

国家自然科学基金项目 (51374096)

煤炭安全生产河南省协同创新中心

共同资助

含瓦斯煤动态破坏 致灾机理及防治技术

HANWASIMEI DONGTAI POHUAI ZHIZAI JILI JI FANGZHI JISHU

袁瑞甫 著



煤炭工业出版社

国家自然科学基金项目 (51374096)

共同资助

煤炭安全生产河南省协同创新中心

含瓦斯煤动态破坏致灾机理 及防治技术

袁瑞甫 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

含瓦斯煤动态破坏致灾机理及防治技术 / 袁瑞甫著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2016

ISBN 978 - 7 - 5020 - 5291 - 1

I. ①含… II. ①袁… III. ①瓦斯煤层—灾害防治 IV. ①TD823.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 121026 号

含瓦斯煤动态破坏致灾机理及防治技术

著 者 袁瑞甫
责任编辑 尹忠昌
编 辑 王 晨
责任校对 邢蕾严
封面设计 盛世华光

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 北京市郑庄宏伟印刷厂
经 销 全国新华书店



开 本 880mm × 1230mm¹/₃₂ 印张 10⁵/₈ 字数 251 千字
版 次 2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷
社内编号 8148 定价 30.00 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、系统地阐述了含瓦斯煤破坏的危害性、危害性评价和危险性区域划分、模拟实验、力学机理分析等内容,介绍了平顶山矿区开采条件对动力灾害影响的特征分析,并从现场监测结果和实验室数据两个方面制定了煤岩瓦斯动力灾害防治技术及工程措施。

本书可供从事煤岩动力灾害、冲击矿压、煤与瓦斯共采等研究与实践的科学工作者、高校师生、工程技术人员参考使用。

前 言

含瓦斯煤破坏引发的煤矿动力现象,是煤炭开采过程中一种复杂的工程诱发灾害,是煤矿安全生产和矿业发展亟待解决的重大问题。随着矿井开采规模和深度的逐年增加,煤层瓦斯含量和地应力增大,煤炭开采强度大幅度提高,开采扰动影响更为强烈,煤岩瓦斯动力灾害的强度和危害也愈加突出。

由于含瓦斯煤自身特性及动力现象发生机制的复杂性,人们对煤岩瓦斯动力灾害的认识仍然处于定性阶段,对动力灾害发生的许多方面还不能做出科学、全面、完整的解释。由于受人力、物力和安全等因素的制约,含瓦斯煤动态破坏的现场测试工作往往受到限制。因此,以物理模拟实验、数值计算及理论分析为手段深入分析含瓦斯煤动态破坏的机理,确定动力灾害的类型、发生条件及显现特征,对于深入理解煤岩瓦斯动力灾害的发生机制并进而指导现场采取相应的防治措施具有重要的理论意义和工程实用价值。

为此,本书作者设计了煤岩瓦斯动力灾害模拟实验系统,实现了对应力—瓦斯压力—煤体强度三因素不同组合条件下含瓦斯煤动态破坏的相似模拟,记录实验过程中应力、瓦斯、声发射、破坏强度等关键参数。以瓦斯压力、垂直应力、煤体强度作为主要影响因素,确定各因素实验水平,利用正交实验方法设计了实验方案。实验研究表明:模拟实验结果很好地再现了含瓦斯煤动态破坏的全过程,得到了不同因素水平下含瓦斯煤岩的破坏

特征。应用 RFPA^{2D} - Flow 数值模拟软件对含瓦斯煤岩破坏诱发压出、突出及复合型动力现象的裂隙萌生、扩展、贯通到抛出、发展、终止的全过程进行了系统的模拟研究,分析了地应力、瓦斯压力以及煤体力学性质等综合作用下诱发煤岩动态破裂过程中应力场、变形场、渗流场的演化过程。通过各因素水平不同组合的模拟计算,得到了不同煤体强度下,诱发煤岩动力灾害发生的瓦斯、应力组合关系。

基于 Drucker - Prage 强度准则,引入有效应力理论,修正了含瓦斯煤岩的强度准则,建立了含瓦斯煤岩失稳破坏的“理想条件”判据。经模拟实验和数值计算验证,认为以“理想条件”下突出的判据来判断含瓦斯煤岩是否存在潜在动力灾害危险具有重要意义。依据矿压理论、瓦斯渗流原理分析了有卸压带(瓦斯压力释放)保护范围时突出的发生条件及判据。详细研究了中硬质煤复合型动力灾害的发生机理、破坏过程和发生条件。

以平顶山矿区为实例,分析了平顶山矿区发生复合动力灾害区域的煤体结构、围岩条件及开采技术条件,在综合指标法的基础上,引入瓦斯参数及煤岩冲击倾向参数,建立了复合型动力灾害区域划分指标体系,并以此为依据对典型复合动力灾害矿井进行了危险区域划分。探讨了导致复合型动力灾害发生的基本条件,并依据前述理论研究成果,建立了复合型动力灾害预测指标体系,提出了区域措施以保护层开采为主,局部措施以卸压增透为主的复合型动力灾害防治技术体系。

著 者

2016 年 3 月

目次

1	绪论	1
1.1	含瓦斯煤动态破坏的危害	1
1.2	含瓦斯煤动态破坏的研究现状	9
2	含瓦斯煤动态破坏模拟实验	21
2.1	实验设备研制	23
2.2	型煤强度及瓦斯吸附性能实验	33
2.3	实验方案及过程	55
3	含瓦斯煤岩固气耦合模型及数值模拟	82
3.1	含瓦斯煤岩动态破坏固气耦合模型	82
3.2	数值模拟实验及结果分析	94
4	含瓦斯煤动态破坏力学机理分析	124
4.1	含瓦斯煤破坏的条件	124
4.2	突出的终止	148
5	平顶山矿区瓦斯动力现象特征分析	155
5.1	煤岩瓦斯动力灾害发生概况	155
5.2	瓦斯动力灾害的分布规律	159
5.3	动力灾害的影响因素分析	237

5.4 小结	250
6 煤岩瓦斯复合型动力灾害危险区域划分	252
6.1 动力灾害危险区域划分的原则	252
6.2 判断危险区域指标的确定	254
6.3 各煤层危险区域划分的案例	264
6.4 小结	276
7 煤岩瓦斯动力灾害防治技术及工程措施	277
7.1 动力灾害防治工程概述	277
7.2 动力灾害主要防治措施及应用效果	281
参考文献	321

1 绪 论

1.1 含瓦斯煤动态破坏的危害

煤炭形成过程中会伴生大量以 CH_4 为主的烃类气体，俗称瓦斯或煤层气。瓦斯的形成、存储和释放一直伴随着整个成煤过程，如图 1-1 所示。在漫长的地质年代中，随着含煤地层经受各种构造运动，瓦斯也在不断地运动和释放，仅有部分还保留在煤层和岩层中。

虽然煤层瓦斯（煤层气）是一种清洁可利用的能源，但瓦斯气体可利用能量的密度远低于煤层，目前绝大多数的矿区以煤炭为主要资源进行开采，煤层瓦斯一般作为次要资源抽采利用。

煤层开采时，滞留在煤层中的瓦斯随煤层开采的扰动而不断地释放出来，对矿井的安全生产造成危害，主要体现在三个方面：①瓦斯爆炸，如图 1-2 所示；②引发煤岩瓦斯动力灾害，如图 1-3 所示；③瓦斯窒息。由于瓦斯事故会显著改变矿井的空气环境，消耗或稀释矿井空气中的氧气含量，因此瓦斯事故常造成重大人员伤亡。这也是煤矿的自然安全生产条件普遍低于其他类矿井的主要原因之一。

进入 21 世纪以来，我国煤矿的生产条件、政策环境和技术发展都出现了很大变化，对瓦斯治理和管控的力度更加严格，瓦斯爆炸事故显著下降。相对来讲，含瓦斯煤的动力灾害已成为影响煤矿安全形势持续好转的主要灾害事故。表 1-1

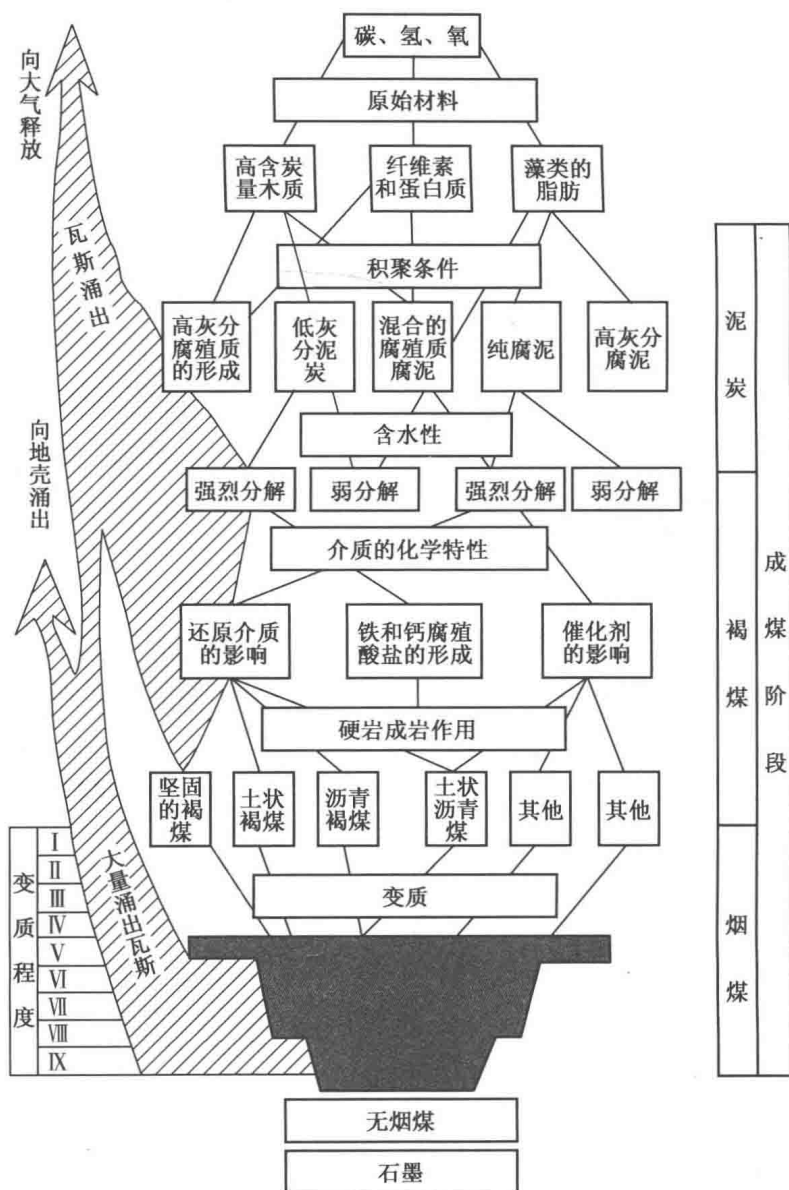


图 1-1 煤及瓦斯形成示意图



(a) 地面瓦斯爆炸演示



(b) 井下瓦斯爆炸波及地表

图 1-2 煤矿瓦斯爆炸



(a) 郑煤大平煤矿突出现场



(b) 平煤十二矿煤层冲击现场

图 1-3 煤岩瓦斯动力灾害

表 1-1 2008—2010 年全国瓦斯事故统计

年 份	瓦 斯 事 故		煤与瓦斯突出事故		突出事故所占比例/%	
	事故起数	死亡人数	事故起数	死亡人数	事故起数	死亡人数
2008	63	290	25	120	39.9	41.4
2009	61	573	20	236	38.2	41.2
2010	65	419	27	218	41.5	52.0

统计了 2008—2010 年全国瓦斯事故，煤与瓦斯突出等动力灾害事故占到了较大比例。2010 年全国煤矿共发生 65 起较大以上瓦斯死亡事故，死亡 419 人，其中煤与瓦斯突出等动力灾害事故 27 起，死亡 218 人，分别占 41.5% 和 52.0%。

随着矿井开采规模和深度的逐年增加，煤层瓦斯含量和地应力增大，煤矿的生产强度大幅度提高，开采扰动影响更为强烈，煤岩瓦斯动力灾害将更为严重。多年来，对煤与瓦斯突出、冲击地压等动力灾害的研究取得了一些重要成果，使得人们对煤岩瓦斯动力灾害的机理有了较为清楚的认识。但总体来看，由于含瓦斯煤自身特性及动力现象发生机制的复杂性，人们对动力灾害的认识仍然处于定性阶段，对动力灾害发生的许多方面还不能做出科学、全面、完整的解释。

1.1.1 煤与瓦斯突出

煤（岩）与瓦斯突出是在地应力和瓦斯压力的共同作用下，破碎的煤、岩和瓦斯由煤体或岩体内突然向采掘空间抛出的异常的动力现象。突出发生时能够在很短的时间里由煤体向采掘空间喷出大量的瓦斯及碎煤，在煤体中留下类似椭圆形状的空洞，突出冲击波会造成较强的动力效应，如冲倒矿车、冲坏支架、伤害作业人员等。煤和瓦斯突出时，粉煤可能充填数百米长的巷道，喷出的瓦斯粉煤流有时带有暴风般的性质，可以逆风流充满数千米长的巷道。

经过长期的理论研究和实践，我国已经形成了较为完善的煤与瓦斯突出防治体系。然而由于对突出的机理还不能做出完整的解释，现有预测指标和防治措施大多依据现场经验，缺乏理论依据。例如，《防治煤与瓦斯突出规定》中规定，依据煤层最大瓦斯压力、煤的破坏类型、瓦斯放散初速度和煤的坚固性系数 4 个单项指标对煤层是否具有突出危险进行鉴定，并给

出了具体的临界值,见表1-2,全部4个指标达到或超过临界值时,定为突出煤层。而现场实例表明,许多矿区开采时都出现过在不满足其中的某个或某几个指标而发生突出的现象,即所谓的低指标突出。又如,《防治煤与瓦斯突出规定》要求突出煤层工作面应保留的最小超前距,煤巷掘进工作面为5 m (图1-4),采煤工作面为3 m,虽然大多数情况下保留这个范围的卸压带能够抵抗突出,但显然更合理的保护带范围应与瓦斯压力、煤层力学性质、开采深度的不同而有所调整,而不是任何突出煤层都采用同一个指标。

表1-2 突出煤层鉴定的单项指标临界值

煤 层	破坏类型	瓦斯放散初速度 Δp	坚固性系数 f	瓦斯压力 (相对 压力) P/MPa
临界值	Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ	≥ 10	≤ 0.5	≥ 0.74

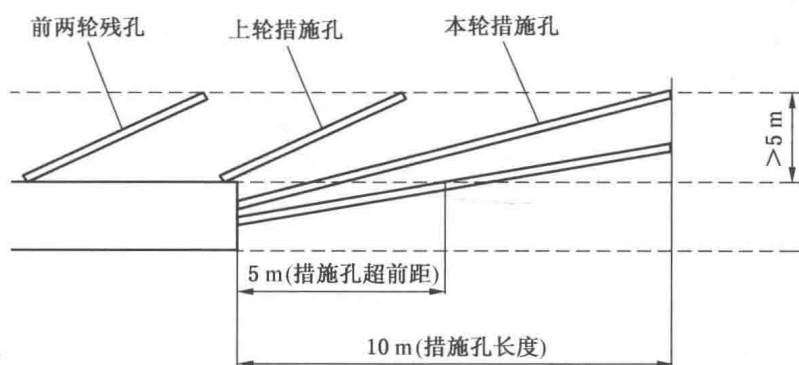


图1-4 掘进防突措施超前钻孔布置

根据现场统计资料和实验室研究,人们得到了解释煤与瓦

斯突出机理的许多假说，这些假说只能对某些现象给予解释，还不能形成完整的突出理论。作者认为，煤与瓦斯突出理论的研究应能够较完整地解释以下问题：①煤与瓦斯突出发生的条件；②形成煤与瓦斯突出的能量来源；③为何突出的瓦斯远多于突出煤本身的瓦斯含量；④突出为何停止。

1.1.2 高瓦斯煤层冲击地压

冲击地压是井巷或工作面周围岩体，由于弹性变形能的瞬时释放而产生突然剧烈破坏的动力现象。常伴有煤岩体抛出、巨响及气浪等现象。它破坏矿山工程、损坏生产设备、威胁人身安全，是矿山的一大灾害。由于冲击地压一般发生在硬质煤层，煤岩因应力调整而积聚的弹性能是冲击地压发生的主要能量，一直以来，大多研究者认为瓦斯作用对冲击地压的影响可以不予考虑。

我国煤矿全部为瓦斯矿井。其中，国有大中型煤矿 50% 以上为高瓦斯矿井，随着开采深度的增加，原来一些非瓦斯和低瓦斯煤层也成为高瓦斯煤层，地应力、瓦斯含量的增加，使冲击地压灾害也更趋于严重，一些中硬质煤甚至软煤也存在冲击地压现象。近几年发生的一些冲击地压现象表明，当煤层中瓦斯含量和瓦斯压力较大时，瓦斯对煤体性质及动力灾害发生的影响明显，瓦斯作用对冲击地压的影响已不能完全忽略。

目前对常规的冲击地压发生机理已经有些基本认识，冲击地压灾害的预测与防治已形成一套较完整的技术体系。但这些都没有考虑煤层瓦斯作用的影响，没有针对瓦斯含量大、压力高条件下的冲击地压发生机理、预测、防治进行专门的研究。

事实上，含瓦斯煤属于气—固两相介质，实验表明，瓦斯含量较多时，煤体强度降低，发生失稳破坏的可能性增大，就容易诱发动力灾害发生，降低冲击地压发生的阈值。同时，由

于瓦斯内能的增加,发生冲击地压时,瓦斯能量释放及其对煤岩的破坏作用也将导致冲击地压能量的增加,使灾害加重。因此,高瓦斯煤层冲击地压应从瓦斯内能、煤岩体变形储能与释放,以及相互间的物理力学作用等方面进行综合考虑。

1.1.3 复合型动力灾害

煤层冲击地压和煤与瓦斯突出是煤矿最典型的两种动力灾害。冲击地压的能量来源主要为煤岩体的弹性能释放,一般发生在较坚硬煤岩中,煤与瓦斯突出则以煤层中瓦斯内能释放为主,绝大部分发生在有构造软煤存在的煤层中。因此,这两种动力灾害一般很少在同一矿井中发生。

进入深部开采,矿井的开采环境发生了显著变化,出现了高地应力、高瓦斯、高非均质性、低渗透性的复杂现象交织的情况,矿井动力灾害的危险性越来越大。有些矿井出现了煤与瓦斯突出和冲击地压两种动力灾害并存的现象,而且两者间相互作用,互为诱因,使得煤矿动力灾害更为复杂和严重。德国的莱茵—维斯特法尔矿区(1926)、哈乌斯克矿井(1955)和鲁尔矿区(1981)曾报道过冲击地压伴随瓦斯异常涌出的案例,并曾提出了冲击地压与瓦斯涌出是否存在相互诱发关系的质疑。近几年,我国也发生多起冲击地压与瓦斯异常涌出并存的动力现象,如辽宁抚顺老虎台煤矿在采深超过700 m以后,常出现矿震后瓦斯大量涌出,其中2002年发生的10次2级以上矿震,有9次伴随着瓦斯大量涌出。图1-5所示为2002年10月7日 $M_L3.2$ 级矿震事件前后瓦斯浓度记录曲线。辽宁阜新矿区的高瓦斯矿井进入深部开采后,也常发生冲击地压伴随瓦斯突出现象,如孙家湾煤矿2005年2月14日由冲击地压引发瓦斯大量异常涌出,造成瓦斯爆炸事故,五龙煤矿、王营煤矿、海州立井等也有多次伴随瓦斯突出的煤岩动力灾害记录。

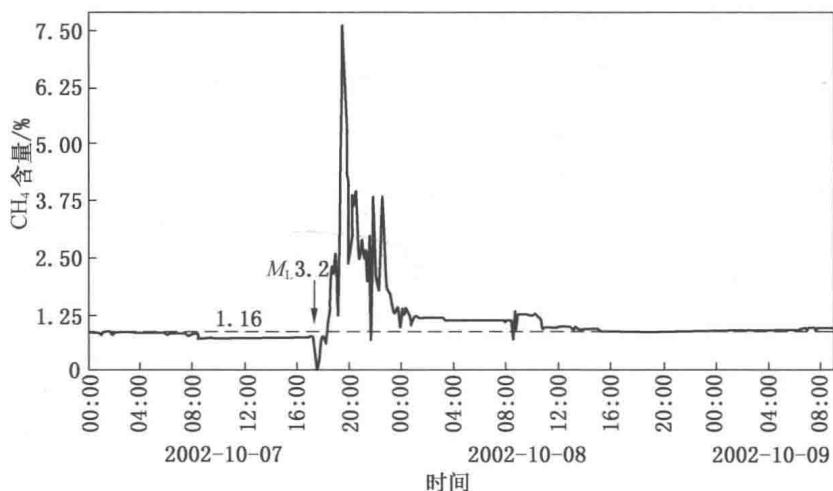


图 1-5 抚顺老虎台煤矿 2002 年 10 月 7 日 $M_1 3.2$ 级
矿震事件前后瓦斯浓度记录曲线

在河南省平顶山矿区，大多数国有煤矿采深已接近或超过 1000 m，近几年发生过多次冲击地压诱发突出的复合型动力灾害，如平煤十二矿三水平回风下山（埋深 1100 m）、己₁₅-31010 机巷（埋深 1025 m）掘进中，发生两次“以冲击地压为主的煤与瓦斯突出”；十矿己₁₅₋₁₆-24110 采煤工作面，2007 年 11 月 12 日在埋深 880 ~ 1039 m 处发生一起冲击地压诱导的煤与瓦斯突出，突出煤量 2000 t，突出瓦斯量 40000 m³，造成 12 人死亡。

因此，瓦斯突出与冲击地压互为诱因的复合型动力灾害，成为深部高瓦斯矿井又一重大安全隐患。显然，与由一种能量主导型的动力灾害（冲击或突出）不同，复合型动力灾害受

两种能量影响,两种现象可能互为诱因,互相影响而导致动力灾害发生的“阈值”比单一型下降,强度比单一型灾害增加。

上面所述的煤与瓦斯突出、高瓦斯煤层冲击地压、复合型动力灾害等从力学的角度看其基础都是一致的,都是含瓦斯煤岩系统在外界干扰下发生动态失稳破坏,都涉及气—固耦合作用下气体的流动和煤岩体的变形与破裂问题,而含瓦斯煤动态破坏机理的理论和实验是研究煤矿动力灾害的理论基础。

1.2 含瓦斯煤动态破坏的研究现状

由于煤与瓦斯突出和冲击地压是目前在我国的许多煤矿开采中所面临的一个严峻的问题,而复合型动力灾害仅在少数矿井发生过,对其进行全面深入研究的成果还不多见,因此,本部分主要对煤与瓦斯突出理论和冲击地压理论的研究现状作简要的回顾。

1.2.1 煤与瓦斯突出理论的研究现状

自1843年法国鲁阿尔煤田以萨克煤矿发生世界上第一次有记载的突出现象以来,世界各国的研究者为了认识突出的机理付出了艰辛的努力。人们通过对煤矿生产实践中突出现场的观察和实验室实验的研究,逐步认识到煤与瓦斯突出是瓦斯、地应力及煤岩体的力学性质或其中的某一因素起主导作用所导致的,并提出了许多有关煤与瓦斯突出机理的假说,这些假说基本也归为瓦斯主导作用假说、地压为主导作用的假说、化学本质假说、综合作用假说四类,目前大部分学者都倾向于综合治理作用假说,因此其他假说的主要内容本文不再赘述。

综合治理作用假说最早在20世纪50年代初由苏联的Я·Э·聂克拉索夫斯基提出,认为煤与瓦斯突出是在地压和瓦斯的共同作用下发生的。А·А·斯柯钦斯基根据现场开采突出