

国家自然科学基金重点项目 (50534030)
江苏省“333 高层次人才培养工程”
教育部骨干教师基金项目

非均质岩体热力耦合理论

与

煤炭地下气化通道稳定性

万志军 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金重点项目(50534030)

江苏省“333 高层次人才培养工程”

教育部骨干教师基金项目

非均质岩体热力耦合理论 与煤炭地下气化通道稳定性

万志军 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍非均质岩体热力耦合理论及其在煤炭地下气化通道稳定性方面的应用。主要内容包括:600℃20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机的研制,高温三轴压力下煤岩的物理力学特性的实验研究,煤炭地下气化采场围岩热力耦合理论,煤炭地下气化采场围岩温度场演化规律与热矿压显现特征,煤炭地下气化采场前方煤体热破裂机理与规律等。

本书可供采矿工程技术人员、相关科技工作者及大中专院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

非均质岩体热力耦合理论与煤炭地下气化通道稳定性/

万志军著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2009. 11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0513 - 1

I. 非… II. 万… III. ①非均质层—岩体—热力学—耦合—研究②煤炭—地下气化—通道—稳定性—研究
IV. P584 TD84

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 199523 号

书 名 非均质岩体热力耦合理论与煤炭地下气化通道稳定性
著 者 万志军
责任编辑 王江涛
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516) 83885307 83884995
网 址 <http://www.cumtp.com> **E-mail:** cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 880×1230 1/32 **印张** 6.125 **字数** 160千字
版次印次 2009年11月第1版 2009年11月第1次印刷
定 价 22.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤炭地下气化是开发清洁能源的新技术,它将建井、采煤、气化三大工艺合为一体,变物理采煤为化学采煤,具有安全性好、投资少、见效快、污染小、效益高等优点。随着燃空区空间的扩大,气化炉顶板的垮落可能波及地表,引起煤气漏失或溢出地表,使气化炉不能正常生产甚至停产。因此,需要研究气化采场围岩的稳定性问题。气化采场围岩处于高温环境,研究气化通道的稳定性必须对煤(岩)高温下的变形和强度特征以及物理力学参数的温度效有足够的认识。同时,煤体是非均质的,气化采场前方煤体在高温作用下发生热破裂,会影响煤体的渗透性,进而影响煤体内的氧化反应。

作者所在课题组在中国矿业大学“211工程”资助下,专门研制了600℃20MN伺服控制高温高压岩体三轴试验机。以此试验机为研究平台,采用高温三轴应力实验、建立数学模型和数值试验相结合的方法,针对以上问题历经数年研究,取得初步研究成果。本书即是这些研究成果的总结。

本书的主要内容有:①自主研制了600℃20MN伺服控制高温高压岩体三轴试验机,该试验机是国内外唯一可应用于多种研究领域的多功能专用实验设备。②进行大尺寸煤和砂岩试样的高温三轴应力下的变形特性实验,得到高温三轴应力下煤和砂岩在变形、破坏和力学参数等方面异于常温下的一些特性。③基于

热弹性本构模型,考虑岩石物理力学参数的热效应和非均质特点,建立了煤炭地下气化的岩体热力耦合作用非线性数学模型和随机非均质岩体热力耦合作用非线性数学模型。④数值模拟研究煤炭地下气化采场围岩温度场分布和矿山压力分布规律。⑤采用数值试验研究了气化采场前方煤体的热破裂现象。

对煤系地层岩石进行大尺寸试样高温高压实验,在国内外尚无先例。由于试样尺寸的加大,给试验机的研制和实验过程均带来很多意想不到的难题,尽管课题组克服了诸多困难,为实验的顺利开展做出了极大努力,但仍然有一些问题难以很好解决。另外,煤性质的复杂性决定了煤的热破裂等特性与普通岩石相比有其特殊性。因此,书中还有一些不尽完善的地方,恳请读者批评指正,以便作者今后进一步研究解决。

本书的研究成果是在尊敬的导师、长江学者赵阳升教授的指导下完成的。课题组成员曲方教授、康建荣教授、张渊博士、董付科硕士和冯子军硕士等为实验的顺利开展作出了很大贡献。在数值计算方面,得到冯增朝教授、梁卫国教授、胡耀青教授以及杨栋教授的帮助。在此一并表示感谢!

作者

2009年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 煤炭地下气化现状	1
1.1.1 煤炭地下气化发展历程	1
1.1.2 煤炭地下气化通道稳定性	4
1.2 岩石高温物理力学特性.....	11
1.2.1 岩石的高温特性.....	11
1.2.2 煤的高温特性.....	16
1.2.3 简要评述.....	17
1.3 热力耦合理论.....	17
1.4 需要研究的内容.....	18
1.4.1 实验研究.....	18
1.4.2 理论研究.....	19
1.4.3 数值模拟与数值试验研究.....	19
第 2 章 600 °C 20MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机 ...	20
2.1 概述.....	20
2.1.1 主要功能.....	21
2.1.2 主要技术参数.....	21
2.2 设备的构成.....	22
2.2.1 主机加载系统.....	22
2.2.2 高温三轴压力室及温控系统.....	24

2.2.3	辅机装料系统·····	26
2.2.4	测试系统·····	27
2.3	设备研制中的关键技术·····	29
2.3.1	加热元件·····	29
2.3.2	密封与绝缘·····	30
2.4	设备的操作程序·····	32
第3章	高温及三轴应力下岩石物理力学特性 ·····	34
3.1	引言·····	34
3.1.1	高温及三轴应力下岩石的物理力学 性质实验·····	34
3.1.2	岩体表征体积单元与大尺寸试样实验·····	35
3.2	实验材料与方法·····	39
3.2.1	实验试样采集及其制备·····	39
3.2.2	实验步骤·····	39
3.2.3	三轴实验弹性模量的计算·····	41
3.3	高温及三轴应力下岩石物理力学特性·····	42
3.3.1	高温及三轴应力下煤岩的变形特征·····	43
3.3.2	高温及三轴应力下煤岩的热破裂特征·····	50
3.3.3	高温及三轴应力下煤岩的物理力学性质·····	55
3.3.4	对煤岩高温特性的讨论·····	64
第4章	煤炭地下气化采场围岩热力耦合理论 ·····	66
4.1	引言·····	66
4.2	数学模型的建立·····	67
4.2.1	基本假设·····	67
4.2.2	岩体温度场控制方程·····	68

目 录

4.2.3	岩体变形控制方程	69
4.2.4	岩体热力耦合数学模型	69
4.3	岩体热力耦合数学模型的数值解法	70
4.3.1	岩体热传导控制方程的离散	70
4.3.2	岩体变形控制方程的泛函及其离散	75
4.4	耦合数学模型的有限元分析	77
4.5	专用模拟程序的编制	81
第 5 章	煤炭地下气化采场围岩温度场演化规律	83
5.1	引言	83
5.2	影响采场围岩温度场分布的因素	84
5.2.1	技术因素	84
5.2.2	岩体热物理性质因素	85
5.2.3	地质因素	85
5.3	模拟方法	85
5.3.1	专用模拟程序的编制	85
5.3.2	模拟模型的建立	86
5.3.3	煤岩体热物理参数随温度的变化规律	87
5.3.4	气化采场的移动速率	92
5.4	煤炭地下气化采场围岩温度场演化规律	94
5.4.1	温度场的总体分布特征	94
5.4.2	温度场动态变化规律	96
5.4.3	燃烧过程的讨论	105
第 6 章	煤炭地下气化采场热矿山压力显现特征	106
6.1	地下气化通道围岩稳定性问题	106
6.2	影响气化通道围岩稳定的因素	108

6.3	数值模拟方法	109
6.3.1	模拟模型的建立	109
6.3.2	煤岩体物理力学参数随温度的变化规律	110
6.3.3	煤岩物理力学参数	114
6.4	煤炭地下气化采场热矿山压力显现特征	115
6.4.1	气化采场围岩变形破坏特征	115
6.4.2	气化采场前方支承压力分布特征	123
6.4.3	气化采场热矿山压力显现特征的讨论	124
第7章	煤炭地下气化采场前方煤体热破裂机理与规律	125
7.1	引言	125
7.2	煤体的非均质性与热破裂	126
7.2.1	煤体结构的非均质性	126
7.2.2	岩石的热破裂	128
7.2.3	煤体的热破裂	131
7.3	非均质岩体热力耦合作用数学模型及其 数值解法	131
7.3.1	基本假设和物理力学基础	131
7.3.2	三维随机非均质岩体热破裂数学模型	132
7.3.3	随机非均质岩体热破裂数学模型的 数值解法	133
7.3.4	随机概率分布	136
7.4	数值试验方法	138
7.4.1	数值试验模型	138
7.4.2	数值试验方法	139
7.4.3	煤和岩石细观单元的赋值	140
7.5	煤炭地下气化采场前方煤体热破裂机理和规律	142

目 录

7.5.1 煤的热膨胀系数非均匀分布对热破裂的影响	142
7.5.2 非均匀温度场分布对热破裂的影响	153
7.5.3 煤体热破裂的讨论	162
参考文献	165

Table of Contents

1 Preface	1
1.1 State-of-the-art underground coal gasification	1
1.1.1 Developing history of underground coal gasification	1
1.1.2 The channel's stability of underground coal gasification	4
1.2 Physics and mechanics properties of rock under high temperature	11
1.2.1 The rock's high temperature characteristics	11
1.2.2 The coal's high temperature characteristics	16
1.2.3 Brief comments	17
1.3 Theory of thermo-mechanical coupling	17
1.4 Research contents	18
1.4.1 Experimental research	18
1.4.2 Theory research	19
1.4.3 Numerical simulation and numerical testing research	19
2 600 °C 20MN servo controlled triaxial rock testing system of high temperature and high pressure	20
2.1 General situation of rock testing system	20
2.1.1 Functions of rock testing system	21
2.1.2 Technical parameters of rock testing system	21

2.2	Main branch system of experimental apparatus	22
2.2.1	Main loading system	22
2.2.2	System of high temperature triaxial compression chamber and temperature control	24
2.2.3	Sample assemble system	26
2.2.4	Measuring system	27
2.3	Key techniques in system developing	29
2.3.1	Heating material	29
2.3.2	Sealing and insulating	30
2.4	Operating procedure of experimental apparatus	32
3	Experimental research on physics and mechanics properties of rock under high temperature and triaxial stress	34
3.1	Introduction	34
3.1.1	Experimentation of rock under high temperature and triaxial stress	34
3.1.2	Characterization volume element and experimentation on big size samples	35
3.2	Experimental approach and material	39
3.2.1	Samples and its preparation	39
3.2.2	Experimental procedure	39
3.2.3	Calculation of Elastic modulus	41
3.3	Physics and mechanics properties of rock under high temperature and triaxial pressure	42
3.3.1	Deformation of rock and coal under high temperature and triaxial stress	43
3.3.2	Permeability of rock and coal under high temperature and triaxial stress	50

3.3.3	Physics and mechanics properties of rock and coal under high temperature and triaxial stress	55
3.3.4	Discussion to properties of rock under high temperature	64
4	Theory of thermo-mechanical coupling process in surrounding rock of burning face of UCG	66
4.1	Introduction	66
4.2	Mathematical model	67
4.2.1	Basic hypothesis	67
4.2.2	Governing equation of rock's temperature field	68
4.2.3	Governing equation of rock's deformation	69
4.2.4	Mathematical model for thermo-mechanical coupling	69
4.3	Numerical solution of thermo-mechanical coupling mathematical model of rock mass	70
4.3.1	Discrete of governing equation of rock's conduction	70
4.3.2	Functional and its discrete of governing equation of rock's deformation	75
4.4	FEM analysis of coupled mathematical model	77
4.5	Program composition	81
5	Evolution rules of temperature field in surrounding rock of burning face of UCG	83
5.1	Introduction	83

5.2	Influencing factors on distribution of temperature field of surrounding rock of burning face	84
5.2.1	Technology factors	84
5.2.2	Properties of rock factors	85
5.2.3	Geology factors	85
5.3	Modeling method	85
5.3.1	Program composition	85
5.3.2	Model building	86
5.3.3	Thermal and physical parameters of rock under variable temperature	87
5.3.4	Moving velocity of burning face	92
5.4	Evolution rules of temperature field in surrounding rock of burning face of UCG	94
5.4.1	General feature of temperature field	94
5.4.2	Dynamic evolution of temperature field	96
5.4.3	Discussion to temperature field	105
6	Characteristics of thermal dynamic pressure in surrounding rock of burning face of UCG	106
6.1	Problem of channel rock's stability in burning face	106
6.2	Influencing factors of channel rock's stability in burning face	108
6.3	Modeling method	109
6.3.1	Model building	109
6.3.2	Rock's physical and mechanical parameters under variable temperature	110
6.3.3	Rock's physical and mechanical parameters	114

6.4	Characteristics of thermal dynamic pressure in surrounding rock of burning face of UCG	115
6.4.1	Deformation and failure characteristics of surrounding rock of burning face	115
6.4.2	Abutment pressure of burning face	123
6.4.3	Discussion on dynamic pressure characteristics of burning face	124
7	Mechanism and rules of thermal induced fracture in frontage coal of UCG burning face	125
7.1	Introduction	125
7.2	Heterogeneity of coal and thermal induced fracture	126
7.2.1	Heterogeneity of coal's structure	126
7.2.2	Introduction of thermal induced fracture	128
7.2.3	Thermal induced fracture of coal	131
7.3	Mathematical model of heterogeneous thermo-mechanical coupling and its numerical solution	131
7.3.1	Basic hypothesis and physical mechanical basis	131
7.3.2	Mathematical model of 3D random heterogeneous thermal induced fracture	132
7.3.3	Numerical solution of mathematical model	133
7.3.4	Random probability distribution	136
7.4	Numerical experimentation method	138
7.4.1	Numerical experimentation model	138
7.4.2	Numerical experimentation method	139
7.4.3	Element assignment of rock	140

Table of Contents

7.5	Mechanism and rules of thermal induced fracture in frontage coal of UCG burning face	142
7.5.1	Influence on thermal induced fracture of thermal expansion coefficient of coal	142
7.5.2	Influence on thermal induced fracture of heterogeneous temperature field	153
7.5.3	Discussion to thermal induced fracture	162
References	165

第1章 绪 论

1.1 煤炭地下气化现状

1.1.1 煤炭地下气化发展历程

煤炭地下气化是开发清洁能源的新技术,它将建井、采煤、气化三大工艺合为一体,变物理采煤为化学采煤,具有如下特点和优点^[1~7]:

① 煤炭地下气化站的厂房和设施比竖井生产简单很多,因而基建投资省、工期短、见效快,同时由于省去了大量价格昂贵的用于采掘和运输提升的电气和机械设备,比井工开采可节省投资三分之二并缩短工期一半以上,因而可以降低开采成本,提高企业经济效益。

② 采用煤炭地下气化,通过调节产品的碳氢比例,可以得到不同工业用途的化工产品。可实现煤(地下气化)、热(地下煤气供工业与民用)、电(使用地下煤气发电)、化(应用地下煤气转变成化工产品)、能(利用地下煤气提取洁净能源——氢能、甲醇等)的综合开发、综合利用。煤炭地下气化尤其是大规模、低成本、环保型煤(水)制氢的新技术。

③ 由于煤炭地下气化仅提取煤炭中的热能或化学能,将灰渣等污染物留在地下,同时,可以低成本、高效地脱除煤气中的 S_xO_y 和 N_xO_y 以及其他污染物,因而是从源头上治理煤炭开采与转化