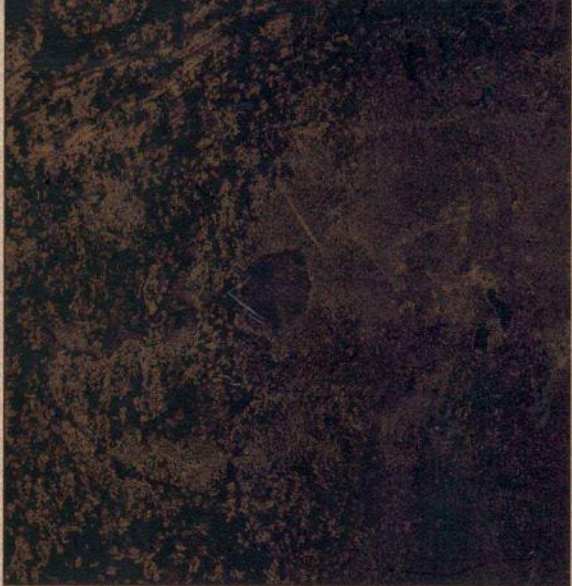
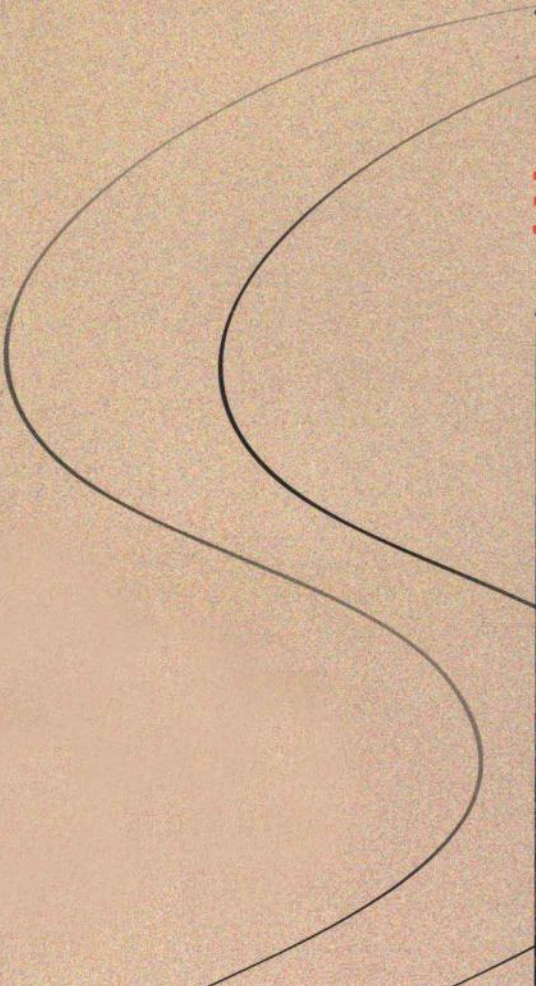




煤层气赋存运移 的核磁共振成像 理论及应用

唐巨鹏 潘一山 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

国家自然科学基金面上项目资助 (50374040/11072102)

中国博士后基金特别项目资助 (200801019)

辽宁省教育厅高等学校科技计划项目资助 (2008274)

煤层气赋存运移的核磁共振成像 理论及应用

唐巨鹏 潘一山 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 唐巨鹏 潘一山 2011

图书在版编目 (CIP) 数据

煤层气赋存运移的核磁共振成像理论及应用 / 唐巨鹏, 潘一山著. —沈阳: 东北大学出版社, 2011. 6

ISBN 978-7-81102-955-0

I. ①煤… II. ①唐… ②潘… III. ①核磁共振—磁共振成像—应用—煤层—地下气化煤气—油气运移—地质勘探 IV. ①P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 117033 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(社务室)

传真: 024-83680180(市场部) 83680265(社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市奇兴彩色广告印刷有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 10

字 数: 185 千字

出版时间: 2011 年 6 月第 1 版

印刷时间: 2011 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘 莹 石玉玲

封面设计: 刘江旻

责任校对: 辛 思

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-81102-955-0

定 价: 26.00 元

序

煤是一种典型的多孔介质,流体通过多孔介质的流动称为渗流,研究流体在多孔介质中运动规律的科学称为渗流力学。随着渗流力学的蓬勃发展,它不断与其他学科相融合和交叉,煤层气赋存和运移理论就是由渗流力学、采矿科学、煤物理学和煤地质学等学科互相渗透、交叉而产生的新的学科。

随着我国国民经济的迅速发展,能源短缺的矛盾越来越突出,寻找非常规能源来补充和接替常规能源就成为我国可持续发展能源战略的重要方向,因此我国煤层气开发被提上了议事日程。由于我国特殊的地质条件,至今还没有形成一套符合我国国情的煤层气赋存运移理论,且已有理论还远没有达到机理清晰、规律明确的程度,急需用新的技术手段加以验证和完善。核磁共振成像技术(简称NMRI)作为一种先进的无损检测技术,为此提供了崭新的技术途径。迄今为止,国内外还没有见到关于煤层气赋存运移的核磁共振成像理论及实验进行系统专门的研究。《煤层气赋存运移的核磁共振成像理论及应用》一书的出版,将开辟崭新的研究方向,为煤层气赋存运移规律研究提供新的技术支撑。因此,本书的出版具有一定的前瞻性和原创性。

本书共设6章,在提出煤层气赋存运移规律研究现状的基础上,科学地分析、总结了煤层气成藏、赋存和运移机理,在此基础上,明确地提出了煤层气产出过程中存在三效应主导作用阶段(有效应力、基质收缩和滑脱效应)。为实现煤层气赋存运移的实验室模拟,使用自主研制完成的非磁性三轴渗透仪,进行了煤层气解吸渗流特性实验研究,得到了新的煤层气解吸特性、渗流特性与有效应力间关系等实验结论,验证了煤层气三效应主导作用阶段的存在,从而为煤层气赋存运移规律的NMRI实验提供了前期实验基础和信息。在阐述NMRI机理的基础上,重点进行了煤和煤层气NMRI机理研究,揭示了NMRI的本质含义,分析了煤和煤层气NMRI性质,给出了煤层气NMRI成像测量方法。将核磁共振成像理论与煤层气赋存运移理论相结合,建立了煤储层核磁渗透率模型,进行了煤层气微观扩散机理NMRI理论研究,给出了菲克扩散系数与核磁扩散系数之间的关系。将装有煤试件的三轴渗透仪置于核磁共振成像仪磁体腔中,进行了自然状态下煤试件的NMRI实验、饱和水煤试样的核磁渗透率测定实验、气驱水NMRI实

验、水驱气 NMRI 实验, 期间, 根据情况, 选择了原煤试件和型煤试件, 直观、实时地观测了水在煤试样中的渗流过程、气驱水过程和水驱气过程, 得到了大量具有实际工程价值的实验结论。

唐巨鹏博士一直潜心于煤层气开采、煤与瓦斯突出等领域研究, 开展研究工作近十年, 在其理论和应用方面, 具有多项研究成果。潘一山教授研究矿山环境与灾害力学近三十年, 在冲击地压、煤与瓦斯突出等煤矿灾害发生理论与防治方面, 有较深造诣。本书的出版对我国煤层气开发具有推动意义和学术价值。我热切地期望本书的早日出版, 并乐于推荐如上, 是为序。

章梦涛 教授

辽宁工程技术大学力学与工程学院

2011 年 5 月 23 日

前 言

煤层气是一种非常规天然气，它赋存于煤层中，又称为煤矿瓦斯或煤田沼气，是煤系地层中以腐殖质为主的有机质在成煤过程中形成，并以吸附和游离状态赋存于生气源岩（煤层、炭质页岩和泥岩等）中的自储式天然可燃气体。煤层气的主要成分是甲烷，还有少量二氧化碳、一氧化碳、二氧化硫和氧化氮等气体，发热量为 $30 \sim 40 \text{ MJ/m}^3$ ，几乎不含硫化氢，与油田伴生气和气田天然气一样，均属于高热值的可燃气体。它在燃烧中基本上不会产生烟尘，二氧化硫排放量也比煤炭燃烧低得多。因此，煤层气是一种洁净优质，开发利用前景广阔，可以代替和优于天然气的新的宝贵矿藏资源。

我国煤层气总储量仅在地下 2000m 以内煤层中就有 36.8 万亿米³，开发前景十分广阔。但由于我国煤层气藏具有自身特殊的成藏条件和成藏规律，现有理论并不适用于中国实际，因此开发实践中不能照搬美国成熟的煤层气理论和实践，必须建立一套适合中国特殊地质条件的煤层气开发理论体系。虽然我国煤层气工作者在此研究领域进行了大量的相关研究，但对中国煤储层煤层气赋存机理和运移可采规律仍然认识不清，远未达到机理清晰、规律明确的程度，理论上的低水平在一定程度上严重地制约着中国煤层气开发技术商业化、国产化的进程，亟待采用新的技术、方法和理论加以解决与完善。应用无损细观研究的核磁共振成像技术（简称 NMRI 技术）研究煤储层中煤层气赋存运移规律，可以直观地揭示煤层气在煤层中的赋存流动状态、运移产出过程中的各方面影响因素，从而提高煤层气采出率，尽快实现煤层气的商业开发。

本书共分 6 章，采用理论分析与实验室试验相结合的方法，第 1 章提出了制约我国煤层气产业开发的问题，总结了前人在煤层气赋存运移规律方面取得的研究成果及应用核磁共振成像技术的可行性；第 2 章对煤层气成藏、赋存和运移机理及其相关因素的影响规律进行了系统总结，据此提出煤层气成藏、赋存和运移过程中的相关因素作用与影响机制，明确地提出了煤层气产出过程中存在三效应主导作用阶段（有效应力主导作用阶段、基质收缩主导作用阶段和滑脱效应主导作用阶段）；第 3 章设计并研制了一套非磁性自压式三轴渗透仪，并进行了煤层气解吸渗流特性实验，获得了煤层气解吸、渗流参数与有效应力之间的关系规

律,从实验角度证明了煤层气开采中三阶段主导作用的存在;第4章重点研究煤和煤层气 NMRI 机理,给出了煤层气 NMRI 测量方法;第5章主要研究煤层气赋存运移的 NMRI 理论,建立了煤储层核磁渗透率模型,揭示了煤层气微观扩散的 NMRI 机理;第6章选择典型高瓦斯矿井——辽宁阜新孙家湾煤矿原煤和型煤试件,分别进行了自然状态下煤试件的 NMRI 实验、饱和水煤试样的水渗流 NMRI 实验、气驱水 NMRI 实验、水驱气 NMRI 实验,直观、实时地观测水在煤试样中的渗流过程、气驱水过程和水驱气过程,从而获得了具有工程实用价值的实验结论,以指导煤层气开采实践。

本书得到了国家自然科学基金面上项目(50374040/11072102)、中国博士后基金特别资助项目(200801019)、辽宁省教育厅高等学校科技计划项目(2008274)资助。2001年潘一山教授在国内最早提出将核磁共振成像技术引入煤层气开发领域,书中研究成果是既课程组十年来从事煤层气开采、煤与瓦斯突出等研究领域的提炼与总结,又是集体劳动和智慧的凝聚。推出煤层气赋存运移的核磁共振成像理论研究专著,旨在实现已有研究成果的使用价值,使其在科研和现场实践中发挥积极作用。

要特别感谢辽宁工程技术大学力学与工程学院李成全高工、董子贤高工在实验设计和仪器加工方面的鼎力帮助,以及中国科学院渗流流体力学研究所刘卫高工、郭和坤高工、周洪涛高工在核磁共振成像实验方面的大力协助。更要感谢国家自然科学基金委、中国博士后科学基金会等提供的充足经费支持。

囿于作者的水平和条件,书中难免有不妥和错误,敬请读者批评指正。核磁共振成像技术在煤层气赋存运移、煤与瓦斯突出等领域应用前景广阔,煤层气细观、微观世界丰富多彩,很多现象和问题还有待揭示与探讨。

作 者

2011年5月24日

目 录

1 绪 论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 煤层气赋存运移规律研究现状	4
1.3 多孔介质核磁共振成像研究现状	7
1.4 存在的问题	8
参考文献	10
2 煤层气成藏、赋存和运移机理	16
2.1 煤层气成藏机理	16
2.1.1 煤层气生成机理	16
2.1.2 煤层气藏形成条件	19
2.2 煤层气赋存和运移机理	21
2.2.1 煤孔隙裂隙特征	21
2.2.2 煤层气赋存机理	23
2.2.3 煤层气运移机理	31
2.2.4 煤层气产出机理	41
参考文献	42
3 非磁性三轴渗透仪研制及瓦斯解吸渗流特性实验研究	47
3.1 引 言	47
3.2 非磁性三轴渗透仪研制	49
3.2.1 研制背景	49
3.2.2 渗透仪设计、加工和制造	49
3.2.3 聚碳酸酯材料强度验算	51
3.3 瓦斯解吸渗流特性实验方法及步骤	55
3.3.1 实验设备和采集煤样	55
3.3.2 实验步骤	56
3.4 实验结果分析	57

3.4.1	孔隙压与解吸特性关系	57
3.4.2	轴压与解吸特性关系	60
3.4.3	受载方式与解吸特性关系	61
3.4.4	渗透率与解吸特性关系	61
3.4.5	有效应力与解吸、渗流特性关系	64
	参考文献	69
4	煤层气 NMRI 机理研究	72
4.1	引 言	72
4.2	NMRI 机理	73
4.2.1	NMRI 物理学机理	73
4.2.2	NMRI 机理	79
4.3	煤层气 NMRI 机理研究	80
4.3.1	煤层气核磁共振性质	82
4.3.2	煤核磁共振性质	85
4.4	煤层气 NMRI 测量方法	88
4.4.1	T_2 弛豫时间的测定	88
4.4.2	核磁共振 T_2 谱含义	89
	参考文献	90
5	煤层气赋存运移的 NMRI 理论研究	92
5.1	引 言	92
5.2	核磁共振 T_2 谱确定煤孔隙结构	93
5.2.1	核磁共振 T_2 谱与煤孔隙结构的对应关系	93
5.2.2	核磁共振 T_2 谱确定煤孔隙结构方法	95
5.3	煤层气扩散系数 D 的 NMRI 测定	96
5.3.1	扩散系数 D 的传统测定方法	96
5.3.2	扩散系数 D 的 NMRI 测定方法	97
5.4	煤层气微观扩散机理 NMRI 理论研究	98
5.5	吸附时间和解吸速率的 NMRI 测定	103
5.6	煤层气核磁渗流率理论模型建立	104
5.6.1	传统孔隙度和渗透率测定方法	104
5.6.2	新核磁渗透率模型建立	105
	参考文献	109

6 煤层中气水两相运移的 NMRI 实验研究	114
6.1 引 言	114
6.2 自然状态下煤试件 NMRI 实验	114
6.2.1 实验过程与结果	115
6.2.2 实验结果分析	115
6.3 煤试件饱和水 NMRI 实验	116
6.3.1 实验过程与结果	116
6.3.2 实验结果分析	119
6.4 煤层中水渗流 NMRI 实验	120
6.4.1 实验过程与结果	120
6.4.2 实验结果分析	124
6.5 气驱水 NMRI 实验	125
6.5.1 实验过程与结果	125
6.5.2 实验结果分析	126
6.6 型煤试件研制	128
6.7 水驱气 NMRI 实验	131
6.7.1 实验过程与结果	132
6.7.2 实验结果分析	143
参考文献	145

1 绪 论

1.1 问题的提出

随着我国国民经济的迅速发展,能源短缺的矛盾越来越突出,对石油、天然气的需求量逐年增加,仅靠常规能源的勘探和开发已远远跟不上国民经济的发展需求,寻找非常规能源来补充和接替常规能源就成为我国可持续发展能源战略的重要方向。据专家预测,煤层气将是 21 世纪新兴的接替能源^[1-7],其勘探开发必将是 21 世纪接替常规天然气资源最有前景和最为现实的途径之一,因此进行适合我国特殊地质条件下的煤层气相关基础理论和实验研究势在必行、迫在眉睫,具有重大的理论价值和重要战略应用意义。

煤层气是一种非常规天然气,它赋存于煤层中,又称为煤矿瓦斯或煤田沼气,是煤系地层中以腐殖质为主的有机质在成煤过程中形成,并以吸附和游离状态赋存于生气源岩(煤层、炭质页岩和泥岩等)中的自储式天然可燃气。煤层气的主要成分是甲烷,还有少量二氧化碳、一氧化碳、二氧化硫和氧化氮等气体,发热量为 $30 \sim 40 \text{ MJ/m}^3$,几乎不含硫化氢,与油田伴生气和气田天然气一样,均属于高热值的可燃气。它在燃烧中基本上不会产生烟尘,二氧化硫排放量也比煤炭燃烧低得多。因此,煤层气是一种洁净优质,开发利用前景广阔,可以代替和优于天然气的新的宝贵矿藏资源。

在世界范围内,煤层气储量十分丰富,总储量超过天然气。有关研究结果表明,我国煤层气总储量仅在地下 2000m 以内煤层中就有 36.8 万亿米³^[8-15]。过去,煤层气作为严重威胁煤矿安全生产的有害伴生物,被排放于大气中,并未被充分利用。借鉴天然气开采技术,从地面用垂直钻孔抽放煤层瓦斯,称为煤层气开采。煤层气开采可以达到使不可再生能源充分利用,有利于环境保护及减少煤矿安全事故的三重效益。

煤层气作为一种新兴战略能源,它的有效开发和利用已经成为国际上能源开发的热点,世界上主要发达国家(如美国、加拿大、英国、法国等)已经先后开展了一系列煤层气的勘探试验工作,除美国现已在圣胡安盆地、黑勇士盆地等进入了开发阶段并形成了煤层气产业外,其余国家均处于研究探索阶段^[1-17]。我国的煤层气开发刚刚起步,虽然在全国陆续开展了一些煤层气的勘探开发试验工作,但仍然处于初步勘探开发探索阶段^[8,10,14,16]。

美国自20世纪80年代初将西部的圣胡安(SanJuan)和中部的黑勇士(Black-warrior)盆地作为勘探、开发基地,进行了系统的煤层气赋存和运移理论的研究工作,提出了煤层气产出是“排水—降压—解吸—扩散—渗流”的一系列过程,建立了中阶煤煤层气成藏与开发的系统理论,该理论包括:①煤储层双孔隙导流理论;②中阶煤生储能力优势与成藏优势理论;③低渗极限与高阶煤产气缺陷理论;④煤储层气饱和与水饱和控制理论;⑤煤层气产出的解吸—扩散—渗流三分漏斗与煤层气开发的多井干扰理论;⑥中阶煤煤层气选区评价理论。在上述认识的指导下,美国形成了以沉积、构造、煤化作用、含气性及渗透率为考察主体的煤层气评价及开发模式,成功地建成了以圣胡安和黑勇士盆地为中心的煤层气产业基地。需要特别指出的是,美国西部煤层气理论并不适用于东部,表明其煤层气开发潜力评价模式存在相当大的应用局限性。1998年,美国煤层气理论又有了新突破,在发育低阶煤(褐煤)的粉河盆地成功地实现了商业性开发,继而提出了“生物型或次生煤层气成藏与产出理论”^[16]。

随着美国煤层气商业开发的成功,其他国家也掀起了开发煤层气的热潮。澳、加、德、英、波、印、俄等29个重要产煤国也相继开始了煤层气的理论研究和开发实践。由于地质条件的差异,以上各国在煤层气开发实践上多未获得成功,加拿大由于地质条件和美国相似,因此进一步证实了美国开发模式的正确性,仅有澳大利亚结合本国煤层气藏低渗特点,发展了地应力评价理论,并在开发了水平井高压水射流改造技术后,获得了商业产气突破。由以上可知,美国以中阶煤为主体的气藏评价和开发模式有着自身理论上的重要缺陷,其原因在于美国西部含煤盆地群地质条件十分简单,且有利于煤层气开发,而建立的煤层气理论大部分仍然是一种经验总结,不可能对煤层气深层次的成藏机理研究具有借鉴意义,因而对不同于美国煤层气成藏地质条件的国家并不适用。

我国煤层气抽放活动始于20世纪50年代,煤矿井下抽放瓦斯(即煤层气)也一直以瓦斯灾害防治、确保煤矿的生产安全为最终目的。80年代中期,由于美国煤层气地面开采实现商业化获得成功,加上煤层气在全世界能源战略地位的不

断提高,我国开始参考美国的有关理论进行煤层气地面开发的研究和试验。“八五”期间进行了煤层气可采性的理论探索,同时实施了联合国开发计划署援助项目“中国煤层气资源开发”、“深层煤层气勘探”、“浅层煤层气勘探”和煤炭部“全国煤层气资源评价”等。尽管煤层气成藏和产出机理研究有了较大的进展,但并没有形成理论上的突破。

目前,中国的煤层气研究还处于低水平阶段,还没有开发成功的商业性煤层气田。一方面是由于中国具有与北美大陆完全不同的成煤和煤化作用地质条件,地壳运动具有多期叠加性,构造活动具有复杂多样性,使中国煤储层表现出自身固有的特殊储集性能,美国的煤层气基础理论对我国的煤层气勘探开发不具有可借鉴的实际指导作用;另一方面是中国的煤储层具有自身的显著特性:①煤层气藏表现为低压、低渗与低饱和,有些地区甚至为特低压、特低渗与特低饱和,这些特征使得中国的煤层气藏在开发时无法借鉴当前的现有理论;②成煤后期构造破坏严重,部分地区构造煤的发育无法实现煤层气井产能的激励过程;③大部分中阶煤储层具有强烈的不均一性,严重地限制了煤层气井的产能开发,同时为规模开发煤层气藏带来了很大困难;④在资源总量中,高阶煤和低阶煤煤层气占总资源量的23%以上,按照现有理论,这些煤储层不具备产气优势;⑤高阶煤中获得了高产气流,说明高阶煤并非煤层气开发的死区。

按照现有的美国煤层气理论体系评判,显然以上特性规律表明中国大部分含煤区都不具备煤层气开发条件。但我国勘探与开发试验在山西晋城和河东、陕西韩城、河北大城、辽宁铁法等地却取得了非常可喜的产气突破,这充分说明了中国煤层气具有非常好的开发潜能。尽管如此,由于中国煤层气资源存在“三低”特征,加上地质变动特殊性,所以勘探、生产技术和工艺都没有突破性进展。例如,实际压裂径长的测算不准确,不能科学合理地布置排采井组,且实验排采井组中没有一个是肯定形成了井间干扰和压力漏斗,从而体现单井或井组的实际产能,实验井平均单井产气量低,缺乏有效的增产技术等^[52]。中国的煤层气藏具有自身特殊的成藏条件和成藏规律,现有理论并不适用于中国实际,因此开发实践中,不能照搬美国成熟的煤层气理论和实践,必须建立一套适合中国特殊地质条件的煤层气开发理论体系。中国煤层气的技术开发和理论研究亟待建立新的技术、实验方法和理论。

总之,虽然我国煤层气工作者在此研究领域进行了大量的相关研究,但对中国煤储层煤层气赋存机理和运移可采规律仍然认识不清,远未达到机理清晰、规律明确的程度,理论上的低水平在一定程度上严重地制约着中国煤层气开发技术

商业化、国产化的进程,使得我国煤层气持续可采评判理论指导性不强,煤层气勘探和生产抗风险能力低,难以形成煤层气产业,因此亟待建立符合中国地质条件的煤层气系统理论体系、有效资源潜力评价体系和开发系统决策体系。需要特别指出的是,建立符合我国特殊地质条件和煤层气藏的煤层气赋存和运移规律,形成新的煤层气基础理论是先期工作的关键,这对我国的煤层气产业尽快实现商业化具有十分重大的战略意义和理论应用价值。

实验研究是科学研究中三大方法之一,通过实验研究,不仅可以对已有理论进行验证,而且可以发现新的现象,形成新的概念,从而孕育新的理论。过去,由于无损检测和图像显示技术落后,开展实验研究十分困难,煤层气赋存和运移规律的实验研究远远落后于理论研究,因而已有煤层气赋存运移理论都没有建立在煤层气流动实验研究基础上或用实验进行验证。目前,情况有了改观,出现了多种无损检测技术,可以被应用于煤层气在煤层中运移的研究,例如,先进的可进行无损细观研究的核磁共振成像(Nuclear Magnetic Resonance Imaging,简称NMRI)技术,其工作原理是先获得被测物体的核磁共振讯息,根据弛豫时间差异,再由计算机以 Fourier 变换重建法等成像,该方法既可检测多孔介质的结构特性,也可检测多孔介质的某些物理特性与流动参数及流体和多孔介质骨架之间的相互作用,研究流体在其中流动状况及分布规律。因此,应用 NMRI 技术研究煤储层中煤层气赋存运移规律有望直观地揭示煤层气在煤层中的赋存流动状态、运移产出过程中的各方面影响因素,从而提高煤层气采出率,尽快实现煤层气的商业开发。

1.2 煤层气赋存运移规律研究现状

煤是一种典型的多孔介质,流体通过多孔介质的流动称为渗流,研究流体在多孔介质中运动规律的科学称为渗流力学。随着渗流力学的蓬勃发展,它不断与其他学科相融合和交叉,煤层气赋存和运移理论(即煤层气流动理论)就是由渗流力学、采矿科学、煤物理学和煤地质学等学科互相渗透、交叉而产生的新的学科。自 1856 年法国工程师达西提出线性渗流定律以来,国内外广大学者将其广泛应用于石油和天然气开采、地下水运移、煤层气开采等相关领域,极大地促进了煤层气在煤层中赋存和运移理论的发展。

1907 年,美国学者 Chamberlin 和 Darton 研究并概括出甲烷聚集与运移的机

理;1910年,为促进安全生产,减少甲烷灾害,美国成立了专门的政府机构——矿业局;1928年,Rice提出了在采煤前采用垂直钻孔从煤层中除去甲烷的设想;但是该法一直没有得到有效的推广和采用,随后的40余年矿井通风和抽排甲烷的方法仍然是控制甲烷的主要措施^[18-20]。

自20世纪60年代以来,随着煤层气赋存和运移理论发展的不断深入,建立了大量的数学模型,这些模型大致可以分成三类:①经验模型。1964年Lindine等根据所观察到的气含量和残余气含量与深度之间存在的非线性函数关系,提出了第一个预测生产矿井瓦斯涌出量的经验模型^[21];1968年Airey从理论上推导出第一个预测矿井静止工作面瓦斯释放量的偏微分方程,采用解析法求解,建立了一维、单孔隙、气相的产量预测解析模型^[22]、McFall模型(1987)等。②平衡吸附模型。它假定煤层气层是单孔隙介质,煤层孔隙壁上吸附的气体与孔隙中游离气压力处于连续平衡状态。这类模型有Kissel模型(1972)、McKee模型(1986)和Bumb模型(1987)等。③非平衡吸附模型。假定煤层为微孔-裂隙双重介质,而煤层中气水是压缩流体,考虑了微孔中气体的吸附、解吸和由微孔到裂隙的扩散过程。此模型可以分为两类:一类为基于菲克(Fick)第一扩散定律的拟稳态模型:美国宾州大学的Ertekin和King开发了类似于ARRAYS模型的单井Psu-1模型(1983),该模型对方程组在空间和时间上进行差分离散,按照全隐式、Newton-Raphson方法进行求解,Remer在此基础上,建立了Psu-2模型(1984)和Psu-3模型(1986),Sung开发了包括有限导流裂缝、水平钻孔和生产煤矿工作面的Psu-4模型^[23],美国ICF Lewin Energy开发出煤层气藏模拟的双孔隙、二维、气水两相Comet模型(1987,1993);另一类为基于菲克第二扩散定律的非稳态模型:Smith模型(1983)、Sugarwat模型(1984)和Chen模型(1987)等。90年代又提出了非平衡吸附的动力学模型,该模型认为,煤层甲烷主要吸附在基质的内表面,在割理裂隙中,服从达西渗流,根据对扩散过程处理的不同而分为拟稳态的非平衡吸附模型和非稳态的非平衡吸附模型。

自20世纪50年代以来,我国学者开始了关于煤层瓦斯流动的理论研究,旨在解释煤层瓦斯流动本质,揭示瓦斯在矿井中流动和瓦斯突出的规律。煤层气在煤层中的流动规律与地下水、石油和天然气在地层中的流动相仿,基本上遵从热传导微分方程,不同之处在于煤层对煤层气具有强烈的吸附作用,且在采出过程中随着排水降压,必将经历单相流、非饱和流与气水两相流运动阶段,煤层气经历解吸—扩散—渗流作用,最终产出。周世宁院士于60年代借助于地下水渗流理论,将煤对瓦斯的吸附和解吸视为源汇项,认为煤层气流动符合达西定律,将

多孔介质煤层视为大尺度均匀分布的虚拟连续介质,在我国首次建立了瓦斯(即煤层气)在煤层中流动的渗流理论^[24],随后二十年煤层气流动理论的研究主要是对建立的数学模型的修改和完善。1984年郭勇义^[25]基于相似理论,在一维情况下,研究了煤层气流动方程的完全解;1986年谭学术^[26]等针对煤层气的气体状态方程,认为应用煤层气真实气体状态方程更加符合实际,提出了修正的矿井煤层真实煤层气渗流方程;1989年余楚新^[27]从煤层气含量方程出发,认为煤层中参与渗流的煤层气量是煤体煤层气含量的部分量,在假设煤体中煤层气吸附与解吸过程是完全可逆的条件下,建立了煤层气渗流控制方程。80年代中期,很多学者在瓦斯扩散速度试验时发现:当煤颗粒直径小于一定值时,其速度不随着粒径变化而改变,从而认为煤粒瓦斯放散是扩散作用,这就是瓦斯的扩散理论^[28,29]。90年代将煤视为双重介质,认为瓦斯从基粒内壁解吸后,经扩散作用到裂隙中形成渗流,这又称为扩散-渗流理论^[30,31]。1992年赵阳升^[32,33]提出了煤体-煤层气耦合理论,提出了考虑耦合模型与非耦合模型得到的结果差别很大的结论;1996年梁冰^[34]应用内时理论,建立了煤层瓦斯固流耦合失稳理论;1996年李斌^[35]建立了煤层裂缝中气水两相渗流及微孔中非平衡吸附气体解吸扩散过程的数学模型;2002年孙培德^[36]基于可压缩流体在各向异性非均质孔裂隙双重变形介质中扩散渗流的非稳定流动,建立了煤层气越流与煤岩体变形的耦合计算模型,并进行了可视化模拟;2004年韦重韬^[37]建立了多煤层煤层气扩散逸失地质模型和数学模型。

目前,我国用于指导煤层气开采的理论主要是渗流模型。这是以周世宁院士^[38,39]为代表的学者提出来的,尽管他们认为煤是双重介质,赋存在煤层中的瓦斯主要吸附于煤基体微孔内壁,解吸后,经扩散作用至裂隙成为渗流流动,但却认为煤层中瓦斯运移主要受到渗流作用的控制,即解吸扩散场受到渗流场控制,因而煤层气在煤层中运移基本上是渗流作用,而且通过一维的瓦斯在煤层中运移分别应用渗流理论和扩散渗流理论提供的方法进行了简化计算,认为除开始外,其余结果相同,但是此方法在进行扩散计算时,包括了吸附于固壁上的瓦斯量,显然还有不够完善之处。在渗流理论指导下,目前将提高瓦斯抽放量、采出量都寄托于提高煤层渗透率,虽然采取了各种措施,进行了大量的工程,但效果甚微,而其他部门的学者认为瓦斯在煤层中解吸、扩散、渗透三种不同的运移是既相互联系又独立的,三者间控制是相互的,瓦斯运移也可能受到解吸或扩散的控制,这也为当前瓦斯抽放和煤层气开采实践所证实^[25-39]。提高渗透性并不能大幅度地提高瓦斯的日产量更为事实所证明。而这些都是由于对解吸、扩散和渗流

三者之间如何相互作用与联系的机理不够清楚,对瓦斯从解吸到扩散直至渗流的全部运移过程也不清楚造成的,而这些问题都只能有待实验研究才能予以解决。

由以上可见,对于煤层气赋存和运移理论研究,国内外的学者已开展了一些工作,得出了一些规律^[18-39],但都是采用常规的宏观方法,即将煤层中水渗流、煤层气驱水、水驱煤层气当成一个“黑匣子”,通过煤体试件两端的气液量来推测、分析煤体中的水渗流及气液两相渗流规律,而从未对三维应力状态下,煤层气水渗流、气驱水、水驱气过程进行实时、直观地观测,从未对煤试件水渗流过程中水在孔隙裂隙中的分布状态进行成像研究。将 NMRI 技术引入煤层气在煤层中赋存运移规律研究,可以搞清煤层气在煤层中赋存和运移机理,从而完善煤层气在煤层中赋存和运移的理论,寻求提高我国煤层气产量的技术措施,既不失为一种崭新的途径和手段,又具有重大的实际应用意义和理论价值。

1.3 多孔介质核磁共振成像研究现状

自 1986 年 Baldwin^[40]首次利用医用核磁共振成像仪研究填砂模型中的驱油过程之后,核磁共振成像技术在国内外石油工业界引起了广泛关注,并得到了迅速的发展,国外很快将其应用于多孔介质研究领域^[41-46]。

1990 年在意大利博洛尼亚大学 Borgia 教授的倡导和组织下,于意大利北部城市博洛尼亚(Bologna)成功地召开了第一届磁共振技术在多孔介质领域应用国际学术大会,之后每两年召开一届,迄今为止已经召开了七届。该国际性会议的一系列成功举办极大地推动了磁共振这一先进实验手段和技术在多孔介质研究领域的应用,并取得了许多科研成果。Sederman 和 Gladden^[41]研究了用 1~3mm 小玻璃球堆成的多孔介质中水单相流及水和空气两相流动问题;Song 和 Lu^[42,43]研究了砂岩中油水两相流和岩石孔隙尺寸及孔隙连续性问题;Godefroy^[44]采用核磁共振,研究了孔隙表面油水分子运动问题;Mair^[45]用氙气通过岩石多孔介质研究了孔隙内部结构;Bencsik^[46]采用气体核磁共振研究了岩石局部水力传导系数。

煤作为一种典型的多孔介质,自核磁共振技术被应用于多孔介质以来,同样受到了国内外学者的关注。P. C. Wernett 等^[47](1990)利用 Xe-129 核磁共振实验,研究了伊利诺斯 6 号煤的平均孔隙直径;Tsiao C^[48](1991)用 NMR 观测了煤微孔隙结构;R. Pugmire^[49]和 R. E. Botto^[50]于 1996 年通过 NMR 技术利用有机溶剂研究了膨胀煤结构特性;L. R. Radovic^[51](1997)试图通过 Xe-129 核磁共振实验观