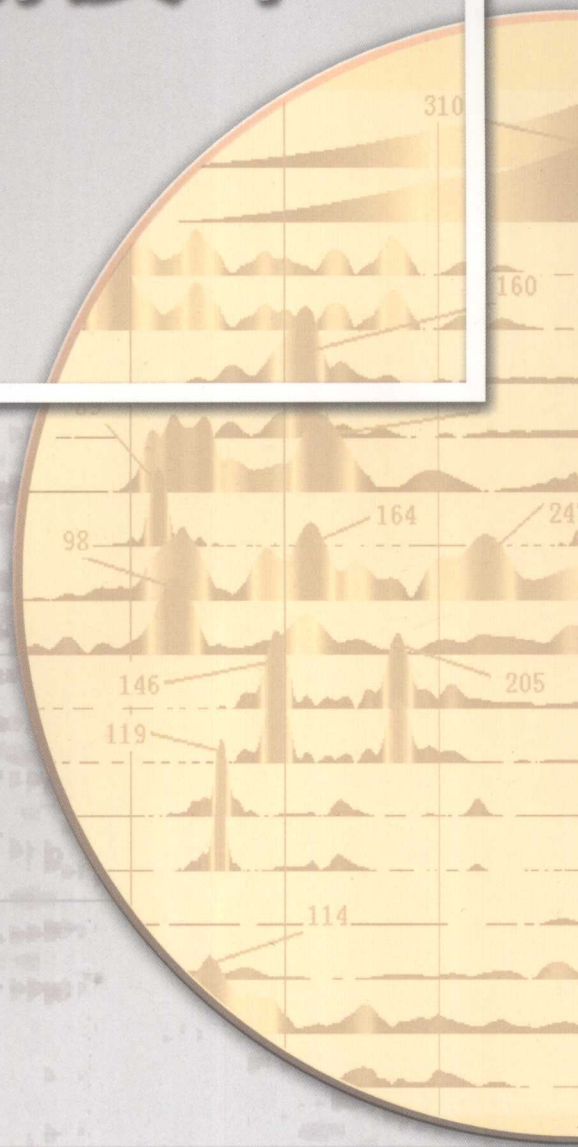


国家重点基础研究发展计划(973计划 2007CB209400)

Shallow Seismic Wave Prospecting Technology in the Underground Engineering

地下工程 震波探测技术

刘盛东 张平松 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家重点基础研究发展计划(973计划 2007CB209400)

地下工程 震波探测技术

刘盛东 张平松 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

内 容 提 要

地下工程主要表现为井巷与硐室,其面临的地质条件制约了工程的设计方案、施工环境、采掘条件。影响地下工程安全高效采掘的地质因素较多,通过震波探测技术可探测和查明相关的地质构造及异常区域,为地下工程提供必要的技术保障。全书共分为八章,在介绍震波探测基本原理的基础上,重点对巷道、采面、环境与工程地质探测进行深入的分析,特别对巷道超前探测、采面构造与煤体结构等特征探测提出了最新的研究成果。

本书可作为高等院校地球探测与信息技术、地质工程、采矿工程、隧道工程和地下工程相关专业本科生和研究生的教材,也可供从事地下工程、井巷工程作业的科研、教学及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程震波探测技术/刘盛东,张平松著. —徐州:
中国矿业大学出版社,2008.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0135 -5

I. 地… II. ①刘…②张… III. 地震波—应用—
地下工程—探测 IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 187247 号

书 名 地下工程震波探测技术
著 者 刘盛东 张平松
责任编辑 潘俊成
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 江苏淮阴新华印刷厂
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 17.5 彩插 4 字数 443 千字
版次印次 2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷
定 价 66.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



序

矿山及隧道工程建设与生产过程中,影响地下工程安全的地质因素较多,其工程地质条件的探测与评价一直是地球物理学界普遍关注的问题,由于受到探测环境的限制,探测仪器设备及技术都需要研究和发展。作者自20世纪80年代以来一直致力于地下工程地质问题的研究工作,围绕矿井井巷掘进、采面生产、围岩破坏以及矿山环境地质等方面出现的地质问题进行专项研究,并在全国各大煤矿做了大量的实验与应用研究工作,形成了不同的井巷工程地质问题探测方法技术,获得了有效的应用效果。同时研制开发了专门的地震仪器及各种分析软件,为矿山地质工作者提供了很好的手段,作出了重要的贡献。

煤炭是我国的第一能源,大约占75%,而且这种趋势在本世纪初的一段时期内将不会改变。当前我国煤炭开采呈现两个方向发展,一是新矿区要建成“高产高效”的现代化大型矿井,另一个是老矿区需要上综合机械化采煤和高档普采工作面。因此,在矿井的建设和生产过程中,工作面的合理布置、综采机组高产高效的发挥以及职工和矿井安全等都依赖于矿井地质条件的探查程度;在非煤矿山以及隧道的施工中,地质因素同样是第一控制要素。水、顶板、瓦斯等地质灾害是地下工程面临的共同安全隐患,从地质灾害上都可以把它们与地质构造联系在一起,地质构造控制安全生产。在地下工程现场进行地质因素探测技术研究,具有探测距离近、探测介质直接、震源衰减小、波谱丰富等优点,大力发展地下震波探测方法技术研究是一种有效的途径,地下工程震波探测技术为地下现场进行地质条件的探测与评价提供了很好的方法技术。

近年来,重大矿井地质灾害频频发生,已引起国务院和全国人民的高度重视。加强对矿山等地下地质条件研究的投入,已经迫在眉睫,目前已引起科学界和工程界的高度重视。由此可见,长期坚持地下科学研究是需要有事业心和责任感的,地下工程安全地质保障体系的建立与健全必须要有科学技术做先导,这是第一要素。随着矿井开采深度的增加,更多更复杂的地质问题已经出现,本书作者有着丰富的矿井工程实践经验,对煤矿的责任心强,工作能力强,愿能继续深入开展地下工程物探技术研究,取得更好的成绩,为煤矿经济发展作出更大的贡献。

全书内容丰富,系统性强,理论上有一定深度,通过作者的科学研究,结合大量的地

下工程探测实际,图文并茂,可读性强。该书的出版可为矿山与隧道的地质工作者提供日常探测工作的手段和方法,并能提供很好的借鉴和参考,相信会受到不同层次读者的欢迎。

中国科学院院士
中国工程院院士

常印佛

2007年11月18日

前 言

在地下工程建设和生产过程中,会遇到各种各样的地质条件,其经常影响地下工程的安全高效作业。特别在煤矿生产中,需要日常地质条件探测技术与管理手段、方法相结合,但事实上与其他行业相比,矿山的条件及技术手段相对滞后,本着为矿山安全生产竭尽全力的思想,我们科研小组自 20 世纪 80 年代以来一直致力于地下工程物探方法及仪器设备开发的研究工作。通过在安徽淮南、淮北、皖北、新集,山东兖州、淄博,河南,陕西,山西,江苏,福建,重庆,四川,吉林,内蒙古等地的各大煤矿的实际探测与应用研究,初步掌握了矿井生产中亟待解决的地质问题,获得了对不同矿井地质条件下物探方法技术应用的特性。

通过对探测成果的总结,努力为矿山安全生产提供一定的技术手段,为矿井安全地质保障体系的建立与健全提供必要的技术支撑。受井巷特殊地质条件及环境限制,目前在井下进行构造探测相对成功的物探手段还是以震波技术为主。本书对地下工程建设与生产过程中井巷掘进开挖、工作面回采生产、煤矿岩层采场破坏以及日常地质条件评价与管理等方面所遇到的地质问题逐一进行说明与探测应用,力求为从事地下工程探测技术的人员提供一些思路、方法和手段。众所周知,物探技术存在特殊性和多解性,因此,对于井巷中所遇到的复杂地质构造及异常判定还需通过多种方法手段综合探测与解释,不断提高解释精度与应用效果。本书结合地下工程条件及特点,对震波技术方法与探测应用等方面进行了详细阐述与分析,但在数据处理与资料解释方法上还有待进一步完善。

书中大部分内容是在作者近年来的研究成果报告和学术论文的基础上编写的。这些成果的获得,无疑与兄弟单位的通力合作是分不开的,特别是各大矿业集团、煤矿及兄弟院校等在资料收集、技术方案选定及数据采集等方面给予了大力支持和指导,在此谨表示衷心的感谢!同时对书中所引用文献的作者致以崇高的敬意!

因作者水平所限,书中在观点和方法上可能会存在片面性,甚至错误的认识,恳请各位专家和读者不吝赐教。

本书共分八章,其中第一章、第三章、第四章和第八章由刘盛东完成,第二章由刘盛东和张平松共同完成,第五章、第六章、第七章由张平松完成。

著 者
2008 年 8 月

FORWARD

Different geological conditions could be met during the course of construction and production of underground projects. Because of change of geological factors, the safety and high efficiency working of underground projects often face serious threats and accident hidden troubles. Especially in mine, the daily detecting technology and managing methods are needed. But in fact, the conditions and technology methods of mine are lagged than other industry. With the thought of serving all out for mine, the authors and researching group persist in the researching works of geophysics detecting technology and apparatus development all along since 1980s. Through the study of practical exploration and applied researching in many large-scale coal mines of the country, geological problems in mine needed to be resolved urgently are known. And applied characteristics of different geophysics methods in different mine geological conditions are obtained.

Through summing up the detecting results, some detecting technology methods are tried to provide for mine safety production, and the necessary gist for the foundation and finish of mine safety ensuring system in geological conditions is offered. Limited by the special geological situation and environment of mine, geophysics method of structure detection being applied more successful in mine is mainly seismic wave technique now. According to the application in underground projects, the book explains one by one the existing geological problems during the course of construction and production, such as digging in laneway, mining in working face, detecting in mining field failure, and evaluating and managing in daily geological condition. Many thoughts and methods for engineers to engage underground projects are strived to provide.

Because the geophysics technique has its particularity and multi-result characteristic, the integrated geophysics exploration methods must be used to detect and explain complex geological structure and its abnormality in the laneway and mine, and explaining precision should be improved sequentially. The book expatiates and analyzes the seismic wave techniques and its applying characteristic combining with underground project conditions. But some faults still exist in data processing and geological explanation, some research should be done to perfect in the future.

Apart from the quotations acknowledged in the bibliography, the great part of the content of the present book is based on the research achievements and papers of the authors themselves in the recent years. We owe a great debt and would like to extend our great appreciation to the each mine group, mines, and brother universities for their friendly cooperation,

support, direction and their technological assistance in data collecting and research plan actualization and data gaining, and so on. At the same time, we appreciate greatly for the authors of bibliography.

Owing to limitation of the authors' academic proficiency, the book cannot be said to be free of one-sided views, shortcomings or even errors, and advice and corrections are hoped sincerely to get from experts and readers alike.

The book falls into eight chapters, with the first contributed by Liu Shengdong; the second by Zhang Pingsong and Liu Shengdong; the third, fourth and the eighth by Liu Shengdong; the fifth to seventh by Zhang Pingsong. About 200,000 words are finished by each writer.

The authors
August, 2008

目 录	
序	1
前言	1
第一章 绪论	1
第一节 震波探测方法概述	1
第二节 地下工程震波探测技术发展及现状	2
第三节 地下工程震波探测技术研究意义	3
第二章 震波勘探的基本原理	5
第一节 震波勘探的理论基础	5
第二节 震波勘探的地质基础	17
第三节 单点探测原理与技术	27
第四节 浅层折射原理与技术	29
第五节 浅层反射原理与技术	37
第六节 面波勘探原理与技术	57
第七节 震波 CT 原理与技术	73
第三章 震波探测仪器及软件	102
第一节 矿井震波探测仪器	102
第二节 震波处理与解释软件系统	107
第四章 巷道震波探测技术	112
第一节 煤及围岩物理力学参数动测技术	112
第二节 围岩松动圈震波探测	113
第三节 巷道震波超前探测方法	117
第四节 MSP 法超前探测技术研究	130
第五节 巷道煤厚探测	141

第五章 采面震波探测技术	147
第一节 煤层工作面内构造探测方法技术	148
第二节 工作面内构造探查条件与任务	150
第三节 投影数据观测系统的建立	151
第四节 数字化断层图像重建	159
第五节 断层特征实际探测模拟	166
第六节 断层特征显现的影响因素	170
第七节 震波 CT 工作方法 with 解释原则	172
第八节 煤层工作面震波 CT 探测应用	175
第九节 地面井间 CT 探测与应用	179
第六章 围岩破坏震波探测技术	183
第一节 煤(矿)层开采围岩破坏理论	183
第二节 顶底板破坏探测方法	185
第三节 震波动态探测技术原理	189
第四节 动态测试技术工作方法	191
第五节 动态探测技术的应用	194
第六节 高密度电法与震波 CT 方法技术的综合应用	204
第七节 煤层底板破坏规律动态观测	214
第七章 常规构造震波探测技术	219
第一节 共偏移法探测原理	219
第二节 共偏移法探测模拟	221
第三节 共偏移数据处理	226
第四节 地面工程探测应用	226
第五节 矿井地质探测应用	230
第六节 煤岩体结构构造特征频谱分析	237
第八章 矿山环境及工程地质震波探测技术	242
第一节 震波瓦斯探测的可行性	242
第二节 注浆效果评价	250
第三节 井筒破裂检测	254
第四节 巷道锚杆与锚喷支护动测技术	259
参考文献	266
后记	270

第一章 绪 论

第一节 震波探测方法概述

建立在岩石弹性力学性质基础上的物探方法主要有地震勘探法、声波探测法以及瑞雷面波探测法,它们都是基于地震波动理论,故将其统称为震波探测方法。具体方法说明见表 1-1。

表 1-1 震波探测方法的分类与应用

类别	方法名称		应用情况
地震勘探	折射波法	单边折射法	划分近水平界面,确定覆盖层厚度,测定潜水面深度,追索断层破碎带(低速带),评价矿井开采地质条件,测定岩土弹性力学参数,原位工程勘察等
		双边折射法	
	反射波法		
	透射波法		
	微震探测法		矿压及裂高探测
面波勘探	瑞雷波法		工程勘探,巷道超前探测及界面探测
声波探测	主动工作方式	波速测定法	进行岩体工程地质分类,进行岩体弹性模量测定,进行应力松弛范围测定,进行混凝土强度检测
		振幅测定法	
		频谱测定法	
	被动工作方式	声发射技术	岩石破裂及矿柱安全监视,天然地震预报

将震波探测技术应用于地下工程中又称为地下工程震波探测技术。具体来说,震波探测技术是运用弹性波原理,采用锤击、爆炸、震源枪、声发射等激震产生的波场进行工程检测和勘探,它是纵波、横波、槽波、面波探测的统称。在矿山建设与生产过程中,地下工程震波探测技术主要以煤、岩层本身作为研究对象,根据波的反射、折射、透射及频散等特性来探查未被开采煤层的不连续性以及与之有关的地质构造破坏与地质异常体。激发的震波在被测介质中传播时,当接收器接收震波的到时与幅频等波场信息,就能够依据一定的物理和数学关系反演介质的工程特性物理量。因此,震波技术包括岩土弹性波测试、声波检测、地震勘探、面波勘探、导波勘探等内容。使用震波技术来归纳这些概念,是因为这些技术方法都是采用相同的波场传播理论与波动力学理论,在数据采集与处理上也基本相同。

由于地下工程面临的是一个不断移动的作业场所,从工程的勘察设计,到工程竣工验收乃至工程后续维护与管理等过程中都存在大量的地质影响因素和测试指标。矿井工程建设和生产中的井筒、巷道、采场布置与回采工艺、煤(矿)层开采围岩破坏变化规律等,都与地质

工程学科密切相关,必须进行重复性的勘探与检测,来监测和预报地下的界面、结构、构造、强度等各项指标,为地下工程安全生产提供准确的地质基础数据。因此,面向井巷地下工程的探测技术研究具有较大的范畴,但这些研究具有一定的针对性、特殊性和实时需求性。与此同时,与地面物探方法相比较,在地下进行探测具有测试目标体近、解决问题具体、数据采集直接、测试条件有限、干扰因素较多以及在多数情况下从数据采集、处理到解释都必须考虑全空间问题等特点。在对井巷中震波运动学和动力学特征的理论进行深入研究的基础上,通过数学建模、反演算法、图像处理、地质解释等专项技术的开发,以及井下观测系统、数据采集、探采对比的应用研究,逐步形成了井巷不同地质条件的探测、检测与预测方法技术。笔者根据 20 年来从事矿井震波探测技术研究的实践与经验,对震波技术在地下工程中的应用作一详细的论述。

第二节 地下工程震波探测技术发展及现状

地下工程中一个主要的部分是矿井,矿井物探是从地面地球物理勘探移植到井下的,因此,在方法及原理上二者没有根本区别,只是要适合矿井特殊的工作条件和环境。矿井物探依据其技术原理的不同进行分类,主要有地震勘探、直流电法、电磁波法、重磁勘探、放射性同位素测量、地热测量、岩体声波探测等,其中高分辨震波勘探是一种探测井下各种构造较为有效的物探方法。同时,在上述物探方法中,依据各种场源(如地震波场、电流场、电磁波场、重力场等)在不同物性条件载体中传播方式的不同,出现了各种适合井下特殊工作环境的探测仪器与设备。

高分辨矿井震波勘探是在一般地面地震勘探基础上发展起来的新技术,目的旨在提高探测小构造的能力。20 世纪 50 年代以前,国外煤田勘探中较少采用地面物探方法。进入 70 年代以后,英、美、德、前苏联等国家纷纷应用以地震勘探为主的地面物探方法,并将其作为一种主要的勘探手段,同时应用地震勘探技术研究小断层也有所发展,并在提高地震勘探分辨率上做了大量细致的工作。20 世纪 80 年代初,美国采用地面和孔中物探相结合的方法进行地下洞穴与构造的探测研究,研制了自动电阻率系统并进行了直流电法及地震、重力、电磁、雷达等的综合探测试验,取得了一定的进展。我国煤炭科学研究总院西安研究院与中国煤炭地质总局下属物探队开展的高分辨地震勘探工作已获得明显成功,同时在研制自动电阻率系统方面也取得了进展。中国矿业大学采用高密度电阻率法为主的电法、地震法等综合物探方法在地面进行的陷落柱探测和安徽理工大学研制生产的 KDY—1 型浅层地震仪用于井下各种小构造探测,均获得了一定的成功。煤炭科学研究总院西安研究院开发的 MRD 系列瑞雷面波探测仪在井下小构造探测方面取得了一定的应用效果;中国矿业大学开发的 ITS—1 型三分量地震仪,用以探测井下煤体结构构造;安徽理工大学开发的 KDZ1114—3 型矿井地质探测仪,对各种井下地质构造及异常进行探测,均取得了较好的效果,对煤矿科学技术的进步产生了极大的推动作用。应该说,矿井物探技术的应用与发展,不仅给人们提供了新的矿井地质工作手段,提高了成果资料的可靠程度,而且推动了煤矿开采技术的进一步发展,反过来矿井开采技术的进步又不断推动矿井物探技术的深入发展。总的来看,经过半个多世纪的研究与生产实践,从整个矿井探测技术到矿井仪器设备等各个方面都取得了明显的成果。但是单纯从井下探测技术的发展角度来看,由于探测条件的复

杂程度不同,探测影响因素较多,对矿井地质构造预测、预报没有达到预期的地质效果,尤其是落差在 2~5 m 的断层构造预测精度、矿井水害防治、瓦斯赋存条件评测等这些影响矿井安全生产的重要地质因素方面,其技术水平还远远未能达到适应矿井开采条件快速发展的技术要求。我们目前所做的研究工作正是结合矿井实际条件,从影响井巷生产的地质因素出发,力求为矿井地质工作者提供日常地质条件探测与预测的技术手段和方法,并努力使矿井地质构造探测走地下物探探测的道路。

煤炭作为当今我国的主要能源与化工原料,约占全国能源市场的 75%。随着国民经济的不断发展,各个行业对煤炭的需求量会不断地增加,于是一批批高产高效的综采工作面相继投产,其产量在总产量中的比重逐渐上升。综合机械化开采程度的不断提高,要求地质保障体系必须得到保证,因此,从地质角度必须能够及时、准确预测预报采区内和工作面前方各种地质构造与异常,诸如小断层、褶曲、陷落柱、老窑、煤层的冲刷与风化、煤层的分叉与合并、煤层厚度的变化、岩浆岩体侵入、溶洞、老空区、可能的涌水点及通道、顶板与围岩的稳定性、瓦斯赋存条件、煤与瓦斯突出预报等诸多地质因素。所有这些地质现象与异常,即使规模不大,如果未能超前探测,除造成采掘系统布局不合理、资源浪费外,还将直接影响综采高产高效优势的发挥和矿井灾害的有效防治,并危及矿工与矿井的安全,会造成巨大的经济损失。因此,围绕着煤炭工业的高产高效建设、改善矿井安全状况,开展地质工程保障环节的研究是矿井物探技术的出发点和目标。随着煤炭能源工业的发展和基础工程开发强度的加大,对地质工程勘查检测技术要求更快更准,由于地下采掘环境的特殊性,矿山井下和其他地下基础工程部门急需提高地质工程勘探手段,使其能够更加及时、准确地提供地质资料。可以预见,矿井震波探测技术的深入研究将是矿井地质和矿井物探工作者永远的任务。

第三节 地下工程震波探测技术研究意义

20 世纪 80 年代以前,基本的勘探手段是传统的地质学方法、地质统计方法、钻探和巷探,只能查找落差在 20~50 m 的断层。从 20 世纪 80 年代起,高分辨率地震勘探技术已经逐步发展完善,成为主要的煤田地质勘探手段,并得以广泛应用。目前,震波勘探广泛用于采区合理布置、主巷道的开拓、综采工作面开采地质条件评价等工作内容,为矿区开发设计与生产提供可靠、正确的决策依据。具体来说,在地震地质条件特别理想的条件下,可以查明落差在 5~10 m 的小断层,但这些与煤矿综采对地质条件的要求相差甚远。因此,影响工作面安全高效生产的落差在 2~3 m 的小断层必须通过矿井中的高效物探技术加以解决。

随着煤矿生产机械化、自动化、集约化程度的不断提高,建设高产高效矿井成为诸多煤矿努力的目标。建立地质安全保障系统是矿井地质技术发展的必然趋势,也是建设高产高效矿井给矿井地质和矿井物探工作者提出的新课题。高产高效矿井地质保障系统是根据高产高效矿井机械化、集约化程度高的特点,以地质量化预测为目标,以物探、钻探等综合技术为手段,依托先进的计算机技术实现地质工作的动态管理。地质安全保障系统包括两大主题,即生产地质保障和安全地质保障。具体来说,一是准确地查明井巷、采区乃至工作面的开采地质条件,特别是采区和工作面内隐伏构造及顶底板条件,以保障综采工作面的顺利展开;二是有效预测和防治诸如煤与瓦斯突出、突水等矿井地质灾害,以保障矿山的安全生产。

这些要求在综合应用矿山信息的同时,加强对矿井各种地质条件的探查力度,做到精确预测与预报,为安全开采做好各种应对措施。应该说,影响煤炭开采的地质因素很多,主要有煤层厚度及其变化、顶底板岩层组合特征及发育特点、断层褶曲等构造的特征及分布规律、矿井水文地质条件、瓦斯地质及煤体结构特征,等等。查明这些地质因素对矿井开采的影响,为煤炭生产提供可靠的地质依据,是地质保障系统的主要内容。在上述各种主要地质因素中,构造因素及矿井水文地质条件是最主要的,所以探明地质构造规律及查清水文地质条件因素是解决煤层开采地质条件的基础。本书以井巷工程中所遇到的各种地质因素进行深入研究,力求通过震波勘探技术去解决问题,其适用范围广,研究意义重大,将会为矿井安全高效生产带来巨大的经济效益和社会效益。

第二章 震波探测技术的基本原理

震波探测技术是应用地震学原理,通过人工激发的震波在地下传播过程中,遇到不同地质体时,由于波速、密度、弹性模量等物理性质的变化,导致震波发生反射、折射、透射、衍射、散射等现象,通过接收器接收这些震波信号,经过处理和分析,从而获得地下地质体的构造信息。震波探测技术广泛应用于石油、天然气、煤炭、金属矿产、水文地质、工程地质等领域。在矿井安全高效生产中,震波探测技术主要用于探测煤层厚度、顶底板岩层组合、断层褶曲、瓦斯地质、煤体结构等地质因素,为矿井开采提供可靠的地质依据。

震波探测技术的基本原理是利用震波在地下传播过程中,遇到不同地质体时,由于波速、密度、弹性模量等物理性质的变化,导致震波发生反射、折射、透射、衍射、散射等现象,通过接收器接收这些震波信号,经过处理和分析,从而获得地下地质体的构造信息。震波探测技术广泛应用于石油、天然气、煤炭、金属矿产、水文地质、工程地质等领域。在矿井安全高效生产中,震波探测技术主要用于探测煤层厚度、顶底板岩层组合、断层褶曲、瓦斯地质、煤体结构等地质因素,为矿井开采提供可靠的地质依据。

第二章 震波勘探的基本原理

第一节 震波勘探的理论基础

震波勘探是研究由人工激发的地震弹性波在煤层、岩层及土层中传播规律的一门科学。弹性波的传播规律取决于煤、岩石及土体的弹性介质。

一、地震波的形成与描述

(一) 地震波的形成与实质

地震勘探中,通常以锤击或小药量爆炸为震源,炸药爆炸时产生大量高温高压气体,并迅速膨胀形成巨大的压力作用于周围的岩土体介质,这个作用力是个瞬时起作用的脉冲力,在其作用下,靠近震源附近的岩土体因受到的压力远超过抗压强度而破坏,形成一个球形破坏圈。圈内岩土质点产生永久位移,常形成以震源为中心的空穴。爆炸产生的部分能量在压碎岩土体和发热过程中被消耗掉。随着离震源中心距离 r 的增大,爆炸能量将传递给越来越多的岩土单元,因而,冲击能量密度随着波的传播而迅速衰减,以致岩土体所受压力小于其抗压强度,但仍超过其弹性限度,使岩土质点仍产生一定的永久位移,从而形成塑性形变(辐射状或环状裂隙),这个区间叫做塑性变形带,如图 2-1(a)所示。

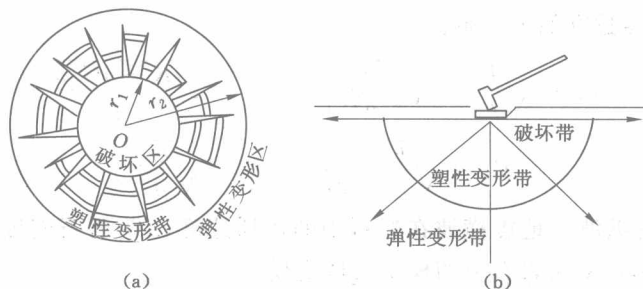


图 2-1 爆炸震源与锤击震源

(a) 爆炸震源;(b) 锤击震源

在塑性变形带以外,随着传播距离 r 的继续增大,冲击波的能量密度继续衰减,使岩土体所受压力降低到弹性限度之内,变形和应力很小,作用时间又很短促,岩土体就表现为完全弹性体的性质,其质点受激而产生弹性位移(形变),同时也就发生与之对抗的应力,使质点产生反向位移,从而使质点在平衡位置附近形成弹性振动。在塑性变形带外面的区域就是所谓的弹性变形区。在本区内,由于岩土体具有连续结构,各质点之间存在弹性联系,形成由近而远的弹性振动传播。

因为每个质点的振动延续 Δt 时间才停止,所以在这个短暂的 Δt 时间内,岩土的一个球层范围内所有质点都处于扰动状态中,这个球层扰动带不断向远处传播的运动过程就形成

了弹性地震波。这就是地震波的形成过程。

锤击震源与爆炸震源机理很相似。锤头加速下落,撞击在锤垫上,通过锤垫把能量传递给土、岩石或煤层。在锤垫下方形成一范围不大的塑性变形带,其质点产生一定的永久位移,锤垫也随之下沉。塑性形变带的外面即弹性形变区,由锤击产生的冲击波以半球面向外传播,同样形成弹性地震波,如图 2-1(b)所示。

由此可见,弹性地震波的实质就是在弹性形变区范围内的弹性扰动——岩土质点弹性位移(形变)不断向外传播的一种运动过程。因此,弹性波的形成需要两个基本条件:一是有震源;二是要有传播振动的介质。两者缺一不可。

(二) 地震波的分类

1. 纵波与横波

可按介质质点的振动方向与波动传播方向之间的关系,将地震波分成纵波和横波两类。质点的振动方向与波传播方向一致的地震波,称为地震纵波(P波),质点的振动方向与波传播方向垂直的地震波,称为地震横波(S波)。

纵波是体积形变,即拉伸与挤压形变在介质中的传递,该波的传播方向和质点振动的方向一致,在纵波经过的扰动带内,会间隔地出现膨胀(稀疏)带和压缩(稠密)带,故纵波有时也叫做疏密波或者压缩波。它是同一介质中传播速度最快的波。

横波,也叫做切变波,它是形状形变,即剪切形变在介质中的传递。该波的传播方向与质点的振动方向相垂直。质点振动在水平平面中的横波分量称为 SH 波,在垂直平面中的横波分量称为 SV 波。

在一般情况下,锤击和爆炸时将同时产生 P 波和 S 波,它们可以以不同的速度在煤(岩)土体中独立地向外传播。由弹性波理论可以证明,它们的传播速度(简称波速)与反映岩土体性质的弹性参数有如下关系:

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} = \sqrt{\frac{K+4G/3}{\rho}} \quad (2-1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1+\sigma)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-2)$$

式中, V_P 、 V_S 为地震纵波与地震横波在岩石中的传播速度; ρ 为岩石密度; σ 为岩石泊松比; E 为岩石杨氏模量; G 、 K 为岩石剪切模量及体变模量。

纵波与横波的传播速度的比为:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}} = \sqrt{\frac{K}{G} + \frac{4}{3}} \quad (2-3)$$

V_P/V_S 比值与介质泊松比 σ 的关系如表 2-1 所示。

表 2-1 V_P/V_S 值与介质泊松比 σ 的关系

σ	0	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
V_P/V_S	1.41	1.5	1.63	1.73	1.87	2.45	∞

对于大多岩石来说, σ 约为 0.25,即 $\sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} = 1$,所以式(2-1)近似为:

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-4)$$

式(2-4)说明岩石的纵波传播速度与杨氏模量 E 的平方根成正比,与密度 ρ 的平方根成反比,一般 ρ 的变化比较小,所以 V_P 主要由 E 来决定。在做岩体的弹性波速度测定时,纵波速度 V_P 可用来评价岩体的弹性强度。当 σ 约为 0.25 时, $V_P \approx 1.73 V_S$, 可见 P 波比 S 波的传播速度要快得多,而且由于炸药爆炸时激发的主要是胀缩力,使产生的 P 波最强。因此,目前地震勘探中主要利用 P 波。

横波不能在液体和气体中传播(液体表面除外),因为在液体和气体内部 $G=0$ 。横波虽然速度低、能量弱,以致来自同一界面的横波总是比纵波到达得晚,以续至波形式出现,但它的分辨率高。此外,若能测定横波的速度 V_S 作为纵波速度资料的补充,就可以根据 V_P 和 V_S 的数据计算弹性模量,并可判断孔隙性岩石的孔隙度与孔隙中流体的性质。因此,近年来的所谓横波地震勘探一直在试验和改进之中,并已有一定的进展。

2. 面波

在介质体内传播的波叫体波,纵波和横波都在介质体内部传播,统称体波。根据弹性力学理论,除体波以外,还存在另一类波,它们仅仅沿弹性介质表面传播,离开界面而深入介质内部就会很快衰减。从能量的角度来说,它们只分布在弹性表面附近,因此统称面波,主要有瑞雷面波和拉夫面波。

(1) 瑞雷面波

一种沿介质与空气接触的分界面(即地表面或自由表面)传播的面波,称为瑞雷面波(R波)。它是纵波与横波在地表附近的复合振动,其特点是:质点的振动轨迹与前进中的车轮转动方向相反,大致为逆时针方向的椭圆运动,即为一个向震源逆进的椭圆,故形成所谓的“地滚波”。椭圆平面与传播方向一致,其长轴垂直于介质表面,长短轴比值大致为 3/2。瑞雷面波的传播速度 V_R 较低,当 $\sigma=0.25$ 时,只有表层介质中横波波速 V_S 的 92%,纵波速度 V_P 的 54%,即:

$$V_R = 0.92V_S = 0.54V_P \quad (2-5)$$

瑞雷面波的能量随深度迅速衰减,一般最多只在离地面几十米的深度范围内能观测得到。

(2) 拉夫面波

一种沿两种弹性介质之间的界面传播的面波,称为拉夫面波(L波)。这种面波的能量沿这样的地震界面分布,这种界面上层(近震源的岩层)横波波速 V_{S1} 低于下层(离震源远的岩层)横波波速 V_{S2} 。拉夫面波传播时,岩石质点的振动方向与传播方向垂直,而振动平面与界面平行,它的传播速度 V_L 介于 V_{S1} 和 V_{S2} 之间,即:

$$V_{S1} < V_L < V_{S2} \quad (2-6)$$

对于水平层状模型来说,拉夫面波可以看做是 SH 波的特殊形式。若使用只能感受垂直于地面振动的检波器,就不会接收到这种面波。

R 波与 L 波的强度在一定条件时可以很大,甚至完全掩盖反射纵波,而它们与地下岩层构造特点并不相关。因此,在地面地震勘探中,它们是一种干扰波,而反映地下岩层构造特点的反射波或折射波,被称为有效波。当然,这种概念是相对的,在煤矿井下采区中应用透射波法勘探煤层小构造时,在煤层内传播的面波将视为有效波而加以利用。