

展计划(973计划)(2010CB226800)资助
智计划(B07028)资助

应力波诱发冲击矿压的 动力学机理研究

卢爱红 张连英 刘海顺 茅献彪 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

发展计划(973 计划)(2010CB226800)资助
高等学校学科创新引智计划(B07028)资助

应力波诱发冲击矿压的 动力学机理研究

卢爱红 张连英 著
刘海顺 茅献彪

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书共分8章,主要讲述了应力波诱发冲击矿压的动力学机理研究方面的知识。全书结构紧凑,内容合理。本书可供矿山生产、设计、科研单位的有关技术人员和相关院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

应力波诱发冲击矿压的动力学机理研究 / 卢爱红等著.

徐州:中国矿业大学出版社,2011.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1261 - 0

I. ①应… II. ①卢… III. ①矿山压力—冲击地压—动力学分析 IV. ①TD324

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 201992 号

- 书 名 应力波诱发冲击矿压的动力学机理研究
著 者 卢爱红 张连英 刘海顺 茅献彪
责任编辑 付继娟 章 毅
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 850×1168 1/32 印张 5.625 字数 144 千字
版次印次 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

冲击矿压的发生机理十分复杂,其中最为关键的是冲击矿压的诱发因素。本书从应力波在采动围岩中的传播与叠加入手,采用理论分析、物理模拟、数值计算和实例分析等综合研究手段,深入揭示冲击矿压的动力学机理,并为采矿工程中预测预报和防治冲击矿压提供理论依据和科学对策。本书的重要研究成果和创新点如下:

(1) 在全面介绍和分析岩石动力学特性的基础上,建立了冲击载荷作用下岩体发生失稳的临界速度判据。

(2) 用弹性动力学理论分析了应力波在弹性介质中的传播规律,并研究了不同岩性参数及不同应力波特征下应力波在自由边界的反射效应以及应力波在黏弹性介质中的衰减规律。

(3) 用数值模拟的方法分析了应力波作用下巷道围岩应力与能量的集中情况,探讨了不同地应力与不同应力波情况下巷道围岩的稳定性状态。

(4) 利用 LS—DYNA 软件中的失效分析功能,分析了巷道围岩在应力波作用下的失效破坏情况,得到了不同围岩岩性、不同地应力条件及不同应力波作用情况下的围岩破坏规律,描述了冲击矿压发生时的剥离薄层屈曲失稳过程。

(5) 通过物理模拟试验,得到了不同应力波强度、作用方法以及不同岩性情况下巷道围岩的破坏规律,并利用高速动态照相机记录了应力波作用下巷道围岩位移(变形)变化的时间历程,验证了理论分析和数值模拟结果。

(6) 运用本书得到的研究成果分析了某矿由于应力波诱发的冲击矿压事故,并提出了应力波诱发冲击矿压的相关防治措施。

著 者

2011年8月

目 录

1	绪论	1
1.1	研究的目的与意义	1
1.2	国内外研究现状	10
1.3	研究内容和技术路线	24
2	煤岩体的动力学基本特性及其动态损伤累积	26
2.1	动荷载下煤岩体的力学特性分析	26
2.2	应力波作用下岩石的动力学特性	33
2.3	动荷载下煤岩体的损伤与能量耗散	38
2.4	本章小结	41
3	应力波在岩体中的传播规律研究	43
3.1	应力波传播的基本方程	43
3.2	应力波在弹性介质中的传播规律	44
3.3	应力波在黏弹性介质中的传播规律	47
3.4	应力波在自由界面的反射	51
3.5	应力波在岩体中传播规律的数值模拟	59
3.6	本章小结	68
4	巷道围岩应力与能量聚集的数值模拟	70
4.1	数值分析软件及分析方法的选用	70
4.2	数值计算模型及方案	71

4.3	巷道围岩的应力分布	74
4.4	巷道围岩的能量积聚特征	89
4.5	冲击矿压危险性的能量密度判据	96
4.6	本章小结	99
5	应力波导致围岩层裂结构形成及冲击失稳机理分析	101
5.1	冲击矿压的层裂板模型研究	101
5.2	应力波作用下围岩层裂结构形成的机理	102
5.3	应力波导致围岩层裂结构及 冲击破坏的数值模拟	108
5.4	本章小结	129
6	应力波诱发冲击矿压的物理模拟	131
6.1	试验概述	131
6.2	相似材料及模拟试验	132
6.3	材料性质对应力波传播的影响	138
6.4	垂直方向不同装药距离爆破对 巷道围岩破坏的影响	143
6.5	水平方向不同装药距离爆破对 巷道围岩破坏的影响	145
6.6	本章小结	147
7	工程实例分析	148
7.1	某矿的生产和地质概况	148
7.2	冲击矿压事故实况	150
7.3	冲击矿压发生的原因分析	151
7.4	应力波诱发冲击矿压的防治措施	154
7.5	本章小结	157

8 结论与展望	158
8.1 主要结论	158
8.2 进一步研究的展望	160
参考文献.....	162

1 绪 论

1.1 研究的目的是与意义

煤矿冲击矿压又称煤爆,它是一种发生在井巷或采煤工作面围岩(煤)体内,以突然、急剧、猛烈破坏为特征的动力现象。常伴有巨大声响和冲击波。一般认为冲击矿压是围岩应力集中导致裂隙发育形成的围岩结构在变形运动过程中其弹性贮能在时间上的非稳定释放和在空间上的非均匀释放的非线性动力失稳过程,它是围岩物理力学性质的综合反映及围岩结构系统对外界扰动的动态响应。冲击矿压的发生不仅影响采掘进度,而且常常威胁到采掘人员及机具的安全,因而,受到人们的普遍关注。

我国的能源结构仍以煤为主。随着煤炭工业现代化开采速度的提高,开采的深度迅速加大,冲击矿压也变得日趋严重。例如徐州矿区在 500 m 采深前,从没有出现过冲击矿压现象;当采深进入 600 m 以后,经常发生冲击矿压,对煤矿生产造成了严重的影响。对煤矿冲击矿压准确预测、预报的要求已显得极为迫切。矿压专家预言,冲击矿压问题将成为“21 世纪矿压研究的焦点”,也给冲击矿压理论与防治研究提出了严峻的挑战。

1.1.1 国内外煤矿冲击矿压灾害的概述

冲击矿压危害几乎遍布世界各采矿国家和地区。世界上第

一次有记载的冲击矿压发生在 1738 年英国的南史塔福煤田。之后前苏联、南非、德国、波兰、美国、加拿大等都曾发生冲击矿压事故。

在波兰,冲击矿压已成为煤矿重大灾害之一,全国 67 个煤矿中 36 个煤矿具有冲击矿压危险,约占 54%。大约 50% 的煤产量采自有冲击危险的煤层。20 世纪 40 年代煤矿发生的冲击矿压最多,1949 年发生 350 次冲击矿压。1950~1960 年期间,平均每年发生 226 次,而以后的各年里,每年大约发生 20 次冲击矿压。1949~1982 年共发生破坏性冲击矿压 3 097 次,造成 401 人死亡, 1.2×10^5 m 井巷被破坏。

冲击矿压对德国采矿业的危害非常严重,图 1-1 为德国北莱茵—威斯特法伦州 1953~1980 年硬煤矿井伤亡事故的发生情况,虽然总的事故数从 1953 年的 604 次降到 1980 年的 62 次,冲击矿压和冒顶事故从 225 次降到 15 次,但冲击矿压在一定程度上更为严重了。

我国煤矿冲击矿压灾害也极为严重。1933 年抚顺胜利矿发生的煤矿冲击矿压是我国最早有记录的冲击矿压。之后,随着开采深度的增加和采掘范围的扩大,北京矿务局的门头沟、城子、房山等六个矿井和坑口,抚顺矿务局龙凤矿和老虎台矿,枣庄矿务局的陶庄矿、八一矿,开滦矿务局的唐山矿,阜新矿务局的高德矿、五龙矿以及四川天池煤矿等都发生了冲击矿压。截至 1985 年的不完全统计,我国有冲击矿压危险的煤矿达到 32 个,其中统配煤矿 27 个,隶属于 14 个矿务局,地方矿 5 个。已发生的破坏性冲击矿压 1 800 多次,震级从里氏 0.5 级至 3.8 级,造成严重的危害,伤亡数百人,破坏巷道约 13 km,停产 1 300 多天。1985 年以后,新汶、义马、松藻等矿务局也相继出现冲击矿压现象。同时我国一些金属矿山(如锡矿山矿、杨家杖子矿、青城子矿等)、水电和铁路隧道工程(如成昆铁路北段关村坝隧道、天生桥二级水电站引水隧道等)也出现了冲击矿压

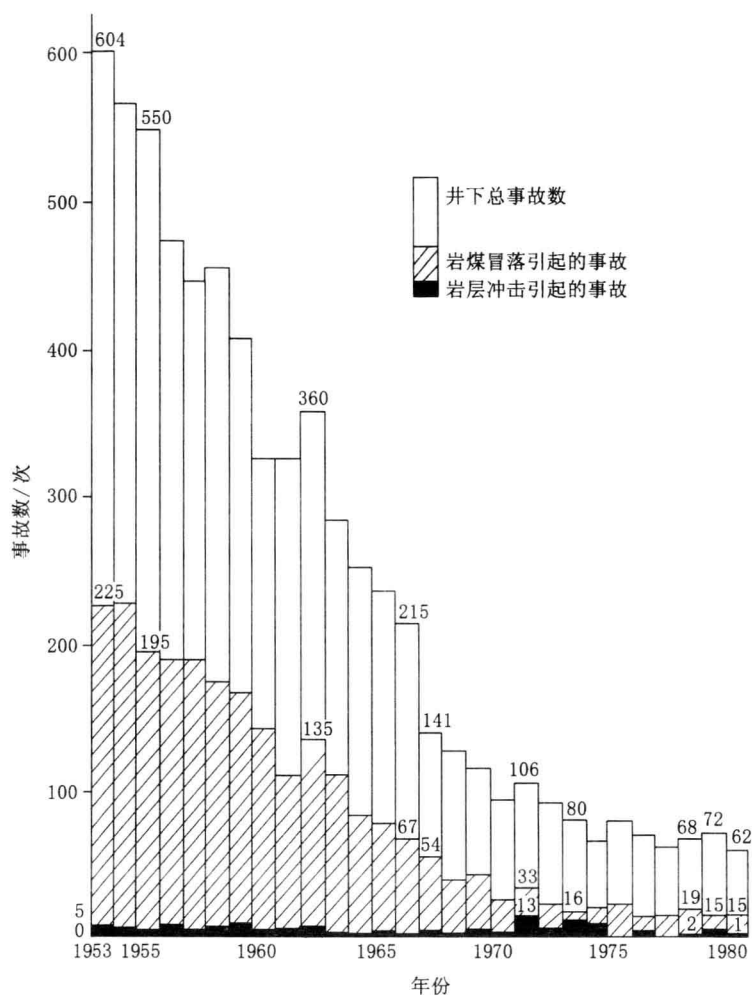


图 1-1 德国冲击矿压事故的发生情况

(岩爆)现象,甚至在露天矿或采石场也发生了冲击矿压。表 1-1 给出了 1994 年之前我国煤矿冲击矿压统计情况(不完全统计)。

表 1-1 我国煤矿冲击矿压统计情况

矿务局、 集团、公司	矿	初始 时间	冲击 次数	最大 震级	矿务局、 集团、公司	矿	初始 时间	冲击 次数	最大 震级
鸡西	滴道	1983-09	9		大同	忻州窑	1981-01	35	
鹤岗	南山	1981-03	5			煤峪口	1972-04	7	
舒兰	营城	1962-01				永定庄	1962-06	16	
辽源	西安	1954-01	266		枣庄	陶庄	1976-01	146	3.6
通化	铁厂		4			八一	1976-01	6	
抚顺	龙凤	1975-01	675	2.5		柴里		1	
	老虎台	1955-01	30	3.7	南桐	砚石台	1979-08	19	
	胜利	1933-01	44			南桐	1962-01		
阜新	高德	1978-01			义马	千秋	1988-01	7	
	五龙	1959-01			天池矿业集团	天池	1959-10	37	
	东梁					五一	1980-12	10	
北票	台吉	1970-05	64	3.8		擂鼓	1981-03	10	
沈阳	牛心台	1972-09	57			花鼓山	1984-09	2	
北京	门头沟	1947-05	288	3.8		冰沟			
	城子	1961-01	14	3.4	大屯煤电公司	姚桥	1993-01	4	
	房山	1958-12	17	3.0	徐州	三河尖	1991-01	102	
	长沟峪	1970-01	1			旗山	1991-07	45	
	大台	1961-01	7			孔庄			
	木城涧	1970-01				权台	1991-07		
开滦	唐山	1963-01	46		新汶	华丰	1991-01	102	

我国煤矿发生冲击矿压的矿井数量逐年增多,灾害程度逐渐加重。20 世纪 50 年代以前只有两个矿井发生了冲击矿压。50 年代增加到 7 个,60 年代为 12 个,70 年代达到 22 个,进入 80 年代后期,猛增到 50 多个。随着开采深度的增加和开采范围的扩大,近年来,虽然采取了不少措施,但冲击矿压的次数并未明显减少。根据粗略统计,共发生破坏性冲击矿压 2 000 余次,伤亡数百人,破坏生产巷道近 20 km。随着我国煤炭生产的发展,矿井开采深度正在以每年 10 m 的速度增加,伴随而来的是冲击矿压灾害的日益严重。图 1-2 为我国部分煤矿发生冲击矿压次数与采深的关系,图 1-3 为波兰煤矿发生冲击矿压次数与采深的关系。从这两个图中可以看出采深越深发生冲击矿压的可能性越大。

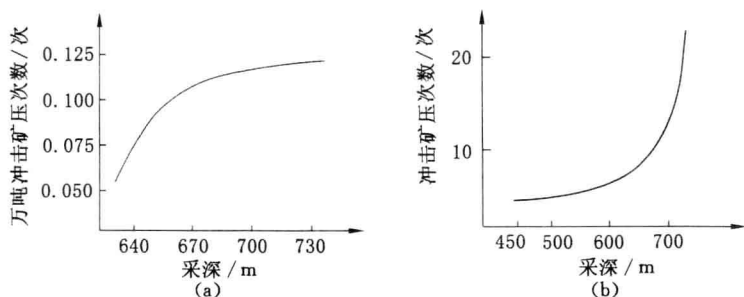


图 1-2 我国部分煤矿发生冲击矿压与采深的关系

(a) 龙凤矿; (b) 胜利矿

1.1.2 煤矿冲击矿压发生的影响因素

冲击矿压的影响因素可归结为两大类:自然地质条件 and 生产技术因素。这两个方面不是相互独立而是相互影响的,其共同作用导致冲击矿压的发生。地质条件包括岩性、地应力大小和方向、矿床赋存厚度和倾角、埋深、地下水、地质构造、岩层组合形式等;生产技术因素包括采矿方法、开采顺序、矿压控制方法(包括煤柱

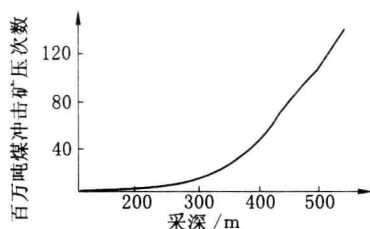


图 1-3 波兰煤矿冲击矿压与采深的关系

留设、充填、空场等)、采掘进度、开挖面的形状和尺寸、工程(生产)爆破等。

在生产技术因素中,不适当的矿压控制方法(如顶板断裂方式)和工程(生产)爆破常诱发冲击矿压,这主要是由于顶板破断和爆破产生的应力波导致巷道和采场围岩裂隙迅速扩展而形成局部失稳。

事例 1 图 1-4 为三河尖矿 7125 材料道的冲击矿压位置示意图(1993 年 5 月 25 日)。在冲击矿压发生区域,巷道发生明显变形,底鼓严重。此次破坏范围达 80 m,破坏最为严重区域距工作面只有 14 m。分析发生这次冲击的主要原因:① 7123 工作面开采结束后,顶板垮落引起冲击,特别是 7125 材料道正处于 7123 工作面顶板垮落形成的冲击波影响范围之内。② 7125 工作面煤层及顶板坚硬且性脆,具有积蓄大量弹性能的能力。③ 冲击发生点正处于工作面前方支承压力显著影响范围之内,使得煤(岩)体的应力更加集中。因而认为是由于冲击点附近应力集中及 7123 工作面顶板垮落共同作用,发生了本次冲击矿压。

事例 2 图 1-5 为孔庄矿 8217 工作面 600 平巷,在采 500 平巷爆破时,突然发生冲击矿压,其特征为巨响,瞬间产生强烈暴风,造成煤(岩)体强烈震动和煤(岩)体移动,巷道变形严重,底鼓达

800 mm,少数巷道上帮支架的卡子被崩掉,回柱绞车从巷道上帮被掀到下帮。在此工作的人员被弹起,头顶到顶板并从上帮掀到下帮,造成多人受伤。分析 8217 水采面冲击矿压发生的原因,主要为:① 采深较大,达 550 m;② 水采巷道布置的特殊性造成应力集中;③ 上部工作面的影响;④ 500 平巷的爆破诱发;⑤ 顶板结构特征及其运动。

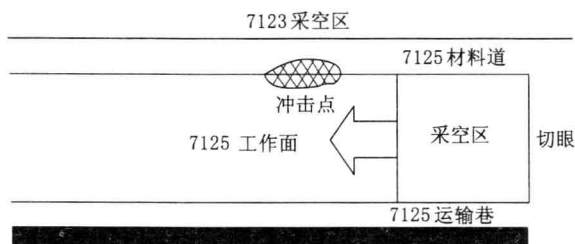


图 1-4 1993 年 5 月 25 日冲击矿压发生区域

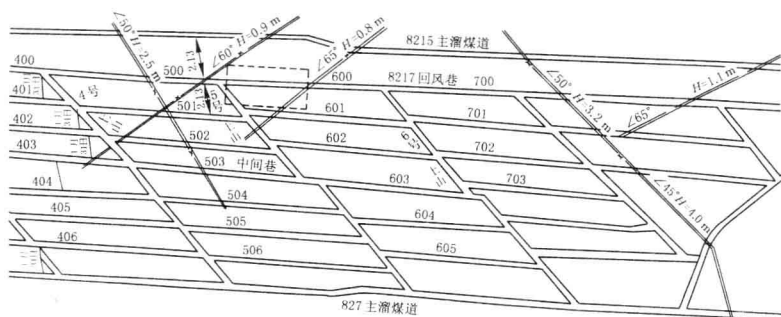


图 1-5 孔庄矿 8217 水采面冲击矿压发生区域

事例 3 北京门头沟煤矿发生的 412 次破坏性较大的冲击矿压事故中 80% 发生在爆破作业 40 min 之内;在铜陵有色金属公司狮子山铜矿冬瓜山铜矿床的冲击矿压调查发现冲击矿压发生集

中在爆破作业以后一段时间,大约是一个工班内,超过一个工班后就很少发生。

此外,天然地震也是诱发冲击矿压的一个重要的动力因素。现以门头沟矿为例,图 1-6 为门头沟矿冲击矿压发生次数与时间关系,图 1-7 为门头沟矿附近天然地震时间分布图。从这两个图中可以看出门头沟矿的冲击矿压在总体趋势上是增加的,在进入 20 世纪 80 年代后,冲击矿压发生的频次在 1984 年达到峰值后,出现异常相对平静时期,而在 90 年代出现新高。而从图 1-7 门头沟附近的天然地震分布情况可以看出,地震在 1988 年以后有一段平静期,在进入 90 年代后地震频次出现了明显的变化,其变化趋势基本与冲击矿压的变化趋势相同。

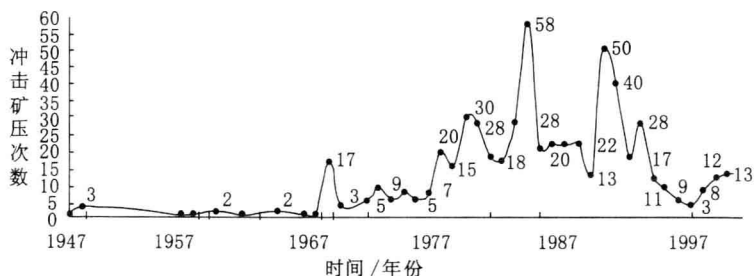


图 1-6 门头沟矿冲击矿压发生次数与时间的关系

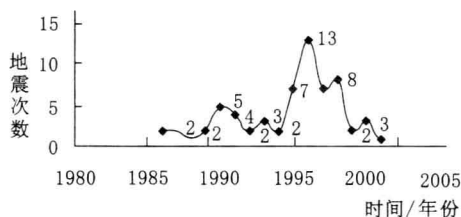


图 1-7 门头沟矿附近天然地震时间分布图

从上面的分析中可以看出,爆破、顶板断裂及地震波形成的冲击作用都可以归结为应力波对冲击矿压的诱发作用。

1.1.3 冲击矿压动力学机理研究的意义

冲击矿压是煤矿开采期间发生的一种突发性地质灾害,其研究可概括为机理研究和防治对策研究两个方面,前者是后者的基础。而机理研究实质上就是对各种冲击矿压现象提出合理的解释。

由于现有理论的不完善,以此为基础的预报体系及控制技术还不能对冲击矿压灾害进行准确预报和有效控制。岩石静力学理论在冲击矿压研究中是重要的,但它还不能阐明冲击矿压发生的全部机理。煤矿的采掘活动总离不开矿山爆破、煤岩运输、机械运转等采矿活动。可以认为整个采矿过程都伴随着应力波的产生,这些应力波由于振源种类的多样性与振源位置的不确定性,必然在岩层中相互干涉叠加,这对于围岩尤其是具有自由表面的围岩的扰动作用应该是显著的。围岩也许不会在上述动荷载的一次作用下就发生宏观破坏,但这些应力波的多次扰动,却会在微观—细观尺度上引起围岩累积性损伤的加剧与局部应力环境的恶化,并最终导致裂纹的瞬时动力扩展,伴随晶间、粒间瞬态应变能的高速释放,围岩便会以冲击矿压的形式破坏。煤矿开挖过程中所产生的各类应力波的传播、叠加,特别是在具有高应力围岩中的传播其围岩动力响应是十分复杂的过程,既有的岩石动力学理论是解决这些问题的基础,但还不能解决与冲击矿压机理有关的所有岩石动力学问题。因此,系统地进行冲击矿压灾害的岩石动力学机理研究将具有重要的理论意义和现实的工程价值。

要从根本上认识应力波诱发冲击矿压的动力学机理,确保煤矿安全生产,就必须综合运用现代数学、物理、力学、地质学、采矿学等学科的新理论和新成果。因此,在冲击矿压动力学机理的研