



● 韩放 主编

抚顺油页岩 工业技术及应用

Fushun Oil Shale Industry Technology
and Application



辽宁科学技术出版社

LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

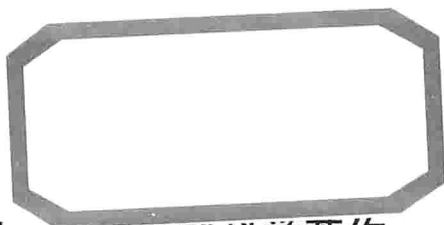


石油工业出版社

抚顺油页岩 工业技术及应用

抚顺石油工业股份有限公司
抚顺石油工业股份有限公司

石油工业出版社



辽宁省优秀自然科学著作

抚顺油页岩工业技术及应用

韩放 主编

辽宁科学技术出版社

沈 阳

主 编：韩 放

副主编：鲍明福 何红梅

编 委：星大松 许 辉 肖立光 王 阳 高 健

© 2014 韩 放

图书在版编目 (CIP) 数据

抚顺油页岩工业技术及应用 / 韩放主编. —沈阳：辽宁科学技术出版社，2014.6

(辽宁省优秀自然科学著作)

ISBN 978-7-5381-8645-1

I. ①抚… II. ①韩… III. ①油页岩—工业技术—抚顺市 IV. ①TE662

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 102727 号

出版发行：辽宁科学技术出版社

(地址：沈阳市和平区十一纬路 29 号 邮编：110003)

印 刷 者：沈阳新华印刷厂

经 销 者：各地新华书店

幅面尺寸：185mm × 260mm

印 张：12.5

字 数：260 千字

印 数：1 ~ 1000

出版时间：2014 年 6 月第 1 版

印刷时间：2014 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑：李伟民

特邀编辑：王奉安

封面设计：嵘 嵘

责任校对：栗 勇

书 号：ISBN 978-7-5381-8645-1

定 价：36.00 元

联系电话：024-23284360

邮购热线：024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

《辽宁省优秀自然科学著作》评审委员会

主 任:

康 捷 辽宁省科学技术协会党组书记、副主席

执行副主任:

黄其励 东北电网有限公司名誉总工程师

中国工程院院士

辽宁省科学技术协会副主席

副主任:

金太元 辽宁省科学技术协会副主席

宋纯智 辽宁科学技术出版社社长兼总编辑 编审

委 员:

郭永新 辽宁大学副校长

陈宝智 东北大学安全工程研究所所长

刘文民 大连船舶重工集团有限公司副总工程师

李天来 沈阳农业大学副校长

刘明国 沈阳农业大学林学院院长

邢兆凯 辽宁省林业科学研究院院长

辽宁省科学技术协会委员

吴春福 沈阳药科大学校长

辽宁省科学技术协会常委

张 兰 辽宁中医药大学附属医院副院长

王恩华 中国医科大学基础医学院副院长

李伟民 辽宁科学技术出版社总编室主任 编审

前 言

油页岩是一种非常规油气资源，储量丰富，具有一定的开发利用价值。经过干馏等加工处理，可以得到碳氢比类似天然石油的页岩油和大量瓦斯，也可以作为燃料产汽、发电。干馏后的废渣可用于提取化工产品，生产水泥、烧结砖、陶粒等建筑材料，也可以作为改良土壤的复合肥料。

本书较系统地阐述了先进的油页岩干馏炼油工艺和技术，介绍了抚顺油页岩工业生产发展的历程；以抚顺干馏工艺为主线，对抚顺式干馏技术、改造后节能减排新型技术、环保技术、安全技术、干馏设备、生产过程检验方法、页岩油的利用以及特殊情况的生产操作方法进行重点叙述。依据多年的生产操作和管理经验积累，对干馏生产过程中主要影响原油生产的故障类型及各类生产安全事故进行了系统的分析，对油页岩行业的发展具有一定的指导和借鉴意义。本书可作为油页岩干馏技术研究工程人员的参考书和工具书，也可用作油页岩干馏生产企业运行管理人员的指导用书。

主编

2014年3月

目 录

第1篇 油页岩资源概述

1 油页岩概述002

1.1 油页岩定义002

1.2 油页岩的组成与结构002

1.3 油页岩的物理性质003

2 世界油页岩的储量及分布009

3 我国油页岩的储量及分布011

3.1 区域分布011

3.2 盆地分布011

3.3 层系分布012

3.4 资源品位分布012

3.5 深度分布013

3.6 勘探程度013

第2篇 油页岩干馏技术概况

4 地上干馏技术017

4.1 固体热载体干馏技术017

4.2 气体热载体干馏技术020

5 地下干馏技术025

5.1 地下干馏025

5.2 工艺简介025

第3篇 抚顺油页岩干馏技术

6 抚顺油页岩干馏生产工艺及应用031

6.1 原矿处理工艺031

6.2 抚顺干馏工艺034

6.3 主要干馏设备038

6.4 国内页岩油工艺技术应用046

7 抚顺油页岩干馏工艺的生产操作051

7.1 干馏装置建成后第一次点火开汽操作051

7.2 干馏装置停产检修期间的开、关汽操作053

7.3 干馏装置运休操作055

7.4 干馏装置排渣系统故障操作055

7.5 送风机故障紧急处理措施056

7.6 瓦斯排送机故障紧急处理措施057

7.7 原油装置突然大停电紧急处理措施057

7.8 干馏装置针对湿碎页岩的操作058

7.9 单炉开、关汽操作060

7.10 加热炉操作061

7.11 加热炉故障判断及处理061

7.12 制约生产的主要影响因素064

8 抚顺油页岩炼油厂能耗指标067

8.1 原料单耗067

8.2 吨油电耗067

8.3 吨油水耗067

8.4 采油效率068

8.5 资源利用率068

9 抚顺油页岩生产过程的化验分析及方法069

9.1 油页岩采样069

9.2 油页岩化验分析069

9.3 页岩油化验分析072

9.4 干馏气体化验分析073

10 抚顺油页岩干馏生产环境保护技术074

10.1 原料系统除尘技术074

10.2 脱硫技术在干馏生产行业的应用078

10.3 干馏污水处理技术084

10.4 噪声防治技术092

10.5 油泥的处理096

11 抚顺油页岩干馏生产安全管理及安全技术101

11.1 干馏生产安全技术101

11.2 生产安全管理103

12 抚顺式干馏工艺应用条件105

12.1 油页岩性质及矿区储量情况105

12.2 干馏炉及回收工艺的确立107

12.3 厂区主要功能构成108

12.4 厂区布置114

12.5 生产能耗指标115

12.6 环保要求116

12.7 职业卫生要求117

12.8 消防要求119

13 ATP干馏技术120

13.1 ATP技术简介120

13.2 ATP处理器120

13.3 工艺流程122

13.4 工艺操作123

13.5 主要系统124

13.6 主要设备126

13.7 ATP工艺平衡因数130

13.8 ATP工艺主要运行变量132

13.9 ATP工艺主要安全设施132

第4篇 油页岩干馏技术研发

14 油页岩干馏技术的研发与应用137

14.1 国家能源页岩油研发中心的建立137

14.2 国家能源页岩油研发中心建设情况137

14.3	研发成果	151
15	油页岩干馏技术发展趋势	156
15.1	提高资源利用率	156
15.2	提高单炉处理量	157
15.3	提高干馏炉采油率	158
15.4	采用新型高效加热炉供热	158
15.5	采用高效油水分离设备	159
15.6	开发干馏产物中轻质油的高效回收技术	161
15.7	合理利用回收系统能量	162
15.8	干馏装置实现自动化	162
15.9	开发干馏工艺的高效环保技术	163

第5篇 油页岩循环经济产业

16	油页岩综合利用	167
16.1	油页岩废渣的用途	167
16.2	油泥的主要用途	168
16.3	瓦斯发电	169
16.4	余热利用	169
17	页岩油深加工	170
17.1	页岩油成分及组成	170
17.2	页岩油用作燃料油	171
17.3	页岩油生产化工产品	171
17.4	页岩油生产喷雾炭黑	175

第6篇 油页岩产业发展现状

18	国外油页岩产业发展现状	181
18.1	美国油页岩产业发展现状	181
18.2	爱沙尼亚油页岩产业发展现状	181
18.3	巴西油页岩产业发展现状	182
18.4	澳大利亚油页岩产业发展现状	182
18.5	德国油页岩产业发展现状	182

18.6 约旦油页岩产业发展现状183

19 我国油页岩产业发展现状184

19.1 抚顺矿业集团有限责任公司油页岩产业发展现状184

19.2 龙口矿业集团有限责任公司油页岩产业发展现状184

19.3 甘肃窑街煤电集团公司油页岩产业发展现状185

19.4 辽宁成大集团公司油页岩产业发展现状185

19.5 汪清县龙腾能源开发公司油页岩产业发展现状185

19.6 北票北塔油页岩综合利用有限公司油页岩产业发展现状185

参考文献186

第 1 篇 油页岩资源概述

1 油页岩概述

油页岩 (Oil Shale) 是可燃性矿物的一种, 属于非常规油气资源, 以资源丰富和开发利用的可行性而被列为 21 世纪非常重要的接替能源, 它与石油、天然气、煤一样都是不可再生的化石能源。

1.1 油页岩定义

油页岩又称油母页岩。联合国 1980 年召开有 11 个国家专家参加的油页岩和油沙小组会议对油页岩的定义为: 油页岩是一种沉积岩, 含固体有机物质于其矿物质的骨架内。其有机物质主要为油母质, 不溶于一般有机溶剂。油页岩加热至 500 ℃ 左右, 其油母质热解生成页岩油, 油页岩热解通常也称为干馏。页岩油与石油近似, 但不相同。

1.2 油页岩的组成与结构

油页岩是由有机物质分布于无机矿物质的骨架内所组成, 其无机矿物质的含量占大多数, 而有机物质的含量通常只占油页岩质量的 10%~25%, 一般不超过 35%。有机物质主要是油母质 (亦称油母), 还有少量的可溶沥青, 一般不超过油页岩质量的 1%。油页岩是一种固体化石燃料, 作为一种能源, 油页岩在隔绝空气的情况下加热至 450~520 ℃ 时, 油母质热解生成页岩油、页岩半焦和干馏气。页岩油可作为液体燃料加以利用, 油页岩亦可直接燃烧, 产生蒸汽发电。

1.2.1 矿物质

油页岩矿物质的组成比较复杂, 通常包括黏土类矿物 (高岭石、蒙脱石、依利石)、碳酸盐类矿物 (白云石、方解石)、石英、黄铁矿等。

油页岩在高温下燃烧时, 其矿物质会发生一系列的化学变化, 如黏土类矿物质和石膏失去结晶水, 碳酸盐类分解放出二氧化碳, 氧化亚铁生成氧化铁, 黄铁矿氧化形成氧化铁和二氧化硫等。因此油页岩在高温下燃烧时, 其有机质油母等被烧掉的同时, 其矿物质转化成为灰分, 矿物质的含量与灰分生成量是不相等的, 且其组成与灰分的组成也是不同的。

1.2.2 油母质

油母质依外观称为油母沥青, 存在于沉积岩 (尤其是页岩) 之中, 由有机物经过复

杂的化石化作用所形成的物质，经蒸馏后可形成类似石油的油品。

油母质是固态、蜡状的有机物质。它是动植物遗骸（通常是藻类或木质植物）在地下深部被细菌分解，除去糖类、脂肪酸及氨基酸后残留下的不溶于有机溶剂的高分子聚合物，除了含有碳、氢、氧之外，也含有氮和硫的化合物。

油母质是一种聚合物：抚顺和茂名油页岩在355~400℃温度范围内用甲苯在超临界状态下，分别在不同温度下抽提所得的多种抽出物——沥青，其元素分析、红外光谱、气相色谱组成分析、氢核磁共振波谱分析的结果都十分近似。其H/C原子比和红外光谱，又与油母质的相近似，这表明了抚顺和茂名油页岩的油母质主要成分是聚合物，而超临界抽提所得的抽出物乃是油母质解聚所得的单体——沥青。因此，对抽出物解聚沥青的组成和性质的研究也就反映了其母体——油母质的组成和性质。

1.2.3 沥青

油页岩的有机质包括不溶于一般有机溶剂的油母质，还有一些可溶于一般有机溶剂的沥青，亦称可溶沥青，乃是将油页岩用有机溶剂在常压下用索氏抽提器抽提出可溶沥青。通常，可溶沥青的量很少，只占不到油页岩量的1%。

1.3 油页岩的物理性质

油页岩的物理性质，对油页岩的开采、破碎及其热加工等均有直接的影响。油页岩的性质主要决定于其原始生成物的种类和环境，即其有机质和矿物质的含量和组成。油页岩自矿区开采出来后，在露天储存的情况下，其性质也可能会有所变化。

1.3.1 外观与颜色

油页岩一般都无光泽。绝大部分的油页岩呈现出不同程度的片理状，当受打击时，会按片理的方向，裂成几片。茂名油页岩呈明显的片理状，热加工时很易崩碎，抚顺油页岩也呈片理状，但不明显。

油页岩的颜色可以从灰色、黄色、褐色至黑色，各地油页岩的颜色有所不同，抚顺及农安等地油页岩呈淡褐色至深褐色，茂名油页岩的颜色从灰白色至黄褐色，甘肃窑街油页岩呈黑色，美国绿河油页岩呈灰色至褐色，爱沙尼亚油页岩呈浅黄色。油页岩的颜色主要决定于其中有机质的颜色，但有时油页岩中的无机物质，例如黄铁矿也影响其颜色。黑色油页岩常含有煤质碎粒，少部分抚顺油页岩有此种情况。

同一矿区油页岩的颜色会随其分布及埋深不同而稍有差异。同一产地的油页岩，含油率高的往往颜色较深，例如抚顺油页岩深褐色的含油率最高，暗褐色次之，而浅褐色的最低，因此，有时可根据颜色来初步判定同一矿区油页岩含油率的变化情况。新开采出来的油页岩，其颜色往往较深，贮存久后，颜色会逐渐变浅，例如抚顺油页岩露天贮存1个月，就由暗褐色变为灰白色，这是由于贮存过程中，失去了吸附的水分并受到氧

化作用的结果。

1.3.2 相对密度

油页岩的相对密度主要取决于其矿物质的含量和组成。这是因为油母质的相对密度变化很小，一般略大于1，而矿物质总的相对密度变化较大，可在2.3~2.8范围内变化（长石和石英的相对密度为2.6，硫铁矿高达5.0）。油页岩的相对密度大体上都在2左右，各国油页岩的相对密度见表1-1。

表 1-1 几种油页岩的相对密度

油页岩产地	中国抚顺	中国茂名	中国桦甸	美国绿河	爱沙尼亚	巴西伊拉提	德国道顿豪逊
相对密度	1.9~2.2	2.1~2.4	1.6~2.1	1.8~2.1	1.7~2.1	2.3	2.2

同一产地油页岩相对密度越小，其含油率越高。

值得注意的是，以上讨论的是油页岩的相对密度，关于其堆积密度则要低得多，可能甚至小于1，视油页岩的块径分布和堆积情况而定。

1.3.3 硬度和强度

油页岩的硬度和强度，除在开采和破碎时直接影响动力和机械消耗外，还和其在破碎时的颗粒和粉末页岩的产生率有较大的关系。此外，块状油页岩在立式干馏炉内加热时，如其热强度过小，则易在炉内破碎成小块，甚至生成粉末，增加炉内的热气体流动的阻力，造成气体在炉内的分配不匀，影响干馏炉的正常运转，并且使得部分的油页岩干馏不完全，影响油收率。

油页岩的硬度和强度，一般取决于其所含矿物质的性质和油页岩形成时的地质条件。油页岩的片理性对强度有很大影响。通常油页岩生成年代古老的硬度较大，但生成年代相同的油页岩，其硬度和强度也有很大的变化。抚顺油页岩的硬度和强度较大，其次为澳大利亚伦特尔、巴西伊拉提、美国绿河油页岩。茂名油页岩的硬度和热强度较差，在炉内干馏时崩碎较多。爱沙尼亚库克瑟特油页岩含碳酸盐类矿物多，在锅炉内燃烧时，因碳酸盐分解生成粉末多，导致烟气含尘多。抚顺茂名油页岩的硬度和强度见表1-2，其热强度见表1-3，美国绿河油页岩的抗剪和抗压强度见表1-4。

表 1-2 抚顺和茂名油页岩的硬度和强度

油页岩产地	肖氏硬度		耐压强度/MPa	自由落下强度，方筛筛分结果/(%) [*]				
	顺层向	逆层向		<10mm	10~30mm	30~50mm	50~100mm	>100mm
抚顺（硬）	33.3	36.0	61.2	0.8	8.1	10.2	21.1	59.8
抚顺	28.0	34.7	47.5	2.5	16.7	12.6	27.9	40.3
抚顺（松碎）	29.3	41.3	55.4	3.2	25.8	17.2	33.9	19.9
茂名	14.0	20.0	32.6	2.3	7.1	5.3	21.3	64.0

*：试料块径：茂名油页岩的长和宽均为100~200 mm，厚为30~60 mm；抚顺油页岩的长和宽均为100~200 mm。试样由在2 m高的标准试验机上连续自由落4次后的筛分组成。

表 1-3 抚顺和茂名油页岩热强度 %

油页岩产地	原油页岩强度（常温） >25 mm	半焦热强度*（油页岩加热 至 550 ℃）>25 mm	油页岩灰热强度*（油页岩加 热至 900 ℃）>25 mm
抚顺	82.5	79.7	41.7
抚顺（松碎）	80.3	43.8	40.8
茂名	95.5	16.7	21.6

*：块状油页岩置于高温马弗炉中加热至干馏温度 550 ℃或汽化温度 900 ℃，并在该温度下恒温 2h，冷却至室温，然后在 2 m 高的标准落下试验机上自由落下，将 4 次落下后的油页岩半焦或油页岩灰用方筛进行筛分实验，以 >25 mm 的筛上半焦或灰的质量对原油页岩质量的百分数作为热强度的指标。

表 1-4 美国绿河油页岩抗剪和抗压强度 MPa

产地	抗剪强度		抗压强度		油页岩加热至 510 ℃的抗 压强度		油页岩加热至 616 ℃的抗 压强度	
	顺层向	逆层向	顺层向	逆层向	顺层向	逆层向	顺层向	逆层向
绿河	6.0 ~ 12.0	21.4 ~ 31.5	130.8	129.4	2.7	2.9	1.1	1.2

如上所述，油页岩的强度和热强度是其重要的指标，这牵涉到其在干馏炉内加工的性能问题。至于油页岩热加工时的黏结性问题，除了爱沙尼亚库克瑟特油页岩（热解产油率高达 20%）油母质分解时容易黏结以外，世界上绝大多数油页岩在正常的热加工情况下都没有黏结问题。

1.3.4 比热容

油页岩在干馏炉内热加工时，所需的热量及干馏时间等与比热容有很大的关系。不同的油页岩由于其矿物质和有机质的含量和组成的不同，故其比热容也不同。同一产地的油页岩，通常其含油率高的比热容也高。同样的油页岩在不同温度时的比热容也不相同。油页岩的比热容可以由差示扫描量热仪（DSC）测得。抚顺、茂名和美国绿河油页岩在不同温度范围内测得的平均比热容见表 1-5。

表 1-5 抚顺、茂名和绿河油页岩在不同温度范围测得的平均比热容

抚顺油页岩		茂名油页岩		绿河油页岩	
温度范围/℃	平均比热容 (kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	温度范围/℃	平均比热容 (kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	温度范围/℃	平均比热容 (kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
20 ~ 200	0.976	20 ~ 200	0.980	25 ~ 66	1.050
20 ~ 300	1.043	20 ~ 300	1.009	25 ~ 93	1.068
20 ~ 400	1.118	20 ~ 376	1.076	25 ~ 121	1.126
20 ~ 500	1.026	20 ~ 400	1.063	25 ~ 149	1.143
20 ~ 600	0.967	20 ~ 500	1.030	25 ~ 177	1.171
20 ~ 700	0.942	20 ~ 600	1.009	25 ~ 204	1.181
20 ~ 800	0.942	20 ~ 700	0.997	25 ~ 232	1.231

续表

抚顺油页岩		茂名油页岩		绿河油页岩	
温度范围/℃	平均比热容 (kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	温度范围/℃	平均比热容 (kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	温度范围/℃	平均比热容 (kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
20 ~ 900	0.963	20 ~ 800	0.997		
20 ~ 1 000	1.005	20 ~ 900	1.009		
		20 ~ 1 000	1.030		

通过对抚顺、茂名、龙口、约旦拉琼、爱沙尼亚库克瑟特油页岩在不同温度时的比热容统计可知，油页岩油母质的比热容较油页岩为大。

1.3.5 热膨胀

油页岩的热膨胀与其强度、热崩碎有很大的关系。中国石油大学利用热机械性质仪对多种油页岩热膨胀率的研究表明：①干燥处理过不含表面水的油页岩，其膨胀率随温度的增加而升高，且两者呈线性关系，抚顺、茂名油页岩从常温加热至300℃时，其长度较原始长度增加0.3%（即膨胀率），龙口和约旦拉琼油页岩膨胀率约1%，桦甸油页岩膨胀率达6%。②未经干燥处理、暴露于大气、含表面水不超过5%的油页岩的热膨胀有两种类型：龙口、茂名和拉琼油页岩在温度升高过程中（至300℃以前）其膨胀率出现峰值，分别约为0.5%、0.2%和0.5%；桦甸、抚顺油页岩的热膨胀率则随温度升高呈线性关系而增加，抚顺油页岩升温至300℃的膨胀率约0.3%；③某些高含水的油页岩在加热干燥脱水的阶段会发生剧烈的膨胀，发生崩碎；试验表明，含水14%的茂名油页岩在10℃/min的加热速度下，开始时收缩，但到180~220℃阶段，其热膨胀曲线出现了突跳，发生了剧烈的膨胀，并导致崩碎，而过了干燥脱水阶段，又继续收缩。

1.3.6 导热性能

在油页岩的干馏过程中，其导热性能是影响传热及热解时间的重要因素。中国石油大学与南京工学院研制了导热系数测定仪。表1-6给出了抚顺、茂名、约旦拉琼、爱沙尼亚库克瑟特油页岩在不同温度下的导热系数，表中还列入了美国绿河油页岩的导热系数。此外，根据差示扫描量热仪（DSC）测得的抚顺油页岩在不同温度的比热容 c_p 及已知抚顺油页岩的密度（ $\rho=2.01\text{ g/cm}^3$ ）计算出抚顺油页岩的热扩散系数（ $a=\lambda/\rho c_p$ ）。表1-7为抚顺和绿河油页岩的热扩散系数。

表 1-6 抚顺、茂名、拉琼、库克瑟特及绿河油页岩在不同温度时的导热系数

导热系数 (λ) / (w·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	100℃	150℃	200℃	400℃
抚顺油页岩	0.96	0.94	1.00	—
茂名油页岩	0.95	0.94	0.95	—
拉琼油页岩	0.75	0.76	0.85	—
库克瑟特油页岩	—	0.40	0.27	—
绿河油页岩	0.77	0.72	0.71	0.70