

# 油页岩开发利用技术及环境影响研究进展

李 硕\*, 王鑫尧#

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年7月1日; 发布日期: 2026年7月13日

## 摘 要

油页岩是一种富含有机质的沉积岩, 作为重要的非常规能源资源, 其储量丰富且分布广泛, 在全球能源供应体系中具有重要战略地位。随着传统石油资源逐渐减少以及能源需求持续增长, 油页岩开发利用受到越来越多国家的关注。文章系统综述了油页岩资源特征、勘探开发技术、热解转化机理、经济性评价以及环境影响等方面的研究进展。重点分析了油页岩形成条件、孔隙结构演化规律及有机质特征, 阐述了地面干馏和原位转化等主要开发技术的发展现状及适用条件, 总结了温度、升温速率、停留时间和颗粒粒径等因素对热解产物分布的影响机制。同时, 对油页岩开发过程中可能引发的地下水污染、大气污染及固体废弃物问题进行了讨论, 并归纳了相应的环境治理措施。最后, 对油页岩资源高效清洁开发的发展方向进行了展望, 以期油页岩资源的合理开发和综合利用提供参考。

## 关键词

油页岩, 页岩油, 热解技术, 原位转化, 环境影响, 资源利用

# Research Progress on Oil Shale Development and Utilization Technology and Its Environmental Impact

Shuo Li\*, Xinyao Wang#

School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: June 3, 2026; accepted: July 1, 2026; published: July 13, 2026

## Abstract

Oil shale, a sedimentary rock rich in organic matter, holds a significant strategic position in the global

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李硕, 王鑫尧. 油页岩开发利用技术及环境影响研究进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 954-959.

DOI: 10.12677/me.2026.144095

energy supply system as an important unconventional energy resource due to its abundant reserves and widespread distribution. With the gradual depletion of traditional petroleum resources and the continuous growth of energy demand, the development and utilization of oil shale have garnered increasing attention from numerous countries. This paper systematically reviews the research progress in various aspects, such as the characteristics of oil shale resources, exploration and development technologies, pyrolysis conversion mechanisms, economic evaluations, and environmental impacts. It focuses on analyzing the formation conditions of oil shale, the evolution laws of pore structure, and the characteristics of organic matter. It also elaborates on the current development status and applicable conditions of major development technologies such as surface retorting and in-situ conversion. Furthermore, it summarizes the influence mechanisms of factors such as temperature, heating rate, residence time, and particle size on the distribution of pyrolysis products. Simultaneously, it discusses potential issues such as groundwater pollution, atmospheric pollution, and solid waste that may arise during the development of oil shale, and summarizes corresponding environmental control measures. Lastly, it provides an outlook on the development direction of efficient and clean exploitation of oil shale resources, aiming to offer references for the rational development and comprehensive utilization of oil shale resources.

## Keywords

Oil Shale, Shale Oil, Pyrolysis Technology, *In-Situ* Conversion, Environmental Impact, Resource Utilization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着全球经济持续发展和能源消费不断增长, 传统石油资源面临储量下降、开采难度增加以及开发成本不断提高等问题, 促使各国加快非常规能源资源的开发利用。油页岩是一种富含固体有机质(干酪根)的沉积岩, 通过热解或干馏处理可转化为液态页岩油和可燃气体, 被认为是最具开发潜力的非常规能源之一[1][2]。研究表明, 全球油页岩资源折算后约相当于 6 万亿桶页岩油, 远高于目前已探明常规石油储量[2]。其中, 美国、中国和俄罗斯等国家拥有丰富的油页岩资源储备[3], 为未来能源供给提供了重要保障。

近年来, 随着热解技术、原位转化技术以及环境治理技术的发展, 油页岩开发利用水平不断提高。然而, 由于油页岩资源具有品位低、开采成本高和环境影响显著等特点, 其大规模商业化开发仍面临诸多挑战。因此, 系统总结油页岩开发利用技术及环境影响研究进展, 对于推动油页岩资源高效清洁开发具有重要意义。

## 2. 油页岩资源特征及性质

油页岩是由矿物组分和有机质共同组成的细粒沉积岩, 其形成与湖泊、海洋及沼泽沉积环境密切相关。在沉积过程中, 大量藻类、浮游生物和高等植物残体不断沉积, 并在缺氧环境下得到保存, 经过长期成岩作用逐渐形成富含干酪根的油页岩矿层[4]。有机质含量、沉积环境及热成熟度共同决定了油页岩的开发价值。从资源分布来看, 全球油页岩资源十分丰富, 主要分布于美国绿河盆地、中国抚顺盆地和松辽盆地、俄罗斯及爱沙尼亚等地区。其中, 美国绿河组油页岩资源量最大, 占全球总储量的 60%以上[2]。我国油页岩资源主要集中于东北地区 and 西北地区, 具有储量丰富、埋藏较浅等特点, 具备较好的开

发前景。

油页岩内部主要由无机矿物和有机质组成。矿物组分包括石英、长石、方解石、白云石以及黏土矿物等,而有机质则主要以干酪根形式存在。根据有机质来源不同,干酪根可分为I型、II型和III型[4],其中I型干酪根富含氢元素,生油潜力最高。油页岩中有机质的组成和结构直接影响其热解行为以及页岩油产率。此外,油页岩通常具有低孔隙度和低渗透率特征。在常温条件下,孔隙主要以纳米级微孔为主,难以形成有效流体通道。但随着温度升高,干酪根发生热解反应,大量有机质分解并形成新的孔隙和裂缝,从而显著提高储层渗透性,为油气运移提供通道。这种热诱导孔隙结构演化过程是原位开发技术的重要理论基础。

### 3. 油页岩开发利用技术

油页岩开发技术主要包括地面干馏技术和原位转化技术两大类[1]。地面干馏技术发展较早,目前仍是工业化生产页岩油的主要方式。该技术首先通过露天或地下开采获得油页岩矿石,然后进行破碎、筛分和加热处理,使干酪根发生热解反应并生成页岩油和热解气。经过冷凝分离后,可获得液态页岩油产品。经过长期发展,地面干馏技术已形成多种成熟工艺,例如 Paraho 工艺、Kiviter 工艺和 ATP 工艺等[5]。这些工艺在热效率和资源利用率方面不断优化,提高了页岩油产率 and 经济效益。然而,由于需要进行大规模采矿和废渣堆放,其环境影响较大,尤其是土地占用和固体废弃物处理问题较为突出。

为了降低地表扰动和环境风险,原位转化技术逐渐成为研究热点[6][7]。该技术通过钻井向地下油页岩层持续供热,使干酪根在原位完成热解反应,生成的油气通过生产井采出地面。与传统采矿方式相比,原位转化技术无需大规模剥离岩层,可显著减少生态破坏。目前较具代表性的原位转化技术包括 Shell ICP 技术[6]、Electrofrac 技术以及 CRUSH 技术等[6][7]。其中,Shell ICP 技术通过电加热方式持续加热地下储层,并利用冻结墙隔离地下水系统,有效降低污染风险。研究表明,原位转化技术不仅能够提高资源回收率,而且有利于开发深层油页岩资源,是未来油页岩开发的重要发展方向。

近年来,多分支水平井、压裂改造以及微波辅助热解等新技术不断出现。微波加热技术利用电磁波直接作用于油页岩内部,可实现快速均匀加热,提高热利用效率;纳米催化热解技术则通过降低热解反应活化能促进有机质裂解,提高轻质油产率。这些新技术为油页岩高效开发提供了新的思路。

### 4. 油页岩热解机理及影响因素

热解是油页岩开发利用过程中最核心的转化环节,其本质是在缺氧或无氧条件下,通过持续加热使油页岩中的干酪根发生热分解反应,最终生成页岩油、热解气以及半焦等产物[8][9]。由于油页岩中绝大部分有机质以固态干酪根形式存在,无法直接开采利用,因此热解过程决定了油页岩资源的开发效率和经济价值。近年来,随着热分析技术、光谱分析技术以及数值模拟方法的发展,研究人员对油页岩热解行为及其作用机理进行了大量研究,逐步揭示了干酪根裂解、有机质转化及产物生成演化规律。

从热解过程来看,油页岩有机质转化并非单一反应,而是一个复杂的多阶段连续反应过程。在低温阶段(通常低于 300℃),体系主要发生吸附水和结晶水脱除,同时部分轻质有机组分开始挥发,但干酪根骨架结构尚未发生明显破坏。随着温度升高至 300℃~500℃,干酪根内部较弱的脂肪链键和醚键逐渐断裂,大量液态烃和气态烃开始生成,此阶段是页岩油形成的主要阶段[9][10]。进一步升高温度后,部分生成的液态产物会发生二次裂解反应,生成更多轻质气体和芳香族化合物,同时残余有机质逐渐碳化形成半焦。当温度超过 500℃后,二次裂解和缩聚反应明显增强,页岩油产率逐渐降低,而气体和焦炭产量不断增加[8]。因此,合理控制热解温度对于提高页岩油收率具有决定性作用。

热解温度被认为是影响油页岩热解过程最关键的因素[11]。大量研究表明,随着温度升高,干酪根转

化率持续增加,页岩油产率呈现先升高后降低的变化趋势。当热解温度处于 450℃~500℃ 范围内时,通常能够获得较高的页岩油产率和较好的油品质量。温度过低会导致干酪根裂解不充分,造成资源利用率下降;而温度过高则会促进二次裂解反应,使液态产物进一步转化为甲烷、乙烷等小分子气体,从而降低页岩油收率。此外,随着热解温度升高,页岩油中轻质组分含量增加,重质组分比例下降,油品品质得到改善,但同时芳香烃含量也会增加,可能影响后续加工性能。

升温速率同样对热解过程产生重要影响。较低升温速率条件下,热量能够充分传递至颗粒内部,使干酪根均匀裂解,有利于提高液态产物收率。而较高升温速率则能够缩短热解时间,提高生产效率,但容易导致颗粒内部形成较大温度梯度,使部分区域发生过热现象,从而促进二次裂解反应。近年来快速热解技术受到广泛关注,其利用高升温速率和短停留时间实现有机质快速转化,在提高轻质油产率方面展现出较大潜力。

油页岩颗粒粒径也是影响热解效率的重要因素。由于热解过程涉及复杂的传热与传质行为,颗粒尺寸直接决定热量向颗粒内部传递的效率。当颗粒粒径较小时,热量能够快速传递至内部,促进干酪根充分裂解,提高油气释放效率;而较大颗粒内部容易形成温度梯度,导致部分有机质未能充分转化。然而,粒径过小又可能增加粉碎能耗,并导致热解过程中细颗粒团聚现象。因此,在实际工业生产中需要综合考虑热解效率和经济成本,选择适宜的颗粒尺寸范围。

除工艺参数外,油页岩自身矿物组成也会影响热解过程。石英、长石等惰性矿物主要起骨架支撑作用,而方解石、白云石及部分黏土矿物则可能对热解反应产生催化作用[12]。研究发现,碳酸盐矿物在高温条件下分解释放 CO<sub>2</sub>,可改变热解气氛并促进部分裂解反应;同时,金属氧化物和黏土矿物表面的活性位点能够降低有机质裂解活化能,提高轻质烃生成比例。因此,近年来催化热解技术逐渐成为研究热点,通过引入分子筛、金属氧化物及纳米催化剂等材料,可进一步提高页岩油品质并改善产物分布。

总体来看,油页岩热解过程本质上是热传递、化学反应和产物迁移共同作用的结果。未来研究应进一步加强热解动力学、多场耦合机制以及催化转化规律研究,建立从微观有机质结构演化到宏观产物形成的理论体系,为高效开发油页岩资源提供理论支撑。

## 5. 油页岩开发的环境影响及治理措施

尽管油页岩资源储量丰富且具有重要开发价值,但其开发利用过程伴随着一系列环境问题。与常规石油相比,油页岩开发涉及采矿、热解、燃烧以及废弃物处置等多个环节,容易对水体、大气和土壤环境造成影响。因此,实现油页岩资源开发与生态环境保护协调发展,已成为当前研究的重要方向。

地下水污染是油页岩开发过程中最受关注的环境问题之一[13][14]。无论是露天开采还是原位转化技术,都可能对地下水系统产生影响。在地面干馏过程中,大量废页岩和半焦堆积于地表,其内部残留的有机物、重金属以及可溶性盐类可能在降雨淋滤作用下进入地下水系统。研究表明,废页岩中可能含有 Cr、Cd、Pb、As 等有害元素,长期累积会增加地下水污染风险。对于原位转化技术而言,由于热解反应直接发生在地下储层中,若储层与地下含水层之间缺乏有效隔离,则可能导致有机污染物迁移进入地下水环境[14]。因此,在实际工程中通常采用冻结墙技术或地下隔离屏障技术,在开采区域周围形成封闭隔离带,以防止污染物扩散。大气污染同样是油页岩开发过程中不可忽视的问题。在热解和燃烧过程中,大量有机质分解释放出二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物以及挥发性有机化合物等污染物。其中,二氧化碳排放不仅影响区域空气质量,也会增加温室气体排放量。由于部分油页岩硫含量较高,其燃烧过程中释放的 SO<sub>2</sub> 可能导致酸雨等环境问题。此外,热解过程中产生的挥发性有机物若未经处理直接排放,还可能形成臭氧污染和光化学烟雾。因此,在工业生产中需要配套建设脱硫、脱硝以及挥发性有机物回收系统,以减少污染物排放。

针对油页岩燃烧产生的大气污染,循环流化床燃烧技术已得到广泛应用[15]。该技术具有燃烧效率高、燃料适应性强和污染物排放低等优点。特别是油页岩中普遍含有一定量的钙质矿物,可在炉内直接与  $\text{SO}_2$  反应形成硫酸盐,实现原位脱硫,从而显著降低烟气中二氧化硫浓度。研究表明,在适宜 Ca/S 比条件下,  $\text{SO}_2$  去除率可达到 90%以上。此外,通过低氮燃烧和选择性催化还原技术,可进一步降低氮氧化物排放水平。固体废弃物处置是制约油页岩产业可持续发展的另一重要问题。油页岩热解后会产生大量半焦和灰渣,其质量通常远高于获得的页岩油产量。若直接堆放,不仅占用大量土地资源,还可能引发粉尘污染和重金属浸出问题。近年来,资源化利用已成为废页岩处理的重要方向。研究发现,油页岩灰渣中含有丰富的硅、铝和钙等元素,可用于生产水泥、陶粒、砖材以及道路基层材料等建筑产品。此外,部分研究还尝试将油页岩灰渣应用于土壤改良和吸附材料制备领域,以进一步提高资源利用效率。

随着绿色低碳发展理念的推进,油页岩开发逐渐向综合利用和循环经济模式转变。以中国桦甸油页岩产业为例,已经形成“油页岩开采-页岩油生产-半焦发电-灰渣建材化利用”的综合利用体系,实现了能源梯级利用和废弃物资源化处理。这种产业链协同模式不仅提高了资源利用效率,也显著降低了环境负荷,为未来油页岩产业发展提供了重要参考。

总体而言,环境问题仍是限制油页岩规模化开发的重要因素。未来应进一步加强环境风险评价和全过程污染控制技术研究,推动清洁热解、碳捕集与封存以及废弃物资源化利用等技术的发展,实现油页岩资源开发与生态环境保护的协调统一。

## 6. 总结与展望

油页岩作为重要的非常规能源资源,具有储量丰富和开发潜力巨大的特点。近年来,地面干馏和原位转化技术不断发展,显著提高了资源利用效率。热解温度、升温速率和颗粒粒径等因素对页岩油产率和品质具有重要影响。尽管油页岩开发仍面临环境污染和经济成本等问题,但随着绿色开采技术和环境治理技术的进步,其开发前景依然广阔。未来应坚持资源开发与生态保护协调发展的理念,推动油页岩资源高效、清洁和可持续利用。

随着能源转型和“双碳”目标的推进,油页岩开发将更加注重资源利用效率和环境友好性。未来研究应重点围绕原位转化技术优化、多场耦合数值模拟、催化热解技术以及二氧化碳封存协同开发等方向展开。同时,应加强废渣资源化利用和全过程环境风险控制,推动油页岩开发由传统高能耗模式向绿色低碳模式转变。

## 参考文献

- [1] 陈晓菲,高武军,赵杰,等. 中国油页岩开发利用现状及发展前景[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(6): 29-31.
- [2] Dyni, J.R. (2006) *Geology and Resources of Some World Oil-Shale Deposits*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5294.
- [3] 刘招君,董清水,孟庆涛,等. 中国油页岩资源现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 869-876.
- [4] Speight, J.G. (2012) *Shale Oil Production Processes*. Gulf Professional Publishing.
- [5] 叶吉文,杨洋,徐明珠. 油页岩资源利用与发展前景[J]. 中国资源综合利用, 2010, 28(6): 21-23.
- [6] Ryan, R.C., Fowler, T.D., Beer, G.L., et al. (2010) Shell's *in Situ* Conversion Process-From Laboratory to Field Pilots. In: Oguniola O.I., Hartstein, A.M. and Oguniola, O., Eds., *Oil Shale: A Solution to the Liquid Fuel Dilemma*, American Chemical Society, 161-183.
- [7] Symington, W.A., Kaminsky, R.D., Meurer, W.P., Otten, G.A., Thomas, M.M. and Yeakel, J.D. (2010) Exxonmobil's Electrofrac™ Process for *in Situ* oil Shale Conversion. In: *ACS Symposium Series*, American Chemical Society, 185-216. <https://doi.org/10.1021/bk-2010-1032.ch010>
- [8] 于明月,战金辉. 油页岩热解机理的研究进展[J]. 辽宁化工, 2024, 53(4): 579-582+590.
- [9] Hillier, J.L., Fletcher, T.H., Solum, M.S. and Pugmire, R.J. (2013) Characterization of Macromolecular Structure of

- Pyrolysis Products from a Colorado Green River Oil Shale. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **52**, 15522-15532. <https://doi.org/10.1021/ie402070s>
- [10] Fletcher, T.H., Gillis, R., Adams, J., *et al.* (2014) Characterization of Macromolecular Structure Elements from a Green River Oil Shale, II: Characterization of Pyrolysis Products by <sup>13</sup>C NMR, GC/MS, and FTIR. *Energy & Fuels*, **28**, 2959-2970.
- [11] Lu, Y., Wang, Z., Kang, Z., Li, W., Yang, D. and Zhao, Y. (2022) Comparative Study on the Pyrolysis Behavior and Pyrolysate Characteristics of Fushun Oil Shale during Anhydrous Pyrolysis and Sub/Supercritical Water Pyrolysis. *RSC Advances*, **12**, 16329-16341. <https://doi.org/10.1039/d2ra02282f>
- [12] Wang, X., Wang, Q. and Wu, C. (2022) Study of the Effect of *in Situ* Minerals on the Pyrolysis of Oil Shale in Fushun, China. *RSC Advances*, **12**, 20239-20250. <https://doi.org/10.1039/d2ra02822k>
- [13] 王淑娟, 雒锋. 油页岩半焦堆放对周围环境的影响[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(4): 57-59.
- [14] Burnham, A.K. and McConaghy, J.R. (2006) Comparison of the Acceptability of Various Oil Shale Processes. *26th Oil Shale Symposium, Colorado School of Mines*, Golden, 16-19 October 2006, 1-11.
- [15] Pan, Y., Zhang, X., Liu, S.H., Yang, S.C. and Ren, N. (2012) A Review on Technologies for Oil Shale Surface Retort. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, **34**, 1331-1338.