

瓦斯煤层 冲击地压 防治技术及应用

李忠华 潘一山 纪海汛 王海兵 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国家自然科学基金重大项目资助

国家科技支撑计划课题资助

国家自然科学基金青年项目资助

辽宁省创新团队项目资助

瓦斯煤层冲击地压 防治技术及应用

李忠华 潘一山 纪海汛 王海兵 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

序

煤矿安全生产受水、火、瓦斯、煤尘等诸多因素的影响。其中瓦斯突出和冲击地压都是煤矿重大灾害。发生在瓦斯煤层中的冲击地压是近年来才引起重视的矿山动力现象。与一般煤层冲击地压相比,由于瓦斯对煤体性质的影响较大,瓦斯煤层冲击地压发生机理更加复杂,预测与防治更加困难,且冲击地压发生时伴有大量瓦斯涌出,易于引起其他安全事故,因此其危害性更加严重。经现场调查发现,我国瓦斯煤层发生冲击地压的矿井已不在少数。目前对通常的冲击地压的发生机理已经有些基本认识,对其预测与防治已形成一些基本方法和技术。但迄今为止很少见到对瓦斯煤层冲击地压的发生机理、预测、防治进行系统专门的研究。“瓦斯煤层冲击地压防治技术及应用”一书的出版,填补了冲击地压研究中的一个空白,为预测与防治瓦斯煤层冲击地压提供了借鉴的途径。因此该书的编著具有一定的前瞻性和可操作性。

全书共设五章,合 20 余万字。在提出瓦斯煤层冲击地压问题后,科学地分析和总结了瓦斯煤层冲击地压发生的机理,认为瓦斯煤层在有效应力作用下,当局部有效应力超过峰值强度时,成为应变软化的非稳定介质,在采动影响下,因瓦斯与煤层耦合作用,使煤层变形系统处于非稳定平衡状态,进一步失稳而发生冲击地压。提出了以钻屑法为主、辅以数值模拟计算的瓦斯煤层冲击地压预测技术,确定了瓦斯煤层冲击地压危险指标及其工艺参数,有效地指导了冲击地压预测实践。通过研究瓦斯煤层注水的水气驱替过

程,确定了工艺参数,完善了瓦斯煤层冲击地压防治技术,是瓦斯煤层冲击地压的有效解危措施。

李忠华教授潜心研究矿山灾害力学近十年,在煤矿灾害防治理论和应用方面有较深造旨。潘一山教授研究矿山环境与灾害力学近三十年,在冲击地压、煤与瓦斯突出等煤矿灾害发生理论与防治方面有多项研究成果。纪海汛高工和王海兵高工都曾任阜矿集团高管,在煤矿灾害防治方面有丰富的现场经验。这次连袂创作,为煤矿灾害防治领域增光添彩,实在可喜可贺。我热切地期待着本书早日出版,并乐于推荐如上,是为序。

章梦涛

辽宁工程技术大学力学与工程学院

2008年12月1日

前 言

冲击地压是煤矿井下生产过程中发生的自然灾害之一。煤层冲击地压是矿井中最为普遍发生的冲击地压,也是研究最多的冲击地压,机理基本清楚。现有的预测、防治措施主要是针对煤层冲击地压进行研究,并且已在有关冲击地压安全开采规程中对冲击地压发生以及预测、防治措施做出规定。但迄今为止很少见到有关高瓦斯煤层冲击地压机理、预测、防治的专门论述。虽然过去在一些瓦斯矿井发生过不同程度的煤层冲击地压,但是都没有考虑煤层含有瓦斯而直接沿用一般冲击地压的预测防治措施,也没有考虑煤层瓦斯含量大、压力高的条件,对瓦斯煤层冲击地压发生的机理、预测、防治进行专门的研究。对于低瓦斯煤层,由于瓦斯含量低、压力小,可以忽略瓦斯作用。但是对高瓦斯煤层,瓦斯的影响和作用不能忽略。对于瓦斯煤层冲击地压,迄今为止还未见到有关的专门研究的报道和文献,是目前为止冲击地压研究的空白。为达到有效预测和防治瓦斯煤层冲击地压、保障高瓦斯煤层安全开采之目的,本书选择阜新矿区五龙矿、王营矿和海州立井为试验矿井,采用理论分析、实验室试验和现场实验相结合的研究方法,揭示了瓦斯煤层冲击地压发生机理,建立了瓦斯煤层冲击地压发生理论及其数学模型,提出了适合我国目前开采条件下的瓦斯煤层冲击地压预测与防治技术。

“瓦斯煤层冲击地压防治技术及应用”一书是在广泛参阅前人研究成果的基础上,根据作者多年来在冲击地压的理论研究成果与工程实践而完成的。

全书共分五章。第一章提出了瓦斯煤层冲击地压问题,总结了前人在瓦斯对煤力学性质的影响规律和冲击地压发生理论、预测与防治技术方面取得的研究成果。第二章介绍了矿井瓦斯的成因和含瓦斯煤的基本特性,阐述了瓦斯对煤力学性质的影响规律、瓦斯作用下煤体有效应力规律和煤层变形对瓦斯渗流的影响规律,建立了煤层瓦斯渗流方程。第三章揭示了瓦斯煤层冲击地压发生机理、冲击地压发生后的瓦斯涌出机理,阐述了瓦斯煤层冲击地压与煤和瓦斯突出的区别与联系,建立了瓦斯煤层冲击地压发生理论及其数学模型,对煤巷和采煤工作面冲击地压进行了解析分析。第四章考虑瓦斯的作用与影响,确定了瓦斯煤层钻屑量指标,讨论了相关参数对钻屑量指标的影响规律,并与不考虑瓦斯情况的钻屑量指标进行了对比分析,确定了钻屑法检测冲击地压危险的工艺参数,通过现场实施验证了其正确性和可行性。第五章分别应用单孔介质和双孔介质模型,建立了瓦斯煤层注水过程水气驱替理论。通过求解平面径向流水气驱替基本方程,得到了计算注水时间的解析式。对煤层注水防治瓦斯煤层冲击地压的可行性进行了研究,确定了瓦斯煤层注水防治冲击地压的工艺参数和过程,并通过现场实施进行了验证。

本书的出版得到国家自然科学基金重大项目(50490275)、国家科技支撑计划课题(2006BAK03B06)、国家自然科学基金青年项目(10502023)、辽宁省创新团队项目(2006T075)资助。

本书的编写,参阅了大量的国内外有关瓦斯运移和冲击地压方面的专业文献,谨向文献的作者表示感谢。特别感谢辽宁工程技术大学章梦涛教授的指导和帮助。衷心感谢辽宁工程技术大学力学与工程学院梁冰教授、王来贵教授、张永利教授、宋维源教授、李成全高工、崔乃鑫副教授的帮助和支持,感谢阜矿集团李跃丰高工、李革高工、王国成高工、王玉学高工在现场实验和实际应用方面所做的大量工作,同时感谢阜矿集团防冲办、五龙煤矿、恒大公

司、兴阜煤矿和国防工业出版社等单位对本书的出版给予的大力支持。

由于高瓦斯煤层冲击地压的研究涉及到从发生机理到预防技术等一系列问题，其中的理论分析十分复杂，本书的理论研究部分只通过初步分析得到了基本规律，预防技术中也只是对工艺参数进行了改进，没有做到优化，这些都有待今后进一步研究。由于作者水平有限，书中疏漏谬误之处在所难免，敬请读者不吝指正。

作 者

2008年8月20日

目 录

第一章 绪论	1
第一节 瓦斯煤层冲击地压问题的提出	1
第二节 国内外研究现状	2
一、关于瓦斯对煤力学性质的影响	2
二、关于煤层瓦斯运移理论	3
三、关于冲击地压发生理论	5
四、关于冲击地压预测与防治技术	8
第二章 煤层瓦斯运移理论	11
第一节 矿井瓦斯的成因	11
第二节 含瓦斯煤的基本特性	13
一、煤的孔隙和裂隙结构	13
二、煤的渗透性能	15
三、煤对瓦斯的吸附和解吸性能	15
四、煤的变形和强度特性	19
第三节 瓦斯对煤力学性质的影响规律	20
第四节 瓦斯作用下煤体有效应力规律	28
第五节 煤层变形对瓦斯渗流的影响规律	32
第六节 煤层瓦斯渗流方程	35
第三章 瓦斯煤层冲击地压发生理论	40
第一节 瓦斯煤层冲击地压现象	40

一、五龙矿	41
二、王营矿	48
三、海州立井	53
四、冲击地压发生后的瓦斯涌出现象	56
第二节 瓦斯煤层冲击地压发生机理	57
第三节 瓦斯煤层冲击地压判别准则	59
第四节 冲击地压发生后瓦斯涌出机理	64
第五节 瓦斯煤层冲击地压与煤和瓦斯突出	65
第六节 瓦斯煤层冲击地压发生理论数学模型	68
第七节 煤巷冲击地压的解析分析	71
第八节 采煤工作面冲击地压的解析分析	81
第四章 瓦斯煤层冲击地压预测技术	96
第一节 冲击地压预测技术	96
第二节 瓦斯煤层钻屑量指标	101
第三节 钻屑法的应用步骤	112
第四节 钻屑法预测冲击地压危险的工艺参数	113
第五节 预测技术的实际应用	114
一、五龙矿	114
二、王营矿	118
三、海州立井	119
第六节 瓦斯煤层冲击地压危险区域划分	123
第五章 瓦斯煤层冲击地压防治技术	127
第一节 冲击地压防治方法综述	127
第二节 煤层注水防治冲击地压机理	128
一、煤样浸水性试验	129
二、瓦斯煤层注水的可行性	135

第三节 瓦斯煤层注水过程中的水气驱替理论·····	140
一、水—气驱替的基本概念·····	140
二、瓦斯煤层注水时的流体流动及其基本方程·····	143
三、孔隙介质煤层注水水气驱替理论·····	146
四、双孔介质煤层注水水气驱替理论·····	155
第四节 瓦斯煤层注水工艺·····	165
第五节 瓦斯煤层注水的实际应用·····	171
一、五龙矿·····	171
二、王营矿·····	174
三、解危措施·····	174
第六节 瓦斯煤层冲击地压防治方案·····	176
一、防治冲击地压总体措施·····	176
二、防治冲击地压具体措施·····	177
三、冲击地压后瓦斯涌出防治措施·····	178
参考文献·····	180

第一章 绪 论

冲击地压是指矿井高应力区内煤体、岩体及断层在受外界扰动瞬间失稳时,释放出很大能量而引起的以猛烈震动和爆发式破坏为特征的矿山动力现象,是矿井的一大自然灾害。在煤矿部门比较普遍地将震级较高、释放能量大、足以造成巷道工作面破坏危及人身安全的地压称为冲击地压。冲击地压可能造成矿井巷道工作面破坏、顶板下沉、底板臃起、支架倒塌折断、设备颠覆损坏、其他生产设施也遭到破坏,还造成井下工作人员伤亡,严重时整个采场被摧毁,造成井毁人亡的悲剧,甚至波及地面,造成地震灾害。对于瓦斯矿井,冲击地压发生时会引起瓦斯大量涌出,发生瓦斯灾害。

本书主要介绍辽宁工程技术大学冲击地压课题组对瓦斯煤层冲击地压发生的机理、预测与防治技术方面的研究成果。

第一节 瓦斯煤层冲击地压问题的提出

经现场调查发现,我国瓦斯煤层发生冲击地压的矿井已不在少数。如抚顺龙凤矿、阜新王营矿、开滦唐山矿、新汶华丰矿等一些瓦斯矿井都发生过不同程度的煤层冲击地压。特别是在阜新五龙矿、王营矿、海州立井和抚顺老虎台矿,瓦斯煤层冲击地压经常发生。

目前对通常的冲击地压的发生机理已经有些基本认识,对其预测与防治已形成一些基本方法和技术。但迄今为止很少见到对瓦斯煤层冲击地压的发生机理、预测、防治进行系统专门的研究。

由于瓦斯对煤体性质的影响较大,瓦斯煤层冲击地压发生机理更加复杂,预测与防治更加困难,且冲击地压发生时伴有大量瓦斯涌出,易于造成其他安全事故。

虽然过去在一些瓦斯矿井发生过不同程度的煤层冲击地压,但是都没有考虑煤层含有瓦斯而直接沿用一般冲击地压的预测防治措施,也没有考虑煤层瓦斯含量大、压力高的条件,没有对瓦斯煤层冲击地压发生的机理、预测、防治进行专门的研究。所以,研究瓦斯煤层冲击地压发生机理和预测防治技术具有重要理论意义和应用价值。

现有的冲击地压预测与防治措施,绝大多数是针对煤体冲击地压而进行的研究,没有考虑煤层中瓦斯在冲击地压发生中的作用和对冲击地压预测、防治的影响。对于低瓦斯煤层,由于瓦斯含量低、压力小,可以忽略瓦斯作用,视为无瓦斯煤层还是可以适用的。但是对采深大的高瓦斯煤层,瓦斯的影响和作用不能忽略。对于高瓦斯煤层冲击地压,迄今为止还未见到有关的专门研究的报道和文献,是目前为止冲击地压研究的空白。

我国解放前及 20 世纪 50 年代建设的矿井开采已经接近或超过 50 年,进入了深部开采,60 年代建设的矿井也已或即将进入深部开采,原来非瓦斯和低瓦斯煤层也将成为高瓦斯煤层,冲击地压灾害也趋于严重。因此,瓦斯煤层冲击地压发生机理和预测防治技术的研究成为需要亟待解决的重要课题。

第二节 国内外研究现状

一、关于瓦斯对煤力学性质的影响

煤层中瓦斯含量的不同,其物理力学性质会发生明显的变化。因此瓦斯对煤的作用和影响属于活泼性流体对煤的作用。有关这方面的研究目前尚很少见。目前有关孔隙水对岩石的变形破坏及力学响应的影响研究较多。

Handin(1963)根据实验结果指出,对于不活泼孔隙流体煤岩体内部存在着连通的孔隙系统,则煤岩介质的变形破坏受有效应力的控制。

Brace(1965)提出,在低渗透率的情况下,煤岩介质的变形破坏受修正的有效应力支配,如果岩体中含有亲水矿物,即流体对于岩体为活泼流体,则岩体除流体孔隙压力作为其体积力的力学作用外,由于亲水矿物含水量的不同,还产生其他附加影响,如力学性质和力学响应都发生明显的变化,称为非力学作用。

Айруни 指出煤层瓦斯大部分被煤吸附,少部分以游离态存在于煤层孔隙中,或溶解于地下水中,在煤中瓦斯的主要成分以固态煤和瓦斯浆的形式存在。

氏平增之(1986)在围压不变的情况下做了不同氦气孔隙压力的三轴压缩试验,研究了孔隙压力与煤体强度的关系。

周世宁等(1988)对原煤样及拟煤样通过三轴压缩试验得到了煤体强度与孔隙压力和侧向压力间的关系的回归方程式。

赵阳升(1992)研究了不同围压、不同孔隙瓦斯压力对煤体强度和弹性模量的影响。

梁冰(1995)通过不同围压、不同孔隙压力下煤的三轴压缩试验结果,对煤体的力学变形破坏性质及力学响应的影响进行了分析,指出瓦斯对煤体的非力学作用和影响,主要来自于煤对瓦斯的吸附和解吸作用,瓦斯对煤的力学响应的影响,既有游离瓦斯压力的力学作用,又有煤对瓦斯的吸附和解吸而产生的非力学作用,二者共同作用下,煤体的力学性质(如峰值强度、残余强度、弹性模量等)发生改变。

二、关于煤层瓦斯运移理论

瓦斯在煤层中运移规律的研究已有 50 余年的历史。20 世纪 80 年代以后,煤层瓦斯开采取得了突破性进展。为了满足试井及储层模拟需要,对瓦斯在煤层中的运移规律进行了大量研究,但是迄今为止仍然停留在零散的、粗糙的、定性的研究水平上。

由于对瓦斯运移过程强调的不同,瓦斯运移规律有渗流模型、扩散模型、扩散渗流模型。90%以上的瓦斯被吸附在微孔内表面,它首先经历解吸过程,通过扩散进入煤介质缝隙成为渗流,目前已成为共识。

在我国普遍应用的是渗流模型,即将瓦斯在煤层中的运移认为是单纯渗流,有的学者从多场耦合对瓦斯运移规律进行研究,但也是认为瓦斯在煤层中运移只是单一的渗流。事实上,瓦斯解吸—扩散—渗流过程是三位一体、互为条件、互相联系、互相制约的连续过程。

1990年Kolesar等首先假设微孔内空间瓦斯浓度包括了被吸附的瓦斯量,推导出了描述瓦斯运移中解吸—扩散—渗流全过程的瓦斯(煤层气)运移规律的数学模型,可以采用拉普拉斯变换数值反演求解,用于煤层气开采储量模拟及试井分析,但没有考虑多场多相耦合;在考虑温度影响时以前所有的研究除认为瓦斯是单一渗流外,没有考虑瓦斯气体与煤固体骨架的热力参数的不同和两者间的热交换及水—煤层气两相流数学模型。特别是在深部条件下受地压高的影响,煤层渗透率降低,出现了非牛顿流体性质,同时高温、高压引起黏度的改变而使黏度不再为常数。

当前普遍认为煤层瓦斯运移首先经历解吸,离开微孔内表面后进入微孔中,通过扩散进入微裂隙形成渗流的全过程,是分别通过试验煤对瓦斯有吸附解吸作用,和煤粒间瓦斯以扩散形式散发得到的结论,并没有得到实验的验证,至于解吸—扩散—渗流三者怎样互为条件、互相约束、互相联系的,煤的孔隙、裂隙结构对解吸、扩散和渗流影响,即瓦斯在煤层中运移全过程以及影响因素,都由于过去无损检测和显示技术方面的困难,无法通过实验的观测进行研究。近年来由于相关科学技术的发展,情况得到了改观,有了核磁共振成像仪(MRI),可以对瓦斯在煤层中运移进行实验观测研究。它可以检测多孔介质结构特性,也可以检测孔隙流体的物理特性和流动参数。中国科学院渗流力学所在1999年购进了一台核磁共振成像仪,并已应用于石油、天然气岩层中运移和水

驱、聚合物驱的实验研究,取得了很好的效果。

三、关于冲击地压发生理论

1738 年英国南斯塔福(South Stanford)煤田发生了世界上首例冲击地压,现在已发生冲击地压的有南非、德国、英国、俄罗斯等 20 多个国家。

我国最早发生冲击地压的矿井是抚顺胜利矿,时间是 1933 年。近几年我国已有近百座矿井发生了冲击地压。

1915 年南非成立了专门的冲击地压研究机构,标志着冲击地压研究的开始。冲击地压发生理论主要有强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向性理论和变形系统失稳理论。

根据冲击地压是煤岩突然破坏的大量事例,早期的冲击地压理论认为,冲击地压是煤岩局部应力超过强度而发生的,这一理论称为冲击地压的强度理论。强度理论解释了冲击地压的一些现象,但是对于地下煤岩体,由于应力集中引起局部应力超过强度极限是随处可见的,也是不可避免的,如采煤工作面、巷道和煤柱等,但并没有都发生冲击地压,强度理论无法解释这些事实。

Cook 等对金矿冲击地压提出了纯弹性方法,比较了没有洞室和有洞室时,在重力作用下,储存于矿层上方和下方岩石中的总弹性能,二者能量之差称为能量释放量。如在采矿过程期间,能量释放的增加率超过材料的能量耗散能力,即认为将引发冲击地压,这一理论被称为能量理论。能量理论可以解释一些现象,但它把煤岩体看成纯弹性的,不符合冲击地压是煤岩体破坏的事实。

Bieniawski 等通过室内煤的应力应变试验结果,同时结合现场调查发现,相同地质和开采条件下,煤层是否发生冲击地压有很大差异,他们认为是煤岩固有力学性质差异造成的,将煤岩的这种固有性质称为冲击倾向性,并提出了两个冲击倾向性指标:弹性能指数和冲击能量指数。认为当这两个冲击倾向性指标大于某个值时,就会发生冲击地压,这一理论称为冲击倾向性理论。至今煤炭部门还在沿用这一指标,并制定了标准。

但是,大量的现场调查表明,具有相同冲击倾向性的煤层,甚至同一煤层,只有少数区域发生冲击地压,大多数区域不发生冲击地压。而且许多属于强冲击倾向性的煤层并不发生冲击地压,而某些冲击倾向性很弱或无冲击性的煤层却发生了冲击地压,可见冲击倾向性理论的不足。

Cook 认识到矿柱冲击地压是一个结构失稳问题,随后在普通试验机上对大理岩进行压缩时,与大理岩试件并联一个铜管以加大试验机刚度。实验发现若试验机刚度大于试件后期变形区刚度时,大理岩在达到峰值强度后不发生突然破坏。若试验机刚度小于试件后期变形刚度时,则发生突然的失稳破坏。对于井下矿柱与围岩关系,可比拟为试件与试验机关系,所以矿柱冲击地压的发生条件可以利用试件在试验机上发生突然破坏的刚度比较条件,这一理论称为刚度理论。刚度理论只在矿柱冲击地压情况下较适用,对于巷道和采场等其他冲击地压情况刚度比较很难进行,而且即使是矿柱情况,对于多个矿柱时刚度也很难计算。

章梦涛等提出冲击地压是煤岩的一种材料失稳破坏现象,认为受应力集中影响煤岩局部应力超过峰值强度变成应变软化材料,当处于非稳定状态时,遇扰发生冲击地压。这一理论称为失稳理论。

近 30 年来,随着数学力学方法在冲击地压研究中的应用,利用非线性动力学、断裂力学、损伤力学、分形几何学、突变和混沌等理论方法,为冲击地压发生机理的研究开辟了新途径,取得了大量的成果,但新的理论体系尚未形成。

周瑞忠、李广平、刘小明、彭祝等分别采用损伤力学和断裂力学方法定性解释了一些冲击地压现象。

谢和平在微震事件分布的基础上利用损伤力学、分形几何学对冲击地压的发生机理进行分析。

潘一山、王来贵等采用分形几何学提出了用煤体振动方法控制冲击地压的机理。

缪协兴等利用断裂力学原理,建立了岩(煤)壁中滑移裂纹扩

展的冲击地压模型。

周晓军、鲜学福以黏弹性本构模型和微元统计损伤本构模型对煤岩体变形失稳的条件进行了研究。

谭云亮、宋维源、朱清安等根据非线性科学理论,对冲击地压的发生机理进行研究,提出了较为准确的预报冲击地压发生方法。

潘一山等采用突变理论模型定性解释了冲击地压发生机理。潘岳采用突变理论分析了断层冲击地压问题。

齐庆新等提出了煤岩体结构破坏的“三因素”准则。徐思朋等研究了冲击地压的时间效应。

实际上,上述这些理论都是相互关联的。“三准则”理论是对强度理论、刚度理论和能量理论的综合;变形系统失稳理论是对强度理论、刚度理论和能量理论的更深入总结和发展。用这两种理论可以对冲击地压发生的条件进行数值模拟。但“三准则”理论不具备可操作性,变形系统失稳理论在必要条件上还不够具体;突变理论本质上也是对能量理论、强度理论和刚度理论的进一步发展,但对冲击地压发生的充要条件还解释不够;分形理论只是一种可预测性和相关性的研究,尚未上升到机理上的认识;“三因素”理论不是独立的理论,是对冲击倾向性理论和能量理论的综合与发展。

综上所述,在目前的各种理论当中,强度理论、能量理论和冲击倾向性理论是根本性的理论,其余的均是这三种理论的总结和发展。

煤层冲击地压是冲击地压中最常见和最普遍发生的,也是研究最多的冲击地压类型。对煤层冲击地压的研究迄今为止均很少甚至没有涉及煤层瓦斯对冲击地压发生的作用。即使是在瓦斯煤层冲击地压的预测防治研究中,也未能提及瓦斯对于煤层冲击地压发生的作用和影响,即煤层冲击地压发生机理还有待研究。特别是随采深增加,煤层瓦斯含量增加,许多浅部瓦斯含量很少的煤层也将成为高瓦斯煤层。因而进入深部开采后不仅冲击地压灾害增多,而且瓦斯煤层冲击地压也开始增多。由此可见,瓦斯煤层冲