

微波热效应对页岩结构热损伤的影响规律

李泓钊¹, 陈彦奇¹, 何乐平², 屈 研¹

(西南石油大学 1. 土木工程与测绘学院; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

摘要:页岩油气资源作为一种非常规油气资源因其孔隙率低、渗透率等原因造成其开采难度高、经济效益低。近年来,微波作为一种新型的加热技术在页岩油气增产领域逐渐被重视并开展了一系列的研究。微波热效应可以破坏岩石结构,有效地提高油气的渗透率,降低开采的难度,研究微波辐照下页岩的热损伤过程与机制对页岩油气资源的开采具有重要意义。本研究利用自制微波加热设备对页岩进行辐照试验,探究了辐照温度(500~900℃)对页岩结构损伤的影响规律。利用扫描电子显微镜、X射线衍射光谱仪(XRD)、X射线荧光光谱仪(XRF)、综合热分析仪(TG—DSC)等分析测试手段揭示了微波辐照下页岩的微观结构与矿物晶体物相演化规律,并建立了微波辐照温度与其孔隙率的关系。研究表明,微波辐照可以对页岩造成不可逆的热损伤,使得页岩的裂缝与孔隙增多,为页岩油气运移开通渗透通道,降低了页岩油气资源的开采难度。本研究的结果对利用微波加热开发页岩油气资源具有重要意义。

关键词:页岩;非常规油气资源;微波辐照;高温;结构损伤

中图分类号:TE662 **文献标志码:**A **文章编号:**1671—1807(2021)01—0258—07

21 世纪以来,世界各国对于石油天然气资源的需求量不断上升。面临传统的化石能源日趋枯竭的局面,人们开始把目光投向非常规油气资源领域。非常规油气资源是指在现有经济技术条件下,不能用传统技术开发的油气资源^[1],其埋藏、储存状态与常规油气资源相比有较大的差距,开发难度大、成本费用高^[2]。目前,全球常规与非常规油气资源量的比例约为 1:9,资源量十分巨大,而且区域分布也比常规资源更广泛^[3-4]。发展非常规油气资源能够延长石油工业的生命周期,其中,稠油、页岩油、页岩气、油砂等非常规油气资源的全面发展能够丰富资源类型,增加资源量^[4]。

近年来,水平井分段压裂技术^[5]带来的“页岩油气革命”极大地提升了全球非常规油气开采能力,重塑了世界能源格局^[3]。美国曾经是全球最大的原油进口国,凭借其先进的科技、设备和丰富的页岩油资源量,现已成为全球最大的原油生产国和净出口国^[6]。在 2018 年,美国的页岩油和页岩气年产量分别达到 3.29×10^8 吨和 $6072 \times 10^8 \text{ m}^3$,然而中国的页岩气年产量为 $108 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7]。近年来,中国国内油气消费需求不断加大,油气产量却无法满

足需求。目前中国原油的对外依存度高达 70%,天然气的对外依存度达 40%^[8]。

油页岩作为非常规油气资源的一种,是重要的能源接续。中国页岩油资源的储备量极为丰富,其中的可采资源量大约为 45 亿吨左右,页岩油的含量在全球排第三,仅仅低于俄罗斯和美国,具有良好的发展前景^[8]。通过热加工技术提取页岩油,是页岩油开采的有效手段^[9]。

微波是一种波长为 0.1 mm~1 m 的电磁波,被广泛应用于材料加热领域,其具有体积加热、选择性加热、可控性好和节能等优点。岩石对微波的响应主要是通过微波选择性加热某些微波活性较好的矿物(如黑云母、角闪石等)^[10],增大不同矿物颗粒之间的热失配,从而产生超过岩石强度的热应力,最终有效地削弱甚至破坏岩石结构。

微波在许多领域得到应用,在石油工业中利用微波采油,中外都进行了多年的探索。外国研究认为,利用微波可以把油井产量提高 1~4 倍;同时, Kiamanesh 认为微波还具有如加热过程连续、不受埋藏深度限制、不受地层渗透率影响、过程容易控制、对环境不会造成污染等优点^[11]。因此许多国家都在积极进行研究和试验。我国微波技术的研究

收稿日期:2020—09—03

作者简介:李泓钊(1999—),男,四川达州人,西南石油大学土木工程与测绘学院,本科生,研究方向:微波破岩。

始于 20 世纪 50 年代,近 10 年来在微波应用于采油的研究有了很大进展,目前正在研究微波加热源的辐射机理,开发大功率微波管、微波传输系统及相关工艺设备,这些研究成果将对加快微波采油技术的实际应用起到重要作用。

微波加热技术作为辐射加热的其中一种,被广泛应用于石油化工行业的各个领域。中外不少学者积极致力于将微波加热技术应用于非常规油气资源的开采领域。

1984 年,Chen 等发现微波对大部分天然矿物都具有一定影响作用,其研究成果为微波在非常规油气开采方面的应用奠定了一定基础^[12]。1996 年,Bradhurst 等通过微波蒸馏实验发现,微波蒸馏页岩可以提高油的质量,比常规蒸馏的页岩油,含有更少的碳氢化合物,更少的硫和更少的氮^[13]。2011 年,赵莉通过研究稠油中加入添加剂,微波作用后的稠油的降黏情况。得出从微波对稠油的降黏效果来看,稠油低温流动性有较大改善,理论上用微波降黏是可行的^[14]。2017 年,王红玉等指出微波加热的优点是,可实现循环注热,且作用时间较短^[15]。He 等对 300~800 °C 温度范围微波辐照 15 min 后的闪长岩进行了研究,结果表明,高温可破坏岩石的结构,结构在 700 °C 和 800 °C 时完全崩解^[16]。时鹏采用间歇微波热解装置,探究微波场加热技术对油砂的热解特性及其热解产物分布的作用机理与应用潜质。结果表明,微波热解的液相产物收率明显增加,并有利于实现高附加值产品的富集^[17]。

2008 年,王擎等对油页岩进行微波干馏,发现随着微波功率的增加,油气产率增加^[18];2010 年,Sateesh 等得出结论,微波在从地下开采到浓缩提炼的石油生产领域的许多应用是有效的^[19]。2010 年,刘洪林等研究了微波加热开采地下油页岩的技术,结果表明,微波加热效率高,岩石产生裂缝多,页岩油气易于通过裂缝渗滤出来,达到高效开采的目的^[20]。2012 年,李小龙等研究了微波干馏与常规干馏这两种方法对页岩油产品品质的影响,发现微波干馏法加工的页岩油产品性质较优,该方法是页岩油开发的有效手段^[21]。2014 年,李隽等通过对油页岩原位开采的研究,结果表明,温度小于 300 °C 时,油页岩产生少量裂缝;400 °C 以上时,裂隙数量增加,小裂隙与大裂隙相互连通,为页岩油气的运移与排采提供充足的流通通道^[22]。2016 年,杨兆中等分析表明微波加热具有能量利用率高,对环

境友好等特点,还可以提高原油的品质^[23]。2020 年,John 等研究了利用微波加热从页岩气藏中产生吸附气体的方法。结果表明,微波加热可以通过加速吸附气体的解吸,在一年内使页岩气累积产量提高 25 %^[24]。

页岩的微观结构在页岩油气的渗流和生产中起着至关重要的作用。微波已经被证实可以用于非常规油气资源的开采,但鲜见关于微波辐照对页岩油气开采的研究。虽然,Zhu 等对添加了氧化铁纳米粒子的页岩进行了微波辐照,结果表明微波能引起了油页岩孔隙和微裂缝的产生^[25]。Zhu 等还研究微波加热参数对油页岩加热行为,表面形态和孔隙结构的影响,说明了微波具有诱导微孔和裂缝的能力^[26]。但是,他们将氧化铁纳米颗粒分散体与原料油的样品混合,以提高微波加热效率,并不能有效地反映微波直接作用下页岩的结构损伤。因此,开展微波辐照下页岩结构损伤的研究具有一定的科学意义,同时可以为微波开采页岩油气投入实际工程应用提供数据参考。

本研究采用自制微波炉对页岩的微波辐照损伤进行探究,采用日立台式扫描电镜(scanning electronic microscope, SEM)、X 射线荧光光谱分析(X-ray fluorescence, XRF)和 X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)分别对微波辐照前后页岩的微观形貌、化学组成和晶体物相进行表征。

1 样品与实验

1.1 样品特性

所有页岩试样呈黑色,表面平整光滑,无明显裂缝,如图 1 所示。表 1 表示采用 X 射线荧光光谱仪(Axios, PANalytical)测定了页岩的化学组成。该页岩主要由石英、方解石和一些含铁矿物组成,而具有较高微波活性的 Fe₂O₃ 约占 1.58 % (Fe 元素约占 1.106 %)。



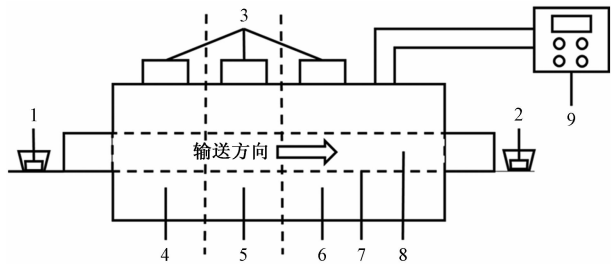
图 1 页岩样品的外观

表 1 页岩的化学组成

氧化物	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅
wt. (%)	77.31	10.64	5.49	1.62	1.58	1.37	1.28	0.25	0.17	0.11

1.2 实验设计

采用自制的频率为 2.45 GHz 的微波炉加热试样,其功率根据预先设定的温度曲线可以在 0~1.35 kW 自动调节,如图 2 所示。管道周围采用氧化铝包裹以绝缘保温。微波炉分为升温段、高温段和缓冷段,每次将设计为同一加热温度的 3 个试样按编号依次放入坩埚中,将坩埚放上输送带,使其缓慢依次经过上述 3 个温度段,在该过程中,坩埚到达高温段时输送带停止输送,当试样加热完毕,取出并等待其自然冷却至室温。为了研究温度对微波辐照页岩的影响,确定了 5 个最大表面温度,分别为 500 ℃、600 ℃、700 ℃、800 ℃和 900 ℃。每组试样均以相同速率加热,当各试样达到各自设定值后,将其保温 15 min,然后关闭电源,让试样在室温下自然冷却。



1. 页岩原样,2. 微波处理后的页岩试样,3. 微波发射源,4. 升温段,5. 高温段,6. 缓冷段,7. 炉管,8. 保温层,9. 控制设备

图 2 微波辐照装置示意图

1.3 试样制备

根据微波设备的尺寸,用岩石切割机将页岩块体切割成 18 个尺寸均为 1 cm × 1 cm × 2 cm 的长方体,如图 3 所示。每组试样包含 3 个样本,挑选每组试样中的一个典型试样进行测试和研究,每个试样的 6 个侧面都没有可见的裂纹。微波辐照处理前,先用酒精将试样表面清洗干净。待试样表面的酒精自然风干后,用电热恒温鼓风干燥箱(DHG—9053A,上海浦东荣丰科学仪器有限公司)在 105 ℃ 的温度下烘干至恒重,用电子天平和密度仪测定试样的质量与密度。

1.4 表征方法

利用扫描电镜(scanning electronic microscope, SEM, TM—1000, HITACHI)对其微观结

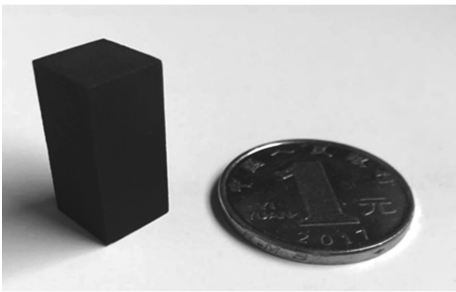


图 3 页岩试样

构进行了观测。使用电子天平(FA2004B, YOKE)测量了每个试样的质量,用密度仪(MDJ—200S)对试样进行了密度测量。利用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD, X'Pert Pro, PANalytical)对试样的矿物组成变化进行了测试。利用热分析设备(thermalgravimetric analysis, TGA, METTLER TOLEDO)对页岩热物理性质进行了分析。

2 结果与分析

2.1 结构演化

经过处理后的各个温度下的页岩试样外观如图 4 所示。试样在 500 ℃ 处理后和原样外观无明显差别;加热至 600 ℃ 时,页岩试样的某些化学成分发生了化学变化,试样颜色由黑色变为灰黄色就证明了这一点;页岩试样在 900 ℃ 处理后破裂,如图 4(f)所示,试样破裂为 4 个较为规则的立方体,这是由于页岩在受到微波辐照时内部产生热应力,在相同的应力条件下岩石会先从其软弱结构面处断开;而破裂前难以观察到裂缝、孔洞和形状上的变化,这是由于页岩结构致密;在温度逐渐升高的过程中,页岩体积并没有发生明显的变化,这跟页岩的变形模量较小有关。

图 5 显示了页岩在微波辐照前后的微观形貌。如图 5(a)和图 5(b)所示,原样与 500 ℃ 处理后试样微观形貌相似,表面较为完整,表明其结构受到的损伤较小;600 ℃ 时,如图 5(c),页岩表面开始出现尺寸较小的孔洞,并且可以观察到少量微裂缝;温度升高至 700 ℃ 时,如图 5(d),由于蒸汽和挥发物引起的内部压力以及微波诱导的基体内的热应力,孔形状变成具有小直径的中孔,随着输出功率和反应温度的增加而增加;800 ℃ 时,如图 5(e)所示,岩

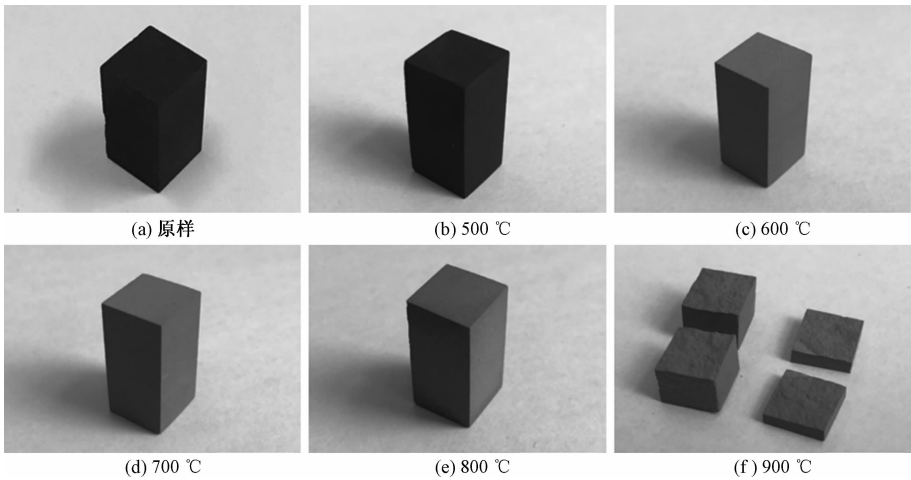


图 4 微波辐照前后页岩试样的宏观形貌

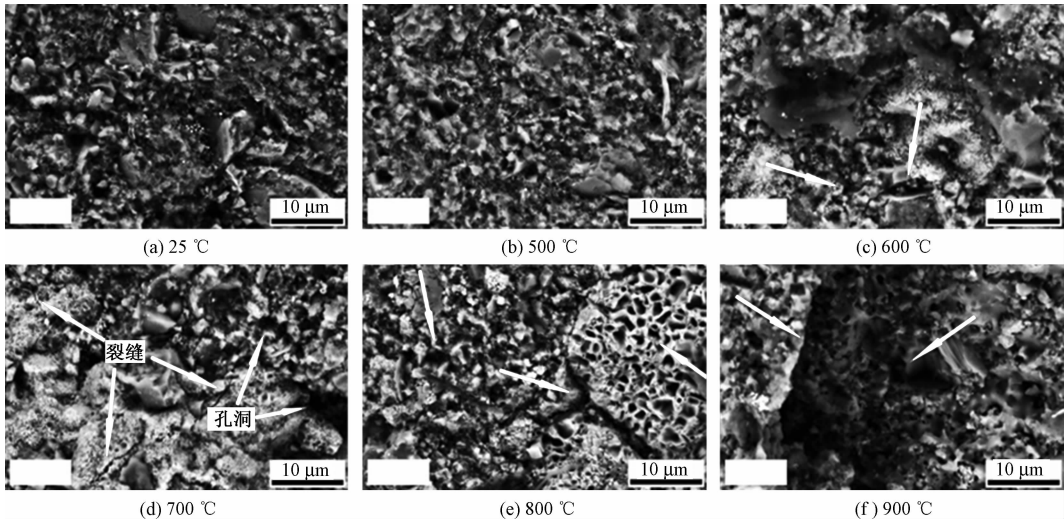


图 5 微波辐照前后页岩试样的微观形貌

石出现大量孔洞且孔洞变密,可以观察到大颗粒经过受热膨胀并冷却后留下的周围缝隙;加热至 900 °C 时,如图 5(f) 所示,岩石断裂产生明显裂缝,孔洞更为密集,剥离的颗粒变小,粒度更加明显。在整个加热过程中,随着温度的升高和加热时间的增加,试样孔隙度和孔径不断增加。这些孔洞的形成有效破坏了页岩的原始结构,从而使得页岩的力学强度下降。

2.2 晶体物相

图 6 表示页岩试样在微波辐照前后的 XRD 图谱。如图 6 所示,页岩中的矿物成分主要是石英和方解石。其中,石英的衍射峰在整个温度段范围内均没有明显变化,说明样品的最高温度在石英的熔点以下。当表面温度达到 800 °C 时,方解石的衍射峰消失,表明方解石完全分解为 CaO 和 CO₂,如公式(1)所示。因此,SEM 照片中孔隙的形成可能也是由于碳

酸钙分解导致的。同时,这也说明当表面温度达到 800 °C 时,内部温度已经超过了方解石的分解温度。因此,页岩样品内部的最大温度在 800 °C 以上。

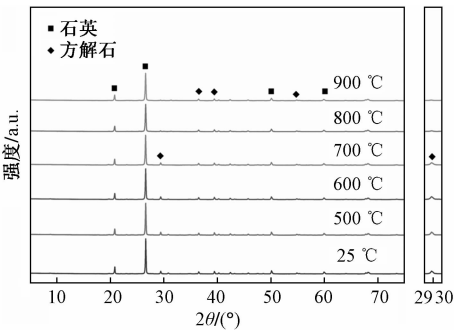


图 6 微波辐照前、后页岩式样的 XRD 图谱



2.3 物理性质

图 7 表示微波辐照前、后页岩质量和密度的变

化率。随着微波辐照的温度逐渐升高,页岩的质量和密度变化率的绝对值不断增大。这说明微波辐照会使质量和密度均会减小。从图 7(a)中进一步可以看出当温度为 600 ℃和 700 ℃时,质量变化率斜率增大,而在其他相邻温度之间,其斜率较小。而密度变化率在 500~600 ℃的较低温度范围内,其密度变化率差值较小,随着温度逐渐升高,密度变化率几乎呈线性下降趋势。此外,在较低的处理温

度下,质量和密度变化率误差棒较短,说明样品均质性较好。但是,随着处理温度的不断升高,质量和密度变化率误差棒有明显的增长。这可能是受到页岩试样在高温阶段孔隙产生的随机性,导致同一组页岩试样在微波辐照后结构存在较大差异。此外根据 XRF 结果,页岩中含有较多的钙质矿物,而类似碳酸钙在高温下易分解,因此这也可能是受到样品尺寸所带来的矿物分布差异的影响。

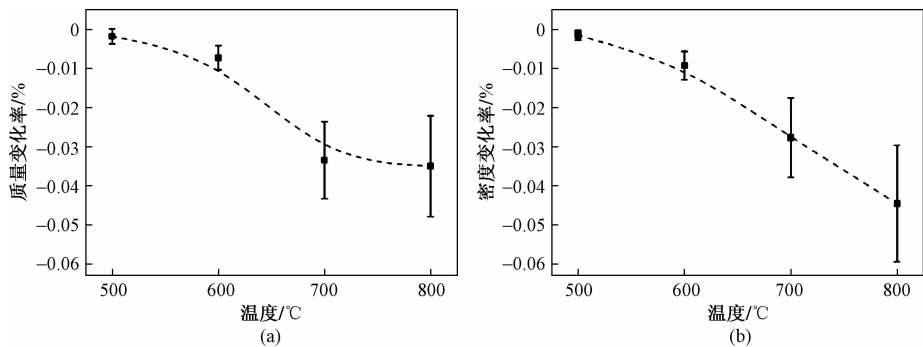


图 7 微波辐照下页岩质量和密度随温度的变化率

2.4 热重分析

图 8 给出了页岩原样的 TG 曲线,如图 8 所示,TG 曲线显示出 4 个不同的阶段。第 1 阶段(25~350 ℃),低温失重阶段,此温度段的失重比例较小,不到 1%^[27];主要是由于页岩中的游离水分和部分结合水分析出。第 2 阶段(350~700 ℃),页岩的质量表现出缓慢的下降,通常归因于矿物结晶水进一步的散失^[10],同时结构水开始释放出来。第 3 阶段(700~820 ℃),TG 曲线迅速下降,结合 XRD 分析图谱可知,导致页岩质量快速下降的原因可能是由于 CaCO₃ 分解为 CaO 和 CO₂ 导致的。第 4 阶段(820~1 000 ℃),此时页岩的 CaCO₃ 含量已大量减少,TG 曲线的下降速率恢复与第 2 阶段相当的水平,此时的质量下降可能主要是由于脱热解水^[28]。

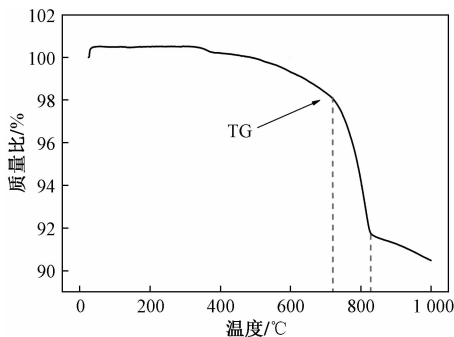


图 8 页岩的热重曲线

3 结论

本研究为了获得页岩试样在 500~900 ℃微波辐照下结构损伤演化机理,采用 XRF、SEM、XRD 和 TGA 对页岩的化学成分、微观形貌、晶体物相和热物理性质进行了分析和表征,主要研究结论如下:

- 1)微波辐照下,随着温度的升高,页岩主要以颜色变化为主,未见明显裂缝产生;当温度升高至 900 ℃时,页岩试样发生断裂。
- 2)SEM 结果表明,在温度低于 500 ℃时,页岩表面无明显变化,晶体结构并未被破坏;当温度达到 600 ℃时,页岩表面开始出现尺寸较小的孔洞及少量微裂缝;随着温度的升高,裂缝和孔洞的数量和尺寸进一步的增大。而同一组页岩试样的表面形貌差异较大,这是孔隙产生的随机性所致。
- 3)本试验采用的页岩主要由石英、方解石和一些含铁矿物组成,结合热重分析和 X 射线衍射光谱分析可得,微波辐照下,试样中石英的衍射峰在 500~900 ℃范围内均无明显变化;而当表面温度达到 800 ℃时,CaCO₃ 的衍射峰消失,说明样品内部的最高温度在 800 ℃以上。页岩样品质量的明显下降出现在 800 ℃附近,这可能与方解石分解有关。

4 展望

通过室内试验对页岩在微波辐照下的结构损伤进行了分析和表征,但仍存在一定的局限性:

- 1)微波辐照过程中,有机物的分解对岩石损伤

有一定影响,受设备影响没有对有机物的成分及变化进行进一步研究。

2)室内实验使用的加热对象是预先切割制成的立方块体,而不是底层岩心,未考虑地下环境对页岩带来的影响。

参考文献

- [1] YERGIN D. The quest; energy, security, and the remaking of the modern world[M]//NIU YUBEN, YAN ZHIMIN. Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 1787—1789.
- [2] 杨兆中,朱静怡,李小刚.微波加热技术在非常规油资源中的研究现状与展望[J].化工进展,2016,35(11):3478—3483.
- [3] 郑丹.谁掌握技术,谁就拥有未来——专访中国石油经济技术研究院副院长吕建中[J].中国石油石化,2019(2):46—49.
- [4] 邹才能,张国生,杨智.非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J].石油勘探与开发,2013,40(4):385—399,454.
- [5] 唐颖,唐玄,王广源.页岩气开发水力压裂技术综述[J].地质通报,2011,30(Z1):393—399.
- [6] 佩蒂特,于柏慧.对中国非常规油气开发的建议——美国致密油开发的经验与启示[J].国际石油经济,2019,27(11):64—69.
- [7] JIAO F Z. Re-recognition of “unconventional” in unconventional oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 847—855.
- [8] 王倩楠,游一,李茜.中国页岩油勘探开发前景[J].石化技术,2019,26(11):224—225.
- [9] 罗万江.油页岩热解过程及产物析出特性实验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [10] Lu G M, LI Y H, HASSANI et al. The influence of microwave irradiation on thermal properties of main rock-forming minerals[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 1523—1532.
- [11] KIAMANESH A I. In-situ tuned microwave oil extraction process: CA, US5082054 [P]. Feb 12, 1990 [Aug 12, 1991].
- [12] CHEN T T, DUTRIZAC J E, HAQUE K E, et al. The relative transparency of minerals to microwave radiation[J]. Taylor & Francis, 2013, 23(3): 349—351.
- [13] BRADHURST D H, WORTNER H K. Evaluation of oil produced from the microwave retorting of Australian shales[J]. Fuel and Energy Abstracts, 1996, 37(3): 285—288.
- [14] 赵莉.微波诱导稠油催化反应的机理研究[D].西安:西安石油大学,2009.
- [15] 王红玉,赵芳,本莲芳.我国非常规油气资源“可燃冰”的开采技术研究进展[J].广州化工,2017,45(15):3—5.
- [16] HE LEPING, CHEN YUAN, ZENG JENSEN, et al. The thermal damaging process of diorite under microwave irradiation[J]. 2019, 13(47): 65—73.
- [17] 时鹏.微波场强化印尼油砂热解过程研究[D].天津:天津大学,2018.
- [18] 王擎,桓现坤,刘洪鹏.桦甸油页岩的微波干馏特性[J].化工学报,2008,59(5):1288—1293.
- [19] SATEESH M, CRAIG F, JOCELYN J R, et al. Microwave applications to oil sands and petroleum: a review[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 91(2): 127—135.
- [20] 刘洪林,刘德勋,方朝合.利用微波加热开采地下油页岩的技术[J].石油学报,2010,31(4):623—625.
- [21] 李小龙,郑德温,方朝合.微波干馏方法是开发页岩油的有效手段[J].天然气工业,2012,32(9):116—120,139—140.
- [22] 李隽,汤达祯,薛华庆.中国油页岩原位开采可行性初探[J].西南石油大学学报:自然科学版,2014,36(1):58—64.
- [23] 杨兆中,朱静怡,李小刚.微波加热技术在非常规油资源中的研究现状与展望[J].化工进展,2016,35(11):3478—3483.
- [24] JOHN F, JEBRAEEL G, MOHAMAD H, et al. Thermal simulation of shale gas recovery involving the use of microwave heating[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 186, March, Article 106768: 186.
- [25] ZHU J Y, YANG Z H, LI X G, et al. Application of microwave heating with iron oxide nanoparticles in the in-situ exploitation of oil shale[J]. Energy Science & Engineering, 2018, 6(5): 548—562.
- [26] ZHU J Y, YANG Z Z, LI X G, et al. Evaluation of different microwave heating parameters on the pore structure of oil shale samples[J]. Energy Science & Engineering, 2018, 6(6): 797—809.
- [27] 高涛,赵静.不同温度作用下油页岩内部孔隙结构精细表征[J].中国矿业,2018,27(12):153—156.
- [28] 孙灿辉.油页岩热重干燥特性分析[D].吉林:东北电力大学,2017.

(下转第 292 页)

Research on Causation Analysis and Preventive Measures of the
Accidents of Grain Burying Based on the "2-4" Model

CUI Peng-cheng, ZHANG Tao, CHEN Xin

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: The incidence of people buried in grain dumps is high, and the rate of survivors is low. In order to study the causation of accidents and preventive measures, 46 accidents involving people buried in grain piles were analyzed using the "2-4" model. First, the direct and indirect causation of the accident were analyzed from the individual level. Second, the basic causation and root causation of the accident were analyzed from the organizational level. Finally, the causation chain of the accident of the people buried in the grain pile and propose preventive measures were built. The results show that unsafety actions such as working on the surface of unstable grain piles, inadequate safety training, and unsafety physical conditions such as unreasonable design of the grain board are the direct causations of the accident; insufficient safety knowledge, low safety awareness, and poor safety habits are the indirect causation of the accident; the lack of safety inspection system, outsourcing management system, safety facilities, equipment management system, arching, and the lack of operation procedures to deal with arching and wall-mounting, and the lack of grain storage operations procedures are the root causes of accidents; the root causation of accident is the lack of safety culture.

Key words: 2-4 model; buried in grain dumps; causation analysis; preventive measures

(上接第 263 页)

Effect Law of Microwave Thermal Effect on Thermal Damage of Shale Structure

LI Hong-zhao¹, CHEN Yan-qi¹, HE Le-ping², QU Yan¹

(1. School of Civil Engineering and Mapping; 2. State Key Laboratory of Petroleum Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: As a kind of unconventional oil and gas resources, shale oil and gas resources are difficult to exploit and have low economic benefits due to their low porosity and permeability. In recent years, microwave as a new heating technology in shale oil and gas production has gradually been paid attention to and carried out a series of studies. Microwave thermal effect can destroy the rock structure, improve the permeability of oil and gas effectively, reduce the difficulty of extraction, and study the process and mechanism of thermal damage of shale under microwave irradiation is of great significance to the exploitation of shale oil and gas resources. In this study, the self-made microwave heating equipment was used to carry out irradiation tests on shale, and the influence of irradiation temperature (500-900 °C) on shale structure damage was investigated. The microstructure of shale under microwave irradiation and the evolution of mineral crystal phase were revealed by means of scanning electron microscope, X ray diffraction spectrometer (XRD), X ray fluorescence spectrometer (XRF) and comprehensive thermal analyzer (TG-DSC), and the relationship between microwave irradiation temperature and its porosity was established. It is shown that microwave irradiation can cause irreversible thermal damage to shale, increase the cracks and pores of shale, open the percolation channel for shale oil and gas migration, and reduce the difficulty of exploitation of shale oil and gas resources. The results of this study are of great significance for the development of shale oil and gas resources by microwave heating.

Key words: shale; unconventional petroleum resources; microwave irradiation; high temperature; structural damage