

聚集型高演化天然固体沥青成因 ——以湘西脉状碳沥青为例

王崇敬¹, 曹代勇¹, 陈健明², 张鹤¹, 周荣洲², 周济¹, 杨光¹

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 湖南煤田地质局第二勘探队, 株洲 412003

摘要 聚集型高变质程度的脉状碳沥青广泛存在于湖南湘西州寒武系地层, 通过野外调查和实验测试, 获得了碳沥青赋存特征、微观形态特征及母质来源、组成和演化程度等信息。野外调查发现, 碳沥青矿脉大多赋存北东—北北东走向的小断裂内, 通过扫描电镜及能谱 (SEM-EDX) 技术、X射线衍射光谱 (XRD) 技术、傅里叶红外光谱 (FT-IR) 技术测试了样品的微观形态、元素组成及分子结构。扫描电镜照片显示碳沥青具备流动状结构与镶嵌结构, X射线衍射光谱也有石墨的衍射峰出现, 说明碳沥青达到了较高的演化阶段; 红外光谱的官能团信息显示碳沥青源于干酪根的演化; 通过实验数据的对比分析发现, 无论是微观形貌还是组分特征, 碳沥青既保留了原始石油的一些特征又受到强烈的后期改造影响, 部分原始特征甚至被后期改造掩盖。

关键词 脉状碳沥青; 湘西; 物质来源

中图分类号 TE122.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.24.005

Formation Mechanism of Aggregated Type Natural Bitumen with High Evolution Degree: With Vein Anthraxolite in Xiangxi as an Instance

WANG Chongjing¹, CAO Daiyong¹, CHEN Jianming², ZHANG He¹, ZHOU Rongzhou², ZHOU Ji¹, YANG Guang¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China

2. The Second Prospecting Team, Hunan Coalfield Geology Bureau, Zhuzhou 412003, China

Abstract The metamorphic grade aggregated type natural vein anthraxolite is widespread in Cambrian strata in Xiangxi, Hunan. The characteristics of its occurrence and microscopic morphology, the source, the composition and the evolution degree are obtained based on the field investigation and analysis. Anthraxolite Veins are hosted mainly in the NE-NNE small faults. With the SEM-EDX (scanning electronic microscopy with energy dispersive X-ray), the XRD techniques and the Fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR), the chemical composition, the morphology and the molecular structure characteristics are identified. The data suggest that the anthraxolite is in a high evolution stage because of the flow structure and the mosaic texture of the SEM images and the graphite diffraction peak of XRD. The functional groups from the Fourier infrared absorption spectrometry illustrate the anthraxolite derived from the kerogen evolution. The anthraxolite with the characteristics of the original oil is shown, and it is influenced in the later stage, which sometimes even covers up the original features.

Keywords vein anthraxolite; Xiangxi; material source

收稿日期: 2014-05-04; 修回日期: 2014-06-17

基金项目: 中国地质调查局资源评价项目 (12120113040600)

作者简介: 王崇敬, 博士研究生, 研究方向为非常规油气地质, 电子信箱: wangchongjing1987@163.com; 曹代勇 (通信作者), 教授, 研究方向为构造地质学, 电子信箱: cdy@cumtb.edu.cn

引用格式: 王崇敬, 曹代勇, 陈健明, 等. 聚集型高演化天然固体沥青成因——以湘西脉状碳沥青为例[J]. 科技导报, 2014, 32(24): 40-45.

20世纪70年代以来,湖南湘西地区一直将碳沥青作为固体燃料进行勘探与开发利用,当地人将其作为煤炭的替代品,用于烤烟、烧砖及取暖等,因此,碳沥青也被称为沥青煤,极大地缓解了湘西地区对煤炭需求的压力。湘西地区碳沥青的正式勘探,较早的是湘西自治州燃化局地质队第三普查组1973年5月提交的《凤凰县水田石煤初查报告》,当时将碳沥青作为早古生界的石煤勘察,此后持续至20世纪90年代,由不同的勘察单位陆续发现了古丈县河逢与排若、吉首社塘坡与结联、凤凰县大田(即后来的万溶江碳沥青矿)等多个富集在断裂中的碳沥青矿,部分矿区在2000年后又进行了重新勘察。

国内学者对碳沥青的研究始于20世纪80年代初。1980年,童玉明^[1]论述了湖南宁乡县西南黄材下志留统张性断裂破碎带内赋存的一种“优质腐泥无烟煤”,将其认定为碳沥青,认为是石油演变的产物,为准油矿物或真正的石油通过迁移与富集作用,经历地沥青、石沥青和碳质沥青等阶段变质作用形成;1981年,朱建国^[2]认为所谓的碳沥青是早寒武世石煤发生塑性流动,流动过程中原岩中沥青质和碳质逐步富集,充填于有利的构造部位,经区域或动力变质作用,形成了碳沥青煤矿床。随后,越来越多的学者对江南隆起带的碳沥青做了研究,对于碳沥青“油源”与“煤源”的成因均有部分支持者,也有部分观点认为围岩就是碳沥青的源岩,而多数研究者赞成碳沥青来源于早古生代古油藏^[3-6]。

油气地质工作者在油气勘探中一直将沥青作为良好的油苗,沥青脉在南方海相地层中广泛存在,碳沥青作为油气演化的一种重要形式受到越来越高的重视,因为它不仅记录了油气的运移过程,更重要的是反映了产区的油气演化程度,这对于所勘察区域的油气勘探前景显得至关重要。本文分析碳沥青矿体自身特征,通过扫描电镜与能谱(SEM-EDX)、X射线衍射光谱(XRD)、傅里叶红外光谱(FT-IR)等手段,根据碳沥青的宏观特征、微观形态及官能团等信息,探讨研究区碳沥青的成因。

1 地质背景

研究区位于江南—雪峰隆起西侧,是以埃迪卡拉系浅变质岩系为主体的隆起带,属于武陵山分区,隶属于扬子区和

江南区的过渡地带,具有复杂的演化历史^[7]。研究区内主体构造线呈北北东方向,元古界及下古生界寒武系地层广泛分布,寒武纪以后沉积的地层均被后期构造抬升剥蚀。研究区内已发现的几个典型脉状碳沥青矿脉分布在万岩背斜两侧的断裂与构造裂缝内,且绝大多数分布在万岩背斜西侧(图1)。

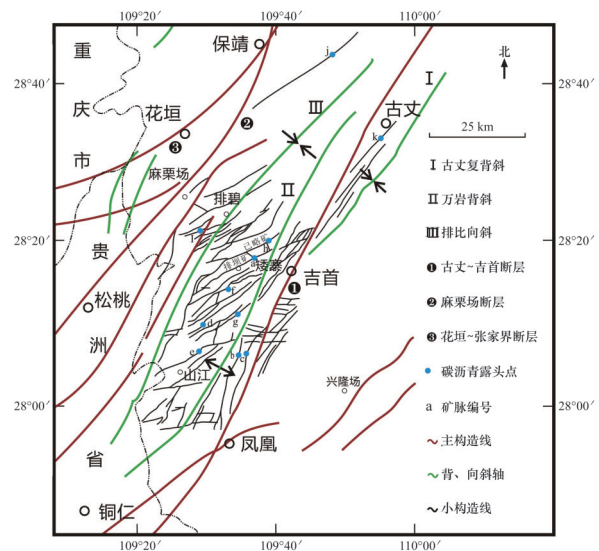


图1 研究区构造特征与碳沥青分布位置

Fig. 1 Tectonic characteristics and anthraxolite sites

湘西地区寒武系碳酸盐岩的沉积环境争议颇多,目前多数学者认为属深水碳酸盐沉积,早寒武世的浊积岩属间歇远源碳酸盐浊流,白云岩亦属深水白云岩,这套碳酸盐岩的构造沉积环境应归属大陆斜坡^[8](图2)。湘西地区早寒武世发育各种藻类,前人通过微体古生物化石及稳定碳同位素等方法得出藻类是中国南方早古生界寒武系油气的生油母质。秦建中等^[9,10]通过实验得出中国南方海相优质烃源岩具有浮游生物、底栖生物和菌类多重母质的组合特点,并通过热压生烃模拟实验证实了浮游藻在成熟早期(R_o 为0.45%~0.7%)就出现生油高峰,并大量生成以非烃和沥青质为主的重质油,这也是研究区脉状碳沥青发育的原始物质基础,即重油的形成。



图2 湘西北寒武纪沉积环境模式

Fig. 2 Sedimentary environment pattern of the Cambrian in Northwestern Hunan

2 碳沥青产出特征

Rogers是最早研究沥青且最具影响的人物,他将沥青划分为储层沥青、石墨沥青、地沥青及油母沥青4种成因类型^[11],国内学者根据沥青的不同性质做出具有不同侧重点的分类方案^[12-14]。研究区脉状碳沥青赋存在断裂内,对比上述各沥青分类方案可知,研究区碳沥青具有后生-储层沥青、异地沥青与热演化成因沥青等综合特点,与烃源岩或储层分散沥青具有明显的区别。

2.1 碳沥青的性状

碳沥青是一种具有高热演化程度的天然固体沥青,是研究区古油藏遭受破坏后沥青质运移聚集而成。碳沥青外观与煤相似,但无层理,敲击可见贝壳状断口,黑色或灰黑色,染手,易碎。矿脉宽度0.2~4.0 m,一般为0.2~0.8 m。根据其宏观结构,将碳沥青分为角砾状、颗粒状及粉末状。角砾状碳沥青产于围岩与碳沥青过渡带内,硬度较大;颗粒状碳沥青硬度介于角砾状碳沥青与粉末状碳沥青之间,常见显著的擦痕;粉末状碳沥青硬度最小,结构紧密。

2.2 矿脉赋存特征

研究区脉状碳沥青分布很广,但多被茂密植被覆盖而露头并不多见。寒武纪各时代地层中均有碳沥青赋存,如凤凰水田早寒武世碳沥青、凤凰万浴江中寒武世碳沥青、吉首社塘坡中寒武世碳沥青、古丈河蓬早寒武世一中寒武世碳沥青、吉首寨阳新溪中寒武世碳沥青、吉首已略早寒武世碳沥青及坪年碳沥青等^[15]。

野外调查发现研究区碳沥青矿脉主要有两种赋存形式:一是呈脉状赋存在断裂中,此类型占绝对优势;二是呈层状赋存在层间裂缝中,部分地段显示成囊状。两种赋存形式的存在,说明碳沥青在形成之初具有无缝不入的特征。

国内外学者通过实验得到基本一致的结论:无论顺着裂缝系统充注油气,还是垂直裂缝系统充注油气,油气将首先选择较大裂缝作为运移通道,然后再选与之相连的次级裂裂缝^[16,17],蒋有录等^[18]对东营凹陷东辛地区的断裂带内沥青赋存特征的研究也表明,主断裂是沥青赋存最有利的场所。因此,尽管目前发现的碳沥青矿脉多数赋存在小断裂内,但主断裂深部有可能存在规模更大的碳沥青矿脉。

矿脉空间展布形态严格受断裂控制。碳沥青矿脉厚度小于破碎带宽度。矿脉出现分支开叉、尖灭与合并,沿走向与倾向都呈现S型现象,矿脉局部有富集段出现。正断层与逆断层中均有碳沥青产出,并无规律可循。赋存断裂两盘产状变化并不明显,更像是赋存在一个较大的裂缝中,且矿脉与围岩界限清晰。另外,碳沥青矿脉走向主体为北东-北北东向,少数为北西向。

3 碳沥青组成

研究区聚集型高演化天然固体沥青组成复杂,是有机物质与无机物质混合而成。为分析脉状碳沥青中含有的矿物成分与碳骨架结构,从采集的样品中选取质地较纯的碳沥青

样品分别做X射线粉末衍射技术(XRD)与傅里叶红外光谱(FT-IR)测试,通过光谱学分析获得碳沥青成分、结构及有机官能团信息。

3.1 碳沥青结构与成分

XRD是研究固体微观结构的常用方法,20世纪80年代至今一直有很多学者通过X射线研究沥青的结构^[19]。碳沥青是由有机不溶物、无机矿物质和沥青物质组成的混合物,沥青含量较高,并且在长期地质作用下已具备一定的结晶特征。

从图3的碳沥青X射线衍射图谱可以看出碳沥青复杂的组成:2 θ 为26.6°、31.0°、60.0°时分别出现石英、方解石与斜长石的衍射峰;为20.8°、25.6°、41.2°时分别对应沥青的 γ 、(002)与(100)衍射谱带。碳沥青具有沥青含量高、结晶度较高以及存在多种结晶矿物的特征。沥青的稠环芳香烃结构可在X射线衍射图谱中显示出类似石墨等层状晶体的衍射图谱,XRD衍射图谱中 γ 谱带是由脂链碳衍射引起的,(002)谱带是沥青中芳碳的贡献^[19]。

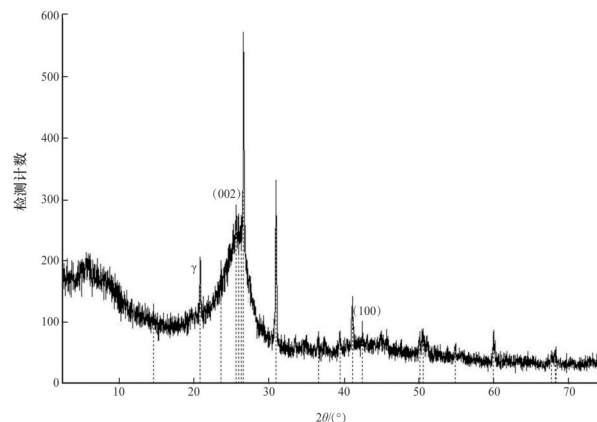


图3 碳沥青X射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction diagram of anthraxolite

X射线衍射光谱表明,碳沥青是由很多无机矿物与沥青组成,尤其是方解石衍射峰十分明显,代表沥青的 γ 谱带、(002)谱带及(100)谱带明显存在。碳沥青中碳元素发生了部分定向排列而石墨化,说明碳沥青的演化程度很高,已具备了一定结晶特征。

3.2 有机官能团组成

中红外光谱的频率在4000~400 cm⁻¹,是一般有机化合物基频振动频率范围,可以给出非常丰富的结构信息。中红外光谱因具有特征性强与可提供官能团、化合物的类别、化合物的立体结构、取代基的位置及数目等多信息的特点而成为有机化合物结构研究的普遍手段,也是国内外学者研究沥青最常用的方法之一^[20]。

将选好的碳沥青样品(1~2 g)充分研磨后分别装进洗净的小烧杯,放进烘箱内40℃下8 h烘干(将盛有KBr固体的烧杯一同放进烘箱内),尽量除尽样品中的水分以减小羟基的干扰。烘干后分别用针尖挑取微量样品与适量KBr混合后研磨做压片,进而做红外图谱的测定,处理过程中应注意完成

一个样品后用无水酒精将用过的实验工具充分清理干净,以免样品间相互污染造成测试结果误差。

如图4所示,3435 cm^{-1} 吸收峰应该是由游离的羟基或缔合后的氨基产生的;2980 cm^{-1} 吸收峰是脂肪族不饱和的 $=\text{CH}_2$ 产生的,2917与2873 cm^{-1} 均代表脂肪族C—H伸缩振动引起的微弱吸收峰;2512 cm^{-1} 吸收峰与指纹区的712 cm^{-1} 吸收峰均显示了 CaCO_3 的存在;双键与酰卤羰基共轭,会使C=O伸缩振动频率向低波数位移,1798 cm^{-1} 吸收峰是由芳香族酰卤的C=O伸缩振动产生,同时指纹区的648~464 cm^{-1} 区域的吸收峰也是有机卤化物存在的反应;C=C双键与苯环相连发生共轭作用,引起C=C伸缩振动向低频位移至1628 cm^{-1} ,再有,当 CH_2 基团与不饱和基团或电负性强的原子(Cl、O等)相连时, CH_2 弯曲振动向低频位移,因此,1420 cm^{-1} 吸收峰也是由烯烃端基上的 CH_2 弯曲振动所引起;1128 cm^{-1} 可能是由脂肪醚C—O伸缩振动引起的吸收峰;875 cm^{-1} 吸收峰可能由苯环、吡啶、萘、蒽、菲及其取代化合物的 $=\text{CH}$ 产生。

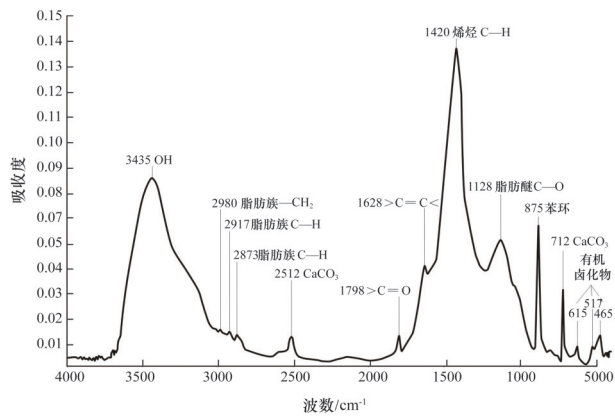


图4 碳沥青红外光谱特征

Fig. 4 FT-IR spectrum diagram of anthraxolite

石油沥青组分主要为芳香族化合物,其中苯环结构较多,其次为脂肪族碳氢化合物。碳沥青红外光谱图可与Suchy^[21]所测由石油演化而来固体沥青红外光谱图对比,是碳沥青源于石油的一个有力证据。

通过对碳沥青红外光谱的解译,能够发现2个主要特点:方解石多呈脉状侵入到碳沥青矿脉中,即便是纯净的碳沥青中依然有分散状方解石存在;另一个是芳香族化合物、烯烃类与醚类的C=C及C=O的伸缩振动。由此可以看出,一方面是原生及后生方解石在碳沥青中广泛存在,二是油气演化过程中生成 CH_2 等小分子量烃类的同时,碳、碳之间,碳、氧之间发生缩合形成了分子量较大的物质。

4 碳沥青形成机理

4.1 物质来源

湘西地区碳沥青矿脉与围岩界线清晰,不存在渐变的过度关系,显然断裂中的碳沥青是异地运移而来,而非围岩生

成,另外,围岩所含有机质不足以将整个裂缝完全填充形成现今规模的矿脉。鉴于目前碳沥青在研究区寒武系各层位地层中均有赋存,而石煤难以做长距离运移,因此,本文认为石煤是碳沥青直接来源的观点与客观地质事实不符。综合前人研究成果,并将碳沥青红外光谱与国内外学者研究的沥青红外光谱对比,可见其具有石油转化沥青的特征,

准确地说,碳沥青的直接来源是研究区古油藏遭受破坏后的油气,而油气则来源于海洋中的底栖藻类与浮游藻类。由藻类形成了低熟稠油,而油藏在加里东运动末期遭受了小规模的结构破坏,此时形成的碳沥青规模及分布范围有限。晚侏罗世—早白垩世的燕山运动是古油藏破坏的主要时期,也是碳沥青形成的主要时期^[22,23]。构造破坏沟通了地表水与油藏,使油气经历了一系列的油气稠化作用,使得胶质与沥青质不断富集,油气向稠油沥青转变,为碳沥青的形成奠定了物质基础,成为碳沥青的直接物质来源。

4.2 碳沥青形成与演化

研究区碳沥青矿脉走向总体上呈北东—北北东向展布,是形成于燕山期破坏的一种表现,绝大多数矿脉露头赋存在小断裂内,但目前在野外调查中已发现大断裂内碳沥青矿脉赋存,且矿脉规模比小断裂明显要大得多。大断裂内碳沥青是一个重要的发现,解决了小断裂中碳沥青来源的问题,也符合油气对运移通道的选择规律。

研究区古油藏在燕山期大量破坏,古油藏破坏后物质运移至构造裂缝与断层内富集而成固体沥青,在裂缝与断层内固体沥青又受到多次后期汽水热液影响而演化程度增高,部分成分与形态发生改变。根据沥青的演化规律,在低至中等演化阶段,沥青表现为均一结构,随着经历的温度逐步升高,沥青由均一结构向中间相转变,之后根据条件不同有两个演化方向,一种是中间相基质未得到充分发展而形成的镶嵌结构,另一种是中间相小球体得到充分发展而逐步经历球状结构→复合球状结构→片状结构→流动状结构^[14,24]。碳沥青属于高演化程度的天然固体沥青,通过对碳沥青矿脉做扫描电镜观测与能谱测试(图5),可见3种主要的结构类型分别为流动结构、片状结构与镶嵌结构,3种结构均是碳沥青达到较高演化程度的象征。另外,通过对其他样品的观测与统计发现,远离方解石脉的碳沥青多具有微裂缝发育的特征,这些微裂缝为碳沥青形成及冷却后又经历了构造改造而成,而靠近方解石脉的碳沥青虽然也形成构造破坏的微裂缝,但后期侵入的气水热液带来的热量使原有裂缝愈合。

从能谱测试可以看出,碳沥青元素组成上都以碳、氧为主,碳元素含量都在70%以上,图5(a)的能谱图还显示有V元素峰存在,这也是碳沥青源于海相油气的一个佐证。不同分带的碳沥青在元素组成上也显示出差异性,其中最明显的是矿脉中部的粉末状碳沥青在元素组成上具有相对“高硅低钙”的特点,而颗粒状及过渡带的角砾状碳沥青则具有相对“低硅高钙”的特征,元素含量差异也表明固体沥青形成后受到了较严重的后期改造作用。

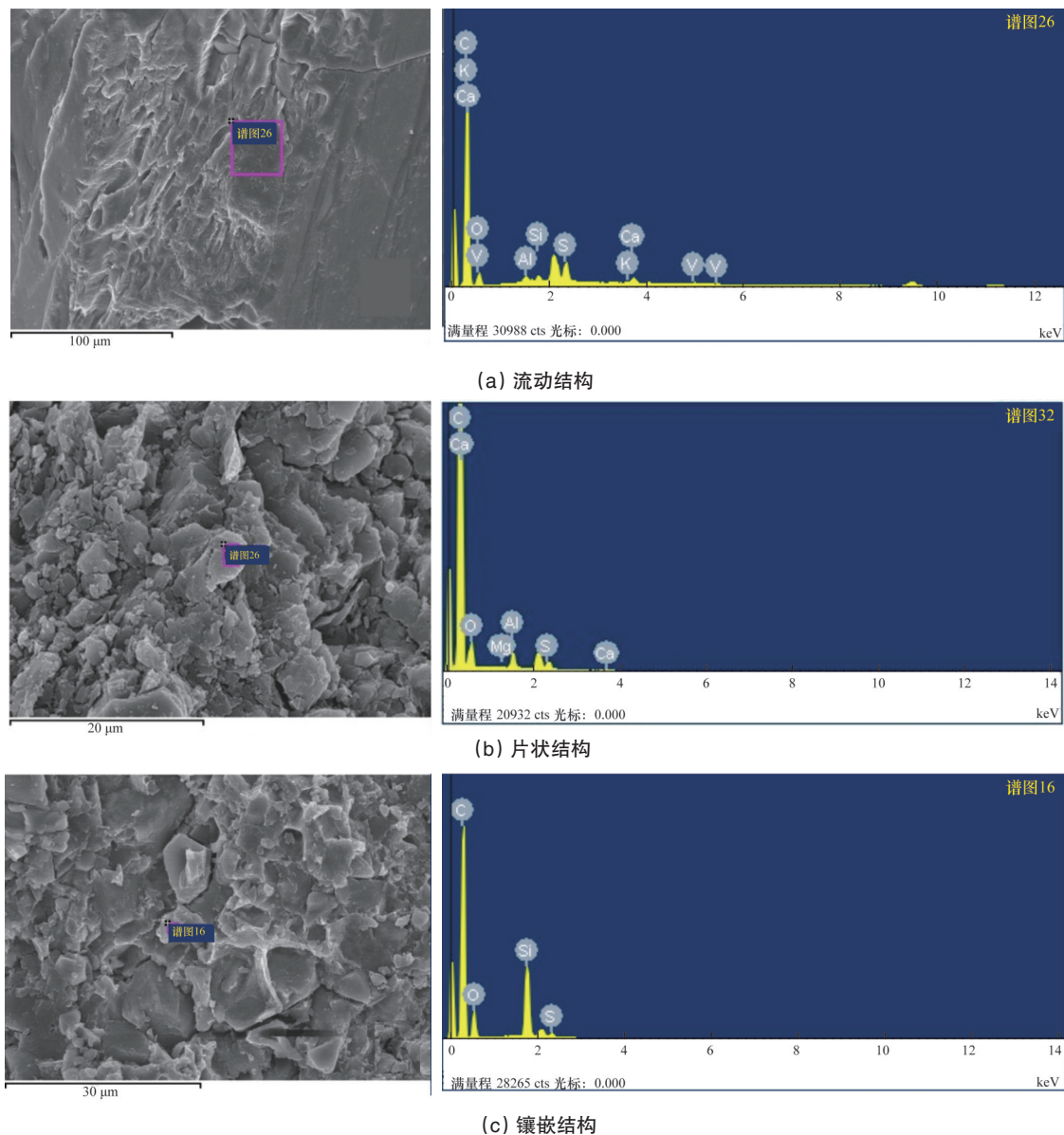


图5 碳沥青结构

Fig. 5 Structure of anthraxolite

综合分析可知,碳沥青从微观形貌与X衍射图谱均呈现高演化沥青特征,在物质组成上既保留了原始油气的部分性质,又受到了严重的后期改造,而后期改造既反映在微观形貌上,也在能谱、X衍射光谱及红外光谱上有所反应。

5 结论

1) 通过XRD分析可知碳沥青组成复杂,以有机成分为主,并含有方解石、石英等矿物;傅里叶红外光谱显示碳沥青与海相石油具有亲缘性,成矿物质来源于破坏的古油藏,而围岩不具备形成充满裂缝的碳沥青矿脉的能力,而石煤显然不可能做长距离的运移赋形成寒武系上部层位碳沥青。

2) 碳沥青以聚集态赋存在以小断裂为主的断裂内,与分散在烃源岩中或储层中的沥青产出状态明显不同,是古油藏

遭受破坏后物质沿断裂运移与富集而成;碳沥青具有较高的有机质热演化程度,微观形态呈现流动结构、片状结构与镶嵌结构;在碳沥青形成演化过程中不断与外界进行能量与物质交换,造成矿脉不同位置组成具有一定差异;现今碳沥青既保留了原始油气的性质,也可见受到外界气水热液改造的证据。

通过野外地质调查与大量的实验测试分析工作,已经查明湘西地区碳沥青的物质来源、成因、演化过程及赋存特征,该工作的完成不仅为研究区碳沥青下一步的勘查与开发提供理论支持,缓解湖南缺煤地区对固体燃料的迫切需求,同样对研究中国南方海相油气系统高演化阶段的成藏演化特征具有一定的借鉴意义。

参考文献 (References)

- [1] 童玉明. 从多因复成再造富集型黄材碳沥青矿看湖南早古生代油气前景[J]. 大地质构造与成矿学, 1985, 4(2): 1-7.
Tong Yuming. Hydrocarbon prospects of Early Palaeozoic in Hunan Province from Huangcai polygenetic reconstruction enrichment type anthraxolite[J]. Geotectonica et metallogenia, 1985, 4(2): 1-7.
- [2] 朱建国. 湖南碳沥青煤成因探讨[J]. 煤田地质与勘探, 1981, 10(28): 26-29.
Zhu Jianguo. Genesis of anthraxolite in Hunan Province[J]. Coal Geology & Exploration, 1981, 10(28): 26-29.
- [3] 徐伟民. 浙西及皖南的碳沥青和油气关系[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1991, 15(3): 8-14.
Xu Weimin. Relationship between carbonaceous bitumen and generation of oil and gas in western Zhejiang and southern Anhui provinces[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition, 1991, 15(3): 8-14.
- [4] 姜海定. 论浙江省碳沥青的成因[J]. 中国煤田地质, 1996, 8(4): 23-26.
Jiang Haiding. Genesis of anthraxolite, Zhejiang[J]. Coal Geology of China, 1996, 8(4): 23-26.
- [5] 陈安定, 黄金明, 杨芝文, 等. 皖南——浙西下古生界碳沥青成因及南方海相“有效烃源岩”问题探讨[J]. 海相油气地质, 2004, 9(1/2): 77-83.
Chen Anding, Huang Jinming, Yang Zhiwen, et al. Discussions on origin of carbonaceous asphalt in lower paleozoic strata in southern Anhui and western Zhejiang and on marine efficiency source rocks in southern China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2004, 9(1/2): 77-83.
- [6] 曹代勇, 朱学申, 邓觉梅, 等. 湘西北万溶江矿碳沥青特征分析及其地质意义[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 110-112.
Cao Daiyong, Zhu Xueshen, Deng Juemei, et al. Analysis on features of anthraxolite from northwestern Hunan Wanrongjiang mine and geological meaning[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 110-112.
- [7] 梅廉夫, 邓大飞, 沈传波, 等. 江南—雪峰隆起构造动力学与海相油气成藏演化[J]. 地质科技情报, 2012, 31(5): 81-93.
Mei Lianfu, Deng Dafei, Shen Chuanbo, et al. Tectonic dynamics and marine hydrocarbon accumulation of Jiangnan-Xuefeng uplift[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5): 81-93.
- [8] 梁百和, 朱素琳. 湘西吉首地区寒武系碳酸盐岩沉积环境的初步探讨[J]. 沉积学报, 1992, 10(2): 39-43.
Liang Baihe, Zhu Sulin. Preliminary discussion on sedimentary environments of Cambrian carbonatite in Jishou district of western Hunan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(2): 39-43.
- [9] 秦建中, 李志明, 刘宝泉, 等. 海相优质烃源岩形成重质油与固体沥青潜力分析[J]. 石油试验地质, 2007, 29(3): 280-291.
Qin Jianzhong, Li Zhiming, Liu Baoquan, et al. The potential of generating heavy oil and solid bitumen of excellent marine source rocks [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2007, 29(3): 280-291.
- [10] 秦建中, 申宝剑, 付小东, 等. 中国南方海相优质烃源岩超显微有机岩石学与生排烃潜力[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 826-837.
Qin Jianzhong, Shen Baojian, Fu Xiaodong, et al. Ultramicroscopic organic petrology and potential of hydrocarbon generation and expulsion of quality marine source rocks in South China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 826-837.
- [11] Rogers M A, McAlary J D. Significance of reservoir bitumens to thermal maturation studies, Western Canada Basin[J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(9): 1806-1824.
- [12] 刘德汉. 碳酸岩中的沥青[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
Liu Dehan. The asphalt in carbonatite[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [13] 肖贤明, 刘德汉, 傅家谟. 沥青反射率作为烃源岩成熟度指标的意义[J]. 沉积学报, 1991, 12(S1): 139-145.
Xiao Xianming, Liu Dehan, Fu Jiamo. The significance of bitumen reflectance as a mature parameter of source rocks[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991, 12(S1): 139-145.
- [14] 阵中凯, 金奎励. 天然固体沥青的有机岩石学特征[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(4): 18-22.
Chen Zhongkai, Jin Kuili. Organic petrology characteristics of nature solid bitumens[J]. Coal Geology & Exploration, 1995, 23(4): 18-22.
- [15] 韩世庆, 武智平. 江南隆起西侧沥青脉的产状成因及其地质意义[J]. 石油实验地质, 1981, 3(2): 85-93.
Han Shiqing, Wu Zhiping. Occurrence causes and geological significances of anthraxolite in the west side of Jiangnan uplift[J]. Petroleum Geology and Experiment, 1981, 3(2): 85-93.
- [16] 姜振学, 庞雄奇, 曾溅辉, 等. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 507-516.
Jiang Zhenxue, Pang Xiongqi, Zeng Jianhui, et al. Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 507-516.
- [17] Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: A three-dimensional model[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9): 1451-1481.
- [18] 蒋有录, 刘华. 断裂沥青带及其油气地质意义[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 36-41.
Jiang Youlu, Liu Hua. Fault asphalt zone and its significance in petroleum geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 36-41.
- [19] 契林盖里 G V. 石油科学进展(7)——沥青、地沥青和沥青砂[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
Chilingari G V. Petroleum science development(7): Bitumen, asphalts and tar sands[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.
- [20] 李炜光, 段炎红, 颜录科, 等. 利用石油沥青红外光谱图谱特征测定沥青的方法研究[J]. 石油沥青, 2012, 26(4): 9-14.
Li Weiguang, Duan Yanhong, Yan Luke, et al. Study on measuring method of asphalt using infrared spectrum characteristic of petroleum pitch[J]. Petroleum Asphalt, 2012, 26(4): 9-14.
- [21] Suchý V, Dobeš P, Sýkorová I, et al. Oil-bearing inclusions in vein quartz and calcite and, bitumens in veins: Testament to multiple phases of hydrocarbon migration in the Barrandian basin (lower Palaeozoic), Czech Republic[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010(27): 285-297.
- [22] 赵宗举, 朱琰, 李大成. 中国南方中、古生界古今油气藏形成演化控制因素及勘探方向[J]. 天然气工业, 2002, 22(5): 1-6.
Zhao Zongju, Zhu Yan, Li Dacheng. Factors controlling the formation and evolution of mesozoic and paleozoic oil/gas reservoirs and their exploration targets in south China[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(5): 1-6.
- [23] 李双建, 高波, 沃玉进, 等. 中国南方海相油气藏破坏类型及其时空分布[J]. 石油试验地质, 2011, 33(1): 43-49.
Li Shuangjian, Gao Bo, Wo Yujin, et al. Destruction types and temporal-spatial distribution of marine hydrocarbon reservoirs in South China[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(1): 43-49.
- [24] 贺福. 中间相沥青的生成机理及其性质[J]. 碳素, 1983(1): 1-11.
He Fu. Forming mechanism and properties of mesophase pitch[J]. Carbon, 1983(1): 1-11.

(责任编辑 王媛媛)