

焦油(超重油)砂和油页岩

[联邦德国] 瓦尔特·吕尔 著

地 质 出 版 社

26119

焦油(超重油)砂和油页岩

[联邦德国]瓦尔特·吕尔著

周明鉴 牟相欣 译

甘克文 校

地质出版社

内 容 提 要

油砂和油页岩是在未来的石油供应中具有巨大潜力的重要资源。两者的地质储量几乎相等,但其成因和地质特征则不相同,因而在开采和加工工艺上也有所差异。本书全面介绍了焦油(超重油)砂和油页岩的地质和地球化学特征,化学性质和物理性质,开采和加工的工艺原理,世界上主要的油砂和油页岩矿床,以及全世界的资源和储量。

本书可供从事油砂和油页岩研究、能源问题研究的地质、工程技术人员、经济工作者以及高等院校师生参考。

GEOLOGY OF PETROLEUM, Vol.6.

Walter Rühl

TAR (EXTRA HEAVY OIL)

SANDS AND OIL SHALES

Ferdinand Enke Publishers

Stuttgart, 1982

焦油(超重油)砂和油页岩

[联邦德国]瓦尔特·吕尔著

周明鉴 牟相欣 译

甘克文 校

责任编辑:李源清

地质出版社出版

(北京西四)

妙峰山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: 850×1168¹/₃₂印张: 6 字数: 155,000

1986年10月北京第一版·1986年10月北京第一次印刷

印数: 1—755册 定价: 1.75元

统一书号: 13038·新298

目 录

1. 引言	1
2. 焦油 (超重油) 砂	4
2.1 概况	4
2.2 地质和地球化学特征	6
2.3 化学性质和物理性质	8
2.3.1 油	8
2.3.2 岩石	14
2.4 焦油砂开采和加工的工艺原理	15
2.5 阿尔伯塔省 (加拿大) 的白垩纪油砂	17
2.5.1 油砂的历史	17
2.5.2 地质情况	20
2.5.3 土地法令和使用权	29
2.5.3.1 定义	29
2.5.3.2 法律	30
2.5.3.3 大油砂矿床中土地的使用	32
2.5.4 工业性开发: 露天采掘	33
2.5.4.1 加拿大油砂公司	34
2.5.4.2 加拿大合成原油有限公司	37
2.5.4.3 阿尔伯塔油砂财团	41
2.5.5 就地采油方法的基本工序	42
2.5.5.1 注蒸汽	44
2.5.5.2 火烧油层 (就地燃烧) 法	45
2.5.5.3 化学剂的应用	46
2.5.5.4 其它就地开采方法	47
2.5.5.5 阿尔伯塔的就地采油项目	48
2.5.5.6 试验和研究项目	51
2.5.6 地质储量和可采储量	52

2.5.6.1 地质储量	52
2.5.6.2 可采储量	53
2.5.7. 开采油砂的经济学	56
2.6 加拿大的其它重油产地	57
2.6.1 阿尔伯塔省和萨斯喀彻温省	57
2.6.2 加拿大北极地区的梅尔维尔岛	58
2.7 美国	59
2.7.1 加利福尼亚州	60
2.7.2 犹他州	63
2.7.3 美国其它各州	66
2.7.4 美国对重油开采的研究	66
2.8 奥里诺科焦油带 (委内瑞拉东部)	69
2.8.1 地质情况	69
2.8.2 各种原油的化学性质和物理性质	73
2.8.3 资源和可采储量	74
2.8.4 瓜诺科、特立尼达和其它沥青湖	75
2.9 世界其它地区的超重油砂产地和沥青露头	77
2.9.1 南非洲	77
2.9.2 欧洲 (苏联除外)	78
2.9.3 苏联	86
2.9.4 土耳其	88
2.9.5 非洲	88
2.9.6 远东	89
2.10 地下采掘法	89
3. 油页岩	97
3.1 油页岩的历史	97
3.2 地质情况	98
3.2.1 沉积和环境	98
3.2.2 油页岩的类型	100
3.3 地球化学	102
3.3.1 矿物组成	102
3.3.2 有机质转变为干酪根	103

3.3.3	干酪根的化学组成	107
3.3.4	有机质和产油率	115
3.4	油页岩和页岩油的回收	116
3.4.1	露天开采	116
3.4.2	地下开采和回收	116
3.4.2.1	概况	116
3.4.2.2	垂向型就地干馏	117
3.4.2.3	水平型就地干馏	118
3.4.3	真正用井的就地开采	119
3.4.4	页岩堆的地面干馏	120
3.5	油页岩的地面加工	120
3.6	页岩油的精炼和提炼加工	129
3.7	世界上的油页岩产地	129
3.7.1	非洲	129
3.7.2	欧洲	131
3.7.2.1	奥地利	131
3.7.2.2	保加利亚	132
3.7.2.3	德意志联邦共和国	133
3.7.2.4	法国	136
3.7.2.5	英国	136
3.7.2.6	意大利	138
3.7.2.7	南斯拉夫	139
3.7.2.8	罗马尼亚	139
3.7.2.9	西班牙	139
3.7.2.10	瑞典	139
3.7.2.11	苏联	140
3.7.3	近东	142
3.7.3.1	“以色列”	142
3.7.3.2	约旦	143
3.7.3.3	土耳其	144
3.7.4	远东和大洋洲	144
3.7.4.1	澳大利亚	144

3.7.4.2 缅甸	146
3.7.4.3 中国	146
3.7.4.4 新西兰	146
3.7.4.5 泰国	146
3.7.5 北美洲	147
3.7.5.1 美国	147
3.7.5.1.1 科罗拉多州、犹他州、怀俄明州	148
3.7.5.1.2 东部各州	151
3.7.5.1.3 加利福尼亚州	153
3.7.5.1.4 阿拉斯加州	154
3.7.5.1.5 其它各州	154
3.7.5.1.6 油页岩在美国的利用	154
3.7.5.1.7 美国的资源和可采储量	158
3.7.5.1.8 美国的油页岩研究工作	160
3.7.5.2 加拿大	160
3.7.6 南美洲	160
3.7.6.1 阿根廷	160
3.7.6.2 巴西	160
3.7.6.3 智利	162
4.环境问题	164
5.全世界的资源和可采储量	166
5.1 焦油砂和重油	166
5.2 油页岩	167
5.3 展望:世界能源前景中的焦油砂和油页岩	169
附录一、计量单位换算系数	171
二、词汇	172
参考文献	176

1. 引言

油砂和油页岩都是能源资源。从能量的观点来看，它们可以与深部储油层中的常规的石油资源相匹敌，但成因和地质特征则并不相同。由于有些油砂和油页岩出露于地表，所以很早以前人们就已熟悉它们了。加拿大阿尔伯塔北部高原上的阿萨巴斯卡（Athabasca）和委内瑞拉东部的奥里诺科（Orinoco）重油带，就是超重油产地中最著名的例子。虽然油砂受到特定的地质条件的限制，而油页岩则广泛地分布在许多种地质建造中，而且自上一个世纪以来就已作为民用能源。

毫无疑问，这些在未来的石油供应中具有巨大潜力的重要资源，在以后几十年期间将会得到大规模的工业性开发。目前未能得到开发的主要原因之一是产品的价格太低，但在1973年国际油价提高以后，情况就发生了变化。不过，它们的产量要达到能对世界能源供应发挥重大作用的水平，还需要很多年时间。这是地质工作者、工程技术人员和经济工作者在今后几十年里需要思考和解决的问题。

我参加了1951年在阿尔伯塔的埃德蒙顿召开的第一届阿萨巴斯卡油砂会议。在这次会议上，提出了有关焦油砂的科学技术状况的第一份综述，通过实验室研究和麦克默里（McMurray）北部的沥青山（Bitumount）中间试验工厂的试验，已经掌握了回收和处理焦油砂的许多方法。这次会议的文集中收入了许多给人以深刻印象的论文。这已是三十年前的事了。现在，利用焦油砂比以往任何时候都更为现实，而油页岩也已进入了能源资源的前列。这一点由在第一届和第二届重油和焦油砂国际会议上交流的220篇论文可得到证实。这两次会议是由联合国训练和调查研究所（UNIAR）、阿尔伯塔油砂技术研究管理局（AOSTRA）和

美国能源部发起，分别于1979年在埃德蒙顿和1982年在加拉加斯召开的。

本书旨在向地质工作者、化学工作者、工程技术人员和经济工作者介绍有关重油砂和油页岩的科学技术知识。它可以作为一本对学生和每个对重油砂和油页岩感兴趣而又不需要作深入研究的人的入门书。为了这一特定的目的，本书尽可能完整地列出了所需的参考文献。

书中提到的尺度、重量和容积均仅使用米制单位，未采用任何其它计量单位（如加仑、英吨、美吨、英制热量单位等等），以避免由于不同的换算系数而引起不必要的误解，如同目前存在的一些情况那样。在现在的许多出版物中，对所采用的单位往往不作解释，以致几乎不可能进行计算或甚至是粗略的估算，或者不能比较其计算结果。因此，在许多情况下就不可能对各种数字直接进行任何对比。资源量和储量的估算值实际上也只是一种估计，它们不可能比所据以算出的那些系数更为精确。

在这种情况下，作者作出错误的解释或者算错几乎是不可避免的。衷心希望读者们能注意到这一情况。

与《石油地质学》丛书的其它各卷不同，我们认为在本书中列出一个焦油砂和油页岩产地的一览表，这会有助于说明焦油砂和油页岩之类术语的界限，这些术语有时被随意地用于任何由生物界所形成的沉积物。此外，这个一览表以较好的方式说明这些资源可能在将来给世界提供烃类方面在经济上所具有的重要意义。除阿尔伯塔焦油砂和奥里诺科带的重油和超重油以外，在世界上还有其它一些地区也产焦油砂和重油。油页岩也是如此，它的种类是多种多样的，而且不只限于著名的美国绿河（Green River）页岩、巴西的伊拉蒂（Iratí）页岩和欧洲的波希多尼亚（Posidonia）页岩。

作者十分感谢各政府部门和石油公司的支持，特别是阿尔伯塔能源资源保护局（卡尔加里）、阿尔伯塔能源和自然资源部（埃德蒙顿）、联邦德国地球科学和矿物原料研究所（汉诺威）、

联合国训练和调查研究所（纽约）、西方油页岩股份有限公司（科罗拉多州大江克欣）、罗尔巴赫水泥制造厂（多特豪森）、合成原油有限公司（埃德蒙顿）、德士古石油股份有限公司（纽约），以及我的同事H. Beckmann（克劳斯塔-策勒费尔德里工大学）、G. L. Chierici（米兰）、S. M. Farouq Ali（埃德蒙顿大学）、K. Götzinger（维也纳）、C. A. Kogbe（尼日利亚的扎里亚大学）、A. A. Meyerhoff（塔尔萨）R. Rammner（法兰克福的卢奇公司）、H. H. Schmitz（汉诺威矿务局）、R. Soler（马德里）、D. H. Welte（亚琛理工大学-朱利赫核子研究中心）的支持。我还要感谢K. Bansen和F. Burgwitz（汉堡德意志德士古石油股份公司图书馆）一直为作者提供参考文献。

瓦尔特·吕尔（Walter Rühl）

1982年4月1日于

汉堡-布兰克内塞

2. 焦油(超重油)砂

2.1 概况

由于油类是各种烃类以及有机和无机化学元素的混合物,所以,各种类型的原油之间没有截然的界限。此外,通常把焦油(tar)这个词误解为煤和木头的干馏产物。然而,从成因和组成的观点来看,各种煤之间的差别很大。有些煤与油页岩有关,但焦油一词通常与油页岩没有关系,而是用作超重油的同义词。最早的发现者称这种物质为焦油或沥青(pitch或bitumen),后来把这些术语引入科学文献中。

在本书中,我们认为所有具有 $0.985-1.000\text{g/cm}^3$ 和更高比重的油,相当于API(美国石油学会)比重 $10-12^\circ$ 以下,称为“超重油”(extra heavy oil)或“焦油”(tar)。然而,由于上述的原因,即各种油类之间没有截然的界限,并且由于即使在一个储集层里,油的比重也可以从构造的底部到构造的顶部发生变化,所以我们还包括了原油比重下降到 0.934g/cm^3 (API比重为 20°)的储集层的一些例子。在厚度大、下伏为底水的均质或不均质的储集层里,油水接触面上的原油的比重可能较高,并向储集层的顶部逐渐下降。在这样一些情况下,油内的轻质组分逐渐地或分阶段地被进入原始含油带的循环底水所溶解,并留下古油水接触面,这可由储集层岩石的不同矿物学特征来说明[例如,叙利亚东北部苏威迪(Soudie)油田的晚白垩世块状石灰岩],并由含油带体积的缩小所形成。

更具特性的是油的粘度,因为在储集层的比较高的压力和温度的条件下,粘度比油的比重更为灵敏。如图3所示,比重与粘

度之间没有直接的联系，在许多情况下可以看到重叠现象。犹他州沥青岭（Asphalt Ridge）的油在储集层条件下比重为 0.973g/cm^3 ，粘度为 1.10^6cP 。这种油称为焦油。林契峡谷（Lynch Canyon）的油是重油；在储集层中其比重为 $0.993—1.007\text{g/cm}^3$ ，而粘度为 9000cP 。

如果一种原油在储集层条件下的比重大于 1.000g/cm^3 （API比重小于 10° ）而粘度在 $10,000\text{cP}$ 以上，应该称为焦油或超重油。在所有其它情况下，脱气后粘度为 $10—10,000\text{cP}$ 的油应该称为重油。

其理由是从可采性的观点来看，除了粘度以外，比重不是主要因素。可是，另一方面，从表示油的化学组成特征来说，比重比粘度好，而且比重是确定油价的主要依据。

粘度与比重的关系可以按下列方式排列（举例）：

比 重 (g/cm^3)	$^\circ\text{API}$	粘 度 (cP)
0.986	12.0	10,000—20,000
0.995	10.7	20,000—40,000
1.000	10.0	40,000—70,000
1.010	8.6	70,000—200,000
1.020	7.2	300,000—1,000,000

在加拿大西部的各种“超重油”中，可以见到在重油和超重油（称做高粘度油和超高粘度油较好）类中有多么大的差别。洛伊德明斯特（Lloydminster）地区重油的粘度是普通油的粘度的300倍。皮斯河（Peace River）和冷湖（Cold Lake）油的粘度是洛伊德明斯特油的粘度的1000倍，阿萨巴斯卡油的粘度是皮斯河和冷湖油的粘度的10倍。

2.2 地质和地球化学特征

石沥青和其它粘着的、固结的或坚硬的沥青不是本书的专门研究对象。然而，可以利用它们的分析特征和地球化学特性来阐明原油的变化途径。

据Jacob (1961, 1967, 1976)，按以下各组固结沥青：

- 沥青岩（地沥青，硬沥青，辉沥青，脆沥青）
- 焦沥青（弹性沥青，韧沥青，黑沥青）
- 浅成的、中间的和深成的泻利盐

所作的光学分析，可以阐明它们相互之间的关系，以及阐明由于热成熟作用、生物降解作用、氧化作用和运移所造成的从原油到石墨的变化过程。

开始时 R_z （546nm时的油浸平均反射率）为0.001—0.2%，与900℃下100%的挥发分含量（waf）相当；它们在 R_z 为0.5%，挥发分约55—60%的情况下合成为脆沥青，相当于褐煤阶段；继续经过浅成的、中间的和深成的泻利盐，到 R_z 为5.0%，挥发分为零值时成为石墨（Cornelius, 1982）。

Cornelius把这个顺序与同位素地球化学和H/C关系研究成果结合起来，作为地下重油产地的地球化学勘探方法。富 CO_2 的气体、碘含量高的低含盐度地层水的存在，是表层样品的这种标志。在成岩作用之前，煤矿床中可能含有大量的异地生成的沥青，成为生成煤以及石油的生物质。

Holmgren等（1975）、Demaison（1977）和其他一些人已经证明，在焦油砂与特大油田之间存在着相互依存的关系；如果考虑到它们的成因，就不会对此感到吃惊：

- 这两种类型都需要有大型沉积盆地和（或）厚的生油层，并与远距离延伸的输导砂岩层相连；
- 广泛分布具有最低渗透性和高毛细管压力特性的区域性海相页岩覆盖层，以制止油从砂岩中逸出；

- 一个近乎无起伏的均斜构造，沿倾斜上方为地层会聚，或为构造圈闭或逆断层圈闭；

- 这两种类型在地质上都被归于年轻的储集层。92%的焦油砂产于白垩系和第三系中，78%的巨型储油层产在早侏罗世以后的岩层中。

如引言中所述，在沥青砂、巨型油田、一般的石油圈闭等产状之间是没有界限的，但所有天然矿床的特点是具有各种类型的过渡和相互联系。这对于固体岩石、混合层，以及对于在孔隙中的流体都是适用的。假如采用不同的术语，则焦油（超重油）砂就必须具有某些不同的特性，然而，

- 焦油砂主要是高孔隙性和强渗透性的。它们的原生水含量和水的含盐量低于常规的深部储油层。它们沉积在古三角洲、河流或近海环境之中；

- 焦油砂矿床通常产出在地表附近，但也可以产在3000m深处甚至更深处。

因此可以得出下列结论，即焦油砂的成因可能是双重的：

焦油的生油层与深部储油层中的常规油属相同的类型。烃类在压力、浓度和重力梯度影响下向上运移。运移的通道是渗透带、裂隙、孔隙系统等，与它们的倾角无关。如果运移是沿着稳定的前寒武系或古老地块发生，或距它们不远，伴生的古生代岩层限定了大型沉积盆地，并且从古生代以来显然没有发生过褶皱，则烃类继续运移，直到它们被海侵层封住，或被静水压力低圈闭，或在极端情况下运移到地球表面。在这些情况下，运移的距离多半要比在年轻的褶皱的、构造变形的沉积区和油田构造中长得多。在某些情况下通道长达50—400km。

在运移过程中，烃类受到各种物理因素和化学因素，例如压力、孔隙水的化学组成、烃类的溶解度、氧化作用等的变化的影响，产生如下的反应：

- 气态的和轻的组分分别从液体里蒸发和（或）运移。如果可能的话，它们聚集到储气层或气顶中，甚至聚集在盆地深部

(阿尔伯塔盆地东北翼深部)；

- 气态的和轻的组分被溶解在孔隙水中，它们的体积取决于静水压力 and 水的含盐度；

- 在深度浅的地方，孔隙水或空气中所含的氧气氧化烃类，于是形成富氧的芳族沥青组分分子，它们具有高的分子量和高的粘度；

- 厌氧细菌首先破坏轻的烷烃并使它们降解，留下较重的组分并使树脂和沥青质富集。同一时间，溶解在孔隙水中的硫酸盐被分解，生成硫化氢和二氧化碳；

- 在破裂的碳酸盐岩储集层中，淡水冲洗起着决定性的作用。在具有年轻褶皱的地区，这种作用特别重要，而且可能是解释西西里岛三叠纪白云岩中重油和超重油深达3000m的理由之一。

不论从生油层到最后聚集的运移距离是长还是短，都决定于当地的地质条件。虽然许多科学家倾向于设想阿萨巴斯卡那样的焦油砂是远距离运移的，但是另外一些科学家则用短距离运移或者甚至原地成因来证明是否是早期成岩作用因素赋予油的特性的。这对于阿萨巴斯卡也可能是适用的，对那里的木质物质和腐泥物质的同位素地球化学和原子组成已作过研究 (Cornelius, 1982)。

2.3 化学性质和物理性质

2.3.1 油

简要介绍Tissot和Welte (1978) (还可参见Neumann等, 1982) 原油分类中的重油和超重油也许是可取的。

这些油通常属于芳族环烷类或芳族沥青类原油。由于石蜡族烷烃的生物化学降解作用，树脂 (分子量700—1000) 和沥青质 (分子量2000—8000) 在变化过程中富集，从石蜡油中的 5—

10%增加到沥青油中的30—60%，并且芳族化合物含量从10—20%增加到40—70%。硫含量只有在芳基中高达10%，而在石蜡基中大约残留1%。Van Krevelen图解表明了这些原理（图1）。

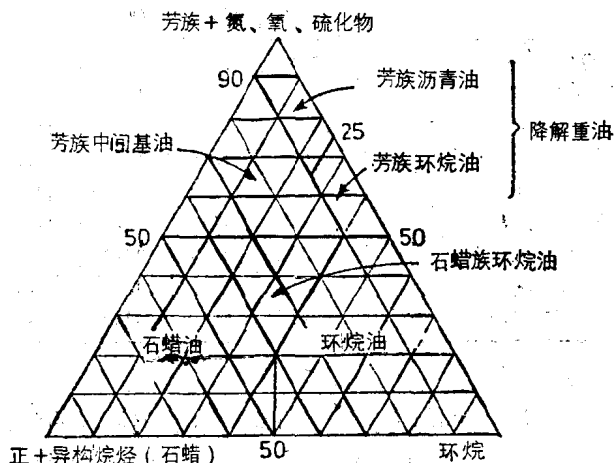


图1 原油分类成分图

(据Tissot和Welte, 1978; Yen, 1982)

Colombo和Sironi (1959) 研究了采自西西里岛北部特兰提诺的迪纳拉带 (Dinarides) 的大约70个重油和沥青样品，并且发现：

重油（比重约为 $0.9-1.0\text{g/cm}^3$ ）中含有60—96%的“油质”成分，而沥青中含“油质”成分为15—66%。树脂含量在沥青中（13—61%）比在重油中（4—22%）为高，沥青中沥青质的含量（11—42%）也比在重油中（1—19%）高很多。连同其它指标，例如Ni/V比率，可以推断所有这些油和沥青都具有相同的成因。

表1表示来自不同国家的超重油中沥青质和树脂的含量。

随着比重的增加，沥青质含量增加，树脂和“油质”含量减少。苏联200个油藏的重油的比重介于 0.95 和 1.1g/cm^3 之间，含5—35%的沥青质，12—60%的树脂和20—70%的油质成分，还有10—12%的硫，3—8%的氮和高达9.7%的氧 (Khalimov

表 1 重油和超重油的特征
(据Speight和Moschopedis, 1981)

	比 重 (g/cm ³)	硫 (重量%)	沥青质 (%)	树 脂 (%)	“油质” (%)
卡亚拉(Quayarah)	0.964	8.4	20.4	36.1	43.5
洛伊德明斯特	0.966	4.3	12.9	38.4	48.7
博斯坎(Boscan)	0.998	5.6	11.9	24.1	64.0
冷 湖	0.999	4.4	15.7	28.7	55.6
纳沙特尔(Neuchatel)	1.016	—	19.9	32.2	42.2
阿萨巴斯卡	1.030	4.9	16.9	34.1	49.0
贝尔穆德斯(Bermudez)	1.058	4.0	35.3	14.4	39.6
特立尼达(Trinidad)	1.070	6.2	33.3	29.4	31.9
塞莱尼察(Selenizza)	1.080	6.9	45.2	18.8	24.5

等, 1981)。

阿尔伯塔沥青的组分列于表 2 和表 3。脱沥青的沥青叫做软沥青(maltene或petrolene)。其75—85%为阿尔伯塔焦油, 可溶于戊烷、己烷和庚烷中。

表 2 阿尔伯塔各产地重油之间的差别(重量%)

	冷 湖	阿萨巴斯卡	皮 斯 河	瓦巴斯卡
沥 青 质	15.3	16.9	19.8	18.6
软 沥 青	84.0	83.1	80.0	81.2

表 3 阿尔伯塔和瓜诺科沥青的元素组成(重量%)

(据Strausz, 1977; Baha Al-Deen, 1977)

	C	H	N	O	S	分子量
沥 青 质	80.0—81.3	7.4—8.2	1.0—1.7	1.0—4.0	5.5—8.8	3500—8100
软 沥 青	80.1—84.4	9.2—11.0	0.8—1.0	1.0—5.4	3.9—5.4	430—520

来自阿尔伯塔、美国、委内瑞拉和西西里岛的超重油的元素组成列入表 4。