

doi:10.11911/syztjs.2023034

引用格式: 肖立志, 罗嗣慧, 龙志豪. 井场核磁共振技术及其应用的发展历程与展望 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 140-148.

XIAO Lizhi, LUO Sihui, LONG Zhihao. The course of development and the future of wellsite NMR technologies and their applications [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 140-148.

井场核磁共振技术及其应用的发展历程与展望

肖立志, 罗嗣慧, 龙志豪

(中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京 102249)

摘 要: 井场核磁共振技术在近 20 年得到快速发展, 在石油钻探和开采中发挥了重要作用。井场核磁共振是指在油气钻探现场复杂恶劣环境下所开展的核磁共振测量、分析及应用, 涉及基础理论、测量仪器、数据采集与处理、解释应用等多个方面。我国科技工作者经过数十年持续攻关, 走过“引进—吸收—集成创新—原始创新”的发展之路, 形成了适合陆相油气的核磁共振测量分析技术, 并进行了工业应用, 在若干新颖及前瞻领域形成了丰富的储备技术。在系统总结国外及我国井场核磁共振理论、方法及仪器技术的发展历程和关键突破的基础上, 展望了井场核磁共振技术在复杂油气、页岩油气等勘探开发中的应用前景和挑战, 以进一步推动我国页岩油气及深层复杂油气的勘探开发水平和进程。

关键词: 核磁共振; 仪器装置; 地层评价; 岩心分析; 多相流计量

中图分类号: P631.8⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)04-0140-09

The Course of Development and the Future of Wellsite NMR Technologies and Their Applications

XIAO Lizhi, LUO Sihui, LONG Zhihao

(College of Geophysics, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China)

Abstract: Wellsite nuclear magnetic resonance (NMR) technologies have developed rapidly in the past 20 years and have played an important role in oil and gas drilling and exploitation. They refer to the NMR measurement, analysis, and application carried out in complex and harsh environments of oil and gas drilling sites, which involve multiple aspects such as basic theory, measurement instruments, data acquisition and processing, and interpretation and application. In the past decades, Chinese scientists and researchers have made continuous efforts to tackle the challenges, going through the development course of “introduction, absorption, integrated innovation, and initial innovation.” As a result, the NMR measurement and analysis technologies suitable for continental oil and gas are developed and industrial applications are achieved, and rich technical reserves are formed in several novel and forward-looking fields. This paper systematically summarized the development course of wellsite NMR theory, methods, instruments, and technologies in and outside China as well as the key breakthroughs in these aspects. On this basis, it gave the application prospects and challenges of wellsite NMR technologies in the exploration and development of complex oil and gas and shale oil and gas. The research is expected to promote the exploration and development level and progress of shale oil and gas and deep complex oil and gas in China.

Key words: nuclear magnetic resonance; instrumentation; formation evaluation; core analysis; multi-phase flow metering

井场核磁共振在近 20 年来得到快速发展, 包括
电缆核磁共振测井、随钻核磁共振测井、核磁共振

井下流体分析等仪器和应用技术, 以及多相流核磁
共振计量分析、井场全直径核磁共振扫描分析和核

收稿日期: 2023-01-31; 改回日期: 2023-02-28。

作者简介: 肖立志 (1962—), 男, 湖南新邵人, 1982 年毕业于江汉石油学院矿场地球物理专业, 1995 年获中国科学院武汉物理研究所无线电物理专业博士学位, 教授, 主要从事地球物理测井、低场核磁共振及油气人工智能等方面的研究和教学工作。系本刊编委。E-mail: xiaolizhi@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目“复杂油气藏核磁共振测井新理论与新方法研究”(编号: 41130417)和“极端环境核磁共振科学仪器研制”(编号: 21427812)联合资助。

磁共振录井等装置和应用场景。核磁共振对多孔岩石中的流体及其赋存状态敏感,可以提供油气含量及其赋存状态等信息。由于其提供的油气储层信息丰富而独特,在石油钻探和开采中发挥了重要作用;随着其应用规模逐步扩大,遇到的挑战和难题也不断增加。国内研究井场核磁共振技术的专家学者很多,并做出了重要贡献,本文着重介绍中国石油大学(北京)油气核磁共振实验室在井场核磁共振技术及其应用方面取得的进展。笔者梳理了国内外井场核磁共振理论、方法、仪器及应用技术的发展历程与技术挑战,展望了其在复杂油气、页岩油气等勘探开发中的应用前景,以期为我国井场核磁共振技术的健康发展提供参考。

1 国外井场核磁共振技术的发展历程

核磁共振技术用于石油天然气及浅层地表水资源的勘探与开发已经有近 70 年的历史。1946 年, F. Bloch 和 E. M. Purcell 等人^[1-2]通过实验观测到核磁共振现象。1954 年, M. Packard 等人^[3]观测到地磁场中核自旋的自由进动,提出利用地磁场找油的设想。1956 年, R. J. S. Brown 等人^[4]对砂岩进行核磁共振,发现砂岩中流体的核磁共振弛豫时间明显快于自由流体。1960 年, R. J. S. Brown 等人^[5]设计了地磁场核磁共振测井仪,进行了现场试验。1966 年, D. P. SeEVERS 等人^[6]观测到岩石核磁共振弛豫速率与渗透率相关, R. R. Ernst 等人^[7]提出了脉冲傅里叶变换核磁共振波谱学。1968 年, A. Timur^[8]提出了核磁共振自由流体指数和测量渗透率、含水饱和度及束缚水饱和度的方法。1973 年, P. C. Lauterbur^[9]在梯度磁场中实现了核磁共振成像。1976 年, W. P. Aue 等人^[10]实现了二维核磁共振技术; K. Wüthrich^[11]将二维核磁共振用于生物高分子研究,并不断拓展和完善。1978 年, Schlumberger 公司开始提供地磁场核磁测井服务。1979 年, K. R. Brownstein 等人^[12]提出了孔隙介质核磁共振弛豫理论和模型,为核磁共振测井应用奠定了基础。1980 年, J. A. Jackson 等人^[13]提出了 inside-out 概念,并申请了基于均匀磁场的脉冲回波核磁共振测井仪的专利。1988 年, Z. Taicher 等人^[14]设计了脉冲回波核磁共振成像测井仪(magnetic resonance imaging logging, MRIL); 1990 年, MRIL-B 投入商业应用。1992 年, R. L. Kleinberg 等人^[15]设计了贴井壁脉冲回波核磁共振测井仪(CMR)。1994 年,国际岩石物理学家和测井

分析家协会(SPWLA)举办了首届核磁共振在地层评价中的应用专题研讨会。1994 年, NUMAR 公司研制出具有多频观测能力的 MRIL-C 型测井仪和配套的实验室核磁共振岩心分析仪,并提出识别油气及定量评价油气水饱和度的时域分析方法(TDA)^[16];随后,又开发出能够测量包括泥质束缚水在内总孔隙度的核磁共振测井仪 MRIL-C/TP^[17]; 1998 年,已并入 Halliburton 公司的 NUMAR 公司将核磁共振测井仪升级为具有 9 个观测频率的 MRIL-P 型测井仪^[18]。同时期, G. R. Coates 等人^[19]出版了《NMR Logging Principles and Applications》。至此,以自旋回波为测量对象、以弛豫时间谱为基础的核磁共振测井成为成熟测井技术,并得到规模应用。

进入 21 世纪,核磁共振在世界范围油气资源勘探开发及实验室岩心分析测试表征中的应用需求逐步旺盛,带动其快速迭代升级。首先,二维核磁共振测井数据采集及处理方法得到发展^[20-21];其次, Halliburton、Baker Hughes、Schlumberger 等公司相继研制了随钻核磁共振测井仪,以满足大斜度井和水平井测井需求^[22-24];再次, Halliburton 公司在模块式地层测试器中集成了核磁共振流体分析装置,并得到推广应用^[25]。2006 年, SPWLA 在桂林召开了第二次核磁共振在地层评价中的应用专题研讨会,系统研讨了技术研究与应用进展。2011 年,国际磁共振显微成像国际会议(ICMRM)在北京召开,核磁共振在岩心分析及测井地层评价中的应用成为重要讨论主题。2022 年,国际孔隙介质磁共振大会(MRPM)在杭州召开,比较全面地反映并展望了核磁共振技术在油气勘探中的应用创新。随着信息量逐步增加,核磁共振在复杂岩性油气藏、特殊岩性油气藏、低电阻率油气藏及页岩油气等疑难储层的流体识别和定量评价中发挥了重要作用。油气勘探开发领域核磁共振技术的发展,显示出利用其评价地层和分析岩心的物理本质属性及其与基础科学进步的有效互动关系。同时,也可以看到产学研合作和尊重知识产权对新技术持续发展的重要性与必要性。

2 我国井场核磁共振技术的发展历程

我国井场核磁共振技术萌芽于 20 世纪 80 年代初。1982 年,梅忠武翻译了俄文专著《核磁测井》,介绍苏联地磁场核磁测井的方法原理及应用分析^[26]。同年,肖立志等人^[27]发表了《核磁共振方法确定岩样孔隙度》一文,成为我国该领域率先公开

发表的研究结果。

1991年,中国石油天然气总公司(CNPC)首次立项进行岩石核磁共振性质的系统研究。1993年,CNPC设立的中青年创新基金首次支持了“核磁共振测井新技术研究”和“利用核磁共振成像研究驱油机理”2个项目。1995年,肖立志利用弛豫、波谱及显微成像等手段,系统研究了岩石多孔介质的核磁共振性质及其与岩石物理表征参数的相关性,研究成果在《核磁共振成像与岩石核磁共振及其应用》^[28]中得到集中反映。1996年,中油测井公司(CNLC)和华北测井公司引进了2套NUMAR公司的核磁共振测井仪MRIL-C,现场应用获得了优质测井资料;同年,江汉石油学院在国内较早引进了NUMAR公司的实验室核磁共振岩心分析仪。1997—1998年,肖立志等人^[29-30]提出了利用核磁共振分析岩心的理论基础、标准化流程及注意事项,明确了相关行业标准的制定原则,至今仍然发挥着作用。2002年,北京环鼎科技公司引进Halliburton公司核磁共振测井仪组件和生产线,并以外包方式为Halliburton公司生产其最新的核磁共振测井仪。

随着国际上油气勘探开发领域核磁共振应用技术不断完善和成熟,我国引进的核磁共振测井仪器越来越多,加之外国公司在我国提供核磁共振测井服务,促使我国开启了“引进—吸收—集成创新—原始创新”的核磁共振探测技术发展之路。国内技术人员充分利用多孔介质核磁共振基础理论和方法,研究了页岩气核磁共振响应特征^[31]、裂缝性地层核磁共振测井响应特征^[32-33]、核磁共振测井界面响应特征^[34]、天然气水合物核磁共振响应特征^[35]等,发展了含油气储层的球管模型解释弛豫模型^[36]、陆相地层核磁共振估算孔隙度模型^[37]、核磁共振润湿性评价模型^[38-41]、核磁共振估算渗透率模型^[42-43]、核磁共振弛豫时间谱重构毛管压力曲线模型^[44-45]及页岩有机质核磁共振表征模型^[46],提出了多孔介质核磁共振正演模拟方法^[47-51]、多指数反演方法及影响因素定量评价方法^[52-54]、二维核磁共振理论与方法^[55-58]、三维核磁共振理论与数据处理方法^[59-60]、核磁共振减小振铃及深度维反演方法^[61],以及利用机器学习对低场核磁共振进行降噪和多指数弛豫反演方法^[62-63]等,经过“资料应用适应性研究”“区域解释模型研究”“处理解释方法及软件研究”和“仪器装置及配套装备研制”等专题攻关,形成了适用于我国陆相复杂油气藏的核磁共振测量分析及若干新颖和前瞻的技术储备,建立了我国井场

核磁共振技术的理论框架和方法原理基础^[64]。

2005年,中国石油天然气集团公司启动核磁共振测井仪研制项目,逐步形成多频核磁共振测井仪MRT6910。2008年,中国海洋石油总公司启动核磁共振测井仪研制项目,研制了偏心型核磁共振测井仪MRT,其性能不断提升,目前其耐温超过200℃。

2010年,国家科技部立项资助核磁共振井下流体分析仪的研制,俄罗斯专家Anferov夫妇参与仪器样机的设计开发及原理验证^[65]。核磁共振测井仪基于J. A. Jackson等人^[13]提出的inside-out原理,探测效率低、信号强度低、信噪比低,但技术难度大。核磁共振井下流体分析仪基于常规的outside-in原理,探测效率高、信号强度高、信噪比高。

2012年,中国石油大学(北京)博士研究生胡海涛等人^[66-71]分别完成了电缆核磁共振测井仪探头、电子系统、软件系统、降噪理论与方法、核磁共振井下流体分析系统、随钻核磁共振测井仪设计制作及原理验证的研究。随后,中国海油、中国科学院地质地球物理所、中国石油和国仪量子等相继开展了随钻核磁共振测井仪的研制和应用。至此,我国井孔核磁共振技术研究已经形成基本范式。井孔核磁共振仪器装置针对井筒复杂恶劣环境及运动测量的独特要求,开展了测量、分析及应用研究,研究内容包括测量理论、井下与地面仪器装置、脉冲序列与数据采集及处理、解释模型与应用等多个方面。

油气钻探作业过程中,随钻井液返排出来的碎屑赋存极其重要的地质信息^[72-74]。为了充分认识非常规勘探对象的复杂性,需要在重点勘探井孔或层段开展取心作业,以获取更多的微观地质数据,用以补充认知不足。其手段则是在勘探作业完毕、进入油气田开发阶段,对油气等经济流体的产量和开采速度进行全过程监控。因此,井孔核磁共振测量技术取得突破性进展后,构建安全、快速、精细的核磁共振测量技术和装置,服务于油气井场钻井—勘探—开发的流程受到关注。

油气井产出液多相计量与化验是油田不可或缺的日常工作,是油藏评价、动态分析、生产优化的基础。我国拥有近50万口油气井、2万余座计量间及化验站、20多万名油气计量与化验从业人员,构建基于先进核磁共振技术的高效精准的多相流在线计量是油田精益化管理、数字化转型、提质增效的重大命题。

以科技部项目阶段性成果为基础,李三国等人^[75]开展了井场核磁共振录井仪方面的研究;刘化冰及其团队^[76]深入开展了井场核磁共振全直径岩心扫

描分析仪和应用技术研究, 并实现规模应用; 邓峰及其团队^[77]深入开展了井场核磁共振多相流量计分析仪和应用技术研究, 同样实现了规模应用。研究过程中井孔核磁共振的共性难题是运动状态下如何实现核磁共振的快速测量和高精度分析处理, 前期井孔核磁共振技术研究积累的理论及实践, 为井场核磁共振全直径岩心扫描分析仪的研制和应用、井场核磁共振多相流量计分析仪的研制和应用奠定了良好基础(见图 1)。

刘化冰团队经过研究, 解决了大口径、高灵敏度核磁共振探头技术难题^[78-79], 开发了适用于复杂工作环境的核磁共振谱仪, 形成了适用于非常规储层物性表征的核磁共振现场测量方法^[80-83], 构架了井场岩心核磁共振数据工业化标准解释流程, 并于 2020 年研制出了高性能井场核磁共振全直径岩心扫描分析仪(field scanner using magnetic resonance, FSMAR)并给出了处理解释方法(见图 2)。该项技术解决了室内岩心取柱塞样难、实验周期长和数据



图 1 移动式核磁共振岩心扫描仪和多相流核磁共振在线计量分析仪

Fig.1 Mobile NMR rock core scanner and online NMR metering analyzer for multi-phase flow

不连续等问题, 为非常规油气储层的精细解释评价提供了另一种有效的解决手段。该设备除了在非常规油气勘探方面可以对现场采集岩心实现实时扫描测量外, 对于地质调查过程中的实物地质资料数字化服务同样具有重要作用。

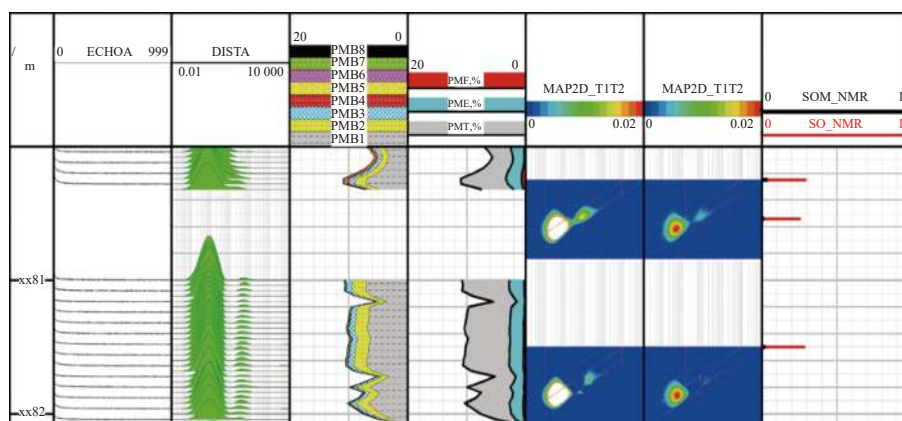


图 2 井场核磁共振全直径岩心扫描处理与解释成果

Fig.2 Scanning and interpretation results of full-diameter cores by wellsite NMR technologies

与国外仪器相比, FSMAR 具有精度、分辨率和信噪比高的特征, 有利于致密性、强非均质性储层的精细评价。该仪器回波间隔短, 利于提供致密储层微孔信号; 最小纵向分辨率 2 cm, 利于刻画储层垂向变化; 信噪比高, 利于 T_2 谱信号更好地反映孔隙结构变化。目前, FSMAR 已实现量产, 在中国石化、中国石油和中国海油等开展了规模应用, 针对致密砂岩、碳质泥岩、泥灰岩和油页岩等复杂油气储层, 完成了 16 个区块数千米全直径岩心的现场扫描分析。实践表明, FSMAR 可快速部署、高效运行, 具备全天候测试分析能力, 为井场岩心精细测试分析和实时地质决策提供了快速、连续、无损和微观技术手段, 见到明显成效。

邓峰团队经过不懈努力和不断突破, 于 2020 年研制了完整的高性能井场核磁共振多相流在线计量分析仪(magnetic resonance multiphase flowmeter, MRMF), 并给出了系统的处理解释方法^[84-91], 其与国外仪器的对比情况如表 1 所示。MRMF 在中国石油吉林、华北、长庆、大庆等油田进行了规模应用, 应用场景为计量间、常规单井、间抽井、试油试气等; 在湿气、高含水率、高黏度、高矿化度、大量程变化和高温高压等不同工况井场累计应用超过 2 000 井次。应用结果表明, 计量间场景中, 计量结果与计量车及化验间对比, 日产液量吻合度达 96%, 日产气量吻合度 92%, 且数据丰度及瞬时精度

提升显著, 计量时间从 1 d 缩短至 2 s; 在高压试气场景(井口压力大于 30 MPa), 日产液量吻合度达 95%, 日产气量吻合度达 91%, 验证了仪器的抗腐蚀、抗冲蚀、高承压和抗大温差能力; 页岩油计量场景中, 率先开展乳化油气计量作业, 核磁共振技术

对乳化油含油率实时检测展现出独特的优势, 且计量与化验的实时性提升显著, 日产液量吻合度达 95%, 日产气量吻合度达 91%。实践表明, MRMF 的测量精度和分析能力为井场多相流在线实时计量及采油工程决策提供了新的技术支持。

表 1 MRMF 与国际井场流量计量仪技术对标情况
Table 1 Comparison of MRMF and international wellsite flow meters

生产商	仪器型号	技术核心	适用范围
Agar	MPFM	微波+科氏力/文丘里, 双传感器串联	含气工况下精度大幅降低
Texco	SMS	伽马能谱/微波+涡轮, 双传感器串联	含气工况下精度大幅降低, 不适用高黏度油和放射性限制场景
Aker Solution ASA	DUET	双伽马能谱+压差, 双传感器串联	含气工况下精度大幅降低, 不适用放射性限制场景
Jiskoot Quality Systems	Mixmeter	双伽马能谱+压差, 双传感器串联	含气工况下精度大幅降低, 不适用放射性限制场景
Multi Phase Meters AS	MPM	单能伽马/高频电磁波+压差, 双传感器串联	含气工况下精度大幅降低, 不适用放射性限制场景
Neftemer Ltd		多能伽马+压差, 双传感器串联	含气工况下精度大幅降低, 不适用放射性限制场景
Pietro Fiorentini S.p.A.	Flowatch 3I	电阻率+压差, 双传感器串联	电阻率不适合高含水工况, 含气工况下精度大幅降低, 不适用放射性限制场景
	Flowatch HS	单伽马能谱/电阻率+压差, 双传感器串联	
Roxar Flow Measurement	MPFM 2600	电阻率+压差, 双传感器串联	电阻率不适合高含水工况, 含气工况下精度大幅降低, 不适用放射性限制场景
	MPFM 2600 Gamma		
	Gamma Subsea MPFM	单伽马能谱/电阻率+压差, 双传感器串联	
	MPFM 1900VI	单伽马能谱/电阻率+压差, 双传感器串联	
Schlumberger Ltd	MPFM 1900VI Non-gamma	单伽马能谱/电阻率+压差, 双传感器串联	电阻率不适合高含水工况, 含气工况下精度大幅降低, 不适用放射性限制场景
	Phasewatcher	双伽马能谱+压差, 双传感器串联	
	Phasetester	双伽马能谱+压差, 双传感器串联	
TEA Sistemi S.p.A	LYRA	单伽马能谱/电阻率+压差, 双传感器串联	电阻率不适合高含水工况, 含气工况下精度大幅降低, 不适用放射性限制场景
中国石油	MRMF	磁共振技术	全场景适用

3 井场核磁共振技术应用前景展望

核磁共振测井技术已经发展了数十年, 井场核磁共振技术研究也超过 10 年并逐步走向成熟, 目前仍然处于快速发展阶段, 一些应用潜力将进一步显现, 也不断出现一些新挑战。

1) 井场核磁共振技术在油气勘探开发中具有广阔的应用前景。一方面, 利用核磁共振技术可以更好地获取储层基本物性特征参数, 如孔隙度、饱和度、孔径分布、渗透率和润湿性等, 对储层评价和产量预测具有重要作用; 然而, 仍需要进一步研究储层流体的物理和化学特征以及流体分子与储层岩石的相互作用方式及机理等。另一方面, 核磁共振技术在油气开采策略和开发效率评价中, 特别是驱替

机理机制研究中受到欢迎。核磁共振可以实现两相流动的可视化, 有助于动态定量分析和认识自吸过程。非常规资源及储层评价时, 核磁共振对有机质中氢自旋动态响应敏感, 利用核磁共振弛豫机制可以表征氢在油、水和气中的自旋动态特征。核磁共振技术有助于了解非常规油气的赋存状态、富集机理及吸附—解吸附的过程。同样的信息和方法原理, 可以用于储气库建设和动态监测。

2) 井场核磁共振技术有望在“碳中和”实践中得到应用。碳捕获、利用与封存(carbon capture, utilization and sequestration, CCUS)被认为是实现“碳中和”的重要手段, 地下碳封存, 不仅要求储层具有高孔隙度、高渗透性及连通孔等特性, 还要有良好的盖层, 使二氧化碳不会泄漏, 因此, 选址对碳赋存非常重要, 可以借鉴现有的油气勘探及开发技

术进行储层评价与帮助选址决策。实验研究表明,核磁共振为 CO_2 -EOR 的工程决策提供了重要信息。

3)核磁共振技术可用于中低温度的地热资源勘探。井孔温度、流体渗流及其与地层应力之间的耦合机理是地热资源勘探开发中的基础性科学问题。储层孔隙度、渗透率和非均质性地热资源的地层模拟具有重要作用。此外,在地热资源开发过程中,可能会改变地层和注入水的化学性质,从而导致地层孔隙堵塞和矿物沉积,并在生产过程中腐蚀井筒。核磁共振将有助于解决地热储层岩石物性参数精确获取的问题。此外,裂缝可以显著影响地层中的流体流动路径,有效提高地层的有效渗透率,将热量从储层传递到工作流体。核磁共振可以间接地分析裂缝的影响。考虑裂缝参数(孔径、数量、角度等),可得到裂缝性储层核磁共振测井响应方程,并用于描述裂缝行为。

4)核磁共振可用于原位条件固井水泥水化机制的研究和固井质量监测。水泥水化过程对于油气井固井及二氧化碳埋存都非常重要,是确保油气生产安全、油气井生命周期、碳封存持久密封的基础,需要深入研究的问题还很多。为了了解和改善水泥性能,采用核磁共振弛豫和成像技术研究水泥石,包括孔隙结构和类型、水化过程、凝胶组成、养护过程、渗透性、稳定性、损伤过程及水泥配方等,均取得了进展。然而,研究大多在室温条件下进行,并且实验过程也大多过于简化,在井孔恶劣环境条件下,水化机制、钻井液污染及流体侵蚀等可能导致核磁共振响应不同。井场核磁共振技术在固井水泥相关基础研究方面具有其独特的价值。

4 结束语

在回顾我国井场核磁共振技术起源和发展脉络的基础上,分别总结了井场核磁共振全直径扫描仪及其资料处理和解释应用技术、井场核磁共振多相流在线计量分析仪及其资料处理和解释应用技术的进展。上世纪,核磁共振技术在常规油气资源勘探开发中发挥了重要作用;本世纪,页岩油等非常规油气资源评价为核磁共振技术提供了更加广阔的应用场景,从各地页岩油气评价实践中,已经看到核磁共振技术的显著优势;未来,在超深层油气资源勘探开发、储气库建设及运行监测、二氧化碳地质封存、固井水泥时空演化的基础研究等丰富应用场景中,核磁共振具有巨大发展前景。可以看

出,井场核磁共振技术正迎来发展和推广应用的新阶段。我国 20 世纪 80 年代开始的岩石多孔介质核磁共振理论及应用基础持续研究,支撑了上世纪常规油气资源的核磁共振评价技术、本世纪页岩油气等非常规油气资源的核磁共振解释应用,也为新阶段更加丰富、更具挑战性的应用奠定了良好基础。

致谢:北京青檬艾柯科技有限公司刘化冰提供了井场核磁共振全直径岩石扫描仪及资料处理和解释应用方面的资料,中国石油勘探开发研究院邓峰提供了井场核磁共振多相流在线计量分析仪及资料处理和应用成效方面的资料,在此一并致谢。

参 考 文 献

References

- [1] BLOCH F. Nuclear induction[J]. *Physical Review*, 1946, 70(7/8): 460-474.
- [2] PURCELL E M, TORREY H C, POUND R V. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid[J]. *Physical Review*, 1946, 69(1/2): 37-38.
- [3] PACKARD M, VARIAN R. Free nuclear induction in the earth's magnetic field[J]. *Physical Review*, 1954, 93: 941.
- [4] BROWN R J S, FATT I. Measurements of fractional wettability of oil fields' rocks by the nuclear magnetic relaxation method[R]. SPE 743, 1956.
- [5] BROWN R J S, GAMSON B W. Nuclear magnetism logging[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1960, 219(1): 201-209.
- [6] SEEVERS D P. A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstones[R]. SPWLA-1966-L, 1966.
- [7] ERNST R R, ANDERSON W A. Application of Fourier transform spectroscopy to magnetic resonance[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1966, 37(1): 93-102.
- [8] TIMUR A. An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationships[R]. SPWLA-1968-J, 1968.
- [9] LAUTERBUR P C. Image formation by induced local interactions: Examples employing nuclear magnetic resonance[J]. *Nature*, 1973, 242(5394): 190-191.
- [10] AUE W P, BARTHOLDI E, ERNST R R. Two-dimensional spectroscopy. Application to nuclear magnetic resonance[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1976, 64(5): 2229-2246.
- [11] WÜTHRICH K. NMR in biological research: peptides and proteins[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1976: 355.
- [12] BROWNSTEIN K R, TARR C E. Importance of classical diffusion in NMR studies of water in biological cells[J]. *Physics Review A*, 1979, 19(6): 2446-2453.
- [13] JACKSON J A, BURNETT L J, HARMON J F. Remote (inside-out) NMR. III. detection of nuclear magnetic resonance in a remotely produced region of homogeneous magnetic field[J]. *Journal of Magnetic Resonance* (1969), 1980, 41(3): 411-421.
- [14] TAICHER Z, SHTRIKMAN S, PALTIEL Z, et al. Nuclear magnetic resonance sensing apparatus and techniques: US4717877[P].

- 1988-01-05.
- [15] KLEINBERG R L, SEZGINER A, GRIFFIN D D, et al. Novel NMR apparatus for investigating an external sample[J]. *Journal of Magnetic Resonance* (1969), 1992, 97(3): 466–485.
 - [16] CHANDLER R N, DRACK E O, MILLER M N, et al. Improved log quality with a dual-frequency pulsed NMR tool[R]. SPE 28365, 1994.
 - [17] PRAMMER M G, DRACK E D, BOUTON J C, et al. Measurements of clay-bound water and total porosity by magnetic resonance logging[R]. SPE 36522, 1996.
 - [18] PRAMMER M G, BOUTON J, CHANDLER R N, et al. A new multiband generation of NMR logging tools[R]. SPE 49011, 1998.
 - [19] COATES G R, XIAO Lizhi, PRAMMER M G. NMR logging: Principles and applications[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1999: 234.
 - [20] VENKATARAMANAN L, SONG Yiqiao, HURLIMANN M D. Solving Fredholm integrals of the first kind with tensor product structure in 2 and 2.5 dimensions[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(5): 1017–1026.
 - [21] SONG Y Q, VENKATARAMANAN L, HURLIMANN M D, et al. T_1 - T_2 correlation spectra obtained using a fast two-dimensional Laplace inversion[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2002, 154(2): 261–268.
 - [22] BORGHI M, PORRERA F, LYNE A, et al. Magnetic resonance logging while drilling streamlines reservoir evaluation[R]. SPWLA-2005-HHH, 2005.
 - [23] HEIDLER R, MORRIS C, HOSHUN R. Design and implementation of a new magnetic resonance tool for the while drilling environment[R]. SPWLA-2003-BBB, 2003.
 - [24] DRACK E D, PRAMMER M G, ZANNONI S, et al. Advances in LWD nuclear magnetic resonance[R]. SPE 71730, 2001.
 - [25] PRAMMER M G, BOUTON J, MASAK P. The downhole NMR fluid analyzer[R]. SPWLA-2001-N, 2001.
 - [26] 阿克谢利罗德. 核磁测井 [M]. 梅忠武, 译. 北京: 石油工业出版社, 1982: 134.
 - AKCELIBPODI C M. Nuclear magnetic resonance logging[M]. MEI Zhongwu, translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982: 134.
 - [27] 肖立志, 谢红. 核磁共振方法确定岩样孔隙度//首届全国岩石与矿物物理性质学术讨论会 [C]. 上海, 1982.
 - XIAO Lizhi, XIE Hong. Determining the porosity of rock by NMR method//National Symposium on Physical Properties of Rocks and Minerals[C]. Shanghai, 1982.
 - [28] 肖立志. 磁共振成像测井提供的信息及其应用 [J]. 测井技术, 1997, 21(2): 79–89.
 - XIAO Lizhi. Basic information provided by MRIL and typical field examples[J]. *Well Logging Technology*, 1997, 21(2): 79–89.
 - [29] 肖立志, 石红兵. 低场核磁共振岩心分析及其在测井解释中的应用 [J]. 测井技术, 1998, 22(1): 42–49.
 - XIAO Lizhi, SHI Hongbing. Low field NMR core analysis and its applications in log analysis[J]. *Well Logging Technology*, 1998, 22(1): 42–49.
 - [30] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 328.
 - XIAO Lizhi. Magnetic resonance imaging logging, rock magnetic resonance and its applications[M]. Beijing: Science Press, 1998: 328.
 - [31] DU Qunjie, XIAO Lizhi, ZHANG Yan, et al. A novel two-dimensional NMR relaxometry pulse sequence for petrophysical characterization of shale at low field[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2020, 310: 106643.
 - [32] XIAO Lizhi, LI Kui. Characteristics of the nuclear magnetic resonance logging response in fracture oil and gas reservoirs[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13: 045003.
 - [33] 郭江峰, 徐陈昱, 谢然红, 等. 含微裂缝致密砂岩核磁共振响应机理研究 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 121–128.
 - GUO Jiangfeng, XU Chenyu, XIE Ranhong, et al. Study on the NMR response mechanism of micro-fractured tight sandstones[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(4): 121–128.
 - [34] 刘双惠, 肖立志, 胡法龙, 等. 核磁共振测井地层界面响应特征研究 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1262–1269.
 - LIU Shuanghui, XIAO Lizhi, HU Falong, et al. Studies on NMR logging responses at formation boundary[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1262–1269.
 - [35] 李新, 肖立志. 天然气水合物的地球物理特征与测井评价 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 136.
 - LI Xin, XIAO Lizhi. Natural gas hydrates geophysical characteristics and well logging evaluation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013: 136.
 - [36] 刘宴堂, 马在田, 傅容珊. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4): 737–742.
 - LIU Tangyan, MA Zaitian, FU Rongshan. Analysis of rock pore structure with NMR spectra[J]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(4): 737–742.
 - [37] 王筱文, 肖立志, 谢然红, 等. 中国陆相地层核磁共振孔隙度研究 [J]. 中国科学G辑: 物理学、力学、天文学, 2006, 36(4): 366–374.
 - WANG Xiaowen, XIAO Lizhi, XIE Ranhong, et al. NMR porosity study of continental formation in China[J]. *Science in China(Series G: Physics, Mechanics & Astronomy)*, 2006, 36(4): 366–374.
 - [38] WANG Jie, XIAO Lizhi, LIAO Guangzhi, et al. Theoretical investigation of heterogeneous wettability in porous media using NMR[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 13450.
 - [39] WANG Jie, XIAO Lizhi, LIAO Guangzhi, et al. NMR characterizing mixed wettability under intermediate-wet condition[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2019, 56: 156–160.
 - [40] LIANG Can, XIAO Lizhi, ZHOU Cancan, et al. Wettability characterization of low-permeability reservoirs using nuclear magnetic resonance: an experimental study[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 178: 121–132.
 - [41] LIANG Can, XIAO Lizhi, ZHOU Cancan, et al. Two-dimensional nuclear magnetic resonance method for wettability determination of tight sand[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2019, 56: 144–150.
 - [42] WANG Lin, XIAO Lizhi, YUE Wenzheng. NMR characterization of pore structure and connectivity for nano-self-assembly γ - Al_2O_3 and precursor[J]. *Applied Magnetic Resonance*, 2018, 49(10): 1099–1118.
 - [43] WANG Lin, XIAO Lizhi, ZHANG Yan, et al. An improved NMR permeability model for macromolecules flowing in porous medium[J]. *Applied Magnetic Resonance*, 2019, 50(9): 1099–1123.
 - [44] 何雨丹, 毛志强, 肖立志, 等. 利用核磁共振 T_2 分布构造毛管压力

- 曲线的新方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(2): 177–181.
- HE Yudan, MAO Zhiqiang, XIAO Lizhi, et al. A new method to obtain capillary pressure curve using NMR T_2 distribution[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2005, 35(2): 177–181.
- [45] 何雨丹, 毛志强, 肖立志, 等. 核磁共振 T_2 分布评价岩石孔径分布的改进方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 373–378.
- HE Yudan, MAO Zhiqiang, XIAO Lizhi, et al. An improved method of using NMR T_2 distribution to evaluate pore size distribution[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(2): 373–378.
- [46] JIA Zijian, XIAO Lizhi, CHEN Zhong, et al. Determining shale organic porosity and total organic carbon by combining spin echo, solid echo and magic echo[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, 269: 12–16.
- [47] 田志. 多尺度孔隙岩石的核磁共振扩散耦合现象及其探测方法[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 1119–1130.
- TIAN Zhi. NMR diffusional coupling of multiple-scale porous rock and its detection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3): 1119–1130.
- [48] 田志, 肖立志, 廖广志, 等. 基于沉积过程的数字岩石建模方法研究[J]. 地球物理学报, 2019, 62(1): 248–259.
- TIAN Zhi, XIAO Lizhi, LIAO Guangzhi, et al. Study on digital rock reconstruction method based on sedimentological process[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1): 248–259.
- [49] 成家杰, 肖立志, 许巍, 等. 基于岩石重构图像的核磁共振响应模拟[J]. 波谱学杂志, 2013, 30(3): 336–344.
- CHENG Jiajie, XIAO Lizhi, XU Wei, et al. Simulating NMR responses in porous media based on reconstructed digital rock image[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2013, 30(3): 336–344.
- [50] 张宗富, 肖立志, 刘化冰, 等. 水分子在微孔隙介质中的受限扩散模拟[J]. 波谱学杂志, 2014, 31(1): 49–60.
- ZHANG Zongfu, XIAO Lizhi, LIU Huabing, et al. Simulation of restricted diffusion of water molecules in micropores[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2014, 31(1): 49–60.
- [51] AN Tianlin, XIAO Lizhi, LI Xin, et al. Investigation of the correlation between internal gradients and dephasing effect in inhomogeneous field[J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, 57(9): 1676–1683.
- [52] XIAO Lizhi, WANG Zhongdong, LIU Tangyan. Application of multi-exponential inversion method to NMR measurements[J]. Petroleum Science, 2004, 1(1): 19–22.
- [53] 王忠东, 肖立志, 刘堂宴. 核磁共振弛豫信号多指数反演新方法及其应用[J]. 中国科学G辑: 物理学、力学、天文学, 2003, 33(4): 323–332.
- WANG Zhongdong, XIAO Lizhi, LIU Tangyan. A new multi-exponential NMR inversion method and its application[J]. Science in China(Series G: Physics, Mechanics & Astronomy), 2003, 33(4): 323–332.
- [54] 廖广志, 肖立志, 谢然红, 等. 孔隙介质核磁共振弛豫测量多指数反演影响因素研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 932–938.
- LIAO Guangzhi, XIAO Lizhi, XIE Ranhong, et al. Influence factors of multi-exponential inversion of NMR relaxation measurement in porous media[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(3): 932–938.
- [55] 谢然红, 肖立志, 邓克俊, 等. 二维核磁共振测井[J]. 测井技术, 2005, 29(5): 430–434.
- XIE Ranhong, XIAO Lizhi, DENG Kejun, et al. Two-dimensional NMR logging[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(5): 430–434.
- [56] 谢然红, 肖立志, 陆大卫. 识别储层流体的(T_2 , T_1)二维核磁共振方法[J]. 测井技术, 2009, 33(1): 26–31.
- XIE Ranhong, XIAO Lizhi, LU Dawei. (T_2 , T_1) Two-dimensional NMR method for fluid typing[J]. Well Logging Technology, 2009, 33(1): 26–31.
- [57] 谢然红, 肖立志. 核磁共振测井探测岩石内部磁场梯度的方法[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1341–1347.
- XIE Ranhong, XIAO Lizhi. NMR logging probing the internal magnetic field gradients of rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1341–1347.
- [58] 谢然红, 肖立志. (T_2 , D) 二维核磁共振测井识别储层流体的方法[J]. 地球物理学报, 2009, 52(9): 2410–2418.
- XIE Ranhong, XIAO Lizhi. The (T_2 , D) NMR logging method for fluids characterization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(9): 2410–2418.
- [59] ZHANG Zongfu, XIAO Lizhi, LIAO Guangzhi, et al. Evaluation of the fast inverse Laplace transform for three-dimensional NMR distribution functions[J]. *Applied Magnetic Resonance*, 2013, 44(11): 1335–1343.
- [60] ZHANG Z F, XIAO L Z, LIU H B, et al. A fast three-dimensional protocol for low-field Laplace NMR in porous media[J]. *Applied Magnetic Resonance*, 2013, 44(7): 849–857.
- [61] 黄科, 肖立志, 李新. 一种降低井下核磁共振振铃的新方法[J]. 波谱学杂志, 2012, 29(1): 42–50.
- HUANG Ke, XIAO Lizhi, LI Xin. A novel method for NMR ringing reduction under downhole condition[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2012, 29(1): 42–50.
- [62] LUO Sihui, XIAO Lizhi, JIN Yan, et al. A machine learning framework for low-field NMR data processing[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(2): 581–593.
- [63] LUO Gang, XIAO Lizhi, LUO Sihui, et al. A study on multi-exponential inversion of nuclear magnetic resonance relaxation data using deep learning[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2023, 346: 107358.
- [64] LIAO Guangzhi, LUO Sihui, XIAO Lizhi. Borehole nuclear magnetic resonance study at the China University of Petroleum[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2021, 324: 106914.
- [65] WU Baosong, XIAO Lizhi, LI Xin, et al. Sensor design and implementation for a downhole NMR fluid analysis laboratory[J]. *Petroleum Science*, 2012, 9: 38–45.
- [66] 胡海涛. 电缆核磁共振测井仪探头关键技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012.
- HU Haitao. Study of key technology in wireline NMR probe[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2012.
- [67] 于慧俊. 核磁共振测井仪电子线路设计与实现[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012.
- YU Huijun. Design and implementation of electronics in NMR logging[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2012.
- [68] 傅少庆. 核磁共振测井数据处理软件设计与实现[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012.
- FU Shaoqing. Design and implementation of data processing soft-

- ware in NMR logging[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2012.
- [69] 谢庆民. 核磁共振测井降噪方法与应用研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012.
- XIE Qingmin. Methods and applications of noise reduction in NMR logging[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2012.
- [70] 吴保松. 井下核磁共振流体实验室关键技术研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012.
- WU Baosong. Design and implementation of NMR sensor for downhole fluid laboratory[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2012.
- [71] 李新. 随钻核磁共振测井仪探头关键技术研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012.
- LI Xin. Study of key technology in LWD NMR probe[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2012.
- [72] 王志战. 国内非常规油气录井技术进展及发展趋势 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(6): 1-7.
- WANG Zhizhan. Technical progress and developing trends in unconventional oil and gas mud logging in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(6): 1-7.
- [73] 王志战, 杜焕福, 李香美, 等. 陆相页岩油录井重点发展领域与技术体系构建 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 155-162.
- WANG Zhizhan, DU Huanfu, LI Xiangmei, et al. Key development fields and construction of technical system for logging of continental shale oil[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 155-162.
- [74] 万亚旗, 陈会年, 杨明清, 等. 录井装备技术现状及发展探讨 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 115-119.
- WAN Yaqi, CHEN Huinian, YANG Mingqing, et al. Status quo and development exploration of mud logging equipment[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 115-119.
- [75] 李三国. 钻井液含油量核磁共振在线检测技术与系统研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- LI Sanguo. The study of drilling fluid NMR online analysis technology and system[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [76] 刘化冰. 孔隙介质低场核磁共振关键技术与应用 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2014.
- LIU Huabing. Key issues and application of low-field nuclear magnetic resonance in porous media[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2014.
- [77] 邓峰. 低场在线核磁共振流体分析系统及其应用研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2014.
- DENG Feng. Low-field online nuclear magnetic resonance fluid analysis system and applications[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2014.
- [78] 肖立志, 于慧俊, 刘化冰, 等. 新型核磁共振孔隙介质分析仪的研制 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 68-73.
- XIAO Lizhi, YU Huijun, LIU Huabing, et al. A novel low field nuclear magnetic resonance analyzer for porous media[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(3): 68-73.
- [79] 肖立志, 于慧俊, 刘化冰, 等. 核磁共振分析仪滑台和核磁共振分析仪: CN201210067251.2[P]. 2015-02-04.
- XIAO Lizhi, YU Huijun, LIU Huabing, et al. Nuclear magnetic resonance analyzer slide and nuclear magnetic resonance analyzer: CN201210067251.2[P]. 2015-02-04.
- [80] 刘化冰, 汪正垛, 孙哲, 等. 一种能够形成变梯度静磁场的磁体系统结构: CN201720431548.0[P]. 2018-01-19.
- LIU Huabing, WANG Zhengduo, SUN Zhe, et al. A magnetic system structure capable of forming variable gradient static magnetic field: CN201720431548.0[P]. 2018-01-19.
- [81] 李新, 肖立志, 刘化冰, 等. 优化重聚脉冲提高梯度场核磁共振信号强度 [J]. 物理学报, 2013, 62(14): 147602.
- LI Xin, XIAO Lizhi, LIU Huabing, et al. Optimization of nuclear magnetic resonance refocusing pulses to enhance signal intensity in gradient B_0 field[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 147602.
- [82] LIU Huabing, XIAO Lizhi, ZONG Fangrong, et al. Permeability profiling of rock cores using a novel spatially resolved NMR relaxometry method: Preliminary results from sandstone and limestone[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2019, 124(5): 4601-4616.
- [83] 刘化冰, 宗芳荣, 汪正垛, 等. 一种快速核磁共振 T_1 成像方法: CN201710869692.7[P]. 2018-02-23.
- LIU Huabing, ZONG Fangrong, WANG Zhengduo, et al. A fast MRI T_1 imaging method: CN201710869692.7[P]. 2018-02-23.
- [84] 邓峰, 赵瑞东, 师俊峰, 等. 一种确定多相流体组分流量的方法及装置: CN201710844809.6[P]. 2019-09-06.
- DENG Feng, ZHAO Ruidong, SHI Junfeng, et al. A method and device for determining component flow of multiphase fluid: CN201710844809.6[P]. 2019-09-06.
- [85] 邓峰, 赵瑞东, 师俊峰, 等. 多相流磁共振流量计刻度装置及其含水率、流速刻度方法: CN201810479204.6[P]. 2020-01-07.
- DENG Feng, ZHAO Ruidong, SHI Junfeng, et al. Multiphase flow magnetic resonance flowmeter calibration device and its water content and flow rate calibration method: CN201810479204.6[P]. 2020-01-07.
- [86] 邓峰, 陈诗雯, 陈冠宏, 等. 流体各组分流量测量装置及方法: CN201910986520.7[P]. 2022-11-04.
- DENG Feng, CHEN Shiwen, CHEN Guan hong, et al. Fluid component flow measuring device and method: CN201910986520.7[P]. 2022-11-04.
- [87] DENG Feng, XIONG Chunming, CHEN Shiwen, et al. A method and device for online magnetic resonance multiphase flow detection[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 855-866.
- [88] DENG Feng, CHEN Guan hong, WANG Mengying, et al. Magnetic resonance multi-phase flowmeter & fluid analyzer[R]. SPE 202208, 2020.
- [89] DENG Feng, CHEN Shiwen, CHEN Guan hong, et al. Intelligent decision making and optimization of artificial lifting based on MR multi-phase flow detection[R]. OTC-31349-MS, 2022.
- [90] DENG Feng, LIU Huabing, CHEN Shiwen, et al. Low-cost multiphase flow metering and assays technology using online magnetic resonance[R]. SPE 211279, 2022.
- [91] SHI Junfeng, DENG Feng, XIAO Lizhi, et al. A proposed NMR solution for multi-phase flow fluid detection[J]. Petroleum Science, 2019, 16(5): 1148-1158.