

石油地质分析测试技术新进展

刘伟新^{1,2}, 把立强², 张美珍², 蒋启贵², 秦建中², 曹寅²

(1. 中国矿业大学, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡实验地质研究所, 江苏 无锡 214151)

摘要: 近年来, 新的分析测试技术在石油地质研究及勘探活动中取得了很大进步。尤其是含油气地层的流体包裹体研究更是突飞猛进, 它能测定地质历史上的时代变迁和物理化学条件。轻烃分析方法也取得了很大进展, 特别对源岩。烷基酚和苯并卟啉抽提法也获得成功, 借助苯并卟啉的浓度及比值变化可以研究油气运移。此外, 包括伊-蒙混层、伊利石在内的粘土矿物分析方法也发展迅速。例如, 伊利石的结晶度值被广泛地用于松潘地区的石油地质勘探。

关键词: 进展; 分析测试技术; 石油地质

中图分类号: TE135

文献标识码: A

石油地质分析测试是石油地质研究和油气勘探的基础, 实验技术的发展带动和促进油气地质勘探理论的进步, 油气勘探理论的突破依赖于实验技术的创新。随着油气勘探的深入, 石油地质分析测试技术得到了长足的发展, 许多新的分析测试仪器及技术在油气勘探中得到了广泛的应用, 涉及油气生成、运移、聚集、保存和油田开发等各个领域。因此, 石油地质分析测试技术的发展在油气地质综合研究和油气地质勘探决策中具有重要意义。

1 分析测试仪器

分析测试技术的进步必然与一定的分析测试仪器有密切的关系。目前油气勘探地质实验分析仪器主要有 3 个系列^[1]: a) 以气相、液相色谱、红外、紫外、元素、原子吸收、等离子光谱分析仪器组成的成分分析仪器系列; b) 以生物、实体、偏光、荧光、阴极发光显微镜、激光共聚焦显微镜等组成的实验观察鉴定系列; c) 以色谱-质谱、同位素质谱、扫描电镜、电子探针、X-衍射仪、色谱-质谱-质谱(GC-MS-MS)等组成的大型分析仪器系列。当前又出现了以激光拉曼光谱、多组分显微荧光探针(FAMM)、环境扫描电镜(ESEM)、全自动全时标同位素定年系统、核磁共振等大型先进仪器, 在油气勘探中发挥越来越大的作用。

在常规样品的制备与前处理方面, 目前正向着

自动化方向发展, 取得较大进展的技术及装备有有机质快速搅拌抽提仪及超临界抽提装置、岩屑切削脱气仪、干酪根自动制备分离仪、岩石薄片精密切割抛光仪、同位素样品制备仪等, 这些技术的发展提高了样品分析的速度及精度。

2 分析测试技术

2.1 有机地化方面

2.1.1 岩石超临界抽提技术^[2]

传统的方法都是用液态氯仿进行抽提, 近年来开发了超临界抽提方法。具有高扩散性和低粘滞性的超临界状态的 CO₂ 流体作为萃取介质, 使混合物快速有效地发生生物相分离, 抽提能力加强, 抽提信息增加, 尤其对煤成烃和碳酸盐岩成烃机理研究具有重要作用。

2.1.2 烃源岩模拟实验技术

烃源岩油气生成模拟实验模拟地质体的实际情况并对所得的一系列气态、液态和残留物的分析鉴定, 可以连续、系统、定量地研究油气生成的过程、机理及演化模式, 研究有机质成烃过程, 恢复原始有机碳, 计算总生油量、初次运移量和运移系数, 并测定生油岩的活化能。

2.1.3 有机岩石学分析测试技术

将全岩石光片及干酪根进行透射光、反射光、荧光、元素及同位素分析, 确定有机质的显微组成、丰

度、类型及成熟度。它为烃源岩的类型划分及生烃能力尤其是高成熟烃源岩的评价提供了有利的手段。

2.1.4 岩石热解技术

它能对烃源岩的有机质丰度、成熟度及储集层的含油气性进行快速评价。

2.1.5 色谱-质谱-质谱分析技术

色谱与质谱的联用及双色质技术,极大地提高了生物标志化合物的检测灵敏度和精度,为油气源的对比及运移方向的确认提供了有力的证据。

2.1.6 有机质同位素分析技术

特别是从全碳同位素发展到单体烃碳同位素及当前的氢同位素分析技术,对油气源对比、形成环境及烃类运移聚集的研究起着重要的作用。

2.1.7 显微红外光谱分析

它为有机质显微组成的化学成分和结构的分析、演化程度及生烃潜力的评价提供了有效的手段。

2.1.8 化探分析技术

酸解烃、吸附烃及水中烃类物质等的分析技术为油气远景评价及初期勘探提供了信息。

2.2 沉积及储盖层方面

2.2.1 储层地球化学研究方法

该方法在于分析储层地球化学——储层孔隙形成的有机-无机反应及与储层孔隙的分布,并将源岩、储集岩和孔隙流体作为一个完整的成岩作用系统,主要的分析手段是地层水有机酸的成分和含量、酸碱度及氧化还原电位、微量元素的特征、矿物及胶结物的组成及与孔渗之间的关系。

2.2.2 成岩作用与模拟实验技术

它主要包括薄片技术、铸体技术、阴极发光技术、荧光分析技术及图像与结构分析技术。随着计算机处理技术的提高,图像处理技术也得到了广泛的应用,主要是对微孔隙结构以及非均质性的定性分析与定量分析与计算。其次是各种针对成岩作用的模拟实验技术,它用于进行深度、温度、压力及介质条件之间的关系研究,用于对岩石的硅质胶结作用、碳酸盐岩的次生成岩作用、矿物的转化与交代的分析,对了解沉积环境、成岩作用及孔隙演化趋势均具有重要作用。

2.2.3 油藏地球化学及油藏注入史研究

研究的主要立足点在于3项分析技术:a)薄层色谱-氢火焰离子检测技术(TIC-FID),其结果是在油藏地球化学剖面上可以清晰地看到各小层原油族组成的细微变化,有助于准确辨识残余油的边界或油水界面位置;b)岩石热解气相色谱分析技术

(PY-GC),用于快速识别烃源岩和储层中的烃类化合物,可以确定不同的含油气组成与含量,确定岩石含油性质及含油级别;c)包裹体分析技术,包括包裹体显微测温、成分分析、流体压力的估算,据此认识烃类向储集层运移聚集的过程,以研究油藏注入史。

2.2.4 油气层保护研究中的分析实验技术

它用于分析研究储层岩石学特征,从微观形态及微区成分上对储层岩石进行岩石矿物成分及结构分析、胶结物特征及充填作用分析、孔隙及喉道连通性分析等,并进行室内模拟、地层敏感性评价和损害机理的确认。油气田开发过程中,特别是注水、注气开发中,可以观察到粘土矿物变化、水-岩反应形成新矿物等各种现象,进而提出油气层保护措施。

2.2.5 成岩矿物的同位素分析技术

它包括同位素年代学,用于了解烃类形成的先后次序,判断油气藏的形成时间、成藏速度以及烃类运移方向。成岩元素如碳、氧同位素分析,可以了解全球海平面的变化,对沉积环境及地层纵向变化进行分析。

2.2.6 储集层、盖层的物性分析

它主要包括热对流成岩模拟实验技术,孔隙度、渗透率、模拟地层压力下孔隙度渗透率的测试技术,视密度、洗油等测试技术和储盖层微孔结构(压汞法、吸附法、扩散系数、比表面)的测试及评价技术。

3 分析测试技术的新进展

3.1 同位素分析测试技术

碳同位素是反映沉积有机质母质类型的重要指标,在油气源对比中具有重要意义。以往的研究受分析技术的限制,只能分析烃类或干酪根的全碳同位素值或某一类化合物如饱和烃、芳烃、沥青质、非烃等的碳同位素值,单体烃碳同位素测定也局限于天然气的甲烷及其同系物。由于油气运移过程中的物质分异及同位素分馏作用,随着气相色谱与同位素质谱技术的应用,单体烃同位素分析技术得到了发展,单体烃碳同位素的分析在油气源对比及油气运移中的作用越来越大,它大大提高了油气类型划分、油气运移研究和油气源对比工作的精度。

烃类气体的单体烃碳同位素可以较好地给出天然气的成因类型、成熟度、运移演化及气源对比的信息^[3]。烷烃气系列分子碳同位素值随着分子碳数的递增或递减呈规律性变化。有机的、同源同期的甲烷及其同系物(包括原生煤型气和油型气)具有正

碳同位素特征($\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4$),而无机成因气具有负碳同位素特征;相同或相近成熟度烃源岩形成的煤成气甲烷及其同系物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比油型气的对应值高。应用煤成气和油型气的回归方程计算与 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_0$ 的关系可以很好地区分天然气的成因类型。在模拟实验过程中,实验室用不同的模拟方法制备出气态烃。利用GC-IRMS联用仪所配多孔聚合毛细色谱柱,采用新的在线分析技术,热模拟气的单体烃碳同位素在线分析逐步成为现实。在气态烃的碳同位素组成特征上,热解模拟试验模拟并重现了地下情况(图1)。

液态烃碳氢同位素分析,包括轻烃、凝析油的单体烃同位素分析,也已取得长足的进步。原油中的碳同位素主要受制于母质的同位素继承效应,因此在油源对比中碳同位素分析成为有效的工具。液态烃包括轻烃、凝析油中的氢同位素分析也取得进展,单体烃氢同位素分析技术成为当前油气领域研究的新课题,可以应用 δD 同位素组成来判别烃类的成因、讨论成烃母质和烃类形成环境。

3.2 轻烃分析测试技术

轻烃指纹分析包括天然气、原油以及烃源岩的轻烃分析。轻烃成因的研究和轻烃指纹参数的开发应用依赖于轻烃测试技术的发展。许多年来,测试技术工作者付出了极大的努力来完善轻烃分析技术,天然气和原油中的轻烃分析技术日趋完善,岩石轻烃分析技术经测试科技工作者的不懈努力已有突破并能满足油-气-源岩三位一体对比分类研究的需要。

3.2.1 天然气轻烃指纹分析

综合利用轻烃鉴别技术进行气-气对比及气-岩对比,可以解决天然气的来源的问题。天然气特别是干气,通过低温或吸附方法进行轻烃浓缩,从中获得或多或少的轻烃,从而获得比通常的天然气烃组成更多的科学信息。由于天然气生气母质性质的不同,其生成轻烃的性质和参数有别。采用一些指数,如甲基环己烷指数、庚烷值与异庚烷值、 C_7 烃($n\text{C}_7$ 、 MCC_6 、 DMCC_5)的结构组成三角图、 C_5 - C_7 脂族烃组成三角图等,可以反映天然气的母质类型、成熟度,并追踪气源。

3.2.2 原油轻烃指纹分析

根据原油轻烃分析资料对原油进行分类,可进行烃类运移研究及油层的连通性对比研究。利用正庚烷值与异庚烷值作图推断生油岩或原油的热成熟度和干酪根类型,也可用于油源追踪。原油轻烃指纹分析方法主要包括“原油切割”、“全油色谱”、“罐

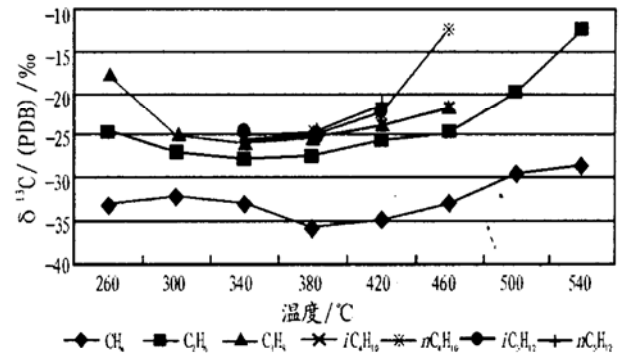


图1 热模拟气单体烃碳同位素演化图

Fig. 1 Carbon isotope evolution of simple hydrocarbon in thermal simulated gases

顶气”等分析。王海清等^[4]针对目前原油 C_1 - C_7 轻烃分析中常采用蒸馏切割方法容易导致烃类损失的情况,研制了蒸发烃分离器并进行了相关实验,分离分析各单体烃组分结果的可信度得到了很大的提高。肖廷荣等^[5]建立了“PTV切割反吹”轻烃分析方法。“PTV切割反吹”原油轻烃色谱分离分析,分析流程短、保护毛细柱、干扰少、分析重复性好,在油源及油气运移研究中具有广泛应用。

3.2.3 岩石轻烃指纹分析

在实现了天然气轻烃分析和原油轻烃分析以后,地化学者希望获得岩石轻烃分析数据以达到进行油-气-岩三位一体对比分类的目的,并在此基础上进行油气运移分析和油源追踪研究。国内外已开展的岩石轻烃测试技术主要是气体洗提法或热蒸发法,方法操作简便,但方法重现性、代表性较差。无锡实验地质研究所采用自有专利技术提出了新的岩石轻烃测试技术方法,用特殊有机溶剂快速抽提,能获得 C_5 以上的烃类物质信息,其中 C_5 至 C_{10} 之间可分离出100多个烃类物质,能很好地满足油气地质研究的需要(图2、图3)。

3.3 含氮、氧化合物分析测试技术

油气藏中烷基苯酚和含氮化合物(主要是咪唑类化合物)的分布组成及含量的变化是研究油气运移、聚集及成藏历史的很重要的内容。含氮有机化合物是原油及生油岩中的一种非烃组成,其含量一般仅占原油的0.1%~2.0%,大部分以芳香杂环化合物形式存在,并普遍带有脂肪性的侧链。原油的含氮有机化合物主要有两类,即含吡咯环结构的中性氮系列和含吡啶结构的碱性氮系列化合物。其中中性氮化合物往往比较稳定,其结构和组成是研究二次运移的指标。在原油及生油岩样品中检测到的中性氮化合物主要有咪唑、苯并咪唑和二苯并咪唑3个系列,由于烷基取代位置的差异,使各异构体极性产生差异,在原油运移过程中各异构体被矿物吸

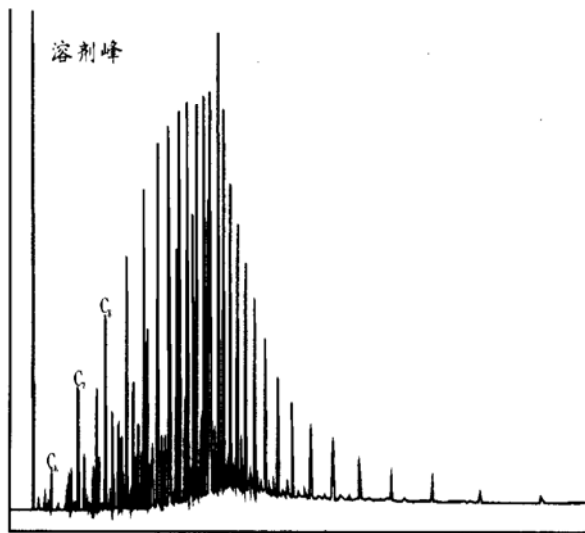


图 2 南阳油田某泥岩低沸点溶剂抽提分析总图
Fig. 2 Total extraction analysis of a mudstone from Nanyang oilfield using a low-boilingpoint solvent

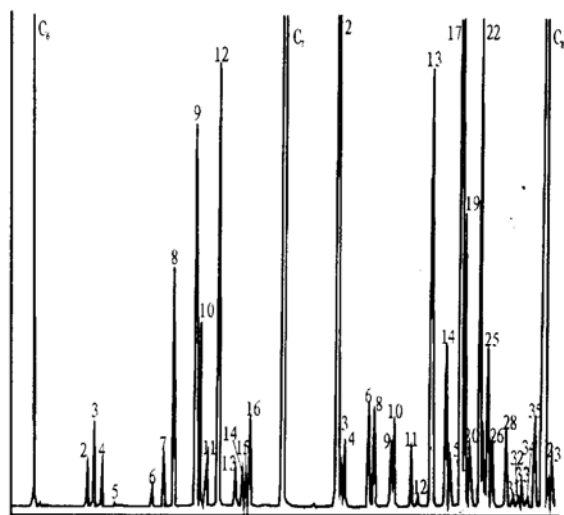


图 3 南阳油田某泥岩低沸点溶剂抽提 C₆—C₈ 分析图
Fig. 3 C₆-C₈ extraction analysis of a mudstone from Nanyang oilfield using a low-boilingpoint solvent

附程度不一, 导致运移距离不一, 因此可以根据样品中咪唑类化合物的绝对含量的变化推测原油可能的运移途径。由于烷基苯酚和中性含氮化合物在原油中是一类具有极性的微量组分, 因而常规的分析流程复杂, 难度大。经过对含氮化合物的分离分析方法的研究, 目前已建立了一套分析含氮化合物的新方法, 即通过色谱和质谱分析, 依据质谱或质量色谱图及保留时间与标准图谱对比分别提供咪唑、甲基咪唑、二甲基咪唑和三甲基咪唑以及苯并咪唑、甲基苯并咪唑和二甲基苯并咪唑的定性结果, 用内标法分别对咪唑类化合物和苯并咪唑类化合物进行定量分析。通过方法研究, 已经鉴定出 40 种中性含氮类化合物, 它们在油气运移研究中具有重要意义。

3.4 包裹体分析测试技术

流体包裹体热力学研究是一门新兴的分支学科, Hobson^[6]指出它是过去 20 年以来含油地层研究最为活跃的领域之一。它利用现代流体热力学原理测定和分析岩石、矿物中所含流体介质的性质, 并对与油气藏关系密切的有机包裹体(碳氢化合物包裹体、烃类包裹体)、气态烃、液态烃- 盐水、气态烃- 液态烃等相图进行研究, 从而认识古流体性质, 了解流体运移和聚集的时间、深度、相态、通道、方向, 计算包裹体捕获时的热动力学条件, 分析不同时期的温度场、地压场、水动力场、地应力场等, 获得储层埋藏史和热演化史, 绘制不同时期包裹体的流体势等值线分布图, 确定烃类运移方向、聚集地带, 为确定油气勘探靶区提供依据, 为研究油气生成、运移聚集提供可靠的数据以指导油气勘探。

3.4.1 包裹体均一温度与油气热成熟度

传统的确定有机质成熟度的工具如镜质体反射

率测定有时因各种不同的地质因素或样品的限制而无法进行, Tobin^[7]详细研究了镜质体反射率与包裹体均一温度之间的关系, 研究了镜质体反射率的对数与包裹体均一温度之间良好的线性关系, 提出了一种热成熟度值估算的新方法。该方法概括了流体包裹体群的样品选择准则, 提出了样品均一化温度与镜质体反射率数据的经验关系。其优点是不受常规有机质成熟度技术的限制, 如有机质循环、干酪根风化、钻井污染、烃污染、油饱和度或样品数量的限制, 可作为成熟度研究的独立质量控制技术, 也可作为有机质方法难以应用时的热成熟度确定工具使用(如早古生代地层, 贫有机质的碳酸盐岩或钙质砂岩)。分析的均一化温度与镜质体反射率的相关系数 r^2 为 0.96, 绝对误差为 $\pm 0.12\% R_o$ (图 4)。

3.4.2 流体包裹体地层学(FIS)分析技术

油田开发中确定油水界面和识别水动力障具有重要作用。Barclay^[8]在研究北海 Magnus 油田时运用流体包裹体地层学(FIS)分析新技术, 在对砂岩储集层的流体接触界面及封隔层的识别上取得了较大进展。该方法涉及对极少量的岩屑和钻井岩心样品经清洗和压碎后取出的包裹体成分不经色谱分离而直接对矿物和孔隙中的包裹体成分和含量进行质谱(MS)分析, 并重建流体包裹体成分和特性的地层空间结构。在北海 Magnus 油田中, FIS 资料识别了比电阻率测井更为准确的复杂的油水过渡带(由页岩或白云岩造成不同的含水饱和度所引起), 指出了含油层位向下进一步延伸; 同时通过含烃包裹体的成分和丰度的变化而识别出储层中潜在的地层(页岩)和成岩作用(白云岩)障。主要的方法是对钻井岩屑或岩心样品进行清洗抽真空并加温除去 C₁

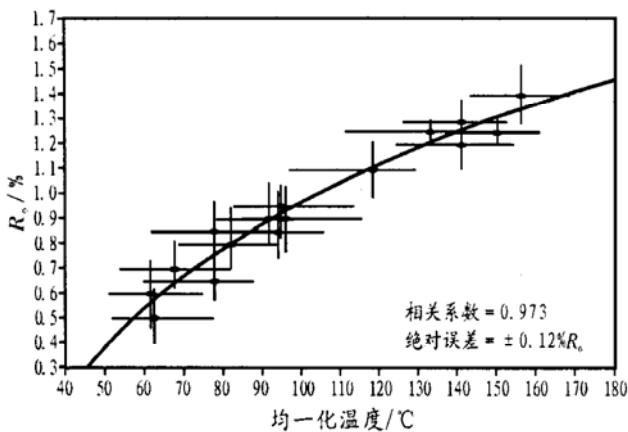


图4 流体包裹体均一化温度与镜质体反射率的关系^[7]

Fig. 4 Relationship between vitrinite reflectance and homogenization temperature in fluid inclusions^[7]

—C₁₃吸附烃和无机气,但不破坏烃类包裹体,清洗后的样品在真空腔中经研碎后释放出包裹体挥发分,直接进入质谱仪分析。流体包裹体地层学分析方法是一种新的测试技术,可以用于快速提供有机和气相地球化学空间分辨率的资料,并可用于解释油水过渡带(界面)的细微变化和油层的分布样式,还可用于研究储层中流体成分的差异和变化,有助于确定储层的封隔层及流动单元。

3.4.3 包裹体激光拉曼光谱分析技术

激光拉曼光谱分析是一项非破坏性的快速而高精度的微区分析技术,利用它可以实现对流体包裹体特征及其气、液、固相化学成分的定性、定量全分析(图5)。对包裹体中烃类成分进行对比分析,可以确定油气藏各期次烃类流体的成藏贡献;利用储层中含烃包裹体的丰度,可以作为古含油饱和度的标志;分析不同期次包裹体中油、气、水的组分,可以识别古油层并确定油水界面的变迁史。

3.5 有机质热类型及演化史分析测试技术

确定有机质类型及成熟度对指导一个地区的勘探具有重要意义,它包括烃源岩成熟阶段的划分、最高古地温和最大古沉积厚度的恢复及热演化史和生烃史的研究。判别有机质成熟度的指标主要有光学指标如镜质体反射率(R_v)、孢粉颜色指数SCI和多组分显微荧光探针(FAMM)分析等,有机地化指标如岩石最高热解峰温 T_{max} 、饱和烃气相色谱——正构烷奇偶优势、芳烃气相色谱和生物标志化合物——甾萜烷异构化参数等,其它如包裹体显微测温、微量元素地质温度计和固体¹³C核磁共振等。

3.5.1 多组分显微荧光技术

澳大利亚长期从事煤及烃源岩成熟度研究的学者Wilkins博士研究出了多组分显微荧光探针

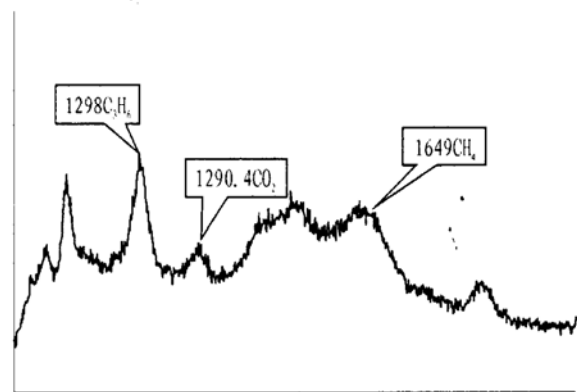


图5 激光拉曼光谱分析松潘—阿坝地区石英中原生包裹体气相成分

Fig. 5 Gas components of primary inclusions in quartz from Songpar-Aba area analysed by the laser Raman spectrometry

(FAMM)技术。该项技术突出的优点是在缺乏镜质体(海相)或因镜质体富氢受抑制、 R_v 不准的情况下能准确反映烃源岩的热演化程度。与镜质体反射率相比,FAMM的重要优点是把数据分成两个参数,一个与成熟度有关,另一个是与组分的富氢性质有关。这解决了单参数的镜质体反射率技术常常遇到的困难,即分散有机质中原生镜质体的识别、崩落和再循环有机质的辨认以及镜质体反射率的受抑制性。因此,FAMM是研究镜质体反射率出现异常,尤其是与其它组分参数不一致时的一个有效工具。

3.5.2 显微傅里叶红外技术

近年来,红外光谱技术在有机岩石学及有机地球化学研究中取得了突破性进展。Ganz(1987)、Kuehn(1984)及Christy(1987)等利用红外光谱技术研究了干酪根类型、成熟度及生烃潜力等油气勘探所关心的问题;Painter(1985)利用曲线拟合及最优化处理定量地研究了脂肪氢及羟基中的氢。随着傅立叶变换红外光谱仪的迅速发展和普及,新的分峰技术逐渐为人们所熟悉和采用。红外光谱不仅能反映有机质的组成和类型(图6),也能表征有机质的热演化程度。

3.6 粘土矿物伊利石结晶度及其分析测试技术

通过粘土矿物的不同类型、含量变化、结晶度等有序度的指标可以很好地分析成岩作用过程,尤其是对粘土矿物的成分及结构进行分析,以确定埋藏深度,分析热演化史,反映油气成熟度,恢复盆地埋藏史。伊利石结晶度分析技术近年来得到较快的发展。伊利石的结晶度(IC指数)是划分成岩作用与极低级变质作用和确立低级变质作用程度的主要指标,是当前地质学研究的一大热点。伊利石结晶度的测定,与各实验室所用的实验条件和制样方法密切相关(Kisch,1991)。长期以来,伊利石结晶度指

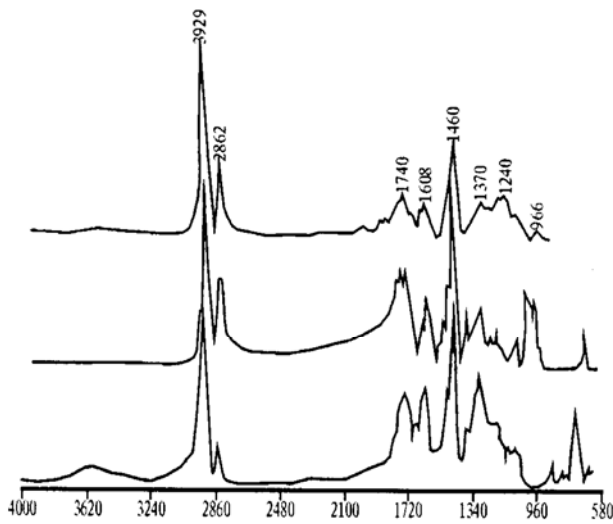


图6 有机质角质体、孢子体与木栓质体的红外光谱分析

Fig. 6 Infrared spectroscopic analysis of cutinite, sporophyte and suberinite in organic matter

数难以对比;最近通过运用最新的测试手段,按照国际上伊利石结晶度的测试条件,应用于中石化松潘—阿坝地区的油气勘探并取得进展。它准确地反映了该勘探区的热演化程度,使我们对该地区三叠系泥质岩的成岩作用与演化阶段有了深入的认识。

参考文献:

- [1] 周光甲,王荣光.我国油气勘探中地质实验技术发展的历程回顾[A].石油地质实验技术论文集[C].北京:石油工业出版社,1997.
- [2] 陆现彩,胡文宣,等.烃源岩中可熔有机质与粘土矿物结合关系[J].地质科学,1999,(1):69-77.
- [3] 戴金星.天然气地质和地球化学论文集(卷三)[M].北京:石油工业出版社,2002.
- [4] 王海清.石油C₁-C₇蒸发烃分离器的研制与实践[J].西南石油学院学报,1999,21(4).
- [5] 肖廷荣.两种轻烃分析方法——PTV切割反吹、顶空分析[A].中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室文集,第一集[C].北京:石油工业出版社,2000,240-248.
- [6] Hobson G D. Petroleum geology: two decade of change[J]. Journal of Petroleum Geology, 1997: 245-247.
- [7] Tobin R C, Claxton B L. Multidisciplinary thermal maturity studies using vitrinite reflectance and fluid inclusion microthermometry: a new calibration of old techniques[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84: 1647-1665.
- [8] Barclay S A, Worden R H, Parnell J, et al. Assessment of fluid contact and compartmentalization in sandstone reservoirs using fluid inclusion: an example from the Magnus Oil Field, North Sea [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84: 489-503.

NEW TECHNOLOGICAL ADVANCES IN PETROLEUM EXPLORATION

LIU Weixin^{1,2}, BA Lirong², ZHANG Meizheng²,
JIANG Qirui², QIN Jiarzhong², CAO Yin²

(1. China University of Mineral Industry, Beijing 100083, China;

2. Wuxi Institute of Experimental Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: New analytic technologies in petroleum geological research and exploration activities have made great progress in recent years. Especially there has been a burst in the fluid inclusion study of oil-bearing sequences, which can determine the timing and physical-chemical conditions in the past. Light hydrocarbon analytic methods is making much progress, especially in source rocks. The alkylphenol and benzocarbazole extraction methods are also successful, and the changes in benzocarbazole concentration and the ratio of benzocarbazole can be used to discuss hydrocarbon migration. Also, the analytic method of clay minerals including mixed layer I/S, illite, etc. has developed fast. For example, the crystallinity values of illite are widely used in the petroleum geological exploration of Songpan region.

Key words: advance; analytic technology; petroleum geology