含瓦斯煤THM耦合模型及实验研究

许 江 陶云奇 尹光志
彭守建 李波波 著

科学出版社

含瓦斯煤 THM 耦合模型及实验研究

许　江　陶云奇　尹光志　彭守建　李波波　著

国家重大科技专项项目(2011ZX05034-004)
国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201203)
国家自然科学基金重点项目(50534080)
国家自然科学基金面上项目(50574108，50974141)

科学出版社
北京

前　言

在煤层中热流固耦合条件下的瓦斯渗流规律是煤矿瓦斯灾害防治领域研究中的基础问题之一，其对瓦斯涌出、煤层气开采、煤与瓦斯突出防治等基础理论的研究均具有重要的指导作用。而在煤与瓦斯突出防治技术研究中，煤与瓦斯突出模拟试验装置的研制又是煤与瓦斯突出理论研究中至关重要的一个环节，其研究成果对煤与瓦斯突出机制的提出与完善、煤与瓦斯突出灾害的防治、扭转我国煤矿安全局面以及保障煤炭工业健康、稳定、可持续发展等均具有重要的科学和现实意义。

国内外学者就瓦斯在煤体介质中的渗流规律、煤的物理力学特性以及煤与瓦斯突出模拟研究等方面均已取得一些有益的研究成果，但由于其所考虑的影响因素相对单一，实验装置功能较为简单，数据采集方式较为落后，并未见同时综合考虑温度、瓦斯压力、应力影响的含瓦斯煤孔隙率、渗透率动态演化规律及其含瓦斯煤温度-渗流-应力三场耦合研究成果；也未见很好再现地应力、瓦斯压力、煤的物理力学性质等因素综合作用下煤与瓦斯突出三维模拟试验研究方面的报道。本书研究内容正是为进一步深入认识在地球物理场环境下的含瓦斯煤孔隙率、渗透率动态演化规律及瓦斯在煤体介质中的渗流规律，并针对随采矿活动向纵深发展而带来的高地应力、高瓦斯压力、低渗透煤体不易抽采瓦斯且易发生煤与瓦斯突出灾害等重大工程实际和理论问题而提出的。

全书共 6 章：第 1 章结合本书主要研究内容，对煤的孔隙、渗透及吸附/解吸特性、多场耦合问题及其求解方法和煤与瓦斯突出模拟试验等方面的研究成果进行了总结和评述。第 2 章根据渗透率试验和煤样扫描电镜及其表面孔隙分形特征研究，发现了煤渗透率与其分形维数和孔隙发育程度呈正相关，与其密度呈负相关；提出了含瓦斯煤在外应力和内应力共同作用下存在结构变形和本体变形两种变形机制，建立了压缩条件下（扩容前）的含瓦斯煤孔隙率动态演化模型和吸附热力学参数表达的有效应力方程，并结合现场和已有实验资料，运用该模型对未采区域含瓦斯煤孔隙发育程度和应力状态进行了预测，误差相对较小。第 3 章基于含瓦斯煤三轴渗透率试验，分析了有效应力、温度和瓦斯压力对其渗透率的作用规律，系统探讨了有效应力、温度和瓦斯压力分别对渗透率的影响机理，建立了压缩条件下（扩容前）煤渗透率动态演化模型，经渗透率试验验证，该模型预测煤渗透率精度较高，对提高瓦斯抽放效果具有理论指导意义。第 4 章基于温度对煤的瓦斯吸附特性实验研究，并在煤岩孔隙率、有效应力及渗透率分析的基

础上，提出了建立含瓦斯煤 THM 耦合数学模型所需的物性参数耦合项方程。这些耦合项在含瓦斯煤温度场、渗流场和应力场之间起着关键的“纽带”作用，进而建立了含瓦斯煤 THM 耦合应力场方程、渗流场方程及温度场方程，结合定解条件的设定，最终建立了体现热流固三场完全耦合的含瓦斯煤 THM 耦合模型。第 5 章详细介绍了自主研发的“煤与瓦斯突出模拟试验台”，该试验台弥补了国内现有突出试验装置存在的不足，在结合相似理论探讨该试验台的模拟能力的基础上，进行了不同瓦斯压力、不同突出口径及不同煤粉粒径配比等条件下的煤与瓦斯突出模拟试验，依据所开展的 11 次煤与瓦斯突出模拟试验结果分析了煤与瓦斯突出过程中煤体温度、突出强度、孔洞形态和突出煤样粉碎性以及煤粉粒级分布的变化规律。第 6 章选择多物理场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics，并经二次开发对含瓦斯煤 THM 耦合模型进行了数值计算，经已有解析解的一维瓦斯渗流算例和煤与瓦斯突出实验室相似模拟试验印证表明，所建立的含瓦斯煤 THM 耦合模型和数值计算方法具有一定的可靠性；并以重庆能源投资集团松藻煤电公司石壕矿 S1824 综采工作面为工程背景，分析了采煤工作面在一次采全高且刚掘出开切眼时煤层瓦斯渗流过程中各相关指标的变化规律，形成了一套热流固耦合条件下煤层瓦斯渗流规律分析和数值计算的研究方法。

随着采矿活动向纵深发展，随之引发的高温、高地应力、高瓦斯压力、低渗透等问题，不仅限制了当前国家号召的煤层气作为新型能源的发展，也极易引发煤矿瓦斯灾害事故的发生。煤层瓦斯运移规律和煤与瓦斯突出防治不仅遇到了极大挑战，而且势在必行，但因该领域涉及的范围较广，本书研究内容只是在前人研究的基础上对该领域进行了补充和延伸。由于作者的水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者朋友批评指正。

最后，感谢各基金项目对本书研究工作的资助，感谢煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室（重庆大学）、复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室（重庆大学）、西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室（重庆大学）所提供的大力支持和帮助！

作　者

2012 年 3 月

于重庆大学

目　录

前言
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　研究现状及评述 …… 2
1.2.1　煤的孔隙、渗透及吸附/解吸特性 …… 2
1.2.2　耦合问题及其求解方法 …… 7
1.2.3　煤与瓦斯突出模拟试验 …… 11
1.3　本书主要研究内容 …… 13
第 2 章　含瓦斯煤孔隙率及有效应力方程 …… 14
2.1　煤体孔隙特征及其孔隙率 …… 14
2.1.1　孔隙成因分类 …… 14
2.1.2　孔隙的孔径结构划分 …… 15
2.1.3　孔隙分形特征 …… 16
2.1.4　孔隙率数学模型 …… 27
2.2　有效应力方程 …… 33
2.2.1　有效应力分析 …… 33
2.2.2　含瓦斯煤变形机制 …… 35
2.2.3　有效应力方程建立 …… 37
2.2.4　方程检验 …… 38
2.3　本章小结 …… 40
第 3 章　含瓦斯煤渗透率演化模型 …… 42
3.1　渗透率理论模型 …… 42
3.1.1　渗透率影响机制 …… 42
3.1.2　模型建立 …… 43
3.2　渗透率试验研究 …… 46
3.2.1　煤样的力学特性试验 …… 46
3.2.2　渗透率试验系统 …… 50
3.2.3　渗透率影响因素分析 …… 54
3.2.4　渗透率敏感性分析 …… 58

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

3.3 渗透率模型验证 …… 62
3.4 本章小结 …… 67
第 4 章 含瓦斯煤 THM 耦合模型 …… 69
4.1 基本物性参数耦合方程及假设 …… 70
4.1.1 孔隙率、渗透率方程 …… 70
4.1.2 煤层瓦斯气体状态方程 …… 71
4.1.3 修正的瓦斯含量方程 …… 71
4.1.4 基本假设 …… 76
4.2 含瓦斯煤耦合应力场方程 …… 78
4.2.1 平衡方程 …… 78
4.2.2 几何方程 …… 79
4.2.3 热流固本构方程 …… 80
4.2.4 应力场方程 …… 81
4.3 含瓦斯煤耦合渗流场方程 …… 84
4.3.1 连续性方程 …… 84
4.3.2 渗流场方程 …… 86
4.4 含瓦斯煤耦合温度场方程 …… 87
4.4.1 能量守恒方程 …… 87
4.4.2 自由能与体积内能 …… 88
4.4.3 温度场方程 …… 89
4.5 定解条件 …… 90
4.5.1 应力场定解条件 …… 91
4.5.2 渗流场定解条件 …… 91
4.5.3 温度场定解条件 …… 92
4.6 本章小结 …… 93
第 5 章 煤与瓦斯突出模拟试验台的研制及应用 …… 96
5.1 煤与瓦斯突出机理 …… 96
5.2 模拟试验台的研制 …… 97
5.2.1 研制思路及目的 …… 97
5.2.2 模拟试验台的结构方案设计 …… 99
5.2.3 模拟试验台操作系统 …… 113
5.2.4 模拟试验台千斤顶精度检测 …… 114
5.2.5 模拟试验台优点 …… 115
5.3 模拟试验相似设计及其试验方法 …… 116
5.3.1 相似设计 …… 116

5.3.2 试验方法 …… 120
5.4 模拟试验结果及分析 …… 127
5.4.1 突出煤样剪切试验 …… 127
5.4.2 模拟试验结果及分析 …… 130
5.5 本章小结 …… 141
第 6 章 含瓦斯煤 THM 耦合模型数值分析 …… 143
6.1 COMSOL Multiphysics 软件简介 …… 143
6.2 THM 耦合模型的嵌入 …… 145
6.2.1 含瓦斯煤 THM 耦合模型 …… 145
6.2.2 THM 耦合模型的嵌入 …… 146
6.3 THM 耦合模型的解析解验证 …… 148
6.4 THM 耦合模型的实验室验证 …… 150
6.5 THM 耦合模型的工程应用 …… 153
6.5.1 石壕矿概况 …… 153
6.5.2 数值计算模型及计算工况 …… 154
6.5.3 数值模拟结果分析 …… 157
6.6 本章小结 …… 167
参考文献 …… 170

第1章 绪 论

1.1 引 言

煤是一种孔隙-裂隙双重介质，其开采过程中的煤体变形和瓦斯流动均是在流固耦合作用下的煤体变形和瓦斯流动，而煤与瓦斯突出也是由于流固耦合作用下的煤体失稳破坏而发生的灾害现象[1]。因此，若要使瓦斯在煤层中的运移规律更符合实际，则必须考虑瓦斯在煤层中的流固耦合问题。通常所说的流固耦合是指在流体和固体组成的系统中流体和固体相互影响、相互作用的现象，流、固两场同时存在。为简化研究过程，一般假设流体和固体在相互作用的过程中温度是恒定的（即不考虑温度场变化与固体变形、流体流动间的耦合作用），然而，因温度变化引起的热效应在煤岩体赋存的地球物理环境诸因素中是不应忽视的，自然界中实际存在的流固耦合系统的温度场通常也是不断变化的，所涉及的工程领域也相对较多，如核废料深埋处理、地热资源的开发、石油热采、煤层气开采等。越来越多的现象表明，随着井下煤层开采深度的增加，井下作业环境温度逐渐升高，这种热效应已成为影响井下煤层中瓦斯流动的重要因素。同时，根据实际观测和实验研究表明，煤层瓦斯被大量解吸时，煤壁温度有所下降。瓦斯在煤层中的运移无论是吸附/解吸或渗透、扩散过程都有热效应发生，现有的煤层瓦斯流固耦合理论将瓦斯在煤层中的流动视为等温过程，与实际偏差较大。因此，若要进行更切合实际的煤层瓦斯流动规律研究，就不能仅仅考虑随着采深增加而引起的煤层高地应力和低渗透性影响，必须放弃等温条件假设，连同随着采深增加而引发的高温热效应共同考虑在内，即将地球物理场中的温度场、渗流场、应力场三场同时耦合考虑，进行瓦斯在煤层中运移的热流固（coupled thermal-hydrological-mechanical，THM）三场耦合研究，该项研究是一条必须且有效的途径。

煤与瓦斯突出是井工煤矿生产中遇到的一种极其复杂的矿井瓦斯动力现象。它能在极短的时间内，由煤体向巷道或采场空间抛出大量的煤炭，并喷出大量的瓦斯，不仅会造成人员伤亡，还造成国家财产损失[2]。据史料记载，自1834年在法国鲁阿雷煤田阿克矿井发生第一次煤与瓦斯突出灾害以来，先后在苏联、中国、法国、波兰、日本、英国等19个国家和地区发生过煤与瓦斯突出事故。据不完全统计，迄今为止发生煤与瓦斯突出的总数已多达4万余次，其中最大一次煤与瓦斯突出灾害发生在1969年苏联的顿巴斯煤矿，其突出煤（岩）量达1.42×

10^4t，瓦斯涌出量达 25×10^4m^3，造成众多人员伤亡，资产损失严重[2~6]。在我国，仅 2004 年 10 月至 2005 年 2 月，短短 5 个月内就发生死亡人数超 100 人的特大型瓦斯爆炸事故 3 起，3 次事故死亡人数为 528 人。其中在 2004 年 10 月 20 日，河南省郑州煤业集团公司大平煤矿发生一起由特大型煤与瓦斯突出而引发的特别重大瓦斯爆炸事故，就造成了 148 人死亡，32 人受伤，社会影响极为恶劣，与“以人为本，建立和谐社会”的国家方针极不协调。党和国家对此给予了高度重视，同时当前集约化煤炭生产技术的进步也对煤与瓦斯突出防治研究提出了更高要求。因此，在相当长一段时间内，煤与瓦斯突出防治将是煤矿安全的重点研究内容。因研究难度较大，以往的研究成果主要侧重于对煤与瓦斯突出机理的探索或防治措施方面，大多数为定性分析，定量研究较少，实验研究更少。现有的突出试验装置存在很大的局限性，迫切需要研制出一种更加先进的、大型的煤与瓦斯突出试验装备，以期在实验研究的基础上，结合瓦斯流动理论，对煤与瓦斯突出防治进行更深层次的探索。

本书拟在对煤的基本物理力学性质进行系统测试分析、瓦斯渗流特性及瓦斯吸附解吸特性进行系列实验研究的基础上，开展含瓦斯煤热流固耦合模型及煤与瓦斯突出模拟试验等研究。

1.2 研究现状及评述

本书以实验研究为主要手段，采用理论和实践相结合的研究方法，研究内容涉及含瓦斯煤孔隙率、渗透率演化规律与热流固耦合模型及煤与瓦斯突出相似模拟等诸多方面。由于煤的力学特性试验是岩石力学常规试验，本书不再赘述。结合本书研究内容，这里将主要介绍煤孔隙性、渗透性及瓦斯吸附/解吸特性、含瓦斯煤 THM 耦合问题及其求解方法、煤与瓦斯突出模拟试验等方面的研究进展。

1.2.1 煤的孔隙、渗透及吸附/解吸特性

1. 煤的孔隙特性

煤是一种孔隙-裂隙双重介质，其孔隙率是决定煤的吸附/解吸、渗透和强度性能的重要因素之一，煤岩性质对瓦斯的运移能力影响也主要体现在煤体的孔隙结构上。目前关于煤孔隙结构的研究方法主要有水孔隙率测定法、氦孔隙率测定法、气体吸附法、压汞法、扫描电镜、投射电镜、X 射线衍射、核磁共振、NMR 旋转-松弛测量法、气相色谱法等[7]，其中的每一种测试方法均有其优越性和局限性。例如，气体吸附法是多孔材料孔隙结构研究的经典方法，77K 下液氮吸附法和 298K 下 CO_2 吸附法是描述煤中孔表面积和孔径分布最流行的方

法，但气体吸附法无法同时揭示中孔和微孔的孔径分布信息，更无法测试闭孔的特征[8]。故而，目前运用较多的主要为压汞法和扫描电镜观察法。

压汞法由于其原理简单、操作方便、对实验技巧要求不高等特点而成为定量研究孔隙结构必不可少的工具，这种方法广泛应用于煤的孔隙研究中，而且对于孔隙的定性表征也较准确和易于分析。吴俊[9]用压汞仪对淮南煤田和南桐煤田的富烃煤及贫烃煤分别做了孔隙体积研究，在可测体积范围内两个煤田的煤样显示了同样的结果，即富烃煤的孔隙体积要高于贫烃煤的孔隙体积；同时还对几个煤矿的破碎煤和硬块煤做了孔隙研究，发现破坏程度大的煤，具有较大的孔隙体积，并含有较多孔径大于 1000Å 的孔隙类型。Taske[10]在实验室使用微孔测定仪对煤样进行测量，测定仪记录了压力、孔径、平均直径、累积体积、体积增加量和微分体积，并进行了孔隙分布的讨论，得知煤中大孔和中孔的分布是非常易变而没有规律性的，且在孔径-汞量增加值曲线上可以很明显地看出几乎所有的煤样在孔径为 0.3μm 处峰值均有一个突然的增加。说明此时汞量的突增是因为煤样的压缩性使得煤样产生压缩变形，此时相对应的汞压为 20MPa。因此必须对压汞试验中会引起煤基质的压缩进行校正，粉碎的煤样测得的煤孔隙分布比没有粉碎过的煤样测得的孔隙分布要大 10μm。而电镜扫描法不仅可以获取其孔隙形貌更直接、定性的感官认识，配合数据处理软件，还可以获得最大和最小孔径、不同孔径范围的孔分布特征等孔隙性参数的定量分析结果。袁静[11]通过观察岩心，鉴定普通和铸体薄片，利用扫描电镜等分析测试手段，研究了松辽盆地东南隆起区上侏罗统储层孔隙发育特征，认为该区深部构造层物性偏差，特别是火石岭组和沙河子组，但各断陷普遍发育 2～4 个次生孔隙发育带，是主要的油气储集空间。张素新等[12]利用扫描电镜通过观察和分析大量的煤样，发现煤储层中的微孔隙有植物细胞残留孔隙、基质孔隙和次生孔隙三种类型，其中基质孔隙又可分为不同组分之间的孔隙、颗粒之间的堆积孔隙和颗粒脱落后所留下的孔隙三种类型，且其孔隙直径大小不一，一般在 1～10μm，同时还发现煤中普遍发育有微裂隙，微裂隙的长度长短不一，其裂隙缝的宽度一般也在 1～10μm。

在孔隙率理论研究方面虽然取得了一定的成果，但考虑的因素相对单一，且与煤和瓦斯相关的报道较少。Doremus[13]认为，孔隙率对岩石力学特性有显著影响，一般孔隙率与岩石强度成正比。张先贵和刘建军[14]通过对低渗多孔介质的孔隙率随有效压力的变化做了大量的室内物理模拟试验后，测定了有效压力变化过程中岩心孔隙率的变化，得到随有效压力的增加，岩心孔隙率具有不同程度的下降，当有效压力降低后，岩心的孔隙率有所恢复，但不能恢复到原始数据，并进一步得出两者服从负指数函数关系。李春光等[15]利用两相等效体的概念，根据 Walsh 公式和球形孔隙的弹性公式导出了多孔介质的孔隙率和体积模量之间的近似公式和精确公式，并指出近似关系式不适用于较大的孔隙率，精确公式

可较好地适用于较大孔隙率。而李祥春等[16]和卢平等[17]从孔隙率基本定义出发，经过一系列数学推导，分别得到了不同的含瓦斯煤孔隙率数学方程，虽然考虑的影响因素不够完善，但在一定工程条件下也已满足需求，其中李祥春等从孔隙率基本定义出发，在理论上还给出了渗透率和膨胀变形之间的关系式，但并未见其实测数据或实验数据的验证结果。

2. 煤的渗透特性

煤层瓦斯渗透特性是专门研究煤层内瓦斯压力分布、瓦斯流动变化及影响因素的科学，包括渗透理论与渗透率试验研究两个方面。自该学科提出至今，经国内外学者的不懈努力，已发展起来的理论成果有：线性瓦斯流动理论、线性瓦斯扩散理论、瓦斯扩散-渗透理论、非线性瓦斯流动理论、地球物理场效应的瓦斯流动理论、多煤层系统瓦斯越流理论和煤层瓦斯流固耦合理论[18]。针对本书后续的研究内容，这里主要从渗透率试验方面的研究进展给予介绍。

随着煤矿开采深度的加大，由深部地球物理场引发的井下煤层高地应力、高温、低渗透等问题越来越引起采矿界学者的关注。经过多年的努力，国内外学者对地应力作用下煤层瓦斯运移方面的研究报道已较多[19~27]，成果也相对成熟，且观点基本趋于一致，即煤层渗透性敏感地依赖于地应力，在高应力区渗透率低，低应力区渗透率高。例如，国外 Somerton[19]研究了裂纹煤体在三轴应力作用下氮气及甲烷气体的渗透性，得出了煤样渗透性敏感地依赖于作用应力，而且与应力史有关等结论，并指出随着地应力的增加，煤层透气率则按指数关系减小。澳大利亚学者 Enever 和 Henning[23]在通过对煤层渗透率与有效应力的相关研究发现，煤层渗透率变化值与地应力的变化呈指数关系，而且煤层渗透率与有效应力关系式为

$$K/K_0 = \exp(-3c\Delta\sigma) \tag{1.1}$$

式中，K、K_0 分别为渗透率和渗透率初始值，m^2；c 为实验回归系数；σ 为地应力，Pa。

随着对煤层瓦斯渗流力学的研究进展，我国学者在地球物理场对煤层瓦斯渗透率的作用和影响领域同样取得了一些新的研究成果，对 Darcy 定律的修正研究起到了很大的推动作用。为研究地应力与煤层瓦斯渗透特性之间的力学联系，林柏泉和周世宁[24]通过模拟地应力环境对煤样瓦斯的渗透率试验研究，得出煤层瓦斯渗透率与地应力之间的函数关系如下：

加载时服从指数方程

$$K = ae^{-b\sigma} \tag{1.2}$$

式中，a、b 均为实验回归系数；σ 为地应力，Pa。

卸载时服从幂函数方程

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

$$K = K_0\sigma^{-c} \tag{1.3}$$

式中，σ 为地应力，Pa；c 为实验回归系数。

赵阳升等[25]利用自制的煤岩渗透试验台和三轴渗透仪对阳泉矿务局 3# 煤层进行了三维应力情况下的煤样渗透率测试试验，揭示了三维应力和煤体吸附作用对煤层瓦斯渗流规律的影响，指出煤体吸附作用表现为渗透系数随孔隙压力呈负幂函数规律变化，变形作用则表现为渗透系数随有效体积应力呈负指数规律变化。吸附与变形共同作用的结果使渗透系数随孔隙压变化表现为存在一临界值 P_c，当 $P<P_c$ 时，渗透系数衰减；当 $P>P_c$ 时，渗透系数增加，并清晰地导出了渗透系数随孔隙压力和体积应力变化的关系式

$$K = K_0P^n\exp[b(\Theta-3\alpha P)] \tag{1.4}$$

式中，b 为体积应力对渗透率的影响系数；Θ 为体积应力，Pa；α 为等效孔隙压系数；P 为孔隙压力，Pa。

唐巨鹏等[27]利用自制的三轴瓦斯解吸渗透仪，通过研究卸载过程模拟煤层瓦斯抽采过程中的煤层瓦斯解吸和运移规律，得出煤层瓦斯渗透率和渗透系数随有效应力减小出现先减小后增大现象。说明在卸载初期，有效应力起主导作用，随有效应力降低，煤层瓦斯渗透率和渗透系数将逐渐减小；但当有效应力降低到一定值时，由于从煤体中解吸的煤层瓦斯增多加大了基质收缩率，此时基质收缩对煤层瓦斯渗透率和渗透系数影响起主导作用，导致煤层瓦斯渗透率和渗透系数开始升高，而随着有效应力的进一步降低，滑脱效应逐渐显现，使得煤层瓦斯渗透率和渗透系数迅速提高，从而滑脱效应起主导作用。

1993 年以来，以鲜学福院士为首的科研团队在煤的渗透性影响因素方面做了大量的研究[28~36]。其中，许江等[28]利用自制的气-固两相三轴仪对含瓦斯煤在三轴应力状态下的变形特性及其强度特征进行了系统的实验研究，结果表明，具有不同气体压力的瓦斯对煤的变形特性及其峰值强度都有不同程度的影响，而这种影响可通过有效应力参数予以描述。孙培德等[32,33]开展了煤层瓦斯渗透率与地应力和孔隙压力的关系研究，其成果表明：①当孔隙压力相对恒定时，煤层瓦斯渗透率随有效体积应力增加而呈负指数规律变小；②煤层瓦斯渗透率随孔隙压力变化呈对数坐标下的抛物线形变化规律，即作用在煤样骨架上的有效体积应力相对恒定时，随着孔隙压力的变化，煤层瓦斯渗透率依指数曲线和抛物线的复合函数规律而变化；③当孔隙压力与体积应力之比值较小时，煤层瓦斯渗透率随孔隙压力增大而变小，且会出现 Klinkenberg 效应；④当孔隙压力与体积应力之比大于某一定值时，煤层瓦斯渗透率随孔隙压力增大而增大，Klinkenberg 效应逐渐消失。此两项研究已不再局限于外围地应力，而是更深层次地考虑了孔隙压力与有效体积应力对煤层瓦斯渗流特性的影响，为地应力场效应的煤层瓦斯渗流特性研究迈出了坚实的一步。程瑞端[34]在围压不变的情况下，利用三轴渗流试

验装置分别在 20℃、30℃、40℃、50℃测定了瓦斯渗流量，经所测数据分析得出煤层瓦斯渗透率 K 与煤体温度 T 呈幂函数关系

$$K = K_0(1+T)^n \tag{1.5}$$

张广洋等[35]、杨胜来等[36]经实验研究发现随着温度的升高，煤样瓦斯的渗透率降低，渗透率的对数与温度呈线性关系

$$\ln K = A + BT \tag{1.6}$$

尽管以上两篇文献在渗透率与温度之间的函数关系表面上不同，但所得的规律现象却是相同的，因为若将式（1.6）取泰勒级数展开并忽略高阶项，则可得到关系式 $K = K'_0(1+nT)$，与式（1.5）的展开式 $K = K'_0(1+nT)$ 相同。由此可见，式（1.5）和式（1.6）在低阶项都可用来描述煤层瓦斯渗透率与温度的关系，说明两项研究所得的结果吻合，而该现象的发生一方面是因为随着温度升高，煤体骨架发生膨胀变形，煤层瓦斯渗流通道缩小；另一方面煤层瓦斯的黏度降低，致使煤层瓦斯渗透率降低。

3. 煤的吸附/解吸特性

煤是一种多孔介质，具有发达的孔隙系统，属于天然吸附剂，煤层中的瓦斯90%以上为吸附瓦斯。吸附于煤微孔隙内的瓦斯气体分子会因温度和瓦斯压力的变化导致热运动能力增加而克服引力，从煤的内表面脱离并进入游离相。煤的吸附能力也与煤体温度有关，普遍认为，温度升高煤的吸附能力下降。Killingey 等测定表明，在压力 5MPa 时，温度每升高 1℃，甲烷吸附量下降 0.12cm^3/g。煤炭科学研究总院重庆研究院的实验表明，温度每升高 1℃，煤吸附甲烷的能力下降 8%[37]。虽然在此方面取得了一致观点，但在探讨 Langmuir 方程吸附常数 a、b 随温度变化的关系时，却出现了严重的分歧。如苏联学者 Ходот[38] 的实验资料显示，a 值基本上不随温度而变化，b 值则随温度的增高而减小。国内学者陈昌国[39]、周胜国和郭淑敏[40]、崔永军等[41]、张庆玲等[42]采用静态容量法，基于 Langumir 方程对不同煤级的煤样进行了不同温度条件下的等温吸附试验，实验结果表明，随温度升高饱和吸附量 a 值的变化趋势不太明显，总体略有下降，说明温度对 a 值的影响不大；而 b 值则随温度升高而明显减小，说明温度升高解吸过程增强。这些成果均与苏联学者 Ходот 的结论一致。然而，赵志根等[43]对 3 个煤样在 30℃、50℃、70℃条件下进行的等温吸附试验结果却表明，随着温度升高，a 值降低，但最终都趋于一个稳定值；钟玲文等[44]的研究结论却是吸附常数与温度无明显的变化关系；刘建军[45]研究发现，a 值随温度升高而降低，b 值则随温度升高而呈波浪形变化（图 1.1），拟合其数学表达式为

$$\begin{cases} a = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 \\ b = d_0 + c_1 d_1 T + d_2 T^2 + d_3 T^3 \end{cases} \tag{1.7}$$

式中，c_0、c_1、c_2、d_0、d_1、d_2 和 d_3 为实验系数。基于以上已有的学术争论，在温度与等温吸附常数之间的变化规律尚需做更细致的研究，尤其是在将其结论作为含瓦斯煤热流固耦合数学模型建立的基础时，更不能想当然地借鉴前人的研究成果。

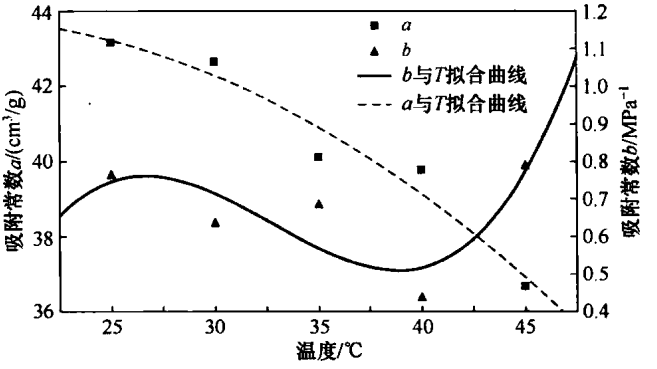

图 1.1 吸附常数 a、b 与温度 T 的关系

1.2.2 耦合问题及其求解方法

1. 含瓦斯煤流固耦合问题研究

煤也是一种复杂的可变形介质，但直到 20 世纪 90 年代，在有关煤层瓦斯流动规律研究的公开报道中，虽将煤层瓦斯看作可压缩流体，但普遍都将煤体视为不可变形的介质，与实际不符。在煤层开采过程中，煤层骨架所承受的应力无疑将发生变化，导致煤层骨架的体积和孔隙的变化，从而使煤层孔隙内瓦斯压力随之发生变化。瓦斯压力的变化引起煤体吸附瓦斯发生变化，并使煤层骨架所受的有效应力发生变化，由此导致煤岩特性变化；另外，这些变化又反过来影响煤层瓦斯的流动和压力的分布。因此，若使煤层瓦斯流动理论的研究更符合实际，就必须研究煤体瓦斯的流固耦合作用。

流固耦合理论是一门较新的力学边缘分支，是流体力学与固体力学二者相互交叉而形成的。对该问题的研究，最早来源于土固结理论的需要。1925 年，Terzaghi 首先将流体的流动与多孔介质的变形之间的耦合问题作为研究对象，提出了著名的有效应力公式，并建立了一维固结模型，在土力学中得到了广泛应用，该公式迄今仍是研究岩石和流体相互作用的基础公式之一。1943 年，Terzaghi[46]将他的一维固结理论推广到了三维。随后，Biot[47,48]进一步研究了三向变形材料与孔隙压力的相互作用，并在一些假设如材料为各向同性、线弹性小变形、孔隙流体是不可压缩的且充满固体骨架的孔隙空间，而流体通过孔隙骨架

的流动满足达西定律的基础上，建立了比较完善的三维固结理论。尔后，Biot[49,50]又将此理论推广到各向异性孔隙固体的弹性固结，奠定了流固耦合理论研究的基础。20 世纪 80 年代后，在油藏工程领域，流固耦合理论得到了长足发展，如 Detournay 和 Roegiers[51]利用流固耦合理论讨论了水力压裂的起裂、扩展和闭合全过程中的耦合现象，指出了流固耦合在水力压裂中应用的重要性。Chen 等[52,53]基于 Biot 理论，导出了三维单相流体渗流和用位移表示岩石运动的控制方程，应用各种压缩系数和有效应力将一般渗流方程扩展为包含应力-应变的耦合方程，可以近似地处理存在天然裂缝等复杂情况的油藏。Osorio 等[54~56]用类似方法导出了单相气和油在三维弹性油藏中渗流的流固耦合数学模型，用有限差分和迭代求解的方法处理流体渗流和固体平衡控制方程，并用于油气藏生产分析。

在煤与瓦斯耦合方面，Litwiniszyn[57]、Paterson[58]、Zhao 等[59]、Valliappan 等[60]从不同的角度研究了煤与瓦斯的耦合作用及煤层瓦斯的运移规律。Zhao 等[61]、赵阳升[62]根据固体变形和煤层瓦斯渗流的相关理论提出了煤体-瓦斯固气耦合数学模型，并结合实际分析了巷道瓦斯涌出规律，提出了模型的数值解法。梁冰等[63]在考虑瓦斯吸附变化对煤体本构关系影响的基础上建立了煤层瓦斯吸附变化对煤体变形耦合作用的数学模型，对采动影响情况下考虑煤体变形影响时煤层瓦斯在采空区的流动规律进行了数值模拟分析，为采空区煤层瓦斯抽放提供了科学依据。汪有刚等[64]将渗流力学与弹塑性力学相结合，考虑煤层瓦斯和煤体骨架之间的相互作用，建立了煤层瓦斯运移的数学模型，并根据有限元法原理推出了耦合模型求解方法。与此同时，徐剑良等[65]从煤层气藏的储存特性入手，建立了煤层气渗流流固耦合的数学模型。孙培德[66]利用煤岩体变形与瓦斯越流相互作用的观点，建立了双层系统煤层气越流与煤岩弹性变形的固气耦合数学模型。赵国景和步道远[67]研究了煤与瓦斯突出的固流两相介质力学理论，建立了突出的两相介质力学模型。杨天鸿等[68]根据煤体变形过程中应力、损伤与透气性演化的耦合作用，建立了含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合作用模型。许广明等[69]详细论述了煤层气在微孔中吸附、解吸以及由微孔到裂缝扩散的非平衡吸附模型，并将其与裂缝中的气-水两相渗流模型以源汇项的方式联合起来，建立了煤层气数值模拟的耦合模型。徐涛等[70]利用煤体变形过程中细观单元损伤与透气性演化的耦合作用方程，在岩石破裂过程分析系统（RFPA2D）的基础上，建立了含瓦斯煤岩破裂过程流固耦合作用的 RFPA2D-Flow 耦合模型及其数值求解方法。

2. THM 耦合问题研究

岩土工程领域中的温度-渗流-应力三场耦合俗称热流固耦合。国外学者对 THM 耦合方面的研究已有较多成果报道，但绝大部分都是围绕地热资源的开发

和利用、核废料深埋处理、石油热采等课题开展。例如，Bear 和 Corapcioglu[71]研究了地热资源开采过程中，地热区域内地应力、地温以及岩石的渗透率变化的规律。Vaziri[72]建立了基于非等温单相渗流和非线性弹性变形的流固耦合模型，并用有限元方法对所建立的模型进行了求解。Lewis 等[73,74]开展了变温油藏渗流规律和因油气开采引起的地面沉降问题的研究，考虑了温度变化和岩石变形对渗流的影响以及渗流对温度场变化的影响。Gutierrez 和 Makurat[75]建立了 THM 耦合模型用来模拟裂缝性储层冷水注入的耦合过程，可惜的是没有考虑岩石变形对温度场的影响，即没有考虑固-热耦合效应，没有建立完全意义上的 THM 耦合模型。国内学者在此领域的研究工作虽然起步相对较晚，但也取得明显的成果。如黄涛[76]基于对深层地下水资源的开采利用和对岩体工程中易发生的地质灾害预测防范研究的目的，提出了开展裂隙岩体 THM 耦合作用研究设想，为环境工程学科中防灾减灾工作及水资源合理利用提供了一个新的研究方法。孔祥言等[77]基于线性热弹性理论，介绍了饱和多孔材料多场耦合的完整方程组，包括渗流方程、本构方程和能量方程，并讨论了对它的求解内容及其在相关工程技术领域的应用。贺玉龙等[78]根据质量守恒方程、线动量平衡方程和能量守恒方程以及相应的物性方程推导了非饱和岩体 THM 耦合控制方程，指出非饱和岩体与饱和岩体的三场耦合控制方程在形式上无明显差别，但在进行数值模拟时，却有较大的差别。王自明[79]建立了两类油藏 THM 耦合模型，并编制程序给出了第一类非完全耦合模型的数值解。在第一类非完全耦合模型中，渗流方程与变形方程完全耦合，但温度场的热应变方程没有与前两者完全耦合，其表达式中没有体现岩体变形、流体渗流的耦合项；第二类完全耦合模型从理论上更深入地研究了 THM 耦合过程，该模型耦合温度场方程中含有体现岩石固相骨架变形场的项，这些项必须联立岩石耦合变形场方程才能求解；流体耦合渗流方程中含有体现岩石固相骨架变形场的项，这些项必须联立岩石耦合变形方程场才能求解；而岩石耦合变形场方程中含有体现孔隙流体压力的项和体现温度场变化的项，这些项必须联立耦合温度场方程和流体耦合渗流方程才能求解。虽然第二类模型与第一类模型相比改进了很多，但仍然存在很大的弊端，如流体耦合渗流场方程中没有体现温度场变化的项；耦合温度场方程中没有体现渗流场变化的项；没有实现双向完全耦合，并且由于第二类模型数值求解困难，没有给出其数值解。

以上为油藏系统的研究成果，已相对成熟，但在煤层瓦斯耦合方面仍然存在一定缺陷，即未将地球物理场中的温度场考虑进去，仅是应力场与渗流场的耦合，有所偏失。而随着采矿活动向纵深发展，井下煤层开采深度的增加，热效应已成为影响井下煤层中瓦斯流动至关重要的因素之一。若要进行更切合实际的煤层瓦斯渗流规律研究就不能仅仅考虑随采深增加而引起的煤层高地应力和低渗透性影响，需连同随采深增加引发的高温效应共同考虑在内，即要将地球物理场中

的温度场、渗流场和应力场三场同时耦合考虑。然而，在煤层瓦斯 THM 耦合研究方面的研究相对较少[80~85]。其中刘建军等[80~83]研究了非等温情况下煤层瓦斯流动规律，并建立了三场耦合模型，编制计算机程序进行了数值模拟求解。在其模型的渗流场方程中体现有煤岩变形场和温度场变化的项，煤岩变形场方程中体现有流体渗流场瓦斯压力项，煤层温度场方程中体现有渗流场瓦斯解吸的微分热能项。但变形场方程中没有体现温度场的耦合项，温度场方程中没有体现变形场的耦合项，即也没有实现各场双向完全耦合。

煤层瓦斯 THM 耦合问题的一个显著特点就是煤与瓦斯互相包含、互相缠绕，难以明显地划分开，因此必须将瓦斯流体相与煤固体相视为相互重叠在一起的连续介质，在不同相的连续介质之间可以发生相互作用。这个特点须使流固耦合问题的控制方程针对具体的物理现象来建立，而 THM 耦合作用也正是通过控制方程反映出来的，即在描述三场中任一场的控制方程中要有体现另外两场的项。含瓦斯煤 THM 耦合问题是本书的重点研究内容之一。

3. THM 耦合问题求解方法

对于数学物理中的问题，要获得它的定量解，必须先建立数学模型，然后设法求解。对于 THM 耦合问题，通常是先建立满足一定初始条件和边界条件的微分或偏微分方程，然后通过解析法和数值计算的方法来求出解析解或数值解。

对于 THM 耦合问题，比较直接的方法是利用解析法来求解。但地质体天然状态的复杂性使得很难求得解析解。为了获得实际问题的解析解，就必须作出简化和假设，尤其对于非均质、非线性材料、几何形状的任意性和不连续性以及由地质学特性所引起的一些其他因素等复杂问题来说，解析方法是难以得出真实解的。即 THM 耦合问题的解析解是很难求到的，即使能求出，也只能是针对于最简单的情形。因此，一般都采用数值方法求解。

有限差分法（FDM）和有限元法（FEM）是求解偏微分方程的两种主要数值方法。有限差分法的基本思路是按照固定的或不固定的时间步长和空间步长将时间和空间域进行离散，然后用未知函数在离散网格结点上的值所构成的差商来近似微分方程中出现的各阶导数，从而把表示变量连续编号关系的偏微分方程离散为有限个代数方程，然后解此线性代数方程组，从而求出场变量在各网格结点上不同时刻的解。有限元法是将求解域离散为若干个子域，并通过它们边界上的结点相互连接成为组合体，然后用每个单元内所假设的近似函数来分片地表示全求解域内待求的未知场变量，每个单元内的近似函数，由未知场函数在单元各个结点上的数值和与其对应的插值函数来表达，通过和原问题数学模型等效的变分原理或加权余量法，建立求解基本未知量的代数方程组或常微分方程组，最后用数值方法求解此方程，从而得到问题的解答。从数学的角度来讲，FDM 的近似

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com