

激光共聚焦扫描显微检测技术在大庆探区 储层分析研究中的新进展*

孙先达^{1,2} 索丽敏³ 张民志¹ 王璞珺²

SUN XianDa^{1,2}, SUO LiMin³, ZHANG MinZhi¹, WANG PuJun²

1. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712

2. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

3. 黑龙江省八一农垦大学电子信息学院, 大庆 163001

1. Petrochina Daqing Oil Field E&P Research Institute, Daqing 163712, China

2. Earth Sciences' College, Jilin University, Changchun 130061, China

3. HJ August First Land Reclamation University, Daqing 163001, China

2004-12-24 收稿, 2005-08-05 改回

Sun XD, Suo LM, Zhang MZ, Wang PJ. 2005. New progress of Reservoir research by the technology of Laser Confocal Scanning Microscope analysis in The Daqing exploration area. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5):1479-1488

Abstract Laser Confocal Scanning Microscope analysis is a new technique for 3D micro-features of inclusions in rocks and minerals. It has many strong points that normal optics microscope and scan electron microscope do not have, such as simple sample making, layered scanning, 3D image reconstruct, clearly differentiate configuration and component between organism and mineral. Because of the technique having been used in the reservoir study in the exploration area of Daqing, we have reconstructed the 3D structure of reservoir pore and microcrack. After we have studied the distribution of organism in source rock and crude oil in reservoir, we found that crude oil form has important meaning to the study of watered-out sand. We also studied the character and the stage of secondary inclusion in fracture. Furthermore this method has been used in the study of Paleozoic microfossil, we have discovered spore fossil which has never be seen in the exploration area of Daqing. In the study of the mechanism of crude oil emulsification, we used the confocal technique to see the inner configuration of emulsified oil for the first time, by the dynamic analysis we can confirm its stabilities, this afford the scientific gist in the study of the mechanism of crude oil emulsification. The Laser Confocal Scanning Microscope analysis has made the unheard-of effect in the study of reservoir analysis in the exploration area of Daqing.

Key words Laser Confocal, 3D image reconstruct, Reservoir, Emulsified oil, Enclosure, Fracture Pore, Exploration area of Daqing

摘要 激光共聚焦扫描显微镜(Laser Confocal Scanning Microscope)分析技术是20世纪80年代末、90年代初兴起的一项新的光学显微测试方法,它具有普通光学显微镜和扫描电子显微镜不具备的很多优点,如样品制备十分简单、分层扫描和三维立体图像重建、清晰分辨有机和无机质等。我们将该技术应用到大庆探区的储层研究中,进行了储层孔隙和微裂缝的三维结构重建,对储层中原油形态进行了详细研究,其中原油形态观察对薄差水淹层的研究有重要意义,研究了裂缝中次生包裹体特征及形成期次,此外,该方法应用于微体古生物化石研究在大庆探区发现了以前本区未见的孢子化石种类,在原油乳化机理研究方面,首次应用共聚焦观察了乳化油的内部结构,通过动态分析可以确定其稳定性,这为乳化油乳化机理研究提供了科学可靠的依据。激光扫描共聚焦显微检测技术在大庆探区储层分析研究中取得了前所未有的效果。

关键词 激光共聚焦; 三维重建; 储层; 乳化油; 包裹体; 裂缝; 孔隙; 大庆探区

中图分类号 P618.130.2

* 本文受国家自然科学基金项目(40372066)资助

第一作者简介: 孙先达, 男, 1973年生, 大庆油田勘探开发研究院工程师, 现读吉林大学矿产普查与勘探专业博士研究生,

E-mail: sunxianda@petrochina.com.cn

1 引言

激光共聚焦扫描显微镜(Laser Confocal Scanning Microscope)分析技术是20世纪80年代末、90年代初兴起的一项新的光学显微测试方法,它集显微技术、高速激光扫描和图像处理技术为一体。该技术虽然属于显微镜分析技术范畴,但弥补了光学显微镜与扫描电子显微镜的不足,具有许多新的功能和优点,除放大倍数高(可达32000倍)、分辨率高(为普通显微镜的1.4倍),可以获得高清晰度、高分辨率的图像外,样品制备要求也十分简单。不仅可以观察到样品内部深层次的结构、构造,进行分层扫描和三维立体图像重建也是其主要的优点(张敏等,1995;应凤祥,2002;李楠)。

把激光共聚焦扫描显微镜应用于储层孔隙结构研究,是一项新的探索,以往主要应用普通显微镜下观察和图像分析以及柱塞孔隙度的测定、压汞法孔隙结构的分析和测量,他们都有一定的局限性并且分析过程比较复杂。该技术针对碎屑岩类或碳酸盐岩类储层的不同岩石孔隙结构进行二维和三维的分层扫描,从而获得岩石孔隙分布的二维和三维图像,并用专业的图像分析软件对图像进行定性和定量的分析、统计和计算(包括孔隙的形态、大小、连通性及面孔率等),最终获得岩石孔隙结构的二维和三维量化指标以及孔隙结构图像(罗平等,2002)。该方法已经应用于松辽盆地北部深层徐深6井天然气勘探储层评价微裂缝研究课题、英6井泥岩有机质分布研究、霍3井的石油包裹体研究等。

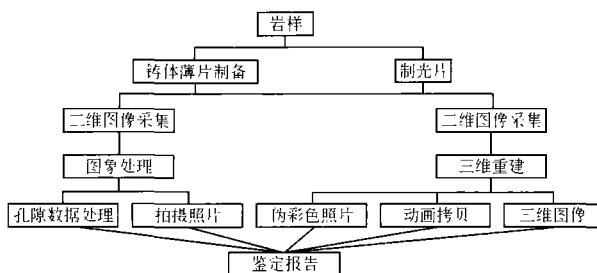


图1 激光共聚焦扫描显微镜分析、鉴定流程

Fig. 1 Flow of laser confocal scanning microscope analyse and appraisal

具体内容包括以下几方面:碎屑岩类、碳酸盐岩类储层适合的荧光充填剂的选择与确定;对岩石中孔隙的二维面孔率、三维孔隙度的精确测定;微孔隙和喉道三维立体图像及定量参数的获取方法;对岩石孔隙结构(微孔)的三维立体重建及分类;通过三维立体图像研究孔隙(微孔)的成因、演化以及对储层的影响。图1是激光共聚焦扫描显微镜分析、鉴定流程。

2 激光共聚焦扫描显微镜的分析原理和性能特点

2.1 基本原理

普通光学显微镜使用的是场光源,由于光散射的作用,标本上每一点的图像都会受到邻近点的衍射光或散射光的干扰,使所观测到的是一幅相干扰的图像,从而降低了信噪比,影响了图像的清晰度和分辨率,而激光共聚焦扫描显微镜(图2)恰好能够避免这些干扰。首先激光光束通过一个针孔光阑入射到样品的一个细微点上,避免了非照射区域产生光散射,而在发射光检测光路上放置了一个针孔,使发射光信号通过此针孔到达监测器。入射光源针对针孔和检测针孔的位置相对于物镜焦平面是共轭的,这样,来自焦平面的光可以通过检测针孔被检测到,而来自焦平面上、下的光被阻挡在针孔两边,这就是激光共聚焦的基本原理(冯志强等,2003)。

在共聚焦系统中样品被一个点光源照射成像。为了得到完整的样品结构信息,则必须使入射光点在垂直于显微镜光轴的焦平面(xy轴)上,沿样品逐点或逐线扫描,将每点扫描的图像信息经计算机采集、存储、处理和转换后合成一定大小的二维图像,这是扫描的基本原理。所得到的二维图像实际上是样品在微小厚度内的平面“切片”图像。如果再沿显微镜光轴(z轴)方向以一定的间距扫描出不同z轴位置的多幅xy平面图像,就可以用计算机处理“堆积”得到此扫描区域内样品的三维立体结构图像,即为三维重建(张敏等,1995)。

由上可知,光源的选择是十分重要的。而与其他电磁辐射的激发光源相比,激光已成为目前扫描共聚焦显微镜中最理想的光源。这是因为其具有高度的单色性、发散小、方向性强、亮度高和相干性好等独特的优点所决定的。

这样,用某一特定波长激光器为发射光源,在配有共聚焦扫描设备的光学显微镜下,对样品进行二维图像采集,再经过专门计算机软件的处理,得到样品的二维和三维图像,这就是激光共聚焦扫描显微镜的基本原理。

2.2 性能特点

激光共聚焦显微镜(图3)具有成像清晰、连续片层扫描及图像重组、多标记技术、动态观察、获得数字化信息等方面的特点,在分析和照相清晰度方面明显优于普通荧光显微镜。

激光作为共聚焦显微镜的光源是很有利的,因为它们具有高亮度、光束偏差小、容易聚焦和强度稳定的特点。稳定性对于荧光定量测量很重要。

因为氩离子激光器普遍的适用性和可靠性,它已成为一个标准的光源。另外一种可替代的激光器是氦氩离子激光器。氦氩离子激光器更适合一些由绿光激发的荧光探针。激光器对应激发波长见表1。

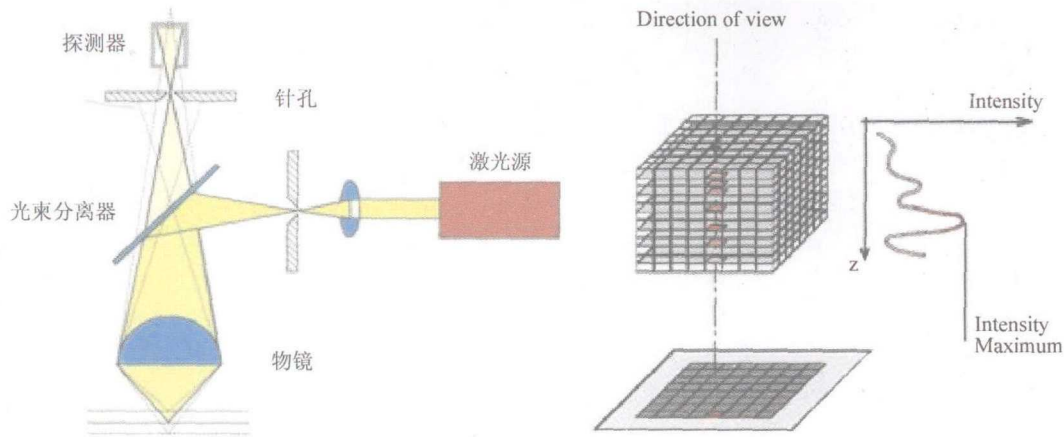


图2 激光共聚焦扫描显微镜原理及三维重建示意图(左图-原理示意图;右图-不同Z轴位置的XY平面扫描示意图)

Fig. 2 Elements of laser confocal scanning microscope and the sketch map of 3D image reconstruct

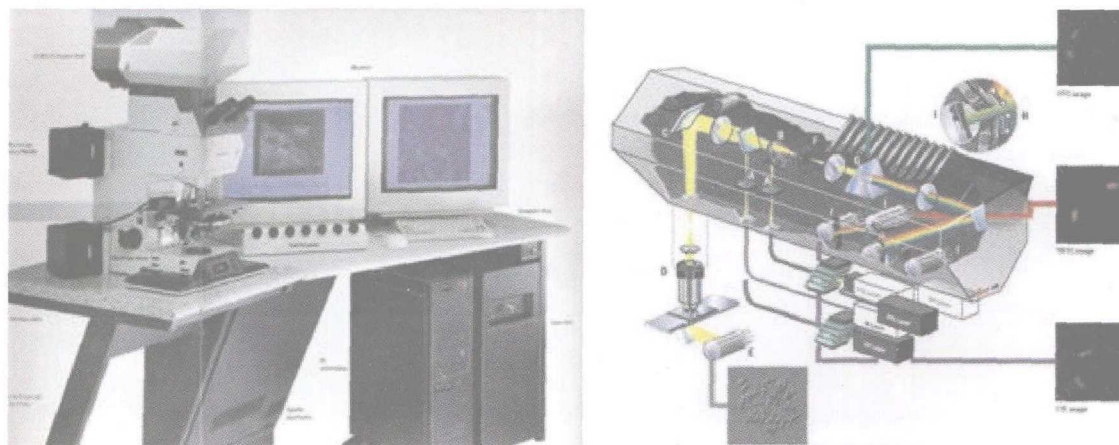


图3 Leica TCS SP型共聚焦显微镜基本结构图(左图-激光共聚焦扫描线显微组成结构图;右图-Leica TCS SP激光共聚焦扫描器内部结构图)

A. 照明针孔; B. 主分光器; C. 扫描反射镜; D. 物镜; E. 透射光光电倍增管; F. 三棱镜; G. 狭缝调节器; H. 荧光光电倍增管

Fig. 3 The basic configuration of Leica TCS sp of laser confocal scanning microscope

表1 激光器对应激发波长表

Table 1 Wavelength of laser

激光器	波长 (nm)
氩离子	458,476,488,514
氦氖离子	488,568,647

3 激光共聚焦扫描显微技术在大庆探区储层分析中的新进展

3.1 孔隙和裂缝精细观察及三维结构重建

3.1.1 实验条件

3.1.1.1 铸体材料的选定

铸体材料的确定是本方法进行孔隙结构研究的关键步骤之一,其材料的选定应满足以下几个条件:(1)铸体材料应

能够加压灌注使其能充满孔隙,尤其是微孔隙的充填;(2)铸体材料的荧光发光强度要适当。因为荧光太弱,采集不到信号,荧光太强,必然造成荧光信号之间的干扰,使微细结构不易分辨;(3)激光激发时能够发出荧光信号。经过试验,我们发现环氧树脂可以被激发出强度适宜的荧光信号。

3.1.1.2 仪器条件

为了保证采集图像的清晰度,开机后,仪器预热,稳定时间需要0.5~1h以上。通过大量的试验,我们认为在采集图像时还应注意以下几点:(1)为了防止光漂白现象的发生,同时使采集图像的光信号均匀分布,要求入射光栅打开程度要适合,并且检测光栅要与其匹配。(2)当入射光栅与检测光栅匹配时,图像扫描次数为7~10次即可获得较好的图像。(3)物镜的选择十分重要,往往能达到事半功倍的效果:一般用2倍物镜进行面孔率(孔隙度)的测定。当颗粒粒级细时(如粉砂或细砂粒级),采用10倍物镜进行测定,效果较好;

如 10 倍、20 倍、50 倍或 100 倍的高倍物镜则应用于微区放大、测量和三维重建的研究工作(罗平、应凤祥等,2002)。

3.1.2 样品分析研究

我们利用上述方法对松辽盆地深层碎屑岩储气层样品的孔隙结构和微裂缝特征进行了分析研究,松辽盆地深层徐家围子气田以徐深 1 井为中心控制的储量已超 1000 亿立方米以上,在对该气田储层孔隙和微裂缝进行研究时,通过普通岩石薄片和铸体薄片的观察,发现有些井的孔隙和裂缝发育并不好,很多微小孔隙似乎并没有连通,整体上孔隙连通性似乎很差,但是其产气量却很好,可以达到每天十几万方以上,该问题一直未得到很好的解释。为此,我们对该气田进行了激光共聚焦储层微观孔隙结构精细观察及三维图像重建,图 4 中的图版 a 至图版 f 分别是徐深 6 井井深 3556.2 米和 3555.1 米储气层样品的普通照片及重建图像成果。从中可以看出,同一样品的普通铸体薄片、共聚焦扫描、三维重建图像相比较,普通铸体薄片图像的孔隙结构,其颗粒间小孔分辨不清(图 4a,d),而激光共聚焦显微镜下显示的铸体孔隙结构,粒间小孔清晰可见(图 4b,e),再经图像重建后的三维立体孔隙结构,孔缝组合非常清晰(图 4c,f)。此外,经过大量的孔隙结构和微裂缝分析发现,在一般偏光镜下,由于粘土矿物吸附染色剂使其颜色或灰度不易与孔隙区分开,从而会造成面孔率的统计误差,而通过激光激发铸体荧光很好地地区分了颗粒之间的孔隙和粘土杂基等,更易于统计面孔率,也更精确地计算出了孔隙度和喉道参数。在微裂缝研究方面,偏光显微镜下未能显示或显示不清的微裂缝通过激光共聚焦观察清晰可见,进一步确定了储气层有利区带。这一分析结果很好地解决了松辽盆地深层储气层孔隙结构研究的疑难问题,为进一步勘探开发提供了确凿的岩石学证据。

3.2 储层中有机质分布、原油形态及成熟度和原油的乳化机理研究

3.2.1 孔隙中原油的分布形态及烃类组分特征

根据岩石的光学特性以及原油的荧光特性,我们用波长为 568nm 的可见光对样品进行扫描,由于岩石对激发光具有反射作用,原油对激发光吸收产生大于 568nm 的荧光,所以采用不同的通道分别接收反射光和荧光,通过软件分别还原出孔隙框架立体图像和孔隙中原油的立体图像。使我们可以从一个全新的角度对储层进行观察。

原油的重质组分——胶质沥青质的相界面有表面活性,可吸附在岩石表面,使岩石憎水和形成具有较高黏度和抗剪切弹性的界面层,这样一来,就会有很大一部分原油以膜状残留在地层中,降低原油的采收率。另外,开采高含胶质沥青质和石蜡的高黏重油时,其中的胶质沥青质和石蜡也易于被孔隙中的粘土矿物吸附并随之一同运移,从而沉积在地层的近井地带,大幅度降低地层的渗透率,造成地层堵塞(金熹高等,1996)。

原油的成分主要有:油质(这是其主要成分)、胶质(一

种粘性的半固体物质)、沥青质(暗褐色或黑色脆性固体物质)、碳质(一种非碳氢化合物)。在烃类中,单环、双环及稠环芳烃是石油的重要组成部分,且具有荧光特性,这些烃类因组分和粘度不同在激光共聚焦扫描图像上的表现可以完全不一样,而且十分清晰,因此,通过激光共聚焦扫描激发荧光的方法来观察原油不同有机组分的分布位置和形态,可以研究注水过程中驱油剂的驱油效果,这是一种新方法,并且非常有效,在油田开发方面具有重要意义,我们对大庆探区注水开发储层的水淹层样品进行了分析,如图 5 所示,a 为含油薄片激光共聚焦扫描图像,其中绿色部分 G 代表饱和烃类,为液态低链组分,吸附于矿物颗粒表面或孔隙壁上,其相应扫描曲线为 G1,I 为复合烃类组分,其中包括了沥青、芳烃和非烃类有机质,F 和 L 是其中芳烃类和沥青质的激光扫描曲线,蓝色圆点部分 U 为非烃类有机质组分,其相应扫描曲线为 U1,是从复合烃类中析离出来的,呈残留状存在于自由孔隙中(黑色部分),这是经水流冲刷的水动力综合作用的结果,从 c 的三维重构图像中可以更清晰地看出上述特征,这些研究结果将驱油效果和特征以及不同有机组分的分布位置反映得十分清楚,为持续注水开发的综合规划提供了直观有效的技术手段。

3.2.2 测算原油成熟度

我们选择了松辽盆地 6 口井的原油样品,首先对芳烃、饱和烃、非烃和沥青质的样品进行了扫描,可以看出它们有各自不同的曲线特征,饱和烃激光扫描曲线的特点是:500nm 处有一强峰,并随着 500nm 到 750nm 强度逐渐减弱,呈光滑的曲线;沥青质激光扫描曲线的特点是:在 525nm 和 540nm 有两处强峰,在 550nm、580nm、595nm、620nm 有四处弱峰,并随着 500nm 到 750nm 强度逐渐减弱;非烃激光扫描曲线的特点是:600nm、630nm、650nm 处有强峰,其中 630nm 最强,在 750nm 处有弱峰;

经过对激光波长扫描结果的详细研究,发现在 505nm、530nm、540nm、560 nm、580 nm、600 nm、620 nm、750 nm 处有强荧光信号出现,其中 505nm、530nm 两处的信号强度与原油的成熟度有一定的联系。我们用 505nm 处的信号强度比上 505nm 和 530nm 的信号强度之和,发现当比值大于 0.49 时属于成熟油,比值小于 0.49 时属于低熟油(见表 2)。

同时,我们通过把松辽盆地原油制成薄片在正交光下观察,发现有大量的旋光物存在,并且其粒径和含量有一定规律可循。一般未成熟油的旋光物平均粒径偏大在 20um 左右,含量一般大于 5%。而成熟油的旋光物平均粒径偏大在 10um 左右,含量一般小于 4%。成熟度越高其含量越低,如英 33 井原油含量 0.89%(见表 1)。

我们把此方法应用在海拉尔盆地 7 口井的样品分析中,成熟油的平均粒径小于 12um,含量低于 8%(由于不同地区的生油母质不同,所以用旋光物来衡量原油成熟度的标准不同)(图 6)。按此方法划分原油成熟度与其他方法划分一致(见表 3)。

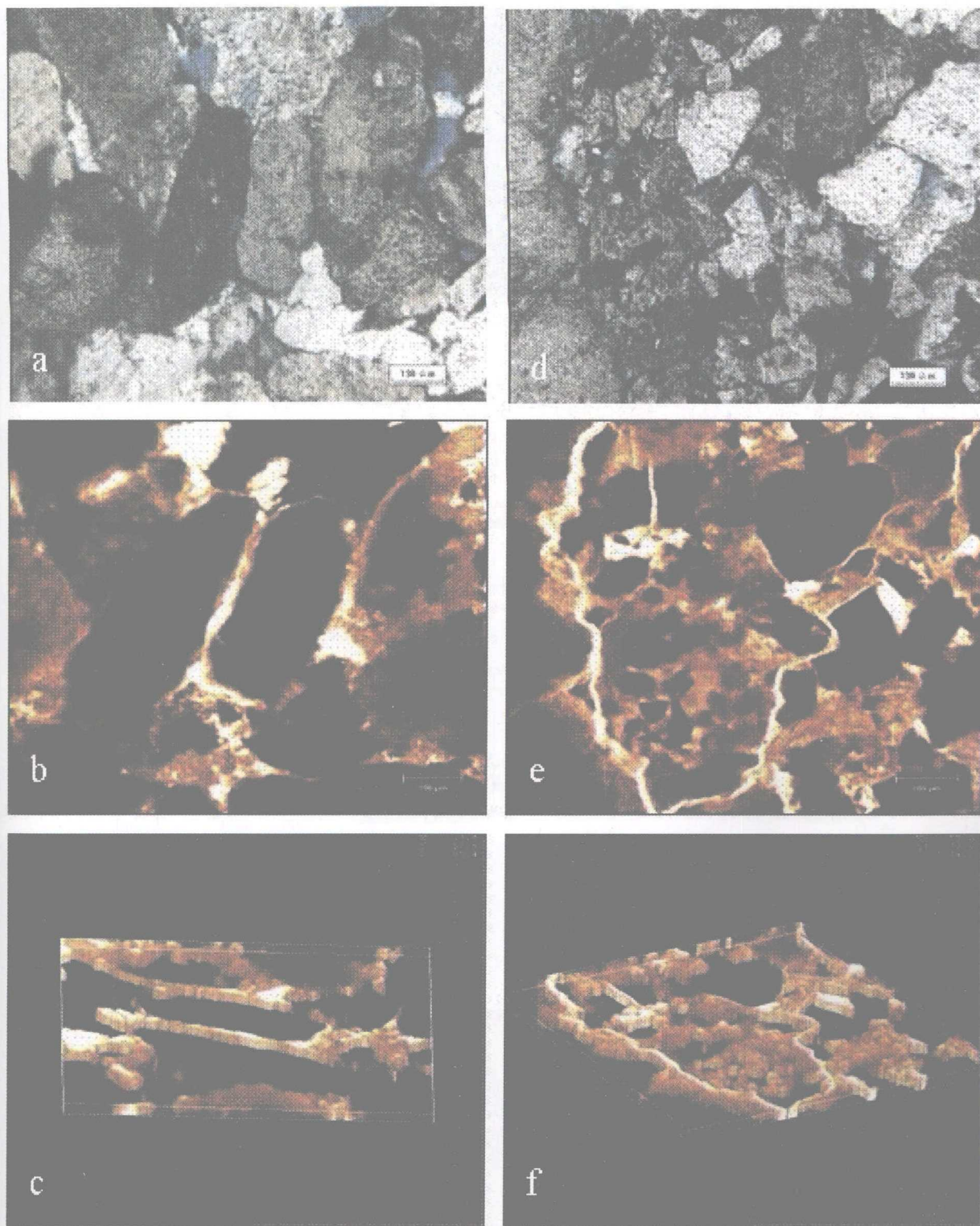


图4 徐深6井储气层样品的普通照片及共聚焦三维重建孔隙立体图像

(由于共聚焦和普通照片照相采用的接口不同,分别是PMT和CCD,所以采集的视域不能完全一致。)

a,b,c分别为3556.2m处一样品的普通铸体薄片、共聚焦扫描、三维重建图像;

d,e,f分别为3555.1m处一样品的普通铸体薄片、共聚焦扫描、三维重建图像。

Fig.4 The normal photo and 3d reconstruct image of gas bearing reservoir of the sample of Xushen 6 well

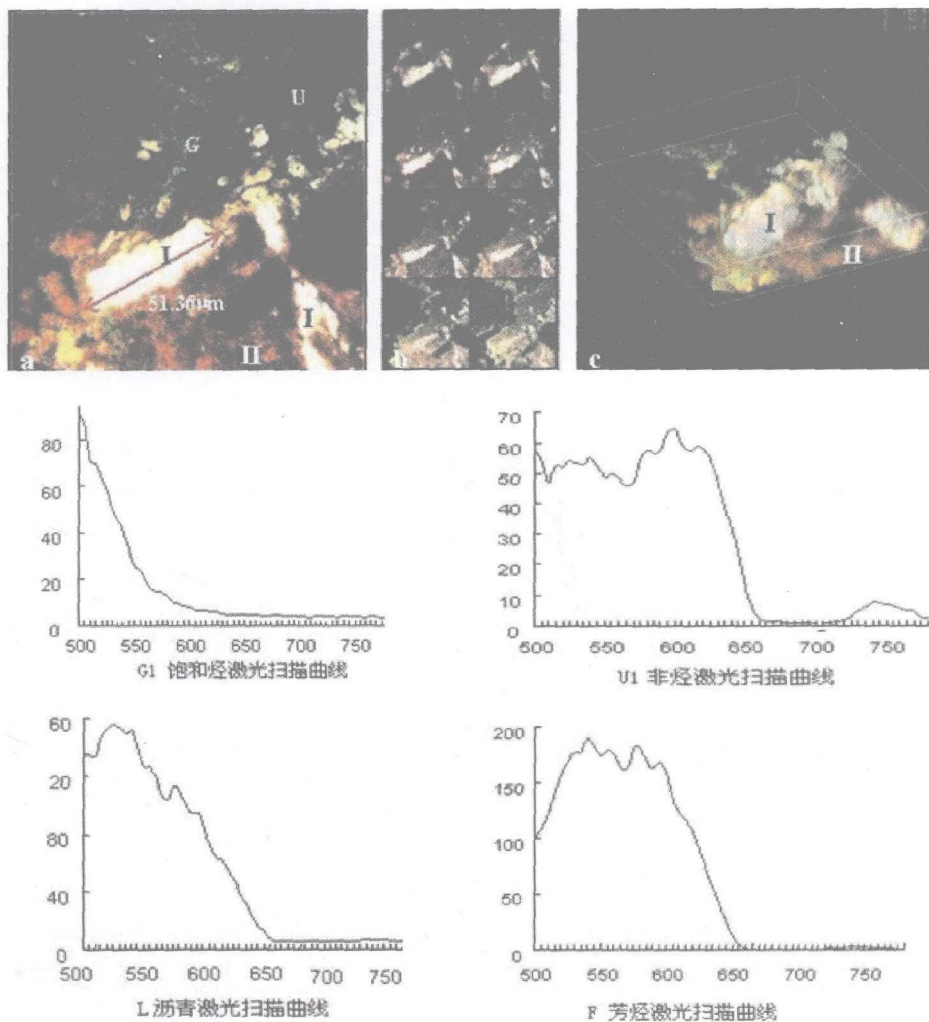


图5 含油薄片激光共聚焦扫描图像及成份曲线

I 吸附在岩石表面的原油; II 岩石颗粒

a 含油薄片激光共聚焦扫描图像; b 相同视域 Z 轴分层扫描系列图像; c 相同视域 45 度三维重建图像

Fig. 5 Laser confocal scanning image and the curve of component of oil-bearing flake

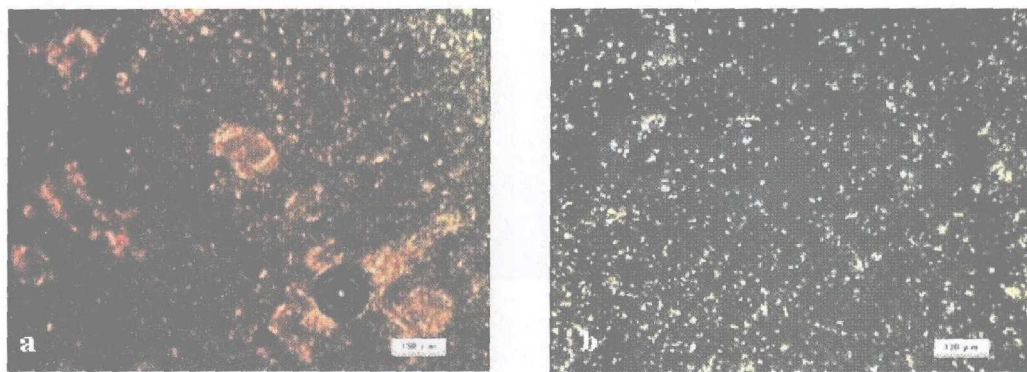


图6 海拉尔地区原油中旋光物照片

a - 舒 1 井原油正交光下旋光物照片, 为低成熟油; b - 贝 12 井原油正交光下旋光物照片, 为成熟油

Fig. 6 Image of polarisation in oil in the Hailaer exploration area

表2 松辽盆地原油色谱-质谱-激光扫描参数对比表

Table 2 The contrast of crude oil chromatogram-mass spectrum-laser scanning parameter of Songliao basin.

原油类型	井号	井深 m	层位	T _m /T _s	C ₃₁ 藿烷 22S/ (22S + 22R)	r-蜡烷/ C ₃₀ 藿烷	C ₂₉ 甾烷			激光扫描 光波长 i505/ (i505 + i530)	正交光下 旋光物的 平均粒径 (μm)	正交光下 旋光物 的含量(%)	
							C ₂₇ 甾烷 20S/ (20S + 20R)	20S (20S + 20R)	ββ/ (ββ + αα)				
未熟 ↓ 低熟油	长 20	1180.6 ~ 1267.8	F	3.40	0.58	0.25	0.26	0.32	0.22	1.02	0.461572	20.11	7.99
	双 23	778.0	F	2.25	0.58	0.15	0.21	0.18	0.15	1.03	0.480556	18.08	6.15
	熬 6	913.33 ~ 929.33	H	0.89	0.53	0.18	0.21	0.22	0.23	1.00	0.442974	20.45	5.10
	朝 108	916.2 ~ 921.6	F	0.67	0.59	0.18	0.42	0.45	0.40	1.16	0.496664	10.81	3.63
成熟油	英 16	1235.6 ~ 1230.8	H	0.57	0.56	0.35	0.43	0.58	0.61	1.27	0.490736	11.16	2.37
	英 33	1435.0 ~ 1439.0	H	0.54	0.62	0.04	0.32	0.43	0.43	1.55	0.534293	10.04	0.89

表3 海拉尔盆地原油色谱-质谱-激光扫描参数对比表

Table 3 The contrast of crude oil chromatogram-mass spectrum-laser scanning parameter of Hailar basin

原油类型	井号	井深 m	层位	C ₂₉ 甾烷		激光扫描 荧光波长 i505/ (i505 + i530)	正交光下旋 光物的平均 粒径(μm)	正交光下 旋光物的 含量(%)
				20S (20S + 20R)	ββ/ (ββ + αα)			
成熟油	贝 10	1956 - 1935	F	0.52	0.48	0.503611	11.36	5.64
	贝 12	1707.3 - 1701.18	F	0.47	0.45	0.489768	11.10	4.28
	贝 13	1583.0 - 1593.0	F	0.41	0.32	0.498469	9.53	4.52
	贝 16	1362.4 - 1438.0	F	0.46	0.45	0.487599	8.78	7.52
	贝 19	1411 - 1404	F	0.49	0.50	0.498635	8.01	2.21
	雀 3	2021 - 2029	F	0.49	0.55	0.534074	8.67	0.29
未熟油	舒 1	1268.6 - 1262.6	F	0.25	0.23	0.46605	30.94	10.25

3.2.3 原油乳化机理研究

在石油开采过程中,三元复合驱是一种高效的驱油方法。但在矿场试验中,采出液乳化严重时无法破乳,所以研究三元复合驱乳化原油的物理化学性质,搞清其内部结构,找出影响原油乳化的关键因素,具有非常重要意义。目前,研究乳化油体系形态结构最常用的方法有电子显微技术,如扫描电镜法(SEM)和透射电镜法(TEM)、X-射线光电子能谱法(XPS)、原子力显微镜法(AFM)、直接无辐射能量转移法(DET)等,这些方法中有的可以从分子水平上获得共混体系中各组份相互作用或形态结构的信息,但也各自存在一些局限性,如有的方法对样品的要求较为苛刻,制样比较复杂,而更主要的是它们或为表面分析方法,只能给出表面结构的信息;或者只能获得

宏观平均结构图象,如果要了解乳化油的层次形态结构及其分布,就要破坏样品,XPS虽可以给出表面以下的组成分布,但只能提供约100Å厚度以内的信息(顾惜人等,1999)。

激光共聚焦显微技术是一种无损的多层形态观测的新方法,它提供了有效的途径弥补上述各种手段的不足之处。其检测深度可达100μm,制样简单、快速、图象直观,通过共聚焦可以观察乳化油的内部结构,以及通过动态分析可以确定其稳定性,图7是大庆探区某乳化油样品的共聚焦图像,该图像所显示的乳化油的内部网状结构具有独到之处,该样品油包水的二维和三维结构特征清晰可见,这为乳化油乳化机理研究提供了科学可靠的依据,这也是共聚焦首次应用在原油乳化机理研究中。

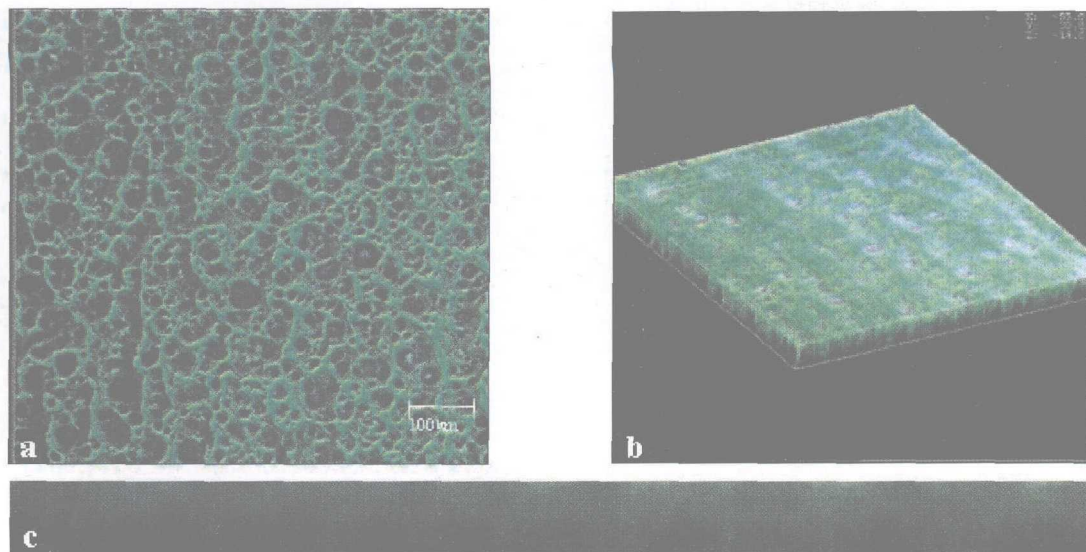


图7 大庆探区乳化油共聚焦图像

a - Extended 荧光重构图像由 32 层图像组成, 样品厚度 76.6 μm, 层间距 5.02 μm。format 512 X 512 X 32; ImageSize-990.1 X 990.1 X 76.6; Pinhole 1.04 μm; Objective 10 X 0.3NA dry PL FLUOTAR; b - 相同视域斜 45 度立体图像; c - 相同视域侧面图像

Fig.7 The image of confocal emulsified oil in the exploration area of Daqing.

3.3 有机包裹体三维成像、形成期次及有机质成熟度研究

激光共聚焦应用于有机包裹体研究,也是根据有机质被激光激发后产生荧光的性质。我们利用共聚焦波长扫描的功能,在不破坏样品的前提下,不对样品进行荧光染色,直接对包裹体进行点、面、层扫描,通过光电倍增管采集量化信息,这样我们不仅可以还原样品的三维立体图像,而且可以把样品内部不同层面及点的波长扫描特征反映出来。激光共聚焦的这些功能特点,非常有利于有机包裹体的研究(孙先达等,2004)。

储集层有机包裹体主要通过交代和重结晶作用而形成,由有机液体(石油)、气体(甲烷)、固体(沥青等)组成,主要分布在石英等颗粒内溶蚀缝或孔隙中,通过对有机包裹体的研究可以对油气运移时间、运移方向、运移通道、运移相态以及油气来源、工业油气藏的远景评价等问题进行研究。

以前观察有机包裹体采用普通荧光显微镜,最大可以放大 630 倍,对大于 1 μm 者可以观察,但对小于 1 μm 的包裹体就存在问题,而且不能对包裹体的成分进行分析。现在通过激光扫描共聚焦对大庆探区海拉尔盆地贝 30 井 井深 2100 米及霍 3 井 井深 2023.27 米有机包裹体样品进行了分析,激发波长采用 488nm,对 8.8 μm 范围内进行 32 层扫描,图 8 是霍 3 井 2023.27 米包裹体样品的三维成像及波长扫描特征曲线,由于放大倍数可以达到 1 万以上,所以可以更清晰直观地观察包裹体的立体形态,与普通荧光显微镜相比,具有明显的优势。

另外,通过波长扫描曲线图可以分析包裹体中有机质成熟度,用 505nm 处的信号强度比上 505nm 和 530nm 的信号

强度之和,即 $i505/(i505 + i530)$ 参数比,发现当该比值大于 0.49 时,包裹体中有机质以轻烃为主,属于成熟油。当该比值小于 0.49 时,包裹体中有机质以重烃为主,属于低成熟油,从霍 3 井 2023.27 米包裹体样品的波长扫描曲线及参数比特征可以明显区分出三种不同成熟度的有机包裹体,其中(a)为成熟油,另两个都是低熟的(b和c)。

3.4 应用于微体古生物化石研究

孢粉学是研究植物体上的孢子和花粉的一门科学。广义孢粉学还包括各种低等植物的个体,如各种单细胞的藻类。广义孢粉学在石油地质研究领域应用很广,如利用孢粉化石对地层进行划分对比、推断古气候、研究古生态,还可判断有机质的成熟度、研究石油的生成和运移等。孢粉和藻类由低级到高级,由简单到复杂的方向发展,具有不可逆性,一定的属种只存在于某一地质时期中,不重复出现,根据不同时期出现的孢粉、藻类化石的属种及其组合来确定地质时代,进而划分和对比地层。同时可以对当时的沉积环境、古气候、古地理加以探讨。激光共聚焦 3D 显微技术可以为微体古生物化石研究提供更可靠、方便的手段(杨伟平等,1998)。

通过激光共聚焦可以在不损坏化石标本本身的前提下,对化石进行断层扫描,观察化石内部结构构造,由于激光扫描共聚焦显微镜可以做虚拟切面,再加上它的分辨率优于常规的光学显微镜,因此可以毫不费力地仔细观察化石内部的结构构造;对化石标本进行光学连续“切面”,并实现显微结构的三维重构,将每一幅光学切面有序地叠放在一起,对该化石标本的三维立体复原图,就能追踪一些重要结构构造

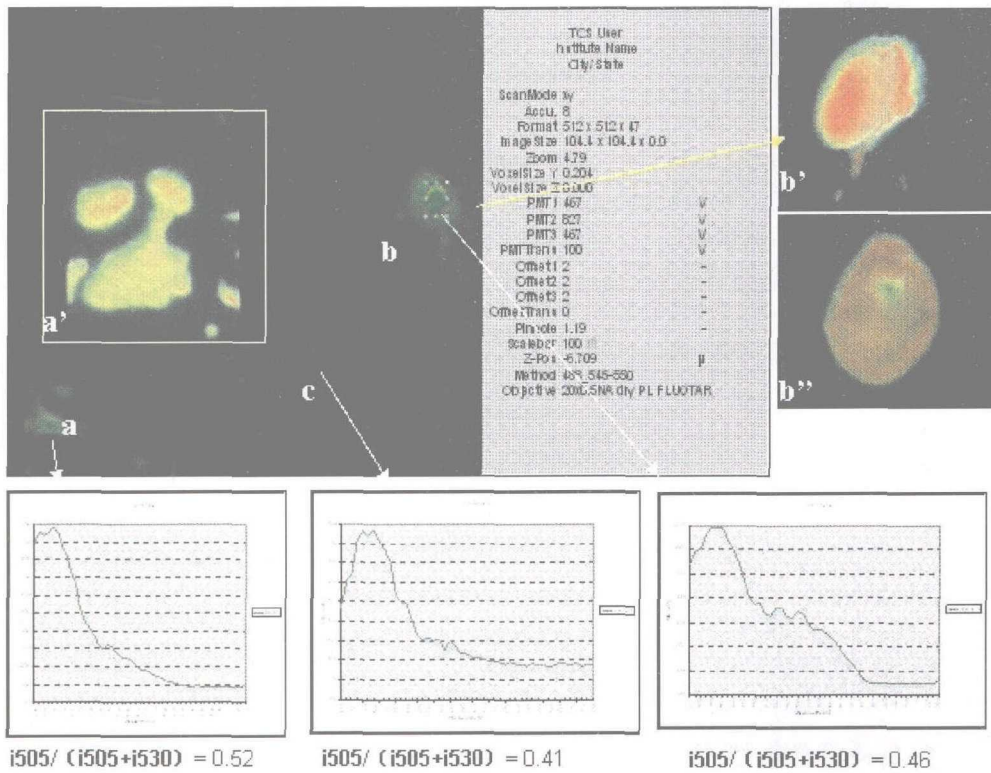


图8 霍3井2023.27米包裹体三维图象及其波长扫描特征曲线。

包裹体中:a为成熟有机质包裹体,a'为其三维重建放大图;b为低熟包裹体,b'和b''为其不同角度三维重建放大图;c为低熟包裹体,白色箭头所指的分别是各期包裹体相应的波长扫描曲线图。

Fig. 8 3D image and the curve of wavelength scanning of enclosure in 2023.27meters of Huo3 well.

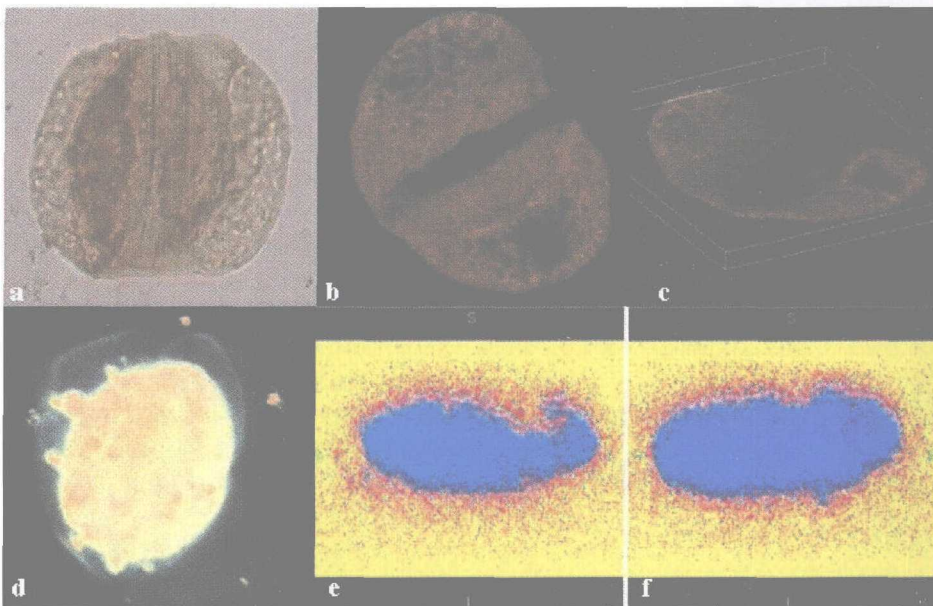


图9 大庆探区孢粉(假云杉 Pseudopicea 粉)共聚焦图像

a 假云杉 Pseudopicea 粉普通光学显微镜照片; b 假云杉 Pseudopicea 粉激光共聚焦扫描图像; c 假云杉 Pseudopicea 粉相同视域激光共聚焦45度立体图像; d 未知孢子正面激光共聚焦立体图像; e 未知孢子左切面图像; f 未知孢子前切面图像

Fig. 9 Confocal image of sporopollen in the exploration area of Daqing.

的三维延伸发展,最终认识该化石的内部结构,还可以对化石进行初步的定量分析,即利用激光扫描共聚焦显微镜可以对化石样品进行初步的形态分析,通过直方图对其进行厚度、面积、长度等的测量。

图9是大庆探区假云杉 *Pseudopica* 粉和未知孢子的共聚焦图像与普通光学显微镜照片对比图。共聚焦系列图像(b,c,d,e,f)与普通光学显微镜孢粉照片(a)相比,其优点一目了然,可以随意进行二维、三维、定量、多层次、多方位等的精细观察研究,a,b,c为假云杉 *Pseudopica* 粉图像d,e,f为未知孢子图像,这是专业古生物研究人员通过该方法发现而尚未定名的大庆探区新的化石种。

4 结论

激光共聚焦扫描显微镜分析技术由于其特有的优点在大庆探区的勘探开发研究中得到了成功的应用,取得了前所未有的效果。

(1)将激光共聚焦方法应用到大庆探区的储层研究中,储层孔隙和微裂缝的三维结构重建为松辽盆地深层储气机理研究提供了更为有效的手段,快速、直观、低成本和较精确的面孔率测定为今后孔隙量化研究提供了一个全新的手段。

(2)我们运用激光共聚焦方法对储层原油形态及烃类组分特征进行了详细研究,这对薄差油层的开发有重要意义,为储层可持续地注水开发提供了更可靠的研究技术手段。

(3)在原油乳化机理研究方面,首次应用共聚焦方法观察了乳化油的内部结构,通过动态分析可以确定其稳定性,这为乳化油乳化机理研究提供了可靠的依据。

(4)运用激光共聚焦方法对裂缝中次生包裹体特征和有机质成熟度的研究成果充分表明了该技术方法的优势。用 $i505/(i505 + i530)$ 参数比可以确定包裹体中有机质成熟度,当比值大于0.49时属于成熟有机质,当该比值小于0.49时属于低成熟有机质。从海拉尔盆地霍3井2023.27米包裹体样品的波长扫描曲线及参数比特征可以明显区分出三种不同成熟度的有机包裹体。

(5)在大庆探区运用激光共聚焦方法研究微体古生物化石,该方法可以随意对化石进行二维、三维、定量、多层次、多方位等的精细观察研究,并发现了本区以前未见的孢子化石新种类。

激光共聚焦扫描显微镜在油田勘探、开发的许多方面都能得到应用,如三次采油中细菌的测量及三维照相等。今后随着油田勘探开发向纵深的发展,勘探开发难度的加大,激光共聚焦三维显微检测技术应用领域和前景是十分广阔的。

References

- Beaudoin G, Taylor B E. 1993. MIES Laser Microprobe. Part 2: Preliminary assessment of precision and accuracy of Sulphur Isotope Analysis. Geological Survey of Canada Paper, 93-1D
- Feng Zhiqiang, Feng Zihui. 2003. The technology of petroleum geology experiment. Beijing: Petroleum Industry Press, 150 - 154 (in Chinese)
- Gu Xiren, Ma Jiming. 1999. Superficial Chemistry. Beijing: Science Press. 48 - 54 (in Chinese)
- Jin Xigao. 1999. Laser confocal fluorescence microscopy. Chemical Journal. (6): 34 - 39 (in Chinese)
- Li Nan. 1997. The Laser confocal microscopy technique. Beijing: Demotic Surgeon Press (in Chinese)
- Luo Ping, Ying Fengxiang. 2002. The new technology and method about basic experiment analyse of reservoir rock. Beijing: Petroleum industry Press, 15 - 26 (in Chinese)
- Scott A C. 1989. Geological Applications of Laser Scanning Microscopy. Microscopy and Analysis
- Sharp Z D. 1992. In Situ Laser Microprobe Techniques for Stable Isotope Analysis; Chemical Geology (isotope Geoscience Section), 101: 3 - 19
- Sun Xianda, Suo Limin, Jiang Hongqi. 2004. The application of the Leica TCS SP Laser focuses microscope in the petroleum and geology. J Chinese Electr Microsc Soc, 23(24): 517 - 518 (in Chinese)
- Yang Weiping, Zhang Haichun, Xu Fangming. 1998. The new study on the over microstructure of micrhystridium. Science Journal, 43(2): 20 - 22 (in Chinese)
- Ying Fengxiang, Yang Shisheng, Zhang Min, Li Yuxi, Zhou Hongyan. 2002. The study on reservoir structure by Laser Focuses Microscope. Sedimentology Journal, 20(1) (in Chinese)
- Zhang Min, Wang Guangying. 1995. The study on the microstructure of sporopollen and algaenite in coal-measure rock by MRC-600 Laser Focuses Microscope. China Coalfield, 7(1): 22

附中文参考文献

- 冯志强, 冯子辉. 2003. 2003年石油地质实验技术. 北京: 石油工业出版社, 150 - 154
- 顾惜人, 马季铭. 1999. 表面化学. 北京: 科学出版社, 48 - 54
- 金熹高, 朱世雄, 贾世军, 陈柳生. 1999. 多组份高聚物体系多层形态观察的新方法: 激光共聚焦荧光显微技术. 化学通报, (6): 34 - 39
- 李楠. 1997. 激光扫描共聚焦显微术. 北京: 人民军艺出版社
- 罗平, 应凤祥. 2002. 储集岩基础实验分析新技术与新方法. 北京: 石油工业出版社, 15 - 26
- 孙先达, 索丽敏, 姜洪启. 2004. 激光扫描共聚焦显微镜在石油地质上的应用. 电子显微学报, 23(24): 517 - 518
- 杨伟平, 张海春, 徐放鸣. 1998. 滇西中二叠世疑源类化石 *Micrhystridium* 的超微结构新研究. 科学通报, 43(2): 20 - 22
- 应凤祥, 杨式升, 张敏, 李豫喜, 周宏燕. 2002. 激光扫描共聚焦显微镜研究储层结构. 沉积学报, 20(1)
- 张敏, 王光盈. 1995. 运用 MRC-600 型激光共聚焦扫描显微镜研究煤岩中孢粉、藻质体的显微特征. 中国煤田地质, 7(1) 22