



“十二五”国家重点出版物出版规划项目
中国石油大学（华东）“211工程”建设重点资助系列学术专著

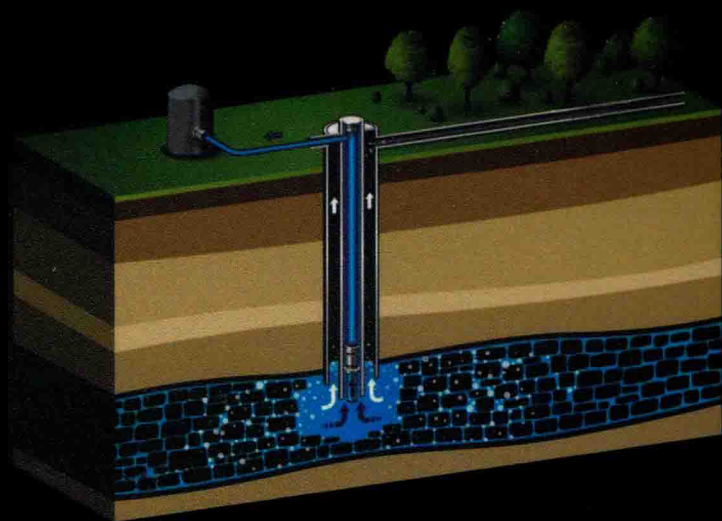
煤层气藏工程

COALBED METHANE RESERVOIR ENGINEERING

冯其红 张先敏 胡爱梅 著

石油石化
学术文库

THE ACADEMIC LIBRARY
OF PETROLEUM AND
PETROCHEMICALS



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



“十二五”国家重点出版物出版规划项目

中国石油大学(华东)“211工程”建设重点资助系列学术专著

煤层气藏工程

COALBED METHANE RESERVOIR ENGINEERING

冯其红 张先敏 胡爱梅 著

图书在版编目(CIP)数据

煤层气藏工程 / 冯其红,张先敏,胡爱梅著. —东营:中国石油大学出版社,2016.12

ISBN 978-7-5636-5258-7

I. ①煤… II. ①冯… ②张… ③胡… III. ①煤层—
地下气化煤气—气藏工程 IV. ①P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 155120 号

书 名:煤层气藏工程
作 者:冯其红 张先敏 胡爱梅

责任编辑:穆丽娜(电话 0532—86981531)

封面设计:悟本设计

出 版 者:中国石油大学出版社

(地址:山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编:266580)

网 址:<http://www.uppbook.com.cn>

电子邮箱:shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者:青岛天舒常青文化传媒有限公司

印 刷 者:青岛国彩印刷有限公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本:185 mm×260 mm

印 张:13.5

字 数:332 千

版 印 次:2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5636-5258-7

印 数:1—1 000 册

定 价:78.00 元

总 序

“211工程”于1995年经国务院批准正式启动,是新中国成立以来由国家立项的高等教育领域规模最大、层次最高的工程,是国家面对世纪之交的国内国际形势而做出的高等教育发展的重大决策。“211工程”抓住学科建设、师资队伍建设等决定高校水平提升的核心内容,通过重点突破带动高校整体发展,探索了一条高水平大学建设的成功之路。经过17年的实施建设,“211工程”取得了显著成效,带动了我国高等教育整体教育质量、科学研究、管理水平和办学效益的提高,初步奠定了我国建设若干所具有世界先进水平的一流大学的基础。


1997年,中国石油大学跻身“211工程”重点建设高校行列,学校建设高水平大学面临着重大历史机遇。在“九五”“十五”“十一五”三期“211工程”建设过程中,学校始终围绕提升学校水平这个核心,以面向石油石化工业重大需求为使命,以实现国家油气资源创新平台重点突破为目标,以提升重点学科水平,打造学术领军人物和学术带头人,培养国际化、创新型人才为根本,坚持有所为、有所不为,以优势带整体,以特色促水平,学校核心竞争力显著增强,办学水平和综合实力明显提高,为建设石油学科国际一流的高水平研究型大学打下良好的基础。经过“211工程”建设,学校石油石化特色更加鲜明,学科优势更加突出,“优势学科创新平台”建设顺利,5个国家重点学科、2个国家重点(培育)学科处于国内领先、国际先进水平。根据ESI 2012年3月更新的数据,我校工程学和化学2个学科领域首次进入ESI世界排名,体现了学校石油石化主干学科实力和水平的明显提升。高水平师资队伍建设取得实质性进展,培养汇聚了两院院士、长江学者特聘教授、国家杰出青年基金获得者、国家“千人计划”和“百千万人才工程”入选者等一批高层次人才队伍,为学校未来发展提供了人才保证。科技创新能力大幅提升,高层次项目、高水平成果不断涌现,年到位科研经费突破4亿元,初步建立起石油特色鲜明的科技创新体系,成为国家科技创新体系的重要组成部分。创新人才培养能力不断提高,开展“卓越工程师教育培养计划”和拔尖创新人才培养特区,积极探索国际化人才的培养,深化研究生培养机制改革,初步构建了与创新人才培养相适应的创新人才培养模式和研究生培养机制。公共服务支撑体系建设不断完善,建成了先进、高效、快捷的公共服务体系,学校办学的软硬件条件显著改善,有力保障了教学、科研以及管理水

平的提升。

17 年来的“211 工程”建设轨迹成为学校发展的重要线索和标志。“211 工程”建设所取得的经验成为学校办学的宝贵财富。一是必须要坚持有所为、有所不为,通过强化特色、突出优势,率先从某几个学科领域突破,努力实现石油学科国际一流的发展目标。二是必须坚持滚动发展、整体提高,通过以重点带动整体,进一步扩大优势,协同发展,不断提高整体竞争力。三是必须坚持健全机制、搭建平台,通过完善“联合、开放、共享、竞争、流动”的学科运行机制和以项目为平台的各项建设机制,加强统筹规划、集中资源力量、整合人才队伍,优化各项建设环节和工作制度,保证各项工作的高效有序开展。四是必须坚持凝聚人才、形成合力,通过推进“211 工程”建设任务和学校各项事业发展,培养和凝聚大批优秀人才,锻炼形成一支甘于奉献、勇于创新队伍,各学院、学科和各有关部门协调一致、团结合作,在全校形成强大合力,切实保证各项建设任务的顺利实施。这些经验是在学校“211 工程”建设的长期实践中形成的,今后必须要更好地继承和发扬,进一步推动高水平研究型大学的建设和发展。为更好地总结“211 工程”建设的成功经验,充分展示“211 工程”建设的丰富成果,学校自 2008 年开始设立专项资金,资助出版与“211 工程”建设有关的系列学术专著,专款资助石大优秀学者以科研成果为基础的优秀学术专著的出版,分门别类地介绍和展示学科建设、科技创新和人才培养等方面的成果和经验。相信这套丛书能够从不同的侧面、从多个角度和方向,进一步传承先进的科学研究成果和学术思想,展示我校“211 工程”建设的巨大成绩和发展思路,从而对扩大我校在社会上的影响,提高学校学术声誉,推进我校今后的“211 工程”建设发挥重要而独特的贡献和作用。

最后,感谢广大学者为学校“211 工程”建设付出的辛勤劳动和巨大努力,感谢专著作者孜孜不倦地整理总结各项研究成果,为学术事业、为学校和师生留下宝贵的创新成果和学术精神。

中国石油大学(华东)校长



2012 年 9 月

序

煤层气(煤矿俗称“瓦斯”)作为非常规天然气的一个矿种,是与煤炭伴生、以吸附态为主赋存在煤层及煤系围岩之中的,其主要成分为甲烷。根据国际能源机构(IEA)估计,全球煤层气资源总量约 $260 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中俄罗斯、加拿大、中国和美国的煤层气资源之和占全球总量的 90% 以上,中国埋深 2 000 m 以浅的煤层气资源量约为 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。由于煤层气资源的低碳、洁净、绿色、低污染的特性,且随着其开发利用技术的日趋成熟,煤层气年产量和商品量不断增加,已成为清洁能源的重要补充。

煤层气在我国以其资源量大、规模开发有助于煤矿安全开采并减少温室气体排放等突出功效而被寄予厚望,国家大力支持非常规天然气资源的开发利用。“十二五”期间,我国煤层气资源的开发利用得到了长足发展,特别是国家能源局将煤层气产业发展定位为重要的新兴能源产业后,煤层气进入发展加速期。

煤层气的成藏和开采机理与常规天然气的成藏和开采机理有明显区别,因此煤层气的勘探开发需要一套与之相匹配的理论和实践认识。该书结合著作者们多年在煤层气藏工程方法与应用方面所取得的科研成果,创新和发展了煤层气藏工程的基本理论和方法,深入地研究了煤层气藏基本地质特征、试井分析、数值模拟、开发优化设计和动态分析等基础理论与方法,并在沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘等开展了相应的工程实践应用,为我国煤层气藏低成本高效开发提供了重要的理论依据和方法指导。

该书内容丰富,数据翔实,注重最新科研成果与工程实践的结合,体现了产学研相结合的科学研究理念,具有很强的科学性、创新性与实用性,对现场工程技术人员以及从事相关研究的科技人员、高校师生大有裨益,同时对我国煤层气产业的发展具有积极作用。

郝文瑞
2016.9.9

前 言

随着我国国民经济和社会的快速发展,对洁净能源的需求越来越大,而资源赋存条件决定我国石油天然气产量无法大幅快速增长,油气供需形势日趋严峻。煤层气作为一种清洁环保能源,是在成煤过程中形成的、以甲烷为主要成分并主要以吸附状态、少量以游离状态或溶解状态赋存于煤层中的非常规天然气,是常规天然气的重要战略补充。煤层气的开发利用对我国缓解温室气体减排压力、优化能源结构、推动经济转型发展均具有重要的现实意义和长远的战略意义。

我国煤层气资源十分丰富,是世界上继俄罗斯、加拿大之后的第三大煤层气储量国。根据最新一轮全国油气资源评价结果,我国埋深 2 000 m 以浅的煤层气资源量达 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$,与常规天然气资源量($35 \times 10^{12} \text{ m}^3$)相当,其中埋深 1 500 m 以浅的煤层气可采资源量为 $10.87 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

有别于常规天然气,煤层气的产出是一个“排水—降压—解吸—扩散—渗流”的复杂过程。我国成煤环境的多期性和多样性决定了煤层气成藏地质条件的复杂性,大多数地区储层非均质性较强、三低(低渗、低压、低饱和)现象普遍、储层应力敏感性强,这些特征成为我国煤层气藏较为显著的特征,为煤层气资源的高效开发带来了极大的困难。目前我国相当一部分煤层气井低产低效甚至不产气。此外,煤层气井产能还受到井网部署、排采制度等工程因素的影响,合理的井网部署和排采制度等均可有效提高煤层气单井产量。我国目前已在部分典型煤层气盆地进行了勘探开发,并取得了突破性进展,但由于我国煤层气开发基础研究较为薄弱,适合我国煤层气开发特点的配套理论和方法还需不断完善和创新。因此,发展和创新煤层气藏工程理论与方法对我国煤层气资源的高效开发具有重要的理论和实际应用价值。为此,作者结合以往多年的科研资料和近期的科研成果撰写了本书,以期为我国煤层气高效开发提供理论指导,推动我国煤层气产业的蓬勃发展。

本书是作者团队负责承担的国家自然科学基金项目“低阶煤储层气-水两相多机理流动规律及数值模拟研究”(编号:11302265)、国家科技重大专项“煤层气高效增产及排采关键技术研究”(编号:2016ZX05042)、中央高校基本科研业务费专项基金项目“低煤阶煤层气开发井网自动优化方法及应用研究”(编号:14CX02046A)以及前期多项部门科研课题研究成果的整理和总结。

在本书撰写过程中,立足于我国煤层气开发的复杂地质条件,从煤层气藏储集特征评

价、运移产出机理分析入手,研究了煤的孔渗特征、含气特征及其影响因素等;系统建立了不同介质类型的煤层气井试井分析模型并分析了典型曲线特征;建立了煤层气藏三维数值模拟模型,开展了差分模型的 IMPES 和全隐式求解研究;进一步发展了煤层气藏开发优化设计和动态分析方法,提出了煤层气井网自动优化方法、工作制度实时优化方法,开展了物质平衡方法、递减曲线方法以及广义翁氏预测模型方法在煤层气藏开发动态分析中的应用研究。本书在进行理论分析的同时,创新和发展了煤层气藏工程的理论和方法,并介绍了新理论和方法在我国煤层气开发较为成功的沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地东缘等多个煤层气区块的实践应用。

本书共分 5 章,由冯其红教授、张先敏博士和胡爱梅教授级高工合作完成,其中前言、第 4 章部分和第 5 章由冯其红教授撰写;第 1 章部分、第 2 章和第 3 章由张先敏博士撰写;胡爱梅教授级高工撰写第 1 章和第 4 章的部分内容。全书由冯其红教授统一审核、定稿。

本书的出版得到了国家科技重大专项、教育部长江学者和创新团队发展计划基金(编号:IRT1294)、国家自然科学基金项目、中央高校基本科研业务费专项基金项目、中国石油大学(华东)“211 工程”建设重点资助系列学术专著以及多项部门科研课题的共同资助;得到了中石油煤层气有限责任公司勘探开发处温声明教授级高工、科技信息处赵培华处长,煤层气开发利用国家工程研究中心科技发展部陈东主任、彭红钊副主任以及勘探开发研究院吴仕贵副院长、翟雨阳博士的支持和帮助;还得到中石油煤层气有限责任公司韩城分公司、忻州分公司,中国石油天然气股份有限公司长治煤层气勘探开发分公司,中国石油勘探开发研究院廊坊分院的领导及工程技术人员的关心和帮助;博士研究生张纪远、王相,硕士研究生石洪福、杜鹏、舒成龙、孙贝贝、胡鹏、袁诺等为部分研究成果的取得、资料收集及图件清绘等做了许多工作,在此一并致以衷心的感谢!同时,向书中所引用文献作者表示谢意。

煤层气藏工程涉及多门学科的理论与方法,有许多理论和实践问题有待于深入探索与揭示。由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者不吝批评指正!

作者

2016 年 9 月

目 录

第 1 章 煤层气藏的基本特征	1
1.1 煤层气藏储集特征评价	1
1.1.1 煤化作用及煤阶	1
1.1.2 煤的工业分析	4
1.1.3 煤的孔渗特征	4
1.1.4 煤的含气性	19
1.2 煤层气的储集机理	28
1.2.1 游离状态	28
1.2.2 溶解状态	29
1.2.3 吸附状态	29
1.3 煤层气的运移产出机理	32
1.3.1 煤层气的解吸机理	33
1.3.2 煤层气的扩散机理	34
1.3.3 煤层气的渗流机理	34
1.3.4 煤层气的产出机理	34
第 2 章 煤层气藏试井分析	36
2.1 变形介质煤层气藏试井分析	36
2.1.1 数学模型	36
2.1.2 数值求解	38
2.1.3 结果分析	40
2.2 分形介质煤层气藏试井分析	41
2.2.1 分形介质煤层气藏拟稳态压力动态分析	42
2.2.2 分形介质煤层气藏非稳态压力动态分析	48
2.2.3 变形分形介质煤层气藏拟稳态压力动态分析	51
2.2.4 变形分形介质煤层气藏非稳态压力动态分析	56

2.3	低渗透煤层气藏试井分析	60
2.3.1	煤层气藏非达西流动分析	60
2.3.2	基于分形理论的煤层气藏非达西流动分析	65
第3章	煤层气藏数值模拟	71
3.1	煤层气藏流动数学模型	71
3.1.1	模型基本假设	71
3.1.2	数学模型的建立	71
3.1.3	数值模型的建立	78
3.2	数学模型的IMPES解法	81
3.2.1	基本原理	81
3.2.2	IMPES线性化处理	82
3.2.3	线性差分方程组的建立	85
3.2.4	数值模型的求解	87
3.3	数学模型的全隐式解法	89
3.3.1	基本原理	89
3.3.2	全隐式线性化处理	90
3.3.3	线性差分方程组的建立	93
3.3.4	线性差分方程组的求解	96
3.3.5	煤层气藏数值模拟应用实例	98
3.4	煤层气羽状水平井产能评价	108
3.4.1	煤层气羽状水平井概述	108
3.4.2	井筒变质量流动压降模型	109
3.4.3	考虑井筒压降影响的煤层气羽状水平井开采数学模型	114
3.4.4	煤层气羽状水平井开采耦合数学模型的求解	117
3.4.5	煤层气羽状水平井开采的产能预测	118
3.4.6	煤层气羽状水平井开采的影响因素分析	123
第4章	煤层气藏开发优化设计	127
4.1	煤层气直井井网优化	127
4.1.1	煤层气直井井网矿场应用概况	127
4.1.2	煤层气开发井网部署要素	128
4.2	煤层气直井井网自动优化方法	131
4.2.1	算法分类与筛选	132
4.2.2	GPS,PSO与CMA-ES算法介绍	136
4.2.3	优化算法性能分析	141
4.2.4	井位直接优化方法	145
4.2.5	分步井位优化方法	146
4.2.6	矿区应用	148

4.3 煤层气多分支水平井井身结构优化	157
4.3.1 分支长度的设计	157
4.3.2 分支间距的设计	158
4.3.3 分支数目的设计	159
4.3.4 井筒直径的设计	161
4.3.5 垂向位置的设计	162
第5章 煤层气藏动态分析方法	164
5.1 物质平衡方法	164
5.1.1 中高阶煤层气藏物质平衡方程	164
5.1.2 低阶煤层气藏物质平衡方程	164
5.2 Arps 递减曲线方法	169
5.2.1 递减模型	170
5.2.2 应用实例	171
5.3 广义翁氏预测模型方法	179
5.3.1 广义翁氏预测模型	179
5.3.2 广义翁氏预测模型验证	181
5.3.3 广义翁氏预测模型应用	182
5.4 排采制度实时优化方法	186
5.4.1 煤层气藏压裂直井气水两相流动阶段的产能方程	187
5.4.2 排采制度实时优化方法	190
5.4.3 实例验证	191
参考文献	194

第 1 章 煤层气藏的基本特征

1.1 煤层气藏储集特征评价

1.1.1 煤化作用及煤阶

煤是由高等植物遗体在地质历史过程中经过泥炭化作用和煤化作用转变而成的固体可燃有机岩。植物遗体在微生物作用下不断分解、化合、聚集,该过程形成煤的前身——泥炭,称为泥炭化阶段。当泥炭被其他沉积物覆盖后,其在温度、压力和时间等因素的作用下发生一系列物理化学变化,形成从褐煤到无烟煤不同种类的煤,这一过程称为煤化阶段。煤化作用有两个结果:一是泥炭转变为固态残留物——褐煤、烟煤和无烟煤,二是生成水和气体挥发性物质(图 1-1-1)。

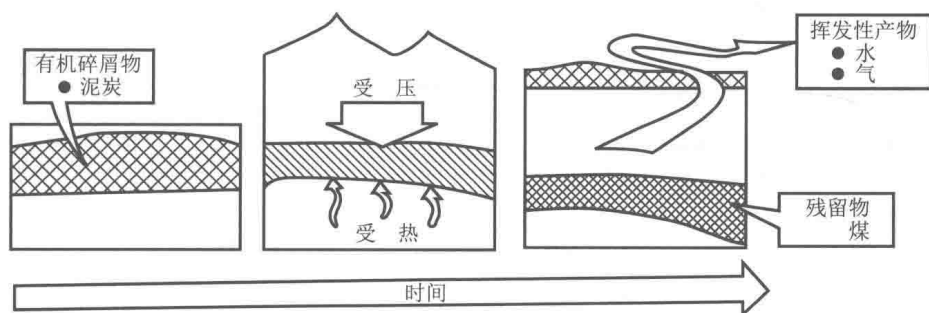
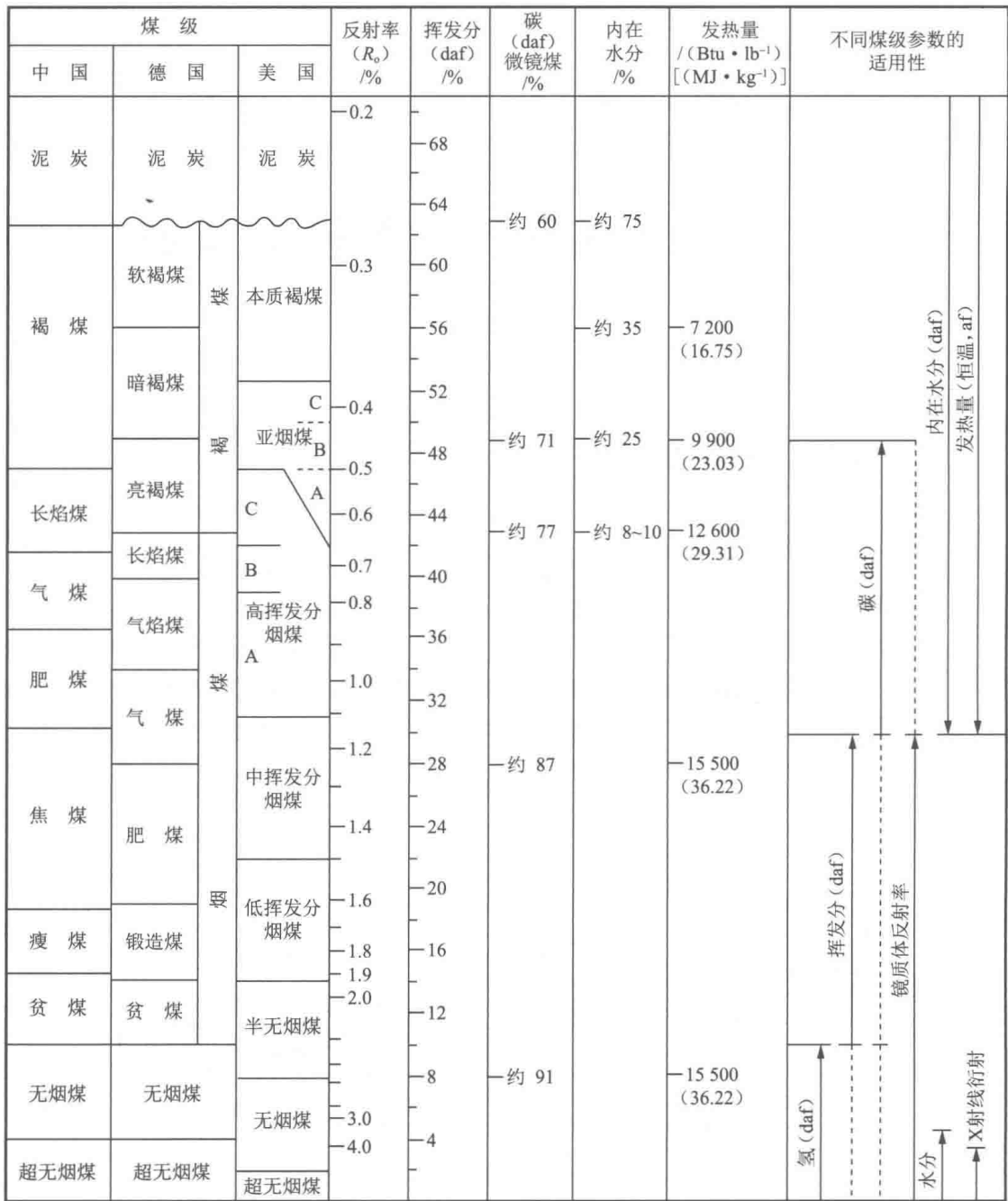


图 1-1-1 煤化作用与产物(Boyer,1989)

从泥炭转变成褐煤,从褐煤转变成烟煤、无烟煤,是一个由低级到高级的发展过程,也是一个逐渐演变的过程。不同演变阶段生成不同数量、不同组分的烃类物质,所形成的煤的物理性质、储集性能也明显不同。根据煤的化学组成和物理结构在煤化过程中的变化,煤化作用的深浅程度用煤阶(煤级)表示。煤阶代表了煤的化学性质,如灰分、水分、挥发物、固定碳、热值(BTV)等,但这些化学性质并不随煤阶的增加而发生均匀变化。对于煤阶的划分,目前还没有统一的方案,不同国家划分煤阶的标准也不相同,如图 1-1-2 所示。

煤不仅具有成烃的物质基础,而且具有容纳烃类物质的空间,是烃类气体的源岩和储集层。在煤化作用的全过程中,即从泥炭到不同变质程度煤的形成过程中,在微生物、温度和压力的作用下,伴随煤(或泥炭)成分与结构的变化,都有烃类气体的生成,而不同阶段、不同



注:daf为dry ash free(干燥无灰基)的首字母缩写,af为ash free的首字母缩写;

1 Btu=1 055.06 J,1 lb=0.454 kg。

图 1-1-2 基于各种煤化作用参数的煤阶划分

成因类型的烃类气体具有不同的成分和同位素特征。与天然气的成因相同,煤层气成因也可分为两大类,即有机成因和无机成因,绝大多数情况下为有机成因。国内外关于有机成因的煤层气研究相对深入,但还未形成统一的分类方案,大体上将有机成因煤层气分为生物成因和热成因两类。根据前人的研究成果,结合近期完成的实际测试数据,苏现波提出了如表 1-1-1 所示的煤层气成因分类方案。

表 1-1-1 煤层气成因类型划分

成因类型		示踪指标		R_o /%	特征	备注	
		同位素组成 甲烷碳同位素; $\delta^{13}C_1$ (PDB), 甲烷氢同位素; δD_1 (SMOW)/‰	组分比值				
有机成因	生物成因	原生生物成因气	$\delta^{13}C_1 < -55$	$C_1/C_{1-5} > 0.95$	≤ 0.5	干气, 甲烷碳同位素组成偏轻	生成早, 一般在后期的煤层中很难保存下来
		次生生物成因气	$\delta^{13}C_1 < -55$ $\delta D_1: -250 \sim -150$	$C_1/C_{1-5} > 0.95$, CO_2 含量极低	≤ 0.3 ≥ 1.5	煤岩中有与微生物活动有关的生物标记化合物及降解特征	煤层受后期抬升, 埋深较浅
	热成因	热降解气	$\delta^{13}C_1: -46.2 \sim -35.1$ $\delta D_1: -247.3 \sim 225.9$	$C_1/C_{1-n}: 0.84 \sim 0.94$ CDMI: $0 \sim 90.55$	$0.5 \sim 2.0$	湿气; $\delta^{13}C_1$ 值和 δD_1 值具正相关关系	热降解气组分以解吸气为代表, 同位素组成则以排采气为代表
		热裂解气	$\delta^{13}C_1: -37.5 \sim -29.6$ $\delta D_1 > -200$	$C_1/C_{1+2} > 0.99$, $C_1/C_2 \geq 3.385$, CDMI $\leq 0.13\%$	$> 2 \sim 2.5$	特干气; 甲烷的碳、氢同位素组成偏重	由于热演化程度高, 煤层气组分和同位素受解吸、分馏的影响较小, 但排采气最稳定
	次生热成因		甲烷碳、氢同位素进一步变轻	干燥系数进一步增大, 但 CO_2 含量增高	> 0.5	解吸、扩散和溶解分馏造成组分与同位素组成变化	为煤层气富集区
	混合成因	混合气	$\delta^{13}C_1: -61.3 \sim -50.7$ $\delta D_1: -242.5 \sim -219.4$ $\delta^{13}C_2: -26.7 \sim -15.9$ $\Delta\delta^{13}C_{c-c}: 30.7 \sim 57.4$	$C_1/C_{1-n}: 0.993 \sim 1.0$ $C_1/C_2: 188.6 \sim 2.993.7$ CO_2 含量 $< 2\%$ CDMI: $0.64\% \sim 3.06\%$	> 0.5	混合气的同位素和组分变化受所含热成因气和次生生物成因气的比例以及煤岩热演化程度影响	热降解气、热裂解气与次生生物成因气的混合
无机成因	无机气						

注: $\delta^{13}C_1$ 为甲烷碳同位素; δD_1 为甲烷氢同位素; $\delta^{13}C_2$ 为乙烷碳同位素; PDB 为 Pee Dee Belemnite 标准; SMOW 为 Standard Mean Ocean Water 标准; $CDMI = \varphi(CO_2) / [\varphi(CO_2) + \varphi(CH_4)]$, 其中 $\varphi(CO_2)$ 和 $\varphi(CH_4)$ 为热成因气中 CO_2 和 CH_4 的相对体积分数。

生物成因煤层气是指有机质(泥炭、煤等)在微生物降解作用下部分转化为煤层气, 按其形成阶段可划分为原生生物成因气和次生生物成因气。热成因煤层气是指煤在温度和压力作用下发生一系列物理化学变化的同时释放出来的以甲烷为主的烃类气体。热成因煤层气可分为两类: 原生热成因气和次生热成因气。根据热模拟实验结果和煤系地球化学分析资料, 煤系有机质演化过程可划分为未成熟阶段(泥炭至褐煤阶段, $R_o < 0.5\%$)、成熟阶段(长焰煤至瘦煤阶段, $0.5\% \leq R_o < 1.9\%$)和过成熟阶段(贫煤到无烟煤阶段, $R_o \geq 1.9\%$)。在未成熟阶段, 成煤有机质在生物化学降解作用下生成水、生物成因甲烷和二氧化碳, 以甲烷

为主要成分,不含或含有极少重烃;在成熟阶段,成煤有机质在热降解作用下大量生烃,气态烃组分仍以甲烷为主,但重烃(乙烷、丙烷等)含量明显增加,这一阶段是热成因甲烷生成的主要阶段;过成熟阶段以热裂解气生成为主,残余干酪根、液态烃以及部分重烃在高温裂解作用下形成以甲烷为主的产物,重烃含量极少。

1.1.2 煤的工业分析

煤的工业分析是指包括煤的水分(M)、灰分(A)、挥发分(V)和固定碳(Fc)四个分析项目指标测定的总称。煤的工业分析是了解煤质特性的主要方法,也是评价煤质的基本依据。通常煤的水分、灰分、挥发分是直接测量出来的,而固定碳是用差减法计算出来的。从广义上讲,煤的工业分析还包括煤的全硫分和发热量的测定,又称煤的全工业分析。根据煤的工业分析结果,可以大致了解煤中有机质的含量及发热量的大小,从而初步判断煤的种类、加工利用效果及工业用途;还可以计算煤的发热量和焦化产品的产率等。此外,由于煤的水分、灰分和固定碳对煤层的吸附性能和含气量具有重要的影响,因而煤的工业分析在煤层气勘探评价阶段也具有重要意义。

1.1.3 煤的孔渗特征

1.1.3.1 煤的孔隙结构特征

因受沉积物组成、煤化作用和后期构造运动的影响,煤中的孔隙可分为原生孔隙和次生孔隙。沉积时形成的沉积物细粒之间的孔隙称为原生孔隙,这类孔隙随煤化作用的加深而不断减少,在煤级较高的煤中基本消失,其直径为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \mu\text{m}$,分布有规律。原生孔隙可进一步分为残留植物细胞腔孔和原生粒间孔。在煤化过程中形成的孔隙称为次生孔隙,其直径一般为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}$,形状为圆形、椭圆形或水滴形,分布无规律,多成群出现。次生孔隙可进一步分为气孔、次生粒间孔和铸模孔。煤中孔隙大小相差极大,大者可至数微米级的裂隙,小的是连氮分子也无法通过的微孔隙,孔隙直径相差 5~6 个数量级。根据孔径大小将煤孔隙分为微孔、小孔、中孔和大孔四个级别。各种孔隙之间都不同程度地相互导通,从而使煤层具有一定的渗透性。煤中各种孔隙不仅为气体和液体(主要为水)的储存提供了场所,而且也为它们在煤层中的流动提供了通道。对各类孔隙结构特征、煤层气的运聚作用以及气体扩散特性进行概括,如表 1-1-2 所示。

表 1-1-2 煤中基质孔隙的类型及特征(吴俊,1993)

类型	孔径分布直径/nm	孔隙结构特征	对煤层气运聚的影响	气体扩散孔隙类型
I	>1 000	多以管状孔隙、板状孔隙为主	利于液态烃、气态烃的储集和运移,排驱效果好	气体容积型 扩散孔隙
II	100~1 000	以板状孔隙、管状孔隙为主,间有不平行板状孔隙	利于液态烃和气态烃的储集和运移	
III	10~100	以不平行板状孔隙为主,有一部分墨水瓶状孔隙	利于气体储集,但不利于重烃气体的运移	气体分子型 扩散孔隙
IV	<10	具有较多的墨水瓶状孔隙和不平行板状毛细管孔隙	气体能储集但不易运移	

随着热演化程度的增加,煤的孔隙结构特征呈现出规律性变化。褐煤演化程度低,裂隙基本不发育,主要表现为基质孔隙型,孔隙度较大,以中一大孔为主,外观呈深灰色—黑色,基质较松散,暗煤含量高,镜煤条带少,割理密度小,多属于半亮煤—半暗煤,密度较大。随着煤阶的增加,大一中孔减少,微孔逐渐增多,比表面积增大,割理发育,孔隙度减小。无烟煤中以微孔为主,基质变得致密,镜煤条带大大增加,割理密度增大,主要表现为裂隙型,密度变小,多属于光亮型煤。扫描电镜结果显示,低煤阶煤的割理基本不发育,基质孔隙度较大,一般为10%~15%,以原生生物孔隙为主(图1-1-3)。

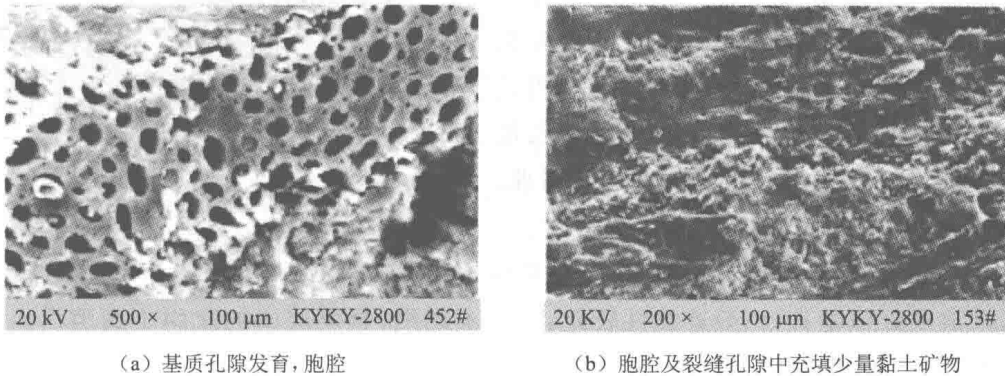


图1-1-3 褐煤扫描电镜图片(陈振宏等,2008)

煤的孔隙度大小及其孔隙大小和分布对煤层气的吸附和流动具有显著的影响。从表1-1-3中可以看出煤阶和孔隙度的关系:孔隙度先随煤阶的升高而降低,焦煤降到最低点,之后又随煤阶的升高有所回升。对煤的孔隙大小的研究表明,孔隙容积主要与中孔有关,而孔隙的比表面积主要与微孔有关。由于煤层中甲烷储集的主要机理是吸附在孔隙表面上,因此煤中大部分气体储集在微孔中,在压力作用下呈吸附状态。又由于煤的微孔极其发育,具有特别大的比表面积,因此煤比常规砂岩具有更高的储气能力。

表1-1-3 我国不同煤阶煤的孔隙度(贾承造,2007)

煤阶	$R_{o,max}/\%$	孔隙度/ $\%$	样品数/个
褐煤	<0.5	8.05	1
长焰煤	0.5~0.7	2.11~10.46 (5.93)	15
气煤	0.7~0.9	3.60~5.41 (4.29)	3
肥煤	0.9~1.2	0.70~8.68 (3.45)	7
焦煤	1.2~1.7	1.33~6.78 (2.72)	16
瘦煤	1.7~1.9	2.66~12.18 (4.65)	7
贫煤	1.9~2.5	1.15~8.18 (3.16)	6
无烟煤3号	2.5~4.0	3.36~4.17 (3.79)	4
无烟煤2号	4.0~6.0	2.92~7.69 (5.31)	2
无烟煤1号	>6.0	6.74~7.18 (6.96)	2

注: $R_{o,max}$ —镜质体最大反射率, $\%$;()中的数值为平均孔隙度。

煤中的裂隙主要是在煤化过程和后期构造改造过程中煤受构造应力作用发生破裂而形成的裂缝网络,按其成因分为内生裂隙、外生裂隙和继承性裂隙。内生裂隙又称割理,是在煤化过程中受古构造应力场的影响,由垂向差异压实作用、煤中凝胶化物质均匀收缩作用或这两种作用在一定程度上的重叠而产生的,以焦煤的内生裂隙最为发育。煤岩在成煤演化过程中发育两组垂直或近似垂直的内生裂隙,将煤体分割成一系列大小不等的基质块体,如图 1-1-4 所示。因两组裂隙的延伸长度和发育程度不同,又可分为面割理和端割理。其中,面割理通常与层面平行或近似平行,一

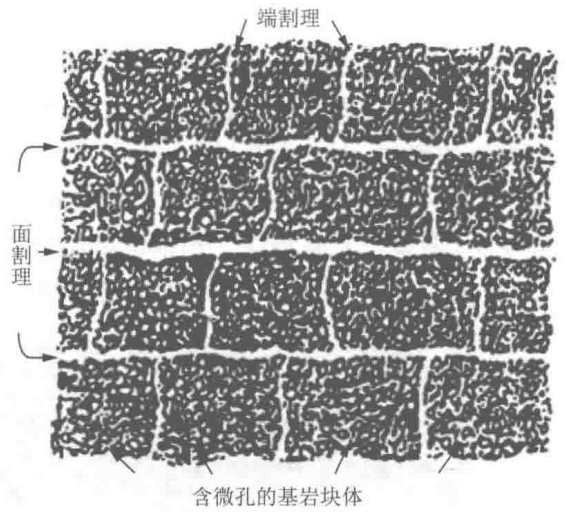


图 1-1-4 煤层割理系统示意图(King 等,1986)

般呈板状延伸,连续性较好,是煤层中的主要内生裂隙;端割理只发育于两条面割理之间,常与层面垂直或近似垂直,一般连续性较差,缝壁不规则,是煤层中的次内生裂隙。由于煤岩中面割理和端割理都比较发育,单体规模小,总体密度大,在空间上交割成立体网状,因此它们是煤层气的主要运移通道。割理往往在煤层中的暗煤条带或夹矸底面终止,纵向上或横向上均不穿过不同的煤岩类型界面。另外,在煤层的局部也可由较强的构造应力作用形成外生裂隙,根据其成因可分为剪性外生裂隙、张性外生裂隙和劈理。如果割理形成前后的构造应力场方向不变,则早期形成的割理就会被进一步强化,表现为部分割理由其发育的煤层向相邻分层延伸扩展,但方向保持不变,这部分裂隙称为继承性裂隙。继承性裂隙兼具割理和外生裂隙的双重性质,属过渡类型,按其性质可分为内生继承性裂隙和外生继承性裂隙两种。内生继承性裂隙是指晚期形成的割理与早期割理的方向一致,沿早期割理发育,但仍局限在光亮煤分层内,属割理范畴。外生继承性裂隙是指割理形成后构造应力场的方向不变,割理受逐渐增强的构造应力场的作用沿原来的产状扩展、延伸,并穿过丝质体或暗煤分层,过渡为外生裂隙。蔚远江总结出的裂隙分类方案如表 1-1-4 所示。

表 1-1-4 煤层裂隙系统划分及识别特征

裂隙类型	高度	延伸长度	切割性	裂隙形态特征	成因	
宏观裂隙	大型裂隙	数十厘米~数米	数十米~数百米	切穿整个煤层甚至顶底板	发育一组,断面垂直,有煤粉,与煤层层面斜交	外应力
	中型裂隙	数厘米~数十厘米	数米	切穿几个宏观煤岩类型分层(包括夹矸)	常发育一组,局部两组,断面垂直或呈锯齿状,有煤粉	
	小裂隙	数毫米~数厘米	数厘米~数十厘米	切穿一个宏观煤岩类型或几个煤岩成分分层,一般垂直或近于垂直层面	普遍发育两组,面裂隙较端裂隙发育,断面平直	综合作用
	内生裂隙	数毫米	数厘米	局限于一个宏观煤岩类型或几个煤岩分层(镜煤、亮煤)中,垂直于层面	发育两组以上,方向较为凌乱	内应力