

国家自然科学基金 (51174211 50674091)

中央高校基本科研业务费 (2010YZ01 2010QZ01)

采空区自然发火 数值模拟

■ 秦跃平 杨小彬 刘 伟 吴建松 著



 煤炭工业出版社

国家自然科学基金 (51174211, 50674091)

中央高校基本科研业务费 (2010YZ01, 2010QZ01)

采空区自然发火数值模拟

秦跃平 杨小彬 刘 伟 吴建松 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

采空区自然发火数值模拟/秦跃平等著. --北京:煤炭工业出版社, 2015

ISBN 978-7-5020-4751-1

I. ①采… II. ①秦… III. ①采空区—煤层自燃—数值模拟—研究生—教材 IV. ①TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 310534 号

采空区自然发火数值模拟

著 者 秦跃平 杨小彬 刘 伟 吴建松
责任编辑 袁 筠
责任校对 邢蕾严
封面设计 王 滨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898 (总编室)
010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)
电子信箱 cciph612@126.com
网 址 www.cciph.com.cn
印 刷 煤炭工业出版社印刷厂
经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 11 插页 8 字数 254 千字
版 次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷
社内编号 7606 定价 38.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

内 容 提 要

本书全面阐述了煤矿开采采空区自然发火理论及数值模拟研究最新进展,系统、详细地讲述了采空区自然发火多场耦合理论模型和基于有限体积法的数值求解及软件开发。全书共分9章,主要内容包括采空区自然发火多场耦合模型、采空区自然发火有限体积离散二维及三维计算模型及软件开发、数值模拟采空区内部多物理场量分布规律及注氮防灭火措施实施效果等。

本书可作为煤炭类高等院校的研究生教材,也可作为在这一领域进行科学研究和应用的科技工作者的参考书。

前 言

煤炭是我国的主要能源和重要战略物资,具有不可替代性。随着煤矿产量的提高和开采深度的增加,煤矿自燃灾害已成为影响煤矿安全生产的主要灾害之一。煤矿采空区是煤矿自燃火灾主要场所之一,采空区内部氧化升温自燃机理及防治技术是从事煤矿火灾防治及安全管理的科研工作者和管理者的重要研究课题。采空区内部存在着传热、传质等复杂的热力学过程,涉及气体流场、氧浓度场、气体温度场和遗煤温度场等多场相互耦合,而采空区内部多场耦合理论及数值模拟的研究著作较少,为此作者在多年研究和积累的基础上撰写了本书。

本书从理论、实验及数值模拟等多方面对采空区自然发火进行了广泛研究,将采空区自然发火最新研究成果和进展进行了总结,重点论述了移动坐标系下采空区多场耦合自然发火理论模型及数值求解过程。全书在撰写过程中注重“基础性、实用性”的原则,希望能够丰富和完善采空区自然发火理论体系及应用技术。

全书共9章。第1章为采空区自然发火概况介绍。第2章详细讲述了采空区自然发火多场耦合理论模型及定解条件。第3章具体讲述了采空区自然发火理论模型参数的实验测定。第4章简要介绍了有限体积法在传热学中的应用。第5章至第7章详细阐述了二维采空区自然发火计算模型的数值离散求解及软件开发、采空区多物理场分布规律数值模拟、采空区三带分布规律,并模拟分析了注氮防灭火措施下采空区多物理场量变化规律。第8章和第9章阐述了三维采空区自然发火计算模型的数值离散求解及软件开发、采空区多物理场分布规律数值模拟。本书可以作为煤炭类高等院校相关专业研究生教材,以及相关学科科研人员的参考用书。

本书在国家自然科学基金(51174211, 50674091)、中央高校基本科研业务费(2010YZ01, 2010QZ01)等项目资助下完成,在此表示深深的谢意!

由于采空区自然发火问题的复杂性,并涉及多个学科交叉,加之时间及作者水平有限,难免存在不妥之处,恳请读者对本书及我们的工作予以批评

和指正。

本书为作者研究团队多年来的研究成果，王月红撰写了第2章的大部分内容，刘宏波撰写了第4章大部分内容，宋宜猛、郝永江、刘鹏、蔡彬彬等提供了部分素材和诸多帮助，并付出了辛勤劳动，在此表示衷心的感谢！

作 者

于中国矿业大学（北京）

2014年7月

1 绪论	1
1.1 采空区自然发火概况	1
1.2 采空区自然发火研究概述	3
1.3 数值模拟方法概述	6
2 采空区自然发火理论模型	9
2.1 基本概念	9
2.2 静坐标下的采空区自然发火微分模型	12
2.3 移动坐标下的采空区自然发火微分模型	24
2.4 移动坐标下的采空区自然发火积分模型	28
2.5 采空区自然发火的边界条件	32
2.6 采空区自然发火模型	36
本章小结	40
3 采空区自然发火模型参数测定	41
3.1 煤(岩)导热系数测定	41
3.2 煤的氧化升温实验	44
3.3 煤的耗氧速率分析	47
3.4 煤的放热强度分析	50
3.5 采空区渗流参数分析	52
本章小结	57
4 有限体积法基础	58
4.1 有限体积法的发展及基本思想	58
4.2 二维导热问题有限体积法研究	59
4.3 三维导热问题有限体积法研究	66
本章小结	79
5 二维采空区自然发火计算模型离散	80
5.1 采空区气体流场模型离散	80
5.2 采空区氧气浓度场模型离散	85

5.3 采空区温度场模型离散	90
本章小结	98
6 二维采空区自然发火数值模拟	99
6.1 程序设计	99
6.2 软件界面及功能介绍	106
6.3 采空区自然发火参数确定	109
6.4 不同推进速度下的采空区自然发火规律	110
6.5 不同工作面供风量下采空区自然发火规律	114
6.6 采空区“三带”划分	118
本章小结	119
7 采空区注氮防灭火数值模拟	121
7.1 采空区防灭火技术	121
7.2 采空区注氮设计	125
7.3 注氮下的采空区自然发火数值模拟	129
7.4 注氮点深度确定	131
本章小结	132
8 三维采空区自然发火计算模型离散	133
8.1 采空区气体流场模型离散	133
8.2 采空区氧气浓度场模型离散	138
8.3 采空区温度场模型离散	142
本章小结	148
9 三维采空区自然发火数值模拟	149
9.1 程序设计	149
9.2 自燃参数确定及软件界面	156
9.3 同忻矿首采工作面自然发火模拟	158
本章小结	161
参考文献	162

1 绪 论

煤矿采空区是煤矿自燃火灾主要场所之一。由于采空区的特殊性,采空区自然发火内部多物理场分布规律、采空区煤自然发火机理及科学合理的防灭火技术等问题是目前采空区自燃火灾防治的重点研究课题。

1.1 采空区自然发火概况

煤炭是我国的主要能源和重要战略物资,具有不可替代性,在我国一次性能源生产和消费中约占 74% 的比重,煤炭在我国能源结构中的主体地位在未来几十年不会改变。随着国民经济快速发展,煤炭产量逐年增加,据国家统计局的数据显示,2009 年全国产原煤为 29.8×10^8 t,2010 年全国原煤产量为 32.4×10^8 t,同比增长 8.9%^[1]。然而,随着煤炭产量的提高,我国的煤矿安全生产形势却不容乐观。2003 年,全球的煤炭生产总量约 50×10^8 t,煤矿事故中死亡的总人数约 8000 人;当年中国的煤炭产量为 17×10^8 t,约占全球的 35%,事故死亡人数约 6400 人,占了近 80%。仅仅在 2005 年,我国就有大约 6000 名矿工丧命,这一数字是同年美国煤矿矿工死亡人数的 150 倍。自 2001—2004 年,我国煤矿发生一次死亡人数超过 10 人的特大事故共 188 起,也就是说,平均 7.4 天就会发生一起,其中平均每 50 天就会发生一起一次死亡人数超过 30 人的特别重大事故^[2]。近年来随着国家对煤炭安全生产的重视,全国煤矿百万吨死亡率由 2007 年的 1.485 下降到 2010 年的 0.798,同比下降 46.3%,而近年来美国百万吨煤死亡率却一直在 0.03% 以下^[3]。因此,我国的煤矿安全生产水平与其他国家如美国相比,形势依然严峻。图 1-1 所示为 2008 年

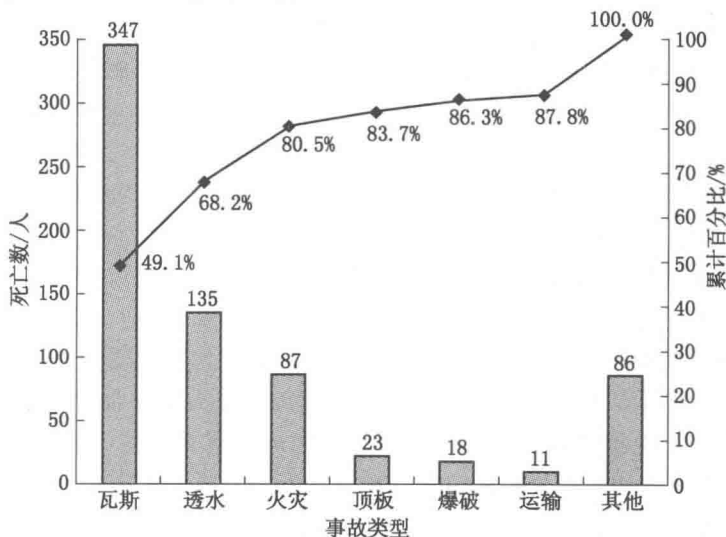


图 1-1 2008 年我国煤矿一次死亡 10 人以上特大伤亡事故统计

我国煤矿一次死亡 10 人以上特大伤亡事故统计。

从图 1-1 中可以看出,煤矿火灾所引起的死亡人数占总死亡人数的 12.3%,仅次于瓦斯和透水事故,这个比例还没有把因为火灾引起瓦斯爆炸事故造成的死亡人数计算在内。所以,研究煤矿火灾事故对保证我国煤矿的安全生产和提高经济效益都具有重要的现实意义。

煤矿火灾事故大都是井下煤自然发火引起的,煤自燃是煤固有的特性之一。煤矿井下自燃主要发生在采空区、压裂的煤柱等地点,其中以采空区最为严重。近年来,随着科技的进步和管理水平的提高,自燃火灾百万吨发火率虽然逐年下降,但是我国煤矿自燃火灾仍较为严重^[4]。截止到 2001 年 5 月,我国大中型煤矿自然发火情况统计见表 1-1。

表 1-1 我国大中型煤矿自然发火情况统计

区 域	I 级		II 级		III 级		IV 级		无自燃危险	
	煤矿数/处	比例/%	煤矿数/处	比例/%	煤矿数/处	比例/%	煤矿数/处	比例/%	煤矿数/处	比例/%
京、津、冀区	3	7.89	5	13.16	10	26.32	18	47.37	2	5.26
晋、陕、蒙区	26	15.76	42	25.45	39	23.64	39	23.64	19	11.51
东北区	25	35.21	20	28.17	14	19.72	9	12.68	3	4.22
华东区	31	27.43	39	34.51	30	26.55	5	4.42	8	7.08
中南区	10	15.38	9	13.85	22	33.85	5	7.69	19	29.23
西南区	9	23.08	5	12.82	14	35.90	6	15.38	5	12.82
新、甘、宁、青区	23	63.89	6	16.67	2	5.55	4	11.11	1	2.78
全国合计	127	24.10	126	23.91	131	24.85	86	16.32	57	10.82

注:自然发火等级的划分依据是《〈煤矿安全规程〉1992 年版执行说明》。

从表 1-1 中可以看出,我国 72.86% 的大中型煤矿发生过危险程度严重或较严重(I、II、III 级)的自然发火,I、II 级自然发火危险矿井占到矿井总数的 48.01%,而无自然发火危险或自然发火危险较小的煤矿仅占 27.14%^[5]。根据统计资料,按采空区、巷道及其他地点分类,采空区自然发火次数占火灾总数的 60%,巷道煤柱自然发火占 29%,其他地点自然发火占 11%^[6]。由于煤层自燃,我国每年损失煤炭资源 2×10^8 t 左右^[7]。2010 年 12 月,国家安全生产监督管理总局在《煤矿安全生产“十二五”规划(征求意见稿)》中把自燃机理列为亟须解决的科研攻关难题,同时强化火灾防控技术措施,进一步完善灾害监控、预测、预警、防治技术体系^[8]。因此,进一步掌握自然发火机理、准确预测预报和防治自然发火,对煤矿的安全生产具有重要的理论和实际意义。

随着采煤方法及采煤工艺的不断发展更新,煤炭产量大幅增加,经济效益不断提高,但同时也造成了采空区遗煤增多,增加了浮煤氧化自燃潜在危险,使得煤层发火概率增高,矿井自燃火灾事故增多。采空区自然发火除了能引发煤矿火灾之外,还可能引起瓦斯爆炸、煤尘爆炸等次生事故,其危害程度不亚于瓦斯、顶板、突水等事故类型,所以在煤矿火灾治理的问题上,防治采空区自燃成了一线技术人员和科研人员所关注的焦点^[6]。

采空区自燃是在煤矿开采过程中由于工作面漏风带进来的氧气与遗落在采空区内的浮煤发生物理、化学吸附以及化学反应,煤氧化产生大量热量,热量得不到及时的疏散,造成热量积聚最终使得煤体发生自燃的现象。漏入采空区内的气体温度、气体渗流速度、氧气浓度等因素相互作用引起采空区气体和煤岩的温度变化,造成采空区内部温度积聚,采空区内部温度的变化加剧遗煤氧化速度,氧化速度加快进一步升高采空区内部温度,所以采空区自燃是采空区内部多场耦合动态氧化升温达到采空区内部遗煤燃点而着火的一个过程^[9]。由于采空区情况复杂多变,火源位置又无法接近,给灭火工作带来很大的盲目性,这样既拖延了灭火时间,又造成了在灭火过程中人力、物力和财力的极大浪费,甚至会冻结大量的煤炭资源。因此,在灭火之前正确地预测出采空区自然发火的危险性及其发火源的位置是一个刻不容缓的问题。

1.2 采空区自然发火研究概述

1.2.1 煤的自燃学说与机理

煤的自燃是一个极其复杂的、动态变化的、自动加速的物理化学过程,其实质是一个缓慢的自动氧化、放热、升温,最后引起燃烧的过程。它不仅与煤自身的氧化性和放热性有关,还与漏风供氧和蓄热环境密切相关。煤自燃是煤体放热和环境散热这对矛盾动态发展的过程,是一个极其复杂的物理化学过程。发火形式与普通燃烧火灾的不同之处是其为不充分燃烧,产生大量的CO等有害气体,严重威胁工作面的安全生产^[10]。随着煤自燃过程的发展,煤体内的各种参数都在发生变化,进而造成煤体内部高温区域的位置、温度、漏风强度和氧浓度等参数随时间发生动态改变。

自17世纪开始探索煤自燃问题以来,研究学者们提出了多种煤炭自燃学说,主要有黄铁矿导因学说、细菌导因学说、酚基导因学说及煤氧复合学说等^[11]。目前,煤氧复合作用理论已经得到大多数学者的认同。该理论认为原始煤体受采动影响产生大量的裂隙,使煤的内表面大大增加,通过这些内表面煤体与空气中的氧气进行物理吸附、化学吸附和化学反应,在这些吸附与反应的过程中放出热量,如果这些热量不能及时地散发出去,则造成热量积聚,使煤体的温度升高,温度的升高更加速了煤与氧气的反应从而产生更多的热量,不断地自加速过程使煤体的温度持续升高,最后达到煤的燃点而自燃。在煤氧复合学说基础上,国内外学者又提出了一些更具体的学说,如自由基作用学说、氢原子作用学说、基团作用理论^[12-16]等。

近十多年来,国内外学者分别从煤的活化能、煤的分子结构模型、煤的表面反应热、煤岩相结构组成等角度用现代技术手段进行了研究。舒新前、路继根、彭本信、Garcia P.等利用TGA(热重分析)、DTA(差热分析)、DSC(差示扫描量热)及FTIR(红外光谱)等不同热分析技术对煤自燃机理进行了研究^[17-20];Tevruucht、Patil、Martin、刘剑等采用煤的活化能理论对煤的自燃机理进行了研究^[21-24];在煤分子结构方面,Wender提出的威斯化学结构模型是煤化学界公认的比较合理的化学结构模型^[25-27]。X. J. Hou、P. Straka等应用分子动力学和量子化学方法对煤的大分子结构特征进行了研究^[28,29]。徐精彩、葛岭梅在对煤分子结构分析的基础上,推断出各类表面活性结构在低温阶段的三步化学反应及其热效应^[30,31];Ltay、Continillo、贺敦良从煤氧化反应和表面反应热的角度研

究了煤的自燃机理^[32-34]；舒新前、王晓华、张玉贵、Streszhelm 等从煤岩相学角度研究了煤的自燃机理^[35-40]。

1.2.2 煤自燃实验及实验装置

20 世纪 80 年代以来，国内外学者对于煤的自燃主要采用实验模拟的方法，全球各产煤大国先后建立了各种规格的自然发火实验台用来模拟煤的自燃过程，进而研究采空区煤的实际自燃过程。

国际方面，1979 年美国人 James B. Stott^[41]设计建立了一台高 5 m、直径 60 cm、装煤 1 t 的垂直圆柱体自然发火实验台。1986 年 James B. Stott 和 Benjamin J. Harris 等人^[42,43]重新建立了高 2 m、直径 30 cm 的圆柱形煤体自然发火实验台。1987—1990 年新西兰坎特伯雷大学的 X. D. Cheng 和 James B. Stott^[44,45]建立了大型自然发火模拟实验台。土耳其人 Fehmi AkgUn 等人^[46]建立了长 3 m、直径 0.3 m 的自然发火实验台。20 世纪 90 年代后，国际上开始出现超大吨位的自然发火实验台，1991 年 Smith A. C^[47]等人建立了装煤达 13 t 的大型自然发火实验台；Cliff D., R. Bennet 等人^[48]于 1998 年建立了装煤量达 16 t 的大型自燃实验台。1998 年西班牙人 V Fierro^[49]利用真实的电厂储煤场进行发火实验，实验用煤量高达 2000~3000 t。

国内方面，淮南工业学院的张国枢、戴广龙、王卫平等人^[50]于 1999 年设计了能够模拟煤炭在常温条件下自燃的发生和发展过程；西安矿业学院的徐精彩教授、葛岭梅教授等人^[51]于 2002 年也设计建造了大型煤自然发火实验台来模拟煤的自燃过程，其设计更加智能和完善，装煤量更大，更能符合现场的实际情况；中国矿业大学的张瑞新教授等人^[52,53]建立了用于研究露天煤体和煤堆的自燃过程的大型煤堆自燃实验台；安徽理工大学的唐明云等人^[54]于 2008 年用不同空气流量做了煤升温氧化实验，得出空气流量和煤升温氧化过程基本呈现正态分布的结论。湖南科技大学的王从陆^[55]等人通过对采集的煤样进行热解试验，用气相色谱仪测定了试验煤样在不同热解温度下氧气的含量，分析了氧气随温度变化的规律，得出了耗氧速率与温度的数量关系，可用于判定煤炭自燃的阶段，为科学控制煤炭自燃、防止煤炭自燃的发生提供了决策依据。河南理工大学的于水军、余明高^[56]等人通过升温氧化实验，发现了不同的煤在不同的阶段有不同的氧化特性，可以选择不同气体作为煤自燃标志性气体的规律。中国矿业大学（北京）的秦跃平等研究粒度对煤的升温氧化的影响，得出不同粒径的煤样氧化速度随着温度升高而增大，粒径较小的煤样，耗氧速度增加较快；在相同温度条件下，氧化速度有随着煤粒度的增大而减小的规律性，并且当温度高于 70℃ 时耗氧速率和煤样粒径之间满足负指数关系。

1.2.3 煤自燃理论模型及数值模拟

实验模拟只能反映在实验室条件下煤的自燃状况，而不能真实地反映采空区的自燃情况。由于采空区是一个封闭的区域，用于采空区内部多物理场量的测试技术和手段非常有限，测试结果大都为点测量，不具备普遍性和通用性，因此在对煤自燃机理和实验模拟研究的基础上，各国学者在建立自然发火数学模型和数值模拟方面做了大量研究。随着计算流体力学和计算机技术的飞速发展，数值模拟方法越来越多地被用于解决矿井火灾问题。数值模拟因其方便、快捷和可预测性成了现阶段自燃防治的研究热点。从开始时模拟无反应无黏性流体的一维流动，发展到今天已出现一些能够详细模拟带化学反应的多维流动问

题,从最初的简单稳态一维无反应模拟发展到今天的三维、非稳态和多场耦合模拟,数值模拟在一定程度上弥补了火灾防治试验研究耗资较大、周期长、安全性差、所得信息少等不足,在矿井火灾防治方面发挥着越来越重要的作用。

对煤自燃的研究首先是从研究煤堆自然发火的危险性开始的。从1980年开始,美国、法国、澳大利亚、日本和中国等国学者如 Brooks K., Schmal D., Sasaki Kyuro, Nordon P., Zhu Mingshan, 卞晓措, 杨运良, 张瑞林和冯小平等, 针对采空区或地面煤堆的自然条件, 运用传质学、传热学和 Arrhenius 公式建立了多种煤自然发火的数学模型, 进而模拟煤的自然过程, 由此预测采空区或煤堆的自然发火危险性^[57-66]。荷兰学者 Schmal D. 等人^[58]给出了储煤煤堆的数学模型; 日本学者 Sasaki Kyuro^[60]利用等效暴露时间法估计煤的放热速率, 根据暴露在空气中煤层的温度、氧浓度变化情况来预测煤堆自然发火的危险程度; 澳大利亚学者 Nordon P. 等人^[62]建立了有源的非稳态自然发火模型用以预测煤的自然性, 其源项与温度满足阿氏方程, 与氧气的浓度成正比。张辛亥等人^[67]运用六面计算元体建立数学模型, 并用 Fluent 模拟软件模拟得出采空区的渗流速度、氧气浓度的分布情况, 并以模拟结果划分了采空区“三带”。宋志等人^[68]提出用人工神经网络来预测煤自然发火期的模型, 但由于首先需要大量学习样本对网络进行训练, 前期工作量非常大。余明高等人^[69,70]对苏联学者卡连金提出的计算煤层最短发火期的模型^[71]进行了修正和完善, 在绝热的条件下, 提出了新的最短自然发火期解算模型和相应实验方法, 预测准确率达 75%~86%, 对现场安全生产具有一定指导作用, 但在应用过程中发现同一个局(矿)最长与最短自然发火期相差达 9~10 倍^[72]。邓军等人^[72]通过对煤自燃过程及总参数的理论分析, 得出煤体自然发火期与表征外界散热条件的毕渥数 Bi 、表征煤体散热性的煤体导温系数 A 和表征煤体放热性的参数 A^* 有关。

邓军^[73,74]通过分析巷道氧化升温、散热的能量守恒性, 建立了能量守恒方程, 得到简化的巷道煤层自燃预测模型, 该模型能够预测巷道由于长时间氧化积聚而产生温度升高所引发的矿井自燃; 根据能量守恒定律建立了采空区自燃动态数学模型, 并利用该模型解算对比分析得出了工作面最小推进速度。王振平^[75]根据氧浓度扩散规律, 建立了一维的非稳态氧浓度模型, 描述了氧气在多孔介质中的流动和扩散规律。陈长华^[76]首次提出了采空区流动为模糊渗流的概念, 并依此建立了模糊渗流模型。何启林^[77]考虑采空区漏风和推进速度对自燃的影响, 建立了采空区自燃预测数学模型, 可以预测在漏风加大或推进速度减慢的情况下发生自燃的可能性, 并在 fluent 模拟软件上予以实现。

随着科技的发展, 电子计算机的数值计算能力也越来越强大, 逐渐可以满足大规模的数据运算。采取的数值模拟方法也越来越成熟, 更加接近采空区实际, 数学模型也从简单的达西流发展到非达西流等^[78]。齐庆杰等人以多孔介质渗流和动力弥散理论为基础, 建立了采场三维稳定渗流和瓦斯分布的数学模型, 并给出了数学模型的 Galerkin 有限元解法^[79]。章梦涛利用渗流理论, 将采场中的空气流动视为工作面和采空区不同介质的渗流, 其中工作面为空隙度 $m=1$ 的渗流, 并依据质量守恒原理建立了统一数学模型^[80]。李宗翔^[78,84]根据采空区自燃和瓦斯流动超限等特点, 并结合迎风格式的有限元法等数值计算方法开发了“3G”综合数值模拟软件。该软件不仅能够模拟采空区自燃, 也可描述采空区瓦斯流动状态, 并将二者进行耦合。该模拟系统还可以模拟采空区 CO 和 CO₂ 等指标性

气体,为采空区火灾的早期预测和及时预报提供了可靠的依据。该软件是采空区数值模拟软件中比较有代表性的成果。丁广骧于1996年应用三维多孔介质流场的紊流扩散方程和迎风加权 Galerkin 有限元法,研究了瓦斯、氮气在三维采空区内的扩散运动和浓度分布,给出的节点加权法有效地避免了求解扩散方程式的数值振荡^[81,82]。单亚飞根据采空区有害气体的运移规律,建立了采空区有害气体的运移数学模型,通过模拟采场气体压力、CO 等火灾气体浓度分布,预测采空区自然发火位置^[83]。朱建芳^[85]利用有限差分法开发了采空区自燃预测数值模拟软件,并得到了无因次自燃判定指标。秦跃平等^[86-94]利用有限体积法建立了移动坐标下的采空区自然发火二维模型,利用 VB 语言编制了自然发火模拟软件。

1.3 数值模拟方法概述

计算机的出现引发了一场重要的技术革命,使科学研究和工程分析方法继理论方法、实验方法之后产生了第三种方法——数值模拟。数值模拟以电子计算机为手段,将工程问题、物理力学问题乃至自然界各类问题用数字形式或数字、图像形式表示出来,达到对其进行研究或演示的目的。

1.3.1 数值模拟方法特点

数学物理方法用来求解工程技术问题是当代科学的一大成果,对微分方程求出它的已给边界条件下的精确解析解,虽然已有完整的理论,但是真正能解出的只有极少数几种简单的情况,特别在二维和三维问题中更是如此。这是因为客观事物的多样性,不可能用有限的解析函数来描述。当研究内容本身遵循的规律比较清楚,所建立的数学模型比较准确,并能为现实所验证能反映问题本质时,数值模拟具有较大的优越性。相对其他方法而言,数值模拟有以下几个独特的优点^[95]:

- (1) 数值模拟能大幅度减少完成新设计所需要的时间和成本;
- (2) 能研究难以进行或不可能进行受控试验的系统;
- (3) 能超出通常的行为极限,研究危险条件下的系统;
- (4) 比实验研究更自由、更灵活,可以无限量地提供研究结果的细节,便于优化设计;
- (5) 数值模拟具有很好的重复性,条件容易控制,通过数值模拟可能发现新现象。

同时,数值模拟也具有一定的局限性,并面临不少问题,了解这些局限性既有助于适当地评估数值模拟的结果,又有助于在陷入困境时找到解决问题的对策。

1) 数值模拟要有准确的数学模型

问题的机理尚未完全清楚之前,其数学模型很难准确化。流体力学曾经很大程度地推动了偏微分方程理论、复变函数、向量和张量分析,以及非线性方法的发展。但是,计算流体力学不是纯理论分析,非线性偏微分方程数值解的现有理论尚不充分,还没有严格的稳定性分析、误差分析或收敛性证明。尽管唯一性和存在性问题的研究已有一些进展,但还不足以对很多实际意义的问题给出明确的回答。

2) 数值试验不能代替物理试验或者理论分析

完成一次特定的计算就像进行了一次物理试验。在数值试验中可以完全控制试验参

数,但是,数值试验与物理试验有相同的限制,它不能给出任何函数关系,因而不能代替哪怕最简单的理论;大多数的数值模型只有在网格尺度为零的极限情况下才能精确地模拟连续介质,而这种极限是无法达到的。离散化的结果不仅在数量上可能影响计算的精度,而且在性质上还可能会改变现象的特征。即使有了可靠的理论模型方程,数值模型的可靠性仍需得到实践的验证。数值模型的有效性,需要与问题有关的边界条件的详尽信息。为此,必须在一定范围得出实验数据以提供边界条件。

3) 计算方法的稳定性和收敛性问题

在数值模拟中,对数学方程进行离散化时需要对计算中所遇到的稳定性与收敛性等进行分析。这些分析方法大部分对线性方程是有效的,对非线性方程来说只有启发性,没有完整的理论。对于边界条件影响的分析,困难就更大些,所以计算方法本身的正确与可靠也要通过实际计算加以确定。在计算过程中还需要一定的技巧。

4) 数值模拟受到计算机条件的限制

以流体力学为例,计算流体力学必须给出实现数值模拟的快速算法,但是计算机的运行速度和容量限制了模拟的实现,数值模拟还不能完全达到工程实用的要求。为了绝对保证模拟的精确度,必须经常地、严格地验证结果的有效性。反复验证有效性将如同最后的质量控制机制一样起到关键作用。

为了满足生产和工程上的需要,在工程技术中(特别是在传热学、流体力学等领域中)采用有效的数值计算方法就显得非常必要了,并且在计算机技术日益普及和发达的今天,数值计算方法更是得到了飞速的发展。

1.3.2 数值模拟方法在采空区的应用

20世纪80年代初,将多孔介质渗流力学应用到采空区流场领域经历了解析法、图解法、物理相似模拟和电模拟,以及数值计算等过程。数值模型方程也经历了从达西渗流到非线性的 Bachmat 方程^[81]、采空区介质条件由均质多孔介质到非均质多孔介质的发展过程。李宗翔提出了“采空区场流安全理论”的概念^[78],该理论系统研究了冒落采空区内部遗煤自燃和瓦斯涌出及其灾害发生规律,研究方法从过去的定性研究上升到定量研究;在分析方法上,将采空区作为“流场”来研究,并综合考虑了各种边界条件和灾害影响因素。

单亚飞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,采用有限元方法在电子计算机上进行解算,并对计算结果进行处理和分析^[83]。李宗翔^[96-98]建立了任意形状采空区边界信息的管理规则,用前沿生成法的网格剖分技术自动生成 Delaunay 三角形单元^[99],并最终实现了区域内部网格的疏密逐渐过渡,采用 Laplacian 优化法进行光顺处理,进一步改善了三角形质量;基于非均质多孔介质中的连续性方程、多相气体渗流-扩散方程和综合传热方程,利用有限元方法建立了工作面动态推进下的采空区遗煤自燃数值模型,对采空区自然发火的“三带”划分、采空区自然发火的早期过程、综放工作面的自然发火、综放面煤柱内的漏风和耗氧过程、综放沿空巷周围煤体自燃升温过程、采空区场域自燃 CO 向工作面涌出等煤自然发火各个方面进行了数值模拟,描绘了工作面开采推进过程中采空区内漏风流态、氧、CO、瓦斯和温度等的分布状态及其动态过程;提出了工作面动态推进用各物理量分布后移的处理方法,使移动步距与时间动态过程相适应,实

现了模拟计算在方法上的连续一体化。黄伯轩、王保伦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^[100]。章梦涛的渗流偏微分方程模型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^[101-103]。对于采空区气体流动模型的求解方法有电模拟法^[104,105]、二维有限单元法^[105]、三维有限元法^[106,107]、物理相似法^[108]等。以上这些研究成果大大推动了采空区气体流动规律研究的进展,为采煤工作面采空区瓦斯涌出和采空区自然发火研究做出了很大的贡献。

2 采空区自然发火理论模型

煤矿采空区是随着工作面的推进,上覆岩层冒落逐渐压实,进而形成的一种相对松散的特殊结构封闭空间。采煤工作面漏风及地面裂隙导通漏风,为采空区遗煤自然发火提供氧气。采空区遗煤吸附氧气氧化升温进而自燃,在这一过程中受多种因素的制约,风流为煤氧化提供氧气的同时带走氧化产生的部分热量,氧化产生的热量促使采空区升温,从而加速煤体的氧化,因此采空区内部存在着传热、传质等复杂的热力学现象,即在此过程中气体流场、氧浓度场、气体温度场和遗煤温度场是相互耦合的。建立合理的采空区自然发火耦合理论模型,描述采空区内各场量的时空变化规律,能为及时预测预防采空区自燃提供有力的理论依据。

2.1 基本概念

2.1.1 多孔介质的概念

多孔介质的概念来源于地下水的渗流理论。J. Bear^[109]把多孔介质的概念定义如下:①多相物质占据一部分空间,在多相物质中至少有一相不是固体,它们可以是气相和(或)液相,固体相称为固体骨架,在多孔介质范围内没有固体骨架的那一部分空间叫做孔隙空间。②在多孔介质所占据的范围内,固体相应遍及整个多孔介质,在每一个表征体元(具体概念详见第2.1.2节)内必须存在固体颗粒。多孔介质的一个基本特点是固体骨架的比面较大,另一个主要特点是构成空间的孔隙比较狭窄。③至少构成孔隙空间的某些孔洞应该相互连通。

2.1.2 多孔介质的孔隙率、表征性体积单元

在采空区这个多孔介质区域 Ω 中,气体的运动发生在固体骨架的孔隙和裂隙中,即气体在以孔隙或裂隙壁面为边界的小通道中运动。从这种尺度上研究采空区中各种运动现象的方法称为微观水平上的方法。由于多孔介质微观几何结构的复杂性,在实际应用中要从微观水平上进行研究是很难做到的,因此只能从微观水平过渡到比较粗糙的宏观水平上来描述采空区中发生的各种现象。

设 P 是多孔介质区域 Ω 内的一个数学点,考虑一个比单个孔隙或颗粒大得多的体积 ΔU_i ,设 ΔU_i 为一球体或立方体, P 是它的质心。对该体积可以确定比值:

$$n_i \equiv n_i(\Delta U_i) = \frac{(\Delta U_v)_i}{\Delta U_i} \quad (2-1)$$

式中 $(\Delta U_v)_i$ —— ΔU_i 内空隙空间的体积。

重复同样的过程,逐步缩小以 P 点为质心的 ΔU_i 的尺寸, $\Delta U_1 > \Delta U_2 > \Delta U_3 > \dots$ 这样便得到一系列的 $n_i(\Delta U_i)$ 值, $i=1, 2, 3, \dots$

对于那些大的 ΔU_i 值来说,当 ΔU_i 减小时,比值 n_i 逐渐变化。在某个 ΔU_i 以下时,