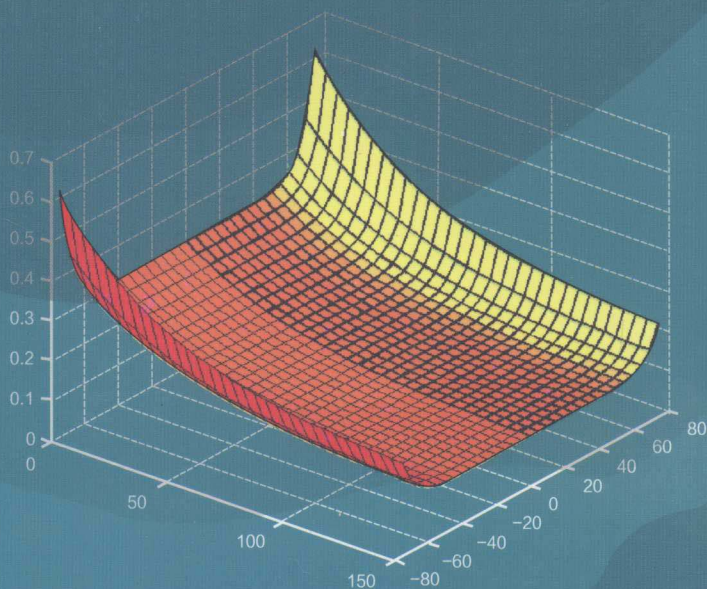


车强 ● 著

# 采空区气体 多场耦合理论及应用

CAIKONGQU QITI

DUOCHANG OUHE LILUN JI YINGYONG



化学工业出版社

# 采空区气体

## 多场耦合理论及应用

车强 著



化学工业出版社

· 北京 ·

与采空区有关的瓦斯灾害和火灾频发,是我国矿业发展中亟待解决的重大问题。尤其是采空区大量存在的遗煤易自燃,为瓦斯爆炸提供了长期存在的火源,致使灾害后果十分严重。本书是关于采空区气体(主要是瓦斯)运动和相互转化规律的专著,对于防治煤矿自燃火灾、一般瓦斯灾害具有十分重要的指导意义。本书以某煤矿采空区实测数据为基础展开,详细分析和介绍了采空区瓦斯-空气混合气体的组成、相互作用规律和机理,对采空区瓦斯抽放、遗煤自燃以及继发性瓦斯爆炸的防治具有重要的指导意义。

本书可供矿业工程领域的设计、研发人员阅读,也可供矿业相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

采空区气体多场耦合理论及应用/车强著. —北京:  
化学工业出版社, 2012. 2  
ISBN 978-7-122-13187-4

I. 采… II. 车… III. 采空区-瓦斯-气体流动-  
研究 IV. TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 000802 号

---

责任编辑: 刘丽宏

装帧设计: 刘丽华

责任校对: 王素芹

---

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

710mm×1000mm 1/16 印张 10 1/4 字数 200 千字 2012 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

# 序

## PREFACE

煤矿采空区存在的大量遗煤容易自燃而引发火灾。采空区火灾具有发生突然、发展迅猛、影响面广、施救困难、易诱发瓦斯爆炸的特点，容易酿成重大灾害事故，严重威胁生命财产安全。因此，预防和治理采空区自燃尤为重要，就要求人们对采空区遗煤自燃机理和发展规律有深入的了解。

《采空区气体多场耦合理论及应用》是作者车强攻读博士期间的科研成果，内容丰富，理论性和实用性较强，是一部采空区遗煤自燃理论研究与实践的佳作。该专著首先综述采空区自燃研究现状，综合应用理论分析、渗透率实验和采空区渗流和传热实验、数值模拟技术对比现场观测，阐明了采空区遗煤自燃机理，揭示自燃前后瓦斯-空气混合气体的三维渗流场、浓度场和温度场的多场耦合变化规律，提出自燃防治机制，为采空区自燃防治提供理论和技术支持。书中提出的一些新见解，对于采空区瓦斯抽放、遗煤自燃以及继发性瓦斯爆炸防治的理论研究与应用实践具有启示意义。该专著展示的具有创新性的研究成果丰富了采空区火灾防治理论和技术研发的研究，不失为一部好的著作。它的出版，可为从事煤矿安全领域特别是煤矿自燃防治方向的大专院校教师和科研院所专业技术人员以及现场技术管理人员提供理论技术新颖、实用价值高、针对性强的借鉴。

作为著者的博士生导师，衷心希望该专著能在我国煤矿自燃防治领域的科研、教学和生产实践中发挥其应有的作用。

周心权

# 前言

# FOREWORD

与采空区有关的瓦斯灾害和火灾频发,是我国矿业发展中亟待解决的重大问题。尤其是采空区大量存在的遗煤易自燃,为瓦斯爆炸提供了长期存在的火源,易引发继发性瓦斯爆炸,致使灾害事故后果十分严重。采空区瓦斯和空气以混合气体的形式,以不同浓度分布在采空区各个区域,受工作面漏风流的风压、顶板破坏的冲击力、瓦斯涌出的动力、遗煤自燃的火风压等外力作用,在采空区内部形成流动以及组分浓度和温度的变化。深入研究采空区遗煤自燃前后混合气体的渗流场、浓度场和温度场的多场耦合规律,不仅有利于了解采空区气体流动情况,而且可以揭示采空区瓦斯燃烧和爆炸的相互转化规律,对于防治煤矿自燃火灾、一般瓦斯灾害以及防治危害性更大的次生灾害——继发性瓦斯爆炸具有十分重要的意义。

本书主要内容是笔者在攻读博士学位期间的研究成果总结,是在国家重点基础研究发展计划(973)(编号为2005CB221506)、国家自然科学基金重点项目(编号为50534090)和国家“十一五”科技攻关项目(编号为2006BAK03B05)的资助下,以采空区瓦斯-空气混合气体中的 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{N}_2$ 等主要组分为研究对象,在现场实测某煤矿采空区的基础上,通过理论分析、实验验证和数值模拟的方法,系统研究了采空区遗煤自燃前后瓦斯-空气混合气体的三维渗流场、浓度场和温度场的多场耦合变化规律,研究成果对采空区瓦斯抽放、遗煤自燃以及继发性瓦斯爆炸的防治具有较大的指导意义。

本书从选题、实验、数值模拟和数据分析到最后定稿和出版始终得到了笔者的博士生导师中国矿业大学(北京)周心权教授的悉心指导和支持。周先生还在百忙之中为本书作序。周先生学识渊博、治学严谨、忘我奉献、宽厚待人,高尚而谦逊。值此书出版之际,谨向恩师致以由衷的感谢和崇高的敬意!

本书的研究工作还得到了安全领域的一些知名学者、研究人员和技术人员的支持和帮助。在前期实验和专著撰写期间,得到了中国矿业大学(北京)的傅贵

教授、秦跃平教授、聂百胜教授、王家臣教授，西南石油大学刘建军教授、辽宁工程技术大学的梁冰教授、李成全高级工程师、孙维吉博士和中国矿业大学（北京）闫保金实验师等的支持和指导。在数值计算过程中得到了中国矿业大学（北京）王海燕副教授的指导。部分实验工作是与昌伟伟硕士共同完成的。中国人民武装警察部队学院消防工程系的领导和同事在专著撰写和出版过程中给予著者大力支持和帮助。在此一并表示衷心的感谢。

本书研究内容得到了国家重点基础研究发展计划（973 项目）、国家自然科学基金重点项目和国家“十一五”科技攻关项目的基金资助，谨此致谢。

由于笔者学识有限，书中不足难免，敬请读者批评指正。

车 强

# 目录

# CONTENTS

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>第1章 绪论</b>             | <b>1</b>  |
| 1.1 研究背景和意义 .....         | 3         |
| 1.2 国内外研究现状综述 .....       | 4         |
| 1.2.1 采空区气体流动研究现状 .....   | 4         |
| 1.2.2 瓦斯燃烧爆炸研究现状 .....    | 7         |
| 1.3 研究内容、研究方法和技术路线 .....  | 8         |
| 1.3.1 主要研究内容 .....        | 8         |
| 1.3.2 研究方法 .....          | 8         |
| 1.3.3 技术路线 .....          | 9         |
| <b>第2章 采空区气体渗流规律研究</b>    | <b>11</b> |
| 2.1 引言 .....              | 13        |
| 2.2 采空区介质及其渗流特性 .....     | 13        |
| 2.2.1 采空区介质 .....         | 13        |
| 2.2.2 多孔介质的基本参数 .....     | 14        |
| 2.2.3 采场裂隙形成理论 .....      | 15        |
| 2.2.4 渗流和渗流速度 .....       | 21        |
| 2.3 采空区内主要气体组分 .....      | 22        |
| 2.4 瓦斯涌出和运移规律 .....       | 23        |
| 2.4.1 采空区瓦斯涌出源分析 .....    | 24        |
| 2.4.2 采动卸压瓦斯运移和积聚规律 ..... | 26        |
| 2.4.3 瓦斯扩散运动规律 .....      | 27        |
| 2.4.4 瓦斯升浮现象 .....        | 31        |
| 2.4.5 瓦斯积聚 .....          | 32        |
| 2.5 采空区气体渗流模型 .....       | 33        |
| 2.5.1 连续性方程 .....         | 34        |

|       |                           |    |
|-------|---------------------------|----|
| 2.5.2 | 动量守恒方程 .....              | 36 |
| 2.5.3 | 湍流输运模型 .....              | 41 |
| 2.5.4 | 组分守恒方程 .....              | 47 |
| 2.5.5 | 状态方程 .....                | 47 |
| 2.6   | 采空区气测渗透率的测量实验 .....       | 48 |
| 2.6.1 | 实验目的和方案 .....             | 48 |
| 2.6.2 | 渗透率计算理论 .....             | 48 |
| 2.6.3 | 实验装置和试样制备 .....           | 50 |
| 2.6.4 | 实验步骤 .....                | 51 |
| 2.6.5 | 实验结果和分析 .....             | 53 |
| 2.6.6 | 采空区多孔介质渗透率与孔隙率的关系方程 ..... | 57 |
| 2.6.7 | 主要结论 .....                | 59 |
| 2.7   | 本章小结 .....                | 59 |

## 第3章 采空区瓦斯渗流和传热的大尺寸实验研究 61

---

|       |                        |    |
|-------|------------------------|----|
| 3.1   | 引言 .....               | 63 |
| 3.2   | 实验目的和方案 .....          | 63 |
| 3.3   | 实验装置 .....             | 63 |
| 3.3.1 | 实验台机械系统 .....          | 63 |
| 3.3.2 | 实验台瓦斯供气系统 .....        | 65 |
| 3.3.3 | 实验台液压系统 .....          | 65 |
| 3.3.4 | 实验台电气系统 .....          | 66 |
| 3.3.5 | 实验台数据信息采集分析系统 .....    | 67 |
| 3.4   | 实验步骤和结果 .....          | 68 |
| 3.4.1 | 实验模型设计 .....           | 68 |
| 3.4.2 | 实验步骤 .....             | 70 |
| 3.4.3 | 实验结果和分析 .....          | 70 |
| 3.4.4 | 孔隙率的空间分布方程 .....       | 72 |
| 3.4.5 | 渗透率的空间分布方程 .....       | 75 |
| 3.5   | 现场观测 .....             | 76 |
| 3.5.1 | 工作面概况 .....            | 76 |
| 3.5.2 | 测点布置 .....             | 76 |
| 3.5.3 | 观测参数和检测仪器仪表 .....      | 76 |
| 3.5.4 | 现场观测的结果和分析 .....       | 77 |
| 3.6   | 实验结果与现场观测结果的比对分析 ..... | 79 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 3.7 本章小结 .....                        | 81         |
| <b>第4章 采空区气体渗流场和浓度场耦合数值模拟研究</b> ..... | <b>83</b>  |
| 4.1 引言 .....                          | 85         |
| 4.2 CFD模拟和场模拟原理 .....                 | 85         |
| 4.2.1 数值模拟 .....                      | 85         |
| 4.2.2 CFD模拟 .....                     | 85         |
| 4.2.3 场模拟 .....                       | 86         |
| 4.3 FLUENT软件概述 .....                  | 87         |
| 4.3.1 FLUENT软件模块和Tecplot后处理软件 .....   | 88         |
| 4.3.2 FLUENT软件在本书数值模拟中的应用 .....       | 89         |
| 4.4 采空区气体渗流场和浓度场耦合数值模拟 .....          | 90         |
| 4.4.1 物理模型构建和边界条件设定 .....             | 90         |
| 4.4.2 基本守恒方程组 .....                   | 92         |
| 4.4.3 方程组的离散和数值解算方法 .....             | 93         |
| 4.4.4 气体压力分布规律 .....                  | 93         |
| 4.4.5 气体流场规律 .....                    | 95         |
| 4.4.6 气体组分浓度分布规律 .....                | 96         |
| 4.4.7 采空区遗煤氧化自燃带的确定 .....             | 104        |
| 4.5 本章小结 .....                        | 106        |
| <b>第5章 采空区气体传热理论</b> .....            | <b>109</b> |
| 5.1 引言 .....                          | 111        |
| 5.2 采空区传热的基本形式 .....                  | 111        |
| 5.2.1 热传导 .....                       | 111        |
| 5.2.2 热对流 .....                       | 112        |
| 5.2.3 热辐射 .....                       | 114        |
| 5.3 采空区的高温源 .....                     | 116        |
| 5.3.1 采空区高温源产生机理 .....                | 116        |
| 5.3.2 高温源位置 .....                     | 117        |
| 5.4 温度引起的瓦斯升浮现象 .....                 | 117        |
| 5.5 化学反应模型 .....                      | 118        |
| 5.5.1 化学反应模型理论 .....                  | 118        |
| 5.5.2 常用的化学反应模型 .....                 | 119        |

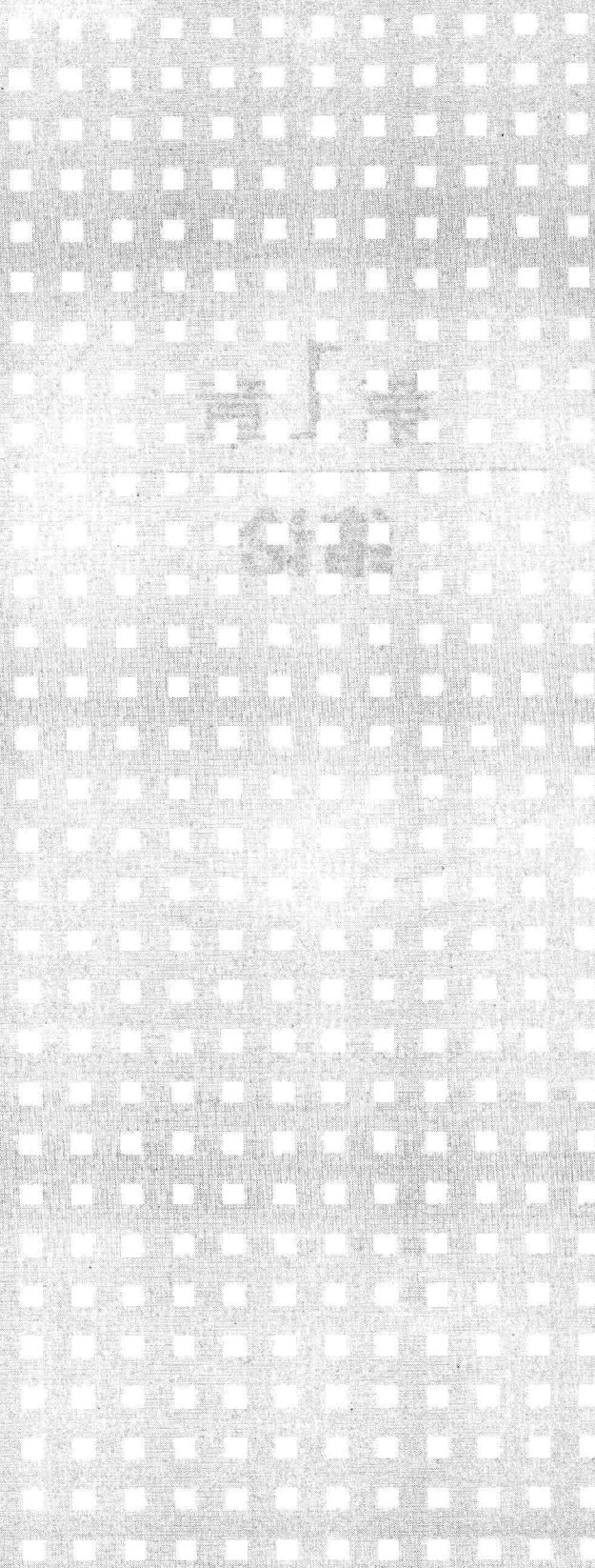
|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 5.6 采空区自燃前后气体组分的变化 .....         | 120        |
| 5.6.1 主要气体的组分浓度变化 .....          | 120        |
| 5.6.2 火源燃烧状态的气体判别指标 .....        | 122        |
| 5.7 采空区多孔介质能量方程 .....            | 124        |
| 5.7.1 简单情况下的多孔介质能量方程 .....       | 124        |
| 5.7.2 较为复杂情况下的多孔介质能量方程 .....     | 125        |
| 5.7.3 采空区多孔介质的能量方程 .....         | 126        |
| 5.8 采空区渗流场、浓度场和温度场耦合模型 .....     | 127        |
| 5.9 本章小结 .....                   | 128        |
| <b>第6章 采空区气体多场耦合数值模拟研究</b> ..... | <b>129</b> |
| 6.1 高温源和边界条件的设定 .....            | 131        |
| 6.2 物理模型构建和假设 .....              | 131        |
| 6.3 计算模型的选取 .....                | 132        |
| 6.4 方程组的离散和数值解算方法 .....          | 132        |
| 6.5 计算结果和讨论 .....                | 133        |
| 6.5.1 受自燃影响的气体压力分布规律 .....       | 133        |
| 6.5.2 受自燃影响的气体渗流场规律 .....        | 135        |
| 6.5.3 受自燃影响的气体温度分布规律 .....       | 135        |
| 6.5.4 受自燃影响的气体组分浓度分布规律 .....     | 141        |
| 6.6 实验、现场观测与模拟结果的比对分析 .....      | 143        |
| 6.7 研究成果对煤矿安全的指导意义 .....         | 145        |
| 6.8 本章小结 .....                   | 146        |
| <b>第7章 主要结论和展望</b> .....         | <b>147</b> |
| 7.1 主要研究工作和结论 .....              | 149        |
| 7.2 研究工作展望 .....                 | 150        |
| <b>参考文献</b> .....                | <b>152</b> |

# 第1章

---

## 绪论

简述了采空区瓦斯灾害和火灾的严重性，指出了采空区瓦斯涌出和燃烧爆炸是最严重的矿井灾害。详细总结和归纳了采空区气体流动和瓦斯燃烧爆炸的研究现状、发展趋势和不足之处，根据以上分析以及国家重点基础研究发展计划和国家自然科学基金的要求，指出了本书研究的主要内容，提出了本书的研究思路和技术路线。



## 1.1 研究背景和意义

我国富煤贫气少油，是以煤为主要能源的国家，而且以煤为主的能源格局数十年内不会发生根本改变。但在煤矿生产中，与采空区有关的瓦斯灾害和火灾频发，常常导致群死群伤恶性事故，是我国矿业发展中亟待解决的重大问题<sup>[1-3]</sup>。尤其是采空区存在的遗煤易自燃，为瓦斯爆炸提供了长期存在的火源，易引发继发性瓦斯爆炸，致使灾害事故后果十分严重。

瓦斯随着煤的开采不断被释放出来。采空区瓦斯通常占整个采场瓦斯涌出的很大一部分。采空区瓦斯随采空区的漏风流涌入工作面，是工作面瓦斯涌出的主要来源之一，约占40%~60%。因此，工作面的瓦斯超限与采空区有十分密切的关系<sup>[4]</sup>。采空区瓦斯涌出主要包括遗煤瓦斯涌出、上下邻近层瓦斯涌出、未采分层瓦斯涌出、围岩瓦斯涌出和相邻已采面老空区瓦斯涌出。各部分瓦斯涌入采空区后混合在一起，在浓度差和通风负压的作用下涌向工作面<sup>[5]</sup>。

综放工作面的采出率只有55%~80%，大量未采出的煤便形成了采空区的遗煤（也称浮煤）。遗煤自燃是采空区燃烧爆炸的最主要的火源。采空区相对封闭，其内遗煤自燃后难以及时发现，易形成大的灾害事故。随着采煤工作面的逐步推进，采空区毗邻工作面的边界动态变化，且不密封而存在漏风现象，使得采空区氧气增多。特别对于高瓦斯矿井，为了降低工作面瓦斯浓度而人为提高工作面风量，也导致工作面向采空区更多地漏风，使采空区氧气含量增大和氧化升温带范围扩大，即存在提高工作面瓦斯安全性的同时也增大了采空区遗煤自燃和瓦斯燃烧爆炸的危险性。

在一定的工作面推进速度、采空区漏风和遗煤自燃等条件下，采空区会发生严重的燃烧或爆炸事故，致使整个工作面结构和通风系统被破坏，工作面通风不正常。随着工作面煤层和采空区瓦斯不断接连大量涌出和积聚，工作面即存在发生二次或多次瓦斯连续爆炸的可能，致使灾害事故后果十分严重。1995年6月23日，淮南矿务局谢一矿44采区特大瓦斯爆炸事故，造成76人死亡，其采空区瓦斯不断涌出，连续发生了多次瓦斯爆炸。2004年11月28日，陕西铜川陈家山煤矿发生了导致166人死亡的特大瓦斯爆炸事故。采空区涌出和聚集的大量瓦斯是其多次爆炸的能量库<sup>[6]</sup>。2006年10月15日，张家口金能集团盛源公司宣东矿206综采工作面采空区发生瓦斯爆炸事故，造成4人死亡。2011年10月16日，陕西省铜川市照金镇田玉煤矿发生瓦斯爆炸事故，造成11人死亡。

采空区瓦斯和空气以混合气体的形式，以不同浓度分布在采空区各个区域，受工作面漏风流的风压、顶板破坏的冲击力、瓦斯涌出的动力、遗煤自燃的火风压等外力作用，在采空区内部形成流动，其组分浓度和温度也发生变化。

采空区气体流动和瓦斯运移机理一直是煤炭安全研究的重点。已有人建立了采空区气体流动和瓦斯运移的二维或三维数学模型,但是现有研究多做了采空区为连续均匀的多孔介质假设和等温假设,这样简化后的模型易于解算,但与采空区气体实际流动情况相差较大。从采动时顶板岩石冒落,到采空区后方压实的矿压过程上看,采空区内部介质是非均质的多孔介质。具体表现就是采空区介质的孔隙率和渗透率不是一个常数,而与空间位置有关。进而有利用分段函数将采空区介质的孔隙率和渗透率分段设定,但利用该假设解算的气体流场误差仍然较大。

另外,现有研究集中于采空区自然发火机理研究,即只考虑遗煤自然发火机理和自燃火灾发生前的气体流动和瓦斯运移情况,而很少考虑采空区遗煤自燃起火后,煤自燃释放的气体组分和热量与原有流场的相互影响。采空区遗煤自燃起火后,温度对瓦斯等气体的渗流场和浓度场影响很大。自燃火源释放二氧化碳和一氧化碳,消耗氧气和点燃瓦斯等可燃气体。在一定条件下,矿井瓦斯燃烧和爆炸可以相互转化。瓦斯爆炸后,影响范围大,大量氧气参加燃烧,造成含氧量低,同时由于一氧化碳增加,导致人员大量伤亡。爆炸产生的高温、高压气体,破坏通信设施、通风系统及其他井下设施,影响救灾决策,给矿山应急救援造成很大困难。

采空区遗煤自燃前后的混合气体的渗流场、浓度场和温度场的多场耦合规律是煤炭安全方面十分重要的研究领域<sup>[4]</sup>。对其进行深入研究,不仅有利于深入了解采空区气体流动情况,而且可以揭示采空区瓦斯燃烧和爆炸的相互转化规律,对于防治煤矿自燃火灾、一般瓦斯灾害以及防治危害性更大的次生灾害——继发性瓦斯爆炸具有十分重要的意义。

基于以上分析,提出了本书的研究内容。

## 1.2 国内外研究现状综述

本书从采空区气体流动和采空区瓦斯燃烧爆炸两个方面的研究工作进行综述。

### 1.2.1 采空区气体流动研究现状

早期的采空区气体流动规律研究主要是应用并联风路模型,即把采空区和回采工作面看作是两条并联的风路来分析采空区内的漏风量。该模型对分析回采工作面后无漏风源和汇的U型通风方式具有一定的指导意义,但当漏风源汇数量较多或采空区几何形状比较复杂时不适用。黄伯轩、王保伦等<sup>[7]</sup>的平面无涡流

源汇模型将采空区视为平面无涡流,在简单源汇分布情况下用图解法来研究采空区气体的流动状态。但求解多漏风源汇或者复杂几何形状的采空区气体流动状态比较困难,甚至技术上不可行。

采空区管网模型和滤流场模型是较早的具有代表性的采空区气体流动模型,其把采空区介质看做是纵横交错相互连通的管网,认为气体在采空区的流动可以近似认为是在众多管网中的流动。冯小平<sup>[8]</sup>、徐军<sup>[9]</sup>和淮南工学院的张国枢<sup>[10]</sup>等人以采空区空气流动属于层流和湍流之间的过渡流为基础,对采空区进行了管网化划分,建立采空区滤流场数学模型,并用网络解算的方法对采空区风流状态进行了数值模拟。他们还以能量方程和质量方程为基础对采空区的温度场和浓度场进行了模拟。刘泽功<sup>[11]</sup>也将采空区冒落带的气体流动假设为通过许多纵横交错的短管流动,将采空区多孔介质简化为网络系统,从而根据网络模拟技术,对采空区漏风场进行模拟解算。丁文通等<sup>[12]</sup>通过建立采空区滤流场数学模型,对采空区进行了管网化划分,并以实例用计算机模拟采空区的流场分布,应用极限风速法对采空区“三带”划分进行了研究。

更具代表性的观点是应用渗流理论来研究采空区气体流动和瓦斯运移规律,将采空区内的介质视为连续多孔介质,而气体在采空区的流动遵循线性或非线性的渗流定律<sup>[13,14]</sup>。

早期研究主要建立了煤层瓦斯线性渗流数学模型,认为在等温和低速条件下的煤层瓦斯渗流是线性渗流。周世宁院士在1965年就提出了煤层瓦斯的流动基本符合达西渗流定律<sup>[15]</sup>。章梦涛的渗流偏微分方程模型<sup>[16-18]</sup>将地下水的渗流理论引入到采空区气体流动中,利用多孔介质流体动力学理论研究采空区气体流动状态,建立了采空区气体流动和瓦斯运移的二维数学模型。郭勇义和周世宁(1984)<sup>[19]</sup>通过相似理论方法研究了四种一维瓦斯流场的完全解,提出了修正的瓦斯流动方程。谭学术和袁静(1986)<sup>[20]</sup>研究了煤层真实瓦斯气体的渗流方程,并对方程作了简化处理。余楚新、鲜学福和谭学术(1989)<sup>[21]</sup>提出煤层中参与渗流的瓦斯量是煤体瓦斯含量部分量,并在假设煤体中瓦斯吸附与解吸过程是完全可逆的条件下,建立了煤层瓦斯渗流的控制方程。孙培德(1989、1994)<sup>[22,23]</sup>修正和完善了均质煤层的瓦斯流动数学模型,同时发展了非均质煤层的瓦斯流动数学模型。印度的Patrick(1995)<sup>[24]</sup>利用气体扩散方程和Darcy定律建立了三维的矿区气体扩散模型,并用有限差分法进行解算。黄运飞和孙广忠(1993)<sup>[25]</sup>讨论了因突出而形成的瓦斯、粉煤两相流流动过程,提出“煤-瓦斯介质力学”的观点,并对煤-瓦斯介质的变形、渗透率、强度等力学特性进行了系统研究。孙培德(2001)<sup>[26]</sup>应用统计热力学与量子化学的理论和结合实验量化计算结果,得出真实瓦斯气体状态的经验方程。郑哲敏院士课题组<sup>[27,28]</sup>阐述了煤与瓦斯突出的孕育、启动与停止过程的机理,指出煤与瓦斯的突出机理缘于煤的破碎启动与瓦斯渗流的耦合。

近些年,瓦斯非线性渗流研究也逐步深入。E. M. Allen 在将达西定律用于均匀煤样涌出瓦斯的试验中得出的结果与实测不符,证明了瓦斯在煤岩体中的渗流存在不遵守线性的达西定律的情况,即存在非线性关系<sup>[29]</sup>。Khristanovici<sup>[30]</sup>和 Siemek 等<sup>[31]</sup>认为在压力梯度较大时,二项式非线性渗流定律比线性的达西定律更符合实际。孙培德基于幂定律的推广形式,建立了可压缩性气体在煤层内流动的数学模型,得出幂定律更符合煤层内瓦斯流动的基本规律<sup>[32]</sup>。章梦涛<sup>[33]</sup>、梁冰<sup>[34-36]</sup>和赵阳升<sup>[37,38]</sup>等也较系统地研究了非等温、煤体变形及瓦斯渗流耦合力学模型及其有效应力规律。齐庆杰和冯圣洪<sup>[39]</sup>根据渗流理论,建立了三维的采空区气体流动和瓦斯运移的数学模型及数值解算方法。罗新荣<sup>[40]</sup>基于实验研究,提出了基于克林伯格(Klinkenberg)效应的修正达西定律,建立了非线性瓦斯渗流数学模型。丁广骧等<sup>[41,42]</sup>引用了大雷诺数渗流力学的 Bachmat 方程,得出了采空区非线性的渗流力学数学模型及数值解算方法。罗新荣<sup>[43,44]</sup>建立了非均质可压密煤层瓦斯运移和数值模拟方程,并得到了煤层瓦斯压力分布曲线和煤(孔)壁瓦斯涌出衰减曲线方程。陈全<sup>[45]</sup>利用渗流理论和质量守恒方程,建立了采空区气体三维不可压缩非线性渗流模型,并用有限元法进行解算。辽宁工程技术大学的单亚飞等<sup>[46]</sup>利用弥散动力学和渗流理论,建立采场气体运移的数学模型,采用有限元方法进行了数值解算,并对计算结果进行处理和分析。辽宁工程技术大学的李宗翔等利用有限元方法对采空区自然发火的“三带”进行了划分<sup>[47]</sup>,并对采空区自然发火的早期过程<sup>[48]</sup>、综放工作面的自然发火<sup>[49]</sup>、综放面煤柱内的漏风和耗氧过程<sup>[50]</sup>、综放沿空巷周围煤体自燃升温过程<sup>[51]</sup>,以及采空区温度场温度分布问题<sup>[52-54]</sup>等煤自然发火各个方面进行了数值模拟。

还有一些其他的采空区气体流动模型及其数值解法。例如朱华的电模拟法<sup>[55,56]</sup>可以定量化模拟采空区,但其几何边界改变困难,有些参数模拟困难,模拟成本较高;徐瑞龙等的物理相似法<sup>[57]</sup>,可以定量研究采空区渗流、弥散及传热过程,但测试技术要求高,模型制作困难,模拟成本高;刘剑的三维有限元法<sup>[58,59]</sup>。

近来,更多研究利用 FLUENT 软件包来求解采空区气体分布规律。肖畅<sup>[60]</sup>和朱毅<sup>[61]</sup>通过实验和现场观测,拟合出孔隙率等参数的分段函数,建立了采空区漏风松散体空隙分段分布方程、采空区不同深度的分段渗透系数方程等自然发火预测模型,并利用 FLUENT 解算。Yuan Liming 和 A. C. Smith<sup>[62]</sup>根据小尺寸自燃实验数据,数值模拟了遗煤自燃下的考虑老空区影响的采空区的气体流动和传热情况,研究了其温度场和氧气浓度场的分布规律。王俊峰和邬剑明等<sup>[63]</sup>在示踪气体试验的基础上,建立了模拟综采工作面采空区空气、瓦斯流动的数学物理模型,利用 FLUENT 解算了采空区氧气和瓦斯的分布规律,得出的 CFD 模型模拟结果与现场长期监测结果相吻合,高瓦斯涌出可以加速采空区的自我惰化,有利于防治采空区自燃。

### 1.2.2 瓦斯燃烧爆炸研究现状

瓦斯燃烧过程中具有自我加速的特点,在封闭环境下,具备适当条件就可能发展为爆炸,在高温下这种转换更容易发生。瓦斯爆炸传播过程中,可能点燃可燃物,特别是点燃可燃气体而导致火灾。因此,瓦斯的燃烧和爆炸是可以相互转化的<sup>[1]</sup>。

已有研究主要集中在燃烧和爆炸的点火源、气体爆炸极限范围、燃烧爆炸的加速特性等瓦斯燃烧爆炸机理方面。

采空区遗煤易自燃起火,自燃源作为引火源易引燃引爆采空区瓦斯-空气混合气体。杨永辰等<sup>[64]</sup>认为采空区自燃是导致混合气体爆炸的根本原因,而火风压是形成爆炸条件的动力源。邓军等<sup>[65]</sup>对CO和C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>两种自燃指标气体与CH<sub>4</sub>组成的多元瓦斯气体的爆炸极限特性,探索了可燃性气体本性对浓度爆炸极限的影响、CO对多元瓦斯气体的阻尼效应以及C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>与CO间的协同氧化诱导效应。刘志坚等<sup>[66]</sup>根据可燃气体爆炸的基本条件以及采空区的实际情况,对采空区可燃性气体爆炸引火源特性进行了研究,最终得出采空区遗煤自燃以及岩石相互摩擦引燃引爆瓦斯过程的主要影响因素。秦波涛等<sup>[67]</sup>通过理论和实验分析,指出采空区自燃主要产物CO大大增加了瓦斯-空气混合气体的爆炸浓度极限范围。并在火风压作用下,在发火区与非发火区之间不断形成CH<sub>4</sub>、CO与新鲜空气的充分混合和热量的对流交换,易导致瓦斯爆炸事故发生。

顶板和煤岩之间或煤岩和煤岩之间的相互摩擦也有可能引燃引爆采空区瓦斯-空气混合气体。康怀宇<sup>[68]</sup>综述了美国矿业局的研究成果,指出当砂岩与砂岩、页岩与砂岩相互撞击与摩擦时,能够引起瓦斯的燃烧或爆炸。特别是在矿井瓦斯中含有乙烷、丙烷和丁烷等气体时,引燃的温度有所降低,因此在井下条件下发生瓦斯爆炸比实验室条件下更容易。王玉武等<sup>[69]</sup>通过对阳城沁水矿区煤层顶板岩石相互摩擦引燃引爆瓦斯模拟实验,得出“岩石在冒落过程中相互撞击摩擦产生火花,可能引起瓦斯与空气混合物着火,是造成采空区瓦斯爆炸(燃烧)事故引爆源”的结论。王家臣等<sup>[70]</sup>利用旋转摩擦试验机进行了岩石摩擦、撞击的模拟试验研究。证实顶板垮落过程中岩石间相互摩擦、撞击作用引起的表面温度升高和火花可以成为诱发采空区瓦斯燃烧爆炸事故的点火源。

针对采空区瓦斯易燃烧爆炸的特点,人们研究了采空区瓦斯燃烧爆炸的防治措施。陈俊成<sup>[71]</sup>针对辛庄煤矿东翼三采区发生的特大恶性瓦斯爆炸事故,对瓦斯涌出异常机理进行了分析。秦玉金等<sup>[72]</sup>根据阳城、沁水矿区旧式采煤方法的工艺特点,叙述了采空区瓦斯爆炸(燃烧)的根本原因以及采空区瓦斯浓度分布特征,介绍了采空区瓦斯爆炸(燃烧)综合防治技术。程绍仁等<sup>[73]</sup>通过对晋城矿区瓦斯涌出情况和矿井瓦斯来源的分析,对采空区瓦斯爆炸原因进行了再探讨。