

丛 书 序

科技立则民族立，科技强则国家强。党的十九届五中全会提出了坚持创新在我国现代化建设全局中的核心地位，把科技自立自强作为国家发展的战略支撑。高校作为国家创新体系的重要组成部分，是基础研究的主力军和重大科技突破的生力军，肩负着科技报国、科技强国的历史使命。

中国石油大学(北京)作为高水平行业领军研究型大学，自成立起就坚持把科技创新作为学校发展的不竭动力，把服务国家战略需求作为最高追求。无论是建校之初为国找油、向科学进军的壮志豪情，还是师生在一次次石油会战中献智献力、艰辛探索的不懈奋斗；无论是跋涉大漠、戈壁、荒原，还是走向海外，挺进深海、深地，学校科技工作的每一个足印，都彰显着“国之所需，校之所重”的价值追求，一批能源领域国家重大工程和国之重器上都有我校的贡献。

当前，世界正经历百年未有之大变局，新一轮科技革命和产业变革蓬勃兴起，“双碳”目标下我国经济社会发展全面绿色转型，能源行业正朝着清洁化、低碳化、智能化、电气化等方向发展升级。面对新的战略机遇，作为深耕能源领域的行业特色型高校，中国石油大学(北京)必须牢记“国之大者”，精准对接国家战略目标和任务。一方面要“强优”，坚定不移地开展石油天然气关键核心技术攻坚，立足油气、做强油气；另一方面要“拓新”，在学科交叉、人才培养和科技创新等方面巩固提升、深化改革、战略突破，全力打造能源领域重要人才中心和创新高地。

为弘扬科学精神，积淀学术财富，学校专门建立学术专著出版基金，出版了一批学术价值高、富有创新性和先进性的学术著作，充分展现了学校科技工作者在相关领域前沿科学研究中的成就和水平，彰显了学校服务国家重大战略的实绩与贡献，在学术传承、学术交流和学术传播上发挥了重要作用。

科技成果需要传承，科技事业需要赓续。在奋进能源领域特色鲜明、世界一流研究型大学的新征程中，我们谋划出版新一批学术专著，期待我校广大专家学

者继续坚持“四个面向”，坚决扛起保障国家能源资源安全、服务建设科技强国的时代使命，努力把科研成果写在祖国大地上，为国家实现高水平科技自立自强，端稳能源的“饭碗”做出更大贡献，奋力谱写科技报国新篇章！

金衍

中国石油大学(北京)校长

2024年3月1日

前 言

核磁共振测井在非常规致密砂岩油气勘探开发中发挥着重要作用，同时也面临诸多问题和挑战。致密砂岩储层微小孔隙发育，润湿相流体受限扩散明显，核磁共振响应机理复杂；致密砂岩储层孔隙度和渗透率低，基于常规砂岩建立的核磁共振测井储层参数评价方法不再适用；致密砂岩储层孔隙结构复杂，非均质性强，储层孔隙结构定量表征与储层分类难度大。

本书是笔者及团队近十年在致密砂岩岩石物理与核磁共振测井评价领域研究成果的梳理总结。本书从致密砂岩数字岩心建模及核磁共振响应数值模拟、储层参数评价、基于岩石物理实验的致密砂岩孔隙结构表征与储层分类等几个方面，介绍了相关的研究成果及进展，包括饱和不同流体的致密砂岩一维和多维核磁共振响应特征，基于扩散-弛豫谱的致密砂岩孔隙流体识别方法，孔隙度、渗透率和束缚水饱和度评价方法，储层束缚流体和可动流体微观分布表征方法，致密砂岩孔隙结构的岩石物理实验表征和核磁共振测井评价方法，以及储层分类方法等。

笔者的学生，特别是吴勃翰、刘秘、邹友龙、刘继龙、卫弘媛、王帅、徐陈昱、谷明宣、高伦、孟祥宁、李博宇、邵亮、魏博、刘若彤等，他们直接参与了本书有关方法的研究工作，其博士论文或硕士论文为本书的撰写提供了素材，感谢他们辛勤的付出。感谢国家自然科学基金面上项目(编号：42174131、41674126、41272163)、中国石油勘探开发研究院、中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院及中国石油吉林油田分公司勘探开发研究院等对本书研究成果的资助。最后，特别感谢中国石油大学(北京)学术专著出版基金的资助。

书中疏漏和不足之处，恳请读者不吝指正。

作 者

2025 年 9 月

目 录

丛书序

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	致密砂岩岩石物理与核磁共振测井评价研究进展	1
1.1.1	数字岩心建模及核磁共振响应数值模拟研究进展	1
1.1.2	储层参数评价研究进展	4
1.1.3	储层孔隙结构评价研究进展	9
1.1.4	储层分类研究进展	13
1.2	致密砂岩储层核磁共振测井评价存在的问题	14
第 2 章	致密砂岩数字岩心建模及核磁共振响应数值模拟	15
2.1	致密砂岩数字岩心建模	15
2.1.1	物理方法	15
2.1.2	数值方法	17
2.2	致密砂岩一维核磁共振 T_2 响应数值模拟	24
2.2.1	一维核磁共振 T_2 采集数值模拟方法	24
2.2.2	方法验证	27
2.2.3	致密砂岩核磁共振 T_2 响应特征	29
2.3	二维核磁共振 D - T_2 响应数值模拟	32
2.3.1	二维核磁共振 D - T_2 采集数值模拟方法	32
2.3.2	方法验证	33
2.3.3	致密砂岩核磁共振 D - T_2 响应特征	34
2.4	二维核磁共振 T_1 - T_2 响应数值模拟	36
2.4.1	二维核磁共振 T_1 - T_2 采集数值模拟方法	36
2.4.2	方法验证	38
2.4.3	致密砂岩核磁共振 T_1 - T_2 响应特征	38
2.5	三维核磁共振 D - T_1 - T_2 响应数值模拟	41
2.6	基于扩散-弛豫谱的致密砂岩孔隙流体识别方法	46
2.6.1	流体受限扩散系数线特征	47
2.6.2	流体受限扩散系数线影响因素	49
2.6.3	致密砂岩孔隙流体识别	51

2.7 小结	52
第3章 致密砂岩储层参数评价	54
3.1 孔隙度评价方法	54
3.1.1 基于多参数回归计算孔隙度	54
3.1.2 基于核磁共振测井计算孔隙度	55
3.1.3 测井资料处理	55
3.2 束缚水饱和度评价方法	57
3.2.1 基于 T_2 分布连续小波变换的束缚水饱和度评价	57
3.2.2 基于回波数据标定的束缚水饱和度评价	70
3.2.3 基于回波数据指数双曲正弦变换的束缚水饱和度评价	76
3.3 渗透率评价方法	83
3.3.1 基于多参数回归模型的渗透率评价	83
3.3.2 基于多参数-思维进化-神经网络模型的渗透率评价	92
3.3.3 基于回波数据标定的渗透率评价	104
3.3.4 基于回波数据指数双曲正弦变换的渗透率评价	106
3.3.5 基于回波数据变时域特征参数的渗透率评价	109
3.4 致密砂岩储层束缚流体和可动流体微观分布表征	121
3.4.1 岩心实验及数据分析	122
3.4.2 方法原理	126
3.4.3 实际资料处理	129
3.5 小结	135
第4章 基于岩石物理实验的致密砂岩孔隙结构表征	137
4.1 分形理论	137
4.1.1 分形与多重分形	137
4.1.2 高斯函数拟合	146
4.2 基于氮气吸附实验的孔隙结构表征	147
4.2.1 氮气吸附实验	147
4.2.2 实验数据处理与分析	147
4.2.3 氮气吸附孔径分布单分形特征分析	152
4.2.4 氮气吸附孔径分布多重分形特征分析	156
4.3 基于高压压汞实验的孔隙结构表征	160
4.3.1 高压压汞实验	160
4.3.2 实验数据处理与分析	160
4.3.3 压汞孔径分布单分形特征分析	163
4.3.4 压汞孔径分布多重分形特征分析	178

4.3.5 压汞孔径分布高斯特征参数计算	183
4.4 致密砂岩全尺度孔径分布的多重分形特征分析	188
4.4.1 致密砂岩全尺度孔径分布	188
4.4.2 多重分形特征分析	190
4.5 小结	191
第5章 核磁共振测井评价致密砂岩储层孔隙结构	193
5.1 核磁共振测井预测毛细管压力曲线	193
5.1.1 核磁共振 T_2 分布预测毛细管压力曲线	193
5.1.2 核磁共振回波数据预测毛细管压力曲线	225
5.2 核磁共振 T_2 分布评价孔隙结构	254
5.2.1 基于核磁共振 T_2 分布单分形特征的孔隙结构评价	254
5.2.2 基于核磁共振 T_2 分布多重分形特征的孔隙结构评价	263
5.2.3 基于分布函数模型拟合 T_2 分布的孔隙结构评价	273
5.3 核磁共振回波数据评价孔隙结构	285
5.3.1 方法原理	285
5.3.2 数值模拟分析	288
5.3.3 岩心实验数据分析	291
5.3.4 核磁共振测井资料处理	293
5.4 小结	296
第6章 致密砂岩储层分类	298
6.1 基于核磁共振测井的致密砂岩储层分类	298
6.1.1 储层分类指数	298
6.1.2 基于核磁共振测井的致密砂岩储层分类方法应用	299
6.2 基于常规测井的致密砂岩储层分类	302
6.2.1 径向基函数	302
6.2.2 基于常规测井的储层分类指数	305
6.2.3 基于常规测井的致密砂岩储层分类方法应用	310
6.3 综合常规与核磁共振测井的致密砂岩储层分类	312
6.3.1 基于综合品质系数的储层分类	312
6.3.2 基于主成分分析-遗传模拟退火-模糊聚类的储层分类	317
6.3.3 不同储层分类方法对比分析	323
6.4 小结	324
参考文献	325

第1章 绪 论

我国致密砂岩油气资源丰富，广泛分布于鄂尔多斯、四川、松辽、塔里木、渤海湾和准噶尔等盆地，勘探前景广阔且开发潜力巨大(邹才能等, 2018; 孙龙德等, 2019; 邹才能和邱振, 2021)。致密砂岩储层微小孔隙发育、孔隙度和渗透率低、非均质性强、孔隙结构复杂，亟须创新发展岩石物理实验表征和测井评价新方法，以加快致密砂岩油气勘探开发进程。

核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)测井是利用氢核与磁场作用发生的共振现象来探测地层孔隙流体的弛豫和扩散信息，能够提供孔隙度、渗透率、饱和度、流体分布和孔隙结构等丰富的岩石物理信息(肖立志, 1998; 邓克俊和谢然红, 2010; Liu et al., 2018a; Jin et al., 2020)，其在非常规油气勘探开发中发挥了重要作用。由于致密砂岩储层中流体赋存状态多样，孔隙结构复杂，NMR响应机理不明确，NMR测井评价存在诸多挑战。深入研究致密砂岩储层NMR响应机理，发展致密砂岩储层NMR测井评价新方法，有助于进一步挖掘NMR测井在致密砂岩储层中的应用潜力，提高NMR测井在致密砂岩储层评价中的应用效果。

本书从致密砂岩数字岩心NMR响应数值模拟研究入手，系统分析饱和不同流体致密砂岩一维、二维及三维NMR响应特征，探究在润湿相流体受限扩散条件下，基于NMR扩散-弛豫谱的致密砂岩孔隙流体识别方法。综合数值模拟与岩石物理实验，从NMR回波数据时间域和横向弛豫时间(T_2)域探索储层参数评价新方法，储层束缚流体和可动流体微观分布表征方法，以及致密砂岩孔隙结构的岩石物理实验表征和NMR测井评价方法。基于上述研究，优选物性和孔隙结构等特征参数，发展致密砂岩储层分类方法。这些研究工作将推动致密砂岩油气NMR测井评价方法的创新与技术进步，对非常规油气勘探开发具有重要意义。

1.1 致密砂岩岩石物理与核磁共振测井评价研究进展

1.1.1 数字岩心建模及核磁共振响应数值模拟研究进展

1. 数字岩心建模研究进展

基于数字岩心的数值模拟是开展微观岩石物理性质研究的重要手段之一。数字岩心建模是数值模拟研究的基础，目前，数字岩心建模方法可分为物理方法和

数值方法。

1) 物理方法

物理方法通常是利用高精度仪器获取岩心的二维图像, 然后将其二值化, 最后将所有二值化的二维图像依次叠加, 得到三维数字岩心, 主要包括序列成像法、X 射线计算机断层成像(X-ray computed tomography, X-CT)法、聚焦离子束扫描电子显微镜(focused ion beam scanning electron microscopy, FIB-SEM)法等。Tomutsa 等(2007)利用序列成像法建立了数字岩心模型, 并对岩心的孔隙结构进行了分析。Rosenberg 等(1999)和 Arns(2002)利用 X-CT 法建立了枫丹白露(Fontainebleau)砂岩的三维数字岩心模型。随后, Arns 等(2005)和 Sisk 等(2010)利用 X-CT 法分别建立了碳酸盐岩和页岩的三维数字岩心模型。Curtis 等(2010)利用 FIB-SEM 扫描页岩岩心样品获得了 500 张切片图像, 然后将其依次叠加获取岩心的三维图像。Bai 等(2013)利用纳米 CT 获得了延长地区致密砂岩的三维数字岩心模型, 并探究了其微观孔隙结构。郭雪晶等(2016)利用纳米 CT 对四川盆地龙马溪组页岩样品进行扫描, 构建了该页岩的三维数字岩心模型, 模型中包括孔隙、有机质及黄铁矿。

2) 数值方法

数值方法是基于岩石二维图像的统计信息, 利用数学方法构建三维数字岩心。数值方法又分为过程法和随机法, 过程法是通过模拟岩石的形成过程构建数字岩心; 随机法是以岩石二维切片的统计函数为约束条件构建三维数字岩心, 如模拟退火法、马尔可夫链-蒙特卡罗(Markov chain Monte Carlo, MCMC)方法等。

(1) 过程法。Bakke 和 Øren(1997)基于岩石的最终几何形态提出了一种过程法构建数字岩心, 但没有分析岩石形成过程中颗粒运动的影响。后来两人基于岩石形成过程中沉积、压实和成岩作用改进了该方法, 并将建立的三维数字岩心分别与实际岩心切片、高斯场法和模拟退火法建立的三维数字岩心进行了对比, 认为过程法获得的三维数字岩心的孔隙结构比其他两种方法(高斯场法和模拟退火法)的结果更接近岩石实际情况。Jin 等(2003, 2007)提出了基于物理过程的数字岩心建模方法, 考虑了岩石沉积和压实过程中颗粒的位移和旋转、成岩过程中颗粒大小的影响。邹友龙等(2015)利用物理过程法模拟了致密岩石的沉积、压实和胶结过程, 构建了致密砂岩的三维数字岩心模型。

(2) 随机法。Hazlett(1997)利用模拟退火法重构三维数字岩心模型。赵秀才等(2007)将孔隙度、线性路径函数及两点概率函数作为约束条件, 利用模拟退火法构建了岩石的三维数字岩心模型。邹孟飞等(2015)提出利用快速模拟退火法对页岩进行分区域数字岩心建模, 构建了具有双重区域的页岩三维数字岩心模型。莫修文等(2016)设置了模拟退火法中孔隙骨架边界点的选取标准, 并以择多算子选取的对象点与边界点交换作为新系统的生成方案, 用遍历扫描搜索代替传统随机

搜索,提高了数字岩心建模的效率,并改善了三维数字岩心的孔隙形态和连通性。模拟退火法建模所需的时间较长,很多学者利用其他方法构建了一个初始的三维数字岩心模型,作为模拟退火法的输入,大大降低了模拟退火法的运算时间(Hidajat et al., 2002; Liu et al., 2009)。

Keehm(2003)以岩心二维图像的孔隙度和变差函数作为约束,提出利用顺序指示模拟方法建立三维数字岩心模型。随后,朱益华和陶果(2007)、刘学锋等(2009)应用顺序指示模拟方法建立了砂岩三维数字岩心模型,并评价了模型的准确性。Okabe 和 Blunt(2004, 2005)基于岩石二维图像获取孔隙结构的统计信息,利用多点地质统计法构建岩石三维数字岩心模型。张挺等(2009)利用顺序指示模拟方法建立了多孔介质三维数字岩心模型。张丽等(2012)将多点地质统计方法用于枫丹白露砂岩的三维数字岩心建模。

Wu 等(2004)提出采用 MCMC 方法构建土壤的二维数字岩心模型,该方法遍历参考图像中 2 点和 5 点邻域的状态,获取每种邻域系统的条件概率,根据计算的条件概率判断重构岩心中每点的状态。随后, Wu 等(2006)将 MCMC 方法用于三维数字岩心建模,并对 9 种不同的二维图像建立对应的三维数字岩心模型。王波等(2012)利用 MCMC 方法构建了页岩气储层岩石的二维数字岩心模型。王晨晨等(2013)利用 MCMC 方法构建了双孔隙碳酸盐岩三维数字岩心模型,根据高低分辨率的二维切面分别构建大孔隙和微孔隙碳酸盐岩模型,然后将二者耦合成双孔隙模型,最终获得孔隙大小呈双峰分布的碳酸盐岩三维数字岩心模型。张磊等(2014)基于高分辨率页岩样品的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图像,利用 MCMC 方法建立了页岩的三维数字岩心模型。聂昕等(2016)基于 MCMC 方法应用数字岩心建模的嵌套组合法建立各向异性强的页岩多组分微米级三维数字岩心模型。郭江峰(2019)利用 MCMC 方法建立了砂岩和致密砂岩的三维数字岩心模型,并利用自相关函数、变差函数等评价重构数字岩心的准确性。

2. 核磁共振响应数值模拟研究进展

核磁共振响应数值模拟方法主要有随机游走方法、多相关函数法、有限元方法和有限差分方法。对大型和复杂的三维多孔介质核磁共振响应数值模拟而言,多相关函数法、有限差分法和有限元方法的计算量大,而随机游走方法具有易实现、灵活和可并行计算等优点,已广泛应用于核磁共振响应数值模拟。

Øren 等(2002)利用随机游走方法模拟了均匀场下砂岩的 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)自旋回波串,模拟得到的 T_2 分布与实验得到的 T_2 分布一致性较好。此后, Toumelin 等(2003)利用该方法模拟了梯度场下不同回波间隔 CPMG 自旋回波串,研究了静磁场梯度和回波间隔对砂岩核磁共振 T_2 分布的影响。Toumelin 等(2004)利用该方法研究了随机堆积模型中流体饱和度、流体黏度、内部梯度及润

湿性对二维 NMR 谱的影响,模拟时考虑了回波间隔和极化时间对回波串的影响。Arns (2004) 根据微米 CT 构建的砂岩数字岩心模型,利用随机游走方法模拟了 CPMG 自旋回波串,通过对比模拟 T_2 分布计算的岩石孔径与 CT 图像计算的岩石孔径验证了核磁共振响应模拟的有效性。后来,他们改进了随机游走方法,模拟了核磁共振反转恢复脉冲序列的测量过程,研究了砂岩内部梯度对纵向弛豫时间-横向弛豫时间 (T_1 - T_2) 分布的影响。Talabi 等 (2008) 利用随机游走方法模拟了碳酸盐岩中单相流体的 CPMG 自旋回波串,并获得其 T_2 分布。Jin 等 (2009) 根据颗粒堆积和体素表征的多孔介质模型,利用随机游走方法分别模拟了它们的 NMR 响应,并对比了孤立球形孔隙的两种模拟结果。Talabi 等 (2009) 与 Talabi 和 Blunt (2010) 基于岩石单相流和两相流三维数字岩心及孔隙网络模型,利用随机游走方法分别模拟了它们的 CPMG 自旋回波串,并对比了它们的 T_2 分布。Arns 等 (2011) 利用随机游走方法模拟了受激脉冲梯度场自旋回波 (pulsedfield gradient-stimulated spin echo, PFGSSE) 脉冲序列的测量过程,研究了砂岩扩散系数-横向弛豫时间 (D - T_2) 分布特征,分析了受限扩散和内部梯度对 D - T_2 分布的影响,认为随着两个梯度脉冲之间扩散时间的增加,流体信号逐渐向扩散系数减小的方向移动。Guo 等 (2016, 2020) 利用随机游走方法模拟了致密砂岩三维核磁共振响应,研究了润湿性、饱和度、回波数据信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 及受限扩散对致密砂岩 D - T_1 - T_2 分布的影响。Guo 和 Xie (2017, 2019) 基于致密砂岩数字岩心模型,利用随机游走方法模拟了扩散编辑脉冲序列和饱和恢复脉冲序列的测量过程,研究了不同流体类型与饱和度下致密砂岩 D - T_2 和 T_1 - T_2 的分布特征,分析了采集参数及数据信噪比对二维核磁共振谱的影响,获取优化的采集参数。

张宝磊 (2011) 利用随机游走方法分别模拟了二维和三维数字岩心模型的核磁共振响应。肖立志等 (2012) 利用随机游走方法模拟了三维颗粒堆积模型和数字岩心模型的核磁共振响应,并分析了 T_2 分布特征及影响因素。安天琳 (2013) 利用随机游走方法模拟孔隙流体分子的扩散和散相效应,利用等效磁偶极子方法定量表征孔隙介质内部磁场强度及梯度,模拟了核磁共振扩散编辑脉冲序列的测量过程,得到了二维 D - T_2 与横向弛豫时间-内部磁场梯度 (T_2 - G) 分布。邹友龙等 (2015) 通过物理过程法构建了致密砂岩数字岩心,利用随机游走方法模拟了其饱和单相流和两相流时的核磁共振响应。郭江峰等 (2016) 通过改变数字岩心的分辨率,模拟生成不同孔隙尺寸的砂岩,基于随机游走方法分别模拟了单相流和两相流砂岩的核磁共振 T_2 和 D - T_2 响应。

1.1.2 储层参数评价研究进展

1. 孔隙度评价研究进展

对于孔隙度的计算,根据选用资料的不同,分为基于常规测井计算孔隙度和

基于测井新方法计算孔隙度。基于常规测井计算孔隙度的方法主要包括多参数回归、岩石体积物理模型和机器学习算法(洪有密, 2008; Lu et al., 2021; Bai et al., 2022)。Lu 等(2021)基于常规测井曲线, 分别利用多参数回归、岩石体积物理模型、改进的孔隙度计算公式及误差逆传播(back propagation, BP)神经网络计算鄂尔多斯盆地长7段页岩储层和凝灰岩储层孔隙度, 并对比了不同方法的优缺点。基于测井新方法计算孔隙度的方法包括利用元素测井结合密度测井和核磁共振测井。元素测井结合密度测井计算孔隙度主要是通过元素测井提高岩石骨架密度的计算精度, 再利用密度测井计算孔隙度。匡立春等(2009)、罗宁等(2009)、袁超等(2018)和席辉等(2020)利用元素测井结合密度测井计算了不同地区、不同储层的孔隙度。核磁共振测井是一种有效的计算孔隙度方法。Straley 等(1997)通过分析大量岩心实验数据认为, 利用低场核磁共振可以评价砂岩和碳酸盐岩的孔隙度。Menger 等(1998)通过分析核磁共振测井在不同地区储层评价中的应用, 认为核磁共振测井可以计算地层孔隙度。Xie 等(2006)针对富含黏土矿物的砂泥岩储层, 提出新的观测模式和处理方法, 提高了核磁共振孔隙度的精度。周宇等(2011)针对富含顺磁物质的火山岩储层, 利用决策树算法对核磁共振孔隙度进行校正。Li 等(2019)考虑了页岩中类固体组分对核磁共振 T_2 分布的影响, 发展了 ΔT_2 方法计算页岩孔隙度。刘欢等(2020)考虑地层水矿化度的影响, 建立了核磁共振 T_2 分布校正模型, 并计算校正后的核磁共振孔隙度。

2. 饱和度评价研究进展

阿奇(Archie, 1942)提出了地层因素与孔隙度的关系式及电阻率增大系数和含水饱和度的关系式。此后阿奇公式广泛用于计算储层流体饱和度(李跃刚等, 2015; 张菲等, 2016; Guo et al., 2022)。由于阿奇公式适用于纯砂岩地层, 考虑到泥质含量的影响, 有学者提出了修正公式, 包括西蒙杜(Simandoux)公式、瓦克斯曼-史密茨(Waxman-Smits)模型、印度尼西亚(Indonesia)公式和双水模型等, 以上公式或模型均基于常规测井, 利用储层流体饱和度和电阻率之间的关系评价饱和度。核磁共振测井可以评价储层束缚水饱和度及可动流体饱和度, 目前, 基于核磁共振测井的储层束缚水饱和度评价方法主要包括 T_2 截止值方法和非截止值方法两类。

根据束缚水饱和度计算模型的不同, T_2 截止值方法又分为基于双峰模型的单一截止值方法和基于薄膜模型的渐变截止值方法(Straley et al., 1991; Coates et al., 1997; Kleinberg and Boyd, 1997; 岳文正等, 2002; 鲜德清等, 2007)。双峰模型认为可动流体分布于岩石大孔中, 束缚水分布于岩石小孔中, 可以通过确定一个单一的 T_2 截止值, 将饱和流体岩石的 T_2 分布分为两部分, 对小于 T_2 截止值的 T_2 分布幅度进行累加, 即可得到束缚水体积。砂岩和碳酸盐岩储层 T_2 截止值分别取 33ms

和 92ms (Morris et al., 1997; Chang et al., 1997), 但这是大量岩心实验结果得到的经验值, 在实际应用中, 不同研究区的岩石矿物成分存在差异, 通常需要对研究区的岩心样品进行核磁共振实验获取 T_2 截止值。周灿灿等 (2001) 采用离心法确定岩心样品的 T_2 截止值。Gao 和 Li (2015) 对 264 块鄂尔多斯盆地低渗透砂岩样品进行核磁共振实验测量, 确定这批样品的 T_2 截止值分布范围为 5.34~20.00ms。Testamanti 和 Rezaee (2017) 通过对澳大利亚珀斯 (Perth) 盆地的页岩样品进行核磁共振测量, 确定该研究区页岩的 T_2 截止值。但是, 当地层非均质性较强时, 采用固定的单一截止值计算的束缚水饱和度误差较大。许多变截止值方法应运而生, 即 T_2 截止值是随地层深度变化的。Haldia 等 (2013) 将地层压力数据与核磁共振测井数据结合确定变 T_2 截止值。Ge 等 (2014) 分析了 T_2 分布的多重分形参数与 T_2 截止值的相关性, 并基于这些参数建立了 T_2 截止值预测模型。Xiao 等 (2018) 采用正态分布函数拟合 T_2 分布, 对拟合与实验测量 T_2 分布的形态特征进行分析, 预测了随地层深度变化的致密砂岩储层 T_2 截止值。与双峰模型中的单一截止值不同, 薄膜模型认为束缚水不仅存在于小孔中, 在岩石大孔的内表面还存在束缚水膜 (Straley et al., 1991; Coates et al., 1997; Kleinberg and Boyd, 1997)。因此, 薄膜模型采用渐变截止值确定束缚水饱和度。虽然理论上薄膜模型计算的束缚水饱和度更加准确, 但由于渐变截止值难以准确确定, 该方法在储层束缚水饱和度评价中应用较少。

非截止值方法则无须确定 T_2 截止值, 直接通过统计方法计算束缚水饱和度。Chen 等 (2008) 将 J 函数与 SDR 渗透率模型结合, 建立了束缚水饱和度计算模型。Xiao 等 (2012a) 则将 Timur-Coates (TC) 和 SDR 两个渗透率模型结合, 建立了束缚水饱和度计算模型。但是非截止值方法是基于束缚水饱和度和 T_2 分布特征参数之间的经验关系式得到束缚水饱和度, 缺少理论基础, 因此在储层束缚水饱和度评价中应用也较少。

无论是 T_2 截止值方法还是非截止值方法, 传统的束缚水饱和度评价方法均基于核磁共振回波数据反演所得的 T_2 分布, 除了评价模型本身的缺陷以外, 还受反演的 T_2 分布不确定性的影响, 尤其是致密砂岩等非常规储层核磁共振测井回波数据信噪比低, 反演误差大, 影响了束缚水饱和度评价的准确性。国内外学者开始探究基于时域分析的束缚水饱和度评价方法, 以规避反演不确定性的影响。斯伦贝谢道尔研究中心的 Gruber 等 (2013) 通过对回波数据进行指数哈尔变换, 计算了 T_2 分布的锥形区域面积。Jin 等 (2019a) 利用指数双曲正弦函数构造渐变截止值, 通过岩心实验确定渐变截止值函数形式, 直接对核磁共振回波数据进行指数双曲正弦变换计算束缚水饱和度。Jin 等 (2020) 利用核磁共振回波数据最优窗口值建立了致密砂岩束缚水饱和度评价模型。

3. 渗透率评价研究进展

常见的渗透率评价方法是基于孔隙度和渗透率之间的关系计算渗透率(赵军等, 2017; 高颖等, 2019), 该方法广泛应用于常规储层渗透率评价。对于孔隙结构复杂的致密砂岩储层, 孔隙度和渗透率之间不是简单的幂函数关系, 只利用孔隙度无法准确计算储层渗透率(Shen et al., 2017)。针对上述问题, 国内外学者提出了许多新的方法, 包括基于核磁共振经典模型及改进模型、基于特征参数回归及基于机器学习评价渗透率。

1) 基于核磁共振经典模型及改进模型评价渗透率

储层岩石的渗流特征与岩石的孔径分布特征密切相关, 核磁共振 T_2 分布可以表征岩石孔径分布, 因此利用 T_2 分布可以预测渗透率。目前, 利用核磁共振测井评价储层渗透率主要有以下经典模型: TC 模型和 SDR 模型(Timur, 1969; Coates and Dumanoir, 1973; Kenyon et al., 1988)。在实际应用中, 两种模型均存在一些局限性(邓克俊和谢然红, 2010), 束缚水饱和度计算精度会影响 TC 模型的有效性; 储层含烃时, SDR 模型计算精度会降低。TC 模型和 SDR 模型在常规储层渗透率评价中应用效果良好; 但在非常规储层, 模型的局限性会影响渗透率预测精度。针对上述问题, 国内外学者在经典模型的基础上, 提出了多种改进模型。Daigle 和 Duga(2009)、Smith 等(2013)、Pirrone 和 Bone(2015)、Rosenbrand 等(2015)和 Qiao 等(2022)分别考虑了岩性、不同 T_2 分布组分、孔隙形状因子、表面弛豫率和孔隙结构类型对岩石渗流特征的影响, 提出了改进的 TC 模型或 SDR 模型, 并将其用于评价不同储层的渗透率。Wei 等(2015)和 Liang 等(2021)分别将 SDR 模型、TC 模型和流动单元指数(flow zone index, FZI)相结合, 对储层分类后再计算渗透率。

2) 基于特征参数回归评价渗透率

岩石的渗流能力受孔隙结构的影响, 可以通过提取孔隙结构参数, 利用参数回归评价渗透率。目前, 用于评价渗透率的孔隙结构参数主要从压汞实验和核磁共振实验中获取。对于利用压汞参数回归评价渗透率, Kolodzie(1980)、Swanson(1981)、Pittman(1992)、Guo 等(2004)、Rezaee 等(2006)、Dastidar 等(2007)、Rezaee 等(2012)和 Liu 等(2018b)提出了多种基于孔隙结构参数的渗透率预测模型, 包括 Swanson 参数、Capillary-Parachor 参数、中值半径、孔喉半径加权几何均值等。对于利用核磁共振参数回归评价渗透率, 张丽华等(2017)选取了 T_2 分布的 6 个特征值, 建立了多元线性回归模型评价渗透率。Liu 等(2017)提取了 T_2 分布的多个特征参数, 并分别利用单参数回归、双参数回归、三参数回归和四参数回归评价致密砂岩渗透率。范宜仁等(2018)选用双截止值提取 T_2 分布的三个组

分, 利用 T_2 分布的三个组分参数评价致密砂岩渗透率。考虑反演的 T_2 分布不确定性对渗透率预测精度的影响, 有学者提出利用核磁共振回波数据评价渗透率。周灿灿等(2002)利用核磁共振回波串包络面积、孔隙度和地层因素回归计算岩石渗透率。Rios 等(2011)利用偏最小二乘回归方法, 分别基于核磁共振回波数据和 T_2 分布计算砂岩渗透率。Jin 等(2019a, 2019b, 2020)和金国文(2021)提出利用核磁共振回波数据计算致密砂岩储层渗透率, 包括利用积分变换从核磁共振回波数据中提取 T_2 加权算术均值评价渗透率, 利用积分变换求取不同渗透率因子用于评价渗透率, 以及基于回波数据最优窗口信息评价渗透率。

3) 基于机器学习评价渗透率

Jafari 等(2011)选用 5 种神经网络算法组成委员会学习机, 选用模糊遗传算法求取对应的权重, 利用常规测井计算渗透率。Jamshidian(2015)提出基于人工神经网络-独立成分分析算法(artificial neural network-imperialist competitive algorithm, ANN-ICA)计算南帕尔斯(South Pars)气田(Kangān)和 Dallan 储层的渗透率。Zhu 等(2017)以核磁共振 T_2 分布为输入, 提出一种结合自适应提升(Adaptive Boosting, AdaBoost)算法、自适应雨林优化算法和改进的 BP 神经网络的混合智能方法评价致密砂岩储层渗透率。赵军等(2021)利用常规测井, 基于深度置信神经网络评价低渗透砂岩储层渗透率。Sen 等(2021)先利用储层品质指数(reservoir quality index, RQI)和 FZI 对储层进行分类, 随后基于随机森林回归评价碳酸盐岩储层渗透率。Mulashani 等(2022)提出利用 LM (Levenberg-Marquardt) 算法优化的数据处理组合方法(group method of data handling, GMDH)神经网络评价储层渗透率。

4. 核磁共振束缚和可动流体微观分布表征方法研究进展

岩石孔隙流体按其分布形式可以分为束缚流体和可动流体两部分。受不同地质作用的影响, 岩石孔径分布范围广, 不同大小的孔隙中流体分布复杂(Daigle et al., 2017; Lai et al., 2018a)。束缚流体和可动流体微观分布能够反映岩石的微观孔隙结构特征和渗流能力等性质。在油气资源勘探开发中, 储层束缚流体和可动流体分布的定量表征, 尤其是可动流体分布表征对储层评价、产能预测及储层高效开发具有重要意义(Yuan et al., 2018; Li et al., 2018)。

核磁共振 T_2 分布可以表征岩石孔隙空间中的流体分布, 饱和流体状态下的 T_2 分布是岩石中束缚流体和可动流体的综合响应。分别对饱和流体和离心后岩石进行核磁共振实验测量可以表征岩石中束缚流体和可动流体的微观分布。Gao 和 Li(2015)借助核磁共振实验对极低渗透率砂岩样品中的可动流体分布状态进行了研究。Testamanti 和 Rezaee(2017)利用核磁共振技术表征了页岩样品在不同离心力及不同烘干温度条件下的流体分布。Lyu 等(2018)通过对致密砂岩样品在不同离心力下的 T_2 分布形态进行分析, 确定最佳离心力得到样品的可动流体分布, 并

研究了致密砂岩孔隙连通性。但是,离心实验只能在实验室条件下对有限的岩心样品进行测量,无法实现对井下地层中束缚和可动流体微观分布的连续定量表征。

1.1.3 储层孔隙结构评价研究进展

1. 分形理论评价储层孔隙结构研究进展

致密砂岩储层孔隙结构复杂,难以用欧几里得几何表征其孔隙结构特征。1982年,Mandelbrot创立了分形几何学(Mandelbrot, 1982)。随后,许多学者对分形几何在岩石孔隙结构中的应用进行了大量研究,主要包含四个方面:图像(扫描电镜和铸体薄片)分形特征分析、气体吸附曲线分形特征分析、毛细管压力曲线分形特征分析和核磁共振 T_2 分布分形特征分析。

1) 图像分形特征分析

Katz 和 Thompson(1985)对砂岩岩心扫描电镜图像的分析,证明了砂岩孔隙具有分形特征。Krohn 和 Thompson(1986)提出一种通过扫描电镜图像计算砂岩孔隙分形维数的方法。Krohn(1988)通过对砂岩、页岩和碳酸盐岩结构特征的统计分析得出其分形性质,认为砂岩小孔隙具有分形特征,而大孔部分不具有分形特征,且分形特征受孔隙中矿物的生长和胶结影响。Peng 等(2011)分别计算不同孔隙结构样品二值化后的 CT 图像和灰度 CT 图像分形维数,认为灰度 CT 图像比二值化后的 CT 图像分形维数能更好地表征孔隙结构。Wang 等(2012)采用计盒维数法计算人造岩心样品的核磁共振图像的分形维数,分析了盒子尺寸、图像分辨率和分割阈值对分形维数的影响。Liu 等(2014)采用分形理论分析了沥青混凝土的 CT 图像,探索了沥青混凝土路面的物理性质与分形维数的关系。Ge 等(2015)采用粒子群算法对二值化后的薄片图像进行多重分形分析,并探索了多重分形参数与核磁共振和毛细管压力曲线计算的孔隙结构参数之间的关系,认为最小阶矩时的分形维和容量维能较好指示孔隙结构类型。Liu 和 Nie(2016)采用分形理论分析煤岩扫描电镜图像和气体吸附曲线,认为煤化作用对分形特征有很大影响。Wang 等(2016)采用分形和多重分形分析扫描电镜图像,定量表征粒间孔、粒内孔和有机质孔的非均质性。

2) 气体吸附曲线分形特征分析

在基于气体吸附曲线计算岩石分形特征方面,主要采用气体吸附-解吸曲线计算分形维,并分析分形维数与岩石矿物组分的关系。Yang 等(2014)采用弗仑克尔-哈尔西-希尔(Frenkel-Halsey-Hill, FHH)方程计算氮气吸附曲线的分形维数,并分析分形维数与总有机碳(total organic carbon, TOC)含量、孔隙结构参数、渗透率及气体吸附能力的关系。Sun 等(2015)基于修正的 FHH 方程和 Neimark 方程,利用氮气吸附-解吸曲线评价孔隙表面分形维数和孔隙结构分形维数,认为孔隙表面

的不规则性对煤岩类型更敏感,且浅层煤岩孔隙表面分形维数小。Liu 等(2015)基于氮气吸附曲线计算分形维数,并分析了分形维数与 TOC 含量、黏土矿物含量及石英含量的关系。Bu 等(2015)利用氮气吸附-解吸曲线评价非海相页岩的分形维数,并分析了气体吸附能力与分形维数的关系。Wang 等(2015)采用气体吸附曲线计算湖相页岩的分形维数,并分析分形维数与孔隙结构参数和矿物组分的关系。Li A 等(2016)利用等温氮气吸附-解吸曲线评价海相页岩的分形维数,认为分形维数越大,甲烷吸附能力越强。Zhang 等(2017)联合氮气吸附曲线和压汞曲线得到页岩全尺度孔径分布,计算页岩全尺度孔隙分形维数,并分析了分形维数与 TOC 含量、黏土矿物和脆性矿物含量的关系。

3) 毛细管压力曲线分形特征分析

基于毛细管压力曲线计算的分形维数可用于评价岩石非均质性。Friesen 和 Mikula(1987)提出利用毛细管压力曲线计算煤岩的分形维数。马新仿等(2004)采用分段回归方法计算毛细管压力曲线的分形维数。Mahamud 和 Novo(2008)通过压汞实验分析氧化导致的煤岩分形特征的变化,认为煤岩孔隙表面氧化导致分形维数变低。Yao 等(2009)通过毛细管压力曲线分析煤岩孔隙分形维数,认为煤岩的分形维数高于砂岩、页岩和碳酸盐岩,且对于高煤阶样品,分形维数与渗透率呈良好的负相关关系。Li(2010)利用毛细管压力曲线评价岩石的非均质性,并根据分形理论推导出三种不同的 Brooks-Corey 模型。Tang 等(2015)通过氮气吸附及高压压汞实验分析页岩样品分形维数,并分析了分形维数与不同矿物组分的关系。Lai 等(2016, 2018a)根据高压压汞实验计算致密砂岩孔隙分形维数,采用 Pittman 曲线的顶点作为大小孔隙的分段点,分别计算了大小孔隙的分形维数。Sakhaee-Pour 和 Li(2016)根据不同页岩样品的压汞曲线,分别采用两种方法计算分形维数,认为孔隙长度具有分形特征而孔隙体积不一定具有分形特征。Ge 等(2016)根据毛细管压力曲线的分段分形特征建立累积分形方程,并利用迭代截断奇异值分解算法构建分形维数谱,用于孔隙结构评价和渗透率计算。Li P 等(2016)采用固定压力点将毛细管压力曲线分为大孔、中孔和微孔三部分,并分别计算每部分的分形维数。Zhou 等(2017)通过压汞实验分析煤岩不同孔隙范围的分形特征,并分析了孔隙分形特征的主要影响因素。

4) 核磁共振 T_2 分布分形特征分析

对于核磁共振 T_2 分布单分形分析,张超谟等(2007)基于核磁共振 T_2 分布和毛细管压力曲线的关系,推导了岩石核磁共振 T_2 分布的分形几何表达式,润湿相饱和度与 T_2 的关系曲线在双对数坐标中明显分为两段,分别对应大孔隙与小孔隙部分,需要分段计算核磁共振 T_2 分布的分形维数。吴国铭等(2015)将碳酸盐岩核磁共振 T_2 分布分为 5 个部分,采用计盒维数法分别计算每部分的分形维数。Ouyang