高瓦斯煤层群综采面瓦斯运移与控制

GAOWASI MEICENGQUN ZONGCAIMIAN WASI YUNYI YU KONGZHI

谢生荣　赵耀江　著

冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高瓦斯煤层群综采面瓦斯运移与控制

谢生荣　赵耀江　著

北　京
冶 金 工 业 出 版 社
2013

内 容 提 要

本书采用现场调研、理论计算分析、数值模拟分析、相似模拟试验、现场试验与实测等多种方法对高瓦斯煤层群综采面瓦斯的运移规律及远距抽采技术进行了深入研究，内容主要包括：基于瓦斯涌出初速度法的综采面瓦斯涌出量预测模型的建立、采空区顶板覆岩采动裂隙分布的 UDEC 数值模拟确定、采空区三维瓦斯浓度场的 CFD 模拟与分析、可变通风系统的采空区流场模拟模型建立与通风系统优选以及大直径长钻孔群抽采机理与控制等。

本书可供从事采矿工程、安全工程等专业的科研人员、工程技术人员及生产管理人员使用，也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高瓦斯煤层群综采面瓦斯运移与控制/谢生荣，赵耀江著.
—北京：冶金工业出版社，2013.3
ISBN 978-7-5024-6205-5

Ⅰ.①高… Ⅱ.①谢… ②赵… Ⅲ.①瓦斯煤层—采空区—瓦斯治理 Ⅳ.①TD823.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 041321 号

出 版 人 谭学余
地　　址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号，邮编 100009
电　　话 (010)64027926 电子信箱 yjcbs@cnmip.com.cn
责任编辑 张耀辉 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红
责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波
ISBN 978-7-5024-6205-5
冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；北京百善印刷厂印刷
2013 年 3 月第 1 版，2013 年 3 月第 1 次印刷
148mm×210mm；5.5 印张；163 千字；167 页
26.00 元

冶金工业出版社投稿电话：(010)64027932 投稿信箱：tougao@cnmip.com.cn
冶金工业出版社发行部 电话：(010)64044283 传真：(010)64027893
冶金书店 地址：北京东四西大街 46 号(100010) 电话：(010)65289081(兼传真)
(本书如有印装质量问题，本社发行部负责退换)

理工大学 图書館

前　言

我国是世界上主要的煤炭生产和消费国，煤炭占我国一次能源构成的70%左右，以煤炭为主的能源格局在今后50年内不会发生根本改变。受煤炭资源赋存条件的限制，我国95%的煤矿开采是地下作业，且几乎所有的井工矿都是瓦斯矿井。由于煤层赋存条件复杂多变，重大瓦斯动力灾害（瓦斯煤尘爆炸、煤与瓦斯突出等）事故频繁发生，长期以来一直受到我国乃至全世界矿业界的关注和重视。随着矿井开采深度的增加和开采范围的扩大，煤炭资源开采的瓦斯地质条件越来越复杂，煤层瓦斯已成为制约矿井安全高效生产的关键因素；同时，瓦斯又是一种清洁、方便、高效的能源，如何将其安全抽采并加以利用，实现新能源供应、矿井安全生产和环境保护，一直以来都是广大科研工作者努力的方向和目标。

瓦斯治理是高瓦斯矿区实现安全高效开采的前提和基础，而瓦斯抽采和通风控制则是目前我国高瓦斯矿井消除瓦斯灾害较为经济可行的方法与技术手段。掌握不同源汇条件下采空区瓦斯运移规律是防治煤矿瓦斯灾害和保障安全生产的前提条件，尤其是高瓦斯近距离煤层群等复杂特困条件下的工作面采空区瓦斯运移及控制技术是矿业工程学科和煤矿安全领域的研究关键。由于煤层的采动会引起周围岩层产生“卸压增透”效应，即引起周围岩层地应力封闭的破坏、层间岩层封闭的破坏以及地质构造封闭的破坏，三者综合导致围岩及其煤层的透气性系数大幅度增加，从而为高产高效地抽采瓦斯提供了可能。

本书深入研究了高瓦斯煤层群综采面瓦斯运移场及远距抽采

技术，构建了沙曲矿煤与瓦斯双能源科学开采的技术框架，促进了瓦斯防治领域的科技进步。书中研究工作的价值及创新点主要体现在以下几个方面：

（1）建立了采空区瓦斯运移规律的三维CFD模型，研究了采空区沿工作面走向方向、倾斜方向及垂直方向的瓦斯浓度分布规律；建立了综采面可变可调通风系统的采空区瓦斯运移规律的相似材料模拟模型，直观显示了采空区瓦斯运移的轨迹，为综采面通风系统的确定补充了有效途径。

（2）提出了能有效控制高瓦斯煤层群开采的“U+I+L”型通风系统，阐述了其对采空区气体流动的控制机理，并进一步提出采用顶板千米长大直径高抽钻孔群（成圆周布置）替代高抽巷，并与顶板裂隙钻孔群（水平单排布置）相结合共同抽采采空区瓦斯。

（3）建立了采动裂隙区垂直平面上高抽钻孔群和裂隙钻孔群抽采瓦斯的渗流模型，并结合数值模拟结果及现场实际情况，确定了沙曲矿千米长大直径高抽钻孔群和裂隙钻孔群的布置参数。

本书的撰写和出版得到了中央高校基本科研业务费专项资金（2010QZ06）的资助，书中所述的采空区瓦斯运移规律的相似模拟试验研究得到了“教育部特色专业建设项目（TS2112）”的资助；撰写时参阅了相关专家、学者的大量文献，在此一并表示感谢！

由于作者水平所限，书中不当之处，恳请读者批评指正。

作　者

2013年1月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　录

1　绪论 …… 1

1.1　课题的提出 …… 1

1.2　研究现状与文献综述 …… 5

1.2.1　瓦斯流动理论的国内外研究现状 …… 5

1.2.2　综采面瓦斯涌出量预测的国内外研究现状 …… 15

1.2.3　瓦斯抽放技术的国内外研究现状 …… 16

1.2.4　主要研究内容与研究方法 …… 33

2　高瓦斯煤层群综采面瓦斯涌出量实测及预测研究 …… 34

2.1　矿井及试验工作面概况 …… 34

2.1.1　矿井概况 …… 34

2.1.2　试验工作面概况 …… 35

2.1.3　现有瓦斯抽采系统 …… 36

2.2　高瓦斯煤层群综采面瓦斯涌出的现场实测研究 …… 37

2.2.1　采场空间瓦斯浓度分布规律 …… 37

2.2.2　试验综采面瓦斯涌出测定 …… 41

2.2.3　综采面瓦斯涌出影响因素研究 …… 45

2.3　高瓦斯煤层群综采面瓦斯涌出量预测模型 …… 50

2.3.1　高瓦斯煤层群综采面瓦斯涌出源分析 …… 50

2.3.2　高瓦斯近距离煤层群综采面瓦斯涌出规律 …… 52

2.3.3　综采面瓦斯涌出量预测模型研究 …… 56

2.3.4　综采面瓦斯涌出量预测结果 …… 61

3　采空区瓦斯运移场及通风系统的研究 …… 64

3.1　采空区基础参数的 UDEC 数值模拟研究 …… 65

3.1.1　UDEC 软件简介 …… 65
3.1.2　UDEC 数值模型的建立 …… 66
3.1.3　模型Ⅰ的建立与结果分析 …… 68
3.1.4　模型Ⅱ的建立与结果分析 …… 73
3.2　采空区瓦斯三维渗流的数值模拟研究 …… 77
3.2.1　FLUENT 软件简介 …… 77
3.2.2　采空区瓦斯渗流的 CFD 模拟理论基础 …… 79
3.2.3　采空区瓦斯三维运移规律的 CFD 模型建立 …… 81
3.2.4　数值模拟结果及分析 …… 85
3.3　不同通风系统下采空区瓦斯运移的相似模拟研究 …… 95
3.3.1　相似模型设计的理论依据 …… 95
3.3.2　试验装置及试验方法 …… 100
3.3.3　试验结果分析 …… 103

4　顶板千米长大直径钻孔抽采理论研究 …… 113

4.1　高瓦斯近距离煤层群采动裂隙场与卸压瓦斯运移的关系 …… 113
4.1.1　基于围岩应力的围岩采动裂隙分布特征 …… 113
4.1.2　高瓦斯煤层群采空区卸压瓦斯运移及储集 …… 115
4.2　“顶板采动裂隙区大直径长钻孔法”抽采瓦斯研究 …… 126
4.2.1　不同直径钻孔抽采效果的理论分析 …… 126
4.2.2　顶板千米长大直径钻孔抽采瓦斯技术 …… 128
4.3　采动裂隙区钻孔群抽采瓦斯的垂直平面稳态渗流模型 …… 132
4.3.1　复变函数的引入 …… 132
4.3.2　复变函数求解无限大平面中钻孔抽采的渗流 …… 136
4.3.3　单钻孔抽采瓦斯渗流模型的镜像法求解 …… 136
4.3.4　钻孔群抽采瓦斯的平面稳态渗流模型 …… 139

5　试验综采面抽采参数研究及现场试验 …… 145

5.1　综采面瓦斯抽采方式及参数确定 …… 145

5.1.1　综采面抽采方式的确定 …… 145
5.1.2　顶板大直径长钻孔参数研究 …… 148
5.1.3　本煤层瓦斯预抽参数确定 …… 156
5.2　试验综采面瓦斯抽采的现场试验及效果分析 …… 157
5.2.1　试验综采面瓦斯抽放系统 …… 158
5.2.2　抽采效果分析 …… 158

参考文献 …… 160

1 绪　　论

1.1 课题的提出

受煤炭资源赋存条件的限制和影响，我国几乎所有的井工矿都是瓦斯矿井。在原国有重点煤矿620处矿井中，高瓦斯矿井、煤与瓦斯突出矿井有285处，占总数的45.97%[1]。我国95%的煤矿是地下作业，由于煤层赋存条件复杂多变，重大瓦斯动力灾害（瓦斯煤尘爆炸、煤与瓦斯突出等）事故频繁发生。表1-1是1949～2011年我国煤矿一次死亡100人以上特大事故统计表[2]，数据表明，自新中国成立以来我国煤矿发生一次死亡百人以上的事故共24起，死亡3781人，其中瓦斯（煤尘）爆炸事故22起，死亡3550人，分别占煤矿事故起数与死亡人数的91.7%和93.9%。因此，长期以来矿井瓦斯灾害一直受到我国乃至全世界矿业界的关注和重视。据我国历年煤矿事故统计资料，在煤矿各类事故中，瓦斯事故死亡人数在事故总死亡人数中所占比重最大，远高于其他事故的死亡人数。例如2007年我国煤矿事故死亡共计3786人，一次死亡3人及以上的事故共发生149起，死亡1162人[3]，而表1-2数据表明，2007年我国煤矿的主要事故为瓦斯爆炸事故，发生70起，死亡687人，占59.12%；一次死亡10人以上的特大事故共发生24起，其中瓦斯爆炸事故发生15次，占62.5%；一次死亡30人以上的特别重大事故共发生4起，全部为瓦斯爆炸事故。上述一系列数据表明，无论从瓦斯灾害事故的频发程度还是从一次死亡人数和总死亡人数上来看，矿井瓦斯灾害都是煤矿安全生产的大敌。频发的矿井瓦斯灾害严重威胁着矿井工作人员的生命安全，制约着矿井生产的发展，给煤炭企业带来了沉重的经济负担。同时，煤矿瓦斯灾害的发生还极大地限制了矿井机械化设备效能的发挥，降低了生产效率，造成每年数百亿元的间接经济损失。矿井瓦斯灾害具有的破坏程度大、人员伤

亡多、经济损失严重及社会负面影响大等特点，使得矿井瓦斯灾害成为制约煤矿安全生产的主要矛盾。不把瓦斯事故控制住，就不能实现全国煤炭安全生产状况的稳定好转，也无法保证煤炭工业的持续健康发展。

表 1-1 1949～2011 年我国煤矿一次死亡 100 人以上特大事故统计表

序号	时 间	单位与地点	事故类型	死亡人数
1	1950-02-27	河南省宜洛煤矿老李沟井	瓦斯爆炸	187
2	1954-12-06	内蒙古大发煤矿	瓦斯煤尘爆炸	104
3	1960-05-09	山西大同矿务局老白洞煤矿	煤尘爆炸	684
4	1960-05-14	四川重庆松藻矿务局松藻二井	煤与瓦斯突出	125
5	1960-11-28	河南平顶山矿务局龙山庙煤矿	瓦斯煤尘爆炸	187
6	1960-12-15	四川重庆中梁山煤矿南井	瓦斯煤尘爆炸	124
7	1961-03-16	辽宁抚顺矿务局胜利煤矿	电气火灾	110
8	1968-10-24	山东新汶矿务局华丰煤矿	煤尘爆炸	108
9	1969-04-04	山东新汶矿务局潘西煤矿二号井	煤尘爆炸	115
10	1975-05-11	陕西铜川矿务局焦坪煤矿前卫斜井	瓦斯煤尘爆炸	101
11	1977-02-24	江西丰城矿务局坪湖煤矿	瓦斯爆炸	114
12	1981-12-24	河南平顶山矿务局五矿	瓦斯煤尘爆炸	133
13	1991-04-21	山西省洪洞县三交河煤矿	瓦斯煤尘爆炸	147
14	1996-11-27	山西省大同市新荣区郭家窑乡东村煤矿	瓦斯煤尘爆炸	114
15	2000-09-27	贵州省水城矿务局木冲沟煤矿	瓦斯爆炸	163
16	2002-06-20	黑龙江鸡西矿业集团城子河煤矿	瓦斯爆炸	124
17	2004-10-20	河南省大平煤矿	瓦斯爆炸	148
18	2004-11-28	陕西省铜川矿务局陈家山煤矿	瓦斯爆炸	166
19	2005-02-14	辽宁省阜新煤业集团孙家湾煤矿海州立井	瓦斯爆炸	214
20	2005-08-07	广东省梅州兴宁市黄槐镇大兴煤矿	透水事故	121
21	2005-11-27	黑龙江龙煤集团七台河分公司东风矿	煤尘爆炸	171
22	2005-12-07	河北省唐山市开平区刘官屯煤矿	瓦斯爆炸	108
23	2007-12-05	山西省临汾市洪洞县瑞之源煤业有限公司	瓦斯爆炸	105
24	2009-11-21	黑龙江龙煤集团鹤岗分公司新兴煤矿	瓦斯爆炸	108
合 计				3781

表 1-2 2007 年我国煤矿重特大事故分类表

事故类别	一次死亡 3~9 人		一次死亡 10~29 人		一次死亡 30 人以上		死亡人数小计	死亡人数所占比例/%
	次数	人数	次数	人数	次数	人数		
瓦斯事故	51	266	15	220	4	201	687	59.12
透水事故	20	118	5	95	0	0	213	18.33
顶板事故	24	87	0	0	0	0	87	7.49
火灾事故	4	25	2	42	0	0	67	5.76
坍塌事故	8	36	1	13	0	0	49	4.22
跑车事故	6	23	0	0	0	0	23	1.98
其他事故	8	22	1	14	0	0	36	3.10
合 计	121	577	24	384	4	201	1162	100

矿井瓦斯的另一个问题是其排放造成了严重的环境影响。随着世界各国工业的不断发展，大气污染越来越严重，人类生存受到了严重威胁，温室效应也不断加剧。我国煤矿每年有将近 $90\times10^8m^3$ 以上的矿井瓦斯被排入大气中，占世界采煤排放甲烷（瓦斯的主要组成成分）数量的 1/3~1/2。甲烷是具有强烈温室效应的气体，其温室效应比二氧化碳大 20 倍以上。在各种温室效应气体对全球气候的变暖影响中，甲烷约占 15%，而煤炭工业排放的甲烷约占人类所排放甲烷量的 10%，其影响不可忽视[4,5]。

一方面，矿井瓦斯已成为制约矿井安全高效生产的关键因素，并污染着人类的生存环境；另一方面，瓦斯又是经济的可燃气体，是一种清洁、方便、高效的能源，其发热量值为 $33.5\sim36.8MJ/m^3$，且燃烧的热效率比煤燃烧的热效率高。瓦斯除作民用燃料外，还可作为化工原料生产氨气、化肥和炭黑等[6]。我国埋深在 2000m 以内的煤层瓦斯储量为 $(32\sim35)\times10^{12}m^3$，几乎与常规天然气资源量相当[7]。因此，大力开发煤层气（煤层瓦斯），既可以充分利用地下资源，又可以改善矿井安全生产条件和提高经济效益，并有利于改善地方环境质量和全球大气环境。美国和澳大利亚的实践表明，只要政府对这种产业给予政策扶持，煤层气开发利用不仅能给社会提供

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

一种优质能源和化工原料，而且能极大地降低煤矿开采的瓦斯排放量，减少大气污染，降低矿井通风的能量消耗，为煤层气开发和煤炭开采带来显著的经济效益，为社会提供更多的就业机会，并带动相关产业的发展[8]。因此，如何更有效地开发和利用煤层气，实现煤与瓦斯两种资源的安全高效共采，成为我国煤炭工业发展中亟待解决的重大问题。

近年来，随着我国经济的飞速发展和煤炭价格的上升，煤炭企业不但更加重视瓦斯事故带来的危害性，而且还积极落实在行动上，加大了瓦斯治理力度，增加了瓦斯治理费用，然而这并未能消除重特大瓦斯事故的发生。表 1-1 数据显示，我国煤矿 2000 ~ 2007 年发生一次死亡 100 人以上的事故共 9 起，死亡 1320 人，其中瓦斯爆炸事故 7 起，死亡 1028 人，占 1949 ~ 2007 年一次死亡 100 人以上的事故总人数的 30.0%。这说明煤矿企业瓦斯爆炸事故仍然频繁发生，未因瓦斯治理力度的加大而显著减少，究其主要原因，一方面是煤炭企业瓦斯治理设备的更新和瓦斯治理技术的发展滞后于煤炭产量的快速增长；另一方面是我国煤矿开采范围的扩大和开采深度的增加，使得瓦斯含量高、瓦斯赋存不稳定等恶劣赋存条件的煤炭资源摆在了煤炭开采者们的前面，加大了瓦斯灾害治理的难度。另外，高产高效矿井的集中生产和综采工艺的应用，更加大了矿井通风、瓦斯治理和防火综合治理的难度，增大瓦斯灾害事故发生的概率。我国煤炭行业的众多科研工作者一直以来都很重视矿井瓦斯灾害防治，从理论到实践均进行了不懈的努力和探索，并随着煤炭企业形势的发展，对高瓦斯矿井的瓦斯综合治理技术以及复杂地质条件下的瓦斯抽采技术开展了广泛的研究，并取得了一定的研究成果，为我国煤炭工业的稳定、持续、健康发展发挥了重要作用。

本课题来源于山西省华晋焦煤有限责任公司科学技术研究与发展计划项目“沙曲矿瓦斯综合治理技术的研究”。课题以沙曲矿为背景，对其综采面瓦斯运移规律进行研究，并在此基础上，结合从德国引进的 DDR-1200 定向钻机，开展顶板千米长大直径钻孔瓦斯抽采技术研究。沙曲矿作为优质焦煤生产基地，井田范围大，地质条件复杂，煤层赋存呈现多煤层、近距离、高瓦斯等特点，对开采十分

不利，根据地质勘探报告、矿井瓦斯等级鉴定报告、煤与瓦斯突出鉴定报告，沙曲矿属高瓦斯且具有煤与瓦斯突出危险的矿井，突出类型为倾出。沙曲矿煤层瓦斯含量、工作面瓦斯涌出量在国内也是较少见的，同时还伴有瓦斯动力现象，现有抽放形式在一定程度上缓解了综采工作面的瓦斯超限和局部区域瓦斯积聚，但未能有效解决瓦斯超限难题。在一些区域，采煤机连续割煤30~40min，工作面瓦斯浓度就会超限，形成断电，造成工作面采煤机割割停停，工作面不能正常生产，也给工作面的安全生产造成严重威胁。因此，瓦斯是制约生产和威胁沙曲矿矿井安全的主要因素。沙曲矿煤质好，是世界上少有的优质焦煤，在目前煤炭产业形势较好的条件下，若瓦斯防治难题不能有效解决，将不利于企业的进一步发展和壮大，不利于职工待遇和生活水平的进一步提高，为此该公司已多次立项进行瓦斯运移规律及瓦斯抽放工艺优化的研究，并已取得初步效果，不过仍没有完全解决该矿生产过程中遇到的难题，因而需要对煤层瓦斯赋存情况、瓦斯涌出情况做进一步的观测，对工作面瓦斯运移规律进行进一步的深入研究，以期对工作面瓦斯来源及涌出量做详细而准确的预测预报，进而提出更加可行、可靠、经济适用的瓦斯防治技术。

1.2 研究现状与文献综述

与世界先进采煤国家相比，我国煤矿安全技术起步较晚，但是煤矿安全技术的研究一直受到国家和行业的高度重视。多年来，通过我国煤炭行业科技工作者的艰苦努力，我国煤矿安全技术进步迅速，在煤层瓦斯流动、瓦斯抽放理论及技术、煤与瓦斯突出预测及防治、煤矿瓦斯灾害预防和瓦斯利用等方面均取得了一定的成绩。尤其近年来在国家和行业主管部门的大力支持下，生产、科研部门与高等院校相结合的队伍通过联合攻关，取得了一大批的科研成果，在瓦斯综合治理方面也取得了重大进展。

1.2.1 瓦斯流动理论的国内外研究现状

煤层瓦斯流动理论研究的主要目的是在于阐明煤层瓦斯流动的

本质，解释矿井中各种瓦斯涌出的现象和本质。矿井瓦斯涌出直接影响矿井的安全高效生产，因此，掌握煤层中瓦斯解吸及涌出的规律，可以预测采动后瓦斯的涌出量，并采取必要的和适合的防治措施，而这些工作的基础都要涉及瓦斯在煤层中的流动理论。因此，瓦斯流动理论的研究，不但为煤矿瓦斯抽放的实践提供了理论依据，而且为矿井瓦斯的综合治理提出改进方向，并促使煤矿瓦斯抽放在技术上实现不断地完善和进步。

煤层瓦斯流动是一个复杂的运动过程，它与介质的结构和瓦斯赋存形式密切相关。目前，国内外学者对煤层瓦斯流动理论的研究主要集中在四个方面：①扩散理论；②渗流理论；③煤层瓦斯渗流-扩散理论；④多物理场、多相煤岩瓦斯耦合理论[2,9~11]。

1.2.1.1 扩散理论

人们在实验室研究煤矿瓦斯涌出规律、预测煤层瓦斯含量及煤粒瓦斯吸附放散时引用菲克定律（Fick's law）。根据分子扩散理论，在扩散体系中流体分子由高浓度向低浓度运动，流体的扩散速度与流体的浓度梯度呈线性正比关系。国外学者从20世纪50年代开始对煤粒瓦斯扩散理论进行研究，建立了第一类边界条件下气体在多孔介质中的解吸扩散数学模型，并求出了解析解；同时结合具体煤样的试验研究，对解析解进行修正，给出了许多煤粒瓦斯放散与时间关系的半经验或试验关系式[12~17]。

在国内，对煤屑中瓦斯扩散规律的研究，主要以杨其銮、王佑安等人为代表，他们认为，各种采掘工艺条件下采落煤的瓦斯涌出、突出发展过程中已破碎煤的瓦斯涌出、在预测瓦斯含量和突出危险性时所用煤钻屑的瓦斯涌出等问题，皆可归结为煤屑中瓦斯的扩散问题。1980年王佑安和杨思敬详细分析了煤的孔隙结构、瓦斯解吸速度与煤的突出危险关系[18]。1981年，王佑安与朴春杰提出了确定煤层瓦斯含量的煤解吸瓦斯速度法[19]，并于1982年给出用煤的解吸指标作为煤层突出危险性的判据[20]。

1986年，杨其銮与王佑安系统地建立了煤粒瓦斯扩散的微分方程，求出了第一类边界条件下的解析解[21,22]，并从扩散理论系统论

述了煤层瓦斯涌出、突出规律，提出了极限煤粒假说。1988 年，他们把扩散理论应用到煤层瓦斯的流动中，针对掘进巷道瓦斯的涌出提出了煤层球向瓦斯扩散运动的数学模型[23]。另外，聂百胜、何学秋等人根据气体在多孔介质中的扩散模式[24,25]，结合煤结构的实际特点，研究了瓦斯气体在煤孔隙中的扩散机理和扩散模式；郭勇义、吴世跃研究了煤粒瓦斯扩散规律及扩散系数测定方法，并依据第三类边界条件煤粒瓦斯扩散传质的理论，提出了一种预测煤和瓦斯突出的新指标[26,27]。

1.2.1.2 渗流理论

渗流理论目前是国内外指导煤矿瓦斯防治工作的主要理论。

A 线性瓦斯渗流理论

线性渗流理论认为，多孔介质内流体的运动符合线性渗透定律——达西定律（Darcy's law）。达西定律是法国水利工程师达西于 1856 年在做把水压过填满砂粒管子的试验时发现的，试验表明水通过砂粒的渗流速度与压力梯度呈正比。此后达西定律首先在水利工程、环境净化工程以及地下水资源开采中得到应用；20 世纪初，随着石油与天然气工业的发展，又逐渐形成了石油天然气渗流理论；从 20 世纪 40 年代起，线性渗流理论开始广泛应用于预测煤矿瓦斯涌出、煤与瓦斯突出和矿井涌水；而目前在将达西定律应用在各行各业的过程中，已对其进行了各种各样的修正。

1923 年太沙基（Terzaghi）提出了有效应力计算公式[28]，揭开了渗流力学和固体力学相互关系研究的新篇章，并形成一门新的学科——流固耦合力学，目前对其研究仍然方兴未艾。20 世纪 40 年代，苏联学者应用达西定律来描述煤层内瓦斯的运动，得出了考虑瓦斯吸附性质的瓦斯渗流规律[29,30]，由此为煤岩瓦斯渗流理论的发展奠定了基础。

我国学者在煤层瓦斯流动理论的研究方面也做了许多开创性工作。以周世宁院士为首的学者群，在主要继承前苏联学者研究成果的基础上，针对我国煤层瓦斯流动理论和煤矿瓦斯灾害防治做了一系列的奠基性和创新性研究工作，他们的研究成果对我国煤矿瓦斯

灾害的防治工作具有深远的影响。

1965 年，周世宁院士从渗流力学角度出发，把多孔介质的煤层视为一种大尺度上均匀分布的虚拟连续介质，在我国首次提出了基于达西定律的线性瓦斯流动理论[31~33]，奠定了我国瓦斯研究的理论基础；同时在总结前期大量实测工作成果的基础上，研究了煤层瓦斯含量和煤层透气性系数的测试方法，并与原苏联的方法进行了比较[34~36]；其创建的“钻孔流量法”测定煤层透气系数的新技术，已被广泛应用于我国煤矿开采中，并成为测定煤层透气系数的标准方法。此后，郭勇义结合相似理论[37]，就一维情况研究了瓦斯渗流方程的完全解，并指出周世宁关于瓦斯含量与孔隙压力之间抛物线关系式的近似性，同时采用朗格缪尔（Langmuio）方程来描述瓦斯的等温吸附量，提出了修正的瓦斯流动方程式。1986 年，谭学术利用瓦斯真实气体状态方程，提出了修正的矿井煤层真实瓦斯渗流方程[38]。

以鲜学福院士为首的学术群，除了在前述煤的物理化学结构方面做了大量的有创造性的工作外，在煤层瓦斯渗流理论方面也做了大量的研究工作。1988 年，魏晓林求出了单孔无限圆径向流场瓦斯压力分布式[39]，提出用无限流场单一钻孔总流量计算煤层平均透气系数的新方法，并在煤矿现场取得了成功应用。1989 年余楚新、鲜学福在假设煤体瓦斯吸附与解吸过程完全可逆的条件下，建立了煤层瓦斯流动理论以及渗流控制方程[40]。孙培德基于前人的研究成果，修正和完善了均质煤层的瓦斯流动数学模型[41,42]，同时，孙培德、张广祥等人还发展了以达西定律为基础的非均质煤层的瓦斯流动数学模型[43,44]；依据日本学者提出的渗流幂定律（power law）比达西定律更符合煤层瓦斯流动的规律，建立了非线性瓦斯流动模型，并结合实际与各种渗流模型进行了计算比较，认为该模型比其他模型更符合实际[45]。此后，孙培德应用统计热力学与量子化学的理论，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，更客观地反映了煤层内游离瓦斯的状态[46]。

近年来，以孙广忠教授为首的学科组应用达西渗流定律，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[47]。

自20世纪80年代初以来，随着计算机应用的普及和计算技术的日益发展，应用计算机研究瓦斯流场内压力分布及其流动变化规律已成为可能，这也是瓦斯渗流力学的研究手段不断实现现代化的主流方面。20世纪80年代初，广东省煤炭研究所和抚顺煤炭科研所合作，应用计算机并结合煤矿实际问题，用有限差分法，首次对瓦斯流场中压力分布及其流量变化实现了数值模拟，较成功地预测了瓦斯流场内的瓦斯压力变化规律。

B 非线性瓦斯渗流理论

国外许多学者针对达西定律是否完全适用于瓦斯在煤体中的运移问题，开展了大量的实验及理论研究，归纳出达西定律偏离的原因为[47]：①流量过大；②分子效应；③离子效应；④瓦斯的吸附。

著名的流体力学家E. M. Allen在将达西定律用于描述均匀固体物（煤样）中涌出瓦斯试验中得出的结果与实测不符[12]，证明了瓦斯在煤岩体中的渗流存在非线性关系。随后，国内外许多学者提出了更为符合瓦斯流动规律的非线性渗流定律表达式，这些表达式可分为四类：①二次式；②幂式；③曲线式；④统计表达式。这一系列的非线性渗流定律表达式在煤层瓦斯运移规律研究中得到了多方面的应用。

国内学者在非线性瓦斯理论研究方面作出了较突出的贡献。如1987年，孙培德根据幂定律的推广形式，在均质煤层和非均质煤层条件下，建立了可压缩性气体在煤层内流动的数学模型——非线性瓦斯流动模型[48]，并以焦作矿务局马村矿的实测瓦斯流动参数为依据，对均质瓦斯流场的压力分布作出了三类不同模型的数值模拟，得出非线性瓦斯流动模型比线性瓦斯流动更符合实际情况。1991年罗新荣提出了煤层瓦斯运移物理模型，并在进一步理论分析和试验的基础上提出了基于克林伯格（Klinkenberg）效应的修正达西定律——非线性瓦斯渗流规律[49]，并建立了相应的瓦斯流动模型；指出达西定律的适用范围之后，罗新荣又建立了非均质可压密煤层瓦斯运移和数值模拟方程[50,51]，得到了煤层瓦斯压力分布曲线和煤

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com