

碳酸盐岩储层实验技术:回顾、进展与展望

沈安江^{1,2,3}, 胡安平^{1,2,3}, 乔占峰^{1,2,3}, 余敏^{1,2,3}, 常少英^{1,2,3}, 梁峰^{1,2,3}, 郑剑锋^{1,2,3},
王永生^{1,2,3}, 罗宪婴^{1,2,3}, 李昌^{1,2,3}

(1. 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油集团 碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023;
3. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要:系统回顾和总结碳酸盐岩储层实验技术的发展历程和进展, 不难发现实验技术进步是推动碳酸盐岩储层理论技术创新的驱动力。研究表明:①从20世纪50—60年代以肉眼、放大镜观察为手段的宏观储层表征到21世纪的数字露头采集、微纳米孔隙三维成像和多尺度储层非均质性表征及建模, 无不凝聚着理论和实验技术进步的推动作用, 尤其是碳酸盐岩岩石学、沉积学和层序地层理论的发展及先进实验设备的应用。②“定年、定温、定压和流体属性示踪”技术代表了21世纪以来最为先进的碳酸盐岩储层地球化学测试技术, 由全岩向原位微区、溶液法向激光法、点检测向面成像的测试技术迭代升级代表着未来的发展趋势, 数字化转型和智能化发展为测试技术的迭代升级提供了驱动力, 将为成岩组构的成因、成岩-孔隙演化研究提供更为丰富可靠的信息。③超深层跨构造期高温、高压可视化成储模拟实验装置是开展超深层储层成因机制研究的核心设备, 可精准复现超高温、超高压地质环境, 实现跨构造期水-岩反应过程的动态正演模拟, 并集成流体特性与岩石渗透率的原位实时检测功能, 能够为揭示超深层碳酸盐岩次生孔隙的形成机理、保存条件及空间分布规律提供直接实验依据, 是21世纪以来非常重要的研究成果, 通过模拟实验揭示超深层碳酸盐岩油气成藏机理代表着未来的发展趋势。④储层预测是储层表征和评价、储层成因和建模研究的最终目的, 地球物理技术是实现储层识别与预测的手段, 建议加强碳酸盐岩储层实验技术与地球物理技术的有机结合。

关键词:元素地球化学; 同位素地球化学; 地球化学分析; 储层模拟实验; 储层表征; 碳酸盐岩储层

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Experimental techniques for carbonate reservoirs: Review, progress, and prospects

SHEN Anjiang^{1,2,3}, HU Anping^{1,2,3}, QIAO Zhanfeng^{1,2,3}, SHE Min^{1,2,3}, CHANG Shaoying^{1,2,3}, LIANG Feng^{1,2,3},
ZHENG Jianfeng^{1,2,3}, WANG Yongsheng^{1,2,3}, LUO Xianying^{1,2,3}, LI Chang^{1,2,3}

(1. State Energy Key Laboratory of Carbonate Oil and Gas, Hangzhou, Zhejiang, 310023, China; 2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, China National Petroleum Corporation, Hangzhou, Zhejiang, 310023, China; 3. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang, 310023, China)

Abstract: A systematic review and summary of the developmental history and advances in experimental techniques for carbonate reservoirs reveals that technological progress in experimentation serves as a fundamental driving force behind theoretical and technological innovations in the field. The research results are as follows. (1) The evolution from macro-scale reservoir characterization via visual inspection and magnifying lenses in the 1950s and 1960s to modern digital outcrop acquisition, 3D micro-to-nano pore imaging, and multi-scale reservoir heterogeneity characterization and modeling in the 21st century, underscores the pivotal role of theoretical and experimental technological advancements, particularly in carbonate petrology, sedimentology, sequence stratigraphy, and the deployment of sophisticated experimental equipment. (2) “Geochronology, thermometry, barometry, and fluid property tracing” represent the most cutting-edge geochemical testing techniques for carbonate reservoirs in the 21st century. The iterative upgrading from

收稿日期: 2025-05-06; 修回日期: 2025-07-03。

第一作者简介: 沈安江(1965—), 男, 博士、教授级高级工程师、博士研究生导师, 海相碳酸盐岩成储成藏研究和实验技术研发。E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn。

通信作者简介: 胡安平(1982—), 女, 博士、教授级高级工程师, 碳酸盐岩储层与实验技术研发。E-mail: huap_hz@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23B20154)。

bulk-rock to in-situ micro-area analysis, from solution-based methods to laser ablation, and from point detection to area mapping defines the future trajectory of the field. Furthermore, digital transformation and intelligent development provide the impetus for these technical upgrades, which will yield more comprehensive and reliable data for investigating the genesis of diagenetic fabrics and diagenetic-porosity evolution. (3) The high-temperature and high-pressure (HTHP) visualization apparatus for reservoir formation simulation across tectonic stages in ultra-deep layers is the core equipment for investigating the genetic mechanisms of ultra-deep reservoirs. It can accurately replicate ultra-HTHP geological environments, enabling dynamic forward modeling of water-rock interaction processes across tectonic stages, and integrates in-situ real-time monitoring of fluid properties and rock permeability. This apparatus provides direct experimental evidence for unraveling the formation mechanisms, preservation conditions, and spatial distribution patterns of secondary porosity in ultra-deep carbonate reservoirs. The elucidation of hydrocarbon accumulation mechanisms in ultra-deep carbonate reservoirs via simulation experiments represents a defining future research trend. (4) Reservoir prediction is the ultimate objective of reservoir characterization, evaluation, genesis, and modeling. Given that geophysical techniques are the primary tools for reservoir identification and prediction, it is highly recommended to strengthen the organic integration of experimental carbonate reservoir techniques with geophysical methods.

Key words: elemental geochemistry, isotopic geochemistry, geochemical analysis, reservoir simulation experiment, reservoir characterization, carbonate reservoir

引用格式:沈安江,胡安平,乔占峰,等. 碳酸盐岩储层实验技术:回顾、进展与展望[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(3): 709–725. DOI: 10. 11743/ogg20260301.

SHEN Anjiang, HU Anping, QIAO Zhanfeng, et al. Experimental techniques for carbonate reservoirs: Review, progress, and prospects[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(3): 709–725. DOI: 10. 11743/ogg20260301.

20世纪50年代, Bob Ginsburg^[1-2]关于南佛罗里达和巴哈马碳酸盐岩沉积作用的开创性工作推动了复杂碳酸盐沉积环境模型的建立; Bathurst^[3]关于 Dination 石灰岩成岩作用的研究工作使大家进一步了解碳酸盐岩的组构与结构; Bob Folk^[4]关于碳酸盐岩分类的论文阐明了结构、组构和组分可用于解释古代石灰岩的沉积环境。这一时期, 沉积地球化学家虽已开始将地球化学方法引入到成岩-成孔研究, 用以解决碳酸盐岩储集岩孔隙体系及非均匀性影响的问题, 但主流研究方法仍以现代沉积和野外露头地质考察为主, 依赖传统的锤子、罗盘、放大镜与偏光显微镜等工具以及简单的矿物成分与物性测试手段。

20世纪60—80年代是碳酸盐岩研究的黄金时期, 通过对现代海洋和淡水体系大量而深入的研究, 取得了许多地质、古气候、古环境和地球化学条件对沉积、成岩作用控制的基本认识, 推动了现代碳酸盐岩沉积环境和成岩作用研究, 并为地质历史时期碳酸盐岩沉积环境、成岩作用和孔隙演化研究提供了参照物^[5-7]。大量分析测试仪器的涌现及其在地学界的广泛应用, 特别是地球化学方法越来越多地被应用于碳酸盐岩储层研究中, 如阴极发光、同位素和流体包裹体等分析技术, 在碳酸盐岩沉积环境重建和储层成因研究中发挥

了重要的作用^[8-10], 但也存在一些局限性, 甚至出现一些误导和虚假的结论。

20世纪80年代末期—90年代, 层序地层学理论的应用给碳酸盐岩沉积储层研究带来了革新^[11-13], 主要应用于在碳酸盐岩早期成岩作用和孔隙演化。20世纪90年代中、晚期, 基于储层建模的露头层序地层解释和追踪迎来了发展高峰^[14], 有力地支撑了以工程-地质为目标的碳酸盐岩孔隙分类方案的提出^[15]。而扫描电镜的应用使碳酸盐岩储层研究由宏观走向微观, 元素和同位素测试新技术的开发和测试精度的提高更为有效地支撑了碳酸盐岩储层研究, 二维地震数据体被应用于碳酸盐岩储层预测中。

进入21世纪, 层序格架中区域沉积相展布样式、储层级别的非均质性、储层分类和评价、成岩-孔隙演化、储层规模性和可预测性成为研究热点, 层序地层理论提供了有用的工具^[16-18]。随着新一代分析测试仪器的出现, 形成了数字露头建模、基于场发射扫描电镜和工业CT的储层宏观-微观三维表征技术^[19-20], 以及以定年、定温、定压和定流体属性为代表的元素和同位素地球化学测试技术^[21-25], 并在碳酸盐岩储层领域得到广泛应用。碳酸盐岩溶蚀-沉淀模拟实验被应用于储层成因研究中^[26-30], 基于三维地震数据体的碳酸盐岩

储层建模和预测技术被应用于碳酸盐岩储层研究中^[29-33],支撑了复杂碳酸盐岩油气藏的勘探与开发。层序格架中岩溶储层发育地质背景、白云岩成因和白云石化对孔隙的贡献、深层碳酸盐岩孔隙形成与保持机理将是未来重要的研究方向。

综上所述,碳酸盐岩储层研究史实际上是一段与技术发展协同演进的历史,涉及储层表征和评价、储层地球化学测试和储层模拟实验技术系列,但存在诸多科学问题。例如,多尺度高精度储层非均质性表征和评价,以及深层正演和反演多信息融合的孔隙形成与保持机理等。本文旨在系统回顾和总结碳酸盐岩沉积储层实验技术的发展历程及进展,阐明技术进展对碳酸盐岩沉积储层研究的推动作用,并基于引领未来的重点研究领域展望技术的发展方向。

1 储层表征和评价技术

储层表征和评价回答碳酸盐岩储层是什么和怎么样的问题,为储层成因研究提供参数。储层表征的内涵非常广泛,包括储层厚度和产状、岩性特征和序列、沉积环境、孔-渗特征和孔喉结构、电性特征、非均质性建模和评价等内容。

1.1 发展历程

碳酸盐岩储层表征和评价技术发展历程可划分为3个阶段^[34]。

1) 20世纪初期—60年代,以肉眼和放大镜观察为特点的宏观储层表征阶段,主要依赖露头剖面观察和岩心描述表征储层的岩性特征和产状、沉积环境和沉积序列、沉积构造和非均质性、分布范围和厚度等,同时借助酸溶法、染色法、醋酸酯揭片法和“锥光”技术,识别碳酸盐矿物和原岩结构,常规的压汞和孔渗测试是该阶段开展储层评价的重要手段。

2) 进入20世纪70年代—90年代中期,显微镜的普及使岩性和孔喉结构研究由宏观走向微观,并使成岩作用和成岩序列研究成为可能。一些先进的分析仪器和技术被引入储层表征和评价研究,如荧光显微镜、激光共聚焦显微镜、扫描电镜、阴极发光仪、电子探针仪、X射线荧光光谱仪和X射线衍射仪等,用于矿物相、化学成分和元素的定量-半定量分析、微组构平面或三维成像、孔喉结构的高分辨率成像以及白云石有序度分析等^[35-37]。

3) 进入20世纪90年代中、晚期—21世纪初期,层序地层理论被广泛应用于碳酸盐岩储层特征和成因分

析、非均质性表征和评价研究中,核磁共振(NMR)、CT扫描和高压压汞等技术的应用^[38-40],实现了微观孔喉结构表征由二维向三维、由静态向动态以及由毫米-微米级向纳米级的跨越。沉积微相、储层地质建模和储层的岩性-物性-电性-含油性(“四性”)关系研究成为该阶段储层表征和评价极其重要的研究内容。

1.2 研究进展

近10年碳酸盐岩储层表征和评价技术实现了快速发展,并在勘探开发中发挥愈来愈重要的作用,主要体现在3个层级的储层表征和评价:①露头尺度的储层表征和评价^[19],解决储层分布问题;②油藏尺度的储层表征和评价^[41],解决非均质性问题;③储层微观孔喉结构表征和评价^[42],解决渗流能力问题。

1.2.1 露头尺度的储层表征和评价

相控型碳酸盐岩储层分布预测的基础是对沉积体系的认识,露头可从近三维空间上展示岩相类型、叠置旋回、接触关系和分布规律。因此,通过露头精细表征可解决地下相控型碳酸盐岩储层分布的问题。该技术通过多种露头数字化手段应用,与传统地质研究结合,最大程度地获取三维地质信息,并结合地质统计学开展储层表征、评价和建模工作^[43-44],主要包括以下4个方面^[20]。

1) 露头建模剖面筛选。露头地质条件决定地质信息的丰富程度和地下类比的有效性,需根据研究目的和地质体特征进行筛选。理想露头应包括多条从不同角度切割沉积相带的剖面,以揭露更多的空间信息。考虑到建模工作量和可行性,剖面长度以数千米至数十千米为宜。

2) 露头剖面地质研究。开展系统的剖面实测与关键层面和地质体横向追踪,通过岩石薄片观察与物性实验分析,获得岩相类型、物性和速度等参数,建立岩性与物性以及速度之间的关系,形成沉积相模式、储层成因和分布规律地质认识,以此作为地质建模方法优选的依据。

3) 数字露头模型建立。利用激光扫描仪(Lidar)、全景成像仪(Gigapan)和无人机(UAV)等数字化技术采集露头面影像数据,运用探地雷达(GPR)技术采集地表浅层数据体,利用动态GPS(RTK-GPS)技术进行空间高精度定位,并通过不同数据体的整合,建立数字露头模型(DOM);然后,通过高分辨率照片比对与高精度GPS定位,将实测剖面 and 取样点以及关键层面标定到数字露头面上,以虚拟井的形式加载取样点的岩

相、孔隙度和渗透率等地质信息;最后,以关键层面为限定,在数字露头剖面或DOM上进行岩相和层面的追踪解释。

4)储层地质模型建立。在Petrel或其他建模软件上开展露头储层地质建模工作:①以DOM中的层界线为输入数据建立三维地层格架;②以实测剖面及虚拟井岩相信息作为输入数据,以层内岩相类型的分布概率作为约束,进行全网格岩相模拟,建立岩相模型;③以实测孔隙度和渗透率作为输入数据,以岩相模型为控制参数,开展全网格孔-渗模拟,建立物性模型。基于数字露头的储层地质模型可以为地下相似储层地质体研究提供重要信息:①使地下钻井和地震剖面的沉积相和储层解释与地质实际更接近;②用于地震正演模型的建立,为地震储层预测提供参数选择依据,提高地震储层预测精度。

露头条件在不同地区存在显著差异。针对这个问题,项目团队经过多年研究,建立了更符合中国实际的露头数据采集技术(图1),主要有2个方面技术内涵:①针对露头剖面大多以平躺为主、出露和连续性差以及表征难的问题,通过Lidar与RTK-GPS结合,实现全地形露头的数字化;②针对难以获取交叉出露剖面且露头面信息有限的问题,引入了探地雷达(GPR)采集覆盖区地表浅层的地质信息,与露头剖面一起构成三维地质信息。

1.2.2 油藏尺度的储层表征和评价

该技术可应用于相控型碳酸盐岩储层及受断裂和不整合面控制的岩溶缝洞型储层,解决储层层级的渗透层和隔挡层分布、缝洞联通单元刻画与识别问题,指导开发井部署。

露头尺度的储层表征、评价和建模为井下油藏尺度的储层表征、评价和建模提供了露头可类比模型的约束。对于相控型碳酸盐岩储层,其地质统计学基础是不同沉积背景下不同岩相(微相)类型的接触关系、尺度、形态特征、分布范围和垂向上的相序存在规律性变化,相带与岩相发育特征、储层特征和分布密切相关。技术内涵(图2)包括以下7个方面:①岩心沉积特征观察和沉积微相、不同层级层序界面的确定;②基于岩心约束的单井沉积相、沉积微相、层序界面、高频沉积旋回分析和连井对比,建立高频等时地层格架下的沉积模式;③以岩相(沉积微相)为单元的储层评价,包括储层物性和孔喉结构评价,建立岩相、沉积微相与储层物性的关系,确定渗透层与隔挡层在高频层序地层格架中的分布规律和主控因素;④单井岩性-物性-电性-含油性分析,建立识别图版;⑤基于单井和连井沉积储层剖面约束的地震相和地震层序研究,层序格架中沉积相、渗透层与隔挡层识别,确定渗透层与隔挡层在地震层序格架中的分布规律和主控因素;⑥交叉露

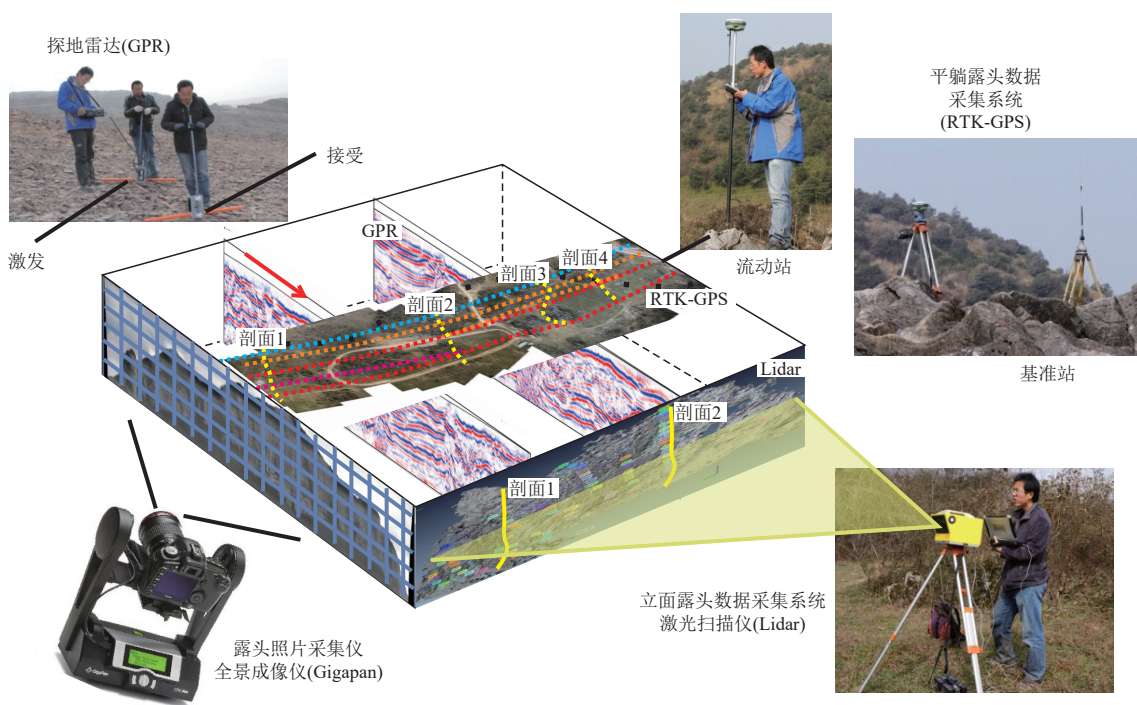


图1 平躺和覆盖区浅层露头数据采集系统示意图^[45]

Fig. 1 Schematic diagram of the digital outcrop acquisition system for shallow outcrops in flat-lying and covered areas^[45]

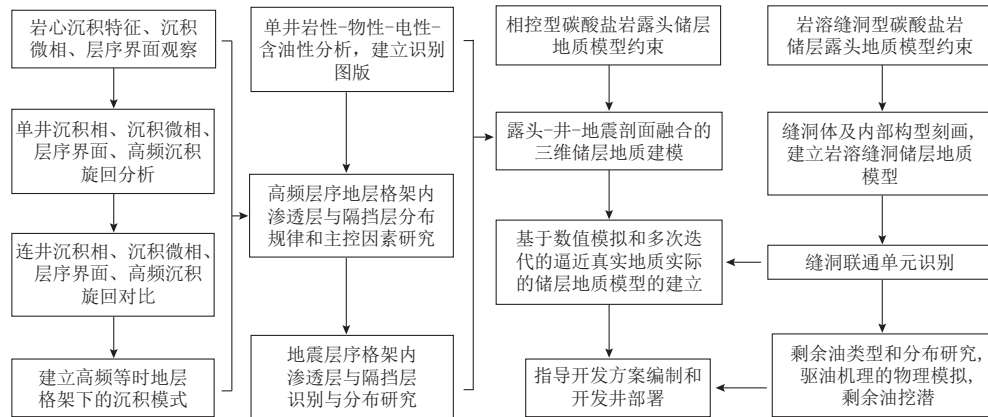


图2 油藏尺度的储层表征评价技术内涵及流程

Fig. 2 Technical connotation and workflow of reservoir-scale reservoir characterization and evaluation

头-井-地震剖面融合的三维储层地质建模,建立岩相、渗透层与隔挡层三维构型;⑦基于三维储层地质模型约束的数值模拟和多次迭代,建立与开发动态吻合的逼近真实地质条件的储层地质模型,指导高效开发井部署。

对于受断裂和不整合面控制的岩溶缝洞型储层,缝洞体及内部构型刻画、缝洞联通单元识别、剩余油挖潜是储层表征和评价的核心内容和目的。基于露头岩溶缝洞储层地质模型的约束,现有的地震反演技术能基本实现缝洞体及内部构型的精细刻画,通过缝洞体地震雕刻、流体示踪和开发动态数据综合分析,能有效地识别缝洞联通单元,建立井-震融合的岩溶缝洞体三维地质模型。与相控型碳酸盐岩储层不同,基于岩溶缝洞体三维地质模型约束的数值模拟和多期迭代,虽然可以建立与开发动态吻合的逼近真实地质条件的储层地质模型,但解决剩余油挖潜问题的效果不佳,仍需开展驱油机理的物理模拟工作。

1.2.3 储层微观孔喉结构表征和评价

油藏内部结构的基本单元是孔喉结构组合。储层微观孔喉结构表征技术可用于渗流能力和产能评估,适用于常规和非常规碳酸盐岩储层。其内涵包括孔喉特征、类型和组合的表征,以及孔喉结构类型与岩相、沉积构造和成岩作用的相关性研究。常用的方法有岩心观察、铸体薄片镜下观察、压汞分析、场发射扫描电镜分析和工业CT扫描等。随着CT扫描精度的提高和数据处理软件能力的增强,可对储层进行精细的三维重建和微观孔喉结构参数定量计算,获取精准的表征参数。

1) 孔喉结构类型及组合。碳酸盐岩储集空间可

划分4种类型,包括微孔隙(孔径 $< 0.01\text{ mm}$)、孔隙($0.01 \sim 2.00\text{ mm}$)、孔洞($2.00\text{ mm} \sim 50.00\text{ cm}$)和洞穴($> 50.00\text{ mm}$),喉道由微裂缝、裂缝和断裂构成;孔喉结构组合包括微孔型、孔隙型、孔洞型和洞穴型,或由多重孔喉介质组合而成,如孔隙-孔洞型、孔洞-洞穴型、孔隙-洞穴型、孔隙-孔洞和洞穴型等;大型的岩溶洞穴往往由断裂连通,孔隙和孔洞往往由裂缝连通,微孔隙往往由微裂缝连通。

2) 孔喉结构类型与组合的主控因素。孔喉结构是沉积和成岩改造共同作用的结果,其类型和组合受多种因素控制。其中,岩相、溶蚀作用和白云石化作用最为显著。岩相决定基质孔隙类型,颗粒结构的岩相多形成粒间孔隙型储层,而泥粒或粒泥结构的岩相则多以孤立孔隙型储层为主。溶蚀作用通过对基质孔隙和喉道的溶扩,建造溶蚀孔洞甚至洞穴,推动孔隙-孔洞型储层的发育。白云石化作用使先期储层转变为以晶间孔为主的连通孔隙型储层。总之,特定岩相经历不同的成岩改造可以形成不同的储集空间类型和组合。一般而言,岩溶储层以孔洞-洞穴型和洞穴型为主,少量孔洞型;白云岩储层和礁滩储层以孔隙型、孔洞型和孔隙-孔洞型为主。

3) 孔喉结构类型与产能关系。储层厚度、孔隙度、渗透率和孔喉结构组合类型控制油气产能。安岳气田龙王庙组孔喉结构组合类型、储层厚度和产能数据的对比分析显示,孔喉结构组合类型与发育厚度共同控制单井产能,其中厚度在 $20 \sim 30\text{ m}$ 以上的大孔隙型、小孔隙+孔洞型以及大孔隙+孔洞型储层,可达到中-高产,而微孔隙+小孔隙型和小孔隙型储层,无法达到工业产能的要求(表1)。基于岩心孔喉结构组合类型的标定,已建立了测井孔喉结构组合类型识别图版。

表1 四川盆地寒武系龙王庙组白云岩储层孔喉结构组合类型与产能的关系^[45]Table 1 Relationship between pore-throat structure assemblage types and productivity of dolomite reservoirs in the Cambrian Longwangmiao Formation, Sichuan Basin^[45]

序号	类型	岩心特征	薄片特征	物性特征		产能/(10 ⁴ m ³ /d)
				孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	
A	微孔隙+小孔隙型	少量针孔状小孔隙	晶间微孔和少量粒间孔	<2	<0.01	<0.1(低产)
B	小孔隙型	针孔状小孔隙发育	晶间微孔和粒间孔,白云石晶体未被溶蚀	2~4	0.01~0.50	0.1~10.0(中-低产)
C	大孔隙型	斑点状大孔隙发育	晶间溶孔为主,白云石晶体被溶蚀	4~6	0.50~2.00	10.0~50.0(中产)
D	小孔隙+孔洞型	针孔状小孔隙与孔洞	晶间孔+粒间孔+溶蚀孔洞,白云石晶体被溶蚀	6~8	2.00~5.00	50.0~100.0(中-高产)
E	大孔隙+孔洞型	斑点状大孔隙与孔洞	晶间溶孔+溶蚀孔洞,白云石晶体被溶蚀	8~12	>5.00	>100.0(高产)

1.3 发展趋势

勘探开发需求和数字化智能化技术进步将推动碳酸盐岩储层表征和评价技术向高精度与多尺度融合、二维向三维表征的升级,具体表现在以下3个发展趋势。

1) 露头尺度的储层表征和评价。数字露头采集技术在推动相控型碳酸盐岩储层表征、评价和建模的同时,还有助于建立不同沉积模式下碳酸盐岩储层地质模型,系统揭示不同沉积背景下碳酸盐岩储层发育和分布规律,指导有利储集相带评价;建立不同地质场景下受不整合及断裂控制的岩溶缝洞型碳酸盐岩露头储层地质模型,系统揭示缝洞发育样式、主控因素和分布规律。

2) 油藏尺度的储层表征和评价。油藏尺度储层地质建模更依赖于不同沉积背景下碳酸盐岩储层地质模型的约束,建立露头-井-震融合的三维储层地质模型;基于开发动态数据、数值模拟和多次迭代,建立不同沉积背景下逼近真实地质实际的储层地质模型,支撑开发井部署。

3) 储层微观孔喉结构表征和评价。不同地质场景(不同的油、气、水等流体充填程度)下,深-超深层碳酸盐岩储层孔隙度、渗透率和孔喉结构变化的表征与评价;深-超深层不同孔喉结构组合碳酸盐岩储层渗流机理的表征与评价,以此解决深-超深层油气运聚机理和开发井产能评估相关问题。

2 储层地球化学测试技术

通过成岩矿物的包裹体、元素和同位素测试,确定成岩矿物的形成时间和环境,反演碳酸盐岩储层成因和成岩-孔隙演化过程,回答碳酸盐岩储层成因问题。包裹体测试可以获取均一温度、捕获压力和流体成分

等信息,元素测试可以获取常量和微量稀土元素含量和比值等信息,(放射性)同位素测试可以获取比值、年龄和温度等信息。

2.1 发展历程

20世纪50—60年代,碳酸盐岩沉积储层研究主要依赖于现代沉积和野外露头地质考察及岩心观察等方式,用传统的锤子、罗盘、放大镜、矿物晶形与硬度法在野外区分碳酸盐矿物和硬度更大的石英矿物及用盐酸法区分方解石矿物和白云石矿物等是该阶段的主要研究手段。偏光显微镜在地质学领域的广泛应用使碳酸盐岩沉积储层研究由宏观走进微观,并催生了基于矿物成分分析的碳酸盐岩岩石分类方案的提出^[4-5]。醋酸酯揭片、锥光和荧光法在偏光和荧光显微镜下恢复灰岩的原岩结构也是该阶段很具特点的研究方法^[46]。

进入20世纪70年代—80年代中期,通过显微镜下铸体薄片观察微观孔喉结构、薄片或岩片染色法恢复原岩结构及矿物成分^[36]、X射线衍射法鉴定白云石有序度和碳酸盐矿物相(文石、方解石、白云石和菱铁矿等)、包裹体均一温度法恢复成岩矿物形成温度,以及X射线荧光光谱法依据铍-铀(Be-U)的常量和微量元素含量恢复沉积环境等是该阶段的主要研究手段。元素和同位素地球化学分析方法(如微量稀土元素、碳-氧稳定同位素和锆同位素等)虽然被应用于碳酸盐岩储层研究,示踪成岩流体属性和成岩环境^[47-48],解决储层成因问题,但受仪器测试精度的限制,还达不到微区测试的要求;受数据积累的限制,更没有建立相关的解释图版,测试数据的解译存在局限性,甚至出现一些误导和虚假的结论。

进入20世纪80年代中、晚期—90年代,包裹体测试技术进一步成熟,除测定均一温度外,还可以开展包裹体成分和压力的测试,示踪成岩流体组分和环境压

力。扫描电子显微镜(SEM)的应用不但可以重建极小固体物质的微观形貌和三维形态,还可通过能谱仪分析固体物质的矿物相、微区成分、元素或开展氧化物的定性-半定量分析;电子探针和阴极发光分析技术被广泛应用于碳酸盐矿物的元素含量、矿物成分和发光特征分析,示踪成岩流体和成岩环境,解决储层成因问题。虽然在这个阶段出现了大量先进仪器及元素和同位素测试新技术,并建立了碳、氧稳定同位素和锶同位素解释图版^[16],但还是很难达到微区检测的需求,而且微钻或牙钻取样的混样问题也未得以解决。

综上,20世纪50年代以来碳酸盐岩储层研究方法可以总结为传统的方法手段日趋完善和成熟,在岩石学、沉积环境和储层成岩研究中发挥了重要的作用,元素和同位素地球化学方法逐渐被应用于碳酸盐岩储层成因研究中,但总体处于探索阶段,检测精度有待提高,尤其是以微区组构为单元的检测,解释图版有待建立和完善,新技术有待开发。

2.2 研究进展

21世纪是元素和同位素地球化学分析方法被广泛应用于碳酸盐岩储层研究的黄金时期,仪器设备更为先进,溶液法对样品需求量的大幅降低以及激光取样技术的应用,使以结构组分为单元的微区检测成为可能;尤其是痕量组分检测和同位素测年等新技术的开发,为更多地球化学信息应用于碳酸盐岩储层研究提供了支撑。本文重点介绍以下5项技术(图3)。

2.2.1 微区、激光锶同位素测试技术

锶同位素包括⁸⁸Sr, ⁸⁷Sr, ⁸⁶Sr和⁸⁴Sr共4种天然稳定同位素,其中⁸⁸Sr的天然丰度最高(含量82.58%)。这些同位素具有稳定的地球化学特征,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr含量比值被广泛应用于地质学、考古和生物学等领域。在地质学领域,可以通过锶同位素比值推测成岩矿物的介质属性和年代意义^[21,49]。一般采用100 mg岩石粉末,通过样品消解、化学分离和富集、质谱仪分析等步骤测试锶同位素,这种方法主要适用于全岩样品分析。通过优化样品消解和化学分离等流程,项目团队建立了微区锶同位素测试技术,样品用量从以往100 mg降低至1 mg,用酸量由100 mL降低至10 mL,测试效率提高2倍,测试精度达到 5×10^{-6} ,实现了微区成岩组构锶同位素测试。近5年,还研发了激光锶同位素测试技术,激光斑束直径为100 μm ,该方法不需要复杂的样品制备过程,极大提高了微区成岩组构锶同位素测试的效率和成功率。

2.2.2 激光碳、氧稳定同位素测试技术

碳和氧不存在放射性衰变,为稳定同位素,碳元素有3个稳定同位素(¹²C, ¹³C和¹⁴C),氧元素有3个稳定同位素(¹⁶O, ¹⁷O和¹⁸O)。地球上的碳酸盐矿物,如方解石和白云石,形成时会记录周围环境的碳、氧同位素,所以碳、氧同位素除了受物质本身控制外,还与周围流体性质、温度和压力等有关,因此可以通过碳、氧同位素比值研究成岩矿物的成岩介质属性和温-压



图3 以定年、定温、定流体属性为核心的微区多参数检测技术

Fig. 3 Micro-area multi-parameter analysis techniques centered on geochronology, thermometry, and fluid property tracing

条件^[21]。

通常碳、氧稳定同位素测试需要5~10 mg样品,主要适用于全岩样品分析,无法适用于微小成岩结构的碳、氧同位素分析。1986年Jones等^[50]提出利用激光微束分析技术和质谱仪联用开展碳酸盐原位碳、氧同位素分析。20世纪90年代末强子同等^[51]研制出中国首套适用于碳酸盐微区组构分析的激光微区取样装置,称为“离线法”取样装置。该方法采用低温冷阱原理进行CO₂纯化收集;其缺点是激光取样过程在真空系统中进行,抽真空耗时,单个样品组构分析时长需要2 h以上,同时产生的CO₂需先用收集瓶收集,再通过气体同位素比质谱仪双路送入质谱分析,CO₂有效利用率不高,而且可测试微区组构面积需要300 μm×300 μm以上,从而限制了该方法的推广应用。

针对以上存在的问题,项目团队通过技术攻关改造和升级了碳酸盐激光微区取样-质谱仪分析装置和方法,装置改造主要在以下3个方面进行:①样品池重新定制;②氦气吹扫管线代替抽真空装置;③石英毛细管杂气分离替代低温冷阱分离装置。通过装置改进和测试方法调整实现碳酸盐激光取样-质谱碳、氧同位素分析在线测试。新测试方法的流程如下:①在密闭系统中,在显微镜下找到待检测目标组构,借助氦氟激光引导,启动钇铝石榴石激光;②碳酸盐矿物在高温作用下发生分解并产生CO₂,用载气(氦气)将CO₂依次通过冷阱、水阱和石英毛细管提纯后,输送至质谱仪进行碳、氧同位素分析。整个过程实现在线取样与实时分析。在线法与离线法相比,具有CO₂气体产生、收集、传输、分离和测定均为实时在线的优势,激光取样样品组构直径由300 μm降低至100 μm,测试效率提高5~10倍,测试精度由离线法的±0.4‰提升至±0.2‰。

2.2.3 碳酸盐岩团簇同位素测试技术

碳酸盐岩团簇同位素是一种新型的温度计,其原理是碳酸盐矿物中¹³C—¹⁸O化学键浓度对温度具有敏感性,而不受成岩流体影响。因此可以利用碳酸盐团簇同位素来计算矿物的形成温度,再通过温度以及测定得到的矿物稳定氧同位素比值(δ¹⁸O)进行成岩流体的δ¹⁸O计算,进而示踪成岩流体属性。碳酸盐岩团簇同位素被广泛应用于古温度重建和成岩流体示踪等研究中^[52-53]。

项目团队通过近5年的技术攻关,自主设计和组建了样品前处理装置,建立了加热器与平衡气线性回归及经验转换方程,开发出碳酸盐团簇同位素测试技术。通过这套装置和测试流程,测得3个国际标样

ETH-3, NIST-88B和ETH-1的测试结果与标准真值的误差小于3%,多次测试后数据重复性好,与国外同类实验室进行测试比对,数据可对比性好。

2.2.4 微量-稀土元素激光面扫描成像技术

对于岩石或矿物来说,微量元素通常指含量低于0.1%的元素,在碳酸盐岩研究中常用的微量元素有Sr, Mg, B, Ba, Na, Fe和Mn等。稀土元素包括从La到Lu(Z=57~71)的15个镧系元素以及与镧系性质相近的铪和钇。利用微量-稀土元素含量或比值、配分模式和异常信息确定成岩环境的研究思路得到广泛的认同^[54-56]。

微量-稀土元素测试通常采用溶液法,样品需求量为岩石粉末50 mg。该方法存在样品需求量大、化学处理流程复杂且耗时长、用酸量大等局限性,制约了该技术的推广应用。针对以上技术局限性,项目团队通过攻关,实现了溶液法碳酸盐矿物微量稀土元素测试技术的升级^[52]。技术升级后,样品需求量从50 mg降低至10 mg,耗酸量从10 mL降低至2 mL,测试误差由5%~10%降至2%~5%,化学处理流程优化后测试效率显著提高。

此外,基于RESolution激光剥蚀系统、QuadLock和iCap TQ三重四极杆电感耦合等离子体质谱仪三设备联用,研发了微量-稀土元素激光面扫描成像新技术。元素含量检测下限由(1~10)×10⁻⁹级降至更低级,图像空间分辨率由5 μm提升到1 μm,面扫描测试效率提高10倍。微量-稀土元素激光面扫描成像新技术可以快速获取样品中各个微区成岩组构的微量-稀土元素含量,相比传统溶液法,在成岩环境重建及成岩流体示踪方面具有更好应用效果;除此之外,与激光铀-铅(U-Pb)同位素定年技术联用,为选取有效定年待测区提供技术手段,提高了定年成功率和精度;与阴极发光仪联用,可以分析微量-稀土元素特征与矿物阴极发光特征的对应关系,为碳酸盐岩阴极发光机理研究提供利器。

2.2.5 碳酸盐矿物和石英激光U-Pb同位素测试技术

U-Pb同位素测年技术已成为目前最常用的定年方法(如在锆石、磷灰石等很多高U含量矿物上具有很好应用效果)。但由于以下3个方面的原因,已有的碳酸盐矿物测年精度和成功率低,还无法开展石英的测年工作:①以往的溶液法U-Pb同位素定年要求制备6~8个平行样品,每份200 mg,但经常难以钻取足够量粉末样品;②碳酸盐矿物定年标样少且年龄低,石英

定年标样缺乏;③超低U含量检测难,碳酸盐矿物和石英U含量比锆石低几个数量级,常规检测方法难以检测到有效信息。

近些年,项目团队研发建立了碳酸盐矿物和石英激光U-Pb同位素测年技术^[18,57-58],主要有以下3个方面技术创新:①设备改进,在多接受电感耦合等离子质谱仪上配置了6个离子计数器(IC),其中第5号离子计数器(IC5)用于测试超低含量的²³⁸U,使U检测极限低至 10×10^{-9} ,其他5个IC分别测量²⁰⁸Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁴Pb和²⁰²Hg,大幅提高了超低U含量碳酸盐矿物和石英测年的成功率;②标样开发,开发了年龄为 $209.8 \text{ Ma} \pm 1.3 \text{ Ma}$ 的方解石标样、年龄为 $248.1 \text{ Ma} \pm 2.6 \text{ Ma}$ 的白云石标样和年龄为 $248.7 \text{ Ma} \pm 7.5 \text{ Ma}$ 的石英标样;③MC-ICP-MS与激光剥蚀系统联用,解决了溶液法难以获得足够量粉末样品的难题,实现了U-Pb同位素测年由溶液法向激光法的升级。与溶液法相比,在测试精度持平的情况下,激光法检测成功率和效率提高10倍。在埋藏成岩过程中会形成多期次碳酸盐矿物和石英,碳酸盐矿物和石英激光U-Pb同位素测年技术为这些不同期次成岩矿物的形成时间确定提供了技术手段,从而为成岩演化过程的定时重建提供利器。

另外,近几年微区痕量元素(Ca, Mg, Ba和Mo)等非传统同位素测试技术开发取得重大进展,为白云岩和白云岩储层成因、古海洋氧化还原环境重建和油-源对比提供了技术手段。

2.3 发展趋势

除实验新技术(如Lu-Hf, Nd-Sm和Rb-Sr同位素测年技术、团簇同位素 Δ_{49} 测温技术、烃类包裹体压力-组分测试技术以及单样品次组分沥青Re-Os同位素测年技术等)的开发外,现有测试技术也实现了由全岩向原位微区组构、由溶液法向激光法、由激光点向激光面扫描成像的迭代升级。随着仪器设备灵敏度的提高和测试流程的优化,元素和同位素检测向超低含量(10^{-6} 级— 10^{-9} 级)和微束斑($150 \mu\text{m}$ — $30 \mu\text{m}$)方向发展。应用领域也将越来越广,元素和同位素测年、测温技术融合,可以解决成储和成藏演化、古海洋氧化还原环境重建和油-源对比等科学问题,推动了地球化学学科的发展。

3 储层模拟实验技术

通过复现地质温度、压力和水动力学条件下碳酸盐岩溶蚀与沉淀作用过程,正演碳酸盐岩埋藏成岩过

程中次生孔隙的形成与动态演化,尤其是深层碳酸盐岩孔隙形成机理与保存条件,回答碳酸盐岩储层成因和主控因素问题。前期的研究更倾向于沉积成岩产物的地球化学特征研究,反演碳酸盐岩储层成因和成岩-孔隙演化;进入21世纪,沉淀-溶蚀模拟实验技术才被应用于碳酸盐岩储层研究,正演其成因和成岩-孔隙演化。事实上,正演和反演是解决一个问题的两种不同手段,正演的方法更直接更客观,优势更明显。

3.1 发展历程

自20世纪80年代起,伴随全球范围内碳酸盐岩油气藏的大规模勘探发现,碳酸盐岩储层次生孔隙成因机理逐步成为勘探研究的重点,但主要依赖于成岩矿物的包裹体、元素和同位素测试解决碳酸盐岩储层成因问题。虽然溶蚀-沉淀模拟实验能够解决孔隙形成和保持机理、溶蚀孔洞分布规律的问题,但由于缺模拟实验装置或只有非常简陋的模拟实验装置,只能开展作坊式的模拟实验研究,取得的认识非常有限,因而未能引起重视。进入21世纪,溶蚀-沉淀模拟实验技术才被真正应用于储层成因研究,并可划分为2个阶段。

1) 21世纪第一个10年为浅层岩石表面溶蚀模拟实验阶段,模拟实验装置主要包括酸-岩反应旋转岩盘仪^[59-62]、高温-高压管式流动反应装置^[63-64]和熔融毛细硅管^[65]。

酸-岩反应旋转岩盘仪是通过电动机带动反应釜内的岩盘定转速旋转,岩盘旋转时带动反应釜内的酸液以一定的转速旋转,实现模拟动态条件下的碳酸盐岩与酸液的溶蚀反应。实验过程中,通过开展不同温度、压力和流体类型等条件下碳酸盐岩的溶蚀模拟实验,计算相应地质条件下的溶蚀速率,进而探讨碳酸盐岩溶蚀化学机理和主控因素^[60,66]。王伟等^[67]利用酸-岩反应旋转岩盘仪开展了不同温度和 CO_2 分压条件下鲕粒灰岩的溶蚀速率特征研究。实验结果表明 CO_2 分压为3 MPa、温度由 25°C 升高至 150°C 时,鲕粒灰岩溶蚀呈弱—强—弱的变化趋势,最大溶蚀速率对应的温度约为 100°C ,但白云石化鲕粒灰岩溶蚀速率随着温度的升高而增大,并且高于非白云石化鲕粒灰岩的溶蚀速率。

高温-高压管式流动反应装置是通过高压泵驱动溶液在管式反应釜内流动,在管式反应釜的溶液出口端安装背压阀,实现稳定流体压力和反应溶液在高温、高压下连续流动,工作温度小于 200°C 、工作压力小于70 MPa,可开展方解石、白云石和长石等矿物的溶解动力学实验。实验过程中,通过开展不同酸液类型、酸

液pH值、实验流速、矿物类型及矿物粒径等与化学动力学相关的实验参数,获取相应条件下矿物的溶解速率和溶蚀特征。2009年,中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所对高温-高压管式流动反应装置进行改造,并应用于碳酸盐岩储层模拟实验^[68]。蒋小琼等^[69]利用改造后的实验装置,在恒压条件下,研究了不同温度下CO₂、乙酸和H₂S溶液对不同类碳酸盐岩的溶蚀作用。结果表明,灰岩最易溶,白云岩最难溶,过渡岩类则介于两者之间。据此提出了方解石较白云石更易溶的地质认识。

熔融毛细硅管实验装置,是以熔融毛细硅管作为高温、高压水-岩反应的核心腔体,同时借助改造后的冷热台精准实现对硅管温度调控的专用实验系统,能为水-岩反应提供稳定可控的高温、高压环境,适配相关机理研究与参数测试需求,可以提供500℃的模拟实验温度。熔融毛细硅管选用耐高温、高压的石英材质制成细管状结构,其核心优势在于无色透明的光学特性:可借助显微镜实现对毛细硅管内部水-岩反应过程的高温、高压原位动态观测,清晰捕捉反应界面变化与物质迁移规律;能够耦合激光拉曼光谱仪,对反应体系内流体的化学组分构成及相对含量开展高温、高压原位精准检测,为量化水-岩作用过程中的物质转化机制提供直接数据。

2) 21世纪第二个10年为中、深层岩石内部溶蚀模拟实验阶段,期间研制了热液金刚石压腔^[70]和高温、高压岩心渗流模拟装置^[71]。

热液金刚石压腔最早由美国康奈尔大学Bassett教授于1990年研制。2009年,北京大学利用热液金刚石压腔开展碳酸盐岩溶蚀模拟实验研究^[70]。热液金刚石压腔装置由一对高纯度金刚石压砧与带中心样品腔的金属垫片组成高压反应空间,环绕压砧的加热模块(配测温元件)实现精准控温,金属框架及精密调节螺杆则用于固定部件与调节腔内压力,部分装置还设有流体注入接口。因金刚石具透明性,可与显微镜、光谱接口联用,实现了单矿物尺度的水-岩反应实验模拟和反应过程中流体化学组分构成及相对含量的高温、高压原位分析,反应体系也实现了从“封闭—(半)开放—开放体系”的转化。

法国蒙彼利埃大学较早研制出高温高压岩心渗流模拟装置,但其真正定型的时间是2016年^[71]。高温高压岩心渗流模拟装置可开展实验温度20~210℃和实验压力常压约70 MPa的岩石内部溶蚀模拟实验,实验采用直径25.4 mm的柱塞样,同时可在高温、高压原位条件下实时测定岩石的渗透率值,量程为(0.1~

1 000)×10⁻³ μm²。该装置的优势是实现了岩石内部溶蚀的模拟实验,实验过程中水/岩比及水动力方式更逼近地质实际情况,不仅可以用来探索碳酸盐岩溶蚀过程流体组分和含量及矿物表面微形貌等特征的变化,还可以从宏观角度研究溶蚀过程中岩石内部孔喉结构、岩样物性的动态变化。余敏等^[72]较早开展了岩石内部溶蚀实验,采用含孔和(或)缝的岩石柱塞样,岩样直径25 mm,进行高温、高压下碳酸盐岩溶蚀模拟实验,获得了(60℃, 10 MPa)~(180℃, 50 MPa)温-压下,浓度0.2%乙酸作为溶解介质时,白云岩和灰岩溶蚀量随温度与压力的升高而逐渐减少的实验结果,并建立碳酸盐岩埋藏、溶蚀及孔喉演化3种路径。

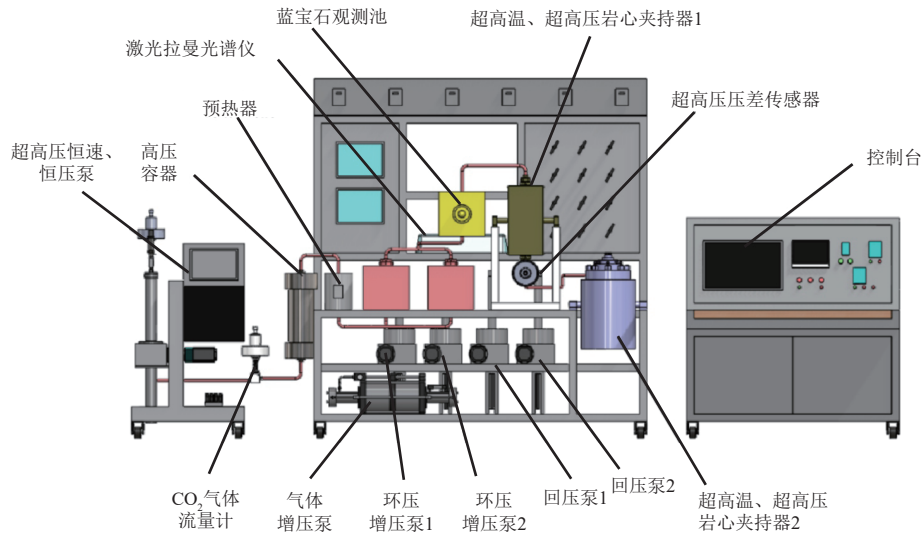
综上所述,上述装置虽功能各有侧重,但均为满足特定需求的单一模拟设备,难以适配叠合盆地超深层碳酸盐岩储层对超高温、超高压和跨构造期水-岩反应的模拟需求。其共性不足显著:①耐高温、高压能力偏低(温度<180℃,压力<70 MPa),且单一反应釜仅支持持续升温、升压模拟;②实验对象与监测能力受限,部分装置仅支持颗粒表面溶蚀可视化实验,无法评价溶蚀增孔效应及表征孔喉结构变化,而另一部分虽支持岩心柱塞内部溶蚀,却缺乏可视化功能,也无法对岩石物性和实验流体组分含量进行高温、高压原位精准检测,最终制约了碳酸盐岩次生孔隙规模形成、主控因素和分布规律的深入研究。

3.2 研究进展

近5年,深-超深层岩石内部沉淀-溶蚀模拟实验进入关键研究阶段。伴随碳酸盐岩油气发现深度持续增加,模拟实验条件逐步从低温-低压、简单流体过程,向高温-高压、复杂流体过程升级。为此,科研人员研制出“超深层跨构造期高温、高压可视化成储模拟实验装置”^[29],该装置可满足深-超深层地质背景下碳酸盐岩溶蚀-沉淀模拟需求,具备跨构造期水-岩反应功能,且能实现温度高于400℃和压力高于150 MPa、反应过程可视化观测,以及渗透率与反应流体高温、高压原位精准检测。

3.2.1 模拟实验装置研制

在中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室前期研制的“高温、高压岩心渗流模拟装置”基础上实现了核心功能模块自主创新。新装置(图4)包括4个核心功能模块(超高温-超高压三轴应力岩心夹持器模块、具“退火、退压”功能的多阶段-连续流模块、超高温-超高压可视化与流体原位检测模块、超高温-超高压渗

图4 超深层跨构造期高温、高压可视化成储模拟实验装置结构图^[14]Fig. 4 Structural diagram of the experimental apparatus for HTHP visualization of reservoir formation across tectonic stages in ultra-deep layers^[14]

透率实时原位检测模块)和1个整机软件控制系统。新装置配套功能模块包括:电子电路系统、高饱和 CO_2 分压(p_{CO_2})压力溶液定量配制模块、高温-高压柱塞管反应釜、夹持器围压自动跟踪控制器、高压原位自动进液系统、恒压恒速双柱塞泵、自动跟踪回压器、超高压容器、超高温-超高压预热器、溶液采集器、计算机、激光拉曼光谱仪、冷却循环水、超高压气动阀门和管线等。

超高温-超高压三轴应力岩心夹持器的结构由内至外依次为样品室、支撑套、固定锁扣、三孔螺杆固定架、石墨垫、耐高温-高压腔体、自密封堵头、测温探头及温控箱。在核心部件设计上,样品室采用紫铜材质套管包裹柱塞样品,相较于传统橡胶材料套管,其耐高温与耐高压性能显著提升,可适应更严苛的实验温压条件;自密封堵头与密封垫则选用石墨烯材料,凭借该材料优异的耐高温、高压特性,成功攻克了超高温-超高压环境下夹持器的密封性难题。此外,为确保包裹柱塞样品的紫铜套管能稳定承受超高围压与轴压加载,通过支撑套与固定锁扣对紫铜套管进行双重包裹,并借助三孔螺杆固定架对样品室进行精准固定,从结构设计层面保障了实验过程的稳定性与可靠性。超高温高压三轴应力岩心夹持器实现了3项功能升级:①提供工作温度高于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、工作压力高于 150 MPa 的模拟实验温-压条件;②提供围压 150 MPa 和轴向压力 150 MPa 的压力条件,满足仿三轴应力的实验需求;③溶蚀模拟实验方式由岩石表面溶蚀升级为岩石内部溶蚀,提供恒压或恒流速两种流体驱动方式,使碳酸盐

岩溶蚀模拟实验更逼近真实地质背景。

具“退火退压”功能的多阶段-连续流模块,集成2项核心技术创新:①通过灵活切换注入泵的恒压、恒流工作模式,并协同调控预热器与围压控制部件的运行参数,能够模拟构造动力、水动力、地静压力和热驱动力等多类型流体驱动机制及运移场景下的溶蚀-沉淀实验过程,成功解决传统装置仅提供单一水动力驱动流体运移的功能短板;②为精准复现跨构造期地质环境下碳酸盐岩溶蚀-沉淀实验过程,采用多台超高温-超高压三轴应力岩心夹持器串联运行架构,每台夹持器均实现流体温度、流体压力及围压的独立调控功能,且在夹持器前端增设预热组件,有效突破传统装置仅能开展持续升温、升压条件下水-岩反应研究的技术局限。实现了2项功能升级:①由单一“升温升压”过程的溶蚀模拟实验升级为可模拟“升温升压”与“退火退压”双过程的溶蚀-沉淀模拟实验;②提供大跨度温-压变化引起流体属性变化的水-岩反应模拟功能。

超高温-超高压可视化与流体原位检测模块,涵盖2项关键技术创新:①研发适配超高温-超高压工况的专用蓝宝石视窗池,该视窗池具备优异的耐高温、高压性能,可清晰实现反应过程的动态可视化观测,为捕捉极端条件下的反应细节提供技术支撑;②创新性地采用岩心夹持器与高温、高压蓝宝石视窗池的一体化集成衔接方案,彻底打破传统分离式结构的局限。与此同时,在蓝宝石视窗池的两端分别装配高精度光纤探头,并构建起光纤探头与光谱分析仪之间的实时数据联动传输系统,实现对反应过程中流体物质组分的

动态捕捉与同步分析,有效填补了传统检测方式在极端条件下动态监测的技术空白。实现了2项功能升级:①流体组分和含量实时在线检测功能实现由无到有,由只能检测溶蚀前、后两个端点到溶蚀过程的连续检测,以及由低温-低压(温度 $<180\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力 $<70\text{ MPa}$)到超高温-超高压(温度 $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力 $>150\text{ MPa}$)检测的升级;②每个岩心夹持器对应一个反应阶段,实现了跨构造期“升温升压”与“退火退压”交替背景每个反应阶段生成流体中物质组分的高温、高压原位检测。

超高温-超高压渗透率实时原位检测模块,核心突破体现在2项关键技术创新:①成功研制可耐受 150 MPa 压力的专用压差传感器,该传感器有效突破传统压差传感器耐压能力小于 70 MPa 的技术瓶颈,为超高温-超高压环境下渗透率参数的实时在线连续检测提供了核心硬件支撑;②创新设计压差传感器与压力传感器协同工作的压差检测模块,针对不同渗透特性场景建立差异化检测机制,当样品呈低渗状态时启用压差传感器保障检测精度,当样品呈高渗状态时切换至压力传感器实现精准测定,从而高效解决了实验过程中样品渗透率值在宽范围内波动时难以高精度测量的行业难题。实现了2项功能升级:①渗透率实时在线检测温-压由低温、低压(温度 $<180\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力 $<70\text{ MPa}$)到超高温、超高压(温度 $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力 $>150\text{ MPa}$)升级;②柱塞样品压差测定方式由单一的压力传感器测定法升级为压差传感器-压力传感器联合测定法,测定范围更宽,由 $(1\sim100)\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 拓宽至 $(0.1\sim10\,000)\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,测定精度大幅提高。

通过整机软件控制系统,实现各功能模块协同工作和时-序控制。

3.2.2 模拟实验创新成果

应用新装置,在深-超深层碳酸盐岩孔隙形成和保持机理研究方面取得诸多创新成果^[14]。

叠合盆地超深层孔喉结构演化研究:传统“高温、高压岩心渗流模拟装置”存在功能局限,既无法实现溶蚀过程的可视化观测,也不具备渗透率实时在线检测能力,仅能获取实验前、后两个端点的孔喉结构类型与渗透率数据;而新研制的“超深层跨构造期高温、高压可视化储层模拟实验装置”,创新性集成溶蚀过程可视化功能与渗透率实时在线检测功能,可动态捕捉溶蚀实验过程中孔喉结构与渗透率的连续变化特征,有助于解决埋藏溶蚀过程中孔喉结构变化规律及主控因素等科学问题。基于该装置开展的模拟实验结果进一步揭示,岩性与初始孔喉结构特征对埋藏溶蚀作用过程

中孔喉结构的演变具有显著的控制作用。

原有的“高温、高压岩心渗流模拟装置”不具备溶蚀过程可视化和渗透率实时原位检测功能,只能在实验前和实验后通过离线方式分析样品的孔隙结构类型和渗透率值。新研制的“超深层跨构造期高温、高压可视化储层模拟实验装置”实现了溶蚀过程可视化和渗透率实时原位检测功能,可以观察溶蚀实验过程中孔喉结构和渗透率的连续变化现象,揭示了埋藏溶蚀过程中次生孔隙形成主控因素和孔隙结构变化规律。多组不同类型碳酸盐岩溶蚀模拟实验的结果表明,岩石类型与初始孔喉构型对溶蚀作用过程中孔喉结构的演化趋势具有关键控制作用。其中,孔隙(洞)型与裂缝-孔隙(洞)型白云岩储层,在埋藏溶蚀作用下呈现出孔隙度与渗透率同步提升的特征,而原始孔喉结构形态保持稳定;与之形成鲜明对比的是,孔隙(洞)型与裂缝型灰岩储层,经埋藏溶蚀作用后渗透率呈现数量级跃升,孔隙度增幅却并不显著,且最终均向缝洞型储层形态转化。这一实验结论清晰阐释了深-超深层油气储层中,裂缝-孔隙(洞)型碳酸盐岩储层多发育于白云岩地层、缝洞型碳酸盐岩储层则主要分布于灰岩地层的地质现象。

在叠合盆地超深层孔隙形成与演化模拟实验研究中,传统“高温、高压岩心渗流模拟装置”存在明显性能局限,实验压力上限不足 70 MPa ,温度调控范围亦低于 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$,仅能复现中浅层地质环境的温-压条件,无法匹配超深层高温、高压的真实地质场景。受此性能限制,该装置所获取的实验数据仅能反映中浅层碳酸盐矿物的溶蚀演化规律,对反应体系流体组分及含量的检测采用离线方式,不仅效率低下,还易因流体转移过程引入误差。与之相比,新研制的“超深层跨构造期高温、高压可视化储层模拟实验装置”实现了全方位技术突破,实验最大压力可提升至 150 MPa 、最高温度可达 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,能够精准复现超深层极端地质条件,且创新性采用反应过程中流体物质组分动态捕捉与同步分析技术,显著提升了检测效率与数据准确性。基于该新装置的模拟实验,进一步获得多项关键认知:在中、浅层环境中,灰岩通过溶蚀作用形成次生溶孔的潜力高于白云岩,而进入超深层后,白云岩的次生溶孔形成潜力反超灰岩;流体类型、浓度及溶蚀时长是控制埋藏溶孔发育丰度的核心因素,其中乙酸的侵蚀性强于 CO_2 饱和溶液(无机酸),且流体浓度与碳酸盐矿物溶解速率呈正相关关系;埋藏次生溶孔的发育主要受控于初始岩石物性、不整合面及断裂系统,表现出显著继承性,多沿先存孔-渗带展布;此外,其发育具有事件式

特征,其“成孔高峰期”对应地层温度为70~100℃。上述认识系统揭示了深-超深层碳酸盐岩埋藏次生孔隙的形成机理与空间分布规律。

3.3 发展趋势

超深层碳酸盐岩是未来10~20年油气勘探的主战场,规模储层的形成机理、保持机制和空间分布规律依然是制约超深层碳酸盐岩油气勘探和开发的瓶颈技术难题,模拟实验依然是揭示超深层碳酸盐岩油气地质规律的重要手段,以下3个方面是储层模拟实验技术的发展趋势。

3.3.1 现有模拟实验装置功能的完善

新研制的“超深层跨构造期高温、高压可视化储层模拟实验装置”虽在实验条件拓展与检测效率提升上实现大幅突破,但仍存在一定技术局限:①该装置暂未实现实验过程中样品孔隙度值的高温、高压原位测定,而是需要将样品从岩心夹持器中取出,采用孔隙度测定仪来测试样品孔隙度值,此过程不仅无法捕捉实验过程中孔隙度的动态变化,还可能因样品取出操作影响数据完整性;②尽管借助蓝宝石视窗池可直观观察柱塞样品的溶蚀进程,但缺乏超高温、超高压下在线工业CT扫描能力,仍需通过工业CT对样品进行离线扫描,难以实现全溶蚀过程中孔喉结构演变的三维动态追踪。针对上述局限性,目前已探索出潜在优化方案——将微型核磁共振仪与“超深层跨构造期高温、高压可视化储层模拟实验装置”进行联用,有望通过二者的功能互补,突破孔隙度实时检测与孔喉结构在线三维观测的技术瓶颈。

3.3.2 超深层成烃-成储-成藏一体化模拟实验装置的研制

超深层碳酸盐岩储层成因和孔隙演化不是孤立的,既受原始沉积的控制,又受构造和复杂流体(包括成烃过程中伴生的有机酸)活动的叠加改造,同时,储层的孔隙演化又控制着超深层油气成藏,因此需要研制一台超深层成烃-成储-成藏一体化模拟实验装置,开展超深层碳酸盐岩成烃-成储-成藏一体化模拟实验,揭示油气地质规律。

3.3.3 超深层成烃、成储、成藏模拟实验

超深层多烃源灶(原油、沥青、源内和源外分散液态烃等)生烃机理和潜力、油气赋存相态、油气流动机理和油气运移驱动力、油气富集条件等都是未解之谜,

这直接关系到超深层资源潜力和勘探有利区评价。目前在缺乏超深层油气地质资料的情况下,成烃、成储、成藏模拟实验是揭示超深层油气地质规律的有效手段。

4 结论

1)从20世纪50—60年代以肉眼和放大镜观察为手段的宏观储层表征到21世纪的数字露头采集、微纳米孔隙三维成像和多尺度储层非均质性表征及建模,无不凝聚着理论和实验技术进步的推动作用,尤其是碳酸盐岩岩石学、沉积学和层序地层理论的发展及先进实验设备的应用,并在勘探开发中发挥愈来愈重要的作用。

2)“定年、定温、定压和流体属性示踪”技术代表了21世纪以来最为先进的储层地球化学测试技术,由全岩向原位微区、由溶液法向激光法及由点检测向面成像测试技术迭代升级代表着未来的发展趋势,数字化转型和智能化发展为测试技术的迭代升级提供了驱动力,这些将为成岩组构的成因及成岩-孔隙演化研究提供更为丰富可靠的信息。

3)“超深层跨构造期高温、高压可视化成烃-成储-成藏一体化模拟实验装置”的自主研制为模拟实验提供了关键设备,可精准复现超高温、超高压地质环境,实现跨构造期水-岩反应过程的动态正演模拟,并集成流体特性与岩石渗透率的原位实时检测功能,是21世纪以来储层实验技术领域非常重要的研究成果。通过模拟实验揭示超深层碳酸盐岩油气成藏机理代表着未来的发展趋势。

4)储层预测是储层表征和评价、储层成因和建模研究的最终目的。地球物理技术是实现储层识别与预测的手段,建议加强碳酸盐岩储层实验技术与地球物理技术的有机结合。基于露头和岩心储层特征表征约束的测井岩相及储层识别和评价是储层预测的基础,包括储层岩性、孔-渗、孔喉结构和流体识别。基于储层发育主控因素、(露头)储层地质模型和井约束的地震储层预测,可以大幅提高地震储层预测的精度。

参 考 文 献

- [1] GINSSBURG R N. Environmental relationships of grain size and constituent particles in some South Florida carbonate sediments [J]. AAPG Bulletin, 1956, 40(10): 2384-2427.
- [2] GINSBURG R N, LOWENSTAM H A. The influence of marine bottom communities on the depositional environment of sediments

- [J]. *The Journal of Geology*, 1958, 66(3): 310–318.
- [3] BATHURST R G C. The cavernous structure of some Mississippian Stromatactis reefs in Lancashire, England[J]. *The Journal of Geology*, 1959, 67(5): 506–521.
- [4] FOLK R L. Practical petrographic classification of limestones[J]. *AAPG Bulletin*, 1959, 43(1): 1–38.
- [5] DUNHAM R J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture [M]//HAM W E. *Classification of Carbonate Rocks—A Symposium*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1962: 108–121.
- [6] BATHURST R G C. Carbonate sediments and their diagenesis [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co., 1975: 39–49.
- [7] CHOQUETTE P W, PRAY L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. *AAPG Bulletin*, 1970, 54(2): 207–250.
- [8] AMIEUX P. La cathodoluminescence: méthode d'étude sédimentologique des carbonates [Z]. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 1982, 6: 437–483.
- [9] ARTHUR M A, ANDERSON T F, KAPLAN I R, et al. Stable isotopes in sedimentary geology [M]. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1983: 435.
- [10] BARKER C E, HALLEY R B. Fluid inclusion, stable isotope, and vitrinite reflectance: Evidence for the thermal history of the bone spring limestone, southern Guadalupe mountains, Texas [M]//GAUTIER D L. *Roles of Organic Matter in Sediment Diagenesis*. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1985: 189–203.
- [11] SARG J F. Carbonate sequence stratigraphy [M]//WILGUS C K, HASTINGS B S, POSAMENTIER H, et al. *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1988: 155–182.
- [12] SCHLAGER W. Sedimentology and sequence stratigraphy of reefs and carbonate platforms: A short course [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1992: 71.
- [13] TUCKER M E. Carbonate diagenesis and sequence stratigraphy [M]//WRIGHT V P. *Sedimentology Review/1*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993: 51–72.
- [14] TINKER S W. Building the 3-D jigsaw puzzle: Applications of sequence stratigraphy to 3-D reservoir characterization, Permian Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 80(4): 460–484.
- [15] LUCIA F J. Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(9): 1275–1300.
- [16] MOORE C H. Carbonate reservoirs: Porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [17] 赵文智, 沈安江, 胡安平, 等. 塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探[J]. *岩石学报*, 2015, 31(11): 3495–3508.
- ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Anping, et al. A discussion on the geological background of marine carbonate reservoirs development in Tarim, Sichuan and Ordos Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(11): 3495–3508.
- [18] 沈安江, 胡安平, 程婷, 等. 激光原位U-Pb同位素定年技术及其在碳酸盐岩成岩-孔隙演化中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6): 1062–1074.
- SHEN Anjiang, HU Anping, CHENG Ting, et al. Laser ablation in situ U-Pb dating and its application to diagenesis-porosity evolution of carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1062–1074.
- [19] 乔占峰, 沈安江, 郑剑锋, 等. 基于数字露头模型的碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 328–337.
- QIAO Zhanfeng, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, et al. Three-dimensional carbonate reservoir geomodeling based on the digital outcrop model [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 328–337.
- [20] 郑剑锋, 沈安江, 乔占峰. 基于数字露头的三维地质建模技术——以塔里木盆地一间房剖面一间房组礁滩复合体为例[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(5): 108–115.
- ZHENG Jianfeng, SHEN Anjiang, QIAO Zhanfeng. 3D geologic modeling technology based on digital outcrop: A case study of reef-shoal body of Yijianfang Formation in Yijianfang outcrop, Tarim Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(5): 108–115.
- [21] 尹观, 倪师军. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- YIN Guan, NI Shijun. *Isotope geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [22] 刘一锋, 邱楠生, 谢增业, 等. 川中古隆起寒武系超压形成与保存[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(8): 1439–1446.
- LIU Yifeng, QIU Nansheng, XIE Zengye, et al. The formation and preservation of overpressure in old formations: Taking the Cambrian in the central of Sichuan Basin as an instance [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(8): 1439–1446.
- [23] 袁静, 周涛, 赵广昊. 深部热流体活动的识别标志及其对储层的改造作用[J]. *地质学报*, 2023, 97(6): 2067–2083.
- YUAN Jing, ZHOU Tao, ZHAO Guanghao. Identification marks of deep thermal fluid activity and its effect on reservoir transformation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(6): 2067–2083.
- [24] 任战利, 崔军平, 祁凯, 等. 叠合盆地深层、超深层热演化史恢复理论及方法研究新进展[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(6): 910–929.
- REN Zhanli, CUI Junping, QI Kai, et al. New progress in research on theories and methods for reconstruction of deep and ultra-deep thermal evolution history in superimposed basins [J].

- Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(6): 910-929.
- [25] 刘恩涛, ZHAO Jianxin, 潘松圻, 等. 盆地流体年代学研究新技术: 方解石激光原位 U-Pb 定年法[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 698-712.
- LIU Entao, ZHAO Jianxin, PAN Songqi, et al. A new technology of basin fluid geochronology: In-situ U-Pb dating of calcite [J]. Earth Science, 2019, 44(3): 698-712.
- [26] 向鹏飞, 季汉成, 汪新伟, 等. 冀中坳陷奥陶系深层白云岩储集层成因机制[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(6): 659-670.
- XIANG Pengfei, JI Hancheng, WANG Xinwei, et al. Genetic Mechanisms of Deep Ordovician Dolomite Reservoirs in Jizhong Depression [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(6): 659-670.
- [27] 李茜, 胡安平, 沈安江, 等. 白云岩的成因、储集空间及实验技术研究新进展[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1456-1482.
- LI Qian, HU Anping, SHEN Anjiang, et al. Recent advances in the study of the origin and reservoir space of dolomites and emerging experimental techniques [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1456-1482.
- [28] 沈安江, 胡安平, 梁峰, 等. 碳酸盐岩储层模拟与地球化学实验技术进展及应用[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 16-29.
- SHEN Anjiang, HU Anping, LIANG Feng, et al. Progress and application of carbonate reservoir simulation and geochemical experiment technology [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(4): 16-29.
- [29] 胡安平, 余敏, 沈安江, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层可视化模拟实验与孔隙演化机理[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(2): 334-346.
- HU Anping, SHE Min, SHEN Anjiang, et al. Visualization simulation experiments and porosity evolution mechanisms of deep to ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(2): 334-346.
- [30] 周进高, 徐哲航, 黄世伟, 等. 碳酸盐岩沉积储层研究前沿与未来发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 929-953.
- ZHOU Jingao, XU Zhehang, HUANG Shiwei, et al. Frontiers and trends in the research on carbonate sedimentology and reservoir geology [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 929-953.
- [31] 田瀚, 杨敏. 碳酸盐岩缝洞型储层测井评价方法[J]. 物探与化探, 2015, 39(3): 545-552.
- TIAN Han, YANG Min. The logging evaluation methods for fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 545-552.
- [32] 陈琰, 张永庶, 徐兆辉, 等. 柴达木盆地干柴沟地区勘探突破及启示[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1018-1031.
- CHEN Yan, ZHANG Yongshu, XU Zhaohui, et al. Breakthroughs in hydrocarbon exploration in the Ganchaigou area, Qaidam Basin and their implications [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1018-1031.
- [33] 常少英, 李昌, 陈娅娜, 等. 海相碳酸盐岩储层地震预测技术进展及应用实效[J]. 海相油气地质, 2020, 25(1): 22-34.
- CHANG Shaoying, LI Chang, CHEN Yana, et al. Progress and application of seismic prediction technology for marine carbonate reservoir [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(1): 22-34.
- [34] 张芮菡, 胡博, 彭先, 等. 碳酸盐岩储气库多孔介质中多组分体系扩散规律研究[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(4): 564-570.
- ZHANG Ruihan, HU Bo, PENG Xian, et al. Study on diffusion patterns of multi-component systems in porous media of carbonate gas storage [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(4): 564-570.
- [35] 沈安江, 胡安平, 谭秀成, 等. 白云岩与白云岩储层成因: 回顾、进展与展望[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 740-758.
- SHEN Anjiang, HU Anping, TAN Xiucheng, et al. Geneses of dolomites and dolomite reservoirs: Review, advances, and prospects [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 740-758.
- [36] DICKSON J A D. Carbonate identification and genesis as revealed by staining [J]. Journal of Sedimentary Research, 1966, 36(2): 491-505.
- [37] SWANSON R G. Sample examination manual [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1981: 80.
- [38] 崔传智, 伊吉庆, 宗然, 等. 基于核磁共振技术储层物性变化规律[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(14): 5790-5796.
- CUI Chuazhi, YI Jiqing, ZONG Ran, et al. Change law of reservoir physical properties based on nuclear magnetic resonance technology [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(14): 5790-5796.
- [39] 龚建涛, 魏繁荣, 闫旭光, 等. 基于 X-CT 扫描的石油地质岩心储层渗透率估算[J]. 天然气与石油, 2023, 41(4): 67-73.
- GONG Jiantao, WEI Fanrong, YAN Xuguang, et al. Permeability estimation of petroleum geological core reservoir based on X-CT scanning [J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41(4): 67-73.
- [40] 赵佳, 郑森, 王莉芳. 基于铸体薄片与高压压汞测试储层孔隙分布特点剖析[J]. 云南化工, 2020, 47(4): 107-108.
- ZHAO Jia, ZHENG Sen, WANG Lifang. Analysis of reservoir pore distribution based on casting slice and high pressure mercury injection test [J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(4): 107-108.
- [41] 计秉玉, 张文彪, 何应付, 等. 油藏地质建模与数值模拟一体化内涵及发展趋势[J]. 石油学报, 2024, 45(7): 1152-1162.
- JI Bingyu, ZHANG Wenbiao, HE Yingfu, et al. Connotation and development trends of integration between geological reservoir modeling and numerical reservoir simulation [J]. Acta Petrolei

- Sinica, 2024, 45(7): 1152–1162.
- [42] 王牧原, 李勇, 吴克柳, 等. 孔隙型碳酸盐岩油藏储层微观孔隙结构定量表征及驱油效果评价[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(2): 96–107.
- WANG Muyuan, LI Yong, WU Keliu, et al. Quantitative characterization of microscopic pore structure and oil re-recovery evaluation in porous carbonate reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(2): 96–107.
- [43] BELLIAN J A, KERANS C, JENNETTE D C. Digital outcrop models: Applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling [J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75(2): 166–176.
- [44] JANSON X, KERANS C, BELLIAN J A, et al. Three-dimensional geological and synthetic seismic model of Early Permian redeposited basinal carbonate deposits, Victorio Canyon, west Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(10): 1405–1436.
- [45] 乔占峰, 郑剑锋, 张杰, 等. 海相碳酸盐岩储层建模和表征技术进展及应用[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 15–26.
- QIAO Zhanfeng, ZHENG Jianfeng, ZHANG Jie, et al. The latest progress on reservoir characterization for marine carbonate and its significance [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(4): 15–26.
- [46] ALI S A, WEISS M P. Fluorescent dye penetrant technique for displaying obscure structures in limestone [J]. Journal of Sedimentary Research, 1968, 38(2): 681–682.
- [47] BANNER J L. Application of the trace element and isotope geochemistry of strontium to studies of carbonate diagenesis [J]. Sedimentology, 1995, 42(5): 805–824.
- [48] BANNER J L, HANSON G N. Calculation of simultaneous isotopic and trace element variations during water-rock interaction with applications to carbonate diagenesis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(11): 3123–3137.
- [49] BURKE W H, DENISON R E, HETHERINGTON E A, et al. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time [J]. Geology, 1982, 10(10): 516–519.
- [50] JONES L M, TAYLOR A R, WINTER D L, et al. The use of the laser microprobe for sample preparation in stable isotope mass spectrometry [J]. Terra Cognita, 1986, 6: 263.
- [51] 强子同, 马德岩, 顾大镛, 等. 激光显微取样稳定同位素分析 [J]. 天然气工业, 1996, 16(6): 86–89.
- QIANG Zitong, MA Deyan, GU Dayong, et al. Stable isotope analysis of laser microscopy sampling [J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(6): 86–89.
- [52] EILER J M. “Clumped-isotope” geochemistry—The study of naturally-occurring, multiply-substituted isotopologues [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 262(3/4): 309–327.
- [53] CAME R E, EILER J M, VEIZER J, et al. Coupling of surface temperatures and atmospheric CO_2 concentrations during the Palaeozoic era [J]. Nature, 2007, 449(7159): 198–201.
- [54] LAWRENCE M G, GREIG A, COLLERSON K D, et al. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways [J]. Aquatic Geochemistry, 2006, 12(1): 39–72.
- [55] PARSAPOOR A, KHALILI M, MACKIZADEH M A. The behaviour of trace and rare earth elements (REE) during hydrothermal alteration in the Rangan area (Central Iran) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(2): 123–134.
- [56] 胡安平, 梁峰, 罗宪婴, 等. 碳酸盐矿物微量稀土元素测试新技术开发及应用[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 365–376.
- HU Anping, LIANG Feng, LUO Xianying, et al. Development and applications of new techniques for tests of trace elements and rare earth elements in carbonate minerals [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 365–376.
- [57] 胡安平, 沈安江, 陈亚娜, 等. 基于U-Pb同位素年龄和团簇同位素(Δ_{47})温度约束的四川盆地震旦系灯影组构造—埋藏史重建[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 896–905, 914.
- HU Anping, SHEN Anjiang, CHEN Yana, et al. Reconstruction of tectonic-burial evolution history of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin based on the constraints of in-situ laser ablation U-Pb date and clumped isotopic thermometer (Δ_{47}) [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 896–905, 914.
- [58] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 476–487.
- SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. The dating and temperature measurement technologies for carbonate minerals and their application in hydrocarbon accumulation research in the paleo-uplift in central Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 476–487.
- [59] POKROVSKY O S, GOLUBEV S V, SCHOTT J. Dissolution kinetics of calcite, dolomite and magnesite at 25 °C and 0 to 50 atm pCO_2 [J]. Chemical Geology, 2005, 217(3/4): 239–255.
- [60] TAYLOR K C, NASR-EL-DIN H A, MEHTA S. Anomalous acid reaction rates in carbonate reservoir rocks [J]. SPE Journal, 2006, 11(4): 488–496.
- [61] 杨俊超, 程远方, 韩忠英, 等. 考虑温度效应的裂缝型碳酸盐岩酸化数值模拟[J]. 特种油气藏, 2025, 32(4): 149–157.
- YANG Junchao, CHENG Yuanfang, HAN Zhongying, et al. Numerical simulation of acidizing in fractured carbonate rocks considering temperature effects [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2025, 32(4): 149–157.
- [62] 刘虹瑜, 任登峰, 秦世勇, 等. 塔里木盆地富满油田超深缝洞型碳酸盐岩储层立体酸压技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2025, 44(3): 77–84.
- LIU Jiangyu, REN Dengfeng, QIN Shiyong, et al. 3D acid fracturing technique for ultra-deep fractured-vuggy carbonate reservoirs in Fuman Oilfield of Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2025, 44(3):

- 77-84.
- [63] 吴兆徽, 刘显太, 杜玉山, 等. 碳酸盐岩微观测试技术对比与应用: 以济阳坳陷乐安油田潜山为例. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(5): 1519-1529.
- WU Zhaohui, LIU Xiantai, DU Yushan, et al. Comparison and Application of Carbonate Rock Microscopic Test Technologies: A Case of Buried Hill in Le'an Oilfield at Jiyang Depression. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1519-1529.
- [64] 范明, 胡凯, 蒋小琼, 等. 酸性流体对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 地球化学, 2009, 38(1): 20-26.
- FAN Ming, HU Kai, JIANG Xiaoqiong, et al. Effect of acid fluid on carbonate reservoir reconstruction[J]. Geochimica, 2009, 38(1): 20-26.
- [65] CHOU I M, SONG Y C, BURRUSS R C. A new method for synthesizing fluid inclusions in fused silica capillaries containing organic and inorganic material[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(21): 5217-5231.
- [66] POKROVSKY O S, GOLUBEV S V, SCHOTT J, et al. Calcite, dolomite and magnesite dissolution kinetics in aqueous solutions at acid to circumneutral pH, 25 to 150 °C and 1 to 55 atm pCO₂: New constraints on CO₂ sequestration in sedimentary basins[J]. Chemical Geology, 2009, 265(1/2): 20-32.
- [67] 王炜, 黄康俊, 鲍征宇, 等. 不同类型鲕粒灰岩储集层溶解动力学特征[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 495-502.
- WANG Wei, HUANG Kangjun, BAO Zhengyu, et al. Dissolution kinetics of different types of oolitic limestones in northeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4): 495-502.
- [68] 范明, 蒋小琼, 刘伟新, 等. 不同温度条件下 CO₂ 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀作用[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 825-830.
- FAN Ming, JIANG Xiaoqiong, LIU Weixin, et al. Dissolution of carbonate rocks in CO₂ solution under the different temperatures [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 825-830.
- [69] 蒋小琼, 王恕一, 范明, 等. 埋藏成岩环境碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 643-646.
- JIANG Xiaoqiong, WANG Shuyi, FAN Ming, et al. Study of simulation experiment for carbonate rocks dissolution in burial diagenetic environment [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 643-646.
- [70] 杨云坤, 刘波, 秦善, 等. 基于模拟实验的原位观察对碳酸盐岩深部溶蚀的再认识[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(2): 316-322.
- YANG Yunkun, LIU Bo, QIN Shan, et al. Re-recognition of deep carbonate dissolution based on the observation of in-situ simulation experiment [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(2): 316-322.
- [71] 余敏, 寿建峰, 沈安江, 等. 碳酸盐岩溶蚀规律与孔隙演化实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 564-572.
- SHE Min, SHOU Jianfeng, SHEN Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution law and porosity evolution of carbonate rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 564-572.
- [72] 余敏, 蒋义敏, 胡安平, 等. 碳酸盐岩溶蚀模拟实验技术进展及应用[J]. 海相油气地质, 2020, 25(1): 12-21.
- SHE Min, JIANG Yimin, HU Anping, et al. The progress and application of dissolution simulation of carbonate rock[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(1): 12-21.

(编辑 董奕含)