

油气资源的太赫兹光谱检测与评价*

金武军 赵昆[†]

(中国石油大学(北京)理学院 全国石油和化工行业油气太赫兹波谱与光电检测重点实验室
北京 102249)

2013-08-22收到

[†] email:zhk@cup.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20131204

Detection and evaluation of oil and gas resources by terahertz spectroscopy

JIN Wu-Jun ZHAO Kun[†]

(Key Laboratory of Oil and Gas Terahertz Spectroscopy and Photoelectric Detection, CPCIF, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

摘要 油气资源作为重要的战略资源,对于国家的经济和社会的可持续发展具有十分重要的意义。石油天然气工业目前面临的诸多困难和挑战对现有的科学技术和方法提出了更高的要求。太赫兹技术作为一项新兴的探测和表征技术,已经从最初的石油化工产品的检测逐步渗透到油气勘探与评价、油气开采与检测等油气领域的中上游环节,显示出良好的应用前景,其在石油天然气工业中的产业化推广和应用值得大家期待。

关键词 太赫兹技术,石油天然气,应用

Abstract Oil and gas are significant strategic resources for sustainable development of both the economy and society in China. The difficulties and challenges facing the oil and gas industry place higher demands on the existing methods and technology. As a rapidly developing tool for prospecting and evaluation, terahertz technology has progressed from initial detection of petrochemical products to upstream and midstream sectors of the oil and gas field, including oil prospecting and evaluation, exploitation and detection, and so on. The oil and gas industries have expressed great interest in the promising applications, and wider commercialization of terahertz technology is to be expected.

Keywords terahertz technology, oil and gas, applications

1 引言

石油和天然气是非常重要的战略资源,由于其在世界能源消耗中所占的重要地位及其广泛用途,被誉为“工业的血液”。作为一种不可再生的化石能源,石油的可持续稳定供应受到了全球范围内的广泛关注和普遍重视。历史上爆发的几次石油危机均对世界经济和区域安全产生了极大冲击。为了占有并控制某一地区的石油资源,甚

至引发了战争,近年来,世界上主要的几个大国对北极圈所展开的竞争与北极圈地区所蕴藏的丰富油气资源有着密切的关系。

当前,在世界一次能源的消费中,石油和天然气的比例分别为33.6%和24%,二者之和占据了世界能源消费的半壁江山,超过了煤炭、水电、核能及可再生能源的总和,可以预见,石油和天然气在今后的几十年中将仍是世界范围的主

* 国家重大科学仪器开发专项(批准号:2012YQ140005)

导能源。2010年,世界石油的探明储量为1888亿吨,年消费量为40.3亿吨,可采年限为46.8年;天然气探明储量为187.1万亿立方米,年消费量为3.2万亿,可采年限为58.4年。然而,石油和天然气在世界范围内的分布很不平衡。以石油为例,中东地区集中了世界石油储量的55%,北美地区次之,占世界的15.8%;亚太地区的石油储量仅占世界的2.6%,而石油消费量却高达32.4%。因此,从世界范围来看,石油的供需矛盾十分突出。

世界石油和天然气剩余可采储量和可采年限的稳定主要依靠新油田、新层位和非常规油气资源的发现和开采。时至今日,世界上尚有一些地区或盆地的某些层位还未做资源评价,特别是广泛分布的古生界油气资源十分丰富。非常规油气资源包括油砂、稠油、页岩油、页岩气、煤层气、致密砂岩气和天然气水合物等,能否成功开采与技术创新和新方法的应用有着密切的联系。

建国以来,经过几代石油地质工作者的艰苦努力,新中国的石油工业取得了巨大成就。1959年大庆油田的发现,极大地增加了我国的石油产量,伴随着其他油田的相继发现和投产,我国也逐渐进入世界产油大国的行列,至今已经连续35年保持在一亿吨以上,并逐步稳定在二亿吨的水平。尽管我国的石油产量每年都有较大幅度

的增长,但是由于消费量的强劲增长,使得我国石油的供应呈现出供不应求的紧张态势,油气对外依存度不断攀升。石油的安全生产和稳定供应仍然关系到整个国民经济的健康持续发展。与国外不同的是,我国的石油资源存在地质条件复杂,地表条件多样,油气资源富集程度低,油气埋藏较深以及原油含水率较高等特点,这些特点决定了中国油气资源勘探开发的难点及成本,我们必须依靠新理论、新方法、新技术、新工艺来解决勘探开发过程中存在的各种难题,从而尽可能低的降低成本,提高油气生产效益。近年来,勘探新的油、气区域和勘探地层深部、海洋、海外区块的油气资源工作取得进展,以及各种非常规油气资源的陆续发现和规模开采,这些都是依靠新方法和新技术来实现稳产增产的有力例证。

太赫兹(THz)波是电磁波谱家族中最为年轻的成员^[1-7]。与其他技术相比,太赫兹具有时间分辨率高、频带宽、辐射能量低、可实现相干测量等优点。通过对太赫兹与物质相互作用的研究,能够获取所研究物质丰富的物理和化学信息,从而对所研究的对象进行探测和表征。近年来,各种新型太赫兹器件与仪器的问世为太赫兹技术的实际应用奠定了坚实的基础。在油气领域,太赫兹方法和技术的应用已初现端倪,并逐渐发展成为一项针对性强、特色鲜明

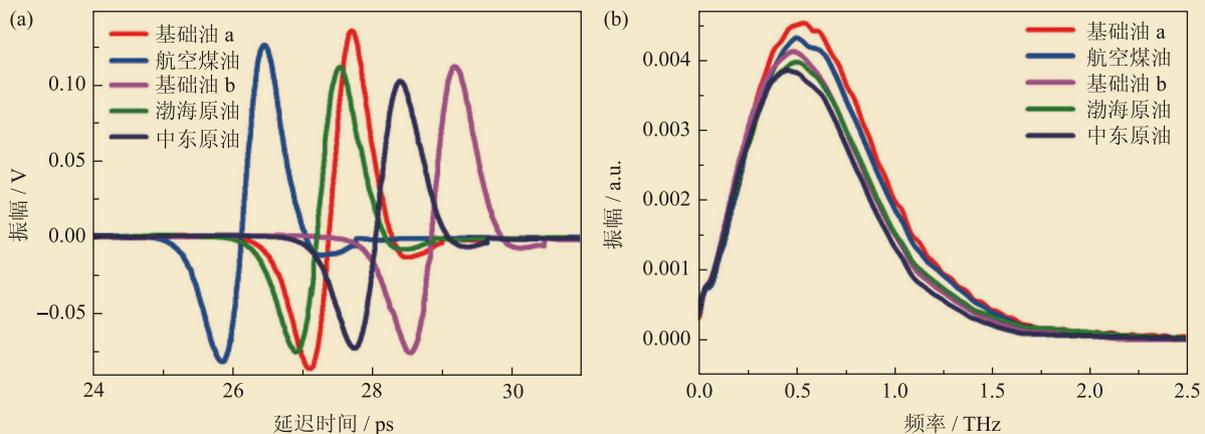


图1 不同原油和油品的太赫兹时域光谱(a)和频谱(b)(图中基础油a和基础油b是两种成分相似、粘度不同的基础油)

的新型实用技术。

我们知道,一些物质的振动和转动频率位于太赫兹波段范围,当物质和太赫兹波相互作用时,物质的振动和转动在太赫兹频段处发生共振,从而引起对特定频段处太赫兹波的吸收,也就是说,如同红外光谱一样,太赫兹光谱亦能提供物质的指纹谱特征。起初,太赫兹方法主要用来对油品种类和性能进行识别和预测^[8-12],由于不同种类的油品对太赫兹波具有不同的折射率和吸收,这就导致了不同油品的太赫兹折射率和吸收系数的差异,通过对这两个参数进行更加深入的分析,可实现油品种类的精确鉴定。由于炼油工艺水平的差异,不同国家的同一油品的太赫兹光谱存在一定的差异,这些差异的原因来自于不同国家油品之间所含成分或杂质的不同,即油品中微量杂质含量能在太赫兹光谱中得到体现。上述研究结果表明,太赫兹技术既可用于油品种类的鉴别(见图1),又可用来实现对油品质量和纯度进行精确鉴定。在国内,中国石油大学(北京)的太赫兹研究人员针对国家石油石化领域对新型光谱技术的重大需求,实现了油品理化性能(燃烧性能、硫含量、凝点、外场调制等)、油品种类鉴别的太赫兹光谱检测和表征,建立了涵盖整个石油产业链的太赫兹光谱数据库(包括储层岩石、干酪根、不同产地原油、重质油、汽油、柴油、生物柴油、燃料油、润滑脂、润滑油、石蜡、沥青、树脂、合成纤维、合成橡胶、石油添加剂、有机溶剂、固化剂、催化剂、烃类分子),为制定《油气资源与产品的太赫兹光谱方法检测》行业标准奠定了基础^[13-16]。

随着油气领域对新方法和新技术需求的不断增大,太赫兹在石油领域应用研究的广度和深度也在不断扩展,并从油气工业的下游环节逐步走向油气勘探开发、油气运输等中上游环节,成为解决油气探测和生产过程中诸多重要难题的新手段。下面围绕油气领域的上游环节对太赫兹方法及技术的研究现状和应用潜力进行概述。

2 油气勘探与评价

大多数地质学家认为,石油是地下有机物质通过漫长的压缩加热和复杂地质作用过程逐渐形成的,其形成需要特定条件以及漫长的时间,因此被视为不可再生资源。岩石有机质的研究对于了解石油天然气的演化过程和油气预测都具有重要的意义,因而受到石油地质工作者的关注和重视。干酪根是岩石有机质的主体,约占总有机质的80%—90%,研究认为,80%以上的石油烃是由干酪根转化而来的。干酪根有固定的化学成分却没有固定的分子式和结构模型,在不同的沉积环境中,由不同来源的有机质形成的干酪根,其性质和油气生成潜力差别很大。根据生油和生气潜力的不同,可将干酪根划分为三种主要类型:腐泥型、中间型和腐殖型,其中腐泥型干酪根生油潜能大,中间型的干酪根生油潜能中等,腐殖型干酪根对生油不利,却可成为有利的生气来源。干酪根类型的划分对于评价烃源岩生油生气潜能具有重要的意义。镜质体反射率($R_0\%$,即镜质体表面反射光与入射光的比率)是描述干酪根成熟度的有效指标。宝日玛等人首次将太赫兹技术引入到干酪根演化过程的研究中,分别对不同演化过程的干酪根进行了太赫兹时域光谱测量,对干酪根的油气生成点进行了判定,并与地球化学中表征干酪根成熟度的镜质体反射率做了对比(如图2)^[17]。研究表明,太赫兹频率下干酪根的吸收系数能够指示干酪根演化过程中的油气生成点,实现对干酪根的生油生气阶段和潜能进行快速预测。

对含油气储层岩石进行表征和评价,是石油勘探工作者的核心任务。对于储层岩石的表征,目前已发展了地震波、电磁波、电阻率、声波、放射性、核磁共振等多种探测方法。这些方法各有优缺点并互为补充,能够从不同的方面和角度实现对储层油气产能的综合评价。太赫兹作为一种全新的测量方法,也可用来对储层性质及其内部构造形态进行表征,例如,岩石的岩性、电

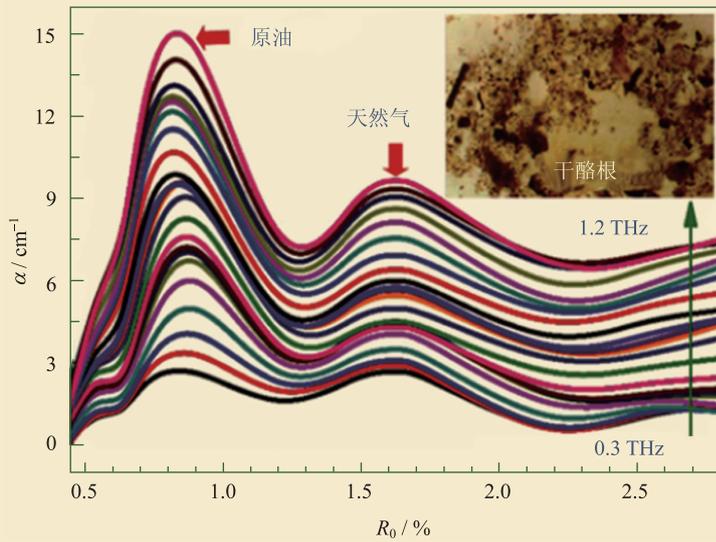


图2 与镜质体反射率 R_0 相关的不同成熟度干酪根的太赫兹吸收系数 α

为基础, 结合地质、地震资料、岩心分析资料以及开发过程中的动静态资料等, 从测井角度综合评价含油气储层, 查明复杂岩性储层的参数计算方法、流体性质判别以及解决面临的某类特殊地质问题等。在所有的含油气储层中, 碳酸盐岩储层通常具有较强的非均质性和各向异性, 通常情况下, 其岩性也比较复杂, 无论是储层参数评价还是流体性质评价, 都有很多的难题需要解决。太赫兹波是介于红外和微波之间的一种新型的电磁波, 其在电磁波谱中的特殊位置决定了它具有其他电磁波所不具备的特点

性和优势, 比如分辨率高, 频带宽, 可同时提供振幅和相位信息等。中国石油大学(北京)太赫兹研究人员分别从正演模拟和实验出发, 研究了太赫兹波在各类岩石中的传播规律及

性和优势, 比如分辨率高, 频带宽, 可同时提供振幅和相位信息等。中国石油大学(北京)太赫兹研究人员分别从正演模拟和实验出发, 研究了太赫兹波在各类岩石中的传播规律及

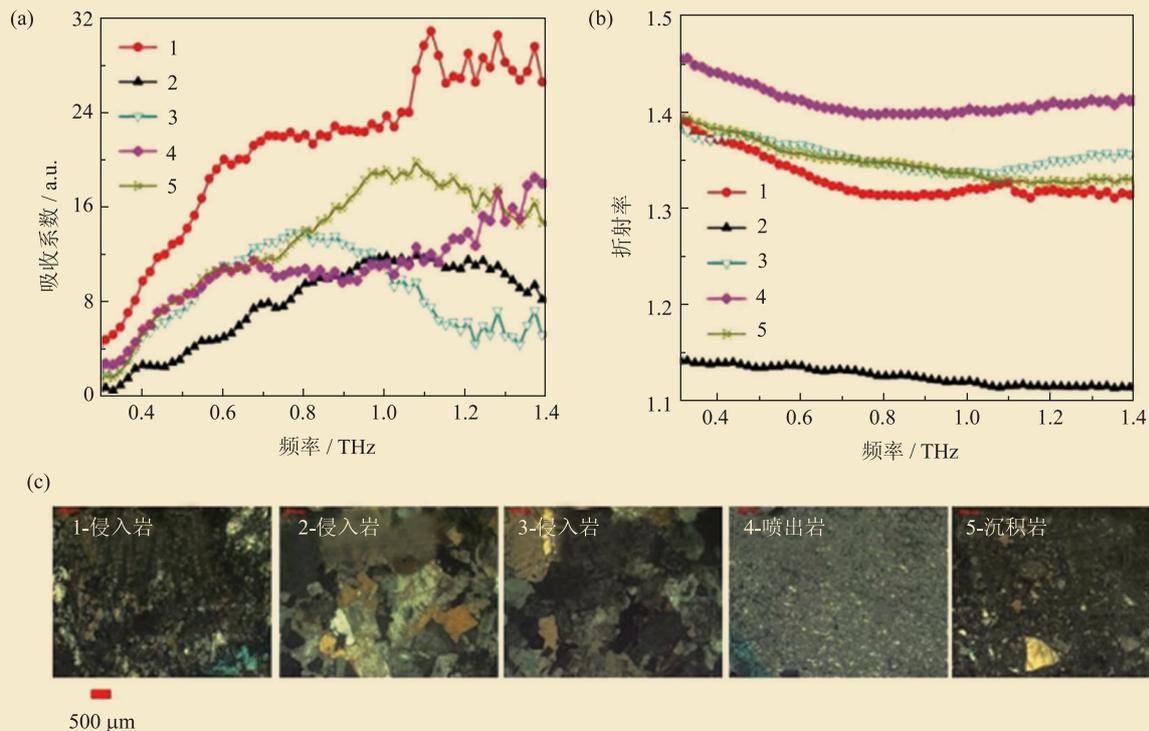


图3 5种不同类型岩石的太赫兹吸收与折射光谱

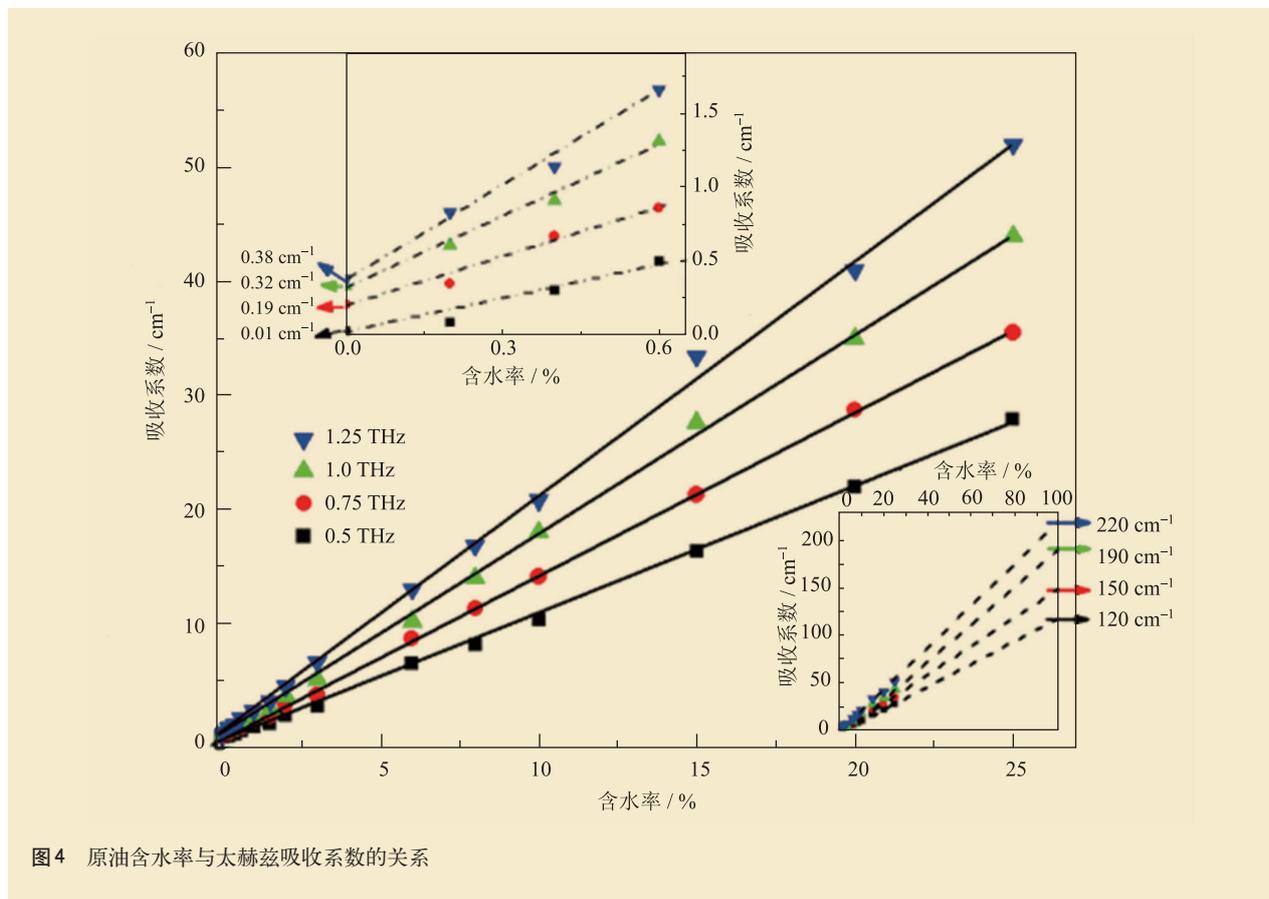


图4 原油含水率与太赫兹吸收系数的关系

其与岩石的相互作用机制，并开展了太赫兹技术在岩石孔隙度测量、孔隙类型识别、非均质性和各向异性评价等方面的实验工作，为油气储层太赫兹技术评价奠定了理论和实验基础。

在国外，太赫兹方法也被用来对岩石等进行研究。例如，Rice大学的研究人员使用单循环太赫兹脉冲，模拟了地球物理勘探的数据采集和成像处理过程，通过克希霍夫(Kirchhoff)偏移对物体进行了太赫兹反射成像，成像结果清楚地重建了物体的位置和形状。此外，基于太赫兹的建模不像地震波建模那样需要很大的物理模型，整个模拟过程在单个的实验平台上就可以方便地实现^[18]。Scales等人对岩石和岩石内部的流体进行了亚太赫兹波段的介电测量，由于该波段的电磁波长很短，使得测量结果具备很好的空间分辨率，便于对岩石的组分和微结构进行分析，与此同时，由于测量速度较快，有利于观测岩石内部流体的蒸发和毛细管流动等动

态过程^[19]。由于具有较高空间分辨率和宽频带的优点，太赫兹方法有望发展成为岩石孔隙结构和各向异性的一种快速评价方法。

3 油气开采及检测

对油气储藏获得了充足的认识并确定其具有经济开采价值之后，便可制定相应的开发方案将油气采出到地面。在地层中，原油、天然气和地层水经常存在伴生关系，因此井下产出液体通常是油、气、水的两相或多相混合物，其中以油、水两相混合物的情况居多。实际中，经常通过井下流体参数的测量来获取油气储藏的产油产气数据，从而为油气井的稳产增产提供保障。无论是井下流体还是采出地面的原油，其含水率的测量都十分重要。实验证明，利用太赫兹技术不仅可以实现原油痕量含水率的检测(如图4所示，图4表明原油含水率(0.1%—25%)与太赫兹吸收系数

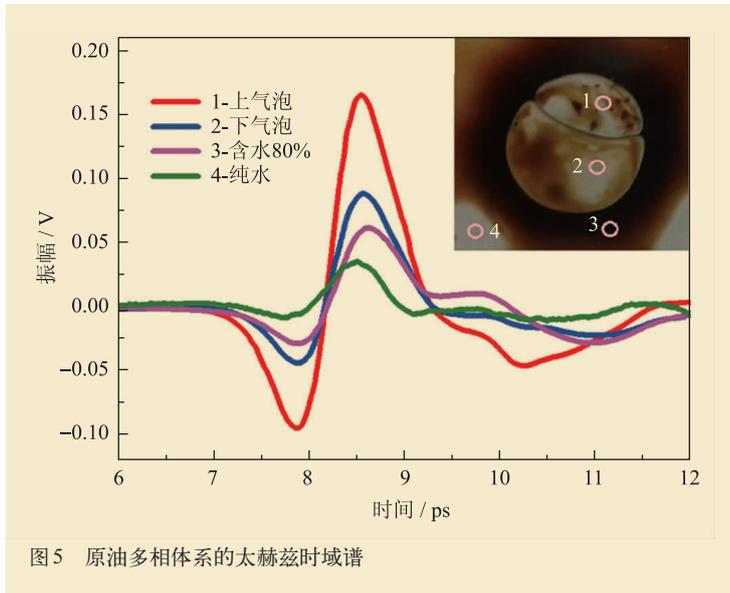


图5 原油多相体系的太赫兹时域谱

之间具有线性经验关系), 而且可以检测高含水原油多相体系(如图5所示)。

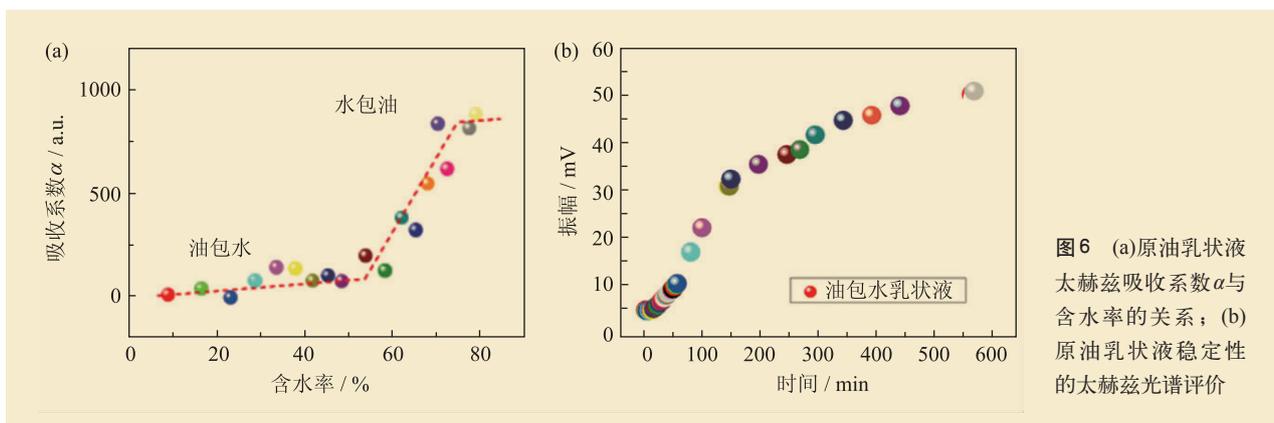
地下原油的开采过程实际上是通过各种物理、化学等方法将储层岩石孔隙、裂缝中的原油驱替出来的过程。根据岩石亲水亲油性和润湿性的不同, 需要选择不同类型的驱替液对岩石中的流体进行驱替。这些驱替液通常为油、水、乳化剂相互混合而成的乳状液, 其稳定性对于驱替效果有着重要的影响。此外, 地下原油在经历了岩石、井眼、油管等的传输后通常也以乳状液的形式存在, 当原油采出到地面以后, 需要对其进行脱水处理, 这个过程的实质为原油乳状液的破乳过程。综上所述可知, 乳状液是石油生产过程中普遍存在的一种体系, 其稳定性的评价十分重要。在乳状液稳定性的评价中, 很多时候都是

通过目测的方法来观察其油、水分离的快慢程度, 并以此来评价所配制的乳状液的稳定性, 显然, 这种方法只能做到定性或半定量的评价。研究表明, 太赫兹波对乳状液的乳化和破乳过程十分敏感, 太赫兹时域光谱技术不仅能给出乳状液破乳过程快慢的定量信息, 而且还能给出乳状液中油水液滴的相对分布信息。图6给出了原油乳状液太赫兹吸收系数 α 与含水率的关系, 以及油包水乳状液破乳过程的太赫兹时域光谱观测曲线, 在破乳的不同阶段, 其相对速率可通过太赫兹时域信号的强度直接体现。

4 结束语和展望

经过近三十年的发展, 太赫兹理论、方法和技术正逐步走向成熟, 各种高效、微型、实用的太赫兹辐射源、探测器及其相关器件的不断涌现为太赫兹技术的实际应用奠定了坚实的硬件基础。除了太赫兹光谱技术之外, 太赫兹成像技术也在快速发展, 逐渐成为物质和材料表征的一种新型实用技术。

本文从石油天然气生产的主要环节对太赫兹技术在油气资源领域的研究现状和应用前景进行了分析和阐释。作为一种新型的分析 and 表征手段, 太赫兹技术能够弥补现有方法和技术的缺陷和不足, 为油气生产提供更加全面而丰富的重要

图6 (a)原油乳状液太赫兹吸收系数 α 与含水率的关系; (b)原油乳状液稳定性的太赫兹光谱评价

信息。在油气领域，太赫兹技术的应用已经逐步深入到勘探开发等上游环节，成为油气资源评价和油气开采及运输过程检测的具有重要的潜力的技术。在今后的几十年中，太赫兹技术一定能实现其在油气资源领域内的规模化应用，从而为石油工业的新发展贡献力量。

参考文献

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Nature Material, 2002, 1: 26
- [2] Fleming J W. IEEE Trans Microwave Theory Technol., 1974, 22: 1023
- [3] Siegel P H. IEEE Trans Microwave Theory Technol., 2002, 50: 910
- [4] Tonouchi M. Nature Photon., 2007, 1: 97
- [5] Baxter J B, Guglietta G W. Anal. Chem., 2011, 83: 4342
- [6] Han P Y, Tani M, Usami M *et al.* J. Appl. Phys., 2001, 89: 2357
- [7] Beard M C, Turner G M, Schmuttenmaer C A. J. Phys. Chem. B, 2002, 106: 7146
- [8] Al-Douseri F M, Chen Y Q, Zhang X C. Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27: 481
- [9] Jin Y S, Kim G J *et al.* J. Korean Physical Society, 2008, 53 (4): 1879
- [10] Ikeda T, Matsushita A, Tatsuno M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 87: 034105
- [11] Naftaly M, Foulds A P, Miles R E. Int. J. Infrared Millimeter Waves, 2006, 26: 55
- [12] Gorenflo S, Tauer U, Hinkov I *et al.* Chem. Phys. Lett., 2006, 421(4—6): 494
- [13] 田璐, 赵昆. 现代科学仪器, 2011, 6: 5
- [14] Tian L, Zhou Q L, Jin B *et al.* Sci. China Ser. G: Phys. Mech. & Astron., 2009, 39: 1938
- [15] 宝日玛, 赵昆, 田璐等. 中国科学G辑:物理学、力学、天文学, 2010, 40: 950
- [16] Zhao H, Zhao K, Tian L *et al.* Sci. China Ser. G: Phys. Mech. & Astron., 2012, 55: 195
- [17] 宝日玛, 吴世祥, 赵昆等. 中国科学G辑:物理学、力学、天文学, 2013, 56: 1603
- [18] Dorney T D, Rossow M J *et al.* Geophysics, 2003, 68(1): 308; Dorney T D, Johnson J L *et al.* Optics Letters, 2001, 26(19): 1513
- [19] Scales J A, Batzle Michael. Appl. Phys. Lett., 2006, 88: 062906



住友重机械 极低温制冷机



主要应用领域:
低温恒温器
超导磁体
冷却样品
小型氦液化器

RDK-408D2(1W@ 4.2K)
全球销量 30,000 台!
业界 No.1!

- 操作简便, 一键启停
- 体积小, 结构紧凑
- 低振动
- 可连续工作 10000 小时以上
- 无方向性

型号		制冷量 (频率 50/60Hz)	
		第一级	第二级
4K GM	RDK-101D	3.0/5.0 W @ 60 K	0.1 W @ 4.2 K
	RDK-305D	15/20 W @ 40 K	0.4 W @ 4.2 K
	RDK-205D	3.0/4.0 W @ 50 K	0.5 W @ 4.2 K
	RDK-408D2	34/44 W @ 40 K	1.0 W @ 4.2 K
	RDK-415D	35/45 W @ 50 K	1.5 W @ 4.2 K
4K 脉管	RP-082B	40W @ 45 K	1.0W @ 4.2 K
	RP-062B	30W @ 65 K	0.5W @ 4.2 K
10K ~20K GM	CH-204N	N/A	2.5/3.0 W @ 10 K
	RDK-408S	30/35 W @ 45 K	5.4/6.3 W @ 10 K
	CH-202	7.3/8.8 W @ 77 K	1.8/2.2 W @ 20 K
	CH-204	13.5/16.2 W @ 80 K	6.7/8.1 W @ 80 K
	CH-208R	65/80 W @ 77 K	6.0/7.5 W @ 20 K
	CH-208L	28/35 W @ 77 K	8.0/10 W @ 20 K
40K ~80K GM	CH-210	110/120 W @ 77 K	6.0/7.0 W @ 20 K
	RDK-400B	N/A	54/70 W @ 40 K
	RDK-500B	N/A	80/100 W @ 30 K
	CH-104	N/A	34/42 W @ 77 K
	CH-110	N/A	175/200W @ 77 K

住友重机械工业株式会社
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

www.shicryogenics.com

住友重机械工业管理(上海)有限公司

总部: 中国上海市虹桥路 1386 号文广大厦 10 楼, 200336
售后中心: 中国上海市闵行区紫秀路 100 号, 201103
电话: +86-21-6070-5200
传真: +86-21-6070-5086
邮箱: 销售 ZCryo_ChinaSales@shi.co.jp
售后 ZCryo_ChinaService@shi.co.jp