

文章编号: 0253-2697(2014)01-058-10 DOI: 10.7623/syxb201401006

岩石热声发射和盆模技术研究中扬子区西部下古生界海相页岩最高古地温和热成熟史

张建坤¹ 何生¹ 易积正² 张柏桥² 张士万² 郑伦举³ 侯宇光¹ 王亿¹

(1. 中国地质大学构造与油气教育部重点实验室 湖北武汉 430074; 2. 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司 湖北潜江 433124;
3. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所 江苏无锡 214151)

摘要:中扬子地区西部下古生界海相页岩热演化程度高,有机显微组分中无镜质组,沥青反射率具有不确定性,故热成熟度较难确定。综合运用岩石热声发射实验与干酪根红外光谱,并结合盆地模拟技术对中扬子地区西部典型井下古生界海相页岩经历的最高古温度及热演化成熟史进行了恢复。样品的热声发射信号随温度的升高变化显著,热凯瑟尔(Kaiser)效应明显;下寒武统水井沱组经历的最高古温度范围为293~324℃,上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组为210~256℃。同时利用二次加温验证热Kaiser效应敏感,表明热声发射技术可用于岩石经历的最高古地温的测定。在对典型井的下古生界海相页岩热演化成熟史模拟中结合最高古温度作为约束条件所得结果表明,模拟计算的下寒武统水井沱组和上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组镜质体反射率分别为4.0%~4.5%和2.6%~3.2%,处于高演化过成熟阶段,与干酪根红外光谱分析得出的有机质成熟度结果一致。

关键词:中扬子地区西部;下古生界海相页岩;岩石热声发射;盆地模拟;干酪根红外光谱;最高古地温;热成熟史

中图分类号:TE112.11

文献标识码:A

Rock thermo-acoustic emission and basin modeling technologies applied to the study of maximum paleotemperatures and thermal maturity histories of Lower Paleozoic marine shales in the western middle Yangtze area

Zhang Jiankun¹ He Sheng¹ Yi Jizheng² Zhang Baiqiao² Zhang Shiwan²
Zheng Lunju³ Hou Yuguang¹ Wang Yi¹

(1. Key Laboratory of Tectonics & Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Sinopec Jiangnan Oilfield Company, Qianjiang 433124, China; 3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Sinopec Research Institute of Petroleum Exploration & Production, Wuxi 214151, China)

Abstract: Shales of Lower Paleozoic marine strata in the western middle Yangtze area are considered to be of a high degree of thermal evolution. It is, however, very difficult to accurately determine their thermal maturities (vitrinite reflectance, R_o) due to the lack of vitrinite in organic macerals in marine shales of these Lower Paleozoic formations. The objective of the present study is to restore the maximum paleogeotemperature experienced by these shales and then to reconstruct their thermal evolutionary histories using the basin modeling technology with the data obtained from thermo-acoustic emission experiments and kerogen FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) analysis. The results of thermo-acoustic emission experiments illustrated that Lower Paleozoic marine shales have a good thermal Kaiser effect and the rock thermo-acoustic emission signal varies with geotemperatures remarkably. For instance, the maximum paleogeotemperature experienced by the Lower Cambrian Shuijingtuo Formation ranges from 293 °C to 324 °C, while the maximum paleogeotemperature of the Upper Ordovician Wufeng Formation and Lower Silurian Longmaxi Formation ranges from 210 °C to 256 °C. Furthermore, the sensitivity of the thermal Kaiser effect was tested by reheating experiments, which suggested that the thermo-acoustic emission could be applied to the measurement of maximum paleogeotemperatures experienced by marine shales. Considering the measured maximum paleotemperature as a constraint, in typical well simulation of the thermal maturity modeling of Lower Paleozoic marine shales, the calculation results of the thermal maturity modeling demonstrated that the simulated values of vitrinite reflectance (R_o) for the Lower Cambrian and Upper Ordovician-Lower Silurian marine shales range from 4.0% to 4.5% and 2.6% to 3.2%, respectively. Therefore, the organic matter maturities of marine shales in the Lower Cambrian Shuijingtuo Formation, Upper Ordovician Wufeng Formation and Lower Silurian Longmaxi Formation are all in a high-maturity to overmature stage of thermal

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05005-002)、国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 41302111)和中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司科研项目资助。

第一作者:张建坤,男,1984年3月生,2007年获长江大学学士学位,现为中国地质大学(武汉)博士研究生,主要从事页岩气地质和烃源岩评价工作。Email: sparkler1984@126.com

通信作者:何生,男,1956年1月生,1982年毕业于武汉地质学院石油专业,现为中国地质大学(武汉)教授、博士生导师,主要从事油气地质教学和科研工作。Email: shenghe@cug.edu.cn

evolution, which is consistent with the data obtained from the kerogen FTIR analysis of the Lower Paleozoic marine formations.

Key words: the western middle Yangtze area; Lower Paleozoic marine shale; rock thermo-acoustic emission; basin modeling; kerogen FTIR; maximum paleogeotemperature; thermal maturity history

随着中国石油勘探的不断深入和油气“二次创业”^[1]思想的提出,南方海相地层非常规油气资源潜力评价与页岩气勘探受到高度重视。但是,中国下古生界海相地层有机质中缺少镜质体以及裂变径迹不适用等原因使得热成熟度评价已成海相地层油气勘探的关键问题之一^[2]。中扬子地区西部属南方下古生界海相地层发育区,南方下古生界海相地层经历了多期构造运动的叠加和改造,古埋深大,热演化程度高。有机显微组分中不存在镜质体,沥青反射率具有不确定性,使得南方下古生界海相地层的热成熟度难以确定。另外,磷灰石和锆石裂变径迹可能不适合该区下古生界样品经历的、大于200℃古地温条件下的热成熟史分析。因此,亟需提出有效的恢复古地温和热成熟史的综合研究方法,用来解决南方海相页岩成熟度的评价问题。

岩石在热载作用下,由于组成岩石内部的矿物颗粒的膨胀系数不同,积聚的弹性应变能以一种应力波的形式快速释放出来的现象称为热声发射^[3]。热声发射具有不可逆的热记忆性^[4-6],岩石重复升温可产生与重复加载产生的力凯瑟尔效应相似的热凯瑟尔(Kaiser)效应^[7]。声发射技术目前主要应用于探测岩石应力损伤的估计以及地震前微震行为的研究^[8-10],一些学者也对岩石的声发射特性与温度间的关系进行了研究^[11-13]。席道瑛等^[12]利用岩石的热Kaiser效应探讨了中国9个地区部分岩石的门槛温度,获得了其古地温值,实验取得的江苏六合盘山包裹体样品的热声发射门槛温度830℃与Meroler单辉石、Wells二辉石古温标测得的800~860℃基本吻合。李佳蔚和邱楠生等^[13]通过对塔里木盆地的系列埋深(2800~5300 m)的砂岩和泥岩样品及川西地区灰岩样品的研究,发现样品的声发射信号随温度升高变化显著,热Kaiser效应明显;利用热声发射技术测得的温度与岩石经历的最高温度基本一致。这些研究表明热声发射技术可被用于岩石经历的最高古温度的直接测定。笔者重点介绍岩石热声发射技术在研究区下古生界海相页岩样品经历的最高古地温和热成熟史分析中的应用,并通过岩石热声发射实验、盆地模拟并结合干酪根红外光谱技术,综合研究和探讨了中扬子地区西部下古生界海相页岩经历的最高古温度和热成熟史。

1 区域地质背景

研究区包括中扬子地区西部的湘鄂西区和川东地区,也称湘鄂西断褶皱带和川东断褶皱带,构造上属湘鄂

西—川东构造带,该构造带南东与江南—雪峰隆起的界线为石门—慈利—保靖断裂带,北西与川中隆起的界线为华蓥山断裂带,北与大巴山弧形构造相接^[14]。湘鄂西断褶皱带自SE向NW由桑植石门复向斜、宜都鹤峰复背斜、花果坪复向斜、中央复背斜和利川复向斜等构造单元组成,断褶皱带内背斜核部主要出露古生界,向斜核部由上古生界及古生界组成,以厚皮“隔槽式褶皱”结构为主;川东断褶皱带分SE和NW两段,其南东段可划分为石柱复向斜、方斗山复背斜、万县复向斜等构造单元(图1),北西段为开江褶皱带,断褶皱多出露中生界及下白垩统,主要为薄皮“隔挡式褶皱”结构。区域构造方向为NE、NNE,整体上呈“S”型的构造格架。该构造带主要受中侏罗世末至早白垩世初期江南—雪峰隆起SE→NW向的挤压作用所产生,江南—雪峰基底拆离、向NW方向的挤压应力和前缘递进演化的连续变形,奠定了本区现今的构造格局^[15]。研究区自震旦纪直到二叠纪主要为海相沉积;印支期,华北板块与扬子板块碰撞,秦岭海槽关闭并褶皱,结束了震旦纪以来差异升降海相沉积的历史。

中扬子西部是南方海相油气勘探的重要地区之一,油气资源主要为常规天然气和非常规页岩气,总体勘探程度低,该区下寒武统水井沱组和上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组下部黑色页岩是南方海相页岩气研究和勘探的两个重要层位。水井沱组为深水陆棚相黑色页岩,厚度变化在几十米到上百米,有机碳含量为5%~15%;五峰组—龙马溪组下部为浅水—深水陆棚相黑色页岩,厚度变化在20~40 m,有机碳含量在2%~6%。

2 样品和实验测试

2.1 热声发射实验

本次热声发射实验样品主要是页岩样品,选自峰1(FD1)井、河1(HY1)井和毛坝野外剖面以及建HF-1(JY HF-1)井,JY HF-1井页岩样品为下侏罗统自流井组东岳庙段,该井的样品实验和研究结果主要用作验证目的。共采集15块样品,制取18个小柱,样品层位分别为下寒武统水井沱组与石牌组界线附近的石牌组底部、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组和下侏罗统自流井组东岳庙段,岩主要为泥页岩、粉砂质泥页岩、含白云质灰岩,少数为介壳灰岩和钙质泥页岩(表1)。样品均被加工为直径2.5 cm,高度2~4 cm的实心小圆柱体,样品干燥,表面无裂缝显示。当岩石经历高温

变质作用或在断层构造带强烈挤压受力状态下,其内部结构会遭受破坏而失去热 Kaiser 效应,本次在钻井

岩心和野外露头采集的沉积岩样品,其原始结构未遭受破坏,满足热 Kaiser 效应存在的条件。

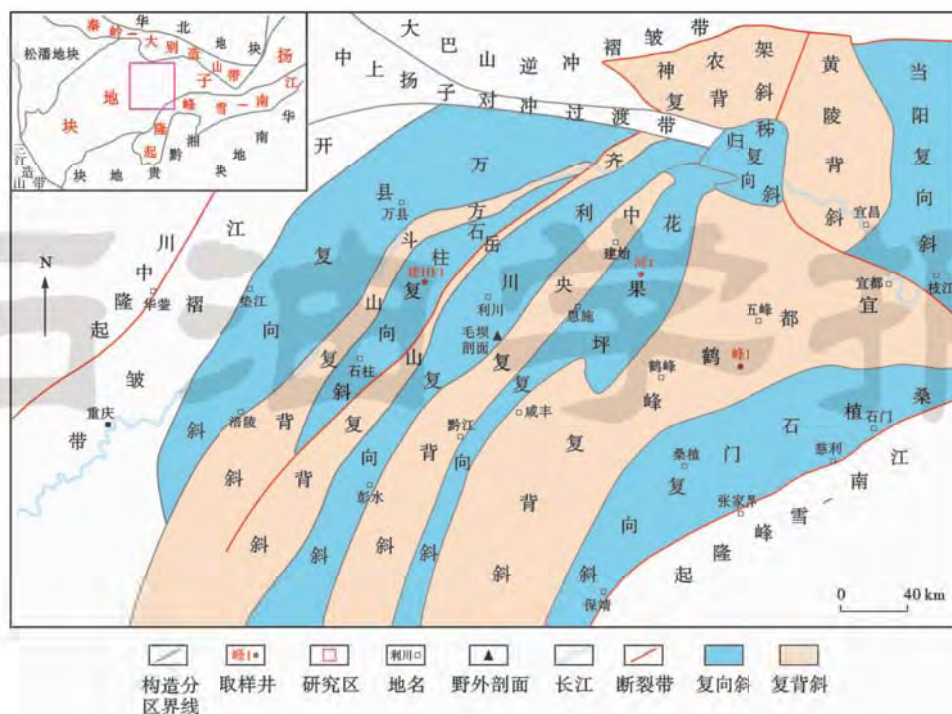


图1 中扬子地区西部构造纲要及取样井位和野外剖面位置

Fig. 1 Structural sketch of the western middle Yangtze region and the sampling locations of wells and outcrops

2.1.1 实验设备

本次岩石热声发射实验仪器主要由热加载系统、PCI-2 声发射检测系统与计算机数据处理系统组成(图2)。加热温度范围为 20~800℃,声发射探头的频率范围 1~1 000 kHz,示波器带宽 100 MHz 或 100 MHz 以上,温度和声频自动控制并实时监测,信号采集系统使用了美国物理声学公司 PCI-2 声发射检测系统。传感器与加热系统之间采用致密氧化铝作为波导杆连接,以确保良好的声学耦合。检测门槛值是影响系统灵敏度的主要可控因素,门槛越低,测得的信号越多,但是干扰也越大,因此需要在灵敏度和噪声干扰之间作出折中选择。根据本次试验环境的噪声水平,设定检测门槛值为 30 dB。实验过程中,岩石微破裂产生的声发射信号首先被声发射探头检测,信号经放大器放大后传输到计算机采集分析系统。测试中采用实时

处理,整个系统在计算机的控制下进行数据采集与保存,并可实时绘制振铃计数率、能量计数率、振铃累计数、能量累计数与时间关系图。

2.1.2 实验方案

实验原理根据岩石热 Kaiser 效应,即岩石能记载其在漫长的地质历史中曾经历的最高温度,若对某一地区岩石加热并记录声发射信号,自某一温度岩石声发射信号突然增多,声发射信号突然增多时的温度代表了岩石经历的最高古温度(门槛温度)。岩石加热速度可明显影响岩石的热膨胀^[16],由于样品小柱尺寸是有限的,热传导在时间和空间上的迟滞效应,在物体表面和内部的温度分布将存在差异,因而热传递的时间效应将产生空间上的热应力效应,这可能导致样品受热不均而形成新的裂缝热声发射^[17]。在岩石热声发射实验中也可能会由于岩石矿物在经过高温作用后,一些矿物出现相变而形成新的结构并在持续高温作用下,又可出现变形破坏而引起声发射现象的二次增强^[18]。同时,部分情况下岩石在未达到其经历的最高温度前也会出现信号突然增多的现象。这样会影响对岩石门槛温度的判断。因此,根据数次不同加热速率实验以及前人实验结果^[13],选择加热速率 2℃/min 从 20℃ 开始加热,同时记录声发射信号;本次实验人工加热的终止温度依据对本地区地层厚度、抬升剥蚀和热参数的研究和认识^[19-22],

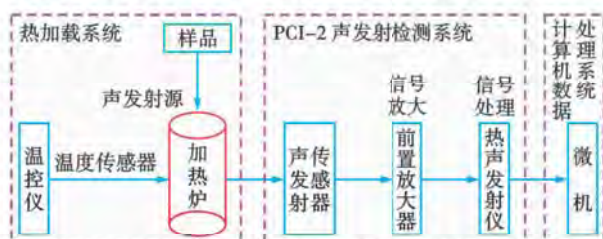


图2 岩石热声发射仪工作流程

Fig. 2 Work-flowing of rock thermo-acoustic emission instruments

设置加热温度高于地层可能经历的最高温度,JY HF-1 井下侏罗统自流井组东岳庙段样品终止温度设置为 220℃和 232℃,HY1 井和毛坝剖面上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组样品设置为 320℃和 300℃,FD1 井下寒武统石牌组样品设置为 400℃(表 1)。

2.2 干酪根红外光谱测试

本次分析选取 4 块泥页岩样品,分别取自 FD1 井、HY1 井和 JY HF-1 井岩心。实验前将干酪根样品置于低温干燥箱中 80℃以下烘干处理,干酪根样品与溴化钾的比例为 1:150,充分混合后置于压片机中压片。检测设备为美国 Nicolet 公司 AVATAR 360-FTIR 红外光谱仪,检测依据为 GB/T6040-2002,检测环境温度 23℃,相对湿度 53%。干酪根红外光谱段为 4 000~400 cm⁻¹ 范围的中红外光谱段。

3 热声发射实验结果与检验

3.1 实验结果分析与讨论

热声发射实验记录的能量计数是事件信号检波包络线的面积,可分为总计数和计数率,反映事件的相对能量或强度,可取代振铃计数,也用于波源的类型鉴别;而对检测门槛、工作频率和传播特性一般不甚敏感。本次实验采用能量累计来衡量岩石热声发射 Kaiser 效应以及热 Kaiser 点的确定,当岩石具有热 Kaiser 效应,声发射(相对能量累计)突然增加时的温度一般代表了岩石经历的最高温度,但有些样品可能出现声发射现象的二次增强,此种情况下正确判定最

高古地温需要结合对研究区地层埋藏演化过程的研究。实验中采集的热声发射信号中含有噪声信号,对判断岩石的门槛温度有一定的影响。岩石热声发射实验中外界噪音信号能量在零附近,而岩石形成裂纹可产生信号能量通常高于外界干扰信号的能量,因此需将采集到的信号进行能量滤波处理,把相对能量在零附近的信号滤除。通过对研究区样品热声发射特征与温度的关系分析,显示样品的热声发射信号随温度升高变化显著,热 Kaiser 效应明显。下寒武统经历的最高古温度范围为 293~324℃,均值为 305℃;上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组为 210~256℃,均值为 230℃;下侏罗统东岳庙段为 142~156℃,均值为 149℃(表 1 与图 3),本次下侏罗统热 Kaiser 效应测得的最高古地温与磷灰石裂变径迹反演获得的最高古温度基本一致^[21]。

影响岩石热声发射最高古地温测定的因素较多,主要是岩石本身和加热过程两方面因素:岩石本身的因素,包括岩石矿物成分、结构构造、成岩作用和物性等;加热过程方面因素,包括加热时间和升温速率以及样品的受热均匀程度等。而且岩石本身和加热过程两者也具有相关性。岩石是由不同的矿物颗粒所组成的非均质体,岩石的均质性影响其破裂过程中的声发射特征^[23]。岩石的胶结类型和胶结程度、颗粒粒径大小及形状、矿物组成成分以及孔隙结构,均会对声发射特征甚至门槛温度产生影响^[24]。均质性好的岩石内部大部分微元受热能量相同或接近,从而产生破裂的时间也基本一致,集中在主破裂发生的时间内破裂,从而

表 1 岩石热声发射实验测试结果

Table 1 Measured results by rock thermo-acoustic emission

井号/ 剖面	层位	样品 编号	岩性	深度/m	起始温 度/℃	温控终止 温度/℃	加热小柱最 高温度/℃	热声发射实测 最高古地温/℃	镜质体反射率 约束模拟温度/℃
建 HF-1	J ₁ dy	JY1	泥页岩	571.02	44	220	202.9	151.5	
建 HF-1	J ₁ dy	JY2	钙质泥岩	601.57	49	232	216.7	156.5	
建 HF-1	J ₁ dy	JY3	介壳灰岩	622.82	34	220	202.6	144.1	140~150
建 HF-1	J ₁ dy	JY4	泥页岩	627.43	50	220	204.5	141.8	
建 HF-1	J ₁ dy	JY5	泥页岩	644.07	25	220	202.6	150.2	
毛坝剖面	S ₁ l	MB1	粉砂质泥页岩	/	36	300	283.5	256.5	
毛坝剖面	S ₁ l	MB2	粉砂质泥页岩	/	48	300	280.0	250.3	
毛坝剖面	S ₁ l	MB3	粉砂质泥页岩	/	48	300	278.3	234.3	
毛坝剖面	S ₁ l	MB4	粉砂质泥页岩	/	49	300	279.7	219.5	
毛坝剖面	S ₁ l	MB5	粉砂质泥页岩	/	24	300	279.4	220.9	/
毛坝剖面	S ₁ l	MB6	粉砂质泥页岩	/	23	300	280.0	219.8	
河 1	S ₁ l	HY1	粉砂质泥页岩	1 992.16	43	300	281.9	210.4	
河 1	S ₁ l	HY2	泥页岩	2 157.50	50	300	278.9	233.8	
河 1	S ₁ l	HY3	泥页岩	2 159.50	20	300	279.3	214.5	
河 1	O ₃ w	HY4	泥页岩	2 161.00	50	320	297.7	246.8	
峰 1	Є ₁ sp	FD1-1	含白云质灰岩	1 016.30	29	400	377.1	324.4	
峰 1	Є ₁ sp	FD1-2	含白云质灰岩	1 016.30	25	400	375.3	296.5	/
峰 1	Є ₁ sp	FD2	含白云质灰岩	1 016.30	51	400	374.7	293.3	

注:J₁dy—下侏罗统自流井组东岳庙段;S₁l—下志留统龙马溪组;O₃w—上奥陶统五峰组;Є₁sp—下寒武统石牌组。

产生较为集中的声发射序列,既没有明显的前兆,也没有明显的后效,在短时间内大量的声发射信号骤现^[17]。均质性差的岩石,在加热过程中微元能量分布离散,声发射活动保持在不稳定状态,热 Kaiser 效应出现的声发射信号相对分散而不集中^[13]。JY5、

HY3、HY4、FD1-1 和 FD2 等样品小柱体在低温段热声发射信号较多,能量累积曲线在加热过程中一直呈上抬的趋势(图 3),推断可能为样品小柱体均质性较差引起,但这些样品在最高古地温处的热 Kaiser 效应出现的能量信号仍然较为集中。

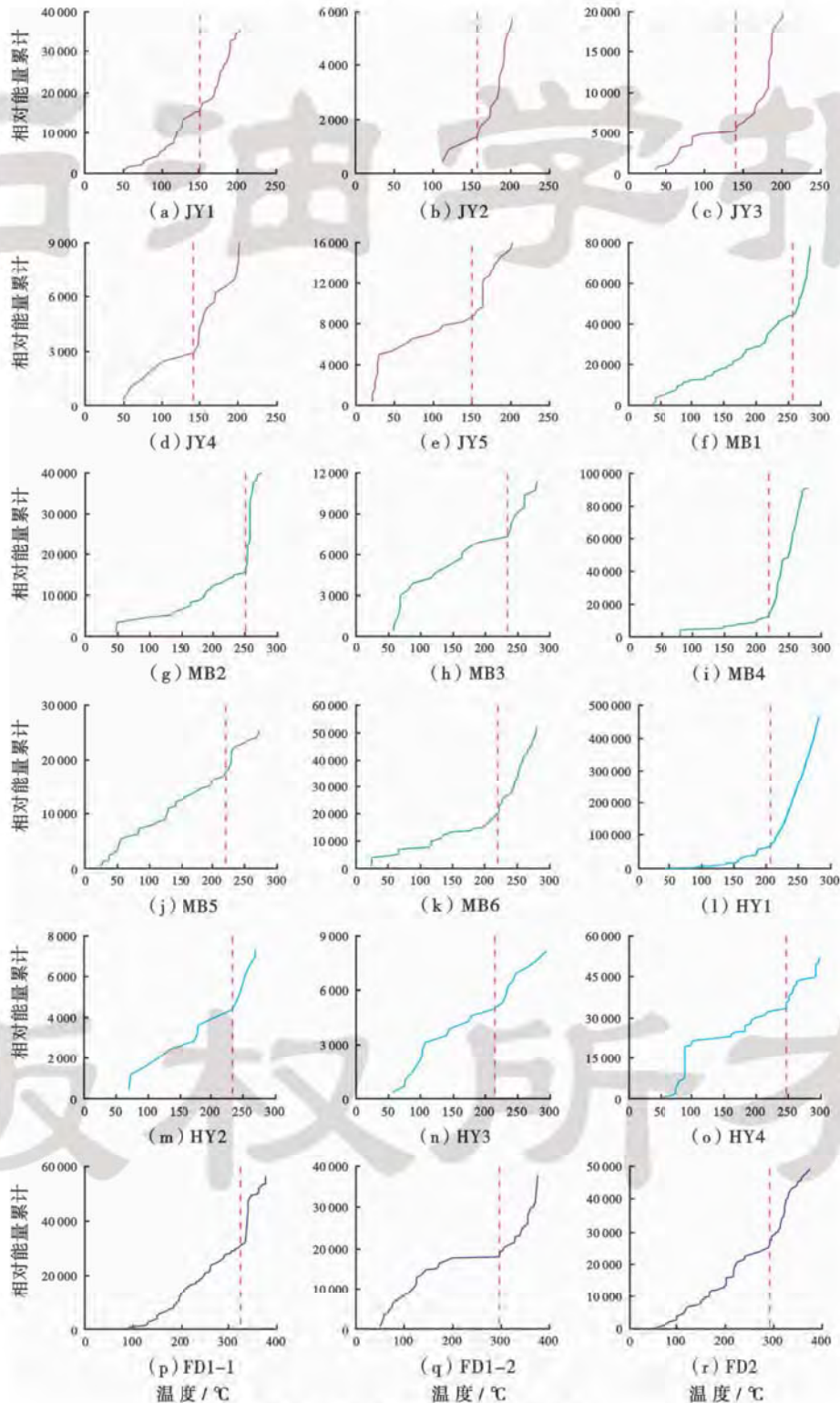


图 3 热声发射特征与温度的关系

Fig. 3 Relationships between thermo-acoustic emission characteristics and temperatures

岩石裂纹的形成是岩石成分、温度、压力、时间等多因素共同影响或作用的结果,所产生热 Kaiser 效应的声发射信号为干扰噪音。一般情况下,压力增加有助于裂纹的产生,在常压下裂纹的形成只受温度的影响,岩石热声发射实验得到的门槛温度应略高于实际经历的最高古地温^[25]。岩石经历最高古地温后的年龄也会对岩石热记忆能力有所影响^[26],这主要取决于后期的各种地质作用对岩石的改造强弱,在地质演化历史相对稳定的地区岩石热记忆衰退可能不明显,岩石热声发射测温产生的误差可能

不大。
3.2 热 Kaiser 效应检验

为了验证热 Kaiser 效应的存在和热声发射实验结果的正确性,选取 HY1 井和毛坝剖面 3 个已进行过热声发射实验的小柱样品进行再加热,均以 2℃/min 的加热速率从常温加热到 360℃,同时记录热声发射。当加温达到前次加热小柱最高温度时,样品的能量累计曲线斜率骤然增大,热 Kaiser 效应明显(图 4)。实验所得第二次岩石热声发射门槛温度与前次加热最高温度十分接近,误差百分比为 1.8%~3.3%(表 2)。

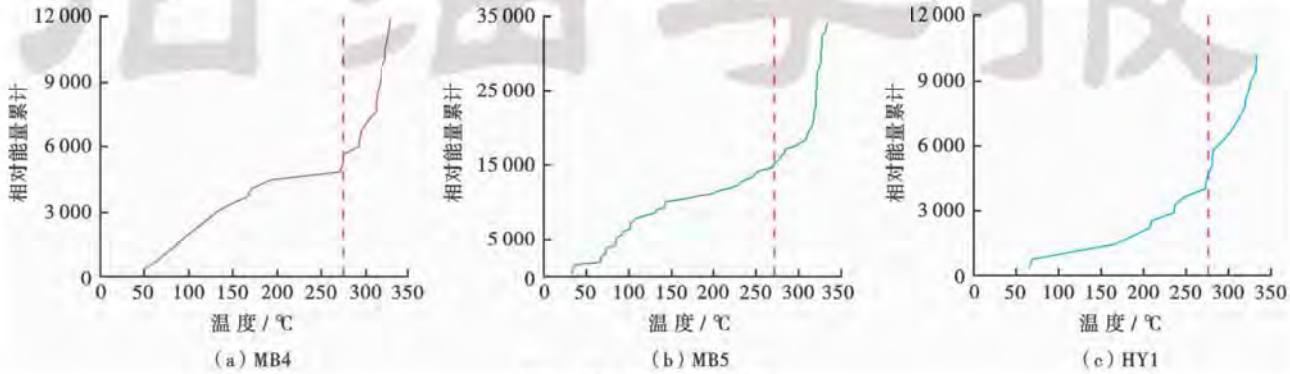


图 4 热 Kaiser 效应检验
Fig. 4 Examines of thermal Kaiser effect

表 2 部分样品的热 Kaiser 效应检验

Table 2 Examines of thermal Kaiser effect for three samples

样品编号	起始 温度/℃	控温终止 温度/℃	第二次加热小柱 最高温度/℃	第二次热声发射 实测最高温度/℃	第一次加热小柱 最高温度/℃	温度 差值/℃
MB4	42	360	334.5	274.8	279.7	4.9
MB5	23	360	334.8	270.9	280.0	9.1
HY1	68	360	334.2	275.6	281.9	6.3

4 热声发射最高古地温与热成熟史模拟

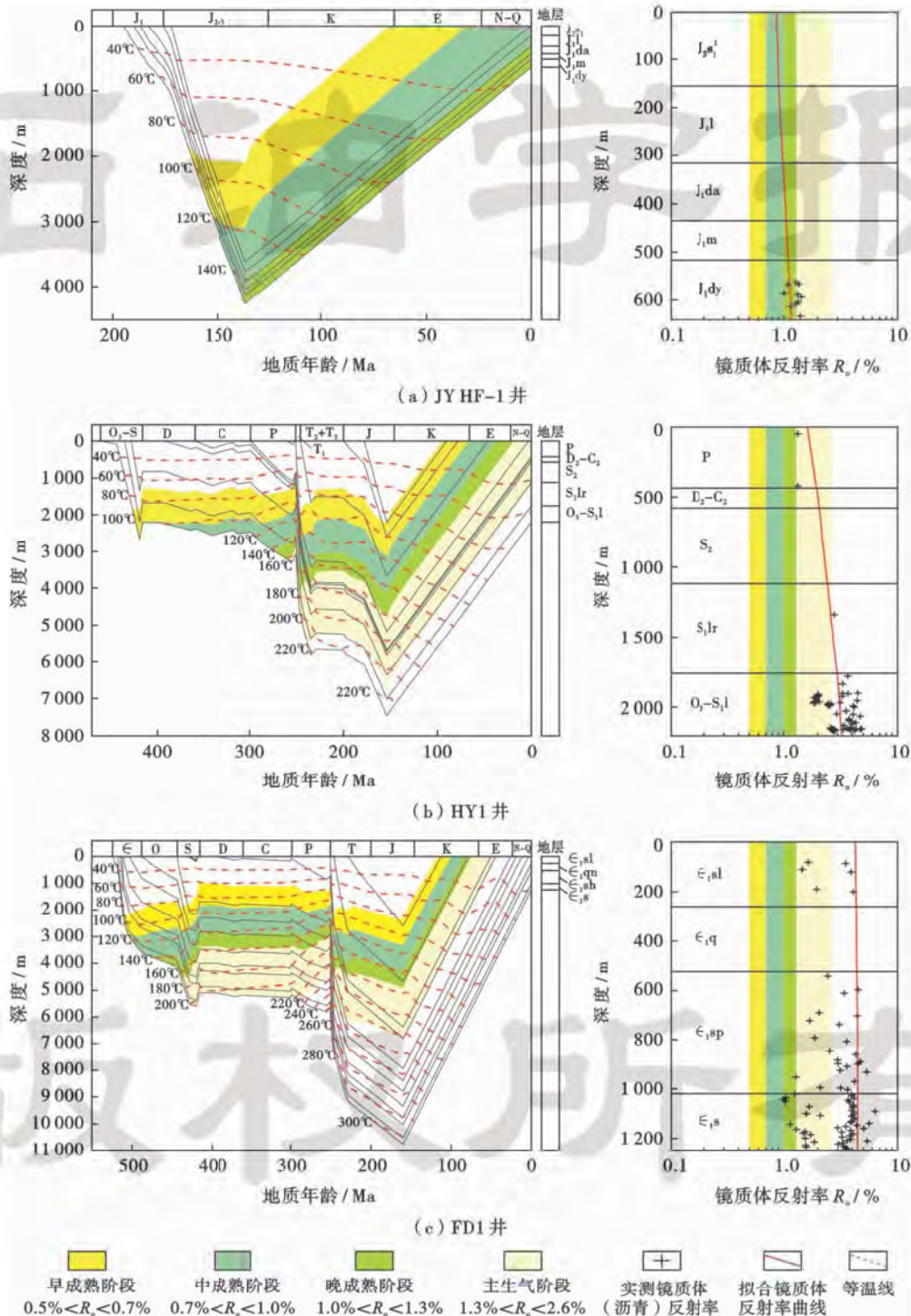
作为有机质成熟度的有效指标镜质体反射率(R_o)是地温和有效加热时间的函数且具不可逆性,依据岩石经历的地温和时间,通过 BasinMod 盆模软件可模拟推算中扬子地区西部下古生界海相地层的热成熟史。BasinMod 盆模软件中计算 R_o 的热动力学模型可采用 EASY% R_o 热力学和化学动力学模型^[27],该模型将有机质的热成熟过程表述为 20 个平行的 Arrhenius 一级反应动力学方程,动力学参数为一个相同的频率因子(A)和 20 个不同的活化能(E),模型计算的镜质体反射率(R_o)范围为 0.3%~4.5%。

本次开展了 FD1 井、HY1 井和 JY HF-1 井的地层埋藏史和热成熟史模拟,利用热声发射实验所测定的地层经历的平均最高古地温作为约束条件,模拟计算了 FD1 井和 HY1 井下古生界的热成熟史;利用 JY HF-1 井下侏罗统东岳庙段实测镜质体反射率作为约束条件,模拟计算了东岳庙段地层的最高古地温和热

成熟史,JY HF-1 井模拟计算结果可作为证实方法的可靠性。热成熟史模拟参数包括:古地表温度均取 18℃,模拟所需的地层和岩性资料根据实钻录井岩性和分层资料,现今热流值依据中国南方大地热流图^[28],为 43~50 mW/m²,燕山期大规模抬升剥蚀时间参考中扬子地区西部不同构造单元磷灰石裂变径迹研究得出的隆升时间,为 165~136 Ma 且由东向西隆升时间逐渐变晚^[14,29],燕山期地层剥蚀厚度根据镜质体反射率和磷灰石裂变径迹方法以及实钻录井和野外实测剖面厚度对比进行恢复^[14,23]。根据相关构造与热场研究^[19,30],研究区在寒武纪一志留纪属克拉通拗陷盆地,古热流变化在低热流值背景中具由克拉通向被动大陆边缘增高的趋势;晚二叠世初期一中三叠世受区域伸展作用的控制,且在邻区川东地区见有峨眉山玄武岩喷发,热流值达到最高;晚三叠世—侏罗纪为前陆盆地发育期,热流持续降低直至现今。根据研究区构造演化、所测最大古地温和前人对本地区古热流研究成果,获得模拟井古热流分布范围为 45~70 mW/m²。

单井一维热成熟史模拟结果表明,作为验证井 JY HF-1 井下侏罗统自流井组东岳庙段泥页岩实测镜质体反射率约在 1.1%~1.3%,作为约束条件模拟的最高古地温为 140~150℃(图 5),与热声发射测得的岩石最高古地温 142~156℃一致,说明热成熟度 R_o 可利用热声

发射测定的岩石最高古地温作为约束条件,采用 Basin-Mod 盆模软件模拟计算获得。利用 FD1 井下寒武统石牌组底部和 HY1 井上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组岩石样品测得的热声发射岩石最高古地温作为约束条件,利用 BasinMod 盆模软件模拟计算下古生界热成



注: J_2s_1 —中侏罗统下沙溪庙组; J_1l —下侏罗统自流井组凉高山段; J_1da —下侏罗统自流井组大安寨段; J_1m —下侏罗统自流井组马鞍山段; S_1lr —下志留统罗惹坪组; ϵ_1sl —下寒武统石龙洞组; ϵ_1q —下寒武统覃家庙组; ϵ_1s —下寒武统水井沱组。

图 5 中扬子地区西部 3 口钻井的一维热成熟史模拟

Fig. 5 One-dimensional thermal maturity modeling of Well JY HF-1, HY-1 and FD-1 in the western middle Yangtze region

熟度 R_o 为:FD1 井水井沱组 R_o 在 4.0%~4.5%,HY1 井五峰组—龙马溪组在 2.6%~3.2%。FD1 井和 HY1 井下古生界样品实测沥青反射率范围大,说明用沥青反射率解释热成熟度存在很大的不确定性(图 5)。

5 干酪根红外光谱特征与热成熟度

干酪根红外光谱特征反映了干酪根中有机官能团的类型和丰度,干酪根在热成熟过程中的组成和结构变化可利用红外光谱进行研究。随着成熟度的增加,其红外光谱特征表现为脂肪族吸收谱带透光率逐渐降低,并最终趋于消失,芳香烃吸收谱带不断增强的过程。参考红外光谱学和有机化学以及相关文献中图谱解释,本次测试的干酪根红外光谱中吸

收峰代表的基团为:①3450~3400 cm^{-1} 处的一个宽而不对称的吸收谱带和 1639~1610 cm^{-1} 处的吸收峰与水分子中 OH 基团的伸缩和弯曲振动有关(样品测试环境湿度在 53%,可能受 KBr 吸水影响);②2922 cm^{-1} 和 2860 cm^{-1} 的两个吸收峰与 CH_2 和 CH_3 脂肪基伸缩振动有关;③1603~1564 cm^{-1} 吸收谱带与芳香烃的 C=C 键有关;④1434 cm^{-1} 处的吸收峰 CH_2 的直链或环状的 CH_2 的弯曲振动有关;⑤与 1123~1069 cm^{-1} 吸收峰可能与黏土矿物 Si-O 基团有关;⑥930~700 cm^{-1} 处的强度较弱的连续吸收谱带与各种芳香烃的 CH 的面外弯曲振动有关;⑦1420 cm^{-1} 附近,955~954 cm^{-1} 和小于 700 cm^{-1} 的吸收谱带为杂原子吸收峰(图 6)。

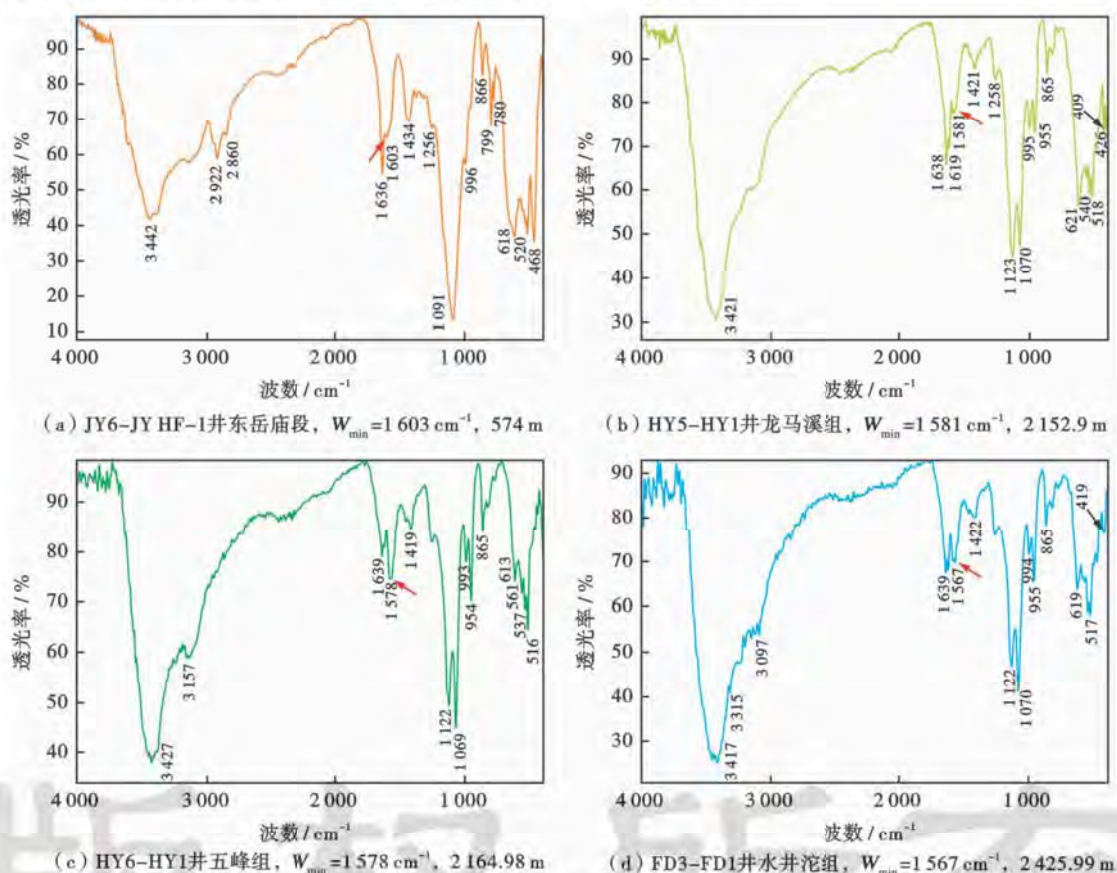


图6 中扬子地区西部下古生界海相页岩干酪根红外光谱特征

Fig. 6 Kerogen FTIR characteristics of the Lower Paleozoic marine shales in the western middle Yangtze region

FD1 井下寒武统水井沱组和 HY1 井上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组样品干酪根红外光谱分析表明,含氧基团($\text{C}=\text{O}$)1710 cm^{-1} 谱带和与 CH_3 和 CH_2 等脂肪族有关的谱带(2922 cm^{-1} 、2860 cm^{-1} 、1450 cm^{-1} 和 1370 cm^{-1})全部消失,与芳香烃 C=C 键有关的 1603~1567 cm^{-1} 吸收峰突出,而 C—H 面外弯曲振动谱带(930~700 cm^{-1})除 865 cm^{-1} 吸收峰外其他基本趋向消失。说明烷基链耗尽,芳香重排缩合,干酪根处于高热演化过成熟阶段。

国内外学者在干酪根红外光谱与其成熟度演化关系方面开展了大量研究^[21-36],认为随着热成熟度的增加,其芳环 C=C 键吸收峰显示出向低波数位移的趋势,提出了“芳环位移律”,并建立了干酪根 C=C 键红外吸收最小波数(W_{\min})与镜质体反射率的对应曲线关系(图 7)。关于此现象的成因,有学者研究认为随着温度升高,干酪根分子中芳环稠合程度增加,芳环结构的 π 键电子的离域作用增强,从而削弱了振动体系之间的相互作用力,使得振动所需能量相应减小,频率降

低,而发生 $C=C$ 键谱峰向低波数方向位移,并指出“芳环位移律”更适合高演化样品^[32];还有学者指出芳环吸收峰一般分布在 $1610\sim 1600\text{ cm}^{-1}$,浅层样品有时到 1630 cm^{-1} ,随着干酪根进一步热演化,频带高的波数向低波数一边迁移,低波数吸收峰保持 $1600\sim 1550\text{ cm}^{-1}$ 范围内不变,这些变化与 1710 cm^{-1} 处谱带的降低同时发生,而且可能要归因于含氧基团的脱除^[33]。这些解释从机理和自然地质现象上解释了“芳环位移律”,都能解释干酪根样品的热演化程度。利用已建立的 W_{\min} 与镜质体反射率经验关系图对研究区样品的成熟度进行了分析,发现下寒武统水井沱组页岩镜质体反射率为 4.2%,上奥陶统五峰组和下志留统龙马溪组分别为 2.9% 和 2.6%,下侏罗统自流井组东岳庙段为 0.9% (与实测值相比偏低,说明该方法更适合高演化样品)。由此可看出,根据“芳环位移律”推断的高演化样品镜质体反射率与模拟热成熟度镜质体反射率基本吻合。

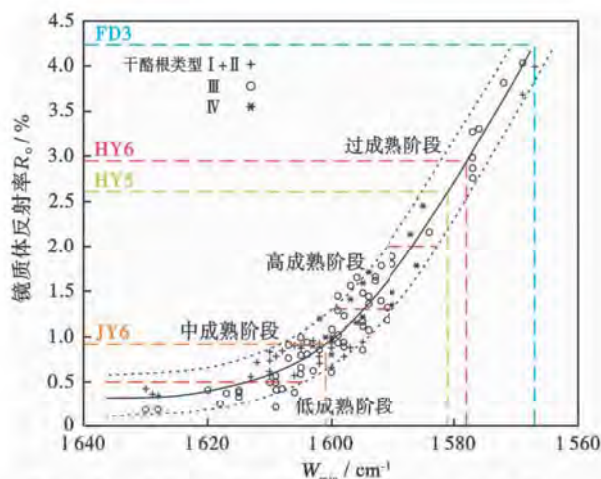


图 7 镜质体反射率与芳香族 $C=C$ 谱带最小波数 W_{\min} 相关图(据文献^[34]修改)

Fig. 1 Correlation of vitrinite reflectance and the minimum wavenumbers of the aromatic $C=C$ bands

6 结 论

(1) 岩石热声发射实验结果表明沉积岩样品的热声发射信号随温度的升高变化显著,热 Kaiser 效应明显,可以利用岩石热声发射测定其经历的最高古温度。利用岩层最高古地温作为约束条件,采用盆地模拟技术可模拟得到较为客观的有机质热演化程度即镜质体反射率。对高热演化干酪根样品,可根据干酪根红外光谱中发生 $C=C$ 键谱峰向低波数方向位移即“芳环位移律”推断有机质的热成熟度(镜质体反射率)。

(2) FD1 井下寒武统经历最高古温度范围为 $293\sim 324\text{ }^{\circ}\text{C}$,均值为 $305\text{ }^{\circ}\text{C}$;HY1 井上奥陶统一志留统为 $210\sim 256\text{ }^{\circ}\text{C}$,均值为 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$;下侏罗统为 $142\sim 156\text{ }^{\circ}\text{C}$,均值为 $149\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。利用岩层最高古地温约束的一维热成

熟史模拟得到,FD1 井下寒武统镜质体反射率范围为 $4.0\%\sim 4.5\%$,HY1 井上奥陶统一志留统模拟镜质体反射率为 $2.6\%\sim 3.2\%$ 。

(3) 干酪根红外光谱分析中的“芳环位移律”表明,FD1 井下寒武统水井沱组和 HY1 井上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组干酪根处于高热演化过成熟阶段,镜质体反射率与 W_{\min} 对应关系图投点值分别为:水井沱组 4.2%、五峰组 2.9% 和龙马溪组 2.6%,与热成熟史模拟计算的镜质体反射率范围一致。

致谢 在岩石样品热声发射实验和文章写作修改过程中得到了邱楠生教授的大力支持和指导,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 刘光鼎. 中国油气资源企盼二次创业[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(4): 1-3.
Liu Guangding. The second exploitation of the oil and gas resources in China[J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(4): 1-3.
- [2] 邱楠生, 李慧莉, 金之钧. 沉积盆地古生界碳酸盐岩地区热历史恢复方法探索[J]. 地质前缘, 2005, 12(4): 561-567.
Qiu Nansheng, Li Huili, Jin Zhijun. Study of the thermal history reconstruction for Lower Paleozoic carbonate succession[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 561-567.
- [3] 袁振明, 马羽宽, 何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
Yuan Zhenming, Ma Yukuan, He Zeyun. Acoustic emission technology and applications[M]. Beijing: China Machine Press, 1985.
- [4] Kaiser E J. A study on acoustic phenomena in tensile test[D]. Munich, Germany: Technische Hochschule Munchen, 1950.
- [5] Goodman R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74(4): 487-490.
- [6] Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 883-899.
- [7] Choi N S, Kim T W, Rhee K Y. Kaiser effects in acoustic emission from composites during thermal cyclic-loading[J]. NDT and E International, 2005, 38(4): 268-274.
- [8] Tuncay E, Ulusay R. Relation between Kaiser effect levels and prestresses applied in the laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(4): 524-537.
- [9] Rao M V M S, Prasanna Lakshmi K J. Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture[J]. Current Science, 2005, 89(9): 1577-1582.
- [10] 邱泽华, 张宝红, 池顺良, 等. 汶川地震前姑咱台观测的异常应变变化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2010, 40(8): 1031-1039.
Qiu Zehua, Zhang Baohong, Chi Shunliang, et al. Abnormal strain changes observed at Guza before the Wenchuan earthquake[J]. Science China Series D: Earth Sciences, 2011, 54(2): 233-240.
- [11] Yavuz H, Demirdag S, Caran S. Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(1): 94-103.
- [12] 席道瑛, 程经毅, 黄建华. 声发射在研究岩石古温度中的应用[J]. 中国科学技术大学学报, 1996, 26(1): 97-100.
Xi Daoying, Cheng Jingyi, Huang Jianhua. The application of acoustic emission in the study of ancient temperature of rock[J]. Journal of China University of Science and Technology, 1996, 26(1): 97-100.

- [13] 李佳蔚,邱楠生,梅庆华,等.利用热声发射技术测量岩石最高古地温的探索[J].地球物理学报,2011,54(11):2898-2905.
Li Jiawei, Qiu Nansheng, Mei Qinghua, et al. Study on measuring the highest rock paleotemperature with thermo-acoustic emission [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(11): 2898-2905.
- [14] 梅廉夫,刘昭茜,汤济广,等.湘鄂西-川东中生代陆内递进扩展变形:来自裂变径迹和平衡剖面的证据[J].地球科学:中国地质大学学报,2010,35(2):161-174.
Mei Lianfu, Liu Zhaoqian, Tang Jiguang, et al. Mesozoic intra-continental progressive deformation in Western Hunan-Hubei-Eastern Sichuan provinces of China: evidence from apatite fission track and balanced cross-section [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(2): 161-174.
- [15] 颜丹平,汪新文,刘友元.川鄂湘边区褶皱构造样式及其成因机制分析[J].现代地质,2000,14(1):37-43.
Yan Danping, Wang Xinwen, Liu Youyuan. Analysis of fold style and its formation mechanism in the area of boundary among Sichuan, Hubei and Hunan [J]. Geoscience, 2000, 14(1): 37-43.
- [16] Yong Chen, Wang Chiyuen. Thermally induced acoustic emission in Westerly granite [J]. Geophysical Research Letters, 1980, 7(12): 1089-1092.
- [17] 孙吉主,周健,唐春安.影响岩石声发射的几个因素[J].地壳形变与地震,1997,17(2):1-5.
Sun Jizhu, Zhou Jian, Tang Chun'an. Factors affecting acoustic emission of rock [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1997, 17(2): 1-5.
- [18] 武晋文,赵阳升,万志军,等.中高温三轴应力下鲁灰花岗岩岩热破裂声发射特征的试验研究[J].岩土力学,2009,30(11):3331-3336.
Wu Jinwen, Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics of granite thermal cracking under middle-high temperature and triaxial stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3331-3336.
- [19] 卢庆治,马永生,郭彤楼,等.鄂西-渝东地区热史恢复及烃源岩成烃史[J].地质科学,2007,42(1):189-198.
Lu Qingzhi, Ma Yongsheng, Guo Tonglou, et al. Thermal history and hydrocarbon generation history in western Hubei-Eastern Chongqing area [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 189-198.
- [20] 陶树,汤达祯,许浩,等.中、上扬子区寒武-志留系高过成熟烃源岩热演化史分析[J].自然科学进展,2009,19(10):1126-1133.
Tao Shu, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. The thermal history of Cambrian-Silurian high/over mature source rock in middle and upper Yangtze region [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(10): 1126-1133.
- [21] 汤济广,梅廉夫,周旭,等.扬子陆块差异构造变形对海相地层成烃演化的控制[J].天然气工业,2011,31(10):36-41.
Tang Jiguang, Mei Lianfu, Zhou Xu, et al. Control of differential tectonic deformation on hydrocarbon generation and evolution of marine sequences in Yangtze massif [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 36-41.
- [22] 石红才,施小斌,杨小秋,等.鄂西渝东斗山-石柱褶皱带中新生代隆升剥蚀过程及构造意义[J].地球物理学进展,2012,26(6):1993-2002.
Shi Hongcai, Shi Xiaobin, Yang Xiaoqiu, et al. Exhumation process of the Fangdoushan-Shizhu fold belt in Meso-Neozoic and its tectonic significance in western Hubei-Eastern Chongqing [J]. Progress in Geophysics, 2012, 26(6): 1993-2002.
- [23] 傅宇方,梁正召,唐春安.岩石介质细观非均匀性对宏观破裂过程的影响[J].岩土工程学报,2000,22(6):705-710.
Fu Yufang, Liang Zhengzhao, Tang Chun'an. Numerical simulation on influence of mesoscopic heterogeneity on macroscopic behavior of rock failure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 705-710.
- [24] 吴晓东,刘均荣.岩石热开裂影响因素分析[J].石油钻探技术,2004,31(5):24-27.
Wu Xiaodong, Liu Junrong. Factors on the thermal cracking of rocks [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 31(5): 24-27.
- [25] Wong T F, Brace W F. Thermal expansion of rocks: some measurements at high pressure [J]. Tectonophysics, 1979, 57(2/4): 95-117.
- [26] 樊运晓.时间对大理岩凯塞效应的影响[J].地质力学学报,2001,7(1):92-96.
Fan Yunxiao. Research on marble Kaiser effect affected by time factor [J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(1): 92-96.
- [27] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [28] 袁玉松,马永生,胡圣标,等.中国南方现今地热特征[J].地球物理学报,2006,49(4):1118-1126.
Yuan Yusong, Ma Yongsheng, Hu Shengbiao, et al. Present-day geothermal characteristics in south China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1118-1126.
- [29] 李天义,何生,何治亮,等.中扬子地区当阳复向斜中生代以来的构造抬升和热史重建[J].石油学报,2012,33(2):213-224.
Li Tianyi, He Sheng, He Zhiliang, et al. Reconstruction of tectonic uplift and thermal history since Mesozoic in the Dangyang synclinorium of the central Yangtze area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 213-224.
- [30] 王洪江,刘光祥.中上扬子区热场分布与演化[J].石油实验地质,2011,33(2):160-164.
Wang Hongjiang, Liu Guangxiang. Distribution and evolution of thermal field in middle and upper Yangtze region [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(2): 160-164.
- [31] Durand B. Kerogen: insoluble organic matter from sedimentary rocks [M]. Paris: Editions TECHNIP, 1980.
- [32] 周萱密,陈美茜,何志高.应用红外光谱方法研究干酪根的演化程度[J].石油实验地质,1981,3(4):307-316.
Zhou Xuanmi, Chen Meiqian, He Zhigao. Application of infrared spectrophotometry in studying the evolution of kerogen [J]. Petroleum Geology and Experiment, 1981, 3(4): 307-316.
- [33] 杨志琼,唐琳仙,杨一峰.我国陆相生油岩干酪根的红外光谱特征[M]//中国石油学会石油地质委员会.有机地球化学和陆相生油.北京:石油工业出版社,1986:211-223.
Yang Zhiqiong, Tang Linxian, Yang Yifeng. Infrared spectrography of kerogens from continental source rocks in China [M] // Petroleum Geological Institute of Chinese Petroleum Society. Organic geochemistry and origin of oil from continental deposits. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 211-223.
- [34] Ganz H H, Kalkreuth W. IR classification of kerogen type, thermal maturation, hydrocarbon potential and lithological characteristics [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1991, 5(1/4): 19-28.
- [35] Xiao Jianxin, Chen Shanqing. Changes of infrared absorption wave number of aromatic-ring C=C bond of vitrinite and their significance [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(12): 1048-1050.
- [36] 李岩,王云鹏,赵长毅,等.煤中干酪根在热演化中结构变化的红外光谱研究[J].矿物岩石地球化学通报,2013,32(1):97-106.
Li Yan, Wang Yunpeng, Zhao Changyi, et al. The FTIR study on structure changes of coal kerogen in the maturation process [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(1): 97-106.