

国家科技重大专项“煤矿区煤层气高效抽采、集输技术与装备研制(2011ZX05041)”项目资助出版

煤矿安全技术

主 编 胡千庭
副主编 黄声树

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家科技重大专项“煤矿区煤层气高效抽采、集输技术与装备研制(2011ZX05041)”项目资助出版

煤矿安全技术

——2011年全国煤矿安全学术年会论文集

主 编 胡千庭
副主编 黄声树

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是2011年全国煤矿安全学术年会优秀论文集。收录论文不仅反映了煤矿安全理论与基础方面的研究成果,更多的则是先进适用技术与装备在灾害防治中的实践与应用,以及煤矿安全生产管理中的思考与总结。论文涵盖了瓦斯治理与利用、粉尘防治、通风防灭火、矿山压力与支护、安全管理等诸多技术领域,可为煤矿安全技术研究开发及灾害防治提供有益的借鉴和帮助。

本书适用于煤矿安全管理人员及工程技术人员,也可供煤矿科研院所研究人员及大中专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿安全应用技术/胡千庭主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2011.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1172 - 9

I. ①煤… II. ①胡… III. ①煤矿—安全生产—研究
IV. ①TD7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 158222 号

书 名 煤矿安全应用技术
主 编 胡千庭
责任编辑 吴学兵 王江涛 郭 玉 黄本斌 陈 慧
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏淮阴新华印刷厂
开 本 880×1230 1/16 印张 27.25 字数 825 千字
版次印次 2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷
定 价 68.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

“十一五”期间,全国煤矿事故起数和伤亡人数持续下降,煤矿安全科技与管理的持续创新发挥了至关重要的作用。值此“十二五”开局之年,特撷取 2011 年全国煤矿安全学术年会优秀论文编辑出版《煤矿安全应用技术》一书,旨在推介煤矿灾害防治先进、实用技术,以进一步推动我国煤矿安全生产工作。

2011 年全国煤矿安全学术年会由中国煤炭学会煤矿安全专业委员会和中国煤炭工业劳动保护科学技术学会粉尘防治专业委员会共同主办,中煤科工集团重庆研究院承办。本次学术年会为广大煤矿企业安全技术人员和科研机构、高等院校科技工作者提供了相互了解、彼此学习的机会和平台,会议的召开是贯彻、落实《国务院关于加强企业安全生产工作的通知》以及国家安全生产监督管理总局、国家煤矿安全监察局《关于进一步加强煤矿安全生产工作的紧急通知》精神的具体举措。

本次会议共征集到论文 136 篇,论文集收录了其中的 80 篇优秀论文。所选论文既体现了理论与基础方面的研究成果,更多的则是先进适用技术与装备在煤矿灾害防治中的实践与应用,以及煤矿安全生产管理中的思考与总结。论文涵盖了瓦斯治理与利用、粉尘防治、通风防灭火、矿山压力与支护、安全管理等诸多技术领域,可为煤矿安全技术研究开发及灾害防治提供有益借鉴和帮助。

在论文的编辑出版过程中,中国矿业大学出版社给予了大力支持与帮助,在此一并致谢。由于我们水平有限,论文的选录难免有遗珠之憾,编纂也难免有不妥甚至错误之处,敬请广大读者给予批评指正!

编 者

2011 年 7 月

目 录

第一篇 瓦斯防治与利用

含瓦斯煤热流固耦合模型·····	陶云奇(3)
基于分形理论的阳泉煤孔隙分类研究·····	于宝种,杨宏民,张 军,等(10)
吸附—应力耦合作用影响的钻孔—维径向不稳定流数学模型及解算·····	张志刚,程 波(17)
芦岭煤矿Ⅱ827—1工作面瓦斯地质规律研究及瓦斯地质图编绘·····	宁小亮(24)
老鹰山井田瓦斯地质规律研究·····	瞿光金(28)
丁集煤矿11—2煤层突出预测敏感指标及临界值体系研究·····	孟贤正,何 清,黄旭超,等(34)
平沟煤矿16 [#] 煤层突出危险性综合分析·····	邹银辉,徐树伟,师建新,等(38)
寺河煤矿西井区3 [#] 煤层瓦斯赋存规律研究·····	李国强,覃木广,汪业松,等(41)
芦岭煤矿煤与瓦斯突出规律分析·····	覃木广,张庆华,董国伟(45)
大兴煤矿煤与瓦斯突出规律的探讨·····	王 军(49)
瓦斯风化带内矿井瓦斯涌出量预测技术研究·····	程建圣,李晓东,范晓刚,等(52)
工作面瓦斯地质图在渝阳煤矿防突工作中的应用·····	屠明军,张庆华,谢长虹,等(56)
中岭煤矿采煤工作面小构造综合预测方法研究·····	罗德艺,冯康武(61)
瓦斯含量直接测定技术在松藻煤电公司的应用·····	陈如忠,牟景珊,隆清明(66)
煤与瓦斯突出综合管理及预警平台在松树镇煤矿的应用·····	王升宇,赵旭生,陈维良,等(71)
瓦斯涌出特征突出预警技术在安全高效矿井中的应用·····	翟 磊,冀大银,徐晓波,等(77)
寺河矿煤与瓦斯突出预警系统建设及应用·····	徐玉胜,赵 彬,曹国华(85)
石门揭突出松软煤层防冒顶综合技术·····	李晓旭,邹银辉,董钢锋,等(92)
有突出危险的保护层采煤工作面防突技术·····	杨秀科(96)
掘进工作面瓦斯排放带宽度初步分析·····	孙 锐,江万刚,林府进,等(103)
采场周期来压期间瓦斯异常涌出防治技术·····	曾坤军,龙传富,张洲平,等(107)
松藻矿区煤层气与煤炭一体化协调开发探讨·····	林府进(112)
杜儿坪矿密闭巷道与钻孔联合预抽技术效果研究·····	田晓平(116)
赵庄煤业瓦斯抽放钻孔施工工艺技术·····	刘发义(122)
高压水射流破煤钻孔技术的试验研究·····	陈金华(126)
煤矿瓦斯发电技术分析探讨·····	霍春秀(132)
高河煤矿乏风氧化利用方案探讨·····	冀敏俊(136)
含氧煤层气变压吸附工艺爆炸危险性分析·····	李润之,司荣军,樊小涛,等(140)

第二篇 粉尘防治

中国煤矿粉尘防治现状及分析·····	李德文,隋金君(147)
煤尘爆炸性鉴定中瞬间火焰长度特征量的提取及分析方法·····	黄 卫,王 杰,汪春梅(154)
煤矿井下高压喷雾特性的数值研究·····	马 威,刘 勇,吴百剑(163)
综掘工作面涡旋风流控尘机理探讨·····	刘 涛(170)

空气放大器用于钻孔除尘器的可行性研究·····	李爱菊(178)
煤矿粉尘达标综合评价指标体系的探讨·····	包亮,王树德,隋金君(183)
采煤机尘源跟踪喷雾降尘系统在综放工作面的应用·····	郑彦奎,吴国友,刘勇,等(189)
机掘面高压喷雾降尘影响因素分析与实践·····	张小涛(194)
掘进工作面综合防尘设计·····	张书银(200)
掘进面“三压带”分段式注水封孔器的研制·····	刘奎,郭胜均,龚小兵,等(205)
晓南矿综掘工作面粉尘综合防治技术研究·····	曲宝,张博,隋金君,等(210)
综合防尘技术在梁北矿综采工作面的应用·····	魏民涛,张小涛,黄金星(215)
阳煤一矿高风速采煤工作面粉尘的综合治理·····	张吉林,李月奎,赵庆珍,等(219)
网式发泡器在煤矿防尘中的应用研究·····	马红伟(225)
曲靖市麒麟区地方煤矿综合防尘技术探讨·····	杨忠文,皮希宇,刘勇(231)
综合防尘技术在高家梁煤矿综掘工作面的应用·····	冯浩(235)

第三篇 通风防灭火

杜儿坪煤矿采空区流场模拟及爆炸危险区域判定研究·····	杨彦群,田晓平(243)
渝阳煤矿采掘工作面通风效果综合评价·····	李向东(251)
“U”形+内错尾巷与两进两回通风方式应用分析·····	赵亮(255)
基于CFD的对旋轴流通风机功率特性研究·····	陈鱼,刁文庆,王清峰,等(259)
矿井风网在线监控技术应用·····	陈久福,周政林,杨守国,等(263)
R_{70} 值与活化能求解煤自燃倾向性比较·····	冯仁俊,李林(268)
浅埋深自燃厚煤层采空区自燃“三带”研究·····	史过平,王正辉,张国军,等(273)
不同氧浓度下煤自燃CO生成规律试验研究·····	刘忠全,尤文顺,周廷扬,等(278)
混合顺序对三相泡沫性能的影响·····	刘朝文,陆伟,李金亮(283)
综合防灭火技术在五虎山煤矿的应用·····	刘智炜,李长宝,陈明河,等(287)
柴家沟煤矿ZF42105工作面CO超限治理·····	王冰山,尤文顺,周廷扬,等(292)
老石旦煤矿16402综放面采空区自燃防治方案·····	张国军,陈明河,刘永军(297)
兖州矿区厚煤层无煤柱开采防灭火钻孔的布置·····	于晓波,王振平,王洪权,等(302)
高瓦斯特厚自燃煤层综放工作面回撤期间防灭火技术研究·····	赵庆民,薄其山,郭召顺(307)
基于动态特征BP神经网络的火灾烟雾检测算法的研究·····	王杰(311)

第四篇 矿山压力与支护

小波包能量谱特征在岩石声发射信号处理中的应用·····	杨慧明,李建功(321)
采区巷道顶板稳定性监测的声发射一位移耦合模式探讨·····	李建功,杨慧明,刘红,等(325)
邢台矿区区域地质构造应力—应变场解析·····	马正恒,李鹏(329)
深井巷道围岩时空演化特征分析·····	朱若军,张永将(334)
通化矿区深部高瓦斯煤层冲击倾向性研究·····	王升宇,陈维良,祁庭宝,等(340)
基于老顶周期来压的综采工作面停采线调整方法·····	陈继刚(347)
锚杆锚注联合支护技术在清水营煤矿软岩巷道中的应用·····	叶平(352)
“三软”煤层综采工作面倒架原因分析及解决技术·····	张雷华,瞿光金,唐志刚,等(358)

第五篇 安全管理及其他

基于 Virtools 矿井虚拟漫游系统的设计与实现	刘 雄, 吴 鑫, 杨俊燕, 等(365)
基于证据理论的煤矿安全评价方法	李 宏(370)
煤矿零星事故的成因与预防探析	黄诚光, 李 彬(374)
某矿瓦斯事故的技术层面剖析	杜 义(378)
煤矿井下救生舱气体净化和降温除湿系统的设计	陈于金, 余秀清, 刘鹏程, 等(382)
煤矿井下避难硐室设置探讨	张世涛, 何廷梅, 刘 林, 等(387)
应用矿井直流电法探测煤矿巷道前方含水体	张怀军, 李 好, 胡运兵(391)
BOOST 变换器在临界导电模式下功率因数校正电路设计	王 杰, 黄 卫, 吴付祥(396)
基于模糊逻辑控制的乳化液浓度控制系统的研究	刘国庆, 吴付祥, 李征真(401)
乳化液浓度超声波在线检测技术的研究	吴付祥, 王 杰, 张 强(406)
基于工业以太环网的煤矿综合自动化系统	马兆军(412)
基于 PLC 与 OPC 矿井供电远程监控系统的设计	薛彦波, 李倩倩(418)
浅谈液压支架性能及选型	冯 春, 冉 波, 唐 强(424)

第一篇

瓦斯防治与利用

含瓦斯煤热流固耦合模型

陶云奇

(河南煤业化工集团研究院有限责任公司,河南 郑州 450046)

摘要:在 THM 耦合模型所需的九条基本假设基础上,综合应用弹性力学、渗流力学和传热学理论,以含瓦斯煤系统为研究对象,建立了体现含瓦斯煤三场的双向完全耦合数学模型。该模型包括含瓦斯煤应力场、渗流场、温度场方程和各场的定解条件,揭示了含瓦斯煤系统内渗流、变形和变温之间的内在联系,可应用于煤与瓦斯突出防治、煤层气开发等工程领域。

关键词:含瓦斯煤;温度场;渗流场;应力场;热流固耦合

1 引言

随着煤矿采掘深度的增加,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。故而煤层瓦斯渗流规律研究就不能仅仅只考虑由于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来开展煤层瓦斯的 THM 耦合研究,俗称热流固耦合。国内外学者对 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。如 J. Bear 等^[1]研究了地热资源开采过程中地热区域内地应力、地温以及岩石渗透率变化的规律;R. W. Lewis 等^[2,3]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;贺玉龙等^[4]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;M. Gutierrez 和 A. Makurat^[5]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,可惜没有考虑固—热耦合效应;王自明^[6]建立了两类油藏 THM 耦合模型,其中第二类耦合模型从理论上更深入地研究了 THM 耦合过程,但在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。在煤层瓦斯 THM 耦合研究方面,刘建军等^[7-10]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,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,也没有实现各场双向完全耦合。作者近年来在自己研究成果的基础上,以含瓦斯煤系统为研究对象,建立起较为完善的含瓦斯煤 THM 耦合数学模型,以此实现温度场、渗流场、应力场三场之间的双向完全耦合^[11](图 1)。

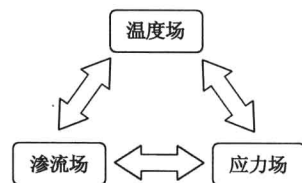


图 1 热流固三场完全耦合模型

2 基本假设

考虑到瓦斯吸附解吸对应力场和温度场的影响,煤层变形和瓦斯在煤层中的流动不仅仅是固流

作者简介:陶云奇(1979—),男,河南新乡人,博士,主要从事矿井瓦斯灾害防治方面的科研工作。E-mail:taoyunqi@126.com。

资助项目:国家自然科学基金资助项目(50974141);国家科技重大专项项目(2008ZX05034—002);国家自然科学基金重点项目(50534080)。

耦合作用下的煤层变形和瓦斯流动,而是热流固耦合作用下的煤层变形和瓦斯流动。因此,含瓦斯煤 THM 耦合模型由含瓦斯煤耦合温度场、渗流场、应力场方程共同组成。为便于研究,作者在前人研究基础上提出以下九条假设:

- ① 含瓦斯煤为均质和各向同性的线弹性体,且煤体及瓦斯传热参数不随温度而变化。
- ② 含瓦斯煤被单相的瓦斯所饱和。
- ③ 游离瓦斯渗流运动和煤体变形运动的惯性力、瓦斯的体积力忽略不计。
- ④ 含瓦斯煤骨架的有效应力变化遵循修正的 Terzaghi 有效应力规律:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{ij} &= \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \\ \alpha &= \frac{\sigma(1-\varphi)}{p} + \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

依据文献[12]的研究成果,其中:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{2\alpha\rho RT(1-2\nu)}{3V_m} \ln(1+bp) + \frac{E\beta\Delta T}{3} - (1-2\nu)\Delta p \quad (2)$$

$$\varphi = 1 - \frac{(1-\varphi_0)}{1+e} \left[1 + \beta\Delta T - K_Y\Delta p + \frac{2\alpha\rho RTK_Y \ln(1+bp)}{3V_m(1-\varphi_0)} \right] \quad (3)$$

式中 σ_{ij} ——总应力张量;
 σ'_{ij} ——有效应力张量;
 p ——瓦斯压力;
 α ——孔隙压缩系数;
 σ ——单位体积煤体各向总膨胀应力;
 ε ——单位体积煤体各向所产生的总膨胀线应变;
 E ——弹性模量;
 ν ——泊松比;
 φ ——煤体孔隙率;
 φ_0 ——初始孔隙率;
 e ——煤体体积应变;
 β ——煤的体积热膨胀系数;
 ΔT ——绝对温度改变量($T-T_0$);
 Δp ——瓦斯压力改变量;
 p ——瓦斯压力;
 K_Y ——体积压缩系数;
 ρ ——煤的视密度;
 V_m ——气体摩尔体积;
 R ——普适气体常数;
 a ——单位质量煤在参考压力下的极限吸附量, $a=a(T)$, 为温度 T 的函数^[13];
 b ——煤的吸附平衡常数, $b=b(T)$, 为温度 T 的函数^[13];
 δ_{ij} ——Kronecker 符号。

$$\delta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

- ⑤ 饱和孔隙—裂隙介质的体积变形由两部分组成,即煤体骨架的变形和孔隙、裂隙变形^[14]:

$$\alpha_b = (1-\phi)\alpha_s + \phi\alpha_p \quad (5)$$

式中 α_b ——煤体总的体积变形;
 α_s ——本体体积变形率;

α_p ——孔隙变形率。

假设 $(1-\phi)\alpha_s \leq \phi\alpha_p$, 因而饱和多孔介质的体积变形等于孔隙变形。

⑥ 瓦斯在煤层中的渗流规律符合达西定律:

$$q = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (6)$$

依据文献[15]的研究成果, 其中:

$$k = \frac{k_0}{1+e} \left[1 + \frac{e}{\varphi_0} - \frac{(\beta \Delta T - K_V \Delta p)(1-\varphi_0)}{\varphi_0} - \frac{\varepsilon_p}{\varphi_0} \right]^3 \quad (7)$$

式中 k ——渗透率;

k_0 ——初始渗透率;

q ——瓦斯渗流速度矢量;

∇p ——煤层内的瓦斯压力梯度;

ε_p ——单位体积煤吸附瓦斯产生的膨胀应变;

μ ——气体动力黏度。

⑦ 煤体中吸附状态和游离状态的瓦斯分别服从修正的朗缪子吸附平衡方程和真实气体状态方程:

$$Q = \left(\frac{abpc}{1+bp} + \varphi \frac{p}{p_n} \right) \cdot \rho_n \quad (8)$$

$$\rho_g = \frac{\rho_n p}{p_n Z} \quad (9)$$

式中 ρ_g ——瓦斯压力为 p 时的瓦斯密度;

ρ_n ——标准状态时的瓦斯密度;

p_n ——标准状态时的瓦斯压力;

Z ——压缩因子, 其值近似为 1;

Q ——单位体积含瓦斯煤的瓦斯含量;

c ——煤质校正参数。

⑧ 煤体的变形是微小的, 煤体处于线弹性变形阶段, 遵守广义胡克(Hooke)定律^[16]:

$$\alpha'_{ij} = \lambda \delta_{ij} e + 2G \varepsilon_{ij} \quad (10)$$

式中 λ ——拉梅常数;

G ——剪切模量;

ε_{ij} ——应变张量。

⑨ 应力应变的符号法则与弹性力学相同。压应力与压应变为负, 拉应力与伸长应变为正; 剪应变以直角变小为正, 反之为负; 位移以沿坐标轴正方向为正, 反之为负。

3 含瓦斯煤 THM 耦合模型

3.1 含瓦斯煤耦合应力场方程

(1) 平衡方程

含瓦斯煤是由含分子尺度孔隙的煤粒组成的骨架及煤粒间裂隙共同组成的双重孔隙介质。在载荷作用下, 煤体将产生应力, 煤体骨架将发生变形或位移错动, 而瓦斯流体在伴随煤体骨架运动的同时, 还做相对于煤体骨架的渗流运动。根据弹性力学原理, 含瓦斯煤平衡微分方程为:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (11)$$

式中, F_i 为体积力。根据基本假设④知, 含瓦斯煤骨架的有效应力变化遵循修正的 Terzaghi 有效应力规律:

$$\alpha'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)得到以有效应力表示的平衡微分方程:

$$\alpha'_{ij} + (\alpha p \delta_{ij})_{,j} + F_i = 0 \quad (13)$$

(2) 几何方程

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (14)$$

(3) 热流固本构方程

含瓦斯煤的本构方程(也称物理方程)是描述煤体应力与应变之间关系的方程。本文中本构关系的建立是基于线性热弹性的假设,即含瓦斯煤总应变是热应变、瓦斯压力压缩煤体引起的应变、吸附瓦斯膨胀引起的应变及应力导致的应变之和。依据热弹性应力应变的关系,经一系列推导和变换可得以应变表示有效应力的含瓦斯煤 THM 本构方程:

$$\alpha'_{ij} = \lambda e \delta_{ij} + 2G \epsilon_{ij} - \theta_T \Delta T \delta_{ij} - \theta_{PY} \Delta p \delta_{ij} - \theta_{PX} \alpha T \ln(1 + bp) \delta_{ij} \quad (15)$$

式中, θ_T 、 θ_{PY} 、 θ_{PX} 分别为热应力系数、瓦斯压力引起的应力系数、吸附瓦斯应力系数。其中:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{2G\nu}{1-2\nu} \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} \\ \theta_T &= \frac{(3\lambda+2G)\beta}{3} \\ \theta_{PY} &= \frac{(3\lambda-2G)K_Y}{3} \\ \theta_{PX} &= \frac{(3\lambda+2G)(2\rho RK_Y)}{9V_m} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

(4) 应力场方程

将式(14)、式(15)代入平衡方程式(13),经过一系列推导和变换可得到含瓦斯煤 THM 耦合应力场方程:

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu}u_{j,ji} - \theta_T(\Delta T)_{,i} - \theta_{PY}(\Delta p)_{,i} - \theta_{PX}\alpha T[\ln(1+bp)]_{,i} + \alpha p_{,i} + F_i = 0 \quad (17)$$

式(17)含有体现流体渗流场影响的耦合项 $\alpha p_{,i}$, 体现有温度场变化影响的耦合项 $\theta_T(\Delta T)_{,i}$ 和 $\theta_{PX}\alpha T[\ln(1+bp)]_{,i}$, 并且 $\alpha p_{,i}$ 项同时耦合了渗流场和温度场。只有联立后续的渗流场方程和温度场方程才能求解。

3.2 含瓦斯煤耦合渗流场方程

(1) 连续性方程

根据基本假设⑥和质量守恒定律,并考虑源汇项得瓦斯在煤层内流动的连续性方程为:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g q) = I \quad (18)$$

(2) 渗流场方程

根据基本假设的约定,瓦斯在煤层中的流动符合达西定律公式(6),瓦斯含量方程符合公式(8),气体状态方程服从式(9)。将这三式联立代入式(18)可得含有源汇项 I 的含瓦斯煤耦合渗流场方程:

$$2\alpha p \frac{\partial e}{\partial t} + \left[2\varphi + \frac{2(1-\varphi)}{k_s} p + \frac{2abc p_n}{(1+bp)^2} + \frac{2abc p_n}{1+bp} \right] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} \nabla p^2 \right) = I \quad (19)$$

式(19)因为有渗透率 k 、孔隙率 φ 以及吸附常数 a 、 b 的参与,且渗透率 k 和孔隙率 φ 为应变、温度、瓦斯压力的函数,即 $k=k(e, T, p)$, $\varphi=\varphi(e, T, p)$;而吸附常数 a 、 b 为温度 T 的函数, $a=a(T)$, $b=b(T)$ 。故而该渗流场方程同时体现有含瓦斯煤应力场和温度场变化影响的耦合项,须同时联立应力场方程和温度场方程才能求解。

3.3 含瓦斯煤耦合温度场方程

在含瓦斯煤的开采过程中,煤层变形和瓦斯在煤层中的流动都是固流耦合作用下的煤层变形和

瓦斯流动。现场实际观察和实验研究表明,煤层中瓦斯的吸附、解吸和渗流都具有热效应,是一个非等温过程;含瓦斯煤在外力作用下发生的变形也同样产生热效应,所以含瓦斯煤耦合温度场方程应同时耦合应力场和渗流场的影响。综合分析含瓦斯煤系统热与功的转换和平衡,根据热力学第一定律和高斯公式得到应力对单位体积含瓦斯煤所做的功为:

$$\delta W = \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (20)$$

由热力学第二定律引入比熵 s :

$$ds = \frac{\delta Q_d}{T} \quad (21)$$

引入热弹性体的另一个热力学状态函数赫姆霍兹自由能 F :

$$F = U - TS \quad (22)$$

根据热力学第二定律,将式(20)、式(21)、式(22)和含瓦斯煤热流固本构方程联立,经过一系列推导和变换,可得到含瓦斯煤耦合温度场方程:

$$\eta \nabla^2 T + qQ = \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} + T_0 \theta_T \frac{\partial e}{\partial t} + \theta_{PX} T_0 \left[T_0 \ln(1+bp) \frac{\partial a}{\partial T} + T_0 \frac{ap}{1+bp} \frac{\partial b}{\partial T} + a \ln(1+bp) \right] \frac{\partial e}{\partial t} \quad (23)$$

式(23)即为含瓦斯煤耦合温度场方程,左边第二项 qQ 为瓦斯解吸引起的附加项,即由于微元煤体瓦斯的解吸引起的温度降低,此附加项为渗流场和温度场的耦合项。右边第二项和第三项是由热弹性和瓦斯作用导致的变形功引起的附加项,也就是说,给予微元煤体的热量不仅引起温度上升,一部分还转变为变形功,此附加项为应力场、渗流场、温度场的耦合项。所以该温度场方程的求解也必须联立渗流场方程和应力场方程才能求解。

4 定解条件

对于数学物理中的问题,要获得它的定量解,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,然后设法求解。含瓦斯煤耦合温度场、渗流场、应力场方程,彼此之间通过多个耦合项相互耦合在一起,要获得它们的解,需要相应的定解条件才能求解,即确定模型的边界条件和初始条件。

4.1 含瓦斯煤耦合应力场定解条件

(1) 边界条件

应力场边界条件一般有三类。第一类为位移边界条件,即煤体的边界位移已知:

$$u_i = \bar{u}_i \quad (24)$$

式中 $\bar{u}_i$ ——煤体边界处位移。

第二类为应力边界条件,即煤体边界上的表面力已知。设作用于边界面上的面力沿 x, y, z 三个方向的分量(以沿坐标轴的正向为正)分别为 F_x, F_y, F_z ,该边界法向与 x, y, z 轴正向的夹角分别为 ξ, ψ, ω ,方向余弦分别为 l, m, n ($l = \cos \xi, m = \cos \psi, n = \cos \omega$),则应力边界条件可表示为:

$$\begin{cases} \sigma_x l + \tau_{yx} m + \tau_{zx} n = F_x \\ \sigma_y l + \tau_{xy} m + \tau_{zy} n = F_y \\ \sigma_z l + \tau_{xz} m + \tau_{yz} n = F_z \end{cases} \quad (25)$$

第三类为混合边界条件,即煤体骨架的部分边界的应力已知,部分边界的位移已知。

(2) 初始条件

含瓦斯煤应力场的初始条件为时间 $t=0$ 时位移或质点的速度的初始值,即:

$$u|_{t=0} = \bar{u} \quad (26)$$

4.2 含瓦斯煤耦合渗流场定解条件

渗流场边界条件一般有四类。第一类边界条件:边界上压力恒定,即:

$$p_s = \text{const} \quad (27)$$

第二类边界条件:边界上流量恒定,即:

$$q_s = \text{const} \quad (28)$$

第三类边界条件:混合边界条件,即一部分边界的流量给定,一部分边界的压力给定。

第四类边界条件:若模型存在内部边界,在分界面上的流量相等,即:

$$\lambda_1 \frac{\partial p_1}{\partial n_1} \Big|_{L_1} = \lambda_2 \frac{\partial p_2}{\partial n_2} \Big|_{L_2} \quad (29)$$

4.3 含瓦斯煤耦合温度场定解条件

(1) 边界条件

温度场边界条件一般有三类。第一类边界条件:煤体边界上各点温度 $(T)_r$ 随位置与时间的函数关系已知。

第二类边界条件:煤体边界上各点沿外法向的热流密度 $(q_n)_r$ 随位置与时间的函数关系已知。

第三类边界条件:当物体表面与流体发生对流换热时,流体介质的温度 T_f ,以及边界表面传热系数已知。

(2) 初始条件

对于非稳定温度场问题初始条件即为 $t=0$ 时刻的 T 值,它可以是某个常值,也可以是空间的函数,即:

$$\begin{cases} (T)_{t=0} = T_0 \\ (T)_{t=0} = f(x, y, z) \end{cases} \quad (30)$$

式中, T_0 为某已知常数,表示开始时煤体的温度是均匀分布的; $f(x, y, z)$ 为某已知函数,表示煤体的初温随坐标而有不同的数值。

5 结束语

① 本文综合应用弹性力学、渗流力学、传热学理论,以含瓦斯煤系统为研究对象,建立了含瓦斯煤应力场、渗流场、温度场完全耦合方程,并给出了各场的定解条件,建立了含瓦斯煤三场真正意义上的双向完全耦合数学模型,揭示了含瓦斯煤系统内渗流、变形和变温之间的内在联系。

② 考虑瓦斯吸附解吸对应力场和温度场的影响,煤层变形和瓦斯在煤层中的流动不仅仅是固流耦合作用下的煤层变形和瓦斯流动,而是热流固耦合作用下的煤层变形和瓦斯流动。

③ 本文提出含瓦斯煤总应变是热膨胀应变、游离瓦斯压力压缩煤体骨架引起的应变、吸附瓦斯膨胀引起的应变及外应力导致的煤体应变之和,进而建立了修正的含瓦斯煤热流固本构方程。

④ 尽管本文所建立的含瓦斯煤热流固耦合模型是在含瓦斯煤为均质和被瓦斯单相饱和的假设下而得,但依据文中所述的基本原理,可将模型推广到多相(气水两相)渗流和非均质情况下应用。

参考文献

- [1] BEAR J, CORAPCIOGLU M Y. A mathematical model for consolidation in a thermoplastic aquifer due to hot water injection or pumping[J]. Water Resource Res, 1981(17):723-736.
- [2] LEWIS R W, SUKIRMAN Y. Finite element modelling of three phase flow in deforming saturated oil reservoirs[J]. Int J Num Anal Methods Geomech, 1993(17):577-598.
- [3] LEWIS R W. Finite element modeling of two phase heat and fluid flow in deforming porous media[J]. Trans Porous Media, 1989(4):319-334.
- [4] 贺玉龙,杨立中,杨吉义. 非饱和岩体三场耦合控制方程[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(4): 419-423.
- [5] GUTIERREZ M, MAKURAT A. Coupled HTM modelling of cold water injection in fractured hydrocarbon reservoirs[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1997, 34(3-4):429.

- [6] 王自明. 油藏热流固耦合模型研究及应用初探[D]. 成都:西南石油学院,2002.
- [7] 刘建军,梁冰,章梦涛. 非等温条件下煤层瓦斯运移规律的研究[J]. 西安矿业学院学报,1999,19(4):302-308.
- [8] 梁冰,刘建军,王锦山. 非等温情况下煤和瓦斯固流耦合作用的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报,1999,18(5):483-486.
- [9] 梁冰,刘建军,范厚彬,等. 非等温条件下煤层中瓦斯流动数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(1):1-5.
- [10] 刘建军. 煤层气热一流一固耦合渗流的数学模型[J]. 武汉工业学院学报,2002(2):91-94.
- [11] 陶云奇,许江,李树春,等. 煤层瓦斯渗流特性研究进展[J]. 煤田地质与勘探,2009,37(2): 1-5.
- [12] 陶云奇,许江,彭守建,等. 含瓦斯煤孔隙率和有效应力影响因素试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(11): 3417-3422.
- [13] 陶云奇. 含瓦斯煤 THM 耦合模型及煤与瓦斯突出模拟试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
- [14] BEAR J. 多孔介质流体力学[M]. 李竞生,陈崇希,译. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [15] 陶云奇,许江,程明俊,等. 含瓦斯煤渗透率理论分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009(增 2):3363-3370.
- [16] 孙培德. SUN 模型及其应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2002.

基于分形理论的阳泉煤孔隙分类研究

于宝种¹, 杨宏民², 张 军¹, 林府进¹

(1. 中煤科工集团重庆研究院, 重庆 400039;

2. 河南理工大学, 河南 焦作 454000)

摘 要: 将压汞试验所测的数据进行煤的孔隙分形计算, 得出了不同煤孔隙阶段的孔隙分形维数, 根据煤体内孔隙的分形规律, 将煤的孔隙分为三类: 渗透孔、扩散孔和吸附孔, 对应了瓦斯等气体在煤中的不同的运移状态。

关键词: 压汞试验; 分形; 孔隙; 分类

煤岩是一种含有极其复杂和不规则的原生孔隙和后生裂隙的固体物质。这些孔隙与裂隙是无序的, 同时又是非均质的, 它们的分布直接与煤中气体的扩散和渗透密切相关。煤作为一种多孔介质, 其孔隙大小和成因多种多样, 国内外不同的学者基于不同的标准对煤的孔隙类型做出了不同的分类。

目前, 应用最广泛的是 B. B. 霍多特的十进制划分方案^[1]。他将煤的孔隙系统划分为大孔(大于 1 000 nm)、中孔(介于 100~1 000 nm)、过渡孔(介于 10~100 nm)和微孔(小于 10 nm), 其分类基础主要是基于固体孔径(孔的平均宽度)范围与固气分子作用效应, 及压汞法和液氮吸附法的测试结果。

张慧^[2]基于煤的成岩作用、变质作用和光学、扫描显微镜下的特征观察率先在国内提出原生孔、变质孔、外生孔和矿物质孔 4 种基本类型。通过扫描显微镜观察到的原生孔、外生孔、矿物质孔及变质孔中的气孔一般孔径在 1 000 nm 以上, 这些孔的发育特征对煤中游离气体的储集和运移很重要; 但难于直接观察变质孔中孔径多小于 100 nm 的键间孔, 而键间孔特征对认识煤中吸附气体储集和运移非常关键。

郝琦^[3]、吴俊等^[4]依据压汞实验的退汞曲线或液氮吸附回线的形态特征在国内开展了对煤孔隙形态类型的研究。陈萍等^[5]根据研究将煤孔隙划分为 I 类孔(两端开口圆筒形孔及四边开放的平行板状孔)、II 类孔(一端封闭的圆筒形孔、平行板状孔、楔形孔和锥形孔)、IV 类孔(细颈瓶形孔)。煤孔隙形态特征对低压吸附影响较为明显, 对高压吸附影响可能较小。

桑树勋等^[6]根据煤的孔隙在煤层气储集、运移中的作用和煤孔隙的固气作用将煤孔隙的储集和运移类型分为渗流孔隙(孔径大于 100 nm)、凝聚—吸附孔隙(孔径 10~100 nm)、吸附孔隙(孔径 2~10 nm)和吸收孔隙(孔径小于 2 nm)。渗流孔隙主要为原生孔和变质气孔, 凝聚—吸附孔隙主要为分子间孔和部分经受变形改造的原生孔和变质气孔, 吸附孔隙主要为分子间孔, 吸收孔隙主要为有机大分子结构单元缺陷, 部分为分子间孔。

本文基于瓦斯在煤中的运移特性, 运用压汞试验所测的数据进行煤的孔隙分形的计算, 得出了不同煤孔隙阶段的孔隙分形维数, 并按分形维数特点, 对煤中孔隙的分类做了研究, 根据煤体内孔隙的分形规律, 把煤的孔隙分为三类: 渗透孔、扩散孔和吸附孔。

1 压汞试验的试验方法及样品测试结果

压汞试验可以提供煤岩的孔隙结构特征如孔隙大小、孔隙喉道大小、平均孔径、不同直径孔隙在全部孔隙中所占的比例、孔隙间的连通程度等, 压汞试验所得出的不同的孔隙数据即可做分形

作者简介: 于宝种(1984—), 男, 河北黄骅人, 硕士, 助理工程师, 专业为矿井瓦斯防治方向。E-mail: yubaozhong@yeah.net。