

国家“十二五”科技重大专项项目(2011ZX05040-005-012)资助
国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAK04B01)资助
国家重点研发计划项目(2016YFC0801402)资助
国家“十三五”科技重大专项项目(2016ZX05045-004)资助
国家自然科学基金青年科学基金项目(51404190)资助
陕西省自然科学基金面上项目(2017JM5115)资助
陕西省“百人计划”人才工程项目资助
中国博士后科学基金资助项目(2015M572655XB)资助
西安科技大学“胡杨人才工程”资助

煤与瓦斯突出地质作用 机理及应用

Mei Yu Wasi Tuchu Dizhi Zuoyong Jili Ji Yingyong

董国伟 金洪伟 胡千庭 王麒翔◎著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家“十二五”科技重大专项项目(2011ZX05040-005-012)资助

国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAK04B01)资助

国家重点研发计划项目(2016YFC0801402)资助

国家“十三五”科技重大专项项目(2016ZX05045-004)资助

国家自然科学基金青年科学基金项目(51404190)资助

陕西省自然科学基金基础研究计划面上项目(2017JM5115)资助

陕西省“百人计划”人才工程项目资助

中国博士后科学基金资助项目(2015M572655XB)资助

西安科技大学“胡杨人才工程”资助

煤与瓦斯突出地质作用机理及应用

董国伟 金洪伟 胡千庭 王麒翔 著



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书首次提出了煤与瓦斯突出“主控地质体”概念,从沉积、构造等地质演化角度进行了“主控地质体”特征及判识依据研究,依据“主控地质体”理论方法系统地阐述了煤与瓦斯突出地质作用机理,并依据大量现场资料进行了验证。全书共10章,包括绪论、中国含煤盆地沉积构造及煤阶情况、煤与瓦斯突出“主控地质体”的定义及理论方法、“主控地质体”理论在典型突出矿区的应用等内容。

本书可供高等院校采矿工程、安全工程等专业的师生以及从事相关领域的科研人员和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤与瓦斯突出地质作用机理及应用/董国伟等著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3699 - 9

I. ①煤… II. ①董… III. ①煤突出—地质作用—高等学校—教材②瓦斯突出—地质作用—高等学校—教材
IV. ①TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 219284 号

书 名 煤与瓦斯突出地质作用机理及应用
著 者 董国伟 金洪伟 胡千庭 王麒翔
责任编辑 黄本斌
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 14.25 字数 362 千字
版次印次 2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷
定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

在未来国家能源布局中,煤炭仍将是我国的主体能源,占到50%左右。我国煤炭资源开采逐步进入中深部,虽然智能化、无人化等先进开采技术得到发展,但煤与瓦斯突出事故次数和死亡人数仍然惊人,煤与瓦斯突出灾害仍然是全世界产煤大国共同面临的难题。煤与瓦斯突出涉及地质、采矿、安全等多个学科领域,发生原因极其复杂,决定其危险性的首要条件是地质演化及特征,矿井开采为其发生创造了条件。经过多年技术发展,预防煤与瓦斯突出灾害虽已形成了“区域四位一体为主、局部四位一体为辅”的技术体系,但矿区、矿井的突出危险性预测技术环节仍存在较大不足,无法满足矿区规划及矿井设计要求。

本书融合矿山压力与岩层控制、瓦斯地质、煤层气地质、煤与瓦斯突出预防等地质、采矿、安全学科的理论与方法,首次提出了控制煤与瓦斯突出的“主控地质体”概念,并进行了定义及分类,从沉积环境演化史、地质构造演化史及热演化史、生烃史等方面建立了主控地质体理论、方法及判识依据。我们认为,沉积埋藏史、构造演化史、热演化史、生烃史等时空配置决定了控制煤层的改造程度、瓦斯的生成、保存及逸散程度以及自重应力、构造应力的分布情况,控制煤与瓦斯突出主控地质体分布,进而控制煤与瓦斯突出灾害分布及严重程度。主控地质体理论揭示了煤与瓦斯突出地质作用机理。

本书共分10章。第1章由董国伟、金洪伟、胡千庭撰写,主要介绍了煤与瓦斯突出地质作用机理和研究意义、现状及发展趋势,提出了研究内容和研究方法。第2章由董国伟撰写,主要介绍了中国含煤盆地构造、沉积及煤阶情况。第3章由董国伟、王麒翔撰写,给出了煤与瓦斯突出“主控地质体”的定义、理论及方法,揭示了煤与瓦斯突出地质作用机理。第4章由董国伟撰写,理论分析了水城矿区煤与瓦斯突出主控地质体,对水城矿区煤与瓦斯突出情况进行了理论预测。第5、6章由董国伟撰写,现场进行了水城矿区层状、构造地质体对煤与瓦斯突出的影响程度分析。第7章由董国伟撰写,综合确定了水城矿区煤与瓦斯突出主控地质体。第8章由董国伟撰写,介绍了主控地质体理论在水城矿区保护层选择中的应用。第9章由董国伟撰写,介绍了煤与瓦斯突出主控地质体理论在典型突出矿区的应用。第10章由董国伟撰写,对本书成果进行了总结,并对煤与瓦斯突出的地质作用机理及发展方向进行了展望。

本书在成书过程中,参阅了大量国内外相关专业文献,它们给了作者很大启发,在此谨向文献的作者表示诚挚的感谢。感谢中煤科工集团重庆研究院有限公司邹银辉研究员长期以来的帮助和指导。感谢中煤科工集团重庆研究院

有限公司崔俊飞副研究员、覃木广副研究员、黄长国副研究员在成书过程中的帮助和支持。感谢水城矿区广大领导和技术人员为本书编写所给予的帮助和支持。

书中难免有不当之处,敬请广大读者予以批评指正。书中观点还有待进一步研究和完善,希望广大读者与作者交流探讨。

作者
2016年11月

目 录

1 绪论	1
1.1 煤与瓦斯突出的地质作用机理概述	1
1.2 煤与瓦斯突出的地质作用机理研究现状及发展趋势	3
1.3 煤与瓦斯突出的地质作用机理研究内容、方法和思路	10
2 中国含煤盆地构造、沉积及煤阶情况	13
2.1 板块、板块边缘构造情况	13
2.2 板块、板块边缘沉积情况	34
2.3 含煤盆地分布情况	53
2.4 区域煤阶展布	65
2.5 中国煤矿瓦斯灾害分布情况	66
2.6 本章小结	67
3 煤与瓦斯突出主控地质体的定义、理论及方法	69
3.1 主控地质体的定义及分类	69
3.2 主控地质体的理论及方法	69
3.3 本章小结	82
4 水城矿区煤与瓦斯突出主控地质体理论分析	84
4.1 黔西地区含煤盆地动力学机制及煤与瓦斯突出分布特征	84
4.2 水城矿区地质特征	88
4.3 水城矿区沉积作用演化及特征	91
4.4 水城矿区地质构造作用演化及特征	96
4.5 水城矿区热演化史和生烃史	101
4.6 水城矿区煤与瓦斯突出主控地质体理论预测	103
4.7 本章小结	105
5 水城矿区煤与瓦斯突出层状地质体现场试验研究	107
5.1 水城矿区层状地质体特征	107
5.2 水城矿区煤层对煤与瓦斯突出影响	107
5.3 水城矿区围岩对煤与瓦斯突出影响	127
5.4 水城矿区含水层(水文地质因素)对煤与瓦斯突出影响	136

5.5	水城矿区层序地层位置对煤与瓦斯突出影响	136
5.6	本章小结	137
6	水城矿区煤与瓦斯突出构造地质体现场试验研究	138
6.1	水城矿区构造地质体特征	138
6.2	水城矿区构造地质体对煤与瓦斯突出影响	140
6.3	本章小结	148
7	水城矿区煤与瓦斯突出主控地质体确定及特征	150
7.1	水城矿区煤与瓦斯突出主控地质体确定	150
7.2	水城矿区主控地质体对煤与瓦斯突出控制作用	151
7.3	水城矿区煤与瓦斯突出危险区域自动判识系统开发	180
7.4	本章小结	182
8	水城矿区煤与瓦斯突出主控地质体在保护层选择中的应用	183
8.1	矿井概况	183
8.2	矿井保护层选择理论分析	183
8.3	矿井保护层选择数值模拟分析	185
8.4	矿井保护层选择现场考察分析	188
8.5	矿井保护层合理参数	191
8.6	本章小结	192
9	主控地质体理论在一些典型煤与瓦斯突出矿区的应用	193
9.1	对松藻矿区煤与瓦斯突出现象解释	193
9.2	对阳泉矿区煤与瓦斯突出现象解释	199
9.3	对鹤岗矿区煤与瓦斯突出现象解释	201
9.4	对韩城矿区煤与瓦斯突出发生预测	204
9.5	煤与瓦斯突出区域主控地质体共同特性和差异	206
9.6	本章小结	207
10	主要结论与展望	208
10.1	主要结论	208
10.2	主要创新点	210
10.3	后续展望	211
	参考文献	212

1 绪 论

1.1 煤与瓦斯突出的地质作用机理概述

我国是世界上产煤大国,同时也是煤矿安全生产形势最为严峻的国家之一。1976年至2006年的31年间,我国每年因煤矿事故的死亡人数都在4500人以上,数字触目惊心;近10年煤矿事故显著降低,2016年煤矿事故死亡526人,控制煤矿事故成效显著,但形势依然严峻,与发达国家比差距还很大。煤与瓦斯突出事故是煤矿事故一种主要的表现形式,也是影响因素最为复杂、防治难度最大的一种瓦斯事故,历来就是煤矿防灾的重点和难点;随着开采深度的加大,煤与瓦斯突出的威胁呈现出越发严重的趋势。

据不完全统计,近些年全国煤矿每年平均发生较大以上(一次死亡3人以上)的煤与瓦斯突出事故29起左右。其中,河南郑煤集团大平煤矿2004年10月20日发生的煤与瓦斯突出引起瓦斯爆炸事故死亡148人、河北峰峰矿业集团大淑村煤矿2007年4月19日发生的煤与瓦斯突出事故死亡17人、江西丰城矿务局建新煤矿2007年10月13日发生的煤与瓦斯突出事故死亡19人、贵州群力煤矿2007年11月8日发生的煤与瓦斯突出事故死亡35人、云南昭通水洞坪煤矿2008年3月14日发生的煤与瓦斯突出事故死亡14人、湖南郴州市张家洲煤矿2008年3月26日发生的煤与瓦斯突出事故死亡13人、河南平禹煤电公司四矿2008年8月1日发生的煤与瓦斯突出事故死亡23人、四川宜宾金河煤业有限公司2008年9月5日发生的煤与瓦斯突出事故死亡18人、河南登封新丰二矿2008年9月21日发生的煤与瓦斯突出事故死亡37人、四川宜宾市幸福煤矿2008年10月12日发生的煤与瓦斯突出事故死亡10人、重庆市松藻煤电有限公司同华煤矿2009年5月30日发生的煤与瓦斯突出事故死亡30人、黑龙江新兴煤矿2009年11月21日发生的煤与瓦斯突出引起瓦斯爆炸事故死亡108人、贵州省振兴煤矿2009年11月26日发生的煤与瓦斯突出事故死亡10人、云南省麻栗树煤矿2009年12月28日发生的煤与瓦斯突出事故死亡11人、河南洛阳伊川煤矿2010年3月3日发生的煤与瓦斯突出事故死亡44人、江西宜春市兴民煤矿2010年4月20日发生的煤与瓦斯突出事故死亡12人、贵州远洋煤矿2010年5月13日发生的煤与瓦斯突出事故死亡21人、贵州明阳煤矿2010年8月3日发生的煤与瓦斯突出事故死亡15人、河南平禹煤电公司四矿2010年10月16日发生的煤与瓦斯突出事故死亡37人、云南私庄煤矿2011年11月10日发生的煤与瓦斯突出事故死亡43人、贵州盘江精煤股份有限公司金佳煤矿2013年1月18日发生的煤与瓦斯突出事故死亡13人、江西丰城曲江公司2013年9月30日发生的煤与瓦斯突出事故死亡11人、河南兴裕煤矿2017年1月4日发生的煤与瓦斯突出事故死亡12人等,这些重、特大煤与瓦斯突出事故的发生不断提醒人们煤与瓦斯突出事故的严峻性,至今令人揪心。

煤与瓦斯突出事故是一种极其复杂的瓦斯动力现象,事故的不断发生与对其产生机理、发生条件、主客观原因等认识不清有着密切的关系。已有研究成果发现:煤与瓦斯突出矿井的分布与板块结合部位或板内构造带、顶底板岩性、煤层赋存状态、煤质及力学性质有直接的关系,也就是说,煤层赋存及瓦斯地质条件决定了煤与瓦斯突出的客观危险性(地质构造、顶底板岩层、煤体等本书定义为地质体,具体定义见第2章)。

分析我国高瓦斯或煤与瓦斯突出矿区的分布可以发现:从区域分布看,我国北部的天山-兴蒙褶皱系与塔里木-华北板块结合部位分布着包头、下花园、承德、京西、北票、阜新、红阳、本溪、通化、辽源、鸡西、鹤岗、通化等高瓦斯或煤与瓦斯突出矿区;塔里木-华北板块与华南板块结合部位的昆仑-秦岭断裂带及两侧,分布着焦作、安阳、鹤壁、郑州、淮北、皖北等煤与瓦斯突出矿区;另外一些突出矿井位于区域小板块的结合带或造山带,如川西龙门山造山带影响的龙门山、雅荣等矿区,川东-川南褶皱带影响的华蓥山、芙蓉、天府、南桐、松藻、中梁山等矿区,贺兰山逆冲推覆构带的神宁矿区等,南华褶皱带和扬子地台结合带的萍乡、涟邵、郴耒、丰城、乐平等矿区,黔西滇东三江造山带影响的盘江、水城、六枝、东源矿区等。煤与瓦斯突出矿区的区域分布特征一部分与地质构造破坏煤体结构、造成瓦斯积聚有关,一部分与岩浆岩侵入,造成煤体变质程度高、瓦斯积聚有关^[1-2]。

不同煤层由于所属沉积体系域的不同,煤层和瓦斯赋存情况也存在较大差异。从层域上看,虽然同一矿井不同煤层处于同一区域,但煤与瓦斯突出危险程度存在较大差异,比如华北地区的太原组与山西组煤层的瓦斯灾害危险性存在较大差异,同一煤组内部各煤层瓦斯赋存也存在差异,华南区域龙潭组也存在类似情况。比如阳泉矿区、神宁矿区、淮北矿区、松藻矿区、水城矿区等,这种差异主要是沉积环境引发的,沉积环境决定了煤层赋存状态及特征、顶底板岩性等,但目前针对同一区域不同煤层煤与瓦斯突出危险程度不同的原因研究较少。

煤与瓦斯突出与煤层瓦斯赋存的地质条件密切相关,许多学者从区域构造地质学方面进行研究取得了显著成果,但从层序地层学分析不同煤层煤与瓦斯突出危险差异性,以及从宏观区域、层域组合角度研究影响煤与瓦斯突出危险性的地质条件成果较少。

对煤与瓦斯突出地质作用机理的认识不足,使得对各区域煤炭资源灾害危险程度、开发难度认识不足,使得煤矿企业投资、开发、设计存在一定的盲目性,出现大量矿井开发前认为不是突出矿井、基建期间即发生煤与瓦斯突出事故,也造成大量经济损失,如云南白龙山煤矿。

煤与瓦斯突出原因极其复杂,决定其危险性的首要条件是地质演化及特征,矿井开采为其发生创造了条件,预防煤与瓦斯突出灾害虽已形成了“区域四位一体为主、局部四位一体为辅”的技术体系,但矿区、矿井的突出危险性预测技术环节仍存在较大不足,无法满足矿区规划及矿井设计要求。

为此,亟须从煤系地层区域、层域角度进行影响煤与瓦斯突出灾害地质条件研究,从而为煤与瓦斯突出灾害预警、预测及防治提供指导。

本书从地质构造、沉积环境、热演化及生烃史等方面研究了煤与瓦斯突出与地质因素的关系,并从区域和层域上解释了煤与瓦斯突出危险性与地质作用关系,进而形成了煤与瓦斯突出地质作用机理。研究成果在水城矿区进行了应用,并对其他一些典型矿区煤与瓦斯突出现象进行了解释、预测。

1.2 煤与瓦斯突出的地质作用机理研究现状及发展趋势

煤与瓦斯突出是个极其复杂的动力现象,要想研究煤与瓦斯突出地质作用机理,首先要研究煤与瓦斯突出产生机理。

煤与瓦斯突出产生机理,是指煤与瓦斯突出孕育、激发、发展和终止的原因、条件及过程^[6]。自从1834年法国卢瓦尔(Loire)煤田依萨克(Issac)煤矿发生了世界上第一次有记载的突出以来^[6],人们就开始了突出机理研究,并提出了众多的煤与瓦斯突出发生理论。国外一些国家如苏联、日本、法国、波兰等取得了煤与瓦斯突出机理研究的一些成果。我国学者于不凡、王佑安、宋世钊等在对国内外突出资料分析的基础上,提出了对于煤与瓦斯突出机理新的观点和看法。他们根据各种理论对突出影响因素描述侧重点的不同,将突出机理理论分为四类:①以瓦斯为主导作用的理论;②以地应力为主导作用的理论;③化学本质理论(因缺乏足够的证据,如今这一类理论已很少有人支持);④综合作用理论(其基本理念已广为接受)。

综合作用理论是Nekrasovski于1951年最早提出的,认为突出是由多种因素综合作用造成的。1954年,斯柯钦斯基(Skochinski)则对综合作用理论进行了更加明确的阐述。该理论认为突出的发生是由许多因素综合作用的结果,这些因素包括:

(1)地应力。其影响包括:①在开采区边缘部位引起裂隙的扩展和煤的破坏,使得边缘部位卸载和强度降低;②煤层渗透率的变化引起瓦斯压力重新分布和大量的瓦斯涌出;③由于靠近工作面的煤被破坏或对顶板失去支撑,使得地应力从静态阶段变为动态阶段,引发进一步的裂隙扩展和煤体破碎,进而生成了可使瓦斯进一步解吸的新鲜表面。煤的弹性势能和重力势能释放转化为煤移动的动能,增加了突出的强度。

(2)煤中的瓦斯。煤中瓦斯对激发突出起到关键性作用应满足以下三个条件:①煤中的瓦斯含量足够高;②由采矿造成的快速裂隙扩展和煤破碎,形成大量新鲜表面极大加快了瓦斯解吸和涌出;③在裂隙和破碎煤体中形成具有足够长度和体积的裂缝,这些裂缝足以使得煤体卸压、瓦斯流向采空空间、降低采空空间和煤体之间的瓦斯压力。

(3)煤的物理力学性质以及煤层的微观和宏观构造。煤的结构决定了:①煤的强度及其对应力的抵抗作用;②瓦斯的释放速率以及瓦斯释放过程中所做的功;③煤中的瓦斯量以及在突出中的可释放势能。

(4)在大倾角煤层,重力对突出有重要影响。当突出孔洞的轴线随着煤层上升时,由于重力造成的动能增加可能接近瓦斯的贡献。

综合作用理论的最大意义是用理论和实际资料证明了突出确实是受众多因素的影响,其机理将是复杂的。该理论的基本理念得到了大多数学者的认可,此后发展的大多数突出机理理论甚至此前提出的能量理论都被认为是综合作用理论中的一种。

在中国,对突出机理的主流认识与Skochinski所提出的综合作用理论大致相同。何学秋、周世宁基于含瓦斯煤样在三轴受力状态下流变特性,提出了突出的流变机理,认为突出往往发生于煤岩体流变的加速变形阶段,因而时间也是影响突出的一个重要因素。该理论很好地解释了延期突出现象。鲜学福等人还提出了采矿工程中产生的振动能够加速煤(岩)柱的蠕变断裂破坏和引起吸附瓦斯解吸,从而引起突出的发生。蒋承林、俞启香提出了突出

的球壳失稳理论,对突出过程中孔洞壁的层裂破坏给出了另外一种解释,球壳失稳理论对突出过程中孔洞周围的力学状态进行了详细的分析,明确指出了地应力和瓦斯对煤破坏作用的不同,不足的是,该理论忽略了突出过程中所出现的不同于准静态条件的动态应力。胡千庭等人认为突出是含瓦斯煤、岩在固气两相力耦合作用下发生短时间内持续破坏和失稳的一种动力现象,即煤与瓦斯突出力学作用机理,从突出的孕育、激发、发展和终止各阶段进行动力学分析,寻找发生突出的力学条件、瓦斯涌出规律、煤岩-瓦斯流的动力学规律等^[4,6]。

煤与瓦斯突出产生机理认识的进步为煤与瓦斯突出地质作用机理的研究提供了知识储备,随着研究的开展深入,逐步认识到包括煤与瓦斯突出在内的煤岩瓦斯动力现象的发生是多种地质体共同作用下的结果,地质体通过影响或控制煤层瓦斯赋存量、地应力、煤体结构、破坏类型等来控制煤岩瓦斯动力现象,即逐渐形成了煤与瓦斯突出地质作用机理的认识,其国内外研究现状如下。

1.2.1 国外研究现状

在欧洲、大洋洲、南北美洲等,在煤矿的生产过程中,逐渐发现煤矿瓦斯与地质等因素有关,开始进行瓦斯地质工作研究。

在国外,以苏联、法国、荷兰、英国、德国等的研究较详细。法国 1914 年成立了“防治煤和瓦斯突出专门委员会”,包括进行瓦斯与地质因素相关性研究;苏联 20 世纪 50 年代就开始瓦斯地质研究;60 年代分别在法国、匈牙利分别召开第一、二届防治煤和瓦斯突出国际讨论会,70 年代在苏联召开第三届防治煤和瓦斯突出国际讨论会。这一时期,瓦斯(煤层气)长期被视为有害气体,20 世纪 70 年代末期由于能源危机,逐渐把瓦斯作为能源考虑,并于 80 年代取得重大突破,美国成为第一个进行大规模商业性生产煤层气(瓦斯)的国家,并在全球掀起煤层气研究热潮,随之诞生了煤层气地质研究。近年来澳大利亚、加拿大等国在煤层气地质及开发方面做出了一些研究成果^[1]。

俄罗斯国立莫斯科矿业大学地质动力区划中心最早开展了动力灾害地质动力区划研究工作,其创始人俄罗斯自然科学院通讯院士 И. М. 巴杜金娜教授和俄罗斯自然科学院院士、国立莫斯科矿业大学地球动力中心主任 И. М. 佩图霍夫教授已在乌克兰的顿巴斯等矿区,用地质动力区划方法对矿区自然地质动力状况进行了评价,用以探索矿井动力现象的可能性^[3]。

19 世纪 50 年代,Taylor 依据英格兰诺森伯兰郡、达拉谟发生的煤与瓦斯突出现象,进行了地质构造、侵入岩岩墙、煤结构的变化、煤的渗透性及高压瓦斯等与煤与瓦斯突出的关系研究。20 世纪初,Halbam 认为煤与瓦斯突出与煤的孔隙率、瓦斯压力、煤体结构、地质构造等有关;Briggs 认为煤与瓦斯突出发生必然条件为:较多破碎煤体、较大瓦斯压力、软煤不含水、开采无法使软煤瓦斯轻易释放等;Loiret 和 Lalignant 判断煤与瓦斯突出与地质构造扰动位置紧密相关,有二氧化碳时易发生煤与瓦斯突出,具体与岩体应力、瓦斯压力有关。20 世纪 50 年代,Pescod 认为煤岩弹性能影响瓦斯释放,认为煤与瓦斯突出是地质体的扰动造成的。此后,Skochinski、Bykov 等认为煤与瓦斯突出受综合因素控制,Skochinski 将影响因素总结为:煤的物理化学属性、宏观微观结构、煤体自重、岩体应力及瓦斯等。20 世纪 80 年代,Hargraves 进一步认为:煤体具有高的吸附率和低的渗透性、可观的吸附瓦斯含量(特别是富含二氧化碳)、高应力或高构造应力作用、地质扰动及快速采动引起的高瓦斯压力梯度与快速的应力调整等容易引起煤与瓦斯突出发生。20 世纪末,波兰的亚·杜宾斯基认为煤

层与围岩力学性质、瓦斯解吸能力、覆岩压力、地质构造等与煤与瓦斯突出相关性较好。苏联顿巴斯煤田、捷克斯诺伐克的奥斯特洛夫斯克-卡尔文斯克矿区、英国的南乌艾里斯矿区等煤与瓦斯突出主要发生在地质构造带^[4-6]。

1.2.2 国内研究现状

我国很早就有学者注意瓦斯灾害与地质因素的关系。20世纪50~60年代煤炭科学研究院抚顺所在峰峰煤田开展了瓦斯赋存与地质因素关系的研究,指出瓦斯赋存与地质构造有关;1956~1960年,大同矿务局忻州窑矿发现三次瓦斯事故均为掘进巷道遇断层。1963年,周世宁确定了影响瓦斯赋存量的8种因素,其中一种为地质因素。1964年,煤炭工业部杨力生带队,分别在南桐矿务局、焦作矿务局、双鸭山矿务局岭东矿、辽源矿务局西安矿进行了瓦斯爆炸及突出事故调研,并编制了瓦斯地质图^[1]。

20世纪70年代中后期,广泛系统的瓦斯地质工作才逐步开展。1977年焦作矿业学院成立“瓦斯地质课题组”,彭立世、袁崇孚在承担煤炭工业部“湘、赣、豫煤与瓦斯突出带地质构造特征研究”课题时,先后在湖南、江西、河南等省开展瓦斯地质调研,同时在四川天府、南桐、华蓥山矿务局,广东梅田矿务局进行了大量调查、研究。1978年下半年,焦作矿业学院和焦作矿务局联合召开了全国煤矿瓦斯地质学术座谈会,这次会议是我国瓦斯地质工作的阶段性总结^[1]。随后,张子敏教授带领团队对瓦斯地质进行深入研究,提出了煤矿瓦斯的构造逐级控制理论。

1982年在煤炭系统高教会议上,提出编制“全国煤矿瓦斯地质图”的思路。1983年,煤炭部重大项目“编制全国煤矿瓦斯地质图”开始。1983年以后,是我国瓦斯地质大发展时期。1987年,全国瓦斯地质编图顺利完成并出版。煤层气作为资源在我国也掀起热潮,“六五”、“七五”期间就进行了地面煤层气开发试验和地质因素关系研究^[1]。

1982年,于不凡基于丰富的突出资料分析了突出与煤厚、煤层倾角、采深、构造等关系^[4]。

重庆煤科院“八五”期间进行了工作面预测敏感临界指标值确定方法的研究,确定了常用指标及其临界值,“九五”期间进行了瓦斯指标结合物探手段预测煤与瓦斯突出危险区域研究,取得了一定成果。

1992年联合国开发计划署利用全球环境基金资助我国实施“中国煤层气资源开发”和“深层煤层气勘探”活动,先后在山西柳林和晋城、辽宁铁法、安徽淮南、河北唐山等地开始煤层气勘探开发试验评价。随后我国煤炭系统、石油系统、地矿系统在全国30多个矿区开展了煤层气试井工作,取得了大量煤储层物性参数。“九五”以来,我国煤层气勘探开发集中在沁水盆地、鄂尔多斯盆地东缘、铁法盆地和阜新盆地,沁水盆地南部煤层气商业开发示范区已逐步形成^[7]。

1999年以来,辽宁工程技术大学张宏伟教授根据中国大陆的构造特点,在俄罗斯研究人员提出的地质动力区划方法基础上,引入了分形理论、GIS技术、岩体应力分析和多因素模式识别等理论和方法,丰富和深化了地质动力区划理论和方法。在此基础上提出了开采地质条件不同、矿井动力现象显现模式不同观点,建立了矿井动力现象多因素模式识别概率的预测方法。其研究中以区域构造和区域岩体应力状态为主要研究对象,以断裂活动性、岩体高应力区(或高应力梯度区)作为预测矿井动力现象的主要判据,利用GIS技术建立区域预测信息管理系统^[3]。

2002年,“973”项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”开始启动,进一步推动了煤层气地质的发展,并取得了丰硕的成果。

2005年,“973”项目“预防煤矿瓦斯动力灾害的基础研究”开始启动,推动了煤矿瓦斯地质认识及防治研究。

2011年,国家能源局再次提出进行“编制全国煤矿瓦斯地质图”工作研究。

分析国内研究成果,主要形成如下观点:

(1) 煤与瓦斯突出与煤层围岩关系

煤层突出与非突出区域煤层顶底板岩性存在差异,突出区域顶底板围岩主要以颗粒较小的泥岩、页岩为主,非突出区域主要以颗粒较大的砂岩、砾岩为主。

在地质历史的演化过程中,煤层瓦斯是在不断地运移和排放。运移和排放的方式和速度与煤层围岩的性质有着密切的关系。在煤层围岩中的中、粗粒砂岩、砾岩和岩溶发育的石灰岩,孔隙率高,渗透性好,是煤系中的透气层,有利于煤层瓦斯的运移和排放,煤层瓦斯含量一般较低。煤层围岩中的油页岩、泥岩、砂质泥岩和胶结物以黏土矿物为主的粉砂岩,孔隙率低,透气性差,是煤系地层中的隔气层^[5],不利于煤层瓦斯的运移和排放,煤层瓦斯含量一般较高。煤层顶板为坚硬砂岩且瓦斯赋存量大时,由于开采造成顶板来压时可能造成煤与瓦斯突出。

沉积体系、地层层序位置决定着顶底板岩性、煤层赋存状况等,进而影响煤层瓦斯赋存及煤与瓦斯突出灾害发生。

沉积作用通过聚煤特征、含煤岩系的岩性、岩相组分及其空间组合在一定程度上控制着瓦斯的保存条件,浅海-障壁海岸体系、近海三角洲体系及湖泊体系对煤层瓦斯的封盖能力较强;浅海-无障壁海岸体系、河流体系及冲积扇体系的封盖能力总体上较差^[7-8]。

低位体系域地层叠置以退积至缓进积为主早期形成的煤层瓦斯保存较差,而低位体系域后期形成的煤层瓦斯保存较好。海进体系域早期地层以退积叠置为主,瓦斯保存较好,晚期以加积叠置为主的高位体系域地层,一般偏海相好于偏陆相,但总的来说其保存条件比早期差。高位体系域早期成煤瓦斯保存较差,而且晚期以加积为主,煤层遭受风化剥蚀,瓦斯保存同样较差^[15]。

华南聚煤区尽管矿井瓦斯状况受到构造、煤阶、采动条件等因素的影响,但高瓦斯矿井、煤与瓦斯突出矿井的分布与龙潭期沉积环境具有明显的成因联系,290余对龙潭组煤层生产矿井的统计资料显示,几乎所有的高瓦斯矿井和煤与瓦斯突出矿井均分布在滨海三角洲和碎屑海岸型含煤地层分布的地区。有利储盖条件主要展布在滇东-黔西、川(渝)东-川南-黔北、湘中-赣中3个地带^[8]。

华北聚煤区石炭系主要为煤层-灰岩顶板储盖条件,形成于陆表海碳酸盐台地体系,沉积特征较为稳定,含气量普遍低于山西组煤层含气量;二叠系为煤层-碎屑岩顶板储盖组合,分别为障壁岛-潟湖潮坪、滨海三角洲、河流-湖泊-冲积扇等体系中沉积作用的产物,煤层含气量较高的矿区几乎均分布在滨海三角洲和潟湖-潮坪相区^[8]。

(2) 煤与瓦斯突出与煤层关系

我国绝大多数煤与瓦斯突出矿井聚煤古地理环境为二叠系煤层,少数为侏罗系煤层,极少数为石炭系煤层,即适宜的成煤建造特征总体上控制着煤与瓦斯突出的形成条件。煤岩沉积形成过程是波动起伏的,不断交替变化。由于受到古植物、气候条件、古地理环境和地

壳构造的发展变化,在各聚煤期内,聚煤作用地理分布是不均衡的,在某些地区集中,作用较大,而在另一些地区则没有或很少。聚煤期在时间和空间上的不均性是有其规律性的,这也决定了煤与瓦斯突出在时间和空间上的不均性和区域性。

我国聚煤年代包括元古代、早古生代、晚古生代、中生代及新生代。其中,晚古生代和中生代含煤地层及部分新生代含煤地层中所含的可采煤层为主要开采对象。

一般来讲,三角洲、滨海平原等沉积环境中形成煤层较厚、较稳定及分布较广,滨海冲积平原沉积环境则相反;潟湖、山间盆地等沉积环境中形成的煤层较厚且范围较小。不同的沉积环境影响了瓦斯的生成量和区域分布。煤层越厚,瓦斯生成的物质基础越丰富,突出可能性越大。

突出危险性煤层相比非突出煤层具有以下主要特征:① 突出煤层变质程度较高,但非控制因素;② 突出煤层瓦斯压力、瓦斯含量一般较大;③ 突出煤层的透气性一般较低;④ 突出煤层的结构破坏类型较高,强度低;⑤ 突出煤层一般具有较大瓦斯放散初速度 Δp ;⑥ 突出煤层一般具有较大的比表面积;⑦ 突出煤层的大、中孔较微、小孔而言,其在总孔隙容积中所占比例较大;⑧ 突出煤层随其厚度增加危险性增大^[9-16,23-56]。

煤层厚度、物理力学性质是原始沉积条件的差异和后期构造运动的结果。

煤层赋存状态,包括煤层厚度、煤层稳定性、煤层结构及煤层倾角等,是影响煤与瓦斯突出主要地质因素之一。同一区域不同煤层煤与瓦斯突出危险性差异主要与其自身赋存状态有关。破坏类型、坚固性系数与煤与瓦斯突出有关,一般认为软分层破坏类型为Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ且坚固性系数 $f \leq 0.5$ 时煤层具有煤与瓦斯突出危险性。软分层厚度较大的区域,煤与瓦斯突出危险性增大。

煤层沉积环境、层序体系域决定着垂向上煤层煤与瓦斯突出危险性。松藻矿区,含煤地层为上二叠统龙潭组,由一套海陆交替相的泥岩、粉砂岩、砂质泥岩、铝土岩及煤层组成煤系地层。可采与局部可采煤层 3~5 层,自下而上的编号分别为 12[#](K₁)、11[#](K₂)、8[#](K₃)、7[#]、6[#](K₆)。松藻煤矿煤与瓦斯突出强度最大的是 8[#](K₃)煤层,其次是 12[#](K₁)煤层;煤与瓦斯突出次数最多的是 7[#]煤层;始突深度最浅的是 8[#](K₃)煤层,其余为 6[#]、7[#]、11[#](K₂)、12[#](K₁)。虽然同处于渝东构造带,但煤层沉积层序、沉积体系域控制了不同煤层的煤与瓦斯突出危险性。例如 8[#]煤层为该层序内最厚,其顶界面为最大海泛面,即海侵体系域顶界面,煤层赋存状态决定其煤与瓦斯突出危险性最大。

煤层埋深增加,瓦斯含量、地应力等相继增加,随着埋深增加,近年来介于煤与瓦斯突出与冲击地压之间灾害时有发生。

煤层煤阶越高,煤层变质程度越高,相对条件下煤层瓦斯赋存量越大(高变质无烟煤除外),进而影响煤与瓦斯突出的发生,但国内不同煤质煤层大都有煤与瓦斯突出灾害发生,比如从南桐、恩洪、淮北矿区的肥焦煤,到松藻、晋城、阳泉矿区的无烟煤,只是煤与瓦斯突出灾害程度不同而已。

(3) 煤与瓦斯突出与地质构造关系

根据已有的突出统计资料,绝大多数的突出地点有断层、褶曲等地质构造,这说明地质构造与突出有着密切的关系。所谓地质构造是指地壳中的岩层由于地壳运动的作用发生变形与变位而遗留下来的形态,其规模大至数千千米、小至毫米甚至微米计。

地质构造演化及特征影响着构造应力、构造形态、煤体强度、瓦斯赋存情况,是影响煤与

瓦斯突出的主要因素之一。

大量的研究成果表明:矿井煤与瓦斯突出与地质构造有直接的关系。统计 15 个矿区 106 个矿井的煤与瓦斯突出实例,在 3 082 次有准确记录的突出实例中,有 2 525 次突出地点有断层、褶皱、岩浆岩侵入等地质构造,无地质构造发生突出 557 次,仅占 18.1%,易发生突出的地质构造带主要有压性及压扭性断层地带、向斜轴部地带、煤层扭转处、帚状构造收敛端及岩浆岩侵入区等。开滦矿区、北票矿区煤与瓦斯突出大多发生在构造区域,四川芙蓉矿区、安徽淮南矿区、平顶山矿区煤与瓦斯突出基本都发生在地质构造附近^[10-14]。

从大地构造的角度分析不难说明我国为何是一个煤与瓦斯突出事故多发的国家。我国大陆及近邻海域位于欧亚板块的南部,东南与太平洋板块(菲律宾板块)相接,西南与印度洋板块相连。我国大陆及陆缘海域以塔里木-华北板块、华南板块(包含扬子板块、华夏板块)和滇藏板块为主体,并包括了天山-兴蒙造山系、秦祁昆造山系以及印度板块和菲律宾板块的一部分,这些板块经 4 次拼接而成。我国大陆主要煤田经受了多期次、多方向、强度较大的改造,其构造复杂程度远超过北美、澳大利亚、印度、俄罗斯地台轻微变形的煤田。我国大陆板块特性、构造演化及特性决定了我国煤与瓦斯突出多发^[57-59]。

我国突出矿区分布与区域构造特征有显著关系,主要分布于板块结合带、隆起造山带、挤压断裂带、逆冲推覆带和岩浆侵入带等。从地区而言,华南地区强于华北地区,再是东北和西北地区。

华北地区瓦斯分布、煤与瓦斯突出煤田分布受构造影响有如下规律:位于华北陆块北缘板块结合带,是以挤压作用为主的燕、辽高瓦斯区,西从包头,经下花园、北票、承德,东到辽宁红阳、通化等,均为高瓦斯和煤与瓦斯突出煤田;位于鄂尔多斯西缘逆冲推覆构造带的桌子山、贺兰山为高瓦斯带,汝箕沟、石嘴山都是高瓦斯煤田,也是煤与瓦斯突出煤田,在太行山隆起带分布的太行山东麓高瓦斯带焦作、鹤壁、安阳,西缘的阳泉-晋城高瓦斯带,如阳泉、左权、潞安、晋城等,且许多矿井为煤与瓦斯突出矿井;受华北陆块南缘板块结合带影响的平顶山煤田和淮南煤田均为煤与瓦斯突出煤田,平顶山煤田表现为 NWW-SEE 向展布的褶皱和断裂构造,淮南煤田表现为近东西向的褶皱和断裂构造,与华北陆块南缘板块结合带展布是一致的。沿下辽河和华北裂陷盆地分布的开滦、蓟玉、蔚县、邢台、邯郸均为低瓦斯煤田,如邢台煤田,主要表现为张性断裂组合而成的地堑构造。位于汾渭地堑附近的汾西、霍县等均为低瓦斯煤田^[2]。

华南地区瓦斯分布、煤与瓦斯突出煤田的分布受构造影响有如下规律:位于横断山脉与梵净山脉之间的滇东、黔西、川南一带,两侧分别遭受特提斯构造域和古华夏构造域的对挤作用,南面受印支陆块北推,北面受上扬子陆块的制约,形成芙蓉、南桐、松藻、桐梓、贵阳、六枝、水城、盘江、恩洪等煤与瓦斯突出煤田;位于湘中南褶皱系和武功-诸广褶皱带的西北侧和南部的赣、湘、粤、桂东地区,自海西早期到印支期处于拗陷状态,后期处于沉降、挤压状态,形成萍乡、杨桥、花鼓山、英岗岭、丰城、乐平、茶醴、涟邵、兴全、西湾、白沙、永来、马田、袁家、华塘、盐湖、梅田、南岭、曲仁、连阳、广花、高要、阳春、茂名、赣南、宁都、于都、饶南等高瓦斯煤田或煤与瓦斯突出煤田,该区是华南地区煤与瓦斯突出最严重的地区^[2]。

东北地区瓦斯分布、煤与瓦斯突出煤田的分布受构造影响有如下规律:以大兴安岭为界可以分成西侧为内蒙古东部大兴安岭低瓦斯区,煤层埋藏浅、盖层薄、煤化程度低;东侧,从松辽拗陷到鸡西、双鸭山、鹤岗和延边和龙,岩浆活动剧烈频繁,煤化程度高,加之郯庐断裂

的分支敦化-密山断裂大规模左行推覆,张广才岭、长白山均属于燕山期的挤压、隆起带(新华夏系第三隆起带),形成阜新、辽源、抚顺、长春、鸡西、双鸭山等煤与瓦斯突出煤田,形成延边和龙、营城等煤、岩与二氧化碳突出矿区^[2]。

西北地区,西界和北界为国境线,东界为贺兰山、六盘山,南界为昆仑山、秦岭,属于天山-兴安活动带、昆仑-秦岭活动带和塔里木陆块大地构造区域。主要有早、中侏罗世煤系地层,主要为低变质烟煤,煤层瓦斯生成条件较差。中、新生代以来,由于受西伯利亚板块、印度板块南北挤压,地势隆起,造成煤层埋深小,瓦斯保存较差。

区域地质构造的差异影响着煤与瓦斯突出危险性差异。贺兰山-龙门山、太行山-武陵山、天山-赤峰及萍乡-郴州等陡变带是煤与瓦斯突出的敏感地带;华北板块北缘板块结合带、鄂尔多斯西缘逆冲推覆构造带、太行山隆起带、华北板块南缘龙首山-固始断裂带、华南地区华盖山断裂带、南丹-紫云断裂带、萍乡-郴州断裂带等区域为煤与瓦斯突出多发地带;在江南古陆与华夏古陆之间形成的湘桂、乐平-萍乡、浙西“S”形和反“S”形逆冲推覆构造带及大别山逆冲推覆构造带等也是煤与瓦斯突出多发地带;在华北板块南缘和华南板块北缘受东秦岭变形带和大别山变形带控制的强变形带也是煤与瓦斯突出多发地带^[2]。

向斜构造分为宽缓向斜、不对称向斜两种,断层发育情况又可再分为两种。如向斜翼部倾角越大且开放性断裂越发育,瓦斯就越易逸散;反之,就越有利于瓦斯的保存^[7]。

背斜构造分为对称背斜、不对称背斜和次级背斜等类型。对称背斜轴部瓦斯赋存往往较差,而向两翼及倾伏端方向瓦斯赋存逐渐变好。不对称背斜顶部多发育张性裂隙,而在缓翼有逆断层形成,造成陡翼顺层瓦斯逸散,而缓翼因受逆断层影响瓦斯保存较好。次级背斜瓦斯赋存一般较好^[7]。

褶皱-逆冲推覆构造分为褶皱推覆和逆冲推覆类型。其共同特征是有利于瓦斯的保存。逆冲推覆构造共生于单斜构造背景,逆冲断面同样是阻隔瓦斯逸散的良好构造界面,有利于瓦斯的大面积保存^[7]。

伸展构造分为单斜断块、断陷盆地和滑动构造等类型。我国断陷型含煤盆地多形成于中-新生代,同沉积盆缘断裂的发育往往导致煤层本身及上覆地层厚度巨大,其特点是以高角度正断层为主体,大都呈在断裂基础上发育起来的地垒、地堑、半地堑和复式断陷盆地等组合形式。其在总体上是瓦斯富集区,但瓦斯赋存存在不均匀性,瓦斯的连续性很差^[7]。

断裂运动伴随着构造运动而发生,断裂的类型对突出危险性有重要影响。压性、压扭性断层区域构造应力集中、煤层赋存急剧变化且形成破坏类型较大煤层,同时瓦斯保存条件较好,易发生煤与瓦斯突出。

(4) 煤与瓦斯突出与水文地质条件关系

在地下水活动比较强烈的地区,煤层瓦斯含量一般都比较小,矿井瓦斯涌出量也比较低;而地下水活动比较微弱的地区,煤层瓦斯含量一般比较大,矿井瓦斯涌出量也比较高。地下水活动强弱对矿井瓦斯涌出量的影响:一是由于地下水活动与岩层的孔隙和裂隙有关,而孔隙和裂隙的发育不仅有利于地下水活动,也有利于煤层瓦斯的排放;二是地下水进入煤层中并吸附在各类孔隙的表面,影响煤对瓦斯的吸附能力和吸附量,使煤层瓦斯含量降低。

水文地质是影响瓦斯赋存的一个重要因素,其概括为水力运移逸散控气作用、水力封闭控气作用和水力封堵控气作用^[7]。

水力运移逸散控气作用在断层发育地区较多。这种控气特征在我国分布广泛,在华北

地区,煤系下伏奥陶系含水层造成瓦斯逸散,如太行山东聚气带西侧、开滦目标区开平向斜东南翼、鲁西南和鲁西北地区等^[7]。

水力封闭控气作用在构造简单的宽缓向斜或单斜发育地区较多,断裂不发育。煤系地层含水层与上覆、下伏含水层基本无联系。地下水以静水压力、重力驱动方式流动,呈封闭状态,对瓦斯有封隔作用,如沁水盆地、淮南目标区、六盘水目标区等。这种水力封闭控气作用在我国分布广泛,有普遍的意义^[7]。

水力封堵控气作用在不对称向斜或单斜发育地区较多,地下水从露头接受补给,顺层由浅部向深部活动,对扩散瓦斯造成封堵,致使瓦斯富集。如开滦目标区开平向斜西北翼、大城目标区和离柳-三交目标区^[2]。

(5) 煤与瓦斯突出与岩浆侵入体关系

岩浆活动主要通过改变煤层煤质、热解生成瓦斯气体、岩墙对瓦斯封闭、岩浆侵入改变煤层赋存参数、煤体结构和受力状态等影响煤与瓦斯突出发生。

岩浆侵入作用可使煤的变质程度升高、将煤进行热解生成更多的瓦斯气体、局部受力积蓄弹性潜能、造成煤的结构破坏等。另外有时因侵入带裂隙增加,形成瓦斯逸散通道。

对岩浆活动起控制作用的构造破碎区域和对煤体有改造破坏作用的岩浆活动区域,都是发生煤与瓦斯突出的危险区域。不受岩浆侵入体影响的煤层,突出危险性小于受岩浆侵入体影响的煤层;侵入煤层或对煤层有影响的辉绿岩尖灭位置具有突出危险^[60]。

前人针对煤与瓦斯突出地质作用机理做了大量工作,形成了学科方向,解决了大量认识问题,总结了大量地质作用突出案例,形成了“构造逐级控制”、“地质动力区划”等学说,但仍有很多问题没有解决。

1.2.3 发展趋势

综上所述,前人针对煤与瓦斯突出地质作用机理已经做了大量工作,但仍有很多问题需要进一步深入研究,对煤与瓦斯突出地质作用机理给出一个合理的、定量的描述尚需时日。

关于煤与瓦斯突出地质作用机理研究,其主要的发展方向为:

(1) 随着现代数学、力学理论及物理模拟试验的发展,关于矿区、矿井的地质演化模拟,以及地质演化对煤与瓦斯突出的作用模拟将成为发展趋势之一。

(2) 从沉积环境演化、地质构造演化、热演化、生烃史等方面寻求煤与瓦斯突出地质作用机理。

(3) 从沉积环境演化、层序地层演化角度研究同一区域不同煤层煤与瓦斯突出危险性差异。

(4) 从地质作用机理角度完善煤与瓦斯突出“区域四位一体为主、局部四位一体为辅”的技术体系,完善矿区、矿井的突出危险性预测技术,为政府能源基地建设、矿区规划提供指导。

1.3 煤与瓦斯突出的地质作用机理研究内容、方法和思路

1.3.1 研究内容

煤与瓦斯突出的地质作用机理主要研究地质演化及特征对煤与瓦斯突出的影响和控制作用,属于地质、采矿、安全等学科的交叉研究,多学科交叉造成了研究内容的多样性和复