

国家自然科学基金项目 (51304006) 资助

煤巷掘进过程中 煤与瓦斯突出机理研究

Meihang Juejin Guocheng Zhong Mei Yu Wasi Tuchu Jili Yanjiu

蔡 峰 / 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

金项目(51304006)资助

煤巷掘进过程中 煤与瓦斯突出机理研究

蔡 峰 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书从“力”的角度出发,利用理论与数值模拟的方法,对煤与瓦斯突出进行了深入的研究:描绘了掘进巷道周围特别是掘进头前方煤体内的应力分布规律,通过 LS-DYNA 数值模拟软件再现了煤与瓦斯突出的全过程,研究获得了煤与瓦斯突出过程中突出煤体质点的受力、运动规律,指出了煤与瓦斯突出的条件及实质,编制了针对井巷建模的 SPH 前处理软件。本研究成果与煤与瓦斯突出的“球壳失稳”机理基本吻合,为煤与瓦斯突出的预防提供了理论依据。

图书在版编目(CIP)数据

煤巷掘进过程中煤与瓦斯突出机理研究/蔡峰著. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2129 - 2

I. ①煤… II. ①蔡… III. ①煤突出—防治②瓦斯突出—防治 IV. ①TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第266650号

- 书 名 煤巷掘进过程中煤与瓦斯突出机理研究
著 者 蔡 峰
责任编辑 何 戈
责任校对 杜锦芝
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 787×960 1/16 印张 6.75 字数 128 千字
版次印次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷
定 价 22.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

能源工业是我国的基础产业。在我国的能源工业中,煤炭占我国一次能源生产和消费结构中的70%左右,预测到2050年仍将占50%以上。因此,煤炭在相当长的时期内仍将是我国的主要能源,保证煤炭工业持续、稳定、健康地发展是我国经济稳定快速增长的重要前提。

近年来煤矿瓦斯灾害事故频繁发生,就煤与瓦斯突出灾害而言,由于我国煤层埋藏深,赋存条件复杂,而且随着矿井的延伸和开采深度的增加,煤层的瓦斯压力、地应力随之增大,煤与瓦斯突出的危险性更加严重。因此,研究含瓦斯煤岩体弱面层崩裂演化机理,有利于含瓦斯突出煤层石门揭煤、煤巷掘过断层或软分层,解决煤与瓦斯突出防治技术的关键问题,具有重要的实际意义。同时,它还有重要的理论意义,因为它涉及固体力学、流体力学和热力学等理论问题。

大量试验研究结果表明,流体不仅对煤岩体的个别物理力学参数产生作用和影响,而且对固流耦合作用的本构关系有影响。但是固流耦合作用本构关系还是有待研究解决的问题,这也是研究固流耦合作用下煤岩体变形破坏规律的基础。煤和瓦斯突出是由固流耦合作用下煤体突然破坏引起的,同时也是建立突出发生理论的基础,因此建立完善而又合理的煤与瓦斯固流耦合作用的本构关系,是进一步研究煤与瓦斯突出发生机理及预防煤与瓦斯发生突出的基础。实践及试验均已证明,多数煤与瓦斯突出都是在煤体并非连续的情况下发生的,且许多情况下煤体也并非如假设的那样呈现各向同性。因此,在建立固流耦合失稳理论及失稳判据中,其内部的参数并非如假设的那样相互独立,而是以某种形式相互作用、相互影响的。

本书从“力”的角度出发,利用理论与数值模拟的方法,对煤与瓦斯突出进行了深入的研究:指出了煤与瓦斯突出的条件及实质,即煤与瓦斯突出是煤体力学强度、地应力、瓦斯压力综合作用的结果,其实质是地应力破坏煤体,煤体释放瓦斯,瓦斯使煤体裂隙扩张并使形成的煤壳失稳破坏,将原本具有一定支撑作用的表面破坏煤体撕开并抛向巷道,迫使应力峰移向煤体内部继续破坏后续煤体这样一个连续发展的过程;对现场煤与瓦斯突出主要影响因素的影响方式、影响结果进行了详细系统的分析;通过数值模拟分析,描绘了掘进巷道周围特别是

掘进头前方煤体内的应力分布规律,再现了煤与瓦斯突出的全过程,指出了煤与瓦斯突出过程中突出煤体质点的受力、运动规律;编制了针对井巷建模的 SPH 前处理软件。本研究成果与煤与瓦斯突出的“球壳失稳”机理基本吻合,为煤与瓦斯突出的预防提供了理论依据。

著 者

2013 年 5 月

目 录	
1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 煤与瓦斯突出的动力现象及特征	2
1.3 我国煤与瓦斯突出的特点及其主要影响因素	3
1.4 国内外煤与瓦斯突出机理研究现状	6
1.5 本书的研究课题以及研究内容	8
2 突出煤体的物理力学特性	10
2.1 突出煤体的形成及结构特性	10
2.2 突出煤体的渗透性	11
2.3 煤体的吸附特性	12
2.4 突出煤体的力学性质	13
2.5 煤岩的破裂类型及微观破裂机制	14
2.6 煤(岩)体的强度准则	15
2.7 煤(岩)体内裂纹的扩展	18
3 巷道周围突出煤体内应力分布规律的数值分析	21
3.1 大型有限元分析系统 ANSYS 软件和计算分析方法	21
3.2 掘进工作面的力学模型	22
3.3 计算模型的观测点和观测线定义	24
3.4 掘进工作面周围煤岩体内应力分布数值模拟结果及分析	25
4 突出发生的条件	39
4.1 煤岩体内力和能量的传递	39
4.2 煤层变形潜能	40
4.3 瓦斯压力抛出煤的可能性	41
5 SPH 前处理器的设计	48
5.1 系统设计的方法和原则	48

5.2	SPH-PRE 的分析设计	49
5.3	系统设计	51
5.4	SPH-PRE 的实现	55
5.5	人机界面	58
6	煤巷掘进过程中煤与瓦斯突出的数值模拟分析	59
6.1	显式动力分析软件 LS-DYNA	59
6.2	数值模拟的基本原理	60
6.3	计算模型及边界条件	62
6.4	数值模拟结果及分析	63
7	煤巷掘进过程中煤与瓦斯突出影响因素分析	70
7.1	煤与瓦斯突出过程的描述	70
7.2	现场煤与瓦斯突出的影响因素	73
7.3	地应力、瓦斯压力及煤体强度在突出过程中的作用	76
8	结论及展望	79
8.1	主要结论	79
8.2	展望	80
	附录 SPH 前处理器的 VB 源程序	81
	参考文献	98

1 绪论

1.1 引言

煤与瓦斯突出是煤矿井下生产中的一种自然灾害,它严重威胁着煤矿的安全生产。自从 1834 年 3 月 22 日在法国鲁阿雷煤田依萨克煤矿发生世界上首次煤与瓦斯突出事故以来的 170 余年间,已发生过煤与瓦斯突出的国家有法国、前苏联、波兰、日本、匈牙利、比利时、加拿大、澳大利亚、捷克、保加利亚、美国、英国、土耳其、德国、荷兰、印度、罗马尼亚、前南斯拉夫和中国等 20 多个国家和地区^[1-5]。据截至 1981 年年底的不完全统计,各国发生煤与瓦斯突出的次数之总和已达到 3 万余次,其中突出强度最大的一次是 1969 年 7 月 13 日在前苏联顿巴斯矿区加加林矿发生的煤与瓦斯突出,突出的煤量达 14 200 t,突出瓦斯为 25 万 m³^[1]。

据史料记载,我国的第一次煤与瓦斯突出于 1950 年 4 月 20 日发生在辽源矿务局富国矿的西二坑^[2]。此后,随着我国煤炭工业的迅猛发展,老矿井的开采深度愈来愈大,新矿井不断增多,突出矿井也日益增多,不仅突出次数大幅度增加,而且其突出强度也大大提高。截至 1981 年年底^[2-9],全国共有 205 个矿井发生了煤与瓦斯突出,其突出总数达 9 845 次,约占当时全世界突出总次数的三分之一,其中最大的一次突出于 1975 年 8 月 8 日发生在四川天府矿务局的三汇一矿,其突出煤量达 12 780 t,突出瓦斯达 140 万 m³,居世界第二位。

显然,我国煤与瓦斯突出无论从数量还是从规模上均居世界之首位,是世界上煤与瓦斯突出最为严重的国家之一^[2]。

我国煤与瓦斯突出的特点有:突出矿井分布面广,而且在部分地区还较为严重;突出分布于不同类型的煤层;突出矿井的始突深度不一;中小型突出占大多数,大强度突出次数也不少。在区域上的表现为:南北都有分布,但南强北弱。全国突出最为严重的是湖南省,到 1980 年年底已发生突出 3 421 次(约占全国总突出次数的三分之一),其中千吨以上的特大型突出 35 次(约占全国特大型突出的二分之一);四川和辽宁省的煤与瓦斯突出严重程度仅次于湖南省,据不完全统计^[3],四川省到 1983 年年底为止已发生突出 1 453 次,其中千吨以上特大型突出有 12 次,突出总煤量达 144 000 t,辽宁省的北票矿务局到 1984 年年底为

止已发生突出 1 558 次,其中千吨以上的特大型突出有 6 次之多,突出总煤量 69 562 t;山西省也是一个煤与瓦斯突出比较严重的省份,其突出主要集中在阳泉矿区,到 1983 年 7 月底止,全矿区共发生突出 1 037 次,最大突出强度 525 t;此外,河南、江西、黑龙江、广东、贵州等省份的煤与瓦斯突出也是比较严重的^{[2][6][9][10]}。

在突出煤层形成的地质年代上,南方主要发生在早石炭纪测水组,晚二叠纪龙潭组和晚三叠纪安源组的含煤地层中,北方则主要发生在早二叠纪山西组、侏罗纪北票组和晚侏罗纪城子河组的含煤地层中。在构造上,各种类型构造体系控制下的煤田都有突出分布,其中以华夏系和新华夏系构造控制下的煤田突出最为严重,而突出区并不位于构造活动(特别是剧烈活动)的地区,多数属于地台区,也常见有突出区位于复式褶皱中的短轴向斜区域内。由于煤与瓦斯突出能在一瞬间向采掘工作面喷出巨量煤与瓦斯流,不仅严重地摧毁巷道设施,毁坏通风系统,而且使附近区域的井巷全部充满瓦斯和煤粉,造成瓦斯窒息以致煤流埋人,甚至还会造成煤尘和瓦斯爆炸等严重后果。

近几年来,我国煤矿的安全生产形势日益严峻,煤矿安全事故层出不穷,80%以上都是瓦斯事故,造成了大量的人员伤亡和财产损失。因此,煤与瓦斯突出是对矿井生产的严重威胁,致力于煤与瓦斯突出机理、预测预报和预处理的理论以及方法的研究(特别是对预测预报的研究)就显得格外重要。

1.2 煤与瓦斯突出的动力现象及特征

煤与瓦斯突出是指煤与瓦斯(以甲烷为主的烃类气体)在一个很短的时间内突然连续地自煤壁抛向巷道空间所引起的动力现象。在煤与瓦斯突出过程中,抛出的煤体有的只有几吨、几十吨,有的则达几百吨,特大型的突出甚至高达几千吨以上,同时涌出大量的瓦斯充满整个巷道空间。根据目前的研究结果,引起煤与瓦斯突出的力有地应力和瓦斯压力,作用介质为软煤和瓦斯。煤与瓦斯突出的基本特征有^{[11][12]}:

(1) 抛出的固体物具有明显的气体搬运特征。在突出现场可以看到突出的煤和岩块从突出口搬至较远的地方,甚至拐了几个弯;煤、岩块的堆积角度小于自然安息角;堆积物中大的颗粒落在近处和下部,小的颗粒飘到远处并覆盖在突出物的上方,这种现象也称为分选性堆积。

(2) 突出物中呈现出明显的高压气体爆炸的特征。软煤被抛出后,由于其中的高压气体迅速膨胀,破碎煤体,因而突出物中含有大量极细的煤尘。有时候突出过程还对已抛出的软煤进行了重新固结和捣实,需要镐刨才能运走。

(3) 突出的孔洞具有一些特殊的形状。有的呈梨形、倒瓶形,口小腔大,孔洞的轴线往往沿煤层倾斜方向延伸或与倾斜方向成一不大的角度,突出孔洞的长度为几米到几十米。有时候则看不到突出孔洞,抛出煤体的地方充满了松散的碎煤。

(4) 突出过程中伴随有大量的瓦斯涌出。在突出过程中,抛出的煤量越大,涌出的瓦斯越多。当涌出的瓦斯量十分大时,瓦斯会逆着矿井的风流而行达几十米,甚至上千米,对矿井的通风系统和设施造成严重破坏。

1.3 我国煤与瓦斯突出的特点及其主要影响因素

我国的煤与瓦斯突出非常频繁,根据大量的突出统计资料,可以分析出我国煤与瓦斯突出的特点及其主要影响因素。

1.3.1 我国煤与瓦斯突出的特点

我国的煤与瓦斯突出具有如下主要特点:

(1) 突出矿井多,分布广泛。我国统配煤矿中有突出危险性的矿井占全国统配煤矿总数的 35% 左右,如果考虑到地方煤矿,则具突出危险性的矿井数及其所占的比率更高。从地区分布来看,全国的主要产煤省份及矿务局都有危险性矿井:南至广东、湖南,北至黑龙江;西起甘肃,东至安徽、江西^{[13][14]}。

(2) 南方的矿井突出危险性最大。从全国的突出强度、突出频度以及百万吨突出次数来看,突出最严重的为湖南、四川及江西,这些省份都不是我国的主要产煤省份,且多为二叠系薄煤层。上述情况尤以湖南及四川两省为突出,据不完全统计,湖南全省的煤矿共发生煤与瓦斯突出 4 000 次左右,占全国煤与瓦斯突出总次数的 30% 左右,其百万吨煤炭的突出次数比全国的平均数要高数十倍。原四川省川东重庆地区的二叠系煤田,上述问题亦很突出,全国最大的两次煤与瓦斯突出都发生在川东煤田,一次为天府矿务局三汇坝一矿,其突出强度仅次于前苏联的顿巴斯,居世界第二位,另一次突出强度居全国第二位的特大型突出则发生在南桐矿务局的鱼田堡矿,其突出强度为 8 765 t,涌出瓦斯达 $245 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。川东煤田发生的大型及特大型突出所占的比例,以及百万吨煤的突出次数充分说明了其突出危险程度。仅南桐矿务局便发生大型及特大型突出 21 次,百万吨煤的突出次数最低亦为 15 次左右,高者则达 30 次以上,均远远高于全国平均水平^[15-18]。

(3) 突出类型齐全。我国的突出类型齐全,包括突出、压出、倾出及喷出,从全国来看,煤与瓦斯突出次数占总突出次数的 45% 左右,压出及倾出次数占突

出总数的 25% 左右。各矿务局的突出情况亦有较大的差别,有的矿务局(红卫煤矿)以煤与瓦斯突出为主,有的矿务局(北票矿务局)则以突然倾出为主,而阳泉矿务局则以突出压出为主。南桐矿务局自 1955 年至 1990 年所发生的 1 182 次突出中,煤与瓦斯突出占 17% 左右,压出占 58% 左右,倾出约占 23%,而喷出仅占不足 2%^[19]。

从突出的物质来看,主要为煤与瓦斯突出,但有个别的岩石与瓦斯突出及煤与二氧化碳突出,不过其所占的比率很小,前者仅占突出总次数的 0.3%,后者所占的比率则更低。

(4) 突出次数多,突出强度大。突出次数及突出强度是衡量煤矿突出危险性的重要指标,与世界突出严重的国家相比,我国煤矿发生突出不仅次数多,而且突出强度大,尤以重庆地区的煤矿更为典型,其突出强度平均为 85 t/次,且大型及特大型突出所占的比率高,一般均占突出总次数的 1%~1.5%。至 1985 年我国已发生各类突出 12 000 余次,且 1 000 t 以上的特大型突出发生 70 多次,均列世界之首^{[12][20]}。

(5) 始突深度浅。我国煤与瓦斯突出的始突深度浅。许多突出严重的矿井,特别是湖南及四川、重庆的突出矿井始突深度多为 100 m 左右,突出深度最浅的白沙矿务局、郴州地区的罗卜安矿及邵阳地区的沙田煤矿,其始突深度仅为 50~80 m,南桐矿务局鱼田堡煤矿的始突深度为 74 m,湖南三五煤矿的始突深度亦为 75 m。突出深度亦表现在发生大型及特大型突出方面,全国约有一分之一的特大型突出发生在距地表 200 m 以内的深度,且发生特大型突出的最小深度仅为 95 m^{[21][22]}。

(6) 煤与瓦斯突出之前大多出现前兆现象,且突出愈严重,其前兆现象愈明显^{[23][24]}。

(7) 突出分布于不同的煤层。突出煤层赋存情况比较复杂:有煤层群,也有单一煤层;有急倾斜煤层,也有倾斜及缓倾斜煤层;有厚煤层,也有薄及中厚煤层。不少突出矿井所有可采煤层均为突出煤层,无保护层可采。因此,全国有半数矿井需采用本煤层的防治突出措施^[25]。

(8) 多数突出发生在煤巷,但揭石门突出强度最大。据统计,煤巷、上山及下山突出次数分别占总突出次数的 47.3%、24.9% 及 3.8%,石门揭煤的突出虽然只占总突出次数的 5.85%,但大型及特大型突出多发生在揭石门时,其平均突出强度比煤巷及上山要高 10 倍以上,且大型、特大型突出占揭石门突出次数比例相当高,比煤巷要高数十倍^{[26][27]}。

(9) 震动爆破引起的突出最多。在不同作用条件时,爆破引起的突出最多,占突出总次数的 55.67%,风镐及手镐作用时亦发生突出,且占相当大的

比例^{[28][29]}。

1.3.2 影响煤与瓦斯突出的主要因素

影响煤与瓦斯突出的因素非常多,亦非常复杂,既包括各种地质因素,亦包括各种非地质因素^[30]。

就地质因素来看,主要包括三个方面:煤田或煤层的地质构造条件及煤体结构特性;煤层中的瓦斯参数(主要包括煤层中的瓦斯压力、瓦斯含量及其封闭条件);矿区或煤层所处的地应力条件。在上述诸因素中,地质构造因素是影响煤与瓦斯突出的地质背景,煤与瓦斯则是发生煤与瓦斯突出的物质基础,而矿区或煤层所处的地应力状态则是发生煤与瓦斯突出的动力条件或力学条件。显然,煤与瓦斯突出是上述各种地质因素的综合效应,但这些因素并不是一定起同等的作用,其作用或影响程度随具体的情况而异。应该强调指出的是,上述影响煤与瓦斯突出的诸因素都与矿区或区域性的地质构造条件有关,煤田的地质构造或构造变形程度,乃至煤体的结构等固然与地质构造条件有直接的因果关系,且煤层中的瓦斯参数亦与矿区的地质构造运动有着密切的关系,它不但决定着煤的变质程度,从而决定或影响着煤层中的瓦斯生成量及瓦斯含量,而且决定着煤层中瓦斯的赋存条件或封闭条件,影响煤层中的瓦斯压力等。矿区的地应力特别是地质构造应力是地质构造运动的动力源,而地质构造变形的褶皱形态及其构造变形的程度则反映了地质构造应力场的方向及其强弱,显然,可以据此判断地质构造应力场的特性^[31]。研究矿区的地应力场及其特性,对有效地控制煤与瓦斯突出具有重要的意义^{[32][33]}。

工程实践表明,并非所有煤炭矿井均具有突出危险性,即便是对于突出矿井,亦并非整个矿区、所有煤层的不同部位均具同等的突出危险性,突出危险区的分布往往是不均衡的,常成区成带分布,且有一定的规律性,这种现象的产生并不是偶然的,总体上受各种地质因素的制约与控制^[34]。

影响煤与瓦斯突出的非地质因素主要是矿山开采的工程因素,如果说地质因素是产生煤与瓦斯突出的必然条件,矿山开采则是其充分条件。显而易见,如果不进行矿山开采就不存在煤与瓦斯突出的问题。在矿山开采过程中,其采矿方法、采煤工艺、顺序乃至某些具体的参数及施工方法均可能影响煤与瓦斯突出的发生,采掘工作面采用爆破诱导煤与瓦斯突出是一个典型的例子,且煤矿采掘工作面的突出亦多发生在爆破开挖之后不久。与地质因素不同,影响煤与瓦斯突出的工程因素可以进行人工控制,尽可能减少发生煤与瓦斯突出的危险程度,这是目前煤与瓦斯突出工程防治方面考虑较多的方面。利用保护层开采消除本层煤与瓦斯突出危险性是对煤与瓦斯突出实行工程治理的最好实例,目前在我

国已较广泛应用,其效果明显^{[35][36]}。

1.4 国内外煤与瓦斯突出机理研究现状

煤与瓦斯突出是一种复杂的自然现象,要防止突出带来的危害,必须了解和掌握这种自然灾害发生和发展的规律,以便采取正确的防治方法和措施。因此,自从1834年法国发生世界上第一次突出以来,人们就一直在研究煤与瓦斯突出是怎样发生的?这些问题统称为煤与瓦斯突出机理。特别是20世纪以来,人们从突出现场和实验室对突出进行了细致的观察,积累了成千上万次的突出记录,总结了历年来突出防治的成功经验与失败教训,提出了几十种关于突出机理的假说。归纳起来,主要有以下几种类型:

(1) 瓦斯作用说。这类假说认为煤体内储存的高压瓦斯是突出中起主要作用的因素。其代表有“瓦斯包说”,“粉煤带说”,“煤孔隙结构不均匀说”,等等。如“瓦斯包说”认为,在煤层中存在着瓦斯压力和瓦斯含量比邻近区域高得多的煤窝,也就是瓦斯包,其中煤体松软,孔隙与裂隙发育,具有较大的储存瓦斯的能力。这些煤体被透气性差的煤(岩)体所包围,一旦巷道揭开这些瓦斯包,在瓦斯压力的作用下,松软的煤体将被瓦斯破碎并抛出从而形成突出^[1]。

(2) 地应力作用说。这类假说认为,突出主要是高地应力作用的结果。这类假说的主要代表有“岩石变形潜能说”,“应力集中说”,“应力叠加说”,等等。当巷道接近储存有高构造应变能的岩层时,这些岩层将像弹簧一样伸张开来,将煤体破碎,引起煤与瓦斯突出^{[1][5]}。

(3) 综合作用假说。这一类假说认为突出是由地应力、瓦斯压力及煤的力学性质等因素综合作用的结果。这类假说由于全面地考虑了突出发生的作用力和介质两个方面的主要因素,得到了国内外大多数学者的普遍承认。在这类假说中,有代表性的是“振动说”^[37]、“分层分离说”^[38]、“游离瓦斯说”^[39]、“能量假说”^[40]及“应力分布不均匀说”,等等。

前苏联的彼图霍夫提出的“分层分离说”认为,突出是地压和瓦斯压力共同作用的结果,突出过程分为三个阶段^[41]。第一阶段是准备阶段,工作面附近的煤体在地压的作用下压缩,增加了瓦斯向巷道方向渗透的困难,促使煤体内保持有较高的瓦斯压力,煤体强度降低,煤柱易于从煤体内分离。第二阶段是颗粒分离波的传播阶段,在突出时,颗粒的分离过程是一层一层地进行的。当突出危险带急剧暴露时,由于瓦斯压力梯度作用使分层承受拉伸力,拉伸力大于分层的强度时,即发生分层从煤体上的分离^[42]。分层分离是一切突出的重要组成部分,影响着突出的主要特征,但并没有全面反映突出过程的多种形式。例如,分层分

离波绕过部分压碎带,通常决定于地压作用,伴随着声响激发此时暴露面上的分层分离。通常是重复的破坏组合,一部分是瓦斯参与下的分层分离而破坏,另一部分是地压破坏。在急倾斜煤层的某些部分,则在自身重力的作用下分离。总之,无论是在突出的准备阶段还是颗粒波的传播阶段,地压都是重要的。第三阶段是瓦斯和颗粒混合物的运动阶段,从煤体分离的煤颗粒和瓦斯急速冲向巷道,随着混合物的运动,瓦斯进一步膨胀,速度继续加快。当遇到阻碍时,速度降低而压力升高,直到增高的压力不能超过破坏条件,过程才停止^{[43][44]}。

在众多的综合作用假说中,不能不提到前苏联学者 B. B. 霍多特提出的“能量假说”^[10]。他认为,突出是煤体的变形潜能 W 与瓦斯内能 Q 突然释放所引起的在近工作面煤体的高速破碎^[45]。激发突出的第一个条件是:

$$\text{对于回采} \quad W + \vartheta > F + U$$

$$\text{对于掘进} \quad W > F + U$$

$$\text{对于石门揭煤} \quad W + Q > F + U$$

式中 W ——煤的变形潜能;

ϑ ——顶板岩石的动能;

Q ——煤体内游离瓦斯所含的内能;

F ——煤向巷道的移动功;

U ——煤体的破碎功。

激发突出的第二个条件是:

$$v_p > v_x$$

式中 v_p ——煤的破碎速度;

v_x ——煤裂隙中的瓦斯压力下降速度,取决于煤的裂隙性。

激发突出的第三个条件是要求煤破碎完成之后,瓦斯压力 p 应保持在比已破碎煤的抛出阻力更大的水平上,即:

$$p > \frac{m}{s} [g(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + a]$$

式中 s ——煤破碎区段的横截面积;

f ——煤沿某一表面移动时,该面的摩擦因数;

α ——煤沿某一表面移动时该面与水平面所成的倾角;

g ——重力加速度;

m ——煤的质量;

a ——为了把煤抛出必须给煤的加速度(惯性力);

$\pm$ ——煤移动方向向上时取“+”,向下时取“-”。

霍多特认为,只有当煤中的应力状态突然改变时,煤层才可能产生高速破

碎,下述原因可以引起煤中应力状态突然改变:

- ① 煤中坚硬区段或坚硬包裹体的承载能力以脆性破碎的形式消失了;
- ② 围岩作用于煤层的动载荷;
- ③ 爆破落煤时,巷道迅速进入煤层;
- ④ 爆破揭开煤层。

进入 20 世纪 80 年代,突出机理的研究有了新的发展。包尔申斯基等测得孔隙压力增长可使得煤样拉伸变形增加^[2]。郑哲敏就我国特大型突出实例所做的能量分析表明,突出煤层中瓦斯内能要比煤体的弹性潜能大一至三个数量级。氏平通过试验发现瓦斯压力梯度是导致煤体拉应变增高从而破坏的直接原因,而后他又首次用有限元方法分析了突然暴露面附近的有效应力场,证明瓦斯压力梯度增大可引起有效拉应力增加。Paterson 用有限元方法分析了由于二维渗流所造成的有效应力场^[1],得到了与氏平同样的结论。丁晓良进行了煤在瓦斯作用下的破坏与持续扩展的研究,认为突出的发生是煤体的破坏与瓦斯渗流耦合的结果^[46]。俞善炳首次建立了煤层暴露面外气固两相各以不同速度作一维运动,相间有质量运输的气相质量守恒与动量守恒方程^{[47][48]}。

1.5 本书的研究课题以及研究内容

1.5.1 课题的提出

煤与瓦斯突出是一种非常复杂的地质动力现象,它巨大的破坏作用迫使人们对其机理进行研究,同时,对煤与瓦斯突出机理的研究又推动了人们对突出这一复杂现象的认识,也为煤矿现场采取适当的措施提供了依据。

到目前为止,人们普遍接受了突出是地应力、瓦斯压力和煤体强度综合作用的结果,但是对于突出过程是如何发生和发展的还没有得出统一的认识。本书 1.4 节所述的各种假说都只能解释某些现场的突出现象。同时,对影响突出的因素认识亦仅处于直观定性认识阶段,或者虽有定量的指标只供定性应用,无法了解各种影响因素之间的相互联系及其在突出过程中的作用或影响程度。

煤与瓦斯突出通常是一种灾难性事故,因而无法通过现场测试,甚至很难得到突出时的参数,而只能通过突出后进行估算得到。同时,煤与瓦斯突出影响因素甚多,关系复杂,实验室相似材料模拟时,投资巨大且只能模拟出一些特定条件下的突出,而不具有一般性。

近年来,煤矿瓦斯事故层出不穷,安全问题日益严重,为了解决这一问题,科研工作者对于煤与瓦斯突出机理工作做了大量的实验室和现场研究工作。对于

瓦斯突出的机理有了一定的认识,但由于煤与瓦斯突出是一种受众多因素影响的非常复杂的特殊动力现象,虽然已经进行了大量、深入、系统的研究,从总体上来看,距离完全认识煤与瓦斯突出机理以及采取何种措施有效预防预测煤与瓦斯的突出还有相当大的距离。因而,有必要继续对煤与瓦斯突出机理作更深入的研究。

1.5.2 研究内容与思路

研究煤与瓦斯突出的机理,也就是要解释煤与瓦斯为什么会突出,突出的条件是什么,突出的过程是怎样的,突出的影响因素有哪些、影响作用方式是什么。为此,本书的研究内容及思路如下:

(1) 对突出煤体的物理及力学性质进行研究。研究突出煤体的渗透性、吸附性以及突出煤体的流变特性。对突出煤体力学性质进行研究,指出突出煤体的强度准则、破裂类型及微观破裂机制。

(2) 煤巷掘进过程中应力场分布特性研究。煤与瓦斯突出是一种复杂的动力现象,因而首先从力的角度着手,对应力场特别是煤巷掘进过程中掘进头前方煤体内的应力场进行分析。采用 ANSYS 隐式计算,分析出煤巷掘进过程中应力场的动态分布变化规律。

(3) 对瓦斯压力的作用进行研究。研究煤与瓦斯突出的可能性,特别是当煤体力学条件和地应力条件均满足的时候,瓦斯压力对煤与瓦斯突出影响的决定性作用。

(4) SPH—PRE 软件的设计。为了再现煤与瓦斯突出的全过程,采用 LS-DYNA 显式计算的 SPH 算法进行模拟。但是目前由于还没有对 SPH 粒子进行复杂几何边界条件下建模的工具,因而有必要设计一个 SPH 的前处理软件 SPH—PRE。

(5) 煤与瓦斯突出的数值模拟。采用 LS-DYNA 显式计算模拟煤与瓦斯突出,再现煤与瓦斯突出的全过程,分析突出过程中突出煤体的运动变化规律,找出影响煤与瓦斯突出的因素。

(6) 对现场影响煤与瓦斯突出的因素进行分析研究。研究现场实际生产过程中影响煤与瓦斯突出的因素,总结其影响规律,为防止煤与瓦斯突出的发生提供依据。

2 突出煤体的物理力学特性

2.1 突出煤体的形成及结构特性

煤是由植物的遗体变成的^[22]。在地质历史上,植物遗体在沼泽中微生物的作用下首先形成泥炭。由于地壳的运动,生成的泥炭层下降,被泥沙所覆盖,随着覆盖层的加厚,泥炭层逐渐被压,在以温度和压力为主的物理化学作用下,泥炭变成褐煤。在温度和压力的进一步作用下,褐煤又通过煤化变质作用形成烟煤和无烟煤。在这一系列的变质过程中,煤体有机质分解产生甲烷(CH_4)等气体^[49]。由于煤层是通过植物遗体沉积形成的沉积岩层,因此煤层均呈层状分布。简单的煤层中没有夹石层,一般多为薄煤层。复杂的煤层中则可能含有一到数层夹石层。在煤层的上部和下部,是煤层的顶板和底板岩石。

在煤层形成的过程中及形成后,地质构造运动不仅改变了煤层的原始产状,使煤层呈倾斜状态,而且引起了煤层厚度的变化^[50]。由于煤层本身强度较低,在构造应力的作用下,容易发生塑性流动,造成煤层局部加厚、变薄、尖灭等现象^{[51][52]}。

地质构造运动还使煤层产生褶曲,形成向斜和背斜构造。在褶曲的轴部,煤层增厚;在褶曲的翼部,煤层变薄乃至尖灭^[53]。较大规模的褶曲引起的煤层加厚和变薄具有一定的方向性,垂直压应力的方向,沿褶曲走向呈带状延伸,煤层加厚与变薄相伴出现。

有些煤田,伴随褶曲构造的变动,小型波状褶曲发育。煤层顶底板起伏不平,使煤层局部压薄或变厚。波状褶曲发育的地区,由于层间滑动的扭力作用,使煤层呈现串珠状或断续透镜体^[54]。

含煤地层在经受地质构造运动作用时,由于煤、岩层的力学性质不同,在同一应力场中,往往出现不同的变形:煤层的顶、底板岩层产生脆性断裂,而煤层则发生塑性流动,造成煤层的局部增厚和变薄。如果在地质构造应力的作用下,煤层受到挤压和搓揉,煤层层面会发生错动,也引起煤层结构发生变化。如果由这些构造运动引起的煤层结构变化发生在整个煤层,则整个煤层的强度降低;如果这些构造运动只影响煤层内的部分煤体,使部分煤体结构发生变化,则这一部分煤体称为软分层。在这些受构造运动影响的煤体中,煤层的原生结构遭到了破