

国家重点研发计划项目(2016YFC0801403)

国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB226805)

国家科技支撑计划项目(2006BAK04B02,2012BAK09B01)

国家自然科学基金和神华集团有限公司联合资助项目(51174285)

国家自然科学基金项目(50474068,51674253,51204165,51404269)

中波政府间合作项目(31-07A)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目

采矿地球物理学

矿山震动

窦林名 曹安业 巩思园 蔡 武 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家重点研发计划项目(2016YFC0801403)

国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB226805)

国家科技支撑计划项目(2006BAK04B02,2012BAK09B01)

国家自然科学基金和神华集团有限公司联合资助项目(51174285)

国家自然科学基金项目(50474068,51674253,51204165,51404269)

中波政府间合作项目(31-07A)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目

采矿地球物理学 矿山震动

窦林名 曹安业 著
巩思园 蔡武

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

采矿地球物理学是采矿科学中的一个新的分支,是利用岩体中自然的或人工激发的物理场来监测岩体动态变化和揭露已有地质构造的一门学科。本书从矿山震动监测这一角度出发,具体介绍了矿震监测仪器、定位及能量计算原理与方法,研究了矿震监测台网的优化布置原理、矿震震动波特征、采动煤岩冲击破裂的震动效应、矿山开采诱发矿震的活动规律、矿震与冲击的监测预警、震动波 CT 技术以及矿震冲击远程监测技术及其在采矿生产实践中的应用。

本书可供从事采矿地球物理、煤岩动力灾害、矿山震动、冲击矿压等研究领域的科技工作者、研究生、本科生、工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

采矿地球物理学矿山震动/窦林名等著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2016. 11(2017. 10 重印)

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3344 - 8

I. ①采… II. ①窦… III. ①矿山开采—地震监测—研究 IV. ①TD8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 271180 号

书 名 采矿地球物理学矿山震动

著 者 窦林名 曹安业 巩思园 蔡 武

责任编辑 王美柱

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 13.5 字数 337 千字

版次印次 2016 年 11 月第 1 版 2017 年 10 月第 2 次印刷

定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

采矿地球物理学是采矿科学的一个新的分支,是利用岩体中自然的或人工激发的物理场来监测岩体动态变化和揭露已有地质构造的一门学科。采矿地球物理的范畴,包括采用所有的地球物理方法来研究与矿山开采有关的岩体物理活动过程和现象,特别是研究矿产资源的高效、安全开采。要安全、高效地开采矿物,首先必须详细了解矿床的赋存状况,如煤层的厚度、倾角等;其次要揭露和确定矿床周围的地质构造,以便进行矿床开采和解决与之有关的灾害问题,如冲击矿压、煤与瓦斯突出等矿山动力现象等。

一些特殊的采矿地质问题可用采矿地球物理方法来解决,例如,与大地震相类似的矿山震动现象的研究;岩体中弹性波传播过程的研究可采用采矿地球物理学中的微震方法、振动方法和声发射方法。从历史来看,采矿地球物理方法首先在世界上最深的矿井中用来观测矿山震动现象。1908年南非在Bochum建立了世界上第一台微震观测仪器,其任务是观测和记录矿山震动。结果表明,震动与矿山开采、岩柱的破裂、损坏有关。从那时起到现在,世界各采矿国家均在不同程度地使用采矿地球物理方法研究和预测岩体的震动和破坏,地质构造的变化等问题。

目前,矿震冲击矿压常用的监测预警方法可归结为以下三类:第一类是经验类比法,主要有综合指数法、计算机数值模拟法和多因素耦合法等;第二类是煤岩应力状态监测法,包括钻屑法、煤岩体变形观察法(顶板动态、围岩变形)、煤岩体应力测量法(相对应力和绝对应力测量);第三类是采矿地球物理监测法,包括微震监测法、电磁辐射法、声发射法、声波探测法等方法,它们都是根据连续记录煤岩体内出现的动力现象,预测煤矿动力现象危险状态。

前两类方法在我国应用广泛,对冲击矿压的监测预报发挥了重要作用,但也暴露了很多问题,如经验类比法主要应用于矿井设计和开拓准备阶段的早期评估,在实际生产阶段适用性不强;传统煤体应力状态监测法则劳动量大,难以实现连续、大范围监测,精度不高。随着科技进步,各学科的不断融合,地球物理方法发展迅速。该方法具有不损伤煤体、劳动强度小、实时、连续、动态、非接触监测等优点,在国内外煤岩动力灾害监测、预测预报中具有很大的应用前景,尤其是矿山震动的微震监测能够对全矿范围进行实时监测,是一种区域性、及时监测方法,该方法目前被公认为煤岩动力灾害监测最有效和最有发展潜力的

监测方法之一。因此,本书涉及的内容主要为采矿地球物理方法中的矿山震动监测在冲击矿压监测预警中的应用。

本书是在广泛参阅前人研究成果的基础上,根据笔者在采矿地球物理方面的研究成果与工程实践的基础上完成的。本书从矿山震动监测这一角度出发,具体介绍矿震监测仪器、定位及能量计算原理与方法,研究矿震监测台网的优化布置原理、矿震震动波特征、采动煤岩冲击破裂的震动效应、矿山开采诱发矿震的活动规律、矿震与冲击的监测预警、震动波 CT 技术以及矿震冲击远程监测技术及其在采矿生产实践中的应用。

全书共分 10 章,第 1 章简要介绍矿震的概念及其研究现状,以及矿震与冲击矿压的关系及其对环境的影响;第 2 章介绍矿震监测仪器及其监测原理;第 3 章介绍微震监测台网布设的重要性、台网优化布置原则、优化方案理论求解的算法和模型及其在煤矿微震监测中的应用;第 4 章介绍矿震定位及能量计算的原理和方法;第 5、6 章分别介绍矿震震动波特征及其在煤岩体中的传播衰减规律和采动煤岩体冲击破裂的震动效应;第 7、8 章主要介绍矿山开采诱发矿震的活动规律和矿震与冲击的监测预警技术;第 9 章介绍煤岩变形破裂的声波探测理论与矿震震动波 CT 技术及其在煤矿冲击矿压预测中的应用;第 10 章介绍矿震冲击远程监测网络体系框架及其建设。

本书是作者负责和承担的国家重点基础研究发展计划(973 项目)“深部煤岩动力灾害的前兆信息特征与监测预警理论”(项目编号:2010CB226805),国家重点研发计划项目(项目编号:2016YFC0801403),国家科技支撑计划项目“采动动力灾害监测、预警与控制关键技术”(项目编号:2006BAK04B02)、“岩爆与突出动力灾害监测预警关键技术研究”(项目编号:2012BAK09B01),国家自然科学基金和神华集团有限公司联合资助项目“采动动载对煤巷锚网支护结构稳定性损伤机理研究”(项目编号:51174285),国家自然科学基金项目“坚硬顶板诱发冲击矿压机理及其预测研究”(项目编号:50474068)、“煤巷开掘加卸载路径下的冲击孕育机理与危险性判识”(项目编号:51674253)、“深部动压扰动下煤体致裂诱冲机理的试验研究”(项目编号:51204165)、“基于矿山被动 CT 监测的矿震冲击危险预警基础研究”(编号:51404269),中波政府间合作项目“采动覆岩运动型冲击矿压机理及防治研究”(项目编号:31-07A),江苏省高校优势学科建设工程资助项目,中国矿业大学“211 工程”三期创新人才培养项目等课题研究成果的整理和总结。

本书的编写,参阅了大量的国内外有关采矿地球物理方面的专业文献,谨向文献的作者表示感谢。衷心感谢 Bernard Drzezla 教授, Jozef Bubinski 教授, Wladyslaw Konopko 教授, Jozef Kabiesz 教授, Adam Lurka 教授, Grzegorz Mutke 教授的指导和帮助。衷心感谢钱鸣高院士,周世宁院士,谢和平院士,彭

苏萍院士,袁亮院士,何满潮院士,蔡美峰院士,岑传鸿教授,何学秋教授,姜耀东教授,潘一山教授,鞠杨教授,周宏伟教授,王金安教授,纪洪广教授,姜福兴教授,刘长武教授,王思元教授,齐庆新研究员,李世海研究员等老师、朋友的关心和指导。同时感谢中国矿业大学矿业工程学院,煤炭资源与安全开采国家重点实验室,四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,华亭煤业集团,兖州煤业集团,徐州矿务集团,义马煤业集团,鹤岗煤业集团,大同煤业集团,淮北煤业集团,大同煤电公司,抚顺煤业集团等单位的大力支持,本书中的许多实验室试验、现场试验和测试内容都是在这些单位完成的。感谢冲击矿压课题组的牟宗龙教授、陆莱平教授、刘海顺教授、贺虎副教授、王桂峰副研究员、何江老师、范军老师等在课题研究 with 成果总结等方面的付出与帮助。感谢课题组博士研究生李振雷、朱光安、沈威、王正义、张敏、刘广建、刘志刚及硕士研究生江衡、杜涛涛、陆振裕、卢新伟、王国瑞、郭晓强、吕长国、高京龙、孙兴林、刘礼鹏、刘辉、李许伟、乔秋秋、谢龙、刘阳、苏振国、王天柱、陈建君、张智勇、王志康、卢昊等同学们,由于他们在书稿的文字录入、绘图排版和校对等方面的辛勤劳动,使得本书得以尽快出版与大家见面。

本书有许多关于采矿地球物理方面的新思想和新观念,其中某些有待于进行更深入细致的研究。由于作者水平所限,书中难免有不足之处,敬请读者不吝指正。

著 者

2015 年 12 月

目 录

1	矿震概述	1
1.1	矿震的概念	1
1.2	矿震与冲击矿压	2
1.3	矿震对环境的影响	4
1.4	矿震研究现状	10
2	矿震监测仪器及原理	13
2.1	矿震监测	13
2.2	仪器监测要求	14
2.3	仪器监测原理	16
3	微震监测台网优化布置	23
3.1	台网布置的重要性	23
3.2	监测区域和台网候选点确定原则	24
3.3	台网布置方案的理论求解	25
3.4	台网布置方案评价	26
3.5	微震台网布置的现场应用	28
4	矿震定位与能量计算	35
4.1	波形的选取	35
4.2	矿震定位原理	36
4.3	矿震能量的计算	40
4.4	矿震震动能量与震级对应关系分析	42
5	矿震震动波特征	44
5.1	震动试验测试系统	44
5.2	冲击震动波波形特征	44
5.3	震动波传播的衰减规律	46
5.4	震动波频谱特征	54
5.5	震动波波形图示例	59

6	采动煤岩冲击破裂的震动效应	63
6.1	采动煤岩诱发矿震的震动位移波场特征分析	63
6.2	煤岩冲击破裂微震特征的实验研究	73
6.3	采动煤岩震源破裂机理的矩张量反演分析	81
6.4	冲击震动波在采动煤岩体中传播的微震效应研究	86
6.5	矿震动载的冲击破坏效应及其影响因素分析	91
7	矿山开采诱发矿震的活动规律	98
7.1	采掘工作面的冲击矿震规律	98
7.2	覆岩关键层破断及其诱发矿震规律	105
7.3	深孔断顶及周期来压与矿震规律	111
7.4	开采与掘进相互影响区域的矿震规律	112
7.5	矿震活动性与开采速度的关系	114
7.6	矿震活动性与开采作业的关系	115
7.7	断层附近采掘活动诱发的矿震活动规律	118
7.8	工作面过褶曲时矿震活动规律	119
7.9	巨厚火成岩下开采的矿震活动规律	121
8	矿震与冲击的监测预警	124
8.1	冲击矿压的微震前兆规律/信息	124
8.2	矿震冲击危险预警模型及参量选取	141
8.3	冲击矿压的监测预警	151
8.4	矿震与冲击的监测预警实例	154
9	冲击矿压震动波 CT 预测技术	160
9.1	煤岩样受载与纵波波速的试验研究	160
9.2	震动波 CT 模型和求解原理	161
9.3	提高震动波 CT 输入数据精度的研究	162
9.4	震动波 CT 预测技术的理论基础及评价指标	169
9.5	震动波 CT 技术预测冲击危险实践	172
10	矿震冲击远程监测网	190
10.1	矿井矿震监测台网建设	190
10.2	矿震远程平台整体框架	191
10.3	矿震远程平台客户端与服务端软件编制	193
10.4	冲击矿压危险专家诊断系统	196
	参考文献	197

1 矿震概述

1.1 矿震的概念

矿震即矿山地震,是矿山开采引起的地震活动(S. J. Gibowicz et al., 1994; 张少泉等, 1993a)。采矿诱发震动与天然地震类似,都是岩体应力释放产生的震动,但矿震具有其特点。地震是构造应力作用下断层活动引起的大地强烈震动,震源一般较深,浅则几千米,深则几十千米甚至上百千米;而矿震则主要是人为开采矿产资源引起的开采区域及附近煤岩体的震动。

根据煤矿地质资料分析,煤矿矿震发生的主要因素有采深、褶曲、断层、煤柱等。这些因素导致矿震发生具有其本身的力学机理,而最为直接的是这些因素往往导致高应力以及高应力差。高应力、高应力差是导致煤岩体破坏以及失稳的直接原因,若煤岩体本身存在诸如断层、巷道表面等结构弱面,则煤岩体极易产生运动,此时的煤岩体处于极限平衡状态。这种平衡是非稳定的平衡,当遇到开采活动的扰动,平衡会被打破,随即产生矿山震动,即为矿震。

总体而言,矿山震动具有如下特点:

- (1) 震动能量从 10^2 J(较弱)到 10^{10} J(较强),对应里氏震级 0~4.5 级;
- (2) 振动频率大约 0~50 Hz;
- (3) 振动范围从弱的几百米到强的几百甚至几千千米。

从类型上讲,矿山震动是一种高能量的震动,而较弱一些的如声响、煤炮、小范围的变形卸压,则属于声发射研究的范围。

矿山微震主要是记录矿山震动活动,对其进行有目的的解释。分析和利用这些记录的信息,对矿山动力危险,如冲击矿压进行预测和预报。总的来说,震动现象是由于矿山开采使岩层产生应力应变过程的动力现象,具有如下特征:

根据 Gurteneberg-Richter 方程,随着震动能量的增加,震动数量呈对数下降。

$$\log N(E) = a - b \log E \quad (1-1-1)$$

式中 E ——震动能量;

$N(E)$ ——该震动能量下的震动数量;

a, b ——常数,其中,系数 b 表征的是单位时间内震动强度下降的速率。

由于矿山开采中会出现如下动力现象,故采用震动方法对其进行监测和预警:

- (1) 开采应力随时间形成和重新分布;
- (2) 开采后上覆岩层结构破坏;
- (3) 坚硬致密顶板岩层变形;

(4) 顶板岩层下沉。

衡量矿山震动程度的大小是采用单位时间内矿山震动的频次和震动能量,是由井巷周围煤岩体的变形体系确定的,是工作面布置方式和岩体结构构造影响的结果。例如:

- (1) 开采边界和邻近层的残采区;
- (2) 地质构造,如断层;
- (3) 工作面前方的巷道、煤柱、老空区等。

上述结构构造的变化,引起应力场的变化,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。

1.2 矿震与冲击矿压

矿震是各类诱发地震中危害性最大的一种,直接关系到矿山的安全问题。矿震也是深层采矿作业中最难掌握的现象,世界上许多国家都开展了对矿震的研究,以求经常性地预测较大的矿震事件。

矿震是矿区内在区域应力场和采矿活动作用影响下,采区及周围应力处于失调不稳的异常状态,在局部地区积累了一定的能量后以冲击或重力等作用方式释放出来而产生的岩层震动。在矿震较强烈的情况下,在地面都能感觉到岩体的震动,甚至使地面的建筑物遭到破坏。在特殊情况下,矿震就是冲击矿压,可造成巷道、工作面的突然损坏和破坏,人员的伤亡。

按矿震发生地点,矿震分为发生在开采面附近的矿震和发生在地质不连续面的矿震。发生在开采面附近的矿震和采矿率有关,其能量来源于自重,多发生在煤柱处,所以有时也称为压力型矿震。当开采引起的附加应力与构造应力相互作用时,如果引起断裂面的重新滑移,即是发生在地质不连续面的矿震,由于与构造应力有关,有时也称为构造型矿震。构造型矿震震级一般较大,南非的克莱克斯多普金矿被一条大的正断层错断,其错断处曾发生过 5.2 级矿震。

按矿山类型分,矿震分为煤矿中的矿震、钾盐矿中的矿震、金属矿中的矿震。矿山类型不同,震源机制也不同,表现出的特征亦不同。煤矿中的矿震主要是煤体内弹性能高度集中,超过了煤体强度。煤矿中的矿震,往往在接近较大矿震时,微震活动急剧变化,甚至平静。钾盐矿属于一种在采矿应力作用下迅速变软的软岩,应力可以通过黏滞变形而减小,以无震级形式逐渐消耗位能,只有当弹性变形大于蠕变变形时,才有可能发生矿震。因此,钾盐矿中的矿震震级一般都很小。金属矿中矿震的成因更多的是断层活动的参与,震级一般较大,其特征更接近天然地震。

按矿震成因分,矿震分为煤(矿)柱冲击型矿震、顶板冒落型矿震、顶板开裂型矿震、断层活动型矿震。在实际中,这几种矿震往往伴随发生,如当出现大面积悬顶并久悬不落时,可能会出现顶板冒落和顶板开裂,如果附近存在矿柱或断层,则很可能发生煤(矿)柱冲击和断层活动。

矿震主要发生在地质构造比较复杂、地应力(构造应力)较大、断裂活动比较显著的矿区。在我国,发生矿震并构成灾害的矿区有北京、新汶、抚顺、北票、大同、华亭、鹤岗、七台河、阜新、徐州等矿区。例如,在抚顺矿区,现在每年矿震(地震台能记录到的矿震)次数达

3 000~4 500 次,最大震级为 M_L 3.3 级;北京在门头沟矿自 1947 年首次测到 M_L 3.8 级矿震以来,随着开采深度的不断增加,矿震频度和能量均显著增加,最大矿震达 M_L 4.2 级,北京市部分地区均有明显震感;新汶矿区现开采深度达 700~1 000 m,矿震现象已十分突出,每年发生的矿震达 100 余次,地面震感强烈,影响范围可达 10 km 以上。

冲击矿压是严重威胁矿井安全生产的煤岩动力灾害现象之一,德国、南非、前苏联、美国、波兰、日本和我国等世界上主要的采矿国家都发生过冲击矿压。在我国有近 50 对大中型矿井发生过冲击矿压,而且随着矿井开采深度的不断增加,冲击矿压的危险和危害也日趋严重,冲击矿压的机理极其复杂,影响因素众多。

冲击矿压以其突然、急剧、猛烈的破坏特征对煤矿、金属矿井、隧道等的正常生产轻则构成严重影响,重则造成巨大的经济损失和人员伤亡。随着井工矿开采深度的增加,冲击矿压的危险也在逐步增加。原来没有发生过冲击矿压的矿井,现在也开始发生;原来发生过冲击矿压的矿井,现在冲击发生的强度越来越大,次数越来越多。

煤矿发生冲击矿压的特征是:一是突然性,主要表现为冲击矿压发生前没有明显的征兆;二是瞬时性,主要表现为发生过程极为短暂,一般持续时间为 10 s 以内;三是破坏性,表现为煤层冲击、顶板冲击、底板冲击等相互组合,片帮和煤炭抛出,顶板断裂下沉、底鼓、破坏巷道支护,造成人员伤亡,而且在各种采矿和地质条件下均发生过冲击矿压。

矿山震动会引发冲击矿压和岩体卸压。在矿山震动较强烈的情况下,在地面都能感觉到岩体的震动,甚至使地面的建筑物遭到破坏。在特殊情况下,矿山震动就是冲击矿压,造成巷道、工作面的突然损坏和破坏,人员的伤亡。

岩体卸压可以理解为冲击矿压的下限,是岩体振动,地音及井巷周围岩体破断的结果。岩体卸压只是造成巷道压缩,支架变形,岩体破碎等。一次卸压不会破坏巷道的作用和功能,但多次卸压后,巷道就需要部分修复。图 1-2-1 为岩体内产生的动力现象及其之间的因果关系。

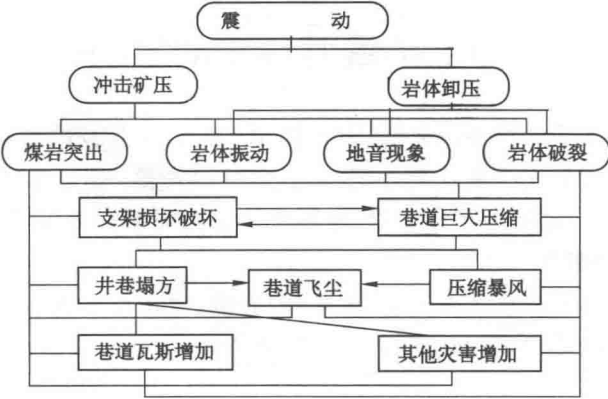


图 1-2-1 岩体内产生的动力现象及其之间的因果关系

研究表明,开采区域内的矿震都是开采活动引起的;每个能量等级每年出现的震动次数是不同的。能量级越高,震动出现的频率就越低;能量级越低,震动出现的频率就越大。图 1-2-2 表示波兰某矿震动出现的频率 n 与能量级 E 之间的关系(J. Dubinski et al., 2000)。

震动频率与能量等级之间可用下式表示:

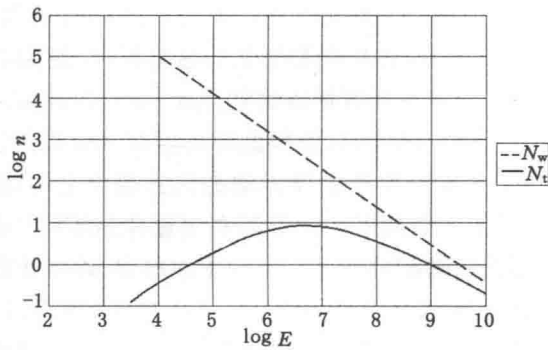


图 1-2-2 震动和冲击矿压频次与能量关系

$$\log n = a \log E + b \tag{1-2-1}$$

式中 a, b ——方程系数。

因此,冲击矿压是矿山震动的一种形式,矿山震动和冲击矿压的基本关系为(J. Kornowski et al., 2012; 窦林名等, 1999; 齐庆新等, 2003):

- (1) 冲击矿压是矿山震动的事件集合之一;
- (2) 冲击矿压是岩体震动集合中的子集;
- (3) 每一次冲击矿压的发生都与岩体震动有关,但并非每一次岩体震动都会引发冲击矿压。

研究表明,冲击矿压的发生和煤岩体内的震动事件有很密切的关系。发生冲击矿压的可能性和震动的能量有很大关系,震动的能量越大,发生冲击矿压的可能性就越大。从冲击矿压与岩体震动的关系来看,发生冲击矿压的最低能量为 1×10^4 J;在能量级别为 1×10^6 J 时,发生的冲击矿压最多;当震动能量为 4×10^{10} J 时,其概率几乎为 1。

1.3 矿震对环境的影响

在采矿巷道中发生震动和冲击矿压,会引起:① 巷道、工作面的破坏,人员的伤亡,其主要原因是震动波传播过程中动载荷脉冲的冲击,使煤层垮落,动力抛出煤岩体。② 在冲击矿压区域人员伤亡,但巷道损坏不大。③ 在较大能量的震动和冲击矿压发生时,地表产生振动,使建筑物产生裂缝甚至倒塌。

下面分别就震动和冲击矿压对井巷(矿井)的影响,对矿工的影响以及对地表建筑物的影响等三个方面加以叙述(J. Dubinski et al., 1995, 2000)。

1.3.1 对井下巷道的影响

冲击矿压对井下巷道的影响主要是动力将煤岩抛向巷道,破坏巷道周围煤岩的结构及支护系统,使其失去功能。而一些小的冲击矿压或者岩体卸压,则对巷道的破坏不大,可造成巷道壁局部破坏、剥落或巷道支架部分损坏。应当确定,当矿山震动较小,或震中距巷道较远时,不会对巷道产生任何损坏。

采矿坑道和支架是一个支护系统,用来支撑一定的静载和动载,即抵抗由振动速度、加

速度及主频率引起的地震力。

研究表明,震源处于巷道附近,即在近距离波场,对巷道的影响是非常大的,其特点是:

(1) 振动的主频率为几十甚至到 100 Hz,它与震动能量大小呈一定的比例,即震动小,频率高;震动强,频率低。

(2) 振动速度的高峰幅值 PPV 为几十到几百 mm/s。

(3) 振动加速度的高峰幅值 PPA 为 50~200 mm/s²。

(4) 煤壁裂缝带起强化振动幅值的作用。

图 1-3-1 为震动能量 10^5 J,距震源 130 m 的近距离波场记录到的信号。

研究表明,在震源发生震动后,会产生压力降,对于波兰上西里地区的矿井,其压力降通常不超过 10 MPa,有的也能达到 20~30 MPa。对于小震动,对巷道不产生破坏,其压力降一般为 0.1~1.0 MPa。因此,震源的压力降与巷道破坏之间存在着一定的关系,而压力降可通过测量震源的有关物理参数来确定,这样就可以预计震动对具体井巷的影响程度。

如果已知振动速度或加速度值,就可以计算压力降,即

$$\Delta\sigma_x = \rho v_p (PPV)_x \quad (1-3-1)$$

$$\Delta\sigma_y = \Delta\sigma_z = \Delta\sigma_x \left(\frac{\gamma}{1-\gamma} \right) \quad (1-3-2)$$

$$\Delta\tau_{xy} = \rho v_s (PPV)_y \quad (1-3-3)$$

式中 $\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\sigma_z$ ——正应力;

$\Delta\tau_{xy}$ ——剪应力;

v_p, v_s ——纵、横波的传播速度;

$(PPV)_x, (PPV)_y$ ——振动速度在 x, y 方向的幅值。

因此,可以采用振动速度来确定震动对井巷损坏程度,Dowding 和 Rezon 给出了经验分类方法,如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 矿山震动对井巷的影响

影响程度	PPV 值/(mm/s)	影 响 特 征
I	<200	对井巷有影响
II	200~400	对井巷影响较小,产生小的破坏,出现裂缝、剥落等现象
III	>400	对井巷影响明显,出现大的新裂缝

对于振动速度的低限 200 mm/s,即巷道因震动而首次产生破坏,岩体产生较弱的卸压情况,根据式(1-3-1)至式(1-3-3),其压力降为

$$\Delta\sigma_x = 1.25 \text{ MPa}, \Delta\tau_{xy} = 1.00 \text{ MPa}, \Delta\sigma_y = \Delta\sigma_z = 0.42 \text{ MPa}$$

1.3.2 对矿工的影响

在发生冲击矿压的区域如果有工人在工作,则可能对其产生伤害,甚至造成死亡事故。波兰对 5 起伤亡 48 人(其中,死亡 24 人,重伤 17 人,轻伤 7 人)的冲击矿压事故进行了分析,表 1-3-2 为医学分析结果。医学上主要将伤亡的情况分为 6 类,这 6 类可能是与冲击矿压动力灾害紧密相关(J. Dubinski et al., 1995, 2000)。

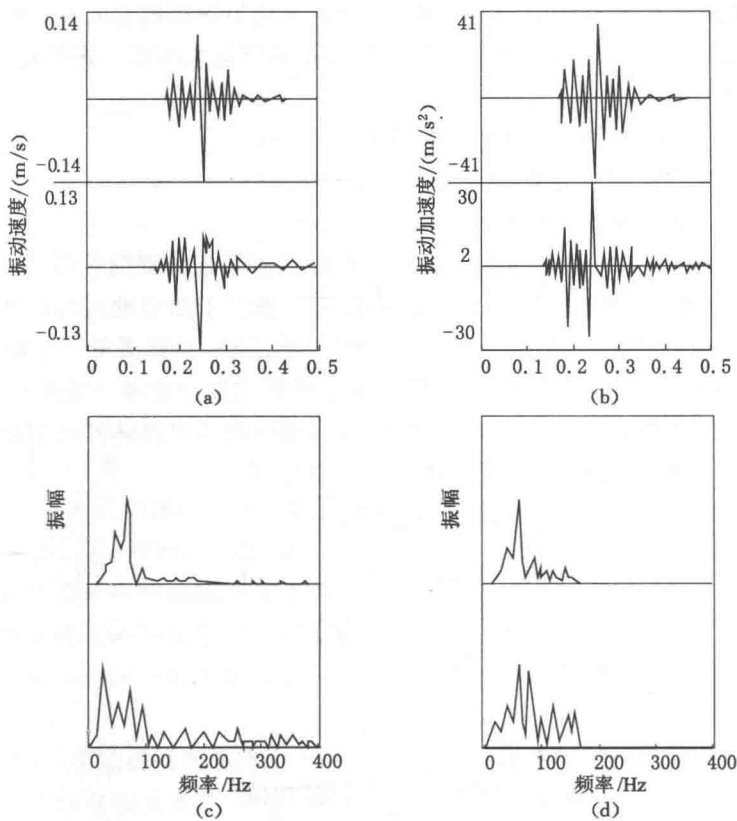


图 1-3-1 近距离波场记录到的信号

(a) 振动速度;(b) 振动加速度;(c),(d) 频谱

表 1-3-2 医学分析表

事故种类	脑顶部	脑脸部	内部器官	上下肢	胸骨	其他
死亡	18	2	6	1	10	1
重伤	11	4	3	2	6	2
轻伤	9	—	—	6	13	2
合计	38	6	9	9	29	5

由上述分析结果可知,发生冲击矿压后,人员受伤的主要部位是脑部,为 44 例,其次是胸部的机械损坏,包括肋骨折断等,为 29 例,而内部器官的损坏主要是肺、心、胃等,为 9 例,再次为上下肢的折断。

为分析其原因,采用人体动力学模型来确定机械振动对人体组织的影响。图 1-3-2 为采用弹性—阻尼系统连接的人体模型。

该模型采用机械的观点,确定了一个自由系统及各组件的共振频率,如表 1-3-3 所示。

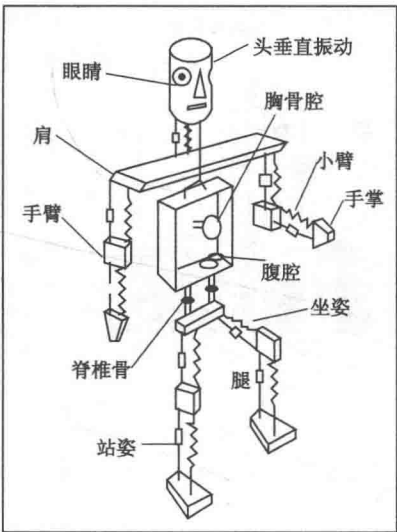


图 1-3-2 人体模型

表 1-3-3 人体器官的共振频率

器官名称	共振频率/Hz
头	4
眼	7~25
上、下颚	60~90
喉、气管、支气管	6~8
胸	12~16
上肢	5~9
骨	3~8
肚	4.5~10
肝	3~4
膀胱	10~18
骨盆	5~9
下肢	5
人在坐的位置	5~12
人在站的位置	4~6

根据上述分析,可采用震动图中振幅、频率的分布情况,分析对人体的威胁。图 1-3-3 为某次震动的振幅分布情况以及人体各部分的共振频率分布规律。

在这次冲击矿压事故中,有 6 人死亡,大部分是脑部、脸部损坏,还有心脏、胃、脊柱、肾等损坏。这与图 1-3-3 分析结果是非常吻合的。研究表明,在震动释放的能量大于 10^5 J 的情况下,振动加速度的振动幅度可能从 2 到甚至大于 $1\,000\text{ m/s}^2$ 。

在震动对人体的影响范围中最重要的一条是确定允许振动加速度与脉冲持续时间之间的关系。其关系如图 1-3-4 所示,可以确定,垂直方向允许的加速度值比水平方向的要高。

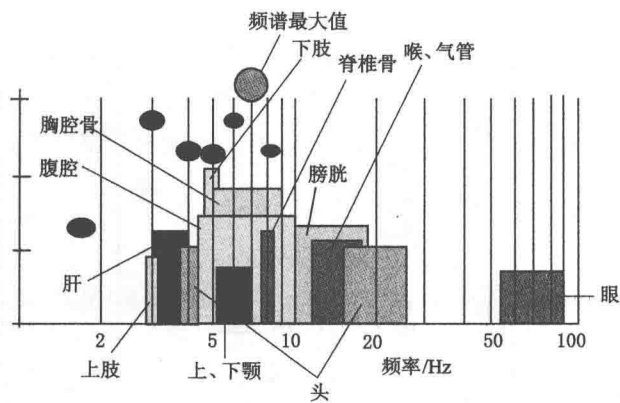


图 1-3-3 人体各器官共振频率分布及某次冲击矿压频率与人体器官对应的关系

而在冲击矿压发生时,其震动持续时间一般为 0.01~0.1 s,因此,发生冲击矿压时,大的振动加速度是人体受伤和死亡的主要原因。震动对大脑的影响是一重要问题,分析表明,脸部损坏,特别是头部顶盖骨头的开裂和折断,大脑受到严重的损伤,其主要原因是动力使人体撞击物体,而撞击力与物体速度降的影响有关,如图 1-3-5 所示。

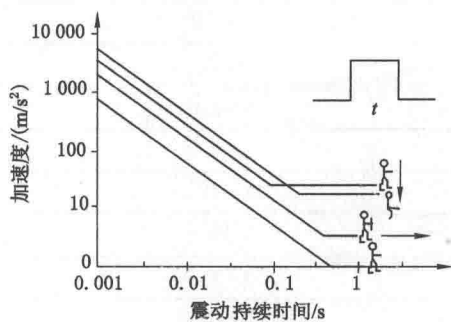


图 1-3-4 人体允许的加速度值

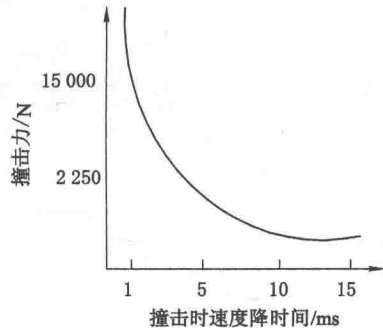


图 1-3-5 撞击力与振动、速度降时间关系图

例如,在速度降时间为 1.5 ms 时,质量为 4.5 kg 的头撞击到固定的物体,则加速度为 $-3\,270\text{ m/s}^2$,撞击力为 14.7 kN,而头顶盖撞击巷道壁的极限强度为 $300\sim650\text{ N/cm}^2$,这样就会产生灾害性后果。从图 1-3-5 可见,降低撞击力可用延长撞击时间来实现。

从这里可以得出对矿工劳动保护的要求,特别是在冲击矿压危险区域工作的矿工,其头盔要满足一定的条件。而且对矿工其他劳保产品,如鞋等也应作一定的要求。

1.3.3 对地表建筑物的影响

矿山震动和冲击矿压不仅对井下巷道造成破坏,对井下工作的人员造成伤害,而且对地表及地表建筑物造成损坏,甚至造成地震那样的灾难性后果。表 1-3-4 为波兰几次大的矿震和冲击矿压对地表的影响结果。其中,破坏最严重的一次为 1982 年 6 月 4 日在 Bytom 市下发生的 3.7 级的矿山震动,造成 588 幢建筑物的损坏,如表 1-3-4 所示。

表 1-3-4 波兰矿山震动与冲击矿压对地表的影响

日期	地点	震动能量/J	震级	建筑物破坏数量
1970-09-30	Bytom	8×10^9	4.26	427
1981-07-12	Bytom	1×10^9	3.80	452
1982-06-04	Bytom	9×10^8	3.77	588
1984-02-18	Ligota-kochlowice	2×10^9	3.95	241
1992-05-05	Bojszowy	2×10^9	3.95	300
1994-12-09	Kochlowice	3×10^9	4.04	140

矿山震动及冲击矿压对地表的影响,可将其分为 7 类,并用震动能量、振动加速度和振动速度来表示,如表 1-3-5 所示。

表 1-3-5 矿山震动对地表影响分布表

强度等级	影响程度	震动能量/J	加速度/(mm/s^2)	速度/(mm/s)
1~4	0	$<10^7$	<120	<5
5	1a	$1 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7$	120~180	5~7
	1b	$5 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$	180~250	7~10
6	2a	$1 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8$	250~370	10~15
	2b	$5 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$	370~500	15~20
7	3a	$1 \times 10^9 \sim 5 \times 10^9$	500~750	20~25
	3b	$5 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10}$	750~1 000	25~30

矿山震动与冲击矿压对地表影响的特征为:

- (1) 3 和 4 级:大楼中的一些居民能感觉到震动,类似于卡车在楼旁经过。
- (2) 5 级:大楼中的所有居民均能感觉到震动,一些在楼外的居民也能感觉到;许多熟睡的居民被惊醒;动物受惊;悬挂的物体来回摆动;某些轻的物体移动;未锁的门窗来回扇动;振动类似于一个很重的物体从楼外掉下。
- (3) 6 级:大楼内外的居民均能感觉到,并能造成许多人的惊慌;画从墙上掉落;书从书架上掉下;家具移动。
- (4) 7 级:许多人惊慌乱跑;类似于坐在行驶中的小汽车内;建筑物因内部家具移动受强烈损坏。

例如,在井下 800 m 深的煤层中开采时,在上覆顶板岩层中发生的 7×10^6 J 能量的震动,在地表记录到的最大加速度为 300 mm/s^2 ,对地表的影响强度为 6 级。图 1-3-6 为地表加速度仪测量的结果,其中,(a),(b),(c)分别为 x, y, z 方向的振动加速度。图 1-3-7 为振动加速度的振幅与振动频率之间的关系。

从上述结论可知,矿山震动与冲击矿压的发生会对地表产生巨大的影响。而其影响程度、范围、规律等,需要进行深入细致的研究。