

国家重点基础研究发展计划课题 (2012CB214702) 资助
国家自然科学基金项目 (41272155) 资助
山西省煤基重点科技攻关项目 (MQ2014-02) 资助
博士后创新人才支持计划 (BX201700282) 资助

上扬子区龙马溪组页岩 微观孔缝演化与页岩气赋存

Microscopic Pore Evolution and Shale Gas Occurrence of
Longmaxi Formation in Upper Yangtze Area

王 阳 朱炎铭 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

究发展计划课题 (2012CB214702) 资助

国家自然科学基金项目 (41272155) 资助

山西省煤基重点科技攻关项目 (MQ2014-02) 资助

博士后创新人才支持计划 (BX201700282) 资助

上扬子区龙马溪组页岩 微观孔缝演化与页岩气赋存

王 阳 朱炎铭 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

全书选取上扬子区下志留统龙马溪组页岩为研究对象,结合研究区沉积埋藏史、有机质成熟生烃史、构造演化史为背景,针对目的层富有机质泥页岩样品,在页岩地球化学参数测试基础上,利用氩离子抛光扫描电镜、高压压汞、低温液氮吸附、二氧化碳吸附等微孔缝结构定性-定量表征技术,同时采用低成熟度页岩样品,利用仿真地层条件高温高压热模拟实验、高压等温吸附测试,借助计算机数值模拟、物理模拟,对研究区页岩微孔缝结构开展多角度、多精度、全尺度的定量表征进行系统研究,探讨页岩微孔缝在不同地质背景下演化规律及其对页岩气赋存的控制机理。研究结果为进一步阐明南方高-过成熟度页岩微孔缝结构演化特征,揭示页岩的微观赋存机理,并为后续研究页岩气成藏富集模式提供重要的实验基础和数据储备,同时,为指导页岩气勘探开发实践提供重要理论依据。

图书在版编目(CIP)数据

上扬子区龙马溪组页岩微观孔缝演化与页岩气赋存/

王阳,朱炎铭著. —徐州:中国矿业大学出版社,2018.7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3820 - 7

I. ①上… II. ①王… ②朱… III. ①页岩—研究

IV. ①P588.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 313204 号

书 名 上扬子区龙马溪组页岩微观孔缝演化与页岩气赋存

著 者 王 阳 朱炎铭

责任编辑 周 红

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 11 字数 209 千字

版次/次 2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着我国经济快速发展,能源供需矛盾日益突出,同时由于传统化石能源过度消费造成的环境问题日益严峻,寻找洁净的替代能源、有效调整国家能源结构迫在眉睫。在此背景下,国家大力支持煤层气、页岩气、致密砂岩气与天然气水合物等非常规天然气的勘探开发。受美国页岩气革命启发以及勘探开发技术手段的升级,国内近几年在页岩气勘探领域取得阶段性突破成果,建立多个国家级页岩气示范区,页岩气资源评价及试点区优选研究在全国范围内掀起热潮,其成藏理论研究成为地质领域研究热点。但由于页岩储层具有低孔低渗、纳米级孔隙发育、孔隙成因复杂、非均质性强等特点,直接造成页岩气赋存状态以及传输机制的多样性与复杂性,进而对页岩气成藏富集机理研究带来极大挑战。因此针对页岩微观孔缝结构及其演化机制的深入研究显得极为迫切!

有鉴于此,本书以上扬子区下志留统龙马溪组富有机质页岩为研究对象,采用野外调查、实验测试、数值模拟、理论研究等方法,以页岩微孔缝结构演化与页岩气赋存机理为科学问题展开系统研究。主要取得以下认识和成果:① 编制上扬子区龙马溪组黑色页岩厚度平面分布图;识别出龙马溪组含有黑色碳质页岩相、钙质页岩相、粉砂质页岩相、泥质粉砂岩相等4种主要岩相类型;定量表征龙马溪组地化特征与矿物组成。② 借助场发射扫描电镜,界定不同类型孔隙形貌特征,提出页岩骨架矿物刚性格架对有机质孔隙的保护机制,揭示层理微缝对页岩气赋存运移的重要意义;有效联合高压压汞、低温液氮和二氧化碳吸附等实验,实现对页岩孔隙结构全尺度定量表征。③ 借助高温高压原位地层仿真热模拟实验,系统揭示不同类型、不同

尺度孔隙形貌与结构动态演化特征;反演龙马溪组孔隙动态演化规律,建立孔隙网络随热演化的4段式演化机制。④借助室内甲烷高压等温吸附实验,从Gibbs吸附量定义出发,揭示甲烷“倒吸附”现象机理,同时阐明页岩吸附含气量的影响因素。⑤最后基于分子动力学理论,借助巨正则蒙特卡洛法模拟系统研究微孔缝中页岩气微观赋存机理,揭示微孔尺度内甲烷主要以吸附态形式存在,明确孔径分布对页岩含气量有着至关重要的影响。

本书的出版得到国家重点基础研究发展计划课题(2012CB214702)、国家自然科学基金项目(41272155)、山西省煤基重点科技攻关项目(MQ2014-02)、博士后创新人才支持计划(BX201700282)与国家留学基金委(2014)资助。同时本次研究工作得到了中国矿业大学秦勇教授、吴财芳教授,美国宾夕法尼亚州立大学Shimin Liu教授、Derek Elsworth和Jonathan P. Mathews教授的指导,山西省煤炭地质勘查研究院张庆辉院长、王海生总工、屈晓荣副院长,中国矿业大学代世峰教授、姜波教授、郭英海教授、韦重韬教授、曾勇教授、傅学海教授、桑树勋教授、王文峰教授、汪吉林教授、李壮福副教授、王猛副教授、陈尚斌副教授和李伍副教授等提供了宝贵建议。江苏地质矿产设计研究院杨柳博士对页岩纳米级微孔缝结构表征提供了帮助。刘宇、冯光俊、王笑齐、张寒、陈司、尚福华、侯晓伟、张楚、姜振飞、高海涛、李学元、刘景、付常青、张旭、张海涛等对样品采集、图件绘制提供了帮助。在此,谨向以上给予帮助的单位和个人表示诚挚的感谢。

由于著者水平所限,书中不足之处在所难免,敬请专家、同行和广大读者批评指正。

著者

2017年12月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状与存在问题	3
1.3 研究内容与研究思路	13
2 地质背景	16
2.1 区域构造特征	16
2.2 区域构造演化	18
2.3 区域地层特征	21
2.4 目的层页岩发育特征	23
2.5 小结	37
3 烃源岩有机地化与矿物学特征	38
3.1 有机质类型	38
3.2 有机质丰度	39
3.3 有机质成熟度	41
3.4 矿物学特征	43
3.5 小结	48
4 页岩微孔缝结构静态精细表征及其影响因素	49
4.1 页岩微观孔缝结构形貌成因特征表征	49
4.2 页岩微孔缝结构定量表征	63
4.3 页岩微孔缝结构发育影响因素	84

4.4	小结	86
5	页岩微孔缝结构动态演化特征	88
5.1	微孔缝结构演化实验	89
5.2	页岩热演化过程中孔隙成因-形貌演变特征	93
5.3	页岩热演化过程中孔隙结构演化定量表征	98
5.4	龙马溪组孔隙演化动态规律反演	106
5.5	小结	110
6	页岩微孔缝中超临界甲烷吸附特征	112
6.1	页岩超临界甲烷吸附	112
6.2	页岩超临界甲烷吸附表征模型	117
6.3	页岩甲烷吸附影响因素	123
6.4	小结	125
7	页岩微孔缝结构与页岩气赋存机理	127
7.1	模拟方法与模型建立	127
7.2	纳米级微孔缝中甲烷微观赋存机理	130
7.3	模拟结果验证与应用	137
7.4	模拟结果地质外推意义	140
7.5	小结	141
8	结论与展望	142
8.1	结论	142
8.2	展望	146
	参考文献	147

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着经济快速发展,我国对能源的需求日益增加,自给能源严重供应不足,急需大量的进口原油才能满足国内的生产建设需求。此外,我国面临的环境问题也日益加重,雾霾在全国各地大范围肆虐,严重影响着人们的日常生活和身体健康。环境问题的产生与大量使用常规化石燃料有着密切关系,为了改善以及扭转这种恶化趋势,国家也积极倡导优化能源结构,重点扶持鼓励绿色清洁能源的开发使用。在这种大背景下,煤层气、页岩气等非常规油气资源等绿色新能源接替研究持续升温。其中,美国页岩气勘探开发的突破引起了全球的广泛关注,页岩气资源不仅符合国家产业政策和发展循环经济的要求,而且也将为企业带来良好的经济效益、环保效益和社会效益。页岩气一旦勘探突破形成产能,不仅对缓解我国油气资源接替的压力产生至关重要的作用,给我国能源结构的逐步调整带来契机,也将有助于减少二氧化碳排放,改善环境问题。页岩气地质基础理论以及勘探开发技术已成为地质领域研究的热点。

页岩气(shale gas)是指主体富集于富有机质页岩中,以吸附和游离状态为主要赋存形式的非常规天然气(Curtis, 2002; Jarvie 等, 2007; 张金川等, 2008; 贾承造等, 2014; 邹才能等, 2015)。美国在页岩气领域成功的商业开发,促进了国际上对页岩气的研究与勘探开发,澳大利亚、新西兰、欧洲以及中国都加大了页岩气的研究和资源评价勘探力度。国内学者主要针对我国海相-海陆交互相-陆相等三套富有机质页岩形成的地质条件(李登华等, 2009; 邹才能等, 2010; 董大忠等, 2012; Zou 等, 2016)、储层特征评价(刘树根等, 2011; 于炳松, 2013; 薛华庆等, 2013; 陈尚斌等, 2013; 黄金亮等, 2016)、成藏机理与富集规律(张金川等, 2008; 陈更生等, 2009; 包书景等, 2016)、页岩气资源评价方法(卢双舫等, 2012; 张金川等, 2012; 肖贤明等, 2015; 董大忠等, 2016)和能源战略意义(张金

川等,2008;肖贤明等,2013;贾承造,2017)等方面进行了系统研究,并取得了丰硕的研究成果。尽管我国页岩气起步晚,但随着近几年国家日益重视,投入增加,页岩气的理论研究和勘探开发进程大大加快。2012年11月,中国石油化工股份有限公司(以下简称“中国石化”)在重庆涪陵焦石坝地区部署焦页1HF井,试产气 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,获得高产工业气流,实现了中国页岩气勘探的重大突破。2013年1月,该井投入开采,日产气 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$,正式拉开了中国页岩气商业化开采的序幕。至2015年年底,涪陵国家级页岩气示范区日产气量超 $1300 \times 10^4 \text{ m}^3$,气田建成超过 $42 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的产能,累计产气达 $30.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,是目前我国首个实现商业化开发的页岩气田(郭彤楼,2016)。

随着页岩气的成功勘探开发,泥页岩“源-储-盖”一体的页岩气系统被众多学者广为接受(Curtis,2002;Montgomery等,2005;Jarvie等,2007;Hill等,2007;Loucks and Ruppel,2007;聂海宽等,2009;宋岩等,2013)。而具有低孔低渗特点的泥页岩储层极大地制约了页岩气经济的有效开发,泥页岩储集空间作为衡量和评价储层优劣的重要指标,其微观孔缝结构研究一直受到国内外石油地质学家的广泛关注(Chalmers等,2012;姚素平等,2012;焦堃等,2014;陈尚斌等,2015;Shao等,2017)。页岩中纳米孔隙发育,孔隙率较低,这种微观孔隙结构会影响页岩气的赋存状态以及传输机制,进而对页岩气的成藏富集产生重要的影响。另一方面,富有机质页岩在地质历史时期经历过复杂的沉积埋藏-成岩演化-生烃成熟-构造改造等过程,而此动态过程直接决定了现今页岩孔隙结构形态和结构参数。由此可见,页岩孔隙结构的演化,受到多种因素的制约,而页岩气赋存形式与传输机理的多样性、复杂性和特殊性又与页岩孔隙结构有着密切的关系,因此针对页岩微孔缝结构(本书中涉及的“缝”均指扫描镜下观测到的微裂缝,也可统称为纳米级孔隙)及其演化机制开展深入的研究,这对页岩储层评价、页岩气成藏机理研究以及指导页岩气藏勘探开发具有重大意义。

“十二五”期间,国土资源部先后设立了4个国家级页岩气开发示范区,其中3个处于上扬子区针对下志留统龙马溪组(重庆涪陵页岩气示范区、长宁-威远页岩气示范区、云南昭通页岩气示范区),并在重庆涪陵、四川长宁-威远地区获得了良好的页岩气产能,2015年中国页岩气产量达 $44.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由此可见,上扬子区龙马溪组页岩气展现出良好的页岩气勘探开发前景。国内多数学者也倾向于将上扬子地区(特别是四川盆地)作为现阶段中国页岩气勘探开发重点目标区,将下志留统龙马溪组黑色页岩作为目标层系(张金川等,2008;蒲泊伶等,2010;Chen等,2011;王玉满等,2015;刘树根等,2015;邹才能等,2015;

郭彤楼,2016;董大忠等,2016;赵文智等,2016;腾格尔,2017)。因此,本次选取上扬子区下志留统龙马溪组作为研究对象,以储层微孔缝结构表征与演化为立足点展开研究,富有理论和现实双重意义。

全书选取上扬子区下志留统龙马溪组页岩为研究对象,结合研究区沉积埋藏史、有机质成熟生烃史、构造演化史为背景,针对目的层富有机质泥页岩样品,在页岩地球化学参数测试基础上,利用氩离子抛光扫描电镜、高压压汞、低温液氮吸附、二氧化碳吸附等微孔缝结构定性-定量表征技术,同时采用低成熟度页岩样品,利用仿真地层条件高温高压热模拟实验、高压等温吸附测试,借助计算机数值模拟、物理模拟,对研究区页岩微孔缝结构开展多角度、多精度、全尺度的定量表征进行系统研究,探讨页岩微孔缝在不同地质背景下演化规律及其对页岩气赋存的控制机理。研究结果为进一步阐明南方高-过成熟度页岩微孔缝结构演化特征,揭示页岩的微观赋存机理,并为后续研究页岩气成藏富集模式提供重要的实验基础和数据储备,同时,为指导页岩气勘探开发实践提供重要理论依据。

1.2 国内外研究现状与存在问题

页岩纳米级孔隙结构给页岩储层表征带来巨大挑战,常规油气储层表征手段难以适用于致密页岩。因此,国内外学者利用多种非常规测试手段,从孔隙静态表征到孔隙动态演化,再到孔隙结构对页岩气成藏的影响等多个角度开展了大量工作,取得了丰硕的研究成果。

1.2.1 页岩孔隙结构表征与分类

(1) 页岩孔隙结构表征

作为储层,含气页岩具有典型低孔低渗特点。页岩中富含的纳米级孔隙构成复杂的孔隙网络,其中微-介孔尺度孔隙比表面积大,为吸附气提供吸附点,而宏孔尺度孔隙为游离气提供了赋存空间(Ross and Bustin, 2008; 张金川等, 2008; 侯宇光等, 2014)。由于认识的局限,前人多将富有机质页岩作为烃源岩研究,而受益于先进实验技术的飞速发展以及非常规油气观念的深入人心,纳米级孔隙的发现揭开了页岩作为储集层研究的序幕。相比于常规砂岩储层的较高孔隙率、渗透率,页岩低孔、低渗的“双低”特点给储层评价带来困难,鉴于页岩储层的特殊性与复杂性,难以直接将常规储层评价方法生搬硬套应用于

页岩中。页岩储层表征的核心难点在于对纳米尺度孔隙结构的定性-定量描述,因此大量学者尝试不同实验手段展开对页岩储层孔隙结构的表征工作。

目前,还没有形成针对页岩微观孔隙特征的一套标准实验分析技术方法。在实际研究中,综合多种实验技术来分析页岩储层微观特征可以使结果更准确。国内外学者利用现有的实验分析技术在页岩储层微观特征研究方面做了大量工作,为页岩气的勘探开发提供了重要的理论支持。总体而言,页岩孔隙结构表征方法主要分为两大类:一是射线探测法,包含光学显微镜、场发射扫描电镜(FE-SEM)、透射电子显微镜(TEM)、原子力显微镜(AFM)、纳米 CT、小角度 X 射线(SAXS)、小角度/超小角度中子散射(SANS/USANS)等(田华等,2016;李晋宁等,2016;刘文平等,2017);二是流体贯入法,主要包括高压压汞、低温液氮吸附、二氧化碳吸附等(Clarkson 等,2013;Tian 等,2015)。

对于射线探测类技术,最为常用的是扫描电子显微镜。该测试技术的最大优点是对孔隙表征具有直观可视化,特别是在孔隙形态学和成因研究方面具有明显优势(Loucks 等,2009;Curtis 等,2012;焦淑静等,2012;韩辉等,2013)。同时,结合氩离子抛光技术处理页岩样品,使得扫描电镜成像效果更加清晰准确,减少手工处理样品引起的误差(Loucks 等,2012;杨超等,2013;黄磊和申维,2015)。场发射扫描电镜不仅可以提供孔隙形貌成因等定性信息,通过专业图像处理软件,结合统计学方法,还可以定量获取孔隙结构参数(面孔率、孔径分布、孔隙数量等)(Jiao 等,2014;张廷山等,2014;赵可英和郭少斌,2015)。Wang 等(2013)借助 Trinity 3D 图像处理软件,批量处理龙马溪组与筇竹寺组页岩孔隙扫描电镜照片,揭示了龙马溪组有机质孔隙更加发育,面孔率能达到 25.6%,孔径分布介于 12~380 nm,而筇竹寺页岩有机质孔隙发育较少,面孔率约为 5.2%,且有机孔隙孔径更小,介于 12~80 nm。在扫描电镜二维观测统计的基础上,Ma 等(2015)借助聚焦离子束-扫描电镜(FIB-SEM)实现对页岩微观结构的三维重建,从三维重建图像中清晰可见有机质孔隙非常发育且互相连通形成网络。图像分析技术受观测范围限制,受页岩样品非均质性影响较大,实验结果代表性有限。因此,国外学者进一步借助小角度/超小角度中子散射技术定量表征整体页岩孔隙结构(Clarkson 等,2013),中子散射可以在无损条件下研究不同温压条件下孔隙结构,且实验结果不受孔隙连通性限制,具有可以定量表征页岩开孔和死孔等独特优势。Mastalerz 等(2012)利用小角度/超小角度中子散射技术对比表征煤与页岩孔隙结构特点,结果表明页岩中孔隙连通性较差,死孔较多。值得注意的是,由于中子源获取极为困难,且实验价格昂

贵,国内利用此技术研究页岩孔隙较少。总体而言,射线探测类孔隙表征技术一方面受限于孔隙非均质性,另一方面一些测试手段价格高昂,因此仅依靠此类实验测试手段难以全面表征页岩孔隙发育特点。

对于流体注入法测试技术,一般使用汞等非润湿性流体或氮气、二氧化碳等气体在不同的压力下注入样品并记录注入量,通过不同理论方法基于合适假设模型,定量表征孔隙结构参数(孔容、孔比表面积、孔径分布等),该类实验样品处理相对简单,实验过程易操作,获取数据相对全面,因而在目前页岩微孔缝表征研究中应用最为广泛(杨峰等,2013;武景淑等,2013;Tian等,2015;王淑芳等,2016;李晋宁等,2016)。压汞法测试在煤储层孔隙表征中应用十分广泛(秦勇等,1995;傅雪海等,2005;姜文等 2013;陈义林等,2015),许多学者将压汞法引入页岩储层孔隙表征研究中(谢晓永等,2006;龙鹏宇,2011;钟太贤,2012;陈尚斌等,2013;杨峰等,2013;王欣等,2015)。同时由于页岩较煤储层而言,具有孔隙率更低、渗透率更低、孔径更小等特点,对于纳米级孔隙而言,需要极高排驱压力促使样品进汞,存在高压破坏页岩原始孔隙的风险,因此压汞法在页岩孔隙表征研究中存在一定局限性,表征微孔-介孔可靠性较差。与压汞测试相比,液氮与二氧化碳吸附法在页岩储层孔隙表征研究中运用更为普遍,前者更适用于表征介孔结构参数,后者适用于微孔结构研究(Clarkson等,2013;Furmann等,2014;Chalmers等,2012)。由于不同流体注入法孔径表征范围的差异,单一方法难以全面揭示样品孔隙特征,多种方法综合使用和数据对比工作成为近年来的发展趋势(田华等 2012;Clarkson等,2013;Wang等,2014)。Clarkson等(2013)利用气体吸附法研究北美页岩储层发现氮气吸附与二氧化碳吸附的孔径分布在重复孔径段相似度高,且联合应用氮气吸附与二氧化碳吸附有效表征了 100 nm 以下孔隙。Wang等(2014)针对湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩,分别利用高压压汞表征宏孔孔隙、液氮吸附表征介孔孔隙、二氧化碳吸附表征微孔体积,联合三类实验实现页岩全尺度孔隙表征,揭示孔体积主要由孔径小于 50 nm 孔隙贡献,而孔比表面积主要由孔径小于 5 nm 孔隙控制。

综合而言,各个实验测试手段都有其独有的优势,也存在其短板,无法使用一种表征技术就能达到全面表征孔隙结构的目的。目前较为系统的孔隙表征方法是首先利用氩离子抛光扫描电镜描述孔隙形貌成因特征,再结合高压压汞、低温液氮和二氧化碳吸附测试联合定量表征孔隙结构参数。

(2) 页岩储层孔隙分类

页岩气储层作为一种非常规储集体,目前国际上对于页岩孔隙分类方案多

种多样。综合而言,各学者分类基本基于两个原则,一是孔隙大小,二是孔隙形貌产状。

页岩孔隙发育尺寸跨度极大,非均质性极强,大则达到几个微米,肉眼可见,小则不足 1 nm。但绝大部分孔隙发育尺寸小于 1 μm ,处于纳米级别。据此,多数学者推荐应用国际理论与应用化学学会(IUPAC)关于孔隙大小的分类(Chalmers 等,2008;Kuila and Prasad,2013;Tian 等,2013;Wang 等,2014)。根据 IUPAC 的分类,孔隙孔径小于 2 nm 的称为微孔(micropore),孔径介于 2~50 nm 的称为介孔(mesopore),孔径大于 50 nm 的称为宏孔(macropore)(Rouquerol 等,1994)。Loucks 等(2012)在对 Barnett 页岩孔隙研究中依据孔径大小提出新的分类:小于 1 nm 称为细微孔(picopore),1 nm~1 μm 称为纳米孔(nanopore),1~62.5 μm 称为小孔(micropore),62.5 μm ~4 mm 称为中孔(mesopore),大于 4 mm 为大孔(macropore)。钟太贤(2012)借鉴煤层孔隙分类成果,在中国南方海相页岩孔隙结构特征研究基础上,将页岩储集空间按孔径大小分为 5 种类型:裂隙(大于 10 000 nm)、大孔(介于 1 000~10 000 nm)、中孔(介于 100~1 000 nm)、过渡孔(介于 10~100 nm)、微孔(小于 10 nm)。

相比页岩孔隙大小分类而言,基于孔隙形貌产状的分类成果则更为多样。Slatt 和 O'Brien(2011)基于对 Barnett 和 Woodford 页岩孔隙类型的研究,将其中的孔隙类型划分为黏土絮体间孔隙、有机孔隙、粪球粒内孔隙、化石碎屑内孔隙、颗粒内孔隙和微裂缝通道等 6 种。Loucks 等(2012)则提出了一个泥页岩储层基质孔隙三端元分类方案,把基质孔隙分成 3 种基本类型,即粒间孔隙、粒内孔隙和有机质孔隙。前两种孔隙类型与矿物基质有关,第三种类型与有机质有关(图 1-1)。

国内许多学者在借鉴北美页岩孔隙分类的基础上,基于扫描电镜下国内页岩孔隙发育类型,提出了较为详尽的分类方案。孔隙类型主要包括有机质孔、生物孔、残余原生孔、黏土絮体间孔隙、次生溶蚀孔、刚性矿物颗粒边缘孔、溶蚀杂基内孔、晶间孔、矿物铸模孔、古生物化石孔、黄铁矿晶间孔隙、石英颗粒边缘微孔隙、构造缝(梁超等,2012;魏祥峰等,2013;梁兴等,2014;蒲伯伶等,2014;伍岳等,2014;张琴等,2016;久凯等,2016)。丁文龙等(2011)根据成因不同将泥页岩中裂缝划分为构造裂缝和非构造裂缝 2 大类 12 个亚类,其中构造裂缝主要为高角度剪切裂缝、低角度滑脱裂缝和张剪性裂缝等,而非构造裂缝主要由超压、成岩、干裂、压溶、重结晶、矿物相变及风化作用形成。龙鹏宇等(2012)基于渝页 1 井龙马溪组页岩储层孔隙研究成果,提出将基质孔隙划分为有机质

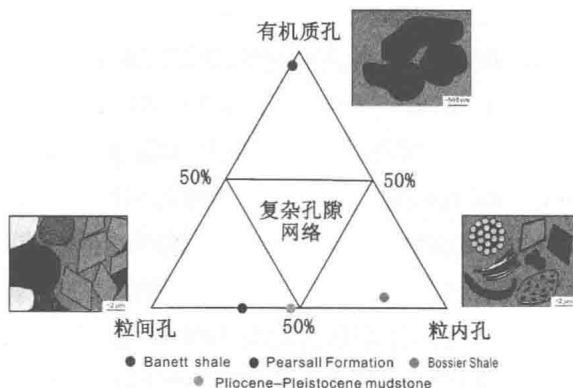


图 1-1 泥岩孔隙分类三角图(据 Loucks 等,2012)

注:Banett,Bossier 和 Pearsall 泥岩地层共统计了 2 000 个点,

Pliocene-Pleistocene 泥岩地层统计了 1 000 点

微孔、矿物质孔、有机质和矿物间孔隙等 3 大类,将裂缝划分为构造缝、成岩缝和有机质演化异常压力缝。于炳松(2013)在充分调研和系统总结国际上有关页岩气储层孔隙分类现状的基础上,将孔隙大小和孔隙产状相结合,对页岩孔隙进行了系统分类,分类结果既包含定性形貌成因描述又包含定量结构参数。

页岩孔隙分类多种多样,但由于不同地区页岩地化特征、矿物成分、沉积背景、构造演化历史都有差别,孔隙发育主要类型区别较大,难以形成统一的国内外学者均认可的分类方案。目前国际上采用最为广泛的分类方案是使用 Loucks 等(2012)建立的三端元分类方案描述孔隙形貌特征,而采用 IUPAC 分类方案描述孔隙大小(Rouquerol 等,1994)。

1.2.2 页岩孔隙结构影响因素与演化特征

(1) 页岩孔隙结构影响因素

页岩中纳米级孔隙结构发育受控于多种因素,从地质角度来看,主要受外因和内因两大因素控制;外因主要包括区域沉积成岩作用、构造改造和有机质熟化生烃作用;内因主要包括岩石组构、地化特征和矿物成分等。其中沉积作用奠定了页岩的组分与结构基础;而成岩作用会改变岩石的矿物成分与内部孔隙结构与构造,并形成许多自生矿物,而使储层的孔隙结构发生改变;构造作用使得原先形成的孔隙发生破坏或重组;熟化生烃作用则使得有机质成分结构发生改变从而形成新的有机质孔。因此,外因与内因对孔隙结构的影响是交织在一起的,外因通过作用于内因,使得孔隙结构发生改变。目前国内外学者主要

从内因入手,重点分析包括有机碳含量、有机质成熟度、矿物成分等因素对孔隙结构的影响(Ross and Bustin, 2008; Tian 等, 2013; 杨峰等, 2013; Furmann 等, 2014; Wang 等, 2014; Hu 等, 2015; Pan 等, 2015)。前人研究表明 TOC 含量是孔隙发育的主控因素之一,且 TOC 含量越高,孔隙越发育,比表面积也越大(侯宇光等, 2014; Wang 等, 2014; Hu 等, 2015; 焦堃, 2015; 刘宇和彭平安, 2017)。Chalmers 等(2008)研究发现对于同体积的有机碳,Ⅱ/Ⅲ型或Ⅲ型干酪根比Ⅰ型和Ⅱ型含有更大的微孔体积。同时对于富有机质页岩而言,成熟度对孔隙结构的影响也至关重要(Mastalerz 等, 2013; 曹涛涛等, 2015)。除有机碳以外,研究同时发现黏土矿物对孔隙结构的影响也不容忽视。页岩中黏土矿物以多种类型相互接触、交织、融合在一起,不同的黏土矿物性质不同,因其特殊的结构和物理化学性质在成岩过程中能形成大量形态、类型、尺度各异的微观孔裂隙(Ross and Bustin, 2009; 吉利明等, 2012; 王玉满等, 2014)。黏土矿物中层状结构之间、颗粒之间以及颗粒内部板片的自然错断处发育大量纳米级孔隙与孔喉(Slatt 和 O' Brien, 2011; 吉利明等, 2014; 于炳松, 2012)。而对于黏土矿物孔隙发育尺度也有针对性研究,田华等(2012)发现,黏土矿物含量与微孔、中孔的相关性较差,与宏孔的相关性较好,说明黏土矿物控制着页岩储层中宏孔的发育。而 Wang 等(2014)基于湘西北牛蹄塘组页岩研究成果,认为黏土矿物含量特别是其中伊利石含量对介孔有着积极的贡献。部分学者基于多因素叠加影响孔隙展开研究,黄磊等(2015)针对渝东南地区龙马溪组页岩展开研究,结果表明有机碳含量、有机质成熟度、石英含量、伊利石含量、伊蒙混层等对微-纳米孔隙和微裂缝发育有着促进作用,而碳酸盐含量、方解石含量、埋藏深度等则起抑制作用。

综上所述,页岩孔隙结构受多种因素的共同影响,且不同构造区域、不同沉积背景下页岩孔隙主控因素各有不同。同时,孔隙结构表征方法的选取也是影响研究成果的关键要素。因此,应该注意避免使用单一研究手段,排除不同影响因素之间产生的干扰。

(2) 页岩孔隙结构演化特征

如 1.2.1 所述,针对页岩孔隙结构的静态表征,国内外学者已经开展了大量研究,在孔隙形貌、成因、类型、大小、空间分布以及连通性方面取得了丰硕成果。相对而言,目前对泥页岩孔隙动态演化的研究相对欠缺,与常规砂岩储集层孔隙演化主要受成岩作用影响不同,页岩孔隙演化主要受到有机质热演化作用和成岩作用双重控制(Jarvie 等, 2007; 崔景伟等, 2013; 胡海燕, 2013; 刘文平

等,2017)。其中,有机质热演化作用不但决定着页岩生烃能力,同时生烃过程中产生的大量纳米级有机质孔隙,也是页岩气储集的重要空间(张金川等,2008;邹才能等,2010,2011;Curtis 等,2012;Mastalerz 等,2013;郭秋麟等,2013;董春梅,2015;扈金刚,2016;马中良等,2017)。另一方面,有机质热演化作用除了直接控制有机质孔隙的形成与演化以外,对无机孔隙的形成与演化同样有着不可忽视的影响。因此本书主要针对有机质热演化作用对孔隙形成与动态演化机制的影响展开研究。

目前关于热演化作用对孔隙结构演化影响研究方法主要包括两大类:第一种是直接采集自然序列不同成熟度样品,开展系列孔隙结构表征实验,从而对比研究热演化作用对孔隙演化的影响。不同学者针对不同地质背景页岩得出结论不尽一致,随着自然序列样品镜质体反射率 R_o 的增大,观测发现有机质孔数量和比例或增大或减小,甚至无明显变化(Curtis 等,2011;Fishman 等,2012;Mathia 等,2016)。其中,Curtis 等(2012)利用氩离子抛光技术针对 Woodford 页岩研究发现,镜质体反射率 R_o 低于 0.9% 时有机孔不发育,而进入生气窗以后液态烃开始裂解,有机孔大量发育,孔体积开始增加。Fishman 等(2012)利用扫描电镜针对不同成熟度 Kimmeridge 页岩孔隙结构展开研究,发现随镜质体反射率 R_o 值增大,有机质孔隙大小及数量未见明显增大。王飞宇等(2013)研究认为页岩有机质孔隙率并非随有机质成熟度升高而单调增加,页岩有机质孔隙率在生气阶段(R_o 值为 1.3%~2.0%)随有机质成熟度升高而增加,但当镜质体反射率 R_o 值大于 2.0%,总体上呈现降低趋势。陈艳艳等(2015)对美国伊利诺伊盆地的 New Albany 页岩研究发现,随着热成熟度的升高,页岩孔容呈非单调演化趋势,推测与有机质初次和二次裂解密切相关。总体而言,此类方法研究孔隙演化规律的优势明显,该方法基于地质历史时期不同成熟度自然演化序列目的层页岩孔隙演化特征展开研究,结论更加可靠,但忽略了样品非均质性及区域差异,且部分地区难以获得不同成熟度自然演化序列样品。

第二种是物理模拟法,即采用低熟样品,通过高温高压热模拟实验获取不同成熟阶段的页岩,从而对热演化系列样品孔隙形貌与结构参数进行表征,进而反演孔隙演化全过程(Chen and Xiao,2014;Ko 等,2016;吉利明等,2016;扈金刚,2016;潘磊,2016)。但由于受研究目的、所选样品、实验条件的限制,不同学者得出孔隙演化规律存在一定的差异。如胡海燕等(2013)、董春梅等(2015)、田华等(2016)都在实验条件设置时未考虑压力因素,研究表明随温度增加成熟度增加,页岩发育大量纳米级孔隙,模拟获得孔隙率可能比实际地质

样品孔隙率更大。相对而言,多数学者在设置实验条件时加入高压液态水,以期达到更贴近在地质条件的模拟环境,在相近的地层流体压力、静岩压力和围压条件下开展热模拟实验。即便如此,由于所用模拟样品不同,实验观测手段不同,得出结论也不尽相同。马中良等(2017)针对西加拿大盆地未熟页岩,研究发现有机孔隙形成与演变具有非均质性,同时成熟度不是控制有机孔形成与发育的决定因素,有机质物理化学结构对有机孔形成演化具有重要作用,同时生油阶段生成有机孔易被热解沥青堵塞。基于鄂尔多斯盆地低熟湖相Ⅰ型富有机质页岩模拟发现,页岩大孔孔容随模拟温度增加呈现先增加后减小,而微孔与介孔孔容呈现先减小后增大的趋势(崔景伟等,2013),孔隙率呈现先增加后减小演化规律(薛莲花等,2015),且依据有机质孔发育特点,可划分为 250~300℃、350~375℃、400~500℃三个阶段(Sun 等,2015)。部分学者同时研究发现,有机质热演化作用对无机孔的演化规律同样起到控制作用,具体表现为有机质热演化作用会导致黏土矿物成分与组构发生明显变化,使得黏土矿物孔演化规律复杂。同时有机质热演化产生的酸性流体使得储层中碳酸盐、长石等不稳定矿物发生溶蚀,产生大量溶蚀孔隙(吴林钢等,2012;Loucks 等,2012;崔景伟等,2013;吴松涛等,2015)。

高温高压热模拟实验在一定程度上降低了样品非均质性对实验结构的影响,可对比性强,缺点是物理模拟实验条件设置难以达到页岩地质历史时期真实的演化效果。两种研究方法均存在各自的局限性,在探讨研究区微孔缝动态演化规律时,应结合自然序列样品与物理热模拟样品对比研究,从而更加准确地揭示页岩孔隙结构的演化机理。

1.2.3 页岩孔隙结构对页岩气赋存机理影响

与常规油气储层相比,页岩储层丰富发育 10 nm 以下的纳米级微孔缝,而甲烷气体在纳米级微孔缝中具有复杂的赋存状态与传输机制,是建立页岩气富集成藏机理的理论瓶颈。因而系统研究页岩气储层纳米级微孔缝结构对页岩气赋存、运移等成藏过程的控制机理,可为页岩气资源潜力评价和成藏机理建立乃至非常规油气高效开发提供重要的理论依据(Jarvie 等,2007;Javadpour, 2009;韩双彪等,2013;汪吉林等,2013;Guo 等,2015;Gao 等,2016;邹才能等,2015;Yang 等,2016)。

页岩气的赋存状态是页岩气成藏核心问题之一,页岩气的赋存状态多变,但整体上以吸附态与游离态为主,溶解态所占比例很低,一般小于 0.1%(Cur-