



全国高协组织教材研究与编写委员会审定

MINING GEOPHYSICS

采矿地球物理学

窦林名 何学秋 编著



中国科学文化出版社

本书由全国高协组织教育发展中心、香港教科文出版有限公司资助出版
全国高协组织教材研究与编写委员会审定

国家自然科学基金重点项目资助(50134040)

国家自然科学基金项目资助(50074030)

国家杰出青年基金项目资助(59925411)

教育部跨世纪优秀人才培养计划资助

MINING GEOPHYSICS

采矿地球物理学

~~奚林名 何学科~~ 编著

中国科学文化出版社

内容提要

采矿地球物理学是采矿科学中的一个新分支,是利用岩体中自然的或人工激发的物理场来监测岩体的动态变化。本书从弹性动力学出发,分析岩体震动、冲击矿压等动力灾害发生的机理;在实验室试验、现场实测的基础上,提出了煤岩体冲击、变形破坏的弹塑脆性模型,分析了煤岩变形破坏过程以及其中产生的声电效应及其耦合规律;介绍了矿山震动、声发射、电磁辐射、振动、微重力等采矿地球物理学研究的内容。

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、研究生和大学本科生及矿山安全科技工作者,工程技术人员参考使用。

采矿地球物理学

窦林名 何学秋 编著

出版发行:中国科学文化出版社

排 版:新天地文印中心

印 刷:盛源印务有限公司

开 本:850mm × 1168mm 1/32

印 张:6

字 数:156千字

版 次:2002年1月第1版

书 号:ISBN 962-8467-72-7

定 价:12.00元

版权所有 翻印必究

前 言

.....

岩体冲击、变形破坏的弹塑性模型,分析了煤岩变形破坏过程以及其中产生的声电效应及其耦合规律;介绍了矿山震动、声发射、电磁辐射、振动、微重力、地电等地球物理学研究的方向。

全书共分九章,第一章介绍了采矿地球物理学的基本任务及优缺点。第二章介绍了煤岩体弹性动力学,其中包括动力学方程、冲击矿压与突出机理、煤岩冲击破坏机理模型、煤岩冲击破坏危险及声电判据。第三章介绍了弹性波测量仪器及传感器的原理。第四、五、六、七、八、九章分别介绍了采矿地球物理学中的采矿震动、声发射、电磁辐射、振动、微重力、地质电法等方法的基本原理及其在采矿生产实践中的应用。

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。特别感谢第一作者的博士生导师西里西亚工业大学教授 Bernard DRZEZLA 院士,博士论文评阅人波兰煤矿研究总院冲击矿压研究所所长 Wladyslaw KONOPKO 教授,波兰煤矿研究总院科研院长 Jozef DUBINSKI 教授的指导和帮助。

作者衷心感谢钱鸣高院士,周世宁院士的帮助和支持。作者感谢谷德钟老师,王恩元老师,刘贞堂老师等的帮助和支持,感谢徐州矿业集团,三河尖煤矿,大屯孔庄煤矿,华丰煤矿,中国矿业大学岩控中心等单位对本书出版给予的大力支持。最后,作者感谢本书的编辑为本书的出版所付出的辛勤劳动。

本书中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。由于作者水平有限,书中疏漏谬误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作者

2002.1

目 录

前言	1
1. 绪论	1
1.1 采矿地球物理学的特点	1
1.2 采矿地球物理学的基本任务	2
1.3 采矿地球物理方法简介	3
1.4 采矿地球物理方法的应用前景	7
2. 煤岩体弹性动力学	8
2.1 应力	8
2.2 平面应力状态	11
2.3 变形	14
2.4 应力与应变之间的关系	16
2.5 动力学方程	17
2.6 岩体中波动方程	18
2.7 冲击矿压与突出机理	20
2.8 煤岩冲击破坏机理模型	26
2.9 煤岩冲击破坏危险及声电判据	37
3. 弹性波测量仪器原理	40
3.1 测量要求	40
3.2 测量仪器原理	42
4. 矿山震动	54
4.1 概述	54
4.2 震动发生的机理	56
4.3 震动测量及观测	60
4.4 震源位置确定	61

4.5 震动能量计算	70
4.6 震动测量网络优化	73
4.7 预测动力危险模型	74
4.8 预报冲击矿压动力灾害	75
4.9 矿山震动对环境的影响	80
5. 声发射	90
5.1 概述	90
5.2 声发射的物理基础	91
5.3 岩石声发射特点	91
5.4 岩石变形过程中的声发射	92
5.5 声发射的测量与观测	96
5.6 冲击矿压动力危险预测	99
5.7 激发声发射法监测	107
5.8 其他方面应用	109
6. 电磁辐射	110
6.1 煤岩破坏的电磁辐射现象	110
6.2 实验室研究结果	114
6.3 煤岩变形破裂电磁辐射机理	119
6.4 电磁辐射能量计算	124
6.5 现场测试结果	125
6.6 煤岩变形破坏与电磁辐射耦合规律	135
6.7 冲击矿压动力危险预测	139
7. 振动	144
7.1 概述	144
7.2 采矿振动的物理基础	144
7.3 振动测量方法及原理	147
7.4 冲击矿压动力危险预测	150
8. 微重力	157
8.1 物理基础	157

8.2 井下测量的重力递减法	158
8.3 测量方法与测量仪器	159
8.4 多水平重力剖面	159
8.5 冲击矿压动力危险预测	160
8.6 揭露老巷及其充填程度	162
8.7 揭露井筒周围岩体条件及变形	163
9. 采矿电法	167
9.1 物理基础	167
9.2 测量方法	171
9.3 测量结果分析	171
9.4 应用实例	172
10. 参考文献	177

1 绪 论

采矿地球物理学是采矿科学中的一个新分支,是利用岩体中自然的或人工激发的物理场来监测岩体的动态变化和揭露已有的地质构造。采矿地球物理学最大特点是在更深层次上认识地下岩层的特点及运动规律。

目前世界采矿业正广泛地应用着地球物理方法来解决采矿生产实际中的问题,而且应用范围将越来越广泛。可以预计,在二十一世纪,采矿地球物理方法将是采矿安全技术以及有益矿物的经济、高效开采方面应用最基本的测量工具。

就像其他测量方法一样,采矿地球物理方法也有自身的优点和局限性。良好的效果取决于正确的应用。

1.1 采矿地球物理学的特点

采矿地球物理学是地球物理学的分支之一,是用地球物理方法来解决采矿现场的实际问题,例如矿床的勘探问题,矿山动力现象,采矿工程问题等。采矿地球物理学感兴趣的是与矿物开采有关的采矿与地质问题,特别是井下的开采与地质问题。

一些特殊的采矿问题可用采矿地球物理方法来解决,例如,与大地震动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——称之为振动法,包括微震法、振动法和地音法;岩体内重力变化的研究,称之为重力法;地电现象的研究,称之为地电法;还有热法,原子能法等。这些研究方法都需要特殊的测量仪器和理论指导。

总的来说,采矿地球物理方法有如下优点:

(1) 与打钻孔、掘巷道探测相比,观察、测量成本低;

(2) 采矿中的许多现象和过程只能用采矿地球物理方法才能进行测量、记录和分析。例如岩体震动、冲击矿压、煤和瓦斯突出等矿山动力现象,而采用其他测量方法则不可能做到;

(3) 获得的信息量大;

(4) 研究测量具有非破坏性。这对采面的安全性及巷道维护的稳定性等都具有重要意义;

(5) 是二十一世纪主要采矿测量方法之一。

1.2 采矿地球物理学的基本任务

采矿地球物理学的基本任务是解决采矿作业的安全性和保证矿井生产的连续性。主要解决关于开采引起的地质动力现象和瓦斯动力现象(震动、冲击矿压、突出)以及对煤层及周围岩层物理学参数认识等问题,关于煤层连续性的地质问题,如冲刷、侵蚀、尖灭、断层等。

1.2.1 矿山压力问题

采用采矿地球物理方法可连续或即刻记录采矿作业引发的振动现象,以此可连续评价,并在一定程度上预测研究区域的震动性及危险性,如冲击矿压、煤和瓦斯突出等,并可以评价灾害防治措施的有效性。

还可以提前认识岩体的结构及物理力学特性,以此可提前减弱或消除采掘面前方冲击矿压危险和不安全因素。此外,还可以认识岩体的力学参数,如弹性模量、泊松比等。这是矿山压力研究中最基本的参数,而其只要测量弹性波的传播速度即可获得。

1) 对于采矿活动引发的地质动力现象的研究:

(1) 地质动力现象的连续记录、评价、分析和诊断 - 采用微震法和地音法、电磁辐射法;

(2) 提前认识潜在的危險区域,如应力升高的地点 - 采用振动法,地质电法,重力法和热法、电磁辐射法;

(3) 评价灾害防治措施的效果 - 采用振动法,地音法和地质

电法、电磁辐射法；

2) 岩石物理力学参数的确定,采用振动法就可以完成。

其基础是测量两重不同类型的地震波(纵波和横波)在介质中的传播速度。这种方式得到的参数称之为动态参数,与实验室获得的静态参数有明显的区别,动态参数更接近于岩体的实际特性。

1.2.2 地质问题

采矿地球物理方法可以对煤层的构造区进行探测和定位,如煤层中特别容易出现的断层、侵蚀、煤层分叉等。在集中化生产的今天,保证煤层开采的节奏性和连续性,具有重大的意义。

对于提前确定工作面前方煤层的构造问题,只有采用振动法来完成。主要是研究煤层中地震波传播的连续性。煤层厚度变小的情况下,地震波振幅缩小,或者利用煤层非连续表面(断层面、侵蚀面)出现的反射波信息等。还可采用其他方法,如电磁波法对其进行研究。目前进行的雷达法研究就属于这类。另外,采用重力法也可获得一些地质方面的信息。

1.2.3 其他问题

1) 采掘面区域内水的诊断,其灾害危险性评价,主要采用地质电法。

2) 墙,特别是井壁状况的评价,主要采用地质电法、振动法、重力法和雷达法。这些方法有时也用来确定支架后方的空洞。

3) 放炮作业等振动效果的评价,以及震动对井下和地表建筑物影响的评价,可采用地震几何法。

1.3 采矿地球物理方法简介

总的来说,采矿地球物理学可以分为:

- 1) 振动法(微震法,地音法,振动法,地震几何法);
- 2) 地质电法(电阻法,电磁法);
- 3) 重力法;
- 4) 地热法。

1.3.1 震动法

采矿作业打破了岩体内原有的应力平衡状态,其结果造成了岩体内变形能的聚积。这些能量以突然的形式动力释放,产生震动,并使变形增加。

由于采矿作业而引发的震动是一种弱的地震。与大地地震相比,其震动频率高,影响范围小。一般来说,采矿引发的震动能量为 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^{10}$ J,里氏震级为 0~4.5 级,振动频率为 1~50Hz,震动范围为几百米到几百公里。

震动法就是记录采矿震动的能量,确定和分析震动的方向;对震中定位来评价和预测矿山动力现象。具体的说,就是记录震动的地震图,确定已发生的震动参数,例如震动发生的时间,震中的坐标,震动释放的能量,特别是震中的大小,地震力矩,震动发生的机理,震中的压力降等,以此为基础,进行震动危险的预测预报,如预报震动能量大于给定值的平均周期,在时间 T 内震动能量小于或等于给定值的概率,该区域内震动的危险性及其他参数。

1.3.2 声发射法

岩石的声发射也称为地音,是岩石的变形和破断,颗粒之间的相位错动,岩石间的摩擦滑动及其他引发的。

地音研究是从三十年代开始的。其后在世界各地如美国,加拿大,日本,南非,波兰,捷克,俄罗斯等迅速发展起来。研究表明,地音与岩石的动力现象及弹性波的发射有关,是在应力作用下,岩体结构的非弹性变性,结构非稳定的结果。地音研究的主要目的是确定岩体中的应力应变状态,预测巷道周围岩体的突然、猛烈破坏(冲击地压、煤和瓦斯突出、垮落等)。

采矿地音法就是以脉冲的形式记录弱的、低能量的岩体声发射弹性波。记录的振动频率从几十到 2000Hz 或更高,记录的能量低于 1×10^{-2} J,振动范围从几米到 200 多米。

采矿地音法可用来评价冲击矿压及煤和瓦斯突出的危险性,并检测其采取的防治措施的效果;评价边坡稳定性;确定采掘面周

围的应力应变状态等。

1.3.3 电磁辐射法

电磁辐射技术是一种很有发展前途的地球物理方法。岩石电磁辐射是指岩石受载破裂过程中向外辐射电磁能量的过程或现象。

岩石破裂电磁辐射的观测和研究是从地震工作者发现震前电磁异常后开始的。前苏联和我国是在这方面开展研究较早的国家，还有日本和美国等国家也开展了这方面的研究工作。在近 25 ~ 30 年内岩石破裂电磁辐射效应的研究，无论是在理论研究方面，还是在应用研究方面，都取得了飞速发展，特别是在地震方面用于预报地震。

从九十年代开始，中国矿业大学对载荷作用下煤体的电磁辐射特性及规律进行了较为深入的定性和定量研究。研究表明，煤岩电磁辐射是煤岩体受载变形破裂过程中向外辐射电磁能量的一种现象，与煤岩体的变形破裂过程密切相关。

电磁辐射可用来预测冲击矿压、煤与瓦斯突出等煤岩灾害动力现象。其主要参数是电磁辐射强度和脉冲数。电磁辐射强度主要反映了煤岩体的受载程度及变形破裂强度，脉冲数主要反映了煤岩体变形及微破裂的频次。此外，电磁辐射还可用于检测煤岩动力灾害防治措施的效果；评价边坡稳定性；确定采掘面周围的应力应变，评价混凝土结构的稳定性等。

1.3.4 振动法

采矿振动法是用来解决采矿技术问题和地质问题的。三十年代首次用来研究开采层的连续性及其构造的非均匀性。其测量参数为地震波的传播速度。其后，采用振动法来确定岩体的物理力学参数，特别是坑道周围的应力应变状态。

振动法解决采矿作业引起的地质动力现象问题，主要是根据地震波的传播速度的变化，确定岩石结构破坏过程发展的各阶段，如弹性阶段的高应力，对应比较大的振动频率，表明了采掘面接近

较大的震动冲击地压危险区,岩石破坏的最后阶段将可能发生高能量的震动甚至冲击地压。

振动法解决矿山压力问题,主要是根据不同类型振动波的传播速度来确定岩体的物理力学参数,例如线弹性模量,泊松系数,横向弹性模量,体积弹性模量,LAME 常数等。这些参数是用动态方式确定的,与实验室岩块试验的静态有很大差异,这些参数更符合实际。

振动法解决地质问题,主要是根据地震波在煤层中传播的通道性及传播速度的异常,能量或阻尼系数的变化来进行。当煤层的连续性出现问题时,这些地震波的传播通道将出现非正常的波图,或通道波组的振幅减小,甚至全部消失等。

1.3.5 重力法

重力法是根据地层中岩石介质质量分布的不均匀性来测量重力的异常变化。

测量仪器和测量方法的发展,促进了重力法的广泛应用,测量仪器的高精度性($2 \times 10^{-9} \text{m/s}^2$)可使其广泛应用于小构造、岩像变化的测量以及由于采矿作业引起密度分布的变化。

目前,重力法主要研究开采引起岩体体积的变化;岩体震动、冲击地压的预测预报;小范围内煤层构造的变化;局部空洞的定位等方面。

重力法所采用的参数主要是重力微小的异常变化和塔式重力梯度。

1.3.6 地质电法

采矿地质电法是利用岩石中电特性的变化来解决地质、采矿技术、预测预报等方面的问题,其应用范围非常广泛。

地质电法主要测量岩石介质在电流稳定性或亚稳定性方面的电阻特性,或电磁波在岩体中传播的电阻,电介常数和磁通量等参数。主要解决的问题有认识顶底板岩层地质条件;震动、冲击矿压、水灾火灾的危险性评价;支架与围岩相互作用的评价;巷道应

力应变状态的监测等。

1.4 采矿地球物理方法的应用前景

以上介绍了采矿地球物理方法在解决地质,采矿技术,采矿安全技术等问题的多样性和有效性,以及解决这些问题的先进性和优越性。也表明了采矿地球物理方法在解决采矿生产安全技术问题方面的巨大潜力。

采矿地球物理学中所采用的方法,如微震法,地音法,振动法等观测记录的信息多,分析处理的信息量也大。随着电子计算机的飞速发展,正好促进了地球物理方法的大力发展。高速、大容量计算机的应用,不仅可以大量存储数据,进行信号的转换和数据的传输,而且可以进行复杂的分析和处理,对处理后的信息能进行及时反馈,来指导实践,并且以此为基础可建立一些新的地球物理模型,进一步解决一些采矿、地质、安全等方面的复杂问题。可以预计,二十一世纪采矿中应用的测量、观测方法主要将是地球物理方法。

2 煤岩体弹性动力学

2.1 应力

物体所受的力有外力和应力。根据外力的作用方式,外力可分为体力和面力。体力是一种场力,分布于弹性体的体积内,如重力,惯性力等。体力可用体力集度来表示。若单位体积 ΔV 上作用有总体力为 ΔQ ,则体力集度为

$$F = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (2-1)$$

面力是分布在弹性体表面上的力。面力可用面力集度来表示。若单位面积 ΔS 上作用有总面力 ΔQ ,则该面积上的集度为:

$$F = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta S} \quad (2-2)$$

受力弹性体内单位面积上内力的大小,称该点的应力,应力是小面积 ΔS 上作用的力 ΔF ,当 ΔS 趋向于零时的极限。

$$\vec{\sigma} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta S} \quad (2-3)$$

由此可见,应力的大小不仅与力的方向和大小矢量有关,而且与力作用的面积矢量有关。因此,应力是一个矢量。应力可以分为作用在与该平面垂直的方向上,称为正应力,和作用在与该平面平行的方向上,称为剪应力。

若用 σ_n 表示正应力,用 τ_i 表示剪应力,则应力矢量可以写成:

$$[\vec{\sigma}_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

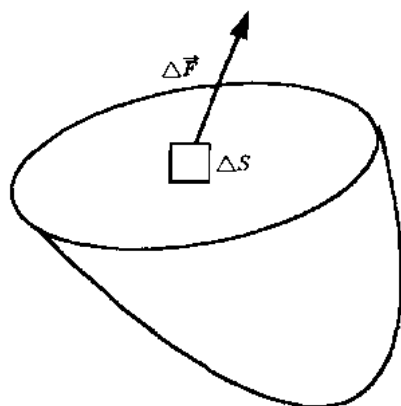


图 2-1 应力示意图

这里, $1 = x, 2 = y, 3 = z$ 。

应力矢量的各分量可以由图来表示, 见图 2-2 所示。

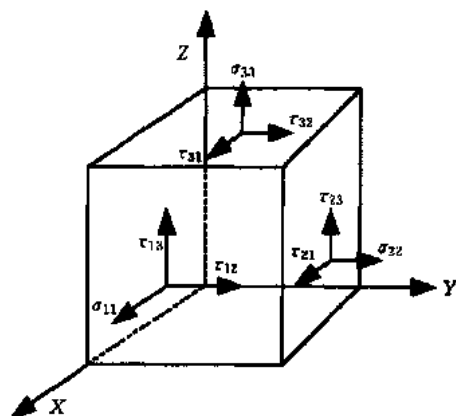


图 2-2 六面体上的应力分量

考虑到 x, y, z 轴相互垂直, 根据平衡条件, 则有:

$$\tau_{12} = \tau_{21}; \quad \tau_{23} = \tau_{32}; \quad \tau_{31} = \tau_{13} \quad (2-5)$$

因此, 给定点的应力可用六个数值来表示。如果处于直角坐标系中的某个平面法向 $n(\alpha, \beta, \gamma)$ 作用有应力 σ_i , 那么该应力可