于这个层序的上部。

在 Peace River 油砂矿床内,最厚和最连续的油砂发现于潮水道复合体中,但在宽阔的岸线和浅海砂中也发现高含油饱和率(77%孔隙体积)。横向上相当于由油砂和页岩互层组成的潮坪层序也含沥青,但由于互层中页岩的存在,形成吸引力较小的储集层。储集层较深(460~760m),净产层带厚达 30m。储集层砂的矿物成分混杂,以石英、燧石、岩屑、碳酸盐岩颗粒为主并含有少量长石。粘土矿物主要是高岭石、伊利石和少量蒙脱石和绿泥石。与下伏自生粘土

(特别是高岭石)丰富得多的含水砂层比较,储集层的油柱中,烃的侵位看来停止和抑制了成岩作用。

第三节 Cold Lake 油砂区

Cold Lake 区中的沥青分布于 270~600m 深度的四个主要层段内。自下而上关键矿床是 Mc Murray-Wabiskaw 段、Clearwater、Grand Rapids 组下部和上部。

一、Mc Murray-Wabiskaw 段矿床

在 Cold Lake 油砂区这一层段的储量最小。Mc Murray 组反映了下伏古生代碳酸盐岩上的最初沉积,为河湖沉积环境。这些石英质大陆沉积充填了许多甚至是所有的不整合面上的低崖地形区。在 Mc Murray 期末,北方海侵入该区,Wabiskaw 段(Clearwater 组)代表了下伏 Mc Murray 组大陆沉积和上伏 Clearwater 组残留的海洋沉积的过渡。在这层段顶部大量沥青在较薄的(5~10m)砂层中,而在 Mc Murray 组中的厚(10~15m)河道沉积以含水为主。

二、Clearwater 组矿床

该组有 Cold Lake 区第二大沥青储量,但其面积范围最小,并限于油砂区北部^[15,16]。大储量是由于油砂层厚度较大(净产层达 60m),储集层横向连续性好,这使得 Clearwater 组成为大量热开采活动的焦点。砂类型是非石英质的,为岩屑砂和长石质岩屑,沉积物来源于西部物源区^[17,18]。有高岭石、伊利石、蒙脱石粘土矿物和不同形状的自生绿泥石。以海岸线沉积环境为主伴有大陆沉积。Clearwater 组海相性质是 Mc Murray 期末北方海侵的结果。北部厚砂层被解释为是大型三角洲系统的部分。该三角洲系统的分支河道和分支河口砂坝沉积形成了 Cold Lake 区最高级的油砂。由于砂层向北尖灭成页岩,沥青圈闭部分是地层成因的,也由于盐从下伏泥盆系蒸发岩移去造成在矿床东边倾向(向东)反转,使部分圈闭是构造成因的。

三、Grand Rapids 组下部矿床

该区有 Cold Lake 区最大的沥青储量。储系砂(岩屑砂)的性质与 Grand Rapids 组上部的近似。沉积环境对矿物变化起着某些控制作用。以海岸线沉积环境为主伴有大陆沉积。Grand Rapids 组下部沉积不象上部分布那么广,但油砂层更连续,这反映出海岸线相有较好的横向稳定性。

四、Grand Rapids 组上部矿床

该组砂层为岩屑砂和长石质岩屑砂,沉积环境由大陆至大洋,在该矿床北部和东部,海水的影响增大^[19]。虽然 Grand Rapids 组上部分布广泛,但油砂连续性较差和较薄(5~10m),反映出这个地层层段的大陆面貌,然而在河道沉积中,单个砂储层可厚达 30m。

第四节 碳酸盐岩矿床

除了较有名的白垩系矿床外,还另有巨大但研究很少的油砂资源,沿着隐伏于白垩系之下的古生代地层东部上倾边缘的沥青^[20,21]。阿尔伯达能源保护委员会已对碳酸盐岩带内最好的四层:上泥盆统、Grosmont 组和 Nisku 组、Athabasca 区)、密西西比系、Shunda 和 Debolt 组(Peace River 区)进行了详细的资源估算。在这四层,至今工业上注意力主要集中在 Grosmont 组。

Grosmont 组是一被 Athabasca 油砂区 Mc Murray 组所覆的一个巨大的、多阶段发育的

浅海碳酸盐岩台地。主要储集层厚 20~25m,其深度约 250~300m,由白云岩组成,平均孔隙度高达 20%,沥青饱和度平均约为可利用孔隙空间的 70%或更多。与上覆白垩系沉积不同,Grosmont 组储层是一已成岩的白云岩,具有不均匀的双重孔隙结构。主要储集层由一系列岩石类型组成,代表了由较深水(台地斜坡向盆地过渡)—台地内碳酸盐砂、泥和斑礁堆积—限制的海岸线和潮坪等沉积环境。总的说来,结构的垂直次序反映了一系列向上变浅的沉积旋回,具有极佳的横向连续性,但有高度变化的垂直储集孔隙结构。

总 结

依其沉积环境条件,阿尔伯达各油砂矿床很不相同,这种变化又由储集层形状、横向和纵向连续性、内部结构和矿物成分反映出来。这些要素影响着储集层流体的相对分布和饱和度,更重要的是影响着对不同热模拟过程储集层成功响应的程度。七十年代初以来,人们日益认识到地质学对油砂资源评价、储层分析和开发战略研究是一个必不可少的组成部分。参考目录提供了许多可供选择的著作,它们对于阿尔伯达油砂和重质油矿床地质特征提供了更多的专门见解。

参 考 文 献

- [1] Alberta Energy Conservation Board, Atlas of Alberta's crude bitumen reserves, 85-38(1985).
- [2] P. W. Brooks, M. G. Fowler and R. W. Macqueen, Implications of biomarker geochemistry to the origin of oil sands/heavy oils, Western Canada Basin, Forum 89 Geological Survey of Canada (1989)60.
- [3] P. D. Flach, Oil sands geology—Athabasca deposit north, Alberta Research Council Bulletin 40(1984).
- [4] D. W. Keith, J. R. MacGillivray, D. M. Wightman, D. D. Bell, T. Berezniuk and H. Berhane, Resource characterization of the McMurray/Wabiskaw deposit in the Athabasca Central region of northwestern Alberta, AOSTRA/ARC/AE internal report(1987).
- [5] G. D. Mossop, Geology of the Athabasca oil sands, Science, 207(1980)145.
- [6] P. D. Flach and G. D. Mossop, Depositional environments of the lower Cretaceous McMurray Formation, Athabasca oil sands, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 69(1985)1195.
- [7] G. D. Mossop, Facies control on bitumen saturation in the Athabasca oil sands, Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 6(1980)609.
- [8] G. A. Stewart, Athabasca oil sands, First UNITAR Conference on the Future of Heavy Crude Oils and Tar Sands, McGraw-Hill, New York(1981)208.
- [9] J. R. MacGillivray, D. M. Wightman, D. A. W. Keith, B. D. Bell, H. Berhane and T. Berezniuk, Resource characterization of the central region of the Lower Cretaceous McMurray/Wabiskaw deposit, Athabasca oil sands area, northeastern Alberta, Paper

- no. 129, Fourth UNITAR/UNDP Conference on Heavy Crude and Tar Sands (1988).
- [10] G. D. Mossop, J. W. Kramers, P. D. Flach and B. A. Rottenfusser, Geology of Alberta's oil sands and heavy oil deposits, First UNITAR Conference on the Future of Heavy Crude Oils and Tar Sands, McGraw-Hill, New York (1981) 197.
 - [11] D. A. W. Keith, D. M. Wightman, S. G. Pemberton, J. R. MacGillivray, T. Berezniuk and H. Berhane, Sedimentology of the McMurray Formation and Wabiskaw Member (Clearwater Formation), Lower Cretaceous, in the central region of the Athabasca oil sands area, northeastern Alberta, Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 15 (1988) 309.
 - [12] D. A. W. Keith, D. M. Wightman, S. G. Pemberton, J. R. MacGillivray, T. Berezniuk and H. Berhane, Fluvial, estuarine and shallow marine sedimentation in the Lower Cretaceous McMurray Formation and Wabiskaw Member (Clearwater Formation) in the Athabasca oil sands area, Alberta, Paper no 130, Fourth UNITAR/UNDP Conference on Heavy Crude and Tar Sands (1988).
 - [13] J. W. Kramers and A. W. Prost, Oil sands resources of the Grand Rapids Formation in the Wabasca deposit, AOSTRA/ARC internal report (1986).
 - [14] B. A. Rottenfusser, Peace River oil sands—Regional geology, AOSTRA/ARC internal report (1985).
 - [15] D. M. Wightman and T. Berezniuk, Resource characterization of the Clearwater Formation, Cold Lake oil sands deposit, east-central Alberta, AOSTRA/ARC Internal Report (1985).
 - [16] D. M. Wightman and T. Berezniuk, Resource characterization and depositional modelling of the Clearwater Formation, Cold Lake oil sands deposit, east central Alberta, U. S. Dept of Energy Tar Sands Symposium, Wyoming (1986) 20.
 - [17] M. E. Prentice and D. M. Wightman, Mineralogy of the Clearwater Formation, Cold Lake oil sands area; Implications for enhanced oil recovery, AOSTRA/ARC/AE Internal Report (1987).
 - [18] Sedimentology Research Group, The effects of *in situ* steam injection on Cold Lake oil sands, Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 29 (1981) 447.
 - [19] D. M. Wightman, S. G. Pemberton and C. Singh, Depositional modelling of the Upper Mannville (Lower Cretaceous), east central Alberta: implications for the recognition of brackish water deposits, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Spec. Publ. 40 (1987) 189.
 - [20] R. S. Harrison, Regional geology and resource characterization of the Upper Devonian, Grosmont Formation, northern Alberta, AOSTRA/ARC internal report (1986).
 - [21] R. S. Harrison, The bitumen-bearing Paleozoic carbonate trend of northern Alberta, American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology 25 (1987) 319.
 - [22] R. S. Harrison, The AOSTRA-ARC joint oil sands geology programs; Regional resource studies of the Alberta oil sands deposits, U. S. Dept. of Energy Tar Sands

Symposium, Wyoming(1986)11.

- [23] T. R. Lennox, The impact of geology on the design and performance of *in situ* projects, AOSTRA conference on Advances in Petroleum Recovery and Upgrading, Calgary, , May(1981).
- [24] B. A. Rottenfusser, J. E. Palfreyman and N. K. Alwast, Geology of the AOSTRA Underground Test Facility site, Paper no. 115, Fourth UNITAR/UNDP Conference on Heavy Crude and Tar Sands(1988).
- [25] J. W. Kramers, S. Bachu, D. L. Cuthiell, M. E. Prentice and L. P. Yuan, A multidisciplinary approach to reservoir L. P. Yuan, A multidisciplinary approach to reservoir characterization, the Provost Upper Mannville B Pool, J. Can. Pet. Tech. 28(1989) 48.
- [26] J. W. Kramers, S. Bachu, D. Cuthiell, A. T. Lytviak, J. E. Hasiuk, J. J. Olic, M. E. Prentice and L. P. Yuan, The Provost Upper Mannville B Pool, an integrated reservoir analysis, Paper no. 60. Fourth UNITAR/UNDP Conference on Heavy Crude and Tar Sands(1988).
- [27] L. P. Yuan and J. W. Kramers, Characterization of pore images in a heavy oil reservoir and its applications, Paper no. 67, Fourth UNITAR/UNDP Conference on Heavy Crude and Tar Sands(1988).
- [28] S. C. O'Connell, The geology and resource characterization of the Lower and Mid-Mannville formations of the South Lloydminster heavy oil trend, Alberta, AOSTRA/ARC internal report(1985).
- [29] S. C. O'Connell and G. W. Bennis, The geology of the mid-Mannville subgroup in the west-central Lloydminster heavy oil trend, Alberta, Alberta Research Council Open File Report 1988-1(1988).
- [30] G. T. MacCallum, Geology of Lloydminster play, Alberta, First UNITAR Conference on the Future of Heavy Crude Oils and Tar Sands, McGraw-Hill, New York (1981)223.
- [31] R. Lefebvre and I. Hutcheon, Mineral reactions in quartzose rocks during thermal recovery of heavy oil, Lloydminster, Saskatchewan, Canada, Applied Geochemistry, 1(1986)395.