

页岩气储层孔隙类型及特征研究:以渝东南下古生界为例

韩双彪^{1,2}, 张金川¹, Brian HORSFIELD², 蒋 恕³, 李婉君¹, 陈 前^{1,4}, 王 鹏¹

1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083
2. 德国国家地学研究中心, 波茨坦 D-14473
3. 美国犹他大学 能源与地学研究院, 犹他盐湖城 U-84108
4. 中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074

HAN Shuangbiao^{1,2}, ZHANG Jinchuan¹, Brian HORSFIELD², JIANG Shu³, LI Wanjun¹, CHEN Qian^{1,4}, WANG Peng¹

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
2. GFZ-German Research Centre for Geosciences, Potsdam 14473, Germany
3. Energy and Geoscience Institute, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84108, USA
4. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources(China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China

HAN Shuangbiao, ZHANG Jinchuan, Brian HORSFIELD, et al. Pore types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(3): 247-253

Abstract: Through thin section analysis, scanning electron microscopy and argon-ion milled surfaces technique, the pore types and characteristics of Lower Paleozoic gas shales in Southeast Chongqing were observed and described. Based on the experimental methods of total organic carbon content, XRD analysis, rock porosity, nitrogen adsorption and methane isothermal adsorption, the pores' contribution to gas storage was analyzed and their impacts on hydrocarbon migration was discussed. The results showed that the organic pore, intraparticle pore, interparticle pore and microfracture are four pore types developed in Lower Paleozoic shale gas reservoir. Most dispersed pores on the organic matter are nanoscale pores, intraparticle or interparticle pores with granular quartz appeared; pore space spreads between small crystals inside pyrite; flake structures produce pores by flocculation of clay; microfractures occur within the matrix of shale, some are millimeter sized. Different types of pores could provide various sized storage space and there is an obvious linear correlation between gas adsorption capacity and pore characteristic parameters (TOC, BET surface area, BJH total pore volume). Microfractures and interparticle pores are most likely to contribute to hydrocarbon migration.

Key words: Southeast Chongqing; Lower Paleozoic; shale gas; pore types; gas storage; hydrocarbon migration

摘 要:通过薄片分析、扫描电镜及氩离子抛光技术,对渝东南下古生界含气页岩中的孔隙类型及特征进行了分类观察、描述,结合有机碳含量、X衍射、岩石物性、氦气吸附及甲烷等温吸附实验测试,分析了页岩气储层中各类孔隙的储气贡献,探讨这些孔隙对页岩中烃类运移的影响。研究认为,有机质孔隙、颗粒内孔、粒间孔隙及微裂隙是页岩气储层孔隙的4种类型,有机质表面的分散状孔隙多为nm级,石英碎屑可形成粒内或粒间孔隙,黄铁矿颗粒内部小晶体排列分布产生孔隙空间,黏土絮状沉淀形成片粒状结构孔隙,微裂隙普遍发育在页岩基质中,可达mm级。不同类型的孔隙能够为页岩气的赋存提供不同尺度的储集空间,页岩吸附含气量与表征孔隙特征的参数(TOC、BET比表面积、BJH总孔体积)具有显著的正相关关系。微裂隙与粒间孔隙对页岩中烃类的运移最有利。

关键词:渝东南;下古生界;页岩气;孔隙类型;储气;烃类运移

中图分类号:P618.130.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2013)03-0247-07

收稿日期:2013-01-08;修回日期:2013-01-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41102088,41272167);全国油气资源战略选区调查与评价专项(2009GYXQ-15);构造与油气资源教育部重点实验室青年基金项目(TPR-2011-25,TPR-2012-11)

作者简介:韩双彪(1987—),男,博士研究生,主要从事油气成藏机理和非常规天然气地质研究。E-mail:bjcuphan@163.com

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2013,20(3)

作为一种清洁高效的非常规天然气,近年来页岩气的勘探开发成为全球能源领域的热点,快速发展的理论研究加深了对页岩沉积成岩过程、储层精细刻画、气体赋存形式及原始含气量变化的理解^[1-5]。页岩气在储层中的存在可分为吸附气、游离气和溶解气^[1,5],甲烷气体的储存形态与页岩中的孔隙类型及特征密切相关。许多学者^[6-8]对页岩致密储集空间中烃类的赋存及渗流进行了研究,利用场发射扫描电镜,结合氩离子抛光技术观测到了丰富的纳米级孔隙,认为纳米孔在页岩气的聚集、成藏中起重要作用。那么其他类型及不同尺度的孔隙在页岩中的发育情况如何,对烃类的储集和运移是否具有重要意义?为此本次研究使用多种分析测试技术,对渝东南下古生

界含气页岩中的孔隙类型及特征进行了分类观察、描述,并分析储层孔隙的页岩气意义。

1 孔隙类型及特征

1.1 有机质孔隙

页岩有机质中存在的孔隙多为 μm 级或 nm 级,干酪根的分布是此类孔隙发育的物质基础。为了清晰地查看页岩中有机质的分布状态,本次研究利用扫描电镜的背散射电子成像原理,对抛光样品成像观察,同时结合能谱仪识别不同元素的 X 射线特征,可确定有机质的存在。图 1 中 A 为页岩 1 井(274 m)下志留统龙马溪组页岩的扫描图像,j 测点的能谱图 B

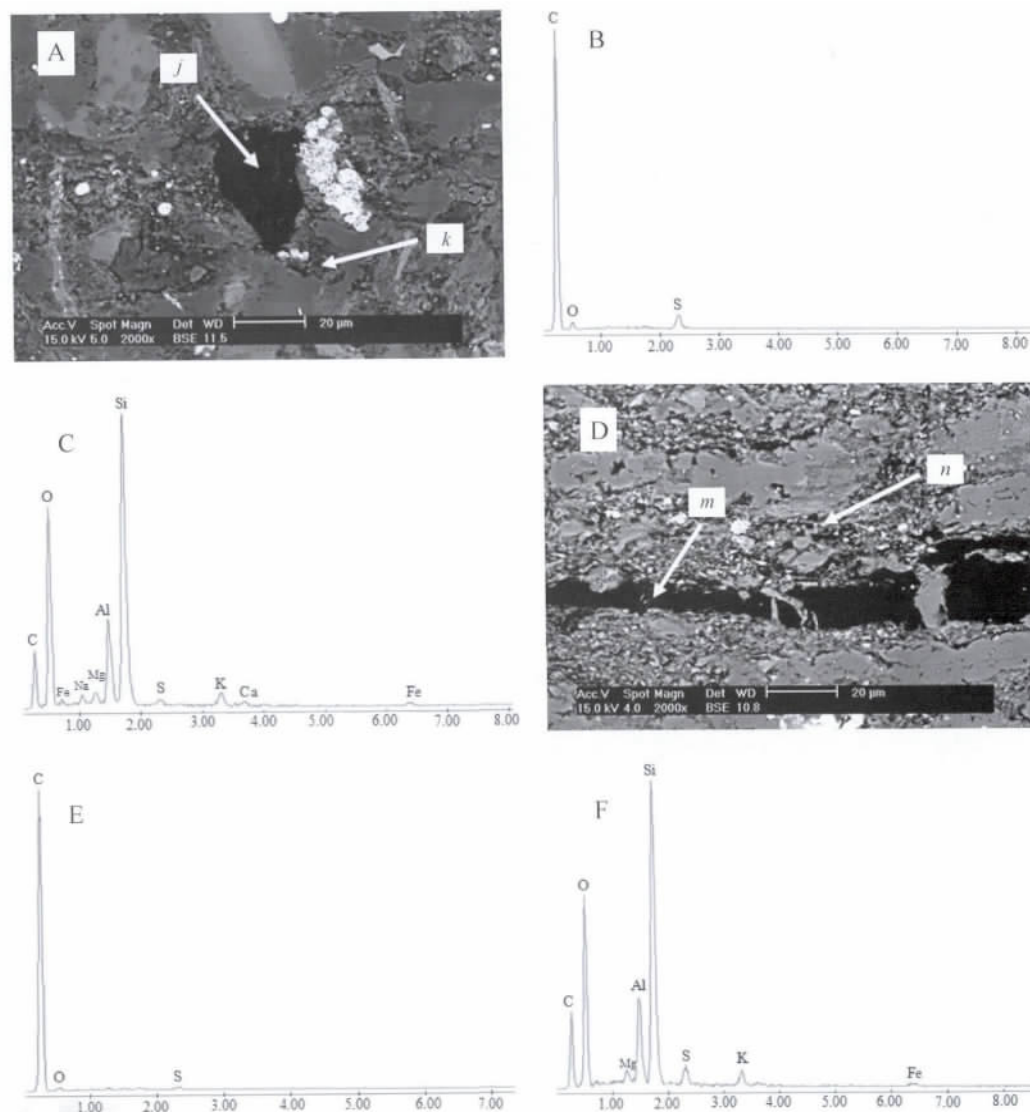


图 1 渝东南下古生界页岩有机质分布图像

Fig. 1 Organic matter distribution of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing

有很明显的碳峰值,说明暗色区域为集中且连续分布的有机质, k 测点的能谱图C显示了一定的碳峰值,说明在暗色区域周围存在分散状有机质。铜仁坝黄剖面下寒武统牛蹄塘组页岩的图像D也具有类似的特征,图E为 m 测点的能谱图,图F为 n 测点的能谱图。

有机质孔隙的观测需要采用氦离子抛光技术,在场发射扫描电子显微镜下可建立孔隙空间的平面或三维立体图像,Slatt 阐述了此类孔隙在 Barnett 页岩中的发育特征^[6]。本次研究通过场发射扫描电镜分析了抛光的页岩立方体,在渝东南地区下古生界页岩样品中也发现相似的有机质微观孔隙(图2),A为彭水剖面下志留统龙马溪组页岩的图像,微孔隙在有机质集中分布的暗色区域发育丰富,孔隙直径一般小于 $1\mu\text{m}$;B为渝页1井(202.6m)

下志留统龙马溪组页岩中微孔隙的分布情况,孔隙呈分散状,直径多为nm级。此类孔隙的连通程度是不确定的,其形成可能与有机质沉积、埋藏及热演化阶段有关,沉积过程中的生物扰动作用也可能产生微观有机孔隙^[9-13]。

1.2 颗粒内孔

页岩气储层中的石英颗粒可形成溶蚀内孔,黄铁矿颗粒由于晶体形态及排列分布可产生内部微孔隙,生物骨架存在残留内孔隙,化石碎片形成后也具有内部孔隙^[6]。利用薄片在镜下观察到渝东南地区露头页岩(N28.41°,E110.47°)中的石英颗粒内孔(图3A)。通过电镜扫描观察,发现渝东南下古生界页岩中存在黄铁矿,其可反映沉积水体深度及氧化还原环境,颗粒多呈草莓状,图3B为酉科1井

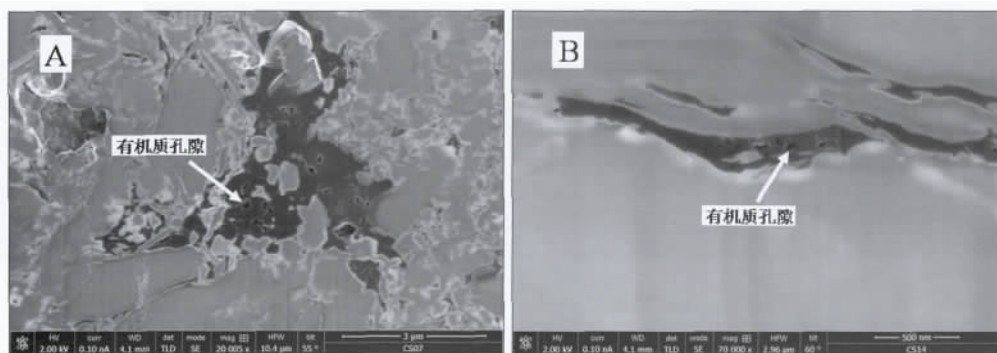


图2 渝东南下古生界页岩有机质孔隙

Fig.2 Organic pores of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing

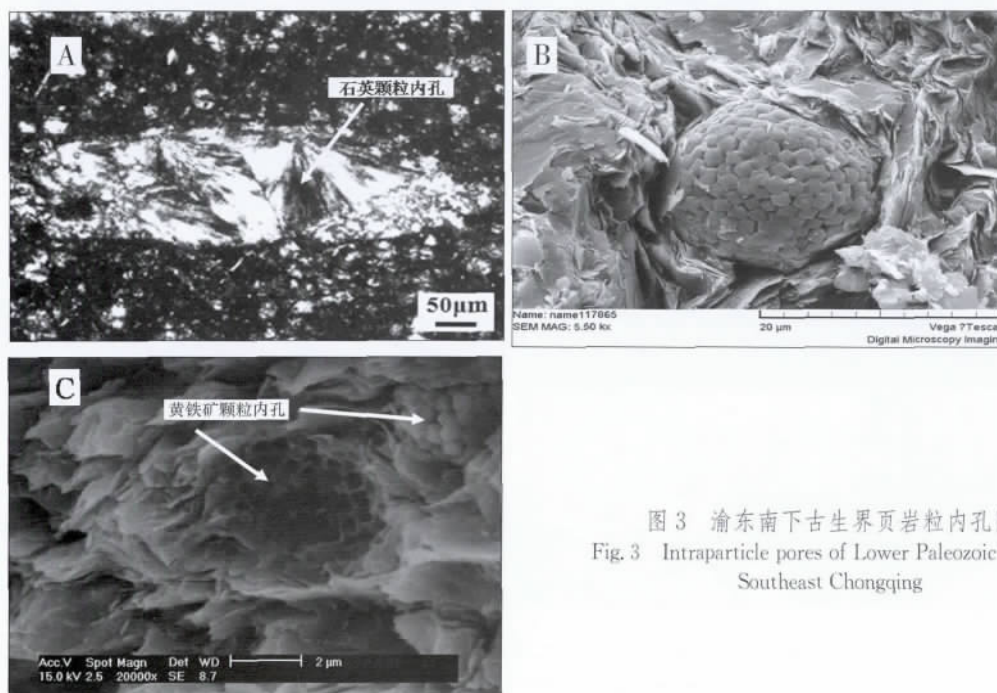


图3 渝东南下古生界页岩粒内孔隙

Fig.3 Intraparticle pores of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing

(962.43 m)下古生界页岩中的黄铁矿,颗粒为 μm 级,内部由许多小的晶体组成。图3C为岑页1井(1369 m)下寒武统页岩,从中可看出草莓状黄铁矿颗粒内部晶体之间产生的微观内部孔隙。有研究认为,在这些孔隙及黄铁矿颗粒边缘存在残余的有机物质^[6]。

1.3 粒间孔隙

含气页岩在形成过程中存在大量的微沉积构造,这是沉积物在古沉积环境中运移产生的,各种颗粒间的不完全胶结或后期成岩改造都会产生粒间孔隙。渝东南地区下古生界页岩中的矿物主要由石英和黏土(伊利石)组成,存在多种其他矿物。石英颗粒间发育孔隙空间,黏土矿物(尤其是伊利石)在页岩沉积形成过程中可形成带静电的片粒状集合体,颗粒之间通过边缘或表面连接富集^[6],并产生孔隙。前人在实验室条件下将伊利石放在液体中蒸发沉淀,记录了类似的片粒状沉积结构^[14]。图4A为蒸馏水中蒸干后的伊利石图像,显示了隔板状粒间孔隙的发育。图4B是盐水条件下的实验记录,形成了不规则的片粒间孔。本次研究通过SEM扫描图像发现,渝东南地区下古生界页岩中发育了黏土片

粒集合体及孔隙(图4C、D),C为酉阳兴隆剖面下志留统龙马溪组页岩,D为龙潭苦竹剖面下志留统龙马溪组页岩。这些颗粒间的结构孔隙为甲烷分子提供了大于其直径(0.38 nm)的储集空间,甚至可能成为页岩气的渗流通道。

1.4 微裂隙

微裂隙在含气页岩研究中具有重要应用价值,是钻井、压裂及改造处理的重要参考因素。通过薄片观察,图5A为渝页1井285 m处下志留统龙马溪组页岩的薄片图像,显示有的微裂隙被后期充填。此外,在渝页1井页岩(49.6 m)的显微组分观测中,发现沥青碎屑中存在微裂隙(图5B),这可能与其经历的热演化过程有关^[15-18]。

在扫描电镜中发现渝东南地区下古生界页岩的微裂隙可发育在基质中(图6箭头所指),6A为渝页1井90 m下志留统龙马溪组页岩,6B为酉科1井1364 m下寒武统牛蹄塘组页岩,这些孔隙一般与微沉积构造纹理伴生,延伸长度较大,宽度可达 μm 级,能够为页岩气提供重要的储集空间,同时可作为甲烷分子的渗流通道,这些微裂隙在人工造隙压裂后的连通效果值得进一步研究,可能为页岩气提供

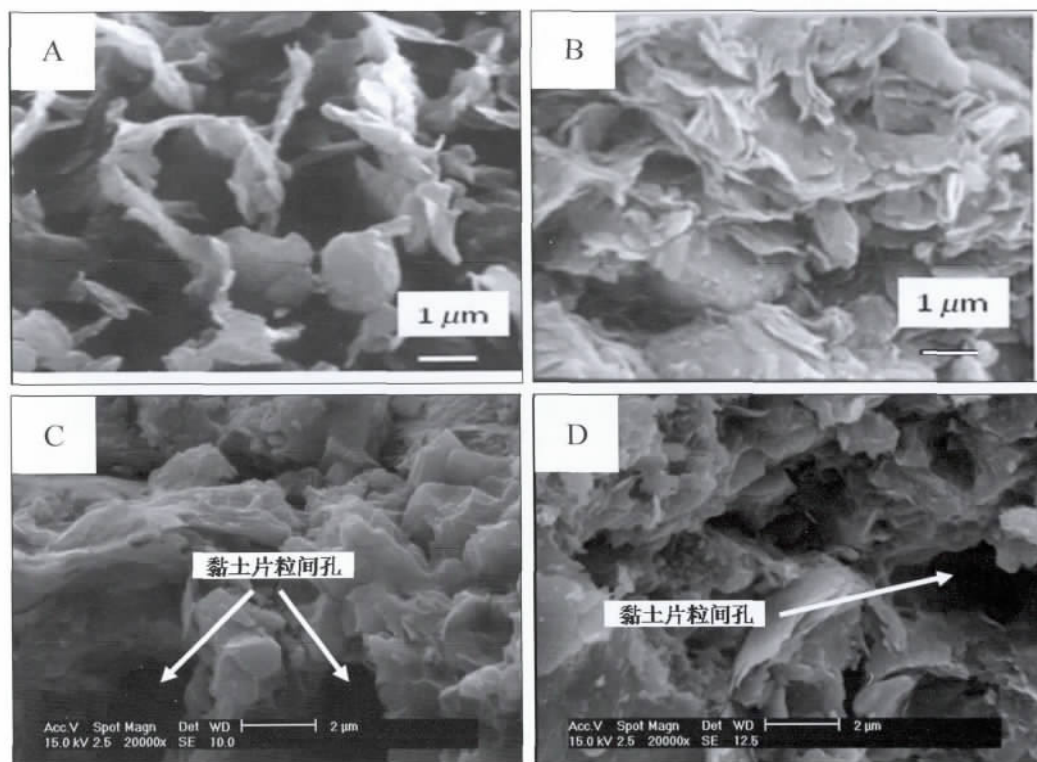


图4 伊利石絮状结构与渝东南下古生界页岩颗粒间孔^[14]

Fig. 4 Illite floccule structure and interparticle pores of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing^[14]

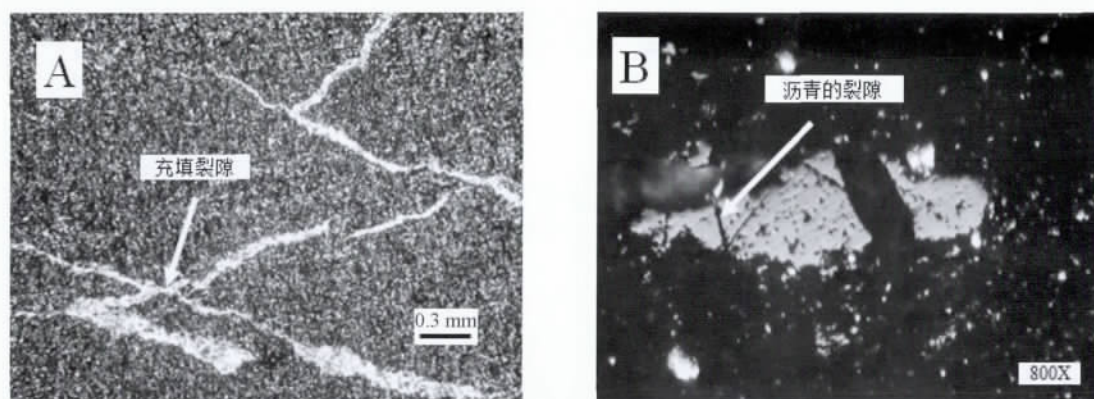


图5 渝东南下古生界页岩微裂隙特征

Fig. 5 Microfracture characteristics of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing

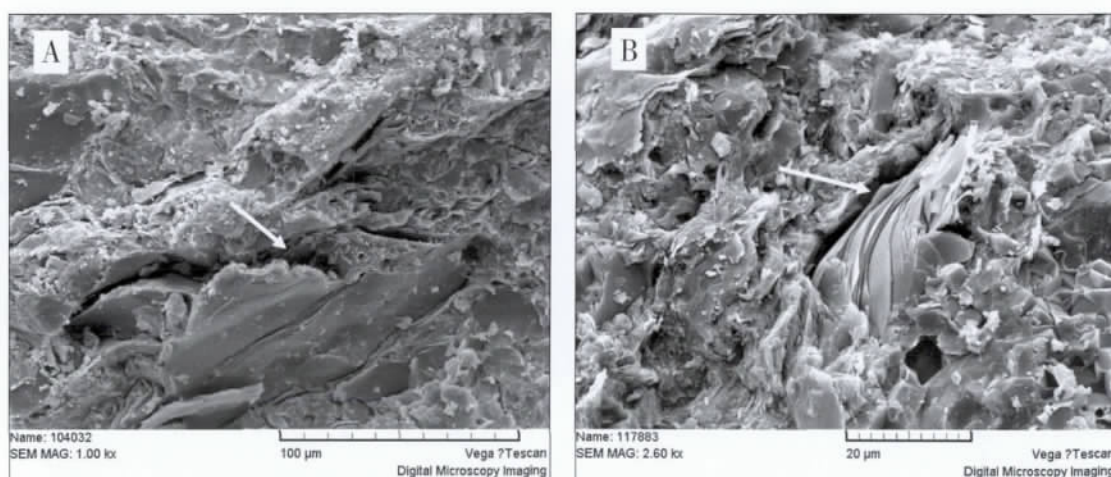


图6 渝东南下古生界页岩基质微裂隙

Fig. 6 Microfracture within the matrix of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing

渗流网络^[19]。

2 孔隙的储气意义

本次研究对页岩气储层中的孔隙进行了分类观察、描述,为了能够以定量的形式说明各类孔隙提供的储存空间对页岩含气量的影响,专门选取西科1井和渝科1井的钻井岩心样品12块,进行等温吸附实验,实验温度为岩心的实际井下地层温度。在样品的实验恒温条件下,测量不同压力下的气体吸附量,进而可以根据 Langmuir 等温吸附方程得到页岩的吸附含气量。渝东南地区下古生界下寒武统页岩的吸附含气量为 $1.13 \sim 5.04 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均为 $2.67 \text{ m}^3/\text{t}$ 。与此同时,基于不同类型孔隙的尺度大小及实验技术手段,选用孔隙度、有机碳含量、BET 比表面积、BJH 总孔体积4个参数表征孔隙特征,岩心样品的孔隙度为

$0.8\% \sim 2.7\%$, 平均为 1.6% ; 有机碳含量为 $0.27\% \sim 9.83\%$, 平均为 2.97% ; BET 比表面积为 $1.73 \sim 27.77 \text{ m}^2/\text{g}$, 平均为 $10.10 \text{ m}^2/\text{g}$; BJH 总孔体积为 $0.002 \sim 0.020 \text{ mL/g}$, 平均为 0.009 mL/g 。

为了进一步探讨各类孔隙的储气贡献,将页岩吸附含气量与孔隙度、有机碳含量、BET 比表面积、BJH 总孔体积进行相关性分析,孔隙度与吸附含气量的线性关系不明显(图7A)。对于页岩这种致密储层,压汞实验只能有效测定 mm 级及少量 μm 级的孔隙,多为微裂隙或粒间孔隙。这些类型的孔隙尺度相对较大,能够更多地为游离气提供赋存空间,这可能是吸附含气量与孔隙度线性关系不显著的原因。有机碳含量对页岩吸附含气量的控制作用得到了国内外学者的普遍认可^[1-5,9-10,20],在此基础上,本次研究结合 BET 比表面积和 BJH 总孔体积,认为渝东南地区下古生界高-过成熟页岩在成岩过程

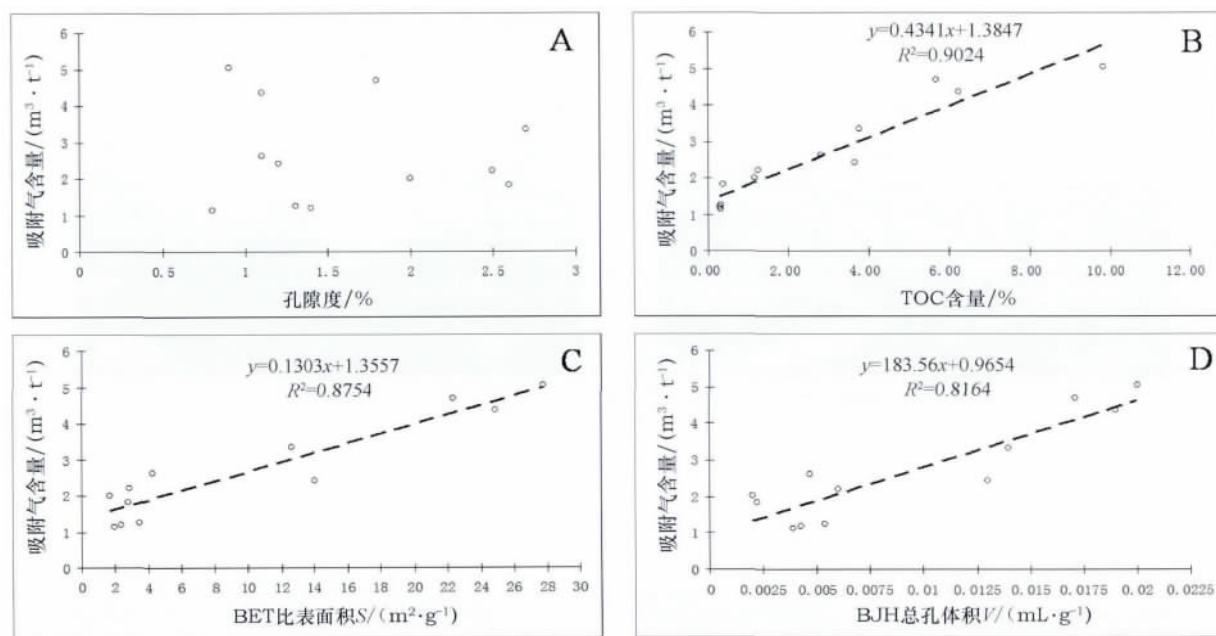


图7 渝东南下古生界页岩孔隙储气贡献关系图

Fig. 7 Pores' contribution to gas storage of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing

中,随着热演化程度的增加,自身有机质、矿物颗粒及基质产生了微观孔隙,TOC含量、BET比表面积、BJH总孔体积与吸附含气量的线性正相关关系(R^2 分别为0.9024、0.8754、0.8164)说明这些孔隙有助于吸附态页岩气的储集(图7B、C、D)。

3 孔隙对烃类运移的影响

页岩气储层中的各类孔隙特征不同,有机质孔隙通常产生在有机碎片或干酪根表面,孔隙直径多为nm级;颗粒内孔多发育在有微晶结构的颗粒内部,如石英、黄铁矿,且伴随结晶矿物分布在页岩基质中;粒间孔隙在页岩中可能保持一定的连通性;微裂隙的发育与页岩中的微沉积构造有关,孔隙直径多在mm、 μ m级,常分布在页岩基质中。

在这些孔隙类型中,特别有助于页岩中烃类(页岩气或页岩油)运移的是微裂隙和粒间孔隙,它们的孔隙尺度较大,不仅为烃类富集提供足够的空间,也能够最大限度地保持连通性,同时对人工压裂诱导裂缝的产生具有促进作用^[21-22]。O'Brien等^[22]在扫描电镜中观察到了页岩中烃类的运移,在3~4d的时间中对页岩持续进行350℃的高温加热后,发现了从页岩基质微裂隙和粒间孔隙中渗出的油珠。发育在页岩基质中的颗粒内孔,如石英溶蚀内孔和黄铁矿内

部的晶体孔隙,对页岩的渗透性有贡献作用。有机质孔隙与干酪根伴生,孔隙空间中的页岩气分子多为结构化存在,其流动性与连通性具有不确定性。

4 结论

(1)页岩气储层中发育多种孔隙类型,有机质孔隙多形成在干酪根表面,孔隙直径多为nm级;石英颗粒形成的粒内或粒间孔隙尺度相对较大;黄铁矿颗粒内部晶体产生的孔隙比较常见;片粒状黏土结构中的孔隙在页岩中普遍发育;微裂隙分布在页岩基质中,连通性较好。

(2)有机质孔隙、颗粒内孔、粒间孔隙及微裂隙能够为页岩气的赋存提供储集空间,小至nm级,大到mm级。TOC含量、BET比表面积、BJH总孔体积与页岩吸附含气量的线性正相关关系说明这些孔隙具有重要的储气贡献。

(3)TOC含量与干酪根分布影响有机质孔隙的发育,颗粒内孔具有一定的渗透性,微裂隙与粒间孔隙可提供渗流通道,对页岩中烃类的运移具有重要意义。

感谢中国地质大学(北京)侯读杰教授、张小涛博士给予的背散射实验支持,感谢德国国家地学研究中心谭静强博士提供的石英颗粒薄片图像。

参考文献

- [1] 张金川,徐波,聂海宽,等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- [2] 李玉喜,张金川,姜生玲,等. 页岩气地质综合评价和目标优选[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 332-338.
- [3] Horsfield B, Schulz H M. Shale gas exploration and exploitation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 31:1-2.
- [4] 刘树根,马文辛, Luba J, 等. 四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2239-2252.
- [5] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [6] Slatt R M, O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks[J]. AAPG Bulletin, 2012, 95(12): 2017-2030.
- [7] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848-861.
- [8] 邹才能,朱如凯,白斌,等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [9] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale gas systems: The Mississippian Barnett Shale of North-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [10] Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, et al. Geologic framework of the Mississippian Barnett shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bend arch-Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 405-436.
- [11] 于炳松. 页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 252-258.
- [12] 孙玮,刘树根,冉波,等. 四川盆地及周缘地区牛蹄塘组页岩气概况及前景评价[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2012, 39(2): 170-175.
- [13] 聂海宽,张金川. 页岩气储层类型和特征研究:以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 219-225.
- [14] O'Brien N R. Fabric of kaolinite and illite floccules[J]. Clays and Clay Minerals, 1971(19): 353-359.
- [15] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 775-782.
- [16] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7-12.
- [17] 龙鹏宇,张金川,姜文利,等. 渝页1井储层孔隙发育特征及其影响因素分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2012, 43(10): 3954-3963.
- [18] 张金川,林腊梅,李玉喜,等. 页岩气资源评价方法与技术:概率体积法[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 184-191.
- [19] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [20] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.
- [21] 张金川,林腊梅,李玉喜,等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.
- [22] O'Brien N R, Thyne G, Slatt R M. Morphology of hydrocarbon droplets during migration: Visual example from the Monterey Formation (Miocene), California[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(11): 1710-1718.