

岩心分段密封及逸散轻烃采集测定技术与初步应用

鲍云杰^{1,2,3,4}, 李志明^{1,2,3,4}, 黎茂稳^{1,2,3,4}, 钱门辉^{1,2,3,4},
刘鹏^{1,2,3,4}, 徐二社^{1,2,3,4}, 陶国亮^{1,2,3,4}, 杨振恒^{1,2,3,4}

1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;
2. 中国石油化工集团公司 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;
3. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 江苏 无锡 214126;
4. 国家能源页岩油研发中心, 江苏 无锡 214126)

摘要:含油气岩心轻烃逸散具有普遍性,岩心出筒后轻烃收集及其逸散差异性的表征技术和方法尚有提升空间。以专利“一种岩心分段式密封装置及其使用方法(2013101681829)”技术为核心,研究设计了岩心分段密封装置及轻烃采集测定方法。装置具有筒状结构,内置数个环状密封圈,能够将置入其中的岩心进行非破坏式分段密封,形成数个互不连通的密闭空间以存储岩心逸散的轻烃;装置配套了气体采样泵、便携式甲烷检测仪以及气相色谱仪等辅助设备,用于对不同密闭空间中的轻烃进行采样以及逸散轻烃浓度和组分测定,建立了密闭空间中逸散轻烃浓度转换为逸散量的方法。初步实验应用表明,利用该装置及方法能够获取岩心出筒后逸散的轻烃,进而表征岩心轴向不同部位轻烃逸散量及其组分的差异性,结合岩性及物性等资料,为页岩油气层系非均质性评价及其主控因素研究提供依据。

关键词:岩心;分段密封;逸散轻烃;测定装置;含气量;含油率

中图分类号:TE135

文献标识码:A

Segmented sealing of cores and collection and test of escaped light hydrocarbons and its preliminary application

BAO Yunjie^{1,2,3,4}, LI Zhiming^{1,2,3,4}, LI Maowen^{1,2,3,4}, QIAN Menhui^{1,2,3,4},
LIU Peng^{1,2,3,4}, XU Ershe^{1,2,3,4}, TAO Guoliang^{1,2,3,4}, YANG Zhenheng^{1,2,3,4}

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
2. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
3. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China;
4. State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: Light hydrocarbons easily escape from hydrocarbon-bearing cores when they are recovered from wellbores, which makes it necessary to improve the methods for collecting light hydrocarbons from cores and characterizing the differences of hydrocarbon losses. A new method for the segmented sealing of cores and the collection and test of light hydrocarbons was developed based on the patent “a segmented sealing device for cores and its instructions (2013101681829)”. The device has a cylindrical structure with several annular seals built in, which can non-destructively seal the core inserted therein to form several closed spaces that are not interconnected to store light hydrocarbons escaping from the core. The device is matched with auxiliary equipment such as gas sampling pumps, portable methane detectors, and gas chromatographs, which are used to sample light hydrocarbons in different confined spaces to determine the concentration and composition of mobile light hydrocarbons. The concentration of escaped light hydrocarbons in confined spaces can be converted to escape quantity. Preliminary applications show that the device and method can be used to obtain light hydrocarbons that escape after the cores are recovered from the wellbores, and then to characterize the differences in the amount and components of light hydrocarbons escaping from different parts of the core in an axial direction. Combined with lithology and physical properties, it provides a basis for the evaluation of shale oil and gas formation heterogeneity and its main controlling factors.

Key words: core; segmented seal; escaped light hydrocarbon; measuring device; gas content; oil content

收稿日期: 2019-10-08; 修订日期: 2020-03-18。

作者简介: 鲍云杰(1963—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事测试技术与页岩油气评价研究。E-mail: baoyj.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05049001 和 2017ZX05036002) 和国家自然科学基金石油化工联合基金(U1663202) 联合资助。

岩心作为最宝贵的地层样品蕴含大量地质信息。岩心出筒后进行岩性、结构构造观察、物性以及含油气性测定分析,是油气综合评价研究的基础。轻烃作为油气的重要组成部分,尽管不同学者对其定义不同,但均泛指低碳数烃类物质^[1]。由于其可流动性和扩散性突出,导致含油气岩心出筒后轻烃散失既有普遍性,又有差异性。随着页岩油中轻烃含量、特别是气态轻烃含量的增加,整体分子量降低,黏度下降,气油比增大,页岩油的可流动性得到改善,有利于页岩油的产出^[2-7]。故而,涉及轻烃含量及其损失恢复的研究备受关注,并已取得重要成果。张居和等^[8]利用气相色谱仪特点研制出解吸装置和技术,直接测定岩石中吸留烃C₃—C₄₀单体烃化合物,减少了样品失真。徐冠军等^[9-10]采用岩心出筒后低温冷冻、低温碎样等技术方法,减少了岩心出筒后以及碎样过程中轻烃的损失。朱日房等^[11]通过新鲜冷冻样品与常温保存样品的对比,研究散失轻烃的恢复方法,并建立了不同演化阶段岩样的散失系数,用于页岩滞留烃的定量评价。李进步等^[12-13]通过有机质成烃动力学研究以及样品抽提前后的热解参数对比,对S₁进行轻、重烃补偿校正,获得泥页岩总含油率参数。李志明等^[14]通过轻烃恢复校正,结合200℃热释轻质油对页岩油资源量进行快速评价。这些研究成果促进了油气评价水平的提高和技术的进步。在页岩气研究领域,研发和应用岩心解吸仪,通过加热到地层温度的方法对一定长度的(20 cm左右)岩心进行轻烃解吸,结合岩心自井底提升到井口过程中散失轻烃的恢复,以准确评价地层的含气性^[15]。然而,由于轻烃中的气态烃沸点低、易于散失,侧重于岩心出筒后常温条件下的逸散轻烃采集及测定技术的研究鲜有报道。

本文基于泥页岩层系岩性、物性及其含油气性非均质性强的特点,为表征岩心轻烃及其逸散特

征,研究设计了岩心分段式密封装置及轻烃采集测定方法。该装置及方法能够以非破坏方式、分段密封岩心并收集岩心逸散的轻烃,结合相应的测试手段,对逸散轻烃量和逸散轻烃组分进行测试和计算,用于表征岩心轴向不同部位逸散轻烃及其组分的差异性,以期页岩油气层系岩心轻烃损失恢复研究、以及含油气性及其非均质性评价提供依据。

1 实验装置及方法

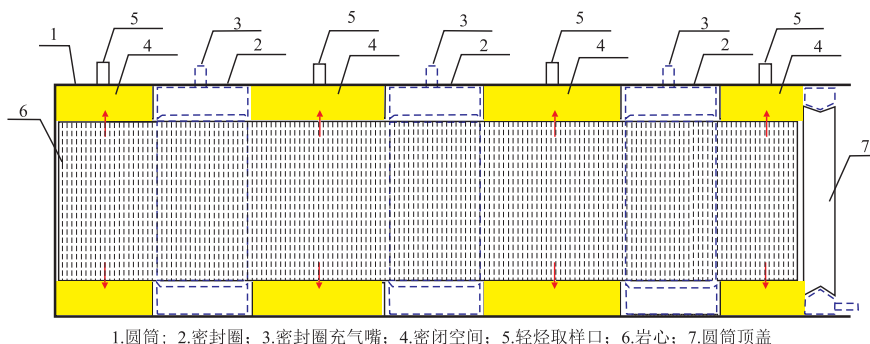
1.1 实验装置

实验采用自主研发的“岩心分段密封及轻烃采集测定系统”进行。实验装置由岩心分段式密封单元、轻烃采集单元以及轻烃(甲烷)测定单元组成。

岩心分段式密封单元的主体为密封圆筒,圆筒上部设置有取样口,内部设置有密封圈和密封圈槽。密封圈安置于密封圈槽内,密封圈内侧具有内凹结构,外侧设置有充气嘴,与充气装置连接可以为密封圈充气,密封圈内侧的内凹部分则会膨胀,并与岩心柱面贴合,在密封圈之间形成密闭空间,用于存储岩心逸散的轻烃,供采集单元收集和测定单元测试(图1)。

采集单元主要用于岩心分段密封单元密闭空间中轻烃的采集,由采样泵和气体采样袋组成。采样泵的进气孔与密封圆筒的取样口通过管线连接,采样泵的出气孔与采样袋的气孔连接,即可实现轻烃的采集。

测定单元主要用于逸散轻烃量及其组分的测定,由GT-903甲烷检测仪和气相色谱仪组成。GT-903甲烷检测仪的检测范围为0%~20%,其测定结果为密封圆筒中密闭空间混合气体中甲烷的体积浓度;气相色谱仪测定的是密封圆筒中密闭空间中混合气体的组分,包括逸散轻烃以及空气中的气体组分。



1.圆筒; 2.密封圈; 3.密封圈充气嘴; 4.密闭空间; 5.轻烃取样口; 6.岩心; 7.圆筒顶盖

图1 密封单元组成

Fig.1 Composition of sealing units

1.2 实验方法

岩心出筒后迅速擦除钻井液,立即放置于本装置的密封单元中;随后以充气泵等充气装置给密封圈充气,并达到充气压力设置值,从而实现岩心的非破坏式分段密封,将岩心划分为以密封圈为间隔的数个密闭空间;在此过程中,检查并确保密闭空间取样口气阀处于关闭状态。同时,记录密封圈充气时间,并作为分时采样的起始时间。

根据需要,岩心密封一段时间之后,即可以进行采样和轻烃(甲烷)浓度测定。采样时以采集单元的抽气泵的采样口与密封单元的抽气口连接,抽气泵出气端与采样袋连接即可。密闭单元轻烃(甲烷)浓度测定有 2 种方式,一是以测定单元直接与密封单元的取样口连接,直接测定密闭空间的轻烃(甲烷)浓度;二是测定单元直接与采样袋连接,测定采样袋中的轻烃(甲烷)浓度。

完成所有密闭空间的轻烃(甲烷)浓度测定之后,即可将岩心从密封单元中取出,并标记好其在密封单元中密封圈的相应位置,仔细观察和描述两两密封圈之间岩心的岩性、层理结构、构造特征,并取样进行物性等测试分析,以便于进行综合分析工作。轻烃(甲烷)浓度测定结果是两两密封圈之间、岩心柱面与密封单元内壁之间的密闭空间混合气体中甲烷的体积浓度,其数值越高则反映岩心的逸散轻烃(甲烷)量越大,在一定程度上可以反映岩心的含油气性。可以根据岩心直径、密封单元密封筒内径以及密封圈的间距,将密闭空间甲烷体积浓度检测结果换算为逸散轻烃(甲烷)量,再结合岩心的密度,可以计算与密闭空间对应的岩心段落单位重量的逸散轻烃(甲烷)量,用于描述岩心轴向轻烃(甲烷)逸散量的差异性并分析影响因素。

2 实验及数据分析

2.1 实验

A 井是某研究区的一口预探井,研究区多套层系具有页岩油/致密油发育条件,富集成藏条件复杂,部署 A 井旨在评价不同砂组的含油气性。目

的层沙三段是研究区主要的暗色泥岩发育段,总厚度约 1 500 m,自上而下细分为沙三上、沙三中和沙三下 3 个亚段。其中沙三下亚段地层厚度约 300~550 m,岩性为黑色(灰色)泥岩夹灰色、灰黑色和紫红色粉—细砂岩、灰质粉砂岩和泥质粉砂岩,并见少量含膏质粉砂岩和含膏质泥岩,具有典型的非均质性特征。

用于该井的岩心分段密封装置中,密封圈间隔按 10~20 cm 设置。岩心出筒后经简单清洗处理即放置于密封单元之中,静置 24 h 后,进行逸散轻烃采集和密封空间中轻烃(甲烷)浓度测试。随后将岩心从密封装置中取出,在岩心上标记密封圈位置,并在处于两个相邻的密封圈之间的岩心上取样,随后进行三维定量荧光、热解、物性分析测试,以便于后续综合分析。

利用本装置和方法对部分岩心的 16 个层段进行了 24 h 逸散轻烃(甲烷)采集和测定,岩性涉及到了浅灰色、黑色泥页岩,以及浅灰色、紫红色(泥质)粉砂岩。轻烃(甲烷)逸散量 0~18.75 cm³,平均 3.54 cm³;其中,泥页岩轻烃(甲烷)逸散量 0.03~6 cm³,平均 2.10 cm³;粉砂岩轻烃(甲烷)逸散量 0~18.75 cm³,平均 4.40 cm³。

实验过程中采集 34 件逸散轻烃样品,以 HP6890 气相色谱仪进行组分测定。测试数据表明,该井岩心逸散轻烃中含有甲烷、乙烷、丙烷、丁烷和戊烷,甲烷含量 70% 以上。泥页岩和粉砂岩逸散轻烃组分具有较大差异,泥页岩逸散轻烃 C₁—C₅ 组分齐全,C₁ 平均含量为 80.46%,nC₅ 占比平均为 0.15%。而粉砂岩逸散轻烃组分具有多样性,孔隙度小于 3% 的灰色、紫红色(泥质)粉砂岩岩心的逸散轻烃仅有 C₁—C₂,C₁ 占比平均为 98.76%,C₂ 占比平均为 1.24%;孔隙度大于 6% 的灰色粉、细砂岩岩心逸散轻烃组分 C₁—C₅ 齐全,C₁ 平均含量为 72.16%,iC₅ 占比平均为 0.21%;孔隙度介于二者之间的灰黑色粉砂岩岩心逸散轻烃组分 C₁—C₄,C₁ 平均含量为 92.63%,nC₄ 占比平均为 0.43%(表 1)。

表 1 不同岩性岩心孔隙度及逸散轻烃组分

Table 1 Composition of escaped light hydrocarbon from core samples with different porosities and lithology

岩性	孔隙度/%	组分/%						
		C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅
灰黑色、黑色泥页岩	1~9	80.46	6.52	8.54	1.59	2.25	0.49	0.15
灰色、紫红色(泥质)粉砂岩	<3	98.76	1.24	0	0	0	0	0
灰黑色粉砂岩	3~6	92.63	4.84	2.04	0.06	0.43	0	0
灰色(泥质)粉砂岩、细砂岩	>6	72.16	11.65	12.14	1.29	2.55	0.21	0

2.2 讨论

以其中一个取心井段为例。从钻录井资料来看,进入取心段时,钻时由 3 394 m 的 6 min/m 左右增大到 3 394.5 m 的 110 min/m 左右,受钻时影响,气测全烃明显降低,一直到 3 402 m 左右,气测全烃略有波动,最大达到 0.34%左右。按照解释标准和以往经验,该井段录井气测解释为无异常显示(图 2)。

从 44 件样品热解 S_1 分析结果(图 3)来看,热解 S_1 变化范围在 0.01 ~ 3.24 mg/g, 平均为 0.38 mg/g。其中,22 件泥岩样品的热解 S_1 变化范围在 0.03 ~ 3.24 mg/g, 平均为 0.50 mg/g; 22 件粉砂岩样品的热解 S_1 变化范围在 0.01 ~ 1.64 mg/g, 平均为 0.25 mg/g。热解 S_1 与孔隙度相关性较弱。

从 60 件样品定量三维荧光(荧光含油率)分析结果(图 4)来看,荧光含油率在 0.05 ~ 5.58 mg/g, 平均为 0.69 mg/g。其中,23 件泥岩和纹层状页岩样品荧光含油率在 0.09 ~ 2.92 mg/g, 平均为 0.62 mg/g; 37 件粉砂岩样品荧光含油率在 0.05 ~ 5.58 mg/g, 平均为 0.73 mg/g。可见,粉砂岩样品的荧光含油率略高于泥岩样品的荧光含油率,荧光含油率与孔隙度相关性较弱,孔隙度大于 6% 时,荧光含油率

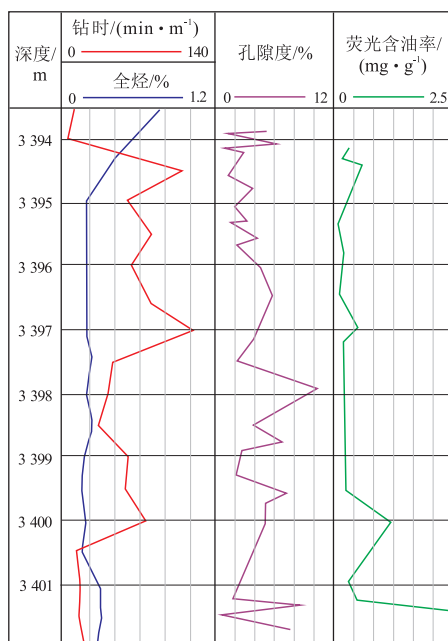


图 2 A 井部分井段录井图

Fig.2 Logging diagram of some sections in well A

与孔隙度具有正相关关系趋势。但有 6 件浅灰色、灰黑色纹层页岩样品较为特殊,其纹层发育且渗透率较高,荧光含油率与孔隙度呈负相关关系,可能暗示烃类散失对荧光含油率测定具有一定的影响。

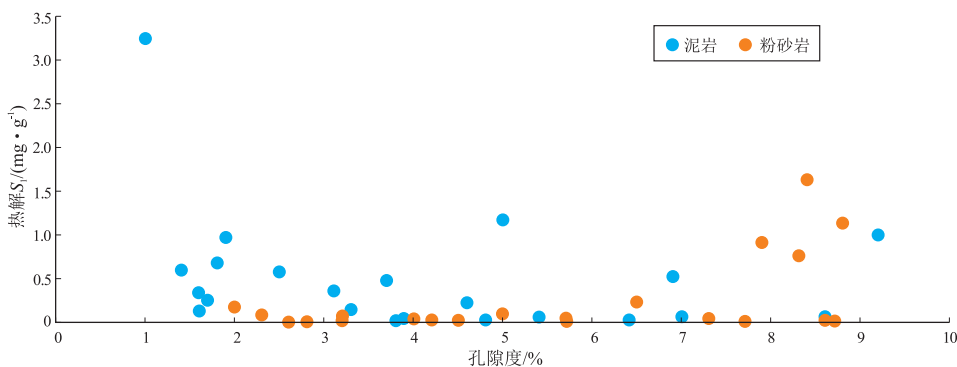


图 3 孔隙度与热解 S_1 交会图

Fig.3 Porosity vs. S_1

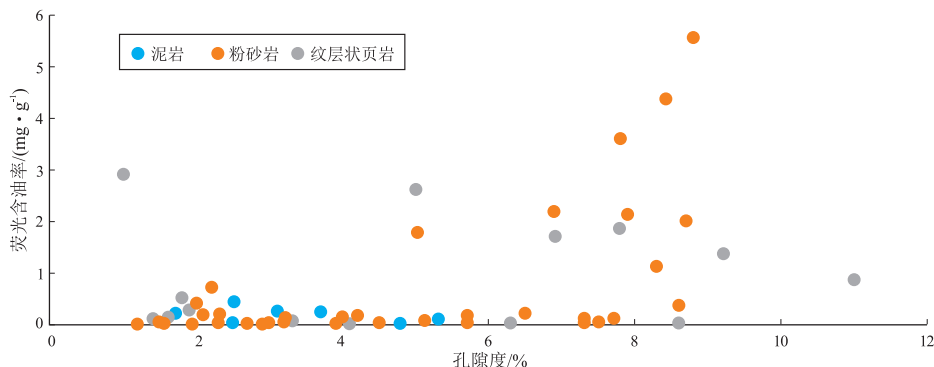


图 4 孔隙度与荧光含油率交会图

Fig.4 Porosity vs. fluorescent oil content

从荧光含油率与热解 S_1 、逸散气量的关系(图 5)来看,荧光含油率与热解 S_1 呈正相关关系,这与前人研究认识基本一致^[10]。两者与逸散气量的关系呈多样性,主要是因为热解和三维定量荧光分析主要反映页岩中的游离油量,而逸散气分析主要反映现有操作条件下页岩中的气态轻烃——甲烷的逸散量。页岩油气中的轻烃具有沸点低、易逸散挥发的特点,荧光含油率以及热解 S_1 与孔隙度的相关关系具有多样性,特别是纹层泥岩荧光含油率与孔隙度具有负相关关系,说明烃类物质沿纹层(裂缝)散失严重,目前采取的岩心出筒后冷冻以及低温碎样措施,不足以解决甲烷、乙烷等轻烃的逸散损失问题。逸散轻烃收集及测定技术为泥页岩含油气性研究提供了新的方法。

从表 1 可见,不同岩性和物性岩心逸散轻烃组分存在差异,总体上泥页岩岩心逸散轻烃组分 C_1-C_5 齐全,而泥质粉砂岩、细砂岩因孔隙度不同而存在差异,孔隙度较大的粉、细砂岩 C_1-C_5 组分齐全,而孔隙度较小的紫红色粉砂岩仅有 C_1-C_2 组分。这是否反映了轻烃由烃源岩向粉砂岩扩散过程中充注动力不足,尚待深入研究。

本装置和方法通过非破坏式分段密封岩心,可以将 10 cm(最小可至 2 cm)作为一个观测单元,收

集并测定其在一定时间内在常温常压下(接近于生产实际情况)逸散的轻烃量,刻画岩心轴向不同部位含气性、轻烃组分及其变化,有利于深化研究岩性、物性、层理结构以及构造对含气性的影响。图 6 反映岩心 24 h 逸散轻烃(甲烷)量与孔隙度具有正相关关系,结合表 1 所示的不同岩性岩样的孔隙度变化范围,可知岩性和物性对该层段岩心含气性具有影响和控制作用。

3 结论

(1) 本文的装置和方法,通过岩心的非破坏式分段密封,为收集、测试、分析岩心出筒后逸散的轻烃提供了新手段,逸散轻烃量及组分测定结果对于页岩含油气性及其非均质性评价研究具有实践意义。

(2) 在本文的操作条件下,某预探井岩心轻烃(甲烷)逸散量与岩性和物性关系密切。灰色及浅灰色(泥质)粉砂岩孔隙度较高,轻烃(甲烷)逸散量最大;泥岩孔隙度较低,轻烃(甲烷)逸散量次之;紫红色粉砂岩孔隙度最小,轻烃(甲烷)逸散量最低。

(3) 泥页岩与具有较高孔隙度的粉砂岩和细砂岩岩心逸散轻烃 C_1-C_5 组分齐全,低孔隙度的

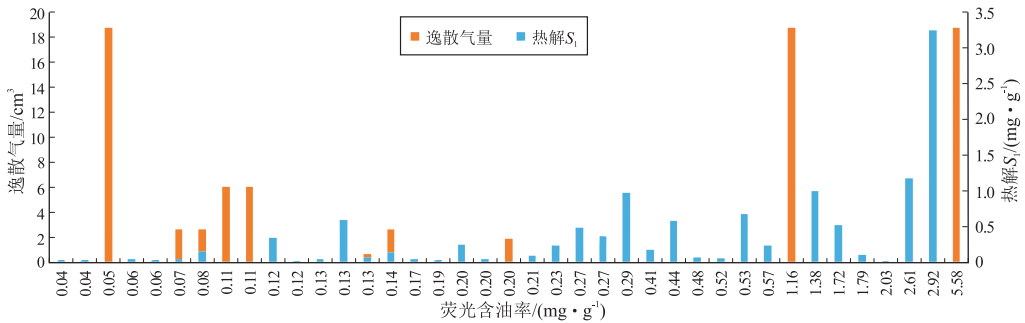


图 5 荧光含油率与热解 S_1 、逸散气量对应关系

Fig.5 Fluorescent oil content vs. S_1 and escaped gas amount

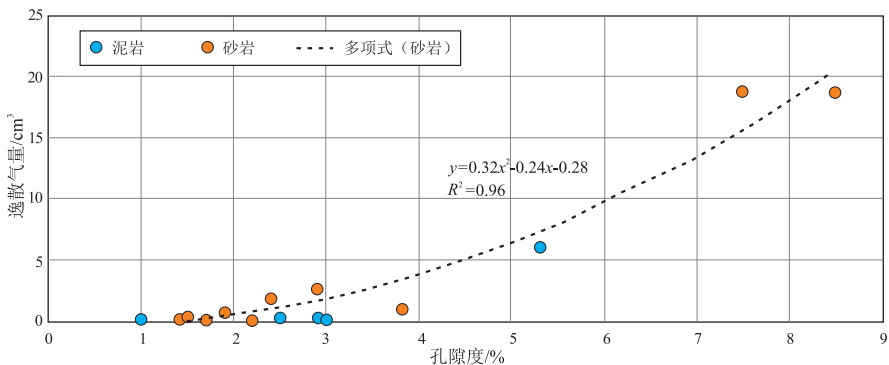


图 6 孔隙度与 24 h 逸散气量交会图

Fig.6 Porosity vs. escaped gas amount (24 h)

(泥质)粉砂岩岩心逸散轻烃组分仅有 C_1-C_2 。这种轻烃组分的差异性,可能反映了油气由烃源岩向粉—细砂岩运移过程中的分异作用,与排烃能力、充注动力的关系有待深入研究。

参考文献:

- [1] 段毅,赵阳,姚泾利,等.轻烃地球化学研究进展及发展趋势[J].天然气地球科学,2014,25(12):1875-1887.
DUAN Yi,ZHAO Yang,YAO Jingli,et al.Research advance and tendency of light hydrocarbon geochemistry[J].Natural Gas Geoscience,2014,25(12):1875-1887.
- [2] 张林晔,包友书,李钜源,等.湖相页岩油可动性:以渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷为例[J].石油勘探与开发,2014,41(6):641-649.
ZHANG Linye,BAO Youshu,LI Juyuan,et al.Movability of lacustrine shale oil:a case study of Dongying Sag,Jiyang Depression,Bohai Bay Basin[J].Petroleum Exploration and Development,2014,41(6):641-649.
- [3] 宋国奇,徐兴友,李政,等.济阳拗陷古近系陆相页岩油产量的影响因素[J].石油与天然气地质,2015,36(3):463-471.
SONG Guoqi,XU Xingyou,LI Zheng,et al.Factors controlling oil production from Paleogene shale in Jiyang Depression[J].Oil & Gas Geology,2015,36(3):463-471.
- [4] 蒋启贵,黎茂稳,马媛媛,等.页岩油可动性分子地球化学评价方法:以济阳拗陷页岩油为例[J].石油实验地质,2018,40(6):849-854.
JIANG Qigui,LI Maowen,MA Yuanyuan,et al.Molecular geochemical evaluation of shale oil mobility:a case study of shale oil in Jiyang Depression[J].Petroleum Geology & Experiment,2018,40(6):849-854.
- [5] 梅海燕,何浪,张茂林,等.页岩油注气提高采收率现状及可行性分析[J].油气藏评价与开发,2018,8(6):77-82.
MEI Haiyan,HE Lang,ZHANG Maolin,et al.Status and feasibility analysis on improved shale-oil recovery by gas injection[J].Reservoir Evaluation and Development,2018,8(6):77-82.
- [6] 湛卓恒,黎茂稳,姜春庆,等.页岩油的资源潜力及流动性评价方法:以西加拿大盆地上泥盆统 Duvernay 页岩为例[J].石油与天然气地质,2019,40(3):459-468.
CHEN Zhuoheng,LI Maowen,JIANG Chunqing,et al.Shale oil resource potential and its mobility assessment:a case study of Upper Devonian Duvernay shale in Western Canada Sedimentary Basin[J].Oil & Gas Geology,2019,40(3):459-468.
- [7] 朱日房,张林晔,李政,等.陆相断陷盆地页岩油资源潜力评价:以东营凹陷沙三段下亚段为例[J].油气地质与采收率,2019,26(1):129-136.
ZHU Rifang,ZHANG Linye,LI Zheng,et al.Evaluation of shale oil resource potential in continental rift basin:a case study of Lower Es₃ Member in Dongying Sag[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2019,26(1):129-136.
- [8] 张居和,吕金龙,董艳华,等.岩石吸附轻烃气相色谱快速检测技术及其应用研究[J].地质地球化学,2003,31(2):93-99.
ZHANG Juhe,LÜ Jinlong,DONG Yanhua,et al.Quick gas chromatography analysis technology of the adsorbed hydrocarbon in rocks and its applications[J].Geology-Geochemistry,2003,31(2):93-99.
- [9] 徐冠军,王培荣,刘建宪,等.烃源岩中 C_5-C_{13} 分析新方法及其在油源对比中的应用[J].石油勘探与开发,2008,35(6):710-714.
XU Guanjun,WANG Peirong,LIU Jianxian,et al.A new analysis method for C_5-C_{13} fractions of organic matter in source rocks and its primary application to oil-source correlation[J].Petroleum Exploration and Development,2008,35(6):710-714.
- [10] 蒋启贵,黎茂稳,钱门辉,等.页岩油探井现场地质评价实验流程与技术进展[J].石油与天然气地质,2019,40(3):571-582.
JIANG Qigui,LI Maowen,QIAN Menhui,et al.Experimental procedures of well-site geological evaluation for shale oil and related technological progress[J].Oil & Gas Geology,2019,40(3):571-582.
- [11] 朱日房,张林晔,李钜源,等.页岩滞留液态烃的定量评价[J].石油学报,2015,36(1):13-18.
ZHU Rifang,ZHANG Linye,LI Juyuan,et al.Quantitative evaluation of residual liquid hydrocarbons in shale[J].Acta Petroli Sinica,2015,36(1):13-18.
- [12] 李进步,卢双舫,陈国辉,等.热解参数 S_1 的轻烃与重烃校正及其意义:以渤海湾盆地大民屯凹陷 $E_2s^{4(2)}$ 为例[J].石油与天然气地质,2016,37(4):538-545.
LI Jinbu,LU Shuangfang,CHEN Guohui,et al.Correction of light and heavy hydrocarbon loss for residual hydrocarbon S_1 and its significance to assessing resource potential of $E_2s^{4(2)}$ member in Damintun Sag,Bohai Bay Basin[J].Oil & Gas Geology,2016,37(4):538-545.
- [13] 薛海涛,田善思,王伟明,等.页岩油资源评价关键参数:含油率的校正[J].石油与天然气地质,2016,37(1):15-22.
XUE Haitao,TIAN Shansi,WANG Weiming,et al.Correction of oil content:one key parameter in shale oil resource assessment[J].Oil & Gas Geology,2016,37(1):15-22.
- [14] 李志明,钱门辉,黎茂稳,等.中—低成熟湖相富含有机质页岩含油性及其赋存形式:以渤海湾盆地渤南洼陷罗63井和义21井沙河街组一段为例[J].石油与天然气地质,2017,38(3):448-456.
LI Zhiming,QIAN Menhui,LI Maowen,et al.Oil content and occurrence in low-medium mature organic-rich lacustrine shales:a case from the 1st member of the Eocene-Oligocene Shahejie Formation in well Luo-63 and Yi-21, Bonan Subsag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology,2017,38(3):448-456.
- [15] 习传学,孙冲,方帆,等.页岩含气量现场测试技术研究[J].石油实验地质,2018,40(1):25-29.
XI Chuanxue,SUN Chong,FANG Fan,et al.Field testing technology for shale gas content[J].Petroleum Geology & Experiment,2018,40(1):25-29.