

SHI MEN GE TUCHU DE

DONGLITEXING JI SHIYANYANJIU

石门揭煤 突出的动力特性及 试验研究

栗才全 著



煤炭工业出版社

石门揭煤突出的动力特性及 试 验 研 究

粟才全 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

石门揭煤突出的动力特性及试验研究 / 栗才全著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2012

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4041 - 3

I. ①石… II. ①栗… III. ①岩巷 - 揭煤 - 煤突出 - 研究
②岩巷 - 揭煤 - 瓦斯突出 - 研究 IV. ①TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 083959 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 880mm × 1230mm¹/₃₂ 印张 4³/₄

字数 118 千字

2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

社内编号 6864 定价 15.00 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

前 言

煤与瓦斯突出（简称突出）是煤矿井下含瓦斯的破坏媒体在极短时间内突然抛向采掘空间的一种十分复杂的动力现象，是煤矿中最严重的灾害之一。自1834年法国鲁阿尔煤田依萨克矿井发生了世界上有记载的第一次突出至今，共有20余个国家发生过煤与瓦斯突出，其中法国、苏联、波兰、日本、匈牙利等国家较为严重。随着我国煤炭工业的飞速发展，矿井数目和开采深度日益增加，突出危险性也日益增大。我国迄今累计突出次数约1.6万余次，占世界突出总次数的35%。

煤与瓦斯突出除造成大量的人员伤亡和财产损失外，还容易引起风流紊乱、短时逆转，以及瓦斯爆炸等许多次生灾害。煤与瓦斯突出严重地影响巷道掘进速度和采煤工作面的推进速度，给矿井的采掘正常接替带来了很大的困难。随着开采深度的增加、开采规模的扩大及高产高效新技术的应用，我国突出死亡事故日趋严重，使国家和人民的经济财产遭受了重大的损失，同时对井下工作人员的生命构成极大的威胁，影响了社会的稳定性。目前国内外在突出机理的研究、实验室模拟等方面取得了一定的成果，但是对于突出的诱因、过程及其中的一些细节等还不明确，有些现象无法解释，还有相当多的问题没有得到深入研究。

近年来，石门揭煤时突出现象越来越严重。由于石门揭煤是首次揭开煤层，在揭煤前，煤层中的瓦斯由于岩层的透气性差，煤层瓦斯得到较好保存，瓦斯压力大，一旦暴露，将有大量的瓦斯释放出来。因此，石门揭煤很容易发生突出，同时，一旦突出，其规模一般都比较较大。因此，石门揭煤过程中的安全性必须引起高度重视。

本书综合运用理论分析、数值模拟、试验台设计和突出试验

等多种方法,对石门揭煤过程中的突出问题进行了研究。

对采掘状态下煤体应力的状态进行归纳总结后认为,在石门揭煤时自重应力场是采动应力场的普遍影响因素,所得采动应力场的各应力分量不仅与原始应力分量的大小有关,而且与这些分量的比值有关;在相关研究成果的基础上进一步归纳总结,将石门揭煤突出划分为突出孕育、突出发动、突出发展和突出终止4个阶段,详细分析描述了4个阶段的应力、瓦斯压力等的发展变化情况,其中突出孕育阶段和突出发展阶段是持续的动态的变化过程,而突出的发动阶段和终止阶段是煤体受力失稳和平衡的突变点,是两个点过程;考虑煤层中地应力和原始瓦斯压力的影响,采用ANSYS软件模拟巷道的开挖,对石门揭煤问题进行数值模拟研究,通过对所得应力分布云图、应变分布云图、应变能分布云图进行分析,得出了石门揭煤过程中巷道围岩的应力场、应变场、能量的分布及其变化情况。

基于煤与瓦斯突出的综合作用假说,通过对石门揭煤突出过程的数值模拟分析,构建了石门揭煤的大型三维试验系统,进行了石门揭煤突出过程的试验。该系统设计主要包括:试验系统的整体设计、测点位置设计、箱体密封设计、瓦斯充气管路及氮气平衡管路设计、数据采集系统设计及液压系统设计等。待瓦斯充分吸附后,开始进行突出试验,并采用动态DH5923和静态DH3815数据采集系统对试验数据进行采集,得出了在石门揭煤突出过程中围岩的地应力、瓦斯压力等的变化情况。结合测点数据分析了突出过程中不同位置地应力、瓦斯压力等变化,以及在突出发生时受到突出影响的范围和程度,对煤与瓦斯突出的机理和突出灾害的防治具有一定的理论指导和现实意义。

本书以作者的博士论文为基础,结合多年从事煤矿现场安全生产管理的经验积累而成,是在导师宋振骥院士和程卫民教授两位老师的悉心指导下完成的,在此表示衷心感谢。

在本书的撰写过程中,山东科技大学的陈连军老师、王刚博士和周刚老师曾多次给予指导,感谢程国强教授、于立仁教授、

汤建泉经理、王伟主任、苏同营主任、张开智教授、辛嵩教授、曹庆贵教授、王海亮教授、刘伟韬教授在论文写作过程中给予的指导。感谢张清涛、张睿、孙路路、王毅、王海洋、张孝强等师弟在实验中付出的大量辛苦劳动和帮助。

由于作者学识水平有限，书中缺点和错误在所难免，不当之处欢迎读者批评斧正。

栗才全

二〇一二年五月

目 次

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究概况	3
1.3 研究存在的问题	17
1.4 研究内容、方法和技术路线	18
1.5 本章小结	20
2 采动应力场与瓦斯突出的关系研究	21
2.1 煤体的应力状态分析	22
2.2 自重应力场	30
2.3 构造应力场	37
2.4 采动应力场	42
2.5 石门揭煤突出的过程分析	45
2.6 本章小结	49
3 基于 ANSYS 软件的石门揭煤过程的数值分析	50
3.1 石门揭煤的有限元模型	51
3.2 模拟结果及分析	57
3.3 路径上参量的变化曲线	81
3.4 本章小结	85
4 石门揭煤突出试验系统的构建	87
4.1 试验准备	87
4.2 试验系统设计	89

4.3 试验流程分析	111
4.4 本章小结	112
5 石门揭煤突出时围岩的力学特性分析	114
5.1 石门揭煤突出试验过程及现象	114
5.2 试验数据分析	115
5.3 本章小结	127
6 研究结论及展望	129
6.1 研究结论	129
6.2 研究的创新点	132
6.3 研究展望	133
参考文献	134

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

我国迄今累计发生煤与瓦斯突出（简称突出）次数 16000 余次，占世界突出总次数的 35%。1975 年 8 月 8 日重庆市天府三汇矿一井 +280 m 水平主平硐揭 K₁ 煤层时发生的突出强度最大，突出煤量 12780 t，瓦斯 $140 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2000 年 7 月至 2010 年 12 月，我国共发生突出死亡事故 362 起，死亡 2105 人，见表 1-1。其中，一次死亡 1~2 人的事故

表 1-1 2000 年 7 月至 2010 年 12 月我国煤与瓦斯突出情况一览表

年份	死亡事故		重大事故		特重大事故		特别重大事故	
	事故 起数/起	死亡 人数/人	事故 起数/起	死亡 人数/人	事故 起数/起	死亡 人数/人	事故 起数/起	死亡 人数/人
2000			4	20	2	40		
2001	15	23	25	120	2	35		
2002	9	14	26	116	9	129	2	72
2003	30	47	33	147	5	69		
2004	12	20	25	110	4	53		
2005	17	22	19	86	3	49		
2006	2	3	28	119	9	117		
2007			23	108	7	108		
2008			25	124	6	86	1	37
2009			16	83	1	10	2	138
2010	1	2	15	83	2	36	1	44
合计	86	131	239	1116	50	732	6	291

86 起,死亡 131 人;一次死亡 3~9 人的重大事故 239 起,死亡 1116 人;一次死亡 10~29 人的特重大事故 50 起,死亡 732 人;一次死亡 30 人以上的特别重大事故 6 起,死亡 291 人。2010 年煤矿事故起数和死亡人数同比减少 213 起、198 人,分别下降了 13.2% 和 7.5%。全国煤矿瓦斯事故起数和死亡人数同比分别下降 7.6% 和 17.5%,其中,特别重大瓦斯事故起数和死亡人数同比分别下降 50% 和 70.9%。尽管煤矿瓦斯事故起数和死亡人数都有明显下降,但煤矿瓦斯防治工作依然严峻。2010 年 3 月 31 日 19 时 20 分,河南省洛阳市伊川县国民煤业公司发生一起特别重大煤与瓦斯突出事故,造成 44 人死亡、6 人下落不明,直接经济损失达 2728.4 万元。煤与瓦斯突出事故的多发性和严重性是我国煤矿安全生产所面临的极大挑战。

1.1.2 研究意义

我国以煤炭为能源消费主体,自 2000 年以来,煤炭占能源生产总量的比重维持在 73%~78%,占能源消费总量的比重维持在 68%~71% 之间。由于受煤炭开采价格、能源供给状况等因素的影响,我国在短期内不会改变以煤炭为能源消费主体的现状,煤炭仍将是非常重要的战略资源,在我国经济和社会发展中占有极其重要的地位。

在不同种类的井下巷道中,由于巷道类型不同,突出的条件不同,形成了各自不同的特点。表 1-2 中列出了一些矿区各类巷道突出强度及次数。从表中可以看出:突出的平均强度以石门揭煤最大,平巷次之,其他类型的巷道平均突出强度相对较小。据统计,石门揭煤突出的平均强度为其他各类巷道平均突出强度的 6 倍以上,80% 以上的千吨级及其以上特大型突出都发生在石门揭煤过程。

从国内外对煤与瓦斯突出的研究来看,大量学者进行了煤与瓦斯突出的模拟试验,取得了一定的成果,但是从模拟的范围和相似程度来看,都没有考虑煤层的顶底板对煤层突出时的影响,因此,有必要对煤与瓦斯突出过程进行一次试验研究:在前人研

表 1-2 一些矿区各类巷道突出情况统计表

地区	项 目	石门	平巷	上山	下山	回采	打钻
重庆地区	突出次数/次	54	240	131	5	127	38
	平均强度/(t·次 ⁻¹)	451	47	35.5	41.6	56.7	37.6
北票矿务局	突出次数/次	97	320	496	2	18	15
	平均强度/(t·次 ⁻¹)	138	34.5	24.3	11	60	6.2
红卫煤矿	突出次数/次	13	116	33	9	27	13
	平均强度/(t·次 ⁻¹)	1090	93.3	40.5	14.9	32.8	13.3
六枝矿务局	突出次数/次	5	20	46	9	0	4
	平均强度/(t·次 ⁻¹)	1168	34	11	98	0	4
合计	突出次数/次	169	696	706	25	172	70
	平均强度/(t·次 ⁻¹)	342	42.5	32.8	49.8	53.3	24.4

究的基础上,考虑煤层顶底板对突出的影响。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 煤与瓦斯突出机理的研究现状

1. 国外研究现状

长期以来,世界各主要产煤国一直都很重视对煤与瓦斯突出机理的研究。许多国家都设立了专门的防突委员会和研究机构负责煤与瓦斯突出机理的研究工作。自 20 世纪 60 年代以来许多国家加强了相关的国际学术交流活动,研讨煤与瓦斯突出机理及其预测预报。通过采用突出实例的统计分析、实验室研究和现场观测的方法,对煤与瓦斯突出机理进行了广泛深入的研究,提出了各种关于突出机理的假说,包括瓦斯主导作用说、地应力主导作用说、煤质主导作用说、综合作用说等。其中,前 3 种假说可以归为单因素假说;综合作用说认为突出是地应力、煤层瓦斯及煤的物理力学性质综合作用的结果,它考虑了突出发生的作用力和介质两个方面的主要因素,获得了国内外多数学者的普遍认可。

1) 瓦斯主导作用说

这类假说认为煤体内储存的高压瓦斯是破坏工作面和高压瓦斯之间煤体的主要因素，主要有以下 10 种假说。

瓦斯包说认为煤层内存在积聚高压瓦斯的空洞，其压力超过煤层强度减弱地区煤的强度极限，当工作面接近这种瓦斯包时，煤壁会发生破坏并抛出煤炭。

粉煤带说认为突出时的粉煤原来就存在煤层中，因地质构造作用，把煤粉碎成粉状，当含有瓦斯时，这些粉煤像流体一样，较小的瓦斯压力就能引起突出。

突出波说认为瓦斯潜能要比煤的弹性变形潜能大 10 余倍，当巷道接近煤强度低的地区时，在瓦斯作用下可产生连续破碎煤体的突出波。

煤透气性不均匀说认为煤层中有透气性变化剧烈的区域，在其边缘瓦斯流动速度变化很大，如透气性小的恰好是坚硬的煤，而透气性大的则是硬度较低的煤，那么当巷道接近这两种煤的边界时，瓦斯的潜能就能将煤喷出。

瓦斯膨胀说认为煤层中存在瓦斯含量增高带，因而引起煤体的膨胀应力增高，此处煤层透气性接近于零，当巷道掘进时，其应力急剧降低，造成煤的破碎和突出。

裂缝堵塞说认为由于均匀排放瓦斯的裂缝系统被封闭和堵塞，在煤层中形成增高的瓦斯压力带，从而引起突出。

瓦斯解吸说认为卸压时煤的微孔隙扩张，孔隙吸附潜能降低，吸附瓦斯的内能转化为游离瓦斯压力，使瓦斯压力升高，破坏硬度较低的煤而引起突出。

闭合孔隙瓦斯释放说认为近工作面地带，由于煤吸收和解吸瓦斯的周期性使其强度降低，包含在闭合孔隙中的瓦斯在孔隙壁的闭合面和敞开面之间产生很大压力差，当煤体破坏时，便被解吸瓦斯抛向巷道。

火山瓦斯说认为由于火山活动，煤受到二次热力变质，产生热力变质瓦斯和岩浆瓦斯，从而在煤层内形成高压瓦斯区，在这

些地带进行采掘工作时即能引起突出。

瓦斯—煤固溶体说认为处于未受采动影响的自然条件下的煤的有机物质是一种瓦斯—煤固溶体,其在支承压力带有可能形成具有增高瓦斯含量的次生固溶体,煤与瓦斯突出可以看做是瓦斯—煤固溶体的转化,固溶体的分解伴随着完整性破坏的形成和气态产物的涌出。

2) 地应力主导作用说

地应力主导假说认为在发生煤与瓦斯突出过程中起主导作用的是煤体应力,主要有以下 8 种假说。

岩石变形潜能说由苏联的别楚克、法国的莫连、加拿大的伊格那季耶夫和日本的外尾善次郎提出,认为含瓦斯煤体储存了大量的弹性势能,当工作面接近该区域时,高应力区的弹性势能释放使煤体发生破坏而发生突出。

集中应力说认为在采煤工作面前方的支承压力带,由于厚弹性顶板的悬顶和突然下沉引起附加应力,煤体受集中应力作用产生移动和破坏,导致突出。

塑性变形说认为在压应力作用下,煤层发生弹塑性变形,使巷道周围煤体破坏。

应力叠加说认为瓦斯突出是由于地质构造应力、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等叠加而引起的。

振动波动说认为突出过程的发展是外力振动引起煤体和围岩振动波动过程的发展,由于岩石的潜能和煤体的破坏而维持和发展了这一过程。

爆破突出说认为大多数瓦斯突出是由于爆破的应力作用而造成的。

冲击式移近说认为突出中起主导作用的是顶底板的冲击式移近,突出的条件是煤层紧张程度增大,煤层边缘有脆性破坏,从破坏的煤中涌出的瓦斯具有一定压力。

顶板位移不均匀说认为突出是由于煤层顶底板不规则和不连

续移动而引起的一种动力现象,并且突出发生在顶底板移近速度值增加又下降后。

3) 煤质主导作用说

煤质主导作用说即化学本质假说,认为煤质在煤与瓦斯突出过程中起主导作用,即煤体破坏时是否发生煤与瓦斯突出现象主要是由煤质决定的,主要有以下4种假说。

“爆炸的煤”说认为由于煤的变质在爆炸性转化的物质(“爆炸的煤”)的介稳区能呈现连锁反应过程,并迅速形成大量的二氧化碳和瓦斯,从而引起爆炸——煤与瓦斯突出。

重煤说认为煤在形成时有原子量为13的重碳及含有原子量为2的氢同位素的重水参加,形成煤的重同位素称为“重煤原子”,当进行采掘时,能发生突出。

地球化学说认为突出是以煤层中不断进行的地球化学过程为基础而形成的。

硝基化学物说认为突出煤中积蓄有硝基化合物,在较小的活化能量条件下,就能发生发热反应,其热量超过分子间活性能时,反应将加速进行并引起突出。

4) 综合作用说

20世纪50年代,苏联学者聂克拉索夫提出了地压和瓦斯综合作用说。苏联的A. A. 斯科钦斯基院士提出,突出是由地压、瓦斯、煤的物理力学性质、煤的重力等因素综合作用的结果。苏联的B. B. 霍多特在对煤样进行了大量试验的基础上用弹性力学的方法分析了突出过程,给出了突出的能量方程。巴普洛夫通过大量的突出现场观测后,提出了关于突出机理的应力分布不均匀说。这两种假说在综合作用说中最具代表性。

能量说认为突出是煤的变形潜能和瓦斯内能所引起的,在煤层应力状态发生突然变化时,潜能释放引起煤体快速破坏。煤层埋深、瓦斯压力、瓦斯含量、煤的强度等是突出激发和发展的主要因素,采矿因素也有一定的影响。该假说认为无论是游离瓦斯,还是吸附瓦斯都参与突出的发展。瓦斯对煤体主要有3方面

的作用：全面压缩煤的骨架，增加煤的强度；吸附在微孔表面的瓦斯对微孔起楔子作用，同时降低煤的强度；存在瓦斯压力梯度，引起作用于梯度方向的力。突出过程可分为3个阶段：在静、动载荷作用下煤的破碎，在煤变形潜能和瓦斯压力作用下煤的移动，瓦斯由已破碎的煤中解吸、膨胀并带出悬浮于瓦斯流中的煤。发生煤与瓦斯的突出条件，即可能造成突出或破碎的条件为

$$W + \lambda = A$$

$$W = \frac{1}{2E}\sigma^2$$

$$\lambda = \frac{10^6 VRT}{22414(\theta - 1)} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\theta-1}{\theta}} \right]$$

式中

W ——煤的弹性潜能，J；

λ ——瓦斯膨胀能；

A ——煤破碎到突出物粉煤时的能量，J；

σ ——煤体的平均应力，MPa；

E ——煤的弹性模量，MPa；

V ——气体瓦斯量， m^3/t ；

R ——气体常数， $R = 8.29 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ；

T ——煤—瓦斯体系的绝对温度，K；

θ ——绝热系数，对于瓦斯 $\theta = 1.3$ ；

p_1 、 p_2 ——初始和最终的瓦斯压力，MPa。

应力分布不均匀说认为在突出煤层的围岩中具有较高的不均匀分布的应力，其主要原因是地质构造运动，个别情况下是由采掘过程引起的（如留煤柱、冒顶等）。该假说将掘进工作面前方煤层分为三个带：压出带、压缩带和未扰动带。由于煤体深部应力分布不均匀，就会产生围岩的不均匀移动，围岩位移减缓或“停滞”，从而建立了不稳定平衡状态。突出前，由于工作面的机械作用，破坏了围岩的不稳定平衡，引起围岩的移近和伸直，使含瓦斯的煤暴露和破碎。突出后，恢复了三个带，并且压出带

和压缩带的尺寸有些扩大。当煤体破坏时,在暴露面附近形成瓦斯压力梯度,引起很薄的分层分离并破坏,饱含瓦斯的分层又重新暴露,破坏过程反复进行,并以突出波的形式向深部传播,释放大量的瓦斯把碎煤抛出。

除能量说和应力分布不均匀说外,还主要有以下4种假说。

动力效应说认为掘进巷道时煤体的应力状态由三向变为双向或单向,煤结构遭到动力破坏,吸附瓦斯迅速解吸并大量涌出,释放出足够的能量把碎煤抛出,形成煤与瓦斯突出。

破坏区说认为突出首先必须破坏煤体,而煤体的破坏过程是一致的,在不均质煤内,各点强度不同,在高压作用下,由强度最小点先发生破坏,并在其周围造成应力集中,如邻点的强度小于这个集中应力,就会被破坏从而形成破坏区,此区内吸附的瓦斯由于煤破坏时释放的弹性能供给热量而解吸,瓦斯使得煤的内摩擦力下降,而变成易流动状态,瓦斯粉煤流喷出便形成突出。

分层分离说认为突出是地压和瓦斯共同作用的结果,当突出危险带煤体表面急剧暴露时,由于瓦斯压力梯度作用使分层承受拉伸力,拉伸力大于分层强度时,即发生分层从煤体上的分离,一部分是瓦斯参与下的分层分离而破坏,另外一部分是地压破坏,从煤体分离的煤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,速度加快,当其遇到阻碍时,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。

游离瓦斯压力说认为瓦斯是突出的主要因素,煤体内部游离瓦斯压力是发动突出的主要力量,解吸的吸附瓦斯仅参与突出煤的搬运过程,如果工作面在突出危险区逐渐推进,那么突出将不会发生,如果工作面前方的过载应力区的围岩突然变化,将可能导致突出的发生。

2. 国内研究现状

从20世纪60年代起,我国展开了对煤与瓦斯突出煤层的应力状态、瓦斯赋存状态、煤的物理力学性能等方面的研究,并根

据现场资料和试验研究对突出机理进行了探讨,提出了新的见解和观点。随着研究的深入及新手段的应用,目前已对突出发生的原因、条件、能量来源作出了定性的解释和近似的定量计算,为防治措施的选择及效果检验提供了理论依据,主要观点如下所述。

中国矿业大学蒋承林、俞启香提出球壳失稳假说。该假说认为,煤与瓦斯突出的实质是地应力破坏煤体,煤体释放瓦斯,瓦斯使煤体破裂扩张并使形成的煤壳失稳破坏,将原来具有一定支撑作用的表面破坏,煤体抛向巷道,迫使应力峰移向煤体内部继续破坏后续煤体这样一个联系发展的过程。

中心扩张学说认为煤与瓦斯突出是从距离工作面某处的中心开始,之后向周围扩展,由发动中心周围的煤—岩石—瓦斯体系提供能量并参与活动。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,突出发动中心就处在应力集中点,且该点向各个方向的发展是不均匀的,决定了煤与瓦斯突出沿煤分层发展和突出孔洞的特殊形状。

胡千庭等认为突出是一个力学破坏过程。通过对突出过程的分析,认为突出的发动是从工作面周围支承压力极限平衡区煤壁的失稳开始的,煤的应变软化与流变特性则是这种失稳的基础。突出的发展是煤壁由浅入深逐渐破坏并抛出的过程,煤体的破坏主要是在瓦斯压力作用下的拉伸破坏,突出的发动和发展存在较大差别。初始失稳条件、破坏的连续进行条件和能量条件是突出发生的三个必要条件。

何学秋、周世宁等提出了关于煤与瓦斯突出机理的流变假说。该假说认为瓦斯、地应力、煤的物理力学性质和时间过程是突出的重要影响因素。当采掘工作面前方的含瓦斯煤体所承受的外载荷等于或大于煤的屈服载荷时,煤体流变出现变形衰减阶段、均匀变形阶段和加速变形阶段。其中,变形衰减阶段和均匀变形阶段对应于煤与瓦斯突出的孕育阶段,加速变形阶段是煤与瓦斯突出的发生发展阶段。突出是含瓦斯煤体快速流变的结果。