



江苏省高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

重点研发计划资助项目 (BE2015040)

”国家科技支撑计划资助课题 (2012BAK09B01)

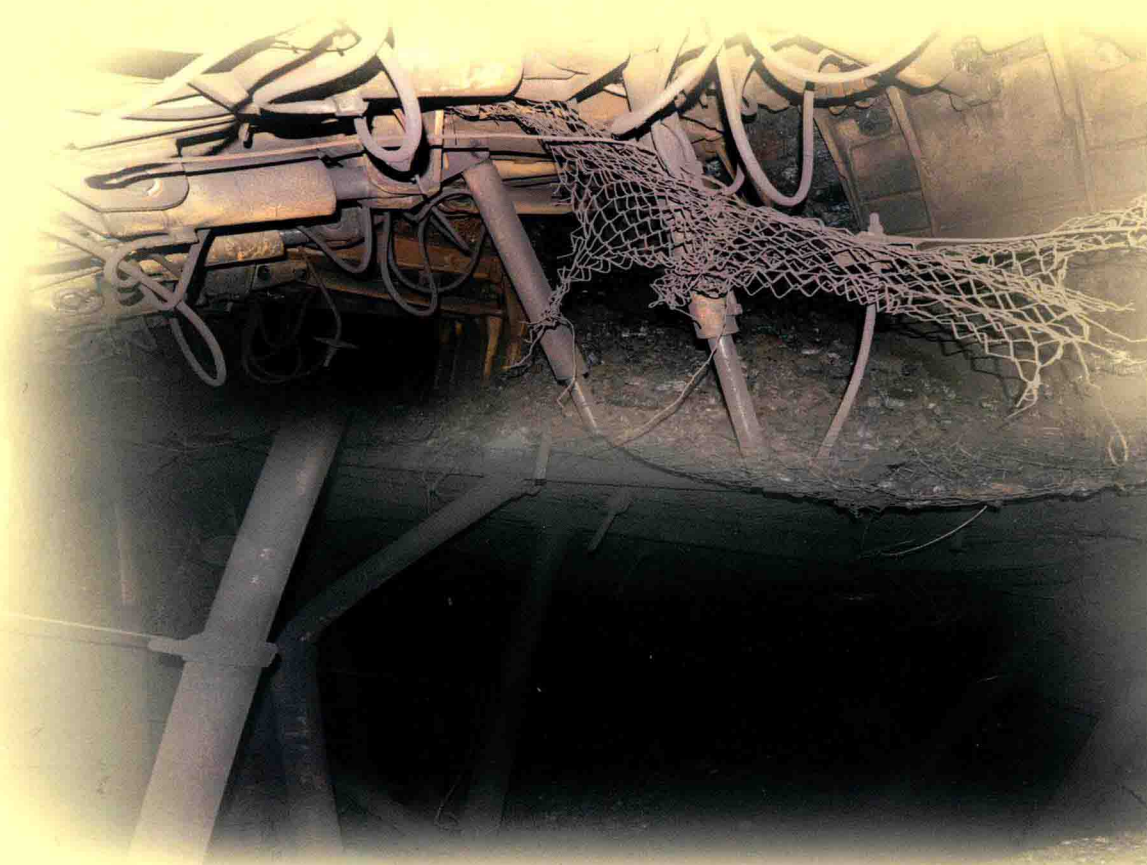
科学基金资助项目 (51104150, 51404269)

后科学基金第四批特别资助项目 (201104609)

国家重点研发计划专项资助项目 (2016YFC0801408)

深部矿井 冲击地压灾害防治研究

牟宗龙 巩思园 刘广建 窦林名 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

■ 建设工程资助项目(PAPD)

江苏省重点研发计划资助项目(BE2015040)

“十二五”国家科技支撑计划资助课题(2012BAK09B01)

国家自然科学基金资助项目(51104150,51404269)

中国博士后科学基金第四批特别资助项目(201104609)

国家重点研发计划专项资助项目(2016YFC0801408)

深部矿井冲击地压灾害防治研究

牟宗龙 巩思园 刘广建 窦林名 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书阐述了巨野煤田深部冲击地压灾害发生的案例,详细分析了深部矿井高冲击危险工作面、巨厚火成岩、断层活化、火成岩及断层复合诱发的冲击地压的机理与发生条件,分析了诱冲岩层的移动规律及辨识,并对冲击型底鼓的力学机理进行了分析。采用综合指数法、多因素叠加法、经验类比法、弹性波 CT 反演以及计算机模拟等对生产采区、采掘工作面提前进行了冲击地压危险性评估论证,确定了冲击地压影响因素、冲击危险等级并划分了冲击危险区域,运用钻屑法、微震法、地音法、电磁辐射法、工作面矿压观测、弹性波 CT 探测、煤体应力在线等对危险区域进行监测预警,形成了一套以冲击地压煤层的设计原则、防范措施、防护措施为基础的综合防治技术体系。最后依据赵楼煤矿的冲击地压防治经典案例来具体阐述危险性评价、监测预警技术以及综合防治技术。本书为深部复杂地质构造矿井动力灾害的影响机制分析、监测、防治和安全生产提供了技术参数和实践经验。

图书在版编目(CIP)数据

深部矿井冲击地压灾害防治研究/牟宗龙等著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3143 - 7

I. ①深… II. ①牟… III. ①矿井—冲击地压—灾害防治—研究
IV. ①TD7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146177 号

书 名 深部矿井冲击地压灾害防治研究

著 者 牟宗龙 巩思园 刘广建 窦林名

责任编辑 郭玉 李敬

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 12.25 字数 291 千字

版次印次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

《深部矿井冲击地压灾害防治研究》
参与著作人员

王富奇 倪兴华 李 腾 阮国强
彭 蓬 王保齐 王义然

前 言

随着矿井开采强度的增加,煤炭资源可采储量急剧衰减,特别是我国东部地区开采条件较好的煤炭资源越来越少,许多矿井面临着资源枯竭的窘境。东部地区矿井的采深以每年约 20 m 的速度不断增加,例如兖煤菏泽能化有限公司、徐州矿务集团有限公司、兖州煤业股份有限公司、山东天安矿业有限公司等矿井采深已达千米,最深的已超过 1 500 m。深度增加导致这些矿井的煤炭开采面临的问题更加复杂,由此产生的工程灾害更为严重,例如矿压显现强烈,巷道维护困难,岩爆冲击地压危险加大,瓦斯涌出量增加,地温升高,通风、提升和勘探困难,开采条件恶化,生产技术效果和经济效益下降等,作为矿井重大自然灾害的冲击地压问题越来越严重,发生的次数越来越多,防治难度进一步加大。

冲击地压的一般特点包括:

(1) 突发性。冲击地压发生前一般没有明显的宏观前兆,部分事故或有矿震声响等短暂时前兆,冲击过程突然且迅疾,持续时间几秒到几十秒,难以提前准确确定发生的时间、地点和强度。

(2) 强烈震动性。冲击地压产生巨大的声响和强烈的震动,电机车等重型设备被移动,震动波及范围可达几千米甚至更远,地面有地震感觉。

(3) 巨大破坏性。冲击地压发生时,大量煤体突然破碎并从煤壁抛出,堵塞巷道,破坏支架,同时会产生强烈的冲击波,造成人员伤亡和巨大的财产损失。

(4) 复杂性。在自然地质条件上,采深从 100 多米到 1 000 多米,地质构造从简单到复杂,煤层从薄层到特厚层,倾角从水平到急倾斜,顶板包括砂岩、灰岩、油母页岩等都发生过冲击地压。在生产技术条件上,不论炮采、机采、综采或是综放、全部垮落法或水力充填法等各种采煤工艺,也不论是长壁、短壁、房柱式或煤柱支撑式、分层开采还是倒台阶开采等各种采煤方法都出现过冲击地压。

(5) 诱发复合动力灾害。冲击地压还会引发或可能引发其他矿井灾害,尤其是瓦斯、煤尘爆炸,火灾以及水灾,干扰通风系统,严重时造成地面震动和建筑物破坏等。

通过多年研究,中国矿业大学冲击地压防治课题组在冲击地压机理研究方面做了大量工作,取得了如下主要进展:

(1) 详细研究了组合煤岩试样的冲击倾向性特征,认为组合煤岩的冲击倾向性不仅与顶板的强度及厚度、煤样强度之间呈正相关的关系,而且与微震强度之间也呈正相关关系,并依此建立了组合煤岩的强度弱化减冲原理。

(2) 基于煤岩介质中应力波传播理论和巷道围岩强度理论,提出了冲击震动巷道围岩的强弱结构控制机理,通过在巷道周边围岩支护体小结构与冲击应力波传递大结构之间设置一个衰减弱化冲击震动波的松软层弱结构,达到保护巷道围岩免受冲击的目的。

(3) 提出了顶板岩层诱发冲击的机理,得到了顶板岩层诱发冲击的机理分为顶板处于稳定时的“稳态诱冲机理”和处于运动态时的“动态诱冲机理”两种类型。

(4) 基于“砌体梁”理论,研究了断层倾向对顶板平衡结构和工作面支承压力的影响,并建立了断层滑移诱发煤岩冲击的黏滑-黏弹脆性体突变模型,提出了“断层滑移失稳动态诱冲机理”和“断层滑移稳态诱冲机理”。

(5) 通过研究最大水平应力对冲击地压的作用机制、褶皱区最大水平应力与采动应力分布规律及其和冲击地压的关系,提出了针对褶皱区工作面防冲优化布置方案和控制对策。

(6) 基于微震监测系统对采动煤岩冲击破裂的震动效应进行了研究,系统分析了不同采动煤岩破裂的位移场和能量辐射特征,揭示了煤岩震动间的震源破裂机理差异,研究得到了覆岩特征的弱化可有效降低震动波能量及其瞬间动载荷对采掘空间的冲击破坏作用,根据传播至巷道围岩处矿震残余动载的诱冲机理研究了矿震动载对巷道围岩冲击破坏效应的影响规律,进而提出了煤岩冲击的预测及防治对策。

(7) 基于弹性波 CT 层析成像技术,通过对工作面煤岩体进行透视层析成像,可以得到震动波速度场的分布规律,进而确定工作面范围内应力场的大小,从而划分出高应力和高冲击危险区,为冲击矿压的监测防治提供依据。

(8) 提出了覆岩整体空间结构形态为水平层面的“ \otimes ”结构与竖向的“F”结构的组合,“ \otimes ”与“F”结构的形成与失稳不断进行,称为煤矿覆岩空间结构动态演化循环。根据工作面受“ \otimes ”与“F”结构影响程度的不同,将工作面开采过程中覆岩所形成的空间结构分为 3 种基本类型,即主要受“ \otimes ”结构影响的“ \otimes ”空间结构工作面、一侧受“F”结构影响的“F”空间结构工作面、两侧受“F”结构影响的孤岛“T”空间结构工作面。

本书是结合作者的博士后研究课题,在对巨野煤田的赵楼煤矿从投产开始所进行的冲击地压防治研究基础上,作出的经验总结,由此形成了一套适合深部矿井冲击地压防治的实践经验体系。由于矿井地质及开采条件处于不断变化中,必将对冲击地压的防治不断提出新的问题和挑战,加之作者水平有限,书中定有不当之处,望各位读者不吝指正。

在课题研究及本书编写过程中,得到了来自企业、科研单位以及多个国家级和省部级基金项目的支持,课题组研究生杜俊留、刘尊严、王翰秋、龚少坤、高笑彬、钱云鹏、易恩兵、温颖远、高京龙、谢龙、曹京龙、杨景、王有勇、包洋等在实验、数值模拟及数据分析方面做了大量工作,作者对所有做出贡献的单位和人员表示衷心感谢!

作者

2016 年 7 月

目 录

1 绪论	1
1.1 深部矿井冲击地压灾害问题	1
1.2 深部冲击地压研究概述	3
1.3 主要研究内容	8
2 深部矿井冲击地压灾害案例	9
2.1 梁宝寺煤矿冲击地压灾害案例	9
2.2 赵楼煤矿冲击地压灾害案例	9
2.3 本章小结	12
3 深部矿井冲击地压机理及发生条件	13
3.1 基于“动静载”相结合的冲击地压机理	13
3.2 坚硬顶板孤岛工作面冲击地压机理研究	19
3.3 火成岩侵入区冲击地压机理	28
3.4 活化性断层冲击地压机理	37
3.5 火成岩及断层复合结构力学机理	47
3.6 诱冲岩层运移规律及辨识	50
3.7 深部巷道冲击性底鼓力学机理	55
3.8 巷道围岩“三区三结构”组合加固体防冲机理	65
3.9 本章小结	69
4 深部矿井冲击地压危险性评价及预测技术	70
4.1 综合指数法	70
4.2 多因素叠加法	77
4.3 经验类比法	84
4.4 弹性波 CT 反演	87
4.5 计算机模拟	95
4.6 本章小结	95
5 深部矿井冲击地压监测及预警技术	96
5.1 钻屑法	96

5.2	微震法	97
5.3	地音法	100
5.4	电磁辐射法	104
5.5	工作面矿压观测分析	105
5.6	弹性波 CT 探测	106
5.7	煤体应力在线监测	112
5.8	综合预测方法	114
5.9	工程实践	115
5.10	本章小结	127
6	深部矿井冲击地压防治技术体系	128
6.1	冲击地压煤层的设计原则	128
6.2	冲击地压防范措施	135
6.3	冲击危险的解危措施	136
6.4	其他防护措施	145
6.5	工程实践	146
6.6	本章小结	156
7	深部矿井冲击地压防治典型案例	157
7.1	1302 工作面冲击地压防治案例	157
7.2	1304 工作面轨道平巷底鼓冲击防治案例	165
7.3	1306 工作面冲击地压防治案例	169
7.4	11301 工作面冲击地压防治案例	173
7.5	本章小结	174
8	主要结论	176
9	后续研究展望	179
	参考文献	181

1 绪 论

1.1 深部矿井冲击地压灾害问题

能源是支撑人类文明进步的物质基础,是现代社会发展不可或缺的基本条件。在我国国民经济快速发展、实现现代化的进程中,能源始终是一个重大战略问题。

我国能源资源总量比较丰富,但人均能源资源拥有量较低,煤炭、石油和天然气的人均占有量仅为世界平均水平的 67%、5.4%和 7.5%。我国富煤、贫油、少气的资源特点决定了煤炭在能源结构中处于主导地位,未来相当长的时期内我国能源仍然以煤为主。国家统计局《2015 中国统计年鉴》数据表明,2014 年我国能源生产总量 36 亿 t 标准煤,其中原煤、原油、天然气及水电、核电、风电占能源生产总量的比重分别为 73.2%、8.4%、4.8%、13.7%;能源消费总量 42.6 亿 t 标准煤,其中原煤、原油、天然气及水电、核电、风电占能源消费总量的比重分别为 66%、17.1%、5.7%、11.2%。进入 21 世纪以来,我国的能源生产结构、能源消费结构逐渐发生着改变,煤炭在我国能源消费结构中所占的比重逐渐下降,但在我国能源生产结构中所占的比重基本稳定,如图 1-1-1~图 1-1-3 所示。我国能源自给率始终保持在 90%左右,但随着能源消费总量的不断增长,能源供应压力不断增大。今后一段时期,我国仍将处于工业化、城镇化加快发展阶段,能源需求会继续增长,能源供应保障任务更加艰巨。

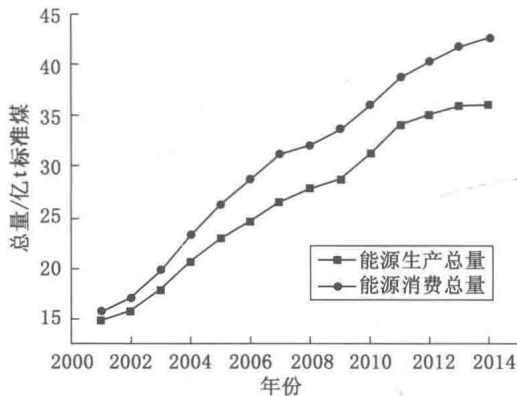


图 1-1-1 能源生产总量、消费总量变化趋势

统计分析表明,开采深度越大,冲击地压发生的可能性也越大。开采深度与冲击地压发生次数的关系如图 1-1-4 所示(波兰资料,横坐标为采深 H ,纵坐标为冲击指数 W_i ,即开采

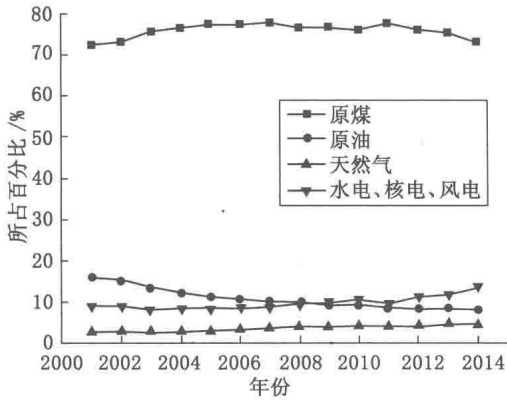


图 1-1-2 能源生产结构变化趋势

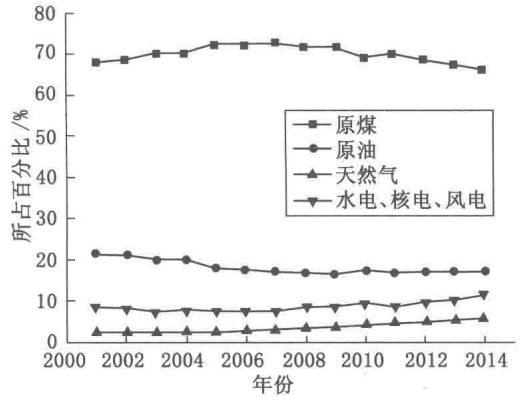


图 1-1-3 能源消费结构变化趋势

百万吨煤炭的冲击地压次数)。考虑到安全界限,可以确定, $H \leq 350$ m 时,冲击地压不会发生。 $350 < H \leq 500$ m 时,在一定程度上危险逐步增加。从 500 m 开始,随着开采深度的增加,冲击地压的危险性急剧增长,从图 1-1-4 中可知,当采深为 800 m 时,冲击指数 $W_t = 0.57$,是采深 500 m ($W_t = 0.04$) 时的 14 倍。而从 $W_t = f(H)$ 的曲线趋势看,当采深非常大时(1 200~1 500 m),冲击指数的梯度将会减小,但其值非常高。

我国天池煤矿的情况与此类似,如图 1-1-5 所示,图中纵坐标为冲击地压次数。

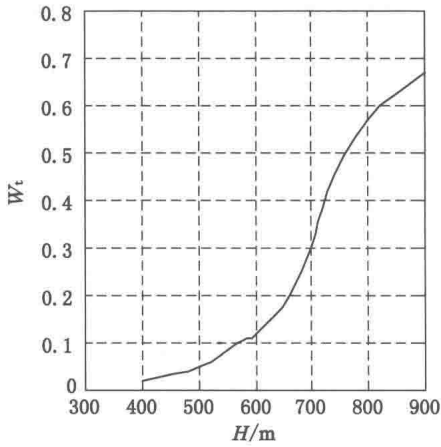


图 1-1-4 波兰采深与冲击地压的关系

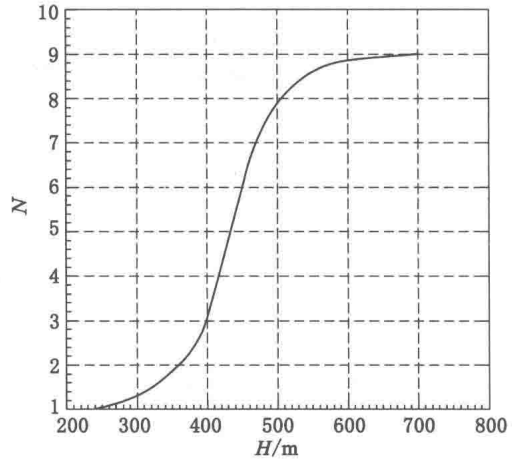


图 1-1-5 天池煤矿采深与冲击地压的关系

由表 1-1-1 和图 1-1-5 可见,在中国煤矿的条件下,发生冲击地压的最小采深为 200~540 m,平均为 380 m。700 m 时发生冲击地压的次数大大高于 400 m 时的次数。

表 1-1-1 中国部分煤矿发生冲击地压的最小采深

矿井	门头沟	天池	抚顺	城子	大台	陶庄	房山	唐山
最小采深/m	200	240	250	370	460	480	520	540

冲击地压发生的规律:

(1) 随开采深度的增加,发生的次数增多,震级增高。

(2) 大断层附近,冲击强度大,震级高。

(3) 在构造带附近,虽有时震级不高,但影响范围较大,破坏能力增强。这主要是因为断层附近由于人为的采动影响,使地质历史时期形成的断层被激活形成活断层,应力重新分配,使原来的应力平衡被打破,从而诱发冲击地压。

(4) 初次来压及关键层运动时很容易造成冲击地压的发生,原因是来压期间煤岩体承受的动压和静压均大幅升高。

冲击地压的破坏形式:

(1) 煤的抛射:煤块抛出,煤尘飞扬等。

(2) 煤的整体位移:在顶板能看出擦痕,巷道空间缩小。

(3) 底鼓:底煤鼓起伤人,将刮板输送机等设备鼓起或弹起,因此要想办法把底煤采出,不留底煤或者开卸压槽。

(4) 震动:造成棚子倾倒、设备器材移动,伴随有飓风的发生,当冲击地压较强时产生的冲击波可以造成人员伤亡。

1.2 深部冲击地压研究概述

煤矿开采过程中,煤或岩体在高应力状态下积聚大量弹性能,在一定条件下突然发生破坏、冒落或抛出,使弹性能量突然释放,并伴随声响、震动以及气浪等明显的动力效应,这种现象属于煤岩动力现象。

矿震是煤、岩体内部发生动力破坏,产生明显震动和声响的弹性能突然释放现象,强度较低的矿震发生时,可在采掘空间内产生煤尘,一般低强度矿震发生时,煤、岩不向已采空间抛出,但部分强矿震可导致片帮或煤岩块塌落现象,甚至可影响一定范围内的煤体发生冲击矿压。矿震也称为“煤炮”。

冲击矿压是巷道和采场周围煤岩体发生突然爆炸性破坏,积聚的大量弹性能量瞬时释放,动力将破碎的煤岩高速抛向采掘空间,同时发出强烈震动和声响,产生大量煤尘,造成采掘空间及设备损坏、人员伤亡等。冲击矿压还会引发其他矿井灾害,包括瓦斯与煤尘爆炸、火灾、水灾以及干扰通风系统等,严重时还可产生类似天然地震的危害,造成地面震动和建筑物破坏等。因此,冲击矿压是煤矿重大灾害之一。

1.2.1 冲击地压发生机理

冲击地压发生机理十分复杂,各国学者在对冲击地压现场调查及实验室研究的基础上,从不同角度相继提出了一系列的重要理论,概括起来主要有强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向理论、“三准则”和变形系统失稳理论以及动静载结合理论等。

1.2.1.1 强度理论

强度理论认为:井巷和采场周围产生应力集中,当应力达到煤岩体的强度极限时,煤岩体就会突然发生破裂,形成冲击地压。近代冲击地压的强度理论主要着眼于“矿体-围岩”这一力学系统的极限平衡条件,具有代表性的是 Brauner 提出的煤体夹持理论。在研究岩爆

问题时,通过对大量的工程实例的分析研究,还提出了岩爆的拉伸断裂机理和剪切破裂判据。

强度理论具有简单、直观和便于应用的特点。井巷和采场周围煤岩体经常出现局部应力超过其强度极限的现象,但即使是具有强烈冲击倾向性的煤层在多数情况下都能平稳进入强度后变形阶段,只在少数情况下才发生突然破裂形成冲击地压,说明强度理论只能判断煤岩体是否破裂,不能回答破裂的形式是静态破裂还是动态破裂。它是冲击地压发生的必要条件,而不是充分条件。

1.2.1.2 刚度理论

刚度理论是 Cook 等人根据刚性压力机理论而提出来的。20 世纪 70 年代,布莱克将此理论完善化并用于美国加利纳矿的冲击地压问题。该理论认为,矿山结构(矿体)的刚度大于矿山负荷系统(围岩)的刚度是产生冲击地压的必要条件。

刚度理论用于判别煤柱稳定性具有简单、直观的特点,但这一理论没有正确反映煤体本身在煤岩体-围岩系统中不但能积聚能量而且还可以释放能量这一基本事实。此外,矿山结构的刚度在概念上并不十分明确,而且矿山结构达到峰后强度后的刚度难于确定。

1.2.1.3 能量理论

能量理论认为,当矿体-围岩系统在其力学平衡状态破裂时所释放的能量大于所消耗的能量时便发生冲击地压。

能量失稳理论认为:围岩系统释放的能量大于煤岩体消耗的能量时,即产生冲击,周围煤岩体是产生冲击的主要能量。实验却证明:当煤岩体中的最大主应力超过其单轴抗压强度时,其存储的弹性应变能就能使其本身破碎,甚至形成冲击。因此,不需要在冲击煤岩体以外去寻找其他的能量源进行分析,只需要分析发生冲击的煤岩体本身所耗散的弹性应变能。

1.2.1.4 冲击倾向性理论

冲击倾向性是指煤岩介质产生冲击破裂的固有能力和属性,是冲击地压发生的必要条件。冲击倾向性理论是波兰和前苏联学者提出的,我国学者在这方面做了大量的工作,提出用煤样动态破裂时间(D_T)、弹性能指数(W_{ET})和冲击能量指数(K_E)三项指标综合判别煤的冲击倾向性的试验方法和指标。

冲击倾向性理论的另一重要方面是顶板冲击倾向性的研究,而且也越来越引起人们的重视。这方面的研究主要包括顶板弯曲能指数和长壁开采条件下顶板断裂引起的煤层冲击等。

用一组冲击倾向性指标来评价煤岩体本身的冲击危险具有实际意义。然而冲击地压的发生与采掘和地质环境等有关,而且实际的煤岩物理力学性质随地质开采条件的不同而有很大的差异,实验室的测定结果往往不能代表各种环境下的煤岩性质,这也给冲击倾向理论的应用带来了局限性。

1.2.1.5 “三准则”机理模型

国内一些学者在总结以上冲击地压机理模型的基础上,考虑到冲击地压发生的充分必要条件,将不同的判据有机地组合到一起,提出了冲击地压的“三准则”机理模型。

该模型认为:强度准则是煤体的破裂准则,而能量准则和冲击倾向性准则是突然破裂准

则。三个准则若同时满足,才是发生冲击地压的充分必要条件。

该模型比较全面地揭示了冲击地压的发生机理。作为机理模型,相对来说是比较完善的,但这只是一个原则性的表达式,特别是强度准则和能量准则,由于影响因素众多,各种参数几乎无法确定,因此该模型的实际应用难度很大。这正是目前预测方法和冲击地压机理之间脱节的重要原因。

1.2.1.6 稳定性理论

Neville Cook 在 20 世纪 60 年代将稳定性理论应用于冲击地压问题的研究。随后,Lippmann 将冲击地压处理为弹塑性极限静力平衡的失稳现象,提出了煤岩冲击的“初等理论”。章梦涛根据煤岩变形破裂的机理,提出了冲击地压的失稳理论。该理论认为煤岩介质受采动影响而在采场周围形成应力集中,煤岩体内高应力区局部形成应变软化介质与尚未形成应变软化(包括弹性和应变硬化)的介质处于非稳定平衡状态,在外界扰动下动力失稳,形成冲击地压。

目前,冲击地压的失稳理论发展较快,围岩近表面裂纹的扩展规律、能量耗散和局部围岩稳定性的研究已取得了一定的进展。Vardoulakis 研究指出,近自由表面的裂纹一旦开始扩展,将失去稳定,导致表面局部屈曲,临界屈曲应力随自由表面与裂纹间距的减小而急剧减小。Dyskin 对壁面附近裂纹扩展方式及裂纹贯穿后的壁面稳定性进行了分析,认为压应力集中造成初始裂纹以稳定的方式平行于最大压应力方向扩展,这种扩展与自由表面相互作用加速了裂纹的增长并最终导致失稳扩展,裂纹面出现分离,分离层屈曲破裂形成冲击地压。缪协兴、张晓春、冯涛等分别建立了煤矿片帮型冲击地压和岩爆的层裂板结构失稳破裂模型,认为采场或巷道壁面的局部失稳是由高应力集中区形成的层裂板结构区的稳定性控制的,冲击地压或岩爆是煤壁形成的层裂板结构区的局部压曲。齐庆新等在煤与岩以及煤层之间摩擦滑动实验研究的基础上,提出了煤矿冲击地压的黏滑失稳机制。

1.2.1.7 突变理论

突变理论是由法国数学家 Thom 于 20 世纪 70 年代逐步发展形成的,目的就是对于一个光滑系统中可能出现的突然变化作出适当的数学描述,分类定理是突变理论的最重要部分,其中心思想是认为自然界的一切突变形式可以根据系统的控制空间和状态空间的维数进行分类。Thom 的研究表明:在控制变量不大于 4 个的情况下,最多可有 7 种突变形式。尖点突变模型是突变理论中最有用、最简单的一种。近几年来,突变理论和分形理论等非线性理论在冲击地压机理的研究中也取得了一定的进展。

从能量的角度来看,冲击地压的实质就是煤岩体中所积聚的弹性应变能达到其极限储存能;根据尖点突变理论,当煤岩体中所积聚的弹性应变能发生突变突跳时就会诱发冲击。

1.2.1.8 动静载结合诱冲机理

矿震动载传播至煤体后,除了单独作用造成煤体破坏以外,更为普遍的是与静载叠加作用诱发冲击矿压的发生。矿震的动力扰动与静载荷叠加作用对煤岩体的冲击主要有两种方式:

(1) 巷道或采场围岩原岩应力本身就很高,巷道开挖或工作面回采导致巷道或采场周边高应力集中,此时应力水平虽未超过煤岩体强度但已接近其强度,远场矿震产生的微小动应力增量便可使动静载组合应力场超过煤岩体强度,从而导致煤岩体冲击破坏。此时,矿震

产生的动应力扰动在煤岩体破坏中主要起到一个诱发作用。

(2) 巷道或采场围岩原岩应力并不很高,但远处矿震震源释放的能量很大,震源传至煤体的瞬间动应力增量很大,巷道或采场周边静态应力与动态应力叠加超过煤体强度,导致煤岩体突然动态冲击破坏。此时,矿震的瞬间动态扰动在冲击破坏过程中起主导作用。

总之,各个理论都有其自身的特点和局限性。强度理论突出了煤岩体的极限强度指标,但很多情况下,在所受应力超过煤岩体的极限强度后,结构若缓慢破坏,也不会发生冲击;在刚度理论中,如何确定矿山结构刚度已经达到峰值强度后的刚度是一难题,它无法由实验测定;能量理论说明矿体-围岩系统在力学平衡状态时,释放的能量大于消耗的能量,冲击地压就可能发生,但没有说明平衡状态的性质及其破坏条件,特别是围岩释放能量的条件,因此,能量理论判据尚缺乏必要条件;冲击倾向性理论考虑了煤体本身的冲击性能,但未能兼顾开采的实际地质条件,实验室测定的特性往往不能完全代表实际环境下的煤岩性质;失稳理论考虑了采动影响和煤岩体在集中应力作用下局部应变软化与应变硬化和弹性介质构成的平衡系统突然失稳,较好地吻合了采矿活动的特点;动静载理论较能满足现场需要。

冲击地压的发生机理仍然属于世界级难题,由于对机理的认识不清导致不能取得满意的防治效果。

1.2.2 冲击地压监测方法

目前现场应用最多的冲击地压监测及预警方法主要有钻屑法、应力监测法、CT层析透视法、电磁辐射法、地音及微震法和综合指数法。

钻屑法是在煤层中施工钻孔,根据不同深度排出的煤粉量及其变化规律和有关动力效应,鉴别冲击危险的一种方法。

应力监测法是通过在煤岩体中埋设应变片来监测其中的应力分布场,从而确定冲击危险区域。

钻屑法和应力监测法都属于接触式探测方法,需要进行钻孔工程,打钻费时费力,而且限于钻孔数量,探测范围十分有限。

电磁辐射法和地音及微震法都属于非接触式的地球物理探测方法,可以进行实时在线监测,因此近年来已逐渐在我国进行应用。

研究表明,煤岩变形破裂时,将会产生电磁辐射现象。电磁辐射是煤体等非均质材料在受载情况下发生变形及破裂的结果,是由煤体各部分的非均匀变速变形引起的电荷迁移和裂纹扩展过程中形成的带电粒子产生变速运动而形成的,煤体中应力越高,变形破裂过程越强烈,电磁辐射信号越强。电磁辐射和煤的应力状态有关,应力高时电磁辐射信号就强,电磁辐射频率就高,应力越高,则冲击危险越大。电磁辐射强度和脉冲数两个参数综合反映了煤体前方应力的集中程度的大小,因此可用电磁辐射法进行冲击地压危险性的预测预报。电磁辐射法的缺点在于受井下复杂电磁环境干扰较大,而且监测范围也只有数十米。

微震法与记录和分析大地地震的方法相类似,但震中浅,强度小,震动频率高,影响范围小。衡量矿山震动程度的大小采用单位时间内矿山震动的次数和震动的能量。地质构造的变化引起地应力场的变化,变化梯度越大,产生震动的可能性就越大,释放的能量就越高,震动的数量就越多。

地音法以脉冲形式记录弱的、低能量的地音现象。地音变化与煤体应力变化过程相似,

地音活动集中在采区某一部位,且地音事件的强度逐渐增加时,预示着冲击地压危险。地音法分为站式连续监测和便携式流动监测,主要记录声发射频度(脉冲数量)、一定时间内脉冲能量的总和、采矿地质条件及采矿活动等。地音和微震的区别在于各自接收震动事件的频率范围和能量大小不同。微震更适合接收低频高能量事件(如顶板突然断裂),通过在顶板、煤层和底板中布置探头(或拾震器)实时采集煤岩体在应力作用下发生破坏而产生的应力波。微震监测具有远距离接收、动态和三维显示的特点,可实时接收并保存煤岩震动信号,从而为冲击地压危险预测提供基础数据。

弹性波 CT 解析成像技术,就是地震层析成像技术,是一种采矿地球物理方法之一。其工作原理是利用地震波射线对工作面的煤岩体进行透视,通过地震波走时和能量衰减的观测,对工作面的煤岩体进行成像。地震波传播通过工作面煤岩体时,煤岩体上所受的应力越高,震动传播的速度就越快。通过震动波速的反演,可以确定工作面范围内的震动波速度场的分布规律,根据速度场的大小,可确定工作面范围内应力场的大小,从而划分出高应力区和高冲击矿压危险区域,为这种灾害的监测防治提供依据。

综合指数法是在进行采掘工作前,在分析影响冲击矿压发生的主要地质和开采技术因素的基础上,确定各个因素对冲击矿压的影响程度及其冲击危险指数,然后综合评定冲击矿压危险状态的一种区域预测方法。根据综合指数的大小,将冲击危险程度分为无冲击危险、弱冲击危险、中等冲击危险、强冲击危险和不安全等不同的等级。

1.2.3 冲击地压治理措施

目前对冲击地压所采取的防治方法可分为 3 类:开采设计优化方法、主动解危方法和加强或改善支护方法。

(1) 开采设计优化方法

开采设计优化方法通过巷道布置优化和保护层开采等手段可达到消除应力多次叠加产生的应力高度集中的目的。开采保护层是开采设计优化方法的主要一种。在进行开采设计时,选择合适的开采顺序、开采方法和采煤工艺,先开采无冲击危险的煤层,力争消除形成冲击地压的因素。由于在浅部开采中很少碰到冲击地压问题,因此很多煤矿在开采设计阶段没有考虑开采中的应力叠加问题,从而造成了在开采过程中出现很多开采应力集中煤柱的不利局面。

(2) 主动解危方法

主动解危方法是在已有冲击地压危险的区域实施包括煤层注水、煤层卸压爆破、断顶断底爆破、钻孔卸压、卸压硐室、定向水力割缝等手段改变煤岩层自身的冲击倾向性质,或将高应力区转移或释放,从而解除该区域的冲击地压危险。目前这方面的应用研究较多。

煤层注水:主要是通过钻孔向煤体中均匀注入高压水,破碎煤体,降低煤层的冲击倾向性,增加煤体的塑性能,以达到降低冲击危险的目的,同时还可以改善工作面的工作环境。煤层注水方法主要有以下三种:短钻孔注水法、长钻孔注水法、联合注水法。

钻孔卸压:采用煤体钻孔可以释放煤体中聚积的弹性能,消除应力升高区,降低冲击危险。实施参数:大直径钻孔 $\phi 95\text{ mm}$ 、 $\phi 145\text{ mm}$ 、 $\phi 200\text{ mm}$,深度为煤层厚度的 3~4 倍,孔间距 10~15 m。

卸压爆破:最大限度地释放聚积在煤体中的弹性能,在煤帮附近形成卸压破坏区,使压

力升高区向煤体深部转移;震动爆破的合理布置及合理的装药量,不仅形成岩体震动,在一定程度上形成煤体的松动带,且落煤方便;炸药爆炸形成的爆轰波(应力波)与开采形成的压力叠加,超过其极限状态,使岩体卸压或引发冲击地压。研究表明:卸压爆破后 30 min 内,若电磁辐射的脉冲数变化剧烈,说明在这期间煤壁内变形破坏剧烈,将可能发生冲击地压。

定向裂隙法:人为在煤层或岩层中,预先制造一个裂缝,在较短的时间内,采用高压水,将煤岩体中预先制造的裂隙破裂,降低煤岩体的物理力学性质,以达到降低冲击危险的目的。

高压水射流煤层割缝卸压技术是一项冲击地压防治新技术,它是利用 50~70 MPa 的高压水在煤体中打一钻孔,钻孔从下平巷仰角沿煤层倾向穿透至上平巷,在喷头返回过程中,改变喷头方向,沿煤层走向割一高 0.2 m、长 3.0 m 左右的卸压槽,实现工作面煤体的超前卸压。

(3) 支护方法

加强或改善支护方法,通过增大支护强度或改善支护方式以提高支护体抵抗冲击的能力,可通过锚网索主动支护+可让压性被动支护实现。这是一种被动防护方法,不能减少冲击地压的发生,但在采用主动解危的条件下,能起到保护人员和设备安全的特殊作用。目前这方面的研究还有待深入。

1.3 主要研究内容

本研究从深部冲击地压发生机理、危险性评价、监测预警及治理的角度出发,主要以巨野煤田赵楼煤矿的地质条件为基础,运用实验室物理模拟、实验室实验、计算机数值模拟、理论分析、现场实测及工业性试验等研究方法,配合相关工程实践,主要研究内容如下:

- (1) 深部矿井冲击地压灾害案例;
- (2) 深部矿井冲击地压机理以及发生条件;
- (3) 深部矿井冲击地压危险性评价及预测技术;
- (4) 深部矿井冲击地压监测及预警技术;
- (5) 深部矿井冲击地压防治技术体系;
- (6) 深部采区冲击地压防治典型案例。

2 深部矿井冲击地压灾害案例

巨野煤田开采深度大,加之地质构造复杂,具有严重的煤岩动力灾害危险性,近年来矿井开采过程中多次出现强烈矿压显现和灾害事故,特别是冲击地压灾害严重威胁矿井的安全生产,甚至造成了人员伤亡的严重后果,其中梁宝寺煤矿和赵楼煤矿冲击地压危险性较高。

2.1 梁宝寺煤矿冲击地压灾害案例

据报道,2012年3月31日20时52分,在梁宝寺煤矿的3301工作面轨道巷由停采线向外180 m至310 m范围内底板突然严重变形,发生了冲击地压事故,导致在此范围向工作面运送材料的2名工人不幸遇难。

发生事故的3301工作面周围500 m范围内存在3305、3309工作面采空区,3301工作面已经停采,在该区域 0.09 km^2 范围内存在13条巷道,5条断层,最大落差9 m,采空区上方地表无明显沉降。发生事故区域为3301、3305、3309三个工作面采空区围成的“孤岛”高应力区域,证明该区域属于采动和构造应力的叠加区,极易发生冲击地压事故。

2.2 赵楼煤矿冲击地压灾害案例

2.2.1 1302工作面底鼓冲击灾害

赵楼煤矿1302工作面有两处较大范围岩浆岩侵蚀,致使局部煤层天然焦化,工作面不能正常推采,岩浆岩的侵蚀使得该区域矿压显现异常。

1302运输巷在导线点P13附近发生过2次冲击地压,发出巨大声响,震感明显,巷道煤块、煤粉脱落,底鼓后,底板明显抬高,出现几米长的裂缝。两次事故分别为:

(1) 2008年8月24日在导线点P13前32.5~50.5 m地段发生冲击地压,造成底鼓,最大底鼓高度1100 mm,形成两条30~60 mm宽的裂缝,底鼓岩层产生离层。

(2) 2008年12月4日,1302运输平巷在导线点P13后6 m到P13前10 m地段发生冲击地压现象,造成底鼓,最大底鼓高度400 mm,产生宽40 mm的裂缝。运输平巷巷道表面位移观测显示底鼓量一般为100~250 mm。

实践证明,煤层厚度明显变化区域极易发生冲击,如运输平巷两次冲击均发生在岩浆岩侵蚀区域边缘,即煤层被侵蚀、厚度出现变化区域,两次底鼓冲击地点如图2-2-1所示。

数值模拟显示,火成岩的侵蚀使得该区域矿压显现异常,顶、底板应力集中程度较高,火成岩边界有较大的垂直应力集中,同时其下部水平应力集中程度较高,达到原岩应力的2倍