

中国南方早古生代页岩有机质的扫描电镜研究

张慧¹, 焦淑静², 庞起发¹, 李宁¹, 林伯伟¹

[1. SGS 集团瑞华通正非常规油气技术检测(北京)有限公司, 北京 102200; 2. 中国石油大学 能源材料微结构实验室, 北京 102249]

摘要:南方早古生代页岩是我国页岩气勘探开发的首选层系,其有机质的研究极其必要和重要。通过制取页岩样品的自然断面(垂直层理的面和平行层理的面)和氩离子抛光面,在场发射扫描电镜下,对安徽省、贵州省、四川省等地早古生代(下寒武统、上奥陶统、下志留统)页岩有机质的显微组分、化学成分、赋存状态、孔隙类型等进行了较系统的观测和研究。结果表明,早古生代页岩的有机显微组分以生烃能力强的沥青质体和菌藻体为主。沥青质体由几十至几百纳米的球粒组成,无固定形态,赋存状态有条带状、孔隙状、薄膜状。菌藻体具有明显的生物形貌特征,形状各种各样,大小为几十微米,赋存状态主要为碎屑状。在显微组分识别的基础上,将有机质孔隙的成因类型划分为生物孔、气孔、沥青球粒孔和铸模孔。其中气孔和沥青球粒孔均发育于沥青质体内部,孔径主要为纳米级,是有机质生烃演化的直接见证,其发育程度可作为烃源岩生烃潜力的评价指标之一。

关键词:显微组分;孔隙类型;扫描电镜;有机质;早古生代;页岩

中图分类号:TE135.1

文献标识码:A

SEM observation of organic matters in the Eopaleozoic shale in South China

Zhang Hui¹, Jiao Shujing², Pang Qifa¹, Li Ning¹, Lin Bowei¹

(1. SGS Unconventional Petroleum Technical Testing Co., Ltd., Beijing 102200 China; 2. Microstructure Laboratory For Energy Materials, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The Eopaleozoic shale in South China is assessed as the preferred target for shale gas exploration and development in China, and the research on its organic matters is imperative. Some shale samples are taken from the Eopaleozoic such as the Lower Cambrian, Upper Ordovician and Lower Silurian in Anhui, Guizhou and Sichuan provinces in South China. The naturally fractured surfaces (perpendicular to or parallel to the beddings) and the argon ion milled surface are prepared from these shale samples. Under the scanning electron microscope (SEM) with field emission, the maceral, chemical composition, occurrences of the organic matters and pore types are systematically observed and studied. The results show that the organic maceral types are dominated by bituminite and bacteria and algae body with strong potential of hydrocarbon generation. The bituminite is composed of spherulites with several to dozens of nanometers in diameter with stripped, interstitial, thin films and amorphous occurrences. The bacteria and algae body has obvious characteristics of biological morphology, mainly in clastic form and dozens of micrometers in diameter. On the basis of identification of maceral, the genetic types of the organic pores are classified into biological pore, vesicular pore, bitum-spherulite pore and molded pore. And both the vesicular pore and bitum-spherulite pore occur in the interior of bituminite and their diameters are of nanometer-scale, which are the direct evidences of hydrocarbon generation from organic matters. Therefore, the development degree of these pores is viewed as one of the indexes for hydrocarbon generation potential assessment of the source rocks.

Key words: maceral, pore type, SEM, organic matter, Eopaleozoic, shale

页岩(广义的)作为烃源岩和储集层,具有组成矿物复杂、粒度细小、粘土矿物多、有机质与无机质共生、孔隙与裂隙成因类型多且尺度细微等特点。这些特点使得页岩用传统的岩石学、储层学手段和方法分析测试,得到的信息非常有限;这些特点使得页岩微观分析测试和研究成为必不可少。微观分析测试手段有各种类型的扫描电子显微镜(简称扫描电镜)及其配套软

件、微纳米 CT 扫描、双离子束扫描电镜等。

扫描电镜具有样品制备简单、观测视域广、倍率范围大、形貌与成分信息可以同时获得的优势,现已成为页岩有机质分析测试的必备手段。20 世纪后期,扫描电镜在常规油气储层(砂岩、灰岩等)、煤层气储层、微体古生物等方面的研究比较多,先后出版了较系统而全面的研究专著^[1-2]。页岩及其有机质的大量扫描电

镜观测开始于近年的页岩气勘探开发,同时也从国外引进了一些新型扫描电镜(包括应用软件、制样设备)。但同样的扫描电镜,常因样品制备方法、观测方式、观测人员不同而获得的信息各异。本文从样品制备—上机观测,介绍扫描电镜观测页岩的新方法和新视角,报道中国南方早古生代页岩有机质的显微组分、赋存状态、孔隙类型等研究结果。

1 研究手段和方法

1.1 仪器设备

采用的仪器设备主要是场发射扫描电镜,同时配有能谱分析仪、金喷镀仪、氩离子抛光仪等。

1.2 样品制备

样品制备流程包括:取样、研磨、抛光、喷镀(金)导电层。

送给扫描电镜实验室的页岩样品一般要求是块样,大于 5cm³ 的块状样品(称大块样品)。实验人员应首先对大块样品进行宏观观察,确定层理方向,然后从大块样品上用锤子敲取扫描电镜适用的小块(1cm³ 左右),并记录观测面方向。

对于页岩(包括其它沉积岩)的扫描电镜观测面应分别取垂直层理和平行层理的新鲜断面。1 个大块样品上至少要取 3 个小块,两块垂直层理的面(1 块进行氩离子抛光,另 1 块观测自然断面),1 块平行层理的面。样品制备类型不同,观测内容也不同(表 1)。实际取样过程中,常会遇到裂隙面、滑移面、摩擦面等,这些面会优先破裂,有时候难以避免重新取样。

氩离子抛光技术率先在北美的页岩微孔隙研究中应用^[3-4],近年来国内相关报道也较多^[5-6]。抛光面上

便于区分矿物质和有机质,但因研磨抛光,矿物、显微组分、微体化石等形貌特征被破坏或消失。故应对自然断面和抛光面进行综合观测,方可获得较全面的信息。

自然断面和抛光面一般均应喷镀导电层,喷镀厚度需适中,方可获得高质量图像。如果导电层过薄,电荷容易集中,影响图像质量。如果导电层过厚,高倍下金粒子显现,易造成一些假象。

1.3 上机观测

上机观测要注意合理选择放大倍数。先在低倍下仔细观察之后,再提高倍数,倍数可由低到高,再由高到低,反复观察,以便弄清各种局部现象与整体的关系,必要时做微区成分分析。

低倍下(几百倍至几千倍)重点观测微米级尺度的内容。包括页岩的微层理、结构和构造,碎屑颗粒的分布及其与泥质的接触关系,判断微米级孔隙的成因类型及其连通情况,识别有机显微组分及其赋存状态。

高倍下(上万倍至几万倍)主要对低倍图像局部放大。观测碎屑颗粒表面现象、蚀变矿物、自生矿物和单个粘土矿物。鉴定矿物种类,判断其成因。观测纳米级孔隙及其发育特征。

2 样品地质背景

本文页岩样品取自中国南方下寒武统(Є₁)、上奥陶统(O₃)、下志留统(S₁)的钻孔岩心,岩性主要为炭质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩等。

下寒武统页岩取自安徽省和贵州省,采样深度为 1 200~2 800 m,有机碳含量为 0.63%~12.5%,硫含量为 0.6%~6.82%,脆性矿物(包括石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿等)含量为 22.7%~95.5%,粘土矿物含量为 7.2%~71.4%。页岩有机质最大反射率为 2.36%~4.31%。上奥陶统页岩取自四川省和湖南省,采样深度为 2 200 m 左右,有机碳含量为 0.85%~3.40%。下志留统页岩取自四川省、重庆市,采样深度为 2 000 m 左右,有机碳含量为 0.66%~4.15%。

3 有机显微组分

有机显微组分是有机岩石学的主要研究内容,也是生烃母质类型及其孔隙发育特征研究的基础。显微组分的鉴定方法和手段主要是光学显微镜^[7-8],扫描电镜的成像原理与光学镜不同,难以依据光学镜的鉴定标志来识别显微组分。以往煤的扫描电镜研究^[1]建立了显微组分识别途径和标志,即本文研究页岩有机质的基础。

表 1 早古生代页岩不同样品制备类型的观测内容

Table 1 Items of observation for different Eopaleozoic shale samples

样品制备类型		观测内容
垂直层理	自然断面	微层理,间层沉积,顺层缝隙,碎屑颗粒表面特征,裂隙及其成因类型判断,裂隙充填及连通情况。有机质及其分布特征,有机质孔隙及其成因类型判断,有机显微组分鉴定。矿物晶形、蚀变、次生加大等,单个粘土矿物形貌,鉴定粘土矿物,判断矿物成因
	抛光面	便于区分矿物质和有机质,微层理,裂隙缝隙,碎屑颗粒轮廓,有机质切断面及其分布情况,有机质孔隙
平行层理	自然断面	层面沉积物(微体化石、凝胶颗粒、铸模孔),裂隙及其组合形式,碎屑颗粒及其粒边缝隙、划痕、擦痕、碎粒、糜棱质、收缩裂隙。微体化石和碎屑有机质在层面易见

3.1 显微组分的识别

识别显微组分一般在自然断面上进行,二次电子(SE)和背散射电子(BSE)图像的亮度、形貌、大小、与矿物质的接触关系、赋存状态、能谱分析结果等均为识别标志和依据。各显微组分在扫描电镜下的主要鉴定标志见表 2。

早古生代页岩中可识别的显微组分主要为腐泥组。腐泥组的显微组分在透射光下(干酪根显微组分)和全岩反光镜下的名称不同(表 3),扫描电镜观测全岩,采用全岩光片显微组分名称及分类比较合适。按全岩光片显微组分名称,早古生代页岩有机显微组分主要为沥青质体和菌藻体。

3.2 沥青质体

沥青质体是低等水生生物菌藻类降解的产物,海相、湖相页岩的主要有机显微组分,属无定形体,具有强的生烃潜力^[7-8]。扫描电镜放大几千倍至 1 万倍左右时,沥青质体可以清晰地识别,其轮廓不规则,没有固定形态,大小不等,二次电子图像亮度小于矿物质,常与自生石英、黄铁矿等紧密共生(图 1a)。3 万倍以上时,沥青质体由几~几十纳米的球粒组成,球粒大小相近,排列紧密(图 1b)。

沥青质体在垂直层理的自然断面上易见,是早古生代页岩的主要有机显微组分。干酪根分离及其光学显微镜研究结果^[9]也表明,深水相页岩中无定形体显微组分占绝对优势,有时含量可达到 100%。

根据扫描电镜附件能谱仪的半定量(或定性)分析结果,沥青质体的主要化学成分为 C、Si、O(表 4)。

表 2 早古生代页岩扫描电镜下显微组分鉴定标志

Table 2 Markers for identification of maceral in the Eopaleozoic shale under SEM

显微组分	图像亮度	形貌特征	赋存状态
镜质组	小	平坦、均质,贝壳状断口	条带状、块状,气孔发育,裂隙发育
惰质组	大	保留较多的植物组织结构	纤维状丝质体平行层理排列,层面上多见
壳质组(腐泥组)	最小	具生物形貌均质、无固定形态	多镶嵌于镜质组,或呈条带状、填隙状,发育气孔和生物孔
矿物质	最大	标形晶体形貌	脉状、团窝状、分散状、充填生物组织孔

表 3 早古生代页岩腐泥组显微组分名称

Table 3 Sapropel maceral names for the Eopaleozoic shale

显微组分	干酪根显微组分	全岩光片显微组分
腐泥组	腐泥无定形体	结构菌藻体
	藻类体	无结构菌藻体
	腐泥碎屑体	沥青质体

C 含量为 22.69%~95.35%,Si 含量为 3.17%~47.63%,O 含量为 8.46%~17.05%。各成分含量均不稳定,表明有机质形成的微环境变化较大。

化学成分与赋存状态相关,由表 4,条带状沥青质体的 C 含量比较高,达 95.35%,一般为 70%左右;填隙状沥青质体的 C 含量为 54.09%~80.09%;薄膜状沥青质体的 C 含量为 2.69%~39.27%。秦建中^[10]用扫描电镜能谱仪分析结果表明,条带状有机质的平均 C 含量为 74.6%,与本次测值相当。

3.3 菌藻体

菌藻体是具有一定结构的单细胞或多细胞水生浮游低等生物遗体,具有明显的生物形貌特征,重要的生烃母质。光学镜下进一步划分为层状菌藻体、结构菌藻体、无结构菌藻体^[7-8]。扫描电镜下不便细分,均称之为菌藻体。数千倍时可观测单个菌藻体及其表面纹饰(图 1c—e)。

菌藻体的形状各种各样,单体几乎没有相同的,且有成群成窝分布的特点。沿二维方向延展的有水母形、蘑菇形、卷筒形、薄片状等,大小为 20~30 μm 左右。沿一维方向延展的有长条形、纺锤形、虾形、海带形等,其短轴长 2~20 μm,长轴长 5~50 μm。菌藻体表面常有皱纹、沟槽,凹凸不平,边部常折卷。

菌藻体的化学成分以 C、Si、O 为主,C 含量为 25.28%~54.51%,一般为 40%左右;Si 含量为 6.52%~31.57%,一般为 20%左右,O 含量为 13.74%~28.21%。此外,有的菌藻体 N 含量高,有的含钙质、硅质、磷灰质比较高。

4 有机质赋存状态

已有研究^[9-10]表明,页岩有机质有多种赋存状态。本次在有机显微组分识别的基础上,根据有机质与矿物质(包括晶质矿物和非晶质矿物)的接触关系,将有机质赋存状态划分为 4 种类型:条带状、填隙状、薄膜状、碎屑状。

4.1 条带状有机质

有机质与矿物质交替沉积形成条带或微层,是早古生代页岩有机质的主要赋存状态之一。条带状有机质一般在低倍下即可分辨(图 2a),有连续的长条带,也有断续的短条带。条带长轴方向大多与层理方向一致,宽度多为几个微米或更小。图像亮度明显低于矿物质,抛光面上有机质表现为黑色,矿物质表现为灰色或白色。

4.2 填隙状有机质

有机质不同程度的充填矿物质孔隙,形成填隙状

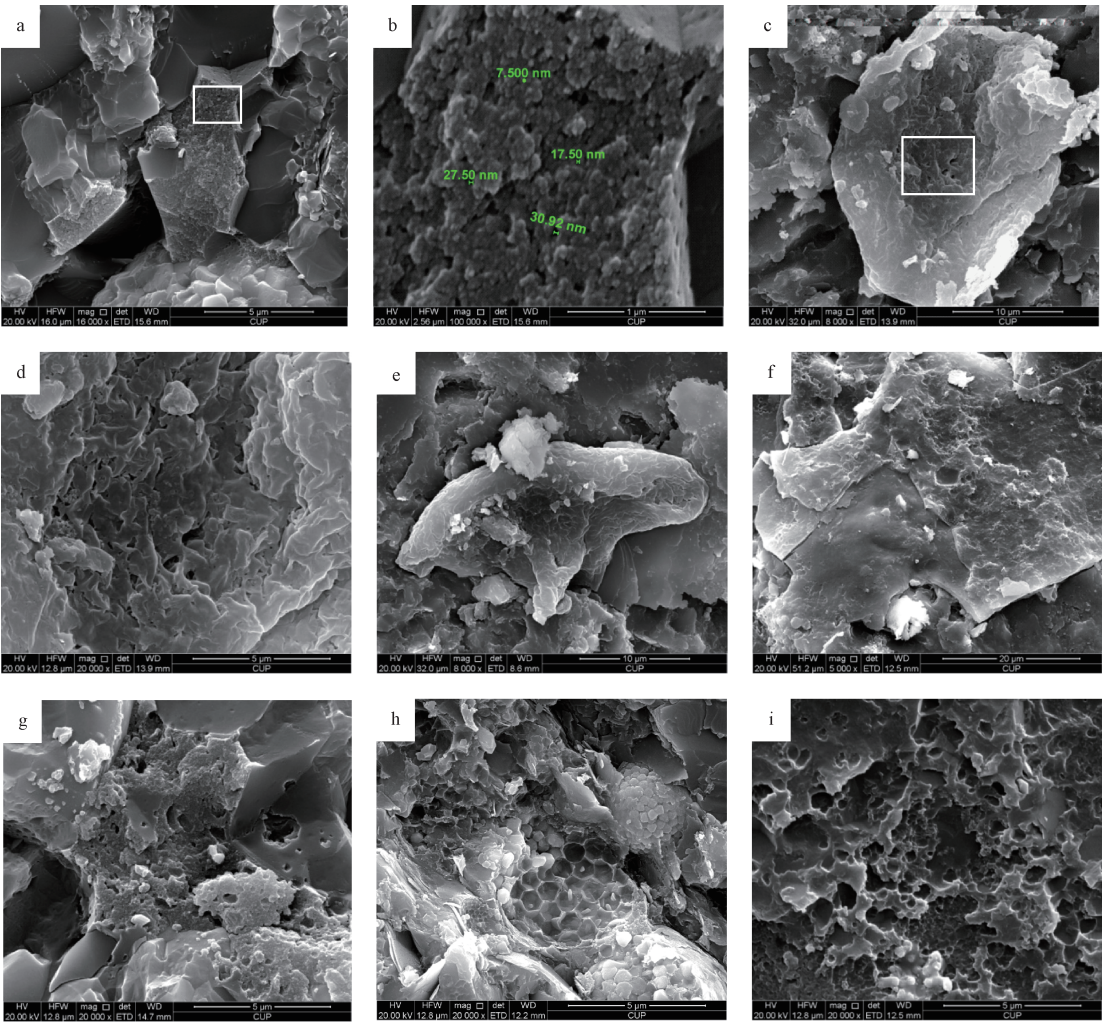


图1 早古生代页岩自然断面的二次电子图像

Fig. 1 Secondary electron images of the natural fractured surfaces in the Eopaleozoic shale

a. 贵州C₁,沥青质体,与黄铁矿共生;b. a图放大,沥青球粒孔;c. 贵州C₁,片状菌藻体;d. c图放大,菌藻体内部的生物孔;e. 四川S₁,蘑菇状菌藻体;
f. 重庆S₁,薄膜状有机质;g. 贵州C₁,沥青球粒孔和气孔;h. 湖南C₁,黄铁矿铸模孔;i. 重庆S₁,自生矿物铸模孔

表4 早古生代页岩沥青质体的能谱分析结果

Table 4 Energy spectrum analysis of bituminites in the Eopaleozoic shale

分析点	赋存状态	主要成分含量/%		
		C	Si	O
Fn-001	填隙状	75.09	11.80	8.46
Fn-002	填隙状	54.09	24.48	11.11
Fn-003	薄膜状	34.18	38.54	14.89
Fn-004	条带状	95.35	3.17	
Fn-005	薄膜状	39.27	21.11	17.05
Fn-006	薄膜状	22.69	47.63	15.09
Fn-007	填隙状	80.09	5.43	14.48
Fn-008	填隙状	68.50	12.14	15.75
Fn-009	填隙状	58.00	10.15	13.59
Fn-010	条带状	74.59	6.51	12.37

有机质,是早古生代页岩有机质的主要赋存状态之一。被充填的原生孔隙有顺层缝隙、粒边缝隙或粒间孔(图2b),显微组分主要为沥青质体,有时与矿物质界限不清,二者呈渐变接触关系。在形成时间上,充填原生孔

隙的有机质略晚于矿物质,故二者构成胶结关系。

4.3 薄膜状有机质

薄膜状有机质是层面(自然断面)上多见的有机质赋存状态(图1f)。薄膜厚度大时,完全覆盖矿物质;厚度小时,矿物质隐约可见。层面上杂质多,导致薄膜状有机质的成分比较复杂,C含量低于条带状和填隙状有机质(表4)。

4.4 碎屑状有机质

与泥粒级矿物大体同沉积的碎屑有机质,主要为菌藻体(图1c—e)或其他生物碎屑。菌藻体大小(20~30 μm)与细粉砂级碎屑相当,但生物体比重小,按重力沉积分异作用,菌藻体与泥质颗粒大体同期沉积。

5 有机质的孔隙特征

页岩作为储层,其孔隙类型的划分方案诸多。

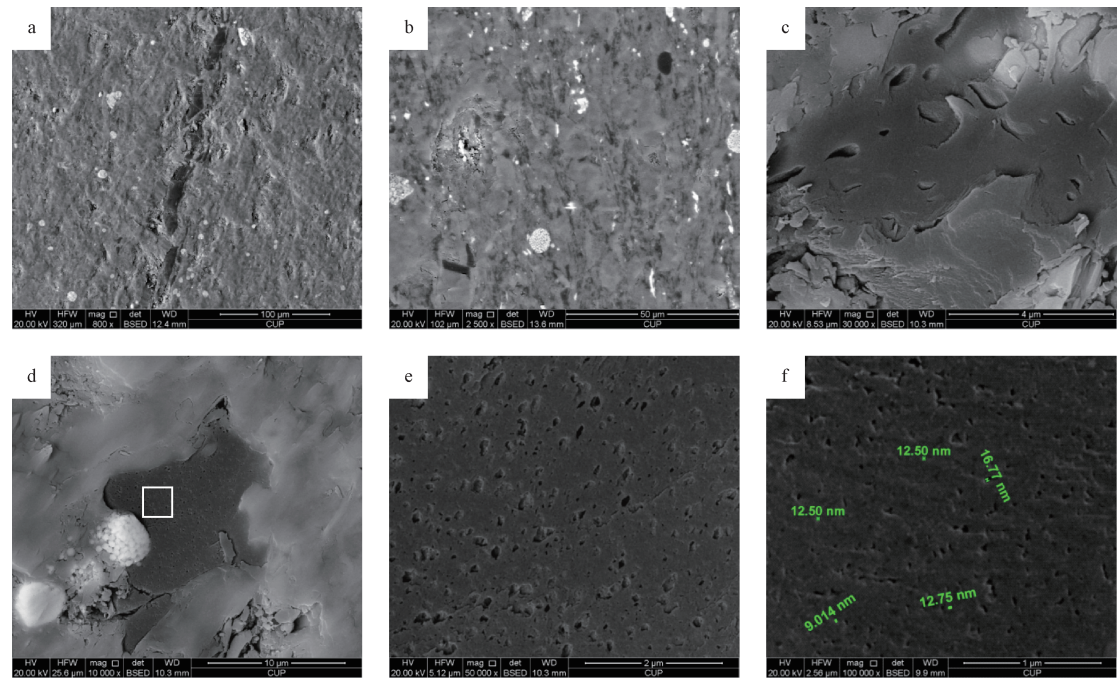


图2 早古生代页岩氩离子抛光面的背散射电子图像

Fig. 2 Backscattered electron images of argon ion milled surface of the Eopaleozoic shale

a. 湖南C₁,条带状有机质;b. 贵州C₁,填隙状有机质;c. 重庆S₁,气孔;d. 重庆S₁,有机质与黄铁矿共生;e. d图放大,气孔;f. 安徽O₃,沥青球粒孔

Slatt 等^[11]将页岩孔隙类型划分为粘土矿物片层间孔隙、有机孔隙、球粒内孔隙、化石碎屑内孔隙、颗粒内孔隙和微裂缝通道6种,Loucks 等^[12]把孔隙分成3种基本类型,即粒间孔隙、粒内孔隙和有机质孔隙。国内学者的划分方案^[5,13]也不尽相同,杨超等^[6]划分的孔隙类型有:粒间孔、粒内孔、晶间孔、溶蚀孔、有机孔、微裂缝。这些划分方案基本上都是将有机质孔隙作为一个类型,没有进一步细分。

立足于页岩的岩石组成及其经受的地质作用,早古生代页岩孔隙的成因类型划分为三大类12小类(表5)。有机质孔隙作为一大类,在显微组分确定的基础上,进一步划分为4个小类:生物孔、气孔、沥青球粒孔、铸模孔。

5.1 生物孔

指生烃母质自身所具有的各种生物孔。菌藻体中生物孔多见,孔径主要为纳米级,要在放大上万倍下方可见到(图1d)。形状有近圆形、多边形、不规则形,在生物体内部有一定的连通性。

5.2 气孔

气孔指生烃母质生气、聚气和气体逸散后留下孔隙。形成于生物降解生烃过程,发育于沥青质体中,属次生孔隙。气孔呈圆形、椭圆形,孔壁光滑,孔内没有充填物,单个气孔孔径从几十纳米至几百个纳米不等,少量为1~2 μm(图2c),自然断面(图1g)和抛光面上

均可见到(图2d,e)。气孔分布不均匀,有成群成带分布的特点,与煤中气孔^[1]相似。

5.3 沥青球粒孔

主要指沥青质体内部的球粒孔。如前所述,沥青质体由纳米级球粒组成,球粒之间有孔隙。提高放大倍数至数万倍时,可观测到沥青球粒孔,自然断面(图1b)和抛光面上(图2f)均可见到,其孔径比球粒小,几至十几纳米级为主,比气孔大约小一个数量级。形状有近三角形、多边形,不规则形,在沥青质体内部有一定的连通性。

表5 早古生代页岩孔隙的成因类型

Table 5 Genetic types of pores in the Eopaleozoic shale

孔隙类型		成因简述
矿物质孔隙	顺层缝隙	顺层理方向延伸的单向短缝隙
	粒边缝隙	围绕碎屑颗粒边缘的缝隙
	片间缝隙	层片状矿物层片之间的缝隙
	晶间孔	自生矿物晶体之间的孔隙
	溶蚀孔	矿物质在气、水作用下受溶蚀而形成的孔隙
有机质孔隙	生物孔	生烃母质自身所具有的各种生物孔
	气孔	生烃母质生气、聚气和气体逸散后留下的孔隙
	沥青球粒孔	沥青质体内部纳米级球粒之间的孔隙
	铸模孔	矿物质在有机质中因硬度差异而铸成的印坑
构造孔隙	构造裂隙	在地质构造应力作用下形成的方向性明显的裂隙
	收缩裂隙	因释压、失水、降温发生收缩作用而形成的裂隙
	碎粒孔	地质构造应力破坏形成的碎粒之间的孔隙

5.4 铸模孔

指矿物质在有机质中因硬度差异而铸成的印坑。主要由制样过程中矿物质脱落而产生,扫描电镜下比较醒目,可见率高。铸模孔多形成于沥青质体表面,形状受控于脱落掉的矿物质,一般比较浅,大者为微米级,小者为纳米级。比较多见的是黄铁矿铸模孔(图1h)和自生矿物铸模孔(图1i)。

5.5 有机质孔隙总体评价

早古生代页岩有机质孔隙大多要在上万倍至数万倍下观测,孔径以纳米级为主。此观测结果与液氮吸附法、等温吸附法和DFT的分析结果^[14-15]一致。各类有机质孔隙均为基质孔隙,成因类型受控于显微组分,在组分范围内局部连通。

气孔和沥青球粒孔发育于沥青质体内部,二者均形成于有机质生烃演化过程,共生关系密切,为页岩气生成与聚集的直接见证。沥青球粒孔的形成早于气孔,气孔孔径比沥青球粒孔大一个数量级左右。

6 结论

大量扫描电镜观测结果表明,早古生代页岩中的有机显微组分有沥青质体和菌藻体,二者均有强的生气潜力和吸附能力。沥青质体的赋存状态有条带状、填隙状、薄膜状,菌藻体的赋存状态主要为碎屑状。

有机质孔隙的成因类型可划分为生物孔、气孔、沥青球粒孔、铸模孔。其中气孔和沥青球粒孔均发育于沥青质体内部,是有机质生烃演化的直接见证,其发育程度可作为烃源岩的评价指标之一。有机质孔隙的尺度范围以纳米级为主,均为基质孔隙,局部连通,是页岩气优先储集的空间。在人工裂隙的沟通和降压作用下,有机质孔隙参与渗流系统,对页岩储层渗透率发挥积极作用。

参 考 文 献

- [1] 张慧,李小彦,郝琦,等. 中国煤的扫描电子显微镜研究[M]. 北京:地质出版社,2003.
- [2] 陈丽华,缪昕,于众. 扫描电镜在地质上的应用[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [3] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Micro-structural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(4): 665-677.
- [4] Javadpour F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks(shales and siltstones)[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(8): 16-21.
- [5] 焦淑静,韩辉,翁庆萍,等. 页岩孔隙结构扫描电镜分析方法研究[J]. 电子显微学报, 2012, 31(5): 432-436.
- [6] 杨超,张金川,李婉君,等. 辽河坳陷沙三、沙四段页岩微观孔隙特征及其成藏意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 286-294.
- [7] 肖贤明. 显微组分的成烃作用模式[J]. 科学通报, 1990, 35(3): 208-211.
- [8] 王飞宇,傅家谟,刘德汉. 煤和陆源有机质烃源岩特点和有机组分分类[J]. 科学通报, 1993, 38(23): 2164-2168.
- [9] 樊馥,蔡进功,徐金鲤,等. 泥质烃源岩不同有机显微组分的原始赋存态[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 39(3): 434-439.
- [10] 秦建中,申宝剑,付小东,等. 中国南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.
- [11] Slatt EM, O'Neal NR. Pore types in the Barnett and Woodford gas shale: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin 2011, 95(12): 2017-2030.
- [12] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C et al. Spectrum of pore types and network in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin 2012, 96(6): 1071-1098.
- [13] 陈文玲,周文,罗平,等. 四川盆地长芯1井下志留统龙马溪组页岩气储层特征研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 1073-1086.
- [14] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 438-444.
- [15] 李娟,于炳松,张金川,等. 黔北地区下寒武统黑色页岩储层特征及其影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 364-374.
- [16] Li Juan, Yu Bingsong, Zhang Jinchuan, et al. Reservoir characteristics and their influence factors of the Lower Cambrian dark shale in northern Guizhou[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 364-374.

(编辑 张亚雄)