

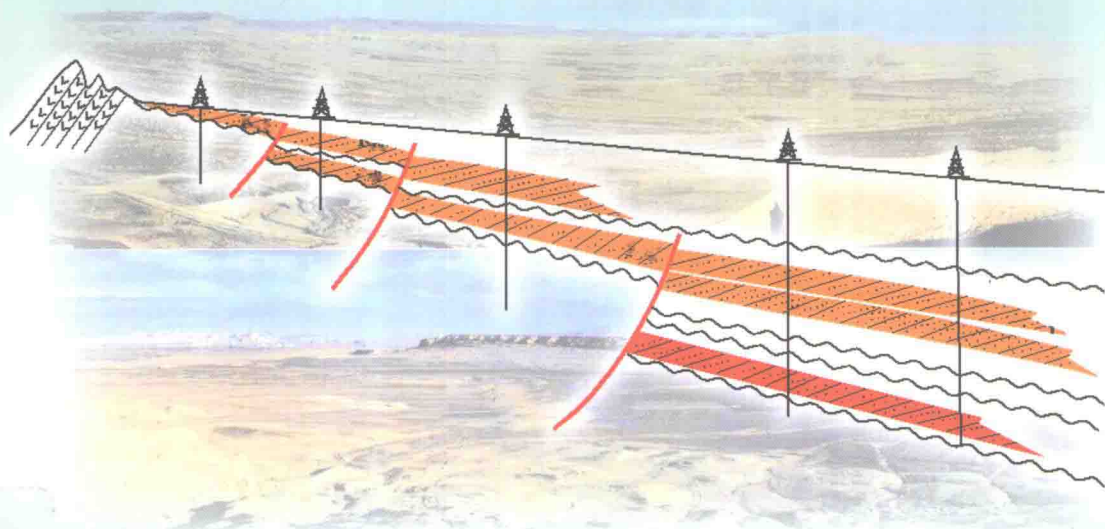
准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书

# 油砂成矿地质条件、富集规律与 勘探开发技术

## ——准噶尔盆地油砂矿勘探开发实践

THE MINEROGENETIC GEOLOGICAL CONDITIONS, ENRICHMENT REGULARITY, EXPLORATION AND DEVELOPMENT TECHNOLOGY OF OIL SANDS—OIL SANDS EXPLORATION AND DEVELOPMENT PRACTICE IN JUNGGAR BASIN

匡立春 薛新克 黄文华 等著



石油工业出版社

# 油砂成矿地质条件、富集规律与 勘探开发技术

——准噶尔盆地油砂矿勘探开发实践

匡立春 薛新克 黄文华 等著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书以准噶尔盆地风城油砂矿为例,系统总结了准噶尔盆地尤其是风城地区近年来油砂矿藏勘探取得的重要成果。全书根据准噶尔盆地风城地区油砂矿藏的勘探、开发实践和相关研究成果,以油砂矿藏地质特征的精细描述和油砂矿藏勘探开发过程中的关键技术设计两大核心内容为主线,从油砂矿所在地层的构造背景、地层特征、沉积和沉积相特征阐述了风城地区油砂矿藏形成的地质背景;通过对大量油砂储层镜下薄片、测井响应和地球化学特征的分析,展示了风城地区油砂矿藏类型、储集作用、富集规律及预测和评价方法;基于多年的勘探开发实践,论述了风城地区油砂矿藏勘探开发的工艺技术和开发方案的设计部署,相关内容涉及油藏工程、钻井工程、采油工程、地面工程以及环保工程的工艺设计及部署方案。

本书可供从事油气勘探的科研工作者、技术管理人员以及高等院校师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

油砂成矿地质条件、富集规律与勘探开发技术:准噶尔盆地油砂矿勘探开发实践/匡立春等著. —北京:石油工业出版社,2016.7

(准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书)

ISBN 978-7-5183-1350-1

I. 油…

II. 匡…

III. 准噶尔盆地-油砂-勘探-研究

IV. TE343

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 139741 号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523543 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:21

字数:533 千字

---

定价:120.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# 《油砂成矿地质条件、富集规律与勘探开发技术 ——准噶尔盆地油砂矿勘探开发实践》

## 编写人员

匡立春 薛新克 黄文华 宋渝新

吴宝成 王小军 周伯玉 王建新

牛 伟 马 亮 王东学 谢宗瑞

# 序

准噶尔盆地位于中国西部,行政区划属新疆维吾尔自治区。盆地西北为准噶尔界山,东北为阿尔泰山,南部为北天山,是一个略呈三角形的封闭式内陆盆地,东西长 700 千米,南北宽 370 千米,面积 13 万平方千米。盆地腹部为古尔班通古特沙漠,面积占盆地总面积的 36.9%。

1955 年 10 月 29 日,克拉玛依黑油山 1 号井喷出高产油气流,宣告了克拉玛依油田的诞生,从此揭开了新疆石油工业发展的序幕。1958 年 7 月 25 日,世界上唯一一座以石油命名的城市——克拉玛依市诞生。1960 年,克拉玛依油田原油产量达到 166 万吨,占当年全国原油产量的 40%,成为新中国成立后发现的第一个大油田。2002 年原油年产量突破 1000 万吨,成为中国西部第一个千万吨级大油田。

准噶尔盆地蕴藏着丰富的油气资源。油气总资源量 107 亿吨,是我国陆上油气资源当量超过 100 亿吨的四大含油气盆地之一。虽然经过半个多世纪的勘探开发,但截至 2012 年底石油探明程度仅为 26.26%,天然气探明程度仅为 8.51%,均处于含油气盆地油气勘探阶段的早中期,预示着巨大的油气资源和勘探开发潜力。

准噶尔盆地是一个具有复合叠加特征的大型含油气盆地。盆地自晚古生代至第四纪经历了海西、印支、燕山、喜马拉雅等构造运动。其中,晚海西期是盆地坳陷构造格局形成、演化的时期,印支—燕山运动进一步叠加和改造,喜马拉雅运动重点作用于盆地南缘。多旋回的构造发展在盆地中造成多期活动、类型多样的构造组合。

准噶尔盆地沉积总厚度可达 15000 米。石炭系—二叠系被认为是由海相到陆相的过渡地层,中、新生界则属于纯陆相沉积。盆地发育了石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系六套烃源岩,分布于盆地不同的凹陷,它们为准噶尔盆地奠定了丰富的油气源物质基础。

纵观准噶尔盆地整个勘探历程,储量增长的高峰大致可分为西北缘深化勘探阶段(20 世纪 70—80 年代)、准东快速发现阶段(20 世纪 80—90 年代)、腹部高效勘探阶段(20 世纪 90 年代—21 世纪初期)、西北缘滚动勘探阶段(21 世纪初期至今)。不难看出,勘探方向和目标的转移反映了地质认识的不断深化和勘探技术的日臻成熟。

正是由于几代石油地质工作者的不懈努力和执著追求,使准噶尔盆地在经历了半个多世纪的勘探开发后,仍显示出勃勃生机,油气储量和产量连续 29 年稳中有升,为我国石油工业发展做出了积极贡献。

在充分肯定和乐观评价准噶尔盆地油气资源和勘探开发前景的同时,必须清醒地看到,由

于准噶尔盆地石油地质条件的复杂性和特殊性,随着勘探程度的不断提高,勘探目标多呈“低、深、隐、难”特点,勘探难度不断加大,勘探效益逐年下降。巨大的剩余油气资源分布和赋存于何处,是目前盆地油气勘探研究的热点和焦点。

由新疆油田公司组织编写的《准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书》历经近两年时间的努力,今天终于面世了。这是第一部由油田自己的科技人员编写出版的专著丛书,这充分表明我们不仅在半个多世纪的勘探开发实践中取得了一系列重大的成果、积累了丰富的经验,而且在准噶尔盆地油气勘探开发理论和技术总结方面有了长足的进步,理论和实践的结合必将更好地推动准噶尔盆地勘探开发事业的进步。

系列专著的出版汇集了几代石油勘探开发科技工作者的成果和智慧,也彰显了当代年轻地质工作者的厚积薄发和聪明才智。希望今后能有更多高水平的、反映准噶尔盆地特色地质理论的专著出版。

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”。希望从事准噶尔盆地油气勘探开发的科技工作者勤于耕耘,勇于创新,精于钻研,甘于奉献,为“十二五”新疆油田的加快发展和“新疆大庆”的战略实施做出新的更大的贡献。

新疆油田公司总经理

2012. 11. 8





# 前言

油砂亦称焦油砂或沥青砂,是一种含有沥青、砂石、黏土、水等的混合物,与常规油气相比,其特征为黏度高,流动性差。随着常规油气勘探难度越来越大,非常规油气资源——油砂的开发利用日趋重要。根据“十一五”期间国土资源部新一轮油砂资源评价结果,中国油砂油资源量为  $59.7 \times 10^8 \text{t}$ ,主要分布于准噶尔、塔里木、柴达木、四川、鄂尔多斯、松辽等盆地中,在已发现矿带中,新疆准噶尔盆地西北缘条件较好,为最有利的开发区之一,埋深  $0 \sim 500 \text{m}$  的油砂资源量为  $14.30 \times 10^8 \text{t}$ 。

世界油砂资源丰富的国家主要有加拿大、俄罗斯、委内瑞拉、尼日利亚、美国等。加拿大无论资源和技术均处于世界领先水平,世界上所探明油砂资源的 95% 集中在加拿大艾伯塔省阿萨巴斯卡 (Athabasca)、皮斯河 (Peace River) 和科尔德湖 (Cold Lake) 地区。其中阿萨巴斯卡流域的油砂是世界上最大的已知油砂资源区,埋藏很浅,深度一般不超过  $610 \text{m}$ ,产层平均厚度  $17 \text{m}$ ,具有极好的储集性能,孔隙度在  $30\% \sim 40\%$  之间,重量含油率可达  $10\% \sim 18\%$ ,可开采沥青  $270 \times 10^8 \text{t}$ ,其中 20% 适用大规模露天开采,2011 年总产量  $5332 \times 10^4 \text{t}$ 。

目前油砂的开发利用还仅限于少数国家,加拿大已有两家公司 (Syncrude、Suncor) 有大规模的工业生产,年开采油砂 1 亿多吨,用热碱水抽提,得到重油 1 千多万吨,再通过焦化、加氢等方法精炼,生产出汽油、柴油等。其他如美国、俄罗斯和委内瑞拉等国也都开展了油砂研究和小规模的开发利用。

国内油砂矿现场开展小规模试验的主要有新疆的乌尔禾和红山嘴地区、吉林套堡油田、内蒙古图牧吉油砂矿。2005 年在风城乌尔禾开展了现场干馏工艺对比试验,现场放大试验效果达到室内效果的 80%。当含油率达到 8% 时,放大试验可以实现 25t 油砂产 1t 油效果,当含油率大于 6.5% 时,可实现 30t 油砂产 1t 油效果。2006 年选择红山嘴地区红砂 6 井区作为中试试验场,11 月 5 日采用电加热水洗分离装置成功分离出了第一桶油砂油。分离温度  $80^\circ\text{C}$ ,洗油效率 80% 以上,最大处理能力  $10 \sim 15 \text{t/d}$ ,产油  $0.8 \text{t/d}$ ,在分离油砂的同时,还对油田污泥进行了试验, $85^\circ\text{C}$  下一次分离后的洗油效率达到 90%,二次水洗后的油砂可以达到环保要求。

吉林套堡油田主要是采用携砂冷采采油技术,是国内携砂冷采做的最好的油田之一。主要产油区为 92 区块,井深为  $300 \text{m}$  左右。年产油  $4.5 \times 10^4 \text{t}$ ,几乎全部采用螺杆泵携砂冷采,采到地面上的油砂经过沉降后将油、水和砂进行分离,沉积下的砂再经过水洗将吸附在砂子上的

油分离出。

内蒙古图牧吉油砂矿发现于1997年。该油砂矿探明储量约 $350 \times 10^4 \text{t}$ ,具有埋藏浅(6~50m)、油品好(室温下黏度 $1000 \text{mPa} \cdot \text{s}$ )、含油率高(一般在8%~14.5%之间,部分高达21%)的特点。而且油砂粒度大、黏土含量低,油砂表面有水膜,表现为亲水性。2005年该油砂矿首次进入开采试验,2006年建成了年产能 $(3 \sim 5) \times 10^4 \text{t}$ 的油砂油分离工厂及综合利用基地。

新疆准噶尔盆地西北缘油砂资源规模和品位为全国条件最优,较落实的油砂储量 $2.3 \times 10^8 \text{t}$ ,是中国石油新疆油田公司今后发展的重要领域,其中风城油砂矿是我国近年来发现的最大油砂矿。2011年以来,为深入贯彻落实中央“新疆资源利用最大化”工作精神,中国石油和各级地方政府高度重视新疆油砂矿综合利用工作,可实现油砂资源规模、高效开发,进一步壮大地方经济实力。2012年新疆油田公司对储量规模最大、品质最好的风城油砂矿进行了勘探和露天开采及处理小型试验。

固体油砂矿的勘探、矿床地质特征描述、储量计算方法、矿藏综合评价等方面与常规油气资源有很大的区别,在国内没有标准、规范、先例可借鉴,是个崭新的研究领域。新疆油田公司通过对风城油砂矿藏的精细描述,落实了探明和控制地质储量,为风城油砂矿的高效开发提供了依据;并通过现场试验和技术攻关,确定了合理开采方式,形成了针对准噶尔盆地西北缘的勘探、评价、现场选样和储量计算等系列技术和方法,这些勘探技术和方法可以为国内外类似油砂矿勘探开发提供有益的参考。

油砂矿作为一种特殊矿藏,其勘探、评价和开发方法与常规油气不同。在长期对油砂矿勘探开发实践的摸索中,形成了一套针对固体油砂矿藏的地质勘探、现场选样、储量计算和开发方法等,具体而言,取得了以下重要进展。

(1)深入分析了准噶尔盆地西北缘油砂矿的成矿富集规律及特征,评价油砂的资源量,指出了油砂勘探的有利方向。

通过对风城油砂矿等的地质精细描述和成藏规律研究,指出了准噶尔盆地西北缘复杂斜坡逸散型油砂成矿模式,认为该区构造发育、样式多变,形成的油砂矿一般规模较大,是我国油砂勘探的重要目标。通过分析西北缘油砂分布与油源、生烃中心、稠油藏的关系,指出了该区油砂分布规律:①油砂分布于盆地或凹陷斜坡边缘,处于油气长期运移、散失的部位;②平面上,油砂位于稠油藏上倾部位;③剖面上,油砂主要分布在上部地层(白垩系、侏罗系)中。分析了准噶尔盆地西北缘油砂成矿的地质条件,认为不整合面和断层为油砂形成提供了高效运移通道,盆地边缘砂体为油砂提供了良好的储集空间,后期构造抬升和降解稠化作用促进了油砂形成。提出了西北缘油砂的有利勘探方向:①盆地边缘扇体;②河道砂体和滨湖砂体发育部位;③与不整合面接触的砂体发育带;④边缘同生断层;⑤后期挤压逆断层附近;⑥油砂露头与下倾稠油区的过渡地带。估算了准噶尔盆地西北缘重点地区油砂的资源量,其中风城地区油砂资源潜力最大。

(2)总结了油砂成矿机制和成矿模式,指出了油砂成矿的五种地质条件和三种富集主控因素。

在对准噶尔盆地西北缘风城油砂矿和其他地区油砂矿形成过程等进行深入剖析的基础



上,提出了油砂四种形成机制,认为油砂中的稠油或沥青主要是由于生物降解、水洗、游离氧化、轻烃挥发等冷变质作用造成油质中极性杂原子重组分——胶质、沥青质富集的结果,其中以生物降解作用最为明显。总结了油砂矿形成的五种地质条件:①丰富的油源;②高效的运移通道;③有效储集体;④后期构造抬升;⑤原油稠化作用。油砂矿的形成存在三种主控因素:有效运移通道、有效储集体和后期构造抬升。通过与国内其他地区油砂矿的对比,认为我国油砂的分布与盆地类型和构造部位有关,通常与稠油和常规油有伴生关系。考虑油砂矿的成因及构造部位,我国油砂矿的构造成因类型分为三种类型,分别为斜坡逸散型、古油藏破坏型和次生聚集型。

(3)通过对储量规模最大的风城油砂矿进行的精细勘探和开采试验,取得了一系列先进的油砂矿勘探和开发技术。

#### ① 油砂成矿条件及富集规律研究技术。

野外露头地质调查,开展基础地质研究,制定稳定和不稳定油砂矿体的勘探与评价井距,开展了重点目的层精细构造解释、风城油砂矿区中生界侏罗—白垩系沉积体系研究、储层宏观及微观特征研究,解剖油砂矿藏类型,建立了挤压型盆地的成矿模式,该模式区别于国外缓倾单斜盆地的成矿模式,有力指导了准噶尔盆地西北缘油砂矿的勘探和评价。

#### ② 地层划分、砂层对比技术。

由于油砂赋存区储层非均质性强,简单的地层对比无法实现对该矿藏的准确描述。因此,应用层序地层学理论并结合岩性、电性及沉积旋回特征,利用本区野外露头、钻井、取心、测井等资料,建立基于剖面,明确对比原则和划分方案,建立了基于层序地层的等时地层格架,在地层格架的约束下,以砂层组为单元,进行基于辫状河流相、辫状河三角洲相模式指导下的砂体对比、刻画。

#### ③ 矿藏精细描述技术。

利用单孔岩性、含油产状、重量含油率资料,结合钻井曲线制作全区油砂对比剖面图,研究油砂层的空间展布、连通性、矿体规模、品位、隔夹层分布等特征,确定油砂垂向及平面分布规律,研究层间、层内和平面非均质性,进一步分小层对油砂储层进行综合评价,为油砂矿的高效开发提供了有力技术支撑。

#### ④ 三维建模技术。

非常规油砂矿床勘探开发过程中应用三维建模技术是一个崭新的研究课题。运用三维地质建模研究平台,依据现有区域地质认识,将地震、钻孔岩心数据、化验分析、测井等各种地质信息多层次交互应用,利用基于序贯指示模拟油藏仿真技术,精细刻画油砂矿体关键参数的三维空间分布规律。可以直观形象地展现出地下油砂矿床的富集规律。为指导风城油砂矿综合高效开发,提高油砂开发水平摸索出一条新的途径。

#### ⑤ 小井距钻孔全井段取心油砂识别技术。

在油砂评价阶段,油砂分布较稳定的区域按照 200m 井距勘探,不稳定区域加密 50m 井距钻孔。直接利用岩心资料描述泥岩、砂岩、砂砾岩等各种岩性,饱含油、富含油、油浸以及油斑等含油产状,通过现场选样实践和室内筛选评价,确定了适用于油砂样品的检测分析项目和具体选样技术要求,合理确定选样项目,样品分析项目的准确性、代表性能够满足地质认识,形成

一套室内、室外相结合,取心、化验相结合的油砂体识别技术。

#### ⑥ 油砂有效厚度划分标准建立技术。

通过风城油砂矿现场钻井勘探和室内资料分析整理,结合地区实际情况对油砂品位划分了三个等级,有效厚度下限标准的确定方法包括岩心含油产状法和重量含油率法,建立油砂有效厚度划分标准为重量含油率 $\geq 6\%$ ,主要为饱含油、富含油和部分油浸级岩心,该方法为油砂储量计算和资源评价奠定了基础。室内水洗分离试验和现场小试试验结果,证实了该方法的适用性,在本地区油砂矿体精细描述和储量计算中得到应用。

#### ⑦ 重量含油率法计算探明储量技术。

针对油砂埋藏较浅,胶结疏松,在抽提时严重破碎,孔隙度、饱和度数据误差大,利用常规油气容积法难以精确计算储量的特点,储量计算方法一般采用重量含油率法。通过现场勘探和室内技术攻关,针对国内外油砂品位及地质特征的差异,借鉴固体矿产及煤炭储量计算方法,通过在风城油砂矿探明储量计算中的摸索,形成了一套适用于国内油砂矿的储量计算方法。

#### ⑧ 发展了油砂矿露天开采技术和水洗分离工艺技术。

目前国际上开采油砂的方法主要有两种:一是露天开采法(埋藏 $<75\text{m}$ );二是钻井热采方法(埋藏 $>75\text{m}$ ),蒸汽吞吐和 SAGD 是目前油砂井采的主体技术。目前国际上露天开采技术在加拿大和委内瑞拉两国已经投入工业性应用,并且取得了比较好的效果,但在中国尚处于起步和初步试验阶段。为了尽快对风城油砂开展实质性试验研究,取得风城油砂露天开采的直接经验,2012 年新疆油田公司就对埋藏较浅的 3 号矿开展了露天开采现场试验,采用热碱水水洗分离工艺技术分离油砂油,发展了油砂矿露天开采技术,为其他地区油砂矿的开采提供了经验。

#### ⑨ 分析了油砂水洗分离机理,研制了水洗分离化学药剂配方,优化了油砂分离工艺。

油砂中抽提物(沥青)的萃取是油砂矿床开采工艺最重要的环节,也是商业性评价的基础。实验室油砂萃取模拟试验,为确定不同性质油砂的萃取方法、油砂含油率、干馏油品的物理性质等参数提供了可靠的基础,特别是为现场实地开采提供了系统可靠的依据。目前通过开展风城油砂水洗分离室内化验及研究工作,确定出了适合风城油砂分离的药剂体系,通过分离实验分析得知,加热温度、试剂质量分数、加热分离时间、剂砂质量比对油砂分离效果的影响比较大,室内实验油砂出油率可达到  $90.0\% \sim 94.8\%$ 。通过水洗分离装置的设计和现场分离试验的成功应用,确定了可靠的油砂分离工艺,在节能降耗、降低分离成本方面发挥了重要作用。

#### ⑩ 发展和完善了油砂矿 SAGD 规模化开采技术。

考虑新疆油田油砂资源埋深特点及物性特征等因素,结合国外油砂开采成熟经验,近年在准噶尔盆地风城油田开展 SAGD 规模化热采试验,形成了从 SAGD 钻井、采油和地面等各环节工程设计方案。通过上述方案试验提高了对油砂整体开采技术认识,为技术的配套完善奠定了基础。SAGD 技术在新疆油田公司的成功应用,说明了该技术方案的可行性,为今后继续加大 SAGD 技术攻关力度,形成完善的配套技术,实现磁导向轨迹控制的国产化等关键技术奠定了基础,进一步降低开发成本,达到油砂矿开采的最大经济性。

通过对准噶尔盆地风城地区油砂矿藏综合地质和勘探、开发技术工艺的研究,完成了准噶尔盆地风城油砂矿藏精细描述,建立了油砂三维空间展布模型;详细查明了油砂矿体的边界、规模和开采技术条件,探明沥青油地质储量  $4247.68 \times 10^4 \text{t}$ ,控制储量  $8164 \times 10^4 \text{t}$ ;同时,编制完成《油砂矿地质勘查规范》和《油砂储量计算规范》两个规范初稿,为类似油砂矿藏描述及探明储量计算提供借鉴,形成了一套固体油砂矿藏的地质勘探、现场选样、储量计算方法以及油砂分离工艺和开采技术。该成果是风城油砂矿综合利用的基础和资源保证,对地方经济以及新疆油田公司的持续稳定发展具有十分重要意义。

本书是集体智慧的结晶,中国石油天然气股份有限公司、新疆油田公司及中国石油大学(北京)等科研院所的广大科研人员参与了研究工作,在此一并表示衷心的感谢。

油砂矿的研究及勘探开发实践是当今非常规油气勘探领域和石油地质研究的一个热点和难题。由于执笔人水平有限,有关项目的创新性成果还没有完全反映出来,书中肯定会存在某些局限性和不足之处,敬请专家和读者批评指正。

# CONTENTS 目录

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 第一章 油砂矿勘探开发现状 .....              | (1)   |
| 第一节 油砂相关概念 .....                 | (1)   |
| 第二节 国内外油砂勘探开发现状 .....            | (3)   |
| 第三节 典型油砂成矿条件及富集规律 .....          | (7)   |
| 第四节 油砂矿开发技术现状 .....              | (12)  |
| 第五节 油砂分离技术现状 .....               | (16)  |
| 第二章 油砂成矿条件及主控因素 .....            | (19)  |
| 第一节 风城油砂矿特征及主控因素 .....           | (19)  |
| 第二节 红山嘴—黑油山油砂成矿地质条件及富集主控因素 ..... | (31)  |
| 第三节 二连盆地包楞油砂成矿地质条件 .....         | (36)  |
| 第四节 内蒙古巴达拉湖油砂成矿地质条件 .....        | (40)  |
| 第五节 松辽西斜坡油砂成矿地质条件及富集主控因素 .....   | (44)  |
| 第六节 中国油砂矿构造成因分类与成矿模式 .....       | (53)  |
| 第三章 风城油砂矿精细地质特征描述 .....          | (60)  |
| 第一节 区域构造背景和地层分布 .....            | (60)  |
| 第二节 白垩系油砂矿地层对比及地层格架的建立 .....     | (62)  |
| 第三节 油砂矿构造特征精细描述 .....            | (72)  |
| 第四节 风城油砂矿沉积相特征及精细描述 .....        | (79)  |
| 第五节 油砂矿储层精细描述 .....              | (97)  |
| 第四章 新疆风城油砂矿勘探技术 .....            | (113) |
| 第一节 工区位置和油砂勘探概况 .....            | (113) |
| 第二节 油砂地质勘查阶段划分及勘查工程设计 .....      | (117) |
| 第三节 小井距钻探及油砂选样标准技术 .....         | (122) |
| 第四节 油砂有效厚度下限标准与确定方法 .....        | (126) |
| 第五节 油砂有效面积、厚度划分及评价技术 .....       | (138) |
| 第六节 有效油砂储层测井响应及评价技术 .....        | (145) |
| 第七节 重量含油率法计算探明储量技术 .....         | (152) |



|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| 第五章 新疆风城油砂矿露天开发技术 .....           | (167) |
| 第一节 油砂和油砂油物理—化学性质检测 .....         | (167) |
| 第二节 油砂水洗分离原理及实验方法 .....           | (177) |
| 第三节 油砂分离实验及影响因素 .....             | (188) |
| 第四节 油砂分离工艺技术设计及优化 .....           | (200) |
| 第六章 新疆风城油砂矿钻井开发技术 .....           | (213) |
| 第一节 油砂矿有效开发方式先导试验及评价 .....        | (213) |
| 第二节 SAGD 油砂矿工程方案设计 .....          | (217) |
| 第三节 油砂矿 SAGD 双水平井钻完井技术 .....      | (237) |
| 第四节 稠油—油砂降黏及水平井采油工艺 .....         | (258) |
| 第五节 稠油—油砂 SAGD 双水平井采油工艺配套技术 ..... | (269) |
| 第六节 油砂矿 SAGD 地面工程实施技术 .....       | (285) |
| 第七节 SAGD 油砂经济评价方法及安全、环保方案 .....   | (304) |
| 参考文献 .....                        | (317) |



# 第一章 油砂矿勘探开发现状

## 第一节 油砂相关概念

油砂亦称焦油砂或沥青砂,是一种含有沥青或焦油的砂或砂岩,通常是由沥青、砂粒、水、黏土等矿物质组成的混合物,具有高密度、高黏度、高碳氢比和高金属含量特征,属于非常规石油资源(固体矿藏)。油砂油又称沥青砂油或天然沥青,是指从油砂矿中直接开采出的或从油砂中经初次提炼的、黏度极高(油藏条件下黏度大于  $50000\text{mPa} \cdot \text{s}$ ) 的石油。油砂矿是由地质作用形成的油砂自然富集物,出露地表或近地表(埋深一般小于  $300\text{m}$ ),主要以露天、巷道或井采方式开采。

油砂沥青是指从油砂矿中开采出的或直接从油砂中初次提炼出的尚未加工处理的石油。目前所发现的世界上 85% 的油砂集中在加拿大艾伯塔省北部地区,主要集中在阿沙巴斯克(Ashabasca)、科尔德湖(Cold Lake)和皮斯河(Peace River)三个油砂区,面积分别达  $4.3 \times 10^4\text{km}^2$ 、 $0.729 \times 10^4\text{km}^2$  和  $0.976 \times 10^4\text{km}^2$ 。

随着世界对烃类需求的不断上涨,未来能源的巨大缺口在很大程度上要依靠包括油砂在内的非常规油气来弥补。油砂已经成为常规油气资源的重要替代资源,对于油砂的开发利用,目前还仅限于少数几个国家:加拿大、美国等。

稠油、油砂与常规油气具有共生或过渡的关系,油砂和稠油资源丰富的盆地也是常规油气资源丰富的盆地,诸如艾伯塔盆地、伏尔加—乌拉尔盆地和东委内瑞拉盆地等。导致油砂矿藏形成的稠化作用主要包括生物降解、轻烃挥发、水洗、游离氧氧化等冷变质作用,这些作用造成了油质中极性杂原子重组分(胶质和沥青质)的富集,形成了油砂矿藏的主要地球化学特征。

不同的国家对油砂资源有不同的分类标准。加拿大及美国等西方国家把油藏条件下黏度大于  $10000\text{mPa} \cdot \text{s}$  的石油称为油砂油或天然沥青。当无黏度参数值可参考时,把相对密度大于 1.0 作为划分油砂油的指标。重质油则是指密度变化在  $0.934\text{g}/\text{cm}^3$  ( $20^\circ\text{API}$ )  $\sim 1.00\text{g}/\text{cm}^3$  ( $10^\circ\text{API}$ ) 之间的石油。原苏联对稠油和天然沥青的定义和研究自成体系,黏度为  $50 \sim 2000\text{mPa} \cdot \text{s}$ ,相对密度在  $0.935 \sim 0.965$ 、油含量大于 65% 的原油称为高黏油,高于上述界限值的均称为沥青(软沥青、地沥青、硫沥青等)。

由于世界各国和组织对重油及沥青砂定义差别较大,因此,1982 年 2 月在委内瑞拉召开的第二届国际重油及沥青砂学术会议上提出了统一的定义和分类标准(表 1-1),并达成共识。

表 1-1 重油及沥青砂的定义和分类标准\*

| 分类 | 第一指标                               | 第二指标                          |                                                    |
|----|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|
|    | 黏度 ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ) | 相对密度 ( $15.6^\circ\text{C}$ ) | 重度 ( $15.6^\circ\text{C}$ ) ( $^\circ\text{API}$ ) |
| 重油 | 100 ~ 10000                        | 0.934 ~ 1.00                  | 20 ~ 10                                            |
| 沥青 | > 10000                            | > 1.00                        | < 10                                               |

\* 联合国培训计划署(UNTAR)推荐的重质原油及沥青分类标准。

国内油砂的界定如下:在油层温度条件下,黏度大于 10000mPa · s 的称为油砂油,或者密度大于 0.95g/cm<sup>3</sup>的原油称之为油砂油。油砂油比一般原油的黏度高,由于流动性差,需经稀释后,才能通过输油管线输送。

油砂矿藏中的原油从原地下储集体中运移至地表后,一般已脱气,呈固体或半固体状态。油砂矿藏既不同于固体矿藏,又不同于常规油气藏,因此,对油砂矿的评价就有其特殊性,必须采用特殊评价方法。

我国对油砂的勘探工作目前可分为普查、详查和勘探三个阶段。联合国资源储量分类框架中的地质研究阶段分为踏勘、普查、一般勘探和详细勘探四个阶段,对比发现,前三个阶段分别相当于我国的普查、详查和勘探阶段。

油砂资源量、油砂地质储量均是指油砂油的量。油砂地质储量的大小是进行经济评价的重要依据,也是编制油砂矿开发方案的物质基础,因而准确地评估油砂矿中油砂油储量是一项十分重要的工作。

目前国内外通行的油砂资源储量计算方法主要为体积法,并可进一步细分为重量法(含油率法)和容积法(含油饱和度法)。风城区块油砂埋藏较浅,大部分样品在抽提时严重破碎或松散,孔隙度、饱和度数据误差大,而含油率及岩石密度参数较易获取,因此采用重量法(含油率法)。其计算采用下列公式:

$$N = 100AH\rho_y w$$

式中  $N$ ——油砂沥青地质储量(或资源量),10<sup>4</sup>t;  
 $A$ ——纯油砂面积,km<sup>2</sup>;  
 $H$ ——纯油砂厚度,m;  
 $\rho_y$ ——油砂岩石密度,t/m<sup>3</sup>;  
 $w$ ——含油率,f。

根据国际上对油砂资源储量分类框架(图 1-1)及我国油砂勘探开发现状将油砂储量分为三级,即探明储量(Proven)、控制储量(Probable)、预测储量(Possible)。各级储量是一个与地质认识、技术和经济条件有关的变数,不同勘探开发阶段所计算的储量精度不同,因而在进行勘探和开发决策时,要和不同级别的储量相适应,以保证经济效益。

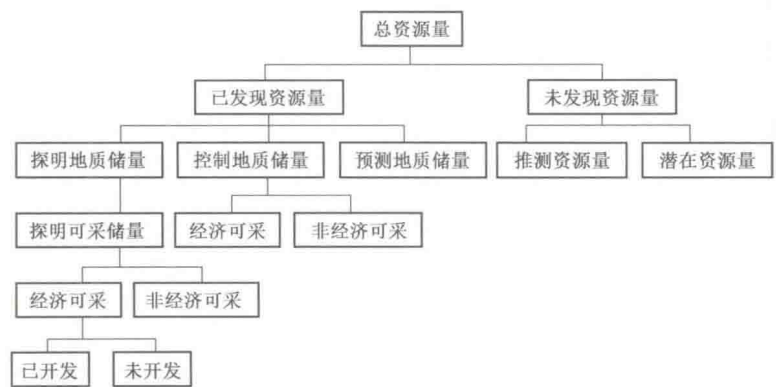


图 1-1 油砂矿储量分类体系图

第二节 国内外油砂勘探开发现状

一、全球油砂分布

全球油砂沿两个带展布,环太平洋带和阿尔卑斯带。环太平洋带:东委内瑞拉盆地、艾伯塔盆地、列那阿拿巴盆地和中国东部诸盆地;阿尔卑斯带:印度坎贝海湾、欧洲诸盆地和中国西部盆地(图 1-2)。

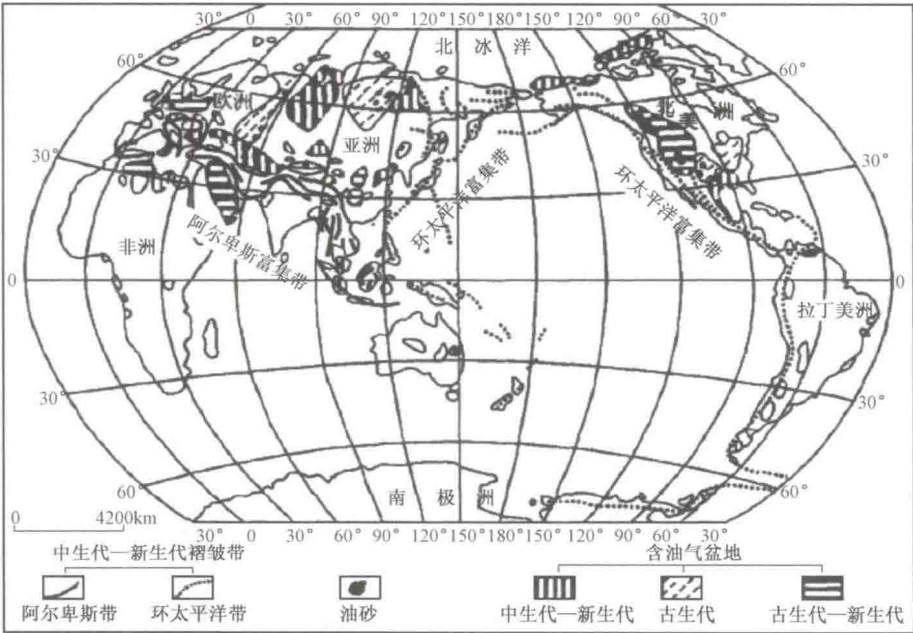


图 1-2 世界油砂分布图(据 BGR,1998)

世界上油砂资源丰富的国家有:加拿大、委内瑞拉、美国、俄罗斯、中国(表 1-2)。BGR (1998)估计全世界有  $6580 \times 10^8 \text{t}$  油砂油,商业产量主要在加拿大的艾伯塔盆地。世界上所探明的油砂资源的 95% 集中在加拿大艾伯塔省北部阿萨巴斯卡河流域、皮斯湖以及艾伯塔省和萨斯喀彻温省交界处的科尔德湖地区,目前已经探明的油砂和重油资源达  $4000 \times 10^8 \text{m}^3$  (合  $3406 \times 10^8 \text{t}$ ),相当于整个中东地区的石油蕴藏量。其中阿萨巴斯卡流域的油砂是世界上最大

表 1-2 世界主要油砂资源分布

| 国家   | 油砂资源量( $10^8 \text{t}$ ) | 相对比例(%) | 资料来源      |
|------|--------------------------|---------|-----------|
| 加拿大  | 2329.0                   | 45.8    | ERCB,2009 |
| 俄罗斯  | 952.0                    | 18.7    | 单玄龙,2007  |
| 委内瑞拉 | 323.8                    | 6.4     | 贾承造,2007  |
| 美国   | 85.7                     | 1.7     | 贾承造,2007  |
| 中国   | 59.7                     | 1.2     | 贾承造,2007  |



的已知油砂资源,产层平均厚度为 17m,具有极好的储集性能,孔隙度在 30% ~ 40% 之间,重量含油率可达 10% ~ 18%,估计地质储量达  $1827 \times 10^8 \text{t}$  (Kramers 和 Mossop, 1987)。加拿大的油砂埋藏很浅,深度一般不超过 610m,其中大约 9% 的油砂层接近地表,有很高的采收率。

加拿大油砂资源量巨大,油砂资源量约为  $2.9 \times 10^{12} \text{bbl}$ 。加拿大油砂主要分布在艾伯塔盆地,盆地面积  $30 \times 10^4 \text{km}^2$ 。盆地西南构造复杂,地层总厚度约 6000m,几乎从泥盆系至上白垩统均有油气藏分布。油砂分布在盆地东翼浅部的白垩系下部,总体处于不整合面之上。其中阿萨巴斯卡、科尔德湖、沃巴斯卡和皮斯河 4 个最大的油砂矿,地质储量合计在  $1.3 \times 10^{12} \text{bbl}$  以上。阿萨巴斯卡是艾伯塔盆地中最大的油砂矿,估算地质储量  $9200 \times 10^8 \text{bbl}$ 。加拿大有两家公司 (Syncrude 和 Suncor) 在进行大规模工业化生产,采用热碱水抽提,每年得到稠油  $0.7 \times 10^8 \text{bbl}$ ,再通过焦化、加氢等方法精制,生产出汽油、柴油等产品,可以满足加拿大国内对油品需求的 1/3,成为加拿大石油工业一大支柱。

俄罗斯油砂分布广泛,各含油气盆地几乎均有发现,资源量约为  $0.7 \times 10^{12} \text{bbl}$ 。其 90% 的潜在油砂资源集中于古老地台区的隆起带和断裂带。主要分布在蒂曼伯朝拉、伏尔加—乌拉尔、滨里海、西伯利亚等盆地中。

美国油砂资源量约为  $690 \times 10^8 \text{bbl}$ ,主要富集于阿拉斯加洲和犹他洲,各占总数的 30% 以上。例如,加利福尼亚洲文图拉盆地 Oxnard 油田,资源量近  $50 \times 10^8 \text{bbl}$ 。产油砂层位为中新统 Modelo 组、Conejo 组和上新统 Pico 组。

国外的油砂多分布于前陆盆地。早期的克拉通边缘盆地如艾伯塔盆地和尤因塔盆地,白垩纪以来逐渐演化为前陆盆地,属于落基山前陆盆地群 (Macqueen 等, 2001; Elise 等, 2002; 单玄龙等, 2011), 油砂富集在前陆盆地缓坡斜坡带高部位。再如东委内瑞拉盆地属板块聚敛前与小洋盆连通的盆地,后期发生板块碰撞,形成前陆盆地格局,重油富集在前陆盆地缓坡斜坡带高部位,即奥里诺科重油带所在的位置 (Alayeto 等, 1974; Parnaud 等, 2001; Audemard 等, 2001)。伏尔加—乌拉尔盆地属于早期的克拉通边缘盆地,二叠纪以来演化为前陆盆地,乌拉尔山隆起,使盆地内前缘拗陷中的烃源岩埋深迅速增加,油气生成、运移达到顶峰,其中运移至前缘隆起带上的部分油气,因上覆盖层封闭性较差,遭受氧化、生物降解作用,发生稠化形成油砂。而由于构造运动形成的隆起带、断裂带以及不整合面则是油砂勘探的有利标志 (Anfort 等, 2001; Lyatsky 等, 2004; Frances, 2006; Qiang 等, 2007)。

## 二、中国油砂分布

中国的油砂资源相当丰富,虽未经系统勘查,但就目前所知,新疆的准噶尔盆地、吐哈盆地和塔里木盆地,青海的柴达木盆地,内蒙古的松辽盆地西部、二连盆地和中口子盆地,四川盆地,西藏的羌塘盆地,广东的三水、茂名盆地,云南的景谷盆地,广西的百色盆地、楚雄盆地,以及贵州麻江和翁安等地区均有分布 (图 1-3)。各盆地的油砂资源特征见表 1-3。与国外油砂资源相比,中国油砂资源较丰富,但其具有分布范围大、层位多、厚度小、含油率低的特点 (单玄龙等, 2007)。