



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

地质构造及其演化对煤 与瓦斯突出的控制

韩 军 著



科学出版社



博士后文库
中国博士后科学基金资助出版

地质构造及其演化对煤与瓦斯 突出的控制

韩 军 著

国家自然科学基金(51104085)

中国博士后科学基金项目(20100471000)

国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2005CB221501)



科学出版社

北京

内 容 简 介

地质构造和煤与瓦斯突出的关系一直以来是进行煤与瓦斯突出发生机制、预测和防治研究的重要内容。本书从多级别、多尺度对地质构造和煤与瓦斯突出的关系进行了综合研究,分析了煤与瓦斯突出矿区/井田的地质动力学状态、地质构造特征控制煤与瓦斯突出的作用机制。以板块学说为基础,以聚煤盆地构造演化过程为切入点,分析了煤与瓦斯突出区域在构造演化过程中构造发育、瓦斯运移与赋存、煤体结构、应力状态的演化特征,阐明了煤与瓦斯突出的空间分布特征及其内在的地质构造控制机制。基于地质动力区划理论和方法确定了中国一级活动断块,确定了煤与瓦斯突出矿井的构造背景和地质动力学条件。

本书可供采矿工程、地质工程和岩石力学与工程领域的研究人员、工程技术人员及高等院校师生参考。

审图号: GS(2018) 6150 号

图书在版编目(CIP)数据

地质构造及其演化对煤与瓦斯突出的控制/韩军著. —北京: 科学出版社, 2019

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-058114-3

I. ①地… II. ①韩… III. ①煤突出-地质作用 ②瓦斯突出-地质作用 IV. ①TD713

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第134693号

责任编辑: 李 雪 刘翠娜/责任校对: 彭 涛

责任印制: 师艳茹/封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年2月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019年2月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 200 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱

刘 伟 卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪

万国华 王光谦 吴硕贤 杨宝峰 印遇龙

喻树迅 张文栋 赵 路 赵晓哲 钟登华

周宪梁

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

煤与瓦斯突出是煤矿最为严重的动力灾害之一。世界上主要采煤国家都曾有煤与瓦斯突出发生,其中以中国和苏联最为严重。我国区域大地构造的主要特点之一是由众多小陆块经多旋回演化拼合而成的,总体上表现为稳定性差、活动性强。因此,我国煤田地质条件复杂、煤层赋存条件差、瓦斯灾害十分严重。据不完全统计,有记录以来,我国发生煤与瓦斯突出次数达 14300 余次,2011~2016 年发生较大以上瓦斯事故 197 起,死亡 1667 人,占全国煤矿较大以上事故次数和死亡人数的 50.3%和 58.8%。瓦斯灾害直接妨碍了煤矿的正常生产,阻滞了煤炭工业的持续、健康和稳定发展,加强瓦斯灾害的防治是确保煤炭资源安全、高效开发的重要前提和途径。

自 1834 年发生首次煤与瓦斯突出以来,大量学者、工程技术人员从不同的角度进行了广泛研究。地质构造和煤与瓦斯突出的关系是被最早认识的,也是研究的最为广泛和深入的内容之一。从早期的简单地质构造的几何描述,到后来的利用多种手段综合研究构造的应力、变形及构造的形成和演化机制等,以及近代数学、力学理论的应用,使得地质构造和煤与瓦斯突出关系的认识从宏观、介观及微观尺度不断得到深化,相关研究成果丰富了构造地质学、瓦斯地质学、地质力学、瓦斯动力学、流体力学、岩石力学等学科的内涵,也对煤与瓦斯突出的预测和防治工作起到了重要的指导和促进作用。尽管如此,由于不同区域构造条件纷繁复杂,针对某一小区域的研究成果难以进行广泛的推广和应用,从而也制约了煤矿安全状况的改进。

本书围绕煤与瓦斯突出矿区/井田的地质构造及其形成机制、煤与瓦斯突出矿区/井田的地质动力状态两个方面研究不同层次的地质构造及其演化对煤体结构和力学性质、瓦斯运移和赋存等的作用,阐明地质构造对煤与瓦斯突出的作用机制,在此基础上进行煤与瓦斯突出的预测。书中重点对活动断裂、褶皱构造和推覆构造的动力学效应及其与应力状态、煤体结构和瓦斯赋存之间的关系,从宏观和细观的角度形成系统的关于地质构造对煤与瓦斯突出的内在作用机制研究成果;提出我国不同聚煤区煤与瓦斯突出的构造演化控制机制和模式,研究成果为煤与瓦斯突出灾害预测提供了基础。

本书的出版,首先要感谢我的导师张宏伟教授。张老师是我走入地质动力区划研究领域的领路人,他为我找到了一个很好的切入点,帮助我很快深入这个领域,让我能结合先前的地质工程专业背景,在与采矿工程专业交叉领域上发挥自

己的专业特长。感谢我的博士后合作导师梁冰教授，在三年的博士后工作中，梁老师引导我从力学的角度去更系统地思考地质构造和煤与瓦斯突出的相关问题，使得我的研究内容更加深入。感谢王宇林教授对书稿进行的审阅及提出的有价值的修改意见。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(51104085)、*中国博士后科学基金项目(20100471000)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB221501)的资助。

由于作者水平有限，书中不妥之处，欢迎读者批评指正。

韩 军

2018年9月

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 国外研究现状	3
1.2 国内研究现状	5
1.3 地质构造与瓦斯灾害研究存在的问题	8
第 2 章 煤与瓦斯突出分布特征及其影响因素分析	11
2.1 我国煤炭资源的时空分布特征	11
2.1.1 中国聚煤区划分	11
2.1.2 中国煤田时空分布	12
2.2 我国煤与瓦斯突出分布特征	13
2.2.1 我国煤与瓦斯突出概况	13
2.2.2 我国各聚煤区的煤与瓦斯突出	13
2.3 煤与瓦斯突出的影响因素分析	17
2.3.1 地质构造	17
2.3.2 地应力	22
2.3.3 煤体结构	22
2.3.4 煤层瓦斯参数	23
2.3.5 煤层渗透率	24
2.3.6 其他因素	25
2.4 本章小结	25
第 3 章 构造凹地分析及煤与瓦斯突出危险性评价	26
3.1 地貌与构造的关系	26
3.2 煤与瓦斯突出矿区的构造凹地	26
3.3 构造凹地的动力学状态	32
3.3.1 构造凹地的地质动力状态	32
3.3.2 构造凹地对地应力场影响的解析计算	34
3.3.3 构造凹地的地应力状态实测	36
3.4 构造凹地对煤与瓦斯突出的控制	39
3.4.1 构造凹地对瓦斯赋存的控制	39

3.4.2	地质动力状态对煤与瓦斯突出的作用	43
3.5	构造凹地煤与瓦斯突出危险性评价	46
3.5.1	构造凹地的反差强度和煤与瓦斯突出的关系	46
3.5.2	煤与瓦斯突出危险性评价	49
3.6	本章小结	49
第4章	地质构造对煤与瓦斯突出的控制	51
4.1	活动断裂对煤与瓦斯突出的控制	51
4.1.1	活动断裂的概念	51
4.1.2	区域性活动断裂对煤与瓦斯突出的控制	51
4.1.3	活动断裂对煤与瓦斯突出点的控制	57
4.2	褶皱构造对煤与瓦斯突出的控制	60
4.2.1	煤与瓦斯突出矿区的褶皱构造	60
4.2.2	褶皱构造的形成机制	66
4.2.3	褶皱构造对煤与瓦斯突出的控制	69
4.3	推覆构造对煤与瓦斯突出的控制	71
4.3.1	煤与瓦斯突出矿区的推覆构造	71
4.3.2	推覆构造的形成机制	79
4.4	构造控制煤与瓦斯突出的机制	81
4.4.1	煤与瓦斯突出动力源的构造控制	81
4.4.2	煤体结构破坏的构造控制	83
4.4.3	煤层瓦斯的构造控制	86
4.4.4	煤层渗透性的构造控制	87
4.4.5	构造对煤与瓦斯突出的控制机制	88
4.5	本章小结	88
第5章	构造演化对煤与瓦斯突出的控制	90
5.1	东北聚煤区构造演化对煤与瓦斯突出的控制	90
5.1.1	东北聚煤区的构造演化	90
5.1.2	东北聚煤区的构造特征	91
5.1.3	东北聚煤区的构造演化对煤与瓦斯突出的控制	92
5.2	华北聚煤区构造演化对煤与瓦斯突出的控制	94
5.2.1	华北聚煤区的构造演化	94
5.2.2	华北聚煤区的构造特征	95
5.2.3	华北聚煤区的构造演化对煤与瓦斯突出的控制	96
5.3	华南聚煤区构造演化对煤与瓦斯突出的控制	98
5.3.1	华南聚煤区的构造演化	98
5.3.2	华南聚煤区的构造特征	99

5.3.3 华南聚煤区的构造演化对煤与瓦斯突出的控制	100
5.4 煤与瓦斯突出的模式	101
5.5 本章小结	103
第6章 活动断裂研究及煤与瓦斯突出预测	104
6.1 活动断裂与地质动力灾害	104
6.1.1 中国新构造运动	104
6.1.2 中国大陆板块活动与地质动力灾害	105
6.2 活动构造的研究方法	107
6.2.1 地质动力区划理论的提出	107
6.2.2 地质动力区划原理	108
6.2.3 活动断裂划分	109
6.2.4 断裂活动性评估	111
6.3 中国一级地质动力区划	116
6.3.1 中国一级地质动力区划图的编制	116
6.3.2 中国一级地质动力区划图分析	117
6.4 本章小结	118
第7章 应用实例	119
7.1 开滦矿区煤与瓦斯突出的构造控制	119
7.1.1 矿区概况	119
7.1.2 矿区地质构造及其演化	120
7.1.3 开滦矿区现代地壳运动	122
7.1.4 矿区地应力场特征	124
7.1.5 矿区构造演化对煤与瓦斯突出的控制	131
7.2 阜新矿区煤与瓦斯突出的构造控制	134
7.2.1 矿区概况	134
7.2.2 矿区地质动力状态分析	135
7.2.3 阜新矿区地质构造及其演化	138
7.2.4 构造及其演化对煤与瓦斯突出的控制	140
参考文献	145
编后记	154

第1章 绪 论

煤与瓦斯突出是煤矿最为严重的动力灾害之一。它能在瞬间由煤体向巷道或采场喷出大量的瓦斯、碎煤和煤粉，在煤体中形成特殊形状的孔洞，具有明显的动力效应，如破坏支架、推倒矿车、损坏和抛出安装在巷道内的设施。喷出的瓦斯量经常超过煤体的瓦斯含量，有时甚至使风流逆转，引发瓦斯爆炸事故。

世界上第一次有记载的煤与瓦斯突出发生于 1834 年的法国鲁阿雷煤田伊萨克矿井。此后相继在中国、法国、苏联、波兰、日本、匈牙利、比利时、美国、德国、澳大利亚等 20 多个国家发生煤与瓦斯突出，其中以中国和苏联最为严重。据不完全统计，我国发生煤与瓦斯突出次数已达 14300 余次^[1]，最严重的一次为天府矿区三汇一矿，突出煤 12780t，涌出瓦斯 1400000m³。法国于 1879~1989 年共发生煤与瓦斯突出 6800 多次，最大突出强度为 5600t 煤，突出的瓦斯类型为 CO₂、CH₄ 及其混合气体^[2]。苏联于 1960~1983 年共发生突出 3463 次，突出次数多而且强度大，顿巴斯煤田加加林煤矿发生了世界上最大的一次煤与瓦斯突出，突出煤 14000t，涌出瓦斯 250000m³^[3]。日本、波兰等也是煤与瓦斯突出灾害较为严重的国家。

我国区域大地构造的主要特点之一是由众多小陆块经多旋回演化拼合而成的，总体上表现为稳定性差、活动性强。由此造成了我国煤田地质条件复杂，煤层赋存条件差，矿井动力灾害特别是瓦斯灾害十分严重。从矿井数量上分析，全国煤矿高瓦斯矿井 4462 座，煤与瓦斯突出矿井 911 座。在国有重点煤矿中，高瓦斯矿井和煤与瓦斯突出矿井所占比例分别达 21% 和 21.3%，合计为 42.3%。其中 45 户安全重点监控企业中，有高瓦斯、突出矿井 250 座，所占比例达 60.2%^[4]。截至 2015 年年底，全国煤矿有 9598 处，其中，9 万 t/a 及以下小型煤矿 4364 处，数量占 45.5%，大多数小型煤矿安全条件差、装备简陋，从业人员安全素质和专业技能低，尤其是高瓦斯和煤与瓦斯突出等灾害严重的小型煤矿，基本不具备灾害防治能力^[5]。近几年的经济快速发展对煤炭的需求迅速增加，矿井加速向深部延伸，目前全国井工煤矿平均开采深度接近 500m，开采深度超过 800m 的矿井达到 200 余处，千米深井达到 47 处^[6]。随着开采深度的增加，地应力、瓦斯含量和压力增大，煤层透气性降低，瓦斯抽采难度进一步加大。技术水平、人员素质和管理水平等极不均衡的煤炭工业在自然条件恶化、产量需求激增的条件下，瓦斯灾害事故接连不断地发生，甚至越来越严重。据统计，2011~2016 年发生较大以上瓦斯事故 197 起、死亡 1666 人，占全国煤矿较大以上事故次数和死亡人数的

50.3%和 58.8%，且这一比例呈逐渐增多的趋势(表 1-1)，2016 年较大以上瓦斯事故次数和死亡人数分别占全国煤矿较大以上事故次数和死亡人数的 72.7%和 83.0%。煤与瓦斯突出事故次数和死亡人数分别占较大瓦斯事故次数和死亡人数的 36.0%和 32.1%^[7]。瓦斯灾害直接妨碍了煤矿正常生产，阻滞了煤炭工业的健康、稳定和持续发展，加强瓦斯灾害的防治是确保煤炭能源稳定、可靠供应，促进国民经济全面、健康发展，创建和谐社会的重要保证。

表 1-1 2011~2016 年全国煤矿较大以上事故按事故类别统计^[7]

事故类别	2011 年		2012 年		2013 年		2014 年		2015 年		2016 年	
	事故次数	死亡人数	事故次数	死亡人数	事故次数	死亡人数	事故次数	死亡人数	事故次数	死亡人数	事故次数	死亡人数
瓦斯	55	440	36	303	33	330	30	242	23	136	20	215
顶板	15	60	16	66	8	30	16	86	5	19	5	28
水害	22	163	13	107	14	26	9	66	9	59	5	28
火灾	2	32	3	24	1	13	1	4	1	22	1	12
机电	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0
运输	9	40	7	56	3	13	3	20	2	6	2	6
放炮	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0
其他	3	27	11	65	5	26	2	7	0	0	0	0
合计	106	762	87	624	64	438	62	428	40	242	33	289

2013 年 10 月，在韩国大邱召开的第 22 届世界能源大会的报告中指出：“到 2050 年，化石能源仍然是世界能源构成的基础，煤炭仍将长期发挥重要作用。”尽管新能源得到很大发展，但世界能源格局在未来 30 多年中，煤炭依然是主角之一。我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，煤炭资源量占国内化石能源总量的 95%。煤炭工业是我国的基础产业，其健康、稳定、持续发展是关系到国家能源安全的重大问题，在国家《能源中长期发展规划纲要(2004~2020 年)》中已经确定，中国将“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略”^[8]。《中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究：综合卷》中指出，我国煤炭年需求高达 38 亿 t，在能源结构比例中占 50%以上，且在今后相当长的时间内不会发生明显改变^[9]。《中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究》中预计到 2030 年，中国煤炭消费仍会占一次能源消费总量的 55%以上^[10]。我国 95%的煤矿是地下开采，构造煤普遍发育，瓦斯赋存复杂，受煤层地质赋存条件、煤炭产量和采深不断增加等因素的制约，煤矿灾害严重。瓦斯灾害是当前困扰煤矿安全生产的主要难题，探寻解决煤矿安全生产中瓦斯灾害事故的途径与方法，保障煤矿

安全生产,是当前煤矿安全生产的重点和关键。

尽管近年我国安全生产总体水平有所提高,煤矿瓦斯治理取得进展,安全生产状况得到了进一步改善,但是煤矿瓦斯事故仍未得到有效遏制,原因之一是目前对于煤与瓦斯突出基础理论研究相对滞后于煤矿安全的现实需要,煤矿安全技术研究主要集中在瓦斯灾害的防治措施方面,对瓦斯灾害事故的发生和发展机理研究不够。深入认识煤与瓦斯突出发生的规律、特征和机理,是实现煤与瓦斯突出预测、检测和解危工作的前提和基础,也一直是矿山安全领域中的关键难题和重大研究课题。

1.1 国外研究现状

1) 早期研究阶段(1852~1950年)

Taylor^[11]于1852~1853年根据在英格兰的诺森伯兰郡和达拉莫进行煤层气勘查遇到的煤与瓦斯突出现象详细说明了突出的条件,包括地质构造、岩墙、煤的结构的变化、渗透性,以及高压瓦斯的存。在此基础上,Taylor提出了煤与瓦斯突出的“瓦斯包”理论模型。Halbaum于1899~1900年提出瓦斯压力控制突出的理论,其核心是煤体中高的孔隙瓦斯压力和高的瓦斯压力梯度,煤体在地质扰动下的各向异性、工作面掘进方向、煤的孔隙率及解吸的难易程度。Halbaum^[12]几乎提到了所有影响突出的因素,除了岩体应力和矿山压力。Telfer^[13]提出了断裂带附近存在“瓦斯包”的认识,他认为地壳运动的不均匀性形成了“瓦斯包体”。Loiret和Laligant^[14]认为突出受到构造扰动的影响,与构造扰动带位置密切相关。Pescod^[15]认为突出是地质体的扰动造成的,指出高煤级的无烟煤拥有更好的瓦斯吸附能力,以及在应力作用下发生显著的瓦斯放散的能力,并认为存储于围岩及煤体中的弹性能对瓦斯的放散有影响。

早期的关于地质构造和煤与瓦斯突出关系的研究着重于突出现场地质构造情况的描述,认为地质构造对煤体造成了扰动,但没有具体说明地质构造扰动的机制和结果。由于早期的煤与瓦斯突出的机理着重于强调单个因素的作用,因此对于地质构造在突出中的作用也往往从构造对某个因素的影响进行分析。

2) 近代研究阶段(1950年至今)

Ettinger等^[16]明确指出,影响煤与瓦斯突出的三个重要的因素之一便是地质构造。Hargraves^[17]提出了发生煤与瓦斯突出必须满足的指标,包括一定数量的瓦斯、局部断裂或煤体的碎裂、残余应力或构造应力、煤层的形态变化、岩墙、煤体的低湿度和低渗透性、不利于瓦斯释放的作业方式。Hargraves^[18]于1983年指出,突出倾向性取决于煤级和瓦斯的组成,突出的地点取决于煤层赋存深度、地质构造、

火成岩、煤体结构及其他影响煤体的几何、物理、化学等非均匀的因素。Price^[19]强调应力和地质构造的作用,他认为煤层中的瓦斯压力是突出的主要机制,瓦斯在一些掘进巷道中发生的突出中发挥了重要的作用。Sziertes^[20]提出了“应力集中理论”,指出巷道掘进中发生的突出较为频繁、强度中等,与地质构造扰动有关。Pooley^[21]在南威尔士煤矿观察到具有突出倾向的煤系或煤层表现为强度低、无几何结构特征,他认为这是构造历史作用的结果。矶部俊郎^[22]认为突出是地应力和瓦斯压力作用的结果,地应力使得煤体中的强度缺陷处形成破坏区,而后此区内的吸附瓦斯由于煤破坏时释放的弹性能供给热量而解吸,从而使煤的内摩擦力降低,变成易流动状态。当这种粉碎的煤瓦斯流喷射出来时,便形成了突出。巴利维列夫、马柯贡和克留金等认为突出是在某些地质构造活动区一定的温度压力下以介稳状态保存在煤层和岩石渗透裂隙内的具有巨大潜能的瓦斯水化物($\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)受到采掘影响后迅速分解,形成高压瓦斯破坏煤体的结果^[23]。Кравцов 和 Вольпова^[24]根据顿巴斯煤田煤与瓦斯突出实例的统计分析得出,煤层构造揉皱系数达 0.86 以上时具有十分高的突出危险性。氏平增之^[25]分析了日本石狩煤田各矿井的地质条件和煤与瓦斯突出的关系,指出断层出现度与瓦斯突出的相关系数为 0.960。兵库信一郎^[26]指出日本煤矿的突出主要是在巷道接近地质破坏带时发生的,而地质破坏带是断层、褶皱、火成岩侵入而造成的。Öwing^[27]指出如果一个煤层的瓦斯含量超过临界极限值 $9\text{m}^3/\text{t}$,则所有的地质构造受到破坏的范围全部是潜在的瓦斯突出地点,同时也指出突出可发生在逆掩断层、正断层和具有剪切断层特性的断裂处,断裂处的煤中所存储的瓦斯不会多于未断裂处,但是前者释放瓦斯要快很多。Батугина 和 Петухов^[28]指出矿井动力根据其地点和时间的不均匀性取决于地壳的现代运动,提出了基于板块构造学说的地质动力区划理论和方法用以进行煤与瓦斯突出等矿井动力灾害的预测。矢野贞三等^[29]认为突出是地质构造应力、火山与岩浆活动的热力变形应力、自重应力、采掘压力和放顶动压叠加而引起的,突出危险煤层具有特殊的“分枝性裂隙”的显微结构。Williams 和 Rogis^[30]根据 CO_2 突出的情况,强调煤级与地质特性,提出以下发生突出所必需的条件:①镜质组反射率大于 2;②逆断层逆冲距离大于 3m,走滑断层的走滑距离大于 0.3m;③瓦斯放散值大于 $1.1\text{cm}^3/\text{g}$ 。他们针对浅部(215~265m)突出提出了以下 3 个条件:①高煤级、高变质梯度;②地层的高构造变形程度;③火成岩侵入。扎比盖洛和左德^[31]对顿巴斯煤层突出的地质条件研究表明,突出的分布受地质因素控制,具不均匀分布的规律性,突出与构造复杂程度、煤层围岩性质、煤变质程度有关,并提出了确定煤层突出危险性的地质指标。Shepherd 等^[32]对地质构造与煤和瓦斯突出分布的关系也做了广泛的研究,对发生突出点的构造性质及其影响突出的原因进行了深入的探讨。Josien 和 Revalor^[33]认为突出必须满足的 3 个条件之一是有结构变形或地质构造引起的非正常地应力的存在。Creedy^[34]提出

在煤系中地质构造对瓦斯的赋存状态和分布情况的影响起主导作用,建议加强地质构造的演化与瓦斯地质规律的研究。Lama^[35]将煤矿中的动力现象分为4类,分别是:①低应力+低瓦斯,指地质构造和软煤发育的情况下的突出;②高应力+低瓦斯,指应力控制下的突出,不一定有明显的构造出现;③低应力+高瓦斯,指火成岩墙和压剪构造下的突出;④高应力+高瓦斯,发生类似“香槟瓶”效应的突出。Bibles等^[36]在研究全球范围的瓦斯涌出现象时,指出矿区构造运动不仅影响煤层瓦斯的生成条件,而且影响瓦斯的保存条件。Frodsham和Gayer^[37]认为地质构造对煤层的影响是在构造挤压、剪切作用下,煤层结构遭受破坏,形成发育广泛的构造煤,为瓦斯的富集提供了载体。

煤与瓦斯突出机理的多因素综合作用假说的提出,使得地质构造与煤与瓦斯突出关系的研究在地质构造与瓦斯的赋存和运移、地质构造与地应力、地质构造与煤体结构变形等方面得到了深化,认识到了煤与瓦斯突出的区域性分布受到地质构造的控制,许多学者认为地质构造是煤与瓦斯突出发生的重要甚至必要条件之一,部分学者提出了一些发生突出的地质构造评价的半定量-量化指标。

1.2 国内研究现状

早期研究主要集中于地质构造对瓦斯含量的影响和控制作用。周世宁院士首先于1963年提出了影响煤层原始瓦斯含量的8项地质因素,成为瓦斯地质科学研究的基础^[38]。杨力生在焦作矿务局焦西矿跟踪掘进巷道瓦斯变化规律时,发现瓦斯突出与断层有密切关系^[39]。中国矿业学院瓦斯组在《煤和瓦斯突出的防治》一书中对影响瓦斯突出的地质因素进行了分析^[40]。

20世纪80年代以来我国广泛开展了地质构造与构造煤形成机制、分布特征及其在煤与瓦斯突出中的作用方面的研究。原焦作矿业学院开展了瓦斯地质调查和瓦斯地质编图工作,查明了煤矿瓦斯灾害分布的主要控制因素,证实了不同尺度的构造,通过对构造软煤的发育控制来控制瓦斯突出的分布规律^[41]。袁崇孚^[42]指出在具有煤与瓦斯突出的矿井煤结构的破坏是煤层在构造应力作用下形变的产物。彭立世和陈凯德^[43,44]指出地质构造在煤与瓦斯突出中的作用主要是形成了构造煤,降低了煤的强度,并认为古构造应力是一个结束了的过程。曹运兴、彭立世等^[45,46]指出顺煤层断层所产生的构造煤是瓦斯高聚集区,也是瓦斯突出的危险区,按成因将顺煤断层划分为3种基本类型:褶皱型、重力滑动型和转换型,指出在高瓦斯矿区,顺煤断层发育的煤层和地带是瓦斯突出煤层或突出带,它通过控制构造煤的分布控制瓦斯突出带。康继武和杨文朝^[47]根据对平顶山东矿区煤层中构造群落宏观特征的研究,指出突出煤层经历了构造重建,认为不同构造群落的叠加与复合控制着构造煤的类型及其分布。张子敏等^[48-50]指出华南板块处在中

国四大构造域复合、联合作用最集中的位置,使其在印支、燕山、喜马拉雅运动中所经受的挤压作用更加剧烈,时间更长,普遍发育构造煤,煤层瓦斯透气性低,瓦斯保存条件比华北聚煤盆地优越,是造成华南聚煤盆地高瓦斯矿井和突出矿井多、煤与瓦斯突出严重的主要原因。刘咸卫和曹运兴^[51]对正断层两盘瓦斯突出发生的规律和机理进行了研究,指出突出主要发生在正断层的上盘,导致这一结果的主要原因是突出煤体主要分布于正断层的下降盘,断层构造、构造煤分布及其与瓦斯突出的这种相互控制作用是地史上和现今构造应力场长期作用的结果。据宜文等^[52,53]指出复杂地质条件下煤层受层间滑动作用容易发生流变,煤层流变引起的厚度变化和煤体结构的破坏是造成煤矿瓦斯突出的主要因素,并进一步总结了煤层断层与层滑构造的组合型式,探讨了其形成机制。刘明举等^[54]提出了地质构造是通过控制构造软煤的分布进而控制突出区带分布的观点,并初步确定煤层突出危险性预测的构造软煤临界值指标。王志荣、徐刚等^[55,56]对豫西芦店重力滑动构造进行分析,阐述了瓦斯地质灾害的构造控制作用。韩军等指出,逆冲推覆和重力滑覆的共性特征是存在一个以相对低的强度和高的剪切应变为特征的滑脱面或拆离层,分隔着其上下力学性质和应变特征不同的两盘。推覆构造对煤与瓦斯突出的作用机制主要表现在两个方面:①推覆构造形成过程中低角度滑动对煤体产生广泛的压剪作用,使得煤层作为相对软弱层面结构发生广泛的层域破坏和面域破坏,构造煤非常发育;②推覆构造的挤压应力环境及地层增厚效应为瓦斯赋存提供了有利条件,低角度的主滑断裂面(大多为逆断层或逆掩断层)往往构成较好的瓦斯封闭系统,对瓦斯的赋存起一定的控制作用,推覆构造派生的具有压性特征的结构面形成了对煤层瓦斯系统的封闭作用^[57]。

一些学者对地质构造的应力状态及其和煤与瓦斯突出的关系进行了分析。谭学术等^[58]通过褶皱构造的光弹实验指出在具有煤和瓦斯突出危险的褶皱构造中,向斜轴部煤系的中、上部突出的可能性较大,其翼部也是可能突出的部位,背斜的轴部和翼部突出的可能性相对小些。徐凤银^[59]对煤与瓦斯突出矿区的古构造应力场进行了定量化研究,指出古构造应力场对芙蓉矿区煤与瓦斯突出起主控作用。王恩营^[60]用力学分析的方法研究了正断层形成的两种应力状态,指出正断层具有张性和剪性两种力学性质,并以剪性为主;构造应力场的空间作用状态是影响断层性质的决定因素。韩军等^[61]对开滦矿区的研究表明,开滦矿区构造应力场的挤压作用使得向斜轴部煤层表现出高瓦斯、低渗透性特征,加之构造作用造成的煤体强度的降低,因此向斜轴部具有更大的煤与瓦斯突出危险性,而处于向斜翼部的矿井,由于构造应力相对较弱,煤体渗透性相对较高,瓦斯含量较低,不具备煤与瓦斯突出的条件。张浪和刘永茜^[62]的研究表明,在断层附近发生煤与瓦斯突出,依据断层结构参数和应力场差异,瓦斯压力存在极值条件,结合构造煤分布及瓦斯压力与正应力关系将其分为两大模式:流压控制型(FPC)和流-固耦

合型(FSC)。张春华、高魁等通过物理模拟研究表明,在石门揭煤过程中巷道前方围岩存在明显的应力集中,发现断层附近存在明显的构造应力异常区并与由后期开挖导致的应力集中相互叠加,有利于形成自构造软煤向周围煤层深部扩展的大型突出^[63,64]。

大量学者基于煤与瓦斯突出的多因素假说,从地质构造对地应力、瓦斯参数和煤体结构等因素的控制作用来解释煤与瓦斯突出的发生机制。于不凡^[65]基于大量地质构造和煤与瓦斯突出关系的实例分析,认为在煤与瓦斯突出地点地应力、瓦斯压力、煤体结构和煤质是不均匀的。梁金火^[66]认为矿区地质构造对煤与瓦斯突出的控制通过对地应力的分布、瓦斯的保存及软分层的发育而表现出来,分析了压性和张性构造等对突出的控制作用。黄德生^[67]指出构造的规模和形态不同,对瓦斯突出的控制作用不同,大型构造是控制瓦斯突出及赋存的区域性构造,中型构造则是带状控制,小型和微型构造常是局部点的控制。王生全等^[68]就南桐矿区扭褶构造的展布规律及其对煤与瓦斯突出的控制进行了研究,指出扭褶构造带是煤与瓦斯突出集中带。郭德勇和韩德馨^[69,70]将地质构造控制突出分布归结为4种作用类型,将地质构造分为突出构造和非突出构造及突出构造的突出段和非突出段,提出了由构造组合特征、构造应力场、构造煤和煤层瓦斯四因素组成构造物理环境综合作用控制地质构造带煤与瓦斯突出的观点。王生全等^[71]利用纵弯褶皱变形中和面上下岩层的不同应力与应变特点,分析了处于褶皱中和面上下各煤层在背斜与向斜部位煤层厚度、煤层构造、煤体结构及煤层瓦斯的赋存规律与差异性。韩军等的研究表明,向斜构造的两翼与轴部中性层以上为高压区,中性层以下为相对低压区,距向斜轴部越近,主应力及其梯度越大。向斜构造形成过程中的层间滑动造成煤体原生结构遭到破坏,煤体强度降低,煤层增厚。向斜构造部位瓦斯生成量亦相对较高,同时中性层以上煤(岩)体中的裂隙和孔隙被压密、压实而闭合,阻止了下部瓦斯的向上逸散,中性层以下的张性作用下的断裂或折裂面、煤体中的割理、节理等降低了解吸压力,形成良好的瓦斯聚集空间,也有助于煤层中吸附瓦斯的解吸,使得向斜轴部瓦斯含量较高,向斜构造同时具备的高地应力、高瓦斯压力(含量)和构造煤发育3个因素是其发生煤与瓦斯突出的主要原因。闫江伟从地应力、构造煤和煤层瓦斯3个因素及构造控制出发,研究了地质构造对平顶山矿区煤与瓦斯突出的主控作用,提出了矿区煤与瓦斯突出地质构造控制类型^[72]。

基于地质构造的煤与瓦斯突出预测方面也得到了广泛的研究。李火银^[73]利用剖面变形系数法和平面变形系数法对以褶皱构造为主要构造型式的突出矿井进行了突出危险性预测。张宏伟等应用地质动力区划方法划分了煤与瓦斯突出矿区的活动构造,分析了地质构造和岩体应力状态对煤与瓦斯突出的影响,指出构造应力和地质构造形式对煤与瓦斯突出具有控制作用,并指出地壳内的各种地质构造