

国家自然科学基金项目 (51504250, 51574231) 资助

教育部科学技术研究项目 (113031A) 资助

江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20150183) 资助

煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题 (SKLCRSM14X03) 资助

中央高校基本科研业务费专项资金 (2015QNA58) 资助

微震震源定位的关键因素 作用机理及其应用

李楠 王恩元 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(51504250,51574231)资助

教育部科学技术研究项目(113031A)资助

江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150183)资助

煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题(SKLCRSM14X03)资助

中央高校基本科研业务费专项资金(2015QNA58)资助

微震震源定位的关键因素 作用机理及其应用

李 楠 王恩元 著



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

微震监测技术作为一种实时、动态、连续的监测手段,在岩土工程中得到了广泛应用。本书主要研究微震传感器台网、波速模型和到时等关键影响因素对微震震源定位的作用机理及震源定位可靠性综合评价体系。本书研究建立了微震震源定位双曲线控制方程(MHGE),分析了震源定位双曲线域的非均匀性几何特征;实验研究了微震传感器台网、波速模型和到时等关键影响因素对震源定位精度和稳定性的影响规律;揭示了微震传感器台网对震源定位的作用机制以及波速和到时误差在震源求解中的传播特性;建立了微震到达波类型(P波、S波、延迟波和外部异常波)自动识别模型(APSIM)、基于 APSIM 的单纯形震源定位方法(APSIM-Simplex)和震源定位可靠性综合评价体系(SLRES),并进行了模拟实验和现场试验验证;研发了微震定位及可靠性评价系统,并在现场进行了应用。本书研究成果对进一步提高震源定位精度和微震监测预警的准确性、促进微震监测技术的应用等具有重要理论意义和应用价值。

本书可供从事微震/声发射理论与技术、采矿地球物理、煤岩动力灾害、岩土工程、油气开发等研究领域的科技工作者、研究生、本科生和相关领域工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

微震震源定位的关键因素作用机理及其应用/李楠,

王恩元著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5646-2819-2

I. ①微… II. ①李… ②王… III. ①震源—地震定位—研究 IV. ①P315. 61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 212226 号

书 名 微震震源定位的关键因素作用机理及其应用

著 者 李 楠 王恩元

责任编辑 于世连 何晓惠

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 字数 325 千字

版次印次 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价 48.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

20 世纪 30 年代末期,美国矿业局(U. S. Bureau of Mines ,USBM)的研究员 Obert 和 Duvall 在深部矿井进行声波探测研究时,偶然发现了受载岩石会向外界发射声波的现象,他们当时把这种现象称之为“Rock Talk”。随后,大量的实验室和现场实验都验证了这种被称为“Rock Talk”的现象,即微震活动现象。微震监测技术是指利用岩体破裂过程中的微震活动来研究和评价岩土工程中岩体稳定性的一种地球物理实时监测技术。通过监测和分析岩体损伤破裂过程中产生的微震信号,微震监测技术能够对岩体破裂产生的微震事件进行震源定位,监测岩体内部的应力分布状态、空间破裂形态以及释放的能量,并对岩体破裂机制进行分析。该技术最早被用来研究硬岩矿井中的岩爆问题。近年来,微震监测技术在矿山、隧道、地热工程、油气田水力压裂监测等地下工程和边坡、路基、堤坝等露天工程中岩体结构稳定性和裂隙场空间形态的监测监控与评价等领域得到了广泛应用。微震监测技术主要包括监测方案的制定和监测系统的优化、微震信号的接收和处理、微震震源定位等方面的研究。其中,震源定位是微震监测技术的基本问题,被认为是微震监测技术优于其他方法的重要特征。微震震源定位是利用传感器记录的波形信号和到时数据计算微震事件的空间坐标和发震时刻,并对震源定位结果进行评价。准确的微震震源定位能够确定岩体破裂区域和时间,是微震监测技术的基础。国内外学者围绕微震震源定位开展了大量的研究工作,但在实际应用中,震源定位精度并不理想并缺乏评价震源定位结果的有效方法。因此,系统深入研究震源定位的关键因素及作用机理以及震源定位可靠性评价,对进一步提高震源定位精度和微震监测预警的准确性、促进微震监测技术的应用等具有重要理论意义和应用价值。

在国家自然科学基金项目(51504250,51574231)、教育部科学技术研究项目(113031A)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150183)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题(SKLCRSM14X03)、中央高校基本科研业务费专项资金(2015QNA58)、中国矿业大学“启航计划”等项目的资助下,经作者多年研究,在微震传感器台网、波速模型和到时等关键影响因素对微震震源定位的影响规律及其作用机理、微震震源定位方法、微震波形识别、微震震源定位可靠性评价等方面取得了一些创新性成果。本书对以上方面进行了较为详细的论述,希望能够为从事此方面及相关领域研究的科技工作者提供参考。

本书围绕微震震源定位及可靠性评价,采用理论分析、实验室实验、数值模

拟、现场试验等方法,实验研究了微震传感器台网、波速模型和到时等关键影响因素对震源定位精度和稳定性的影响规律;研究建立了微震震源定位双曲线控制方程(MHGE),分析了震源定位双曲线域的非均匀性几何特性,在此基础上,研究并揭示了微震台网对震源定位的几何扩散效应和方向控制效应,分别构建了两种效应的三维空间量化模型;研究了波速和到时误差在震源求解中的传播特性;建立了微震到达波类型(P波、S波、延迟波和外部异常波)自动识别模型(APSIM)、基于 APSIM 的单纯形震源定位方法(APSIM-Simplex);提出了评价震源定位可靠性的事件残差指标、敏感度指标、触发序列指标,确定了各指标的评价准则,建立了震源定位可靠性综合评价体系(SLRES);研发了微震定位及可靠性评价系统,并在现场进行了应用。

全书共分8章。第1章介绍了微震监测技术及其研究现状,微震震源定位方法、微震震源定位影响因素、微震震源定位评价及其研究现状,提出了本书的研究内容及研究方法。第2章介绍了微震震源定位基本原理及常用的微震震源定位方法。第3章介绍了影响微震震源定位的关键影响因素。第4章开展了震源定位关键影响因素实验,研究了传感器台网、波速和到时等关键影响因素对震源定位精度和稳定性的影响规律。第5章研究了微震传感器台网对震源定位的作用机理,分析了波速和到时误差在震源定位求解中的传播特征。第6章建立了微震到达波类型(P波、S波、延迟波和外部异常波)自动识别模型(APSIM)和基于 APSIM 的单纯形震源定位方法(APSIM-Simplex),并进行了现场试验验证。第7章提出了评价震源定位结果的事件残差指标、敏感度指标和触发序列指标,建立了震源定位可靠性综合评价体系(SLRES),并进行了模拟实验和现场试验验证。第8章研发了微震定位与可靠性评价系统,并进行了现场应用。

作者在研究工作中多次与美国密苏里科技大学 GE Maochen 教授在微震/声发射监测技术、震源定位理论及方法以及本书研究方法和研究内容等方面进行了深入探讨和交流,在此成书之际,作者衷心感谢 GE Maochen 教授的关心和指导。作者衷心感谢中国矿业大学刘贞堂教授、李忠辉教授、刘晓斐副教授、赵恩来博士、宋大钊博士等的关心和帮助;衷心感谢密苏里科技大学 Jerry C. Tian 教授、Stephen S. Gao 教授、Amir Bagherieh 博士、Ibrahim Ahmed 博士、张喜臣博士,中国矿业大学沈荣喜副教授、贾慧霖博士、欧建春博士、金佩剑博士、陈鹏博士、马衍坤博士、魏明尧博士、刘杰博士、胡少斌博士、唐一博博士,西安科技大学张玉涛博士、丁自伟博士等在研究工作中的有益探讨和交流。特别感谢中国矿业大学李学龙博士、孙珍玉硕士、李保林硕士、何森硕士、邱黎明硕士等参与的部分研究工作。特别感谢中国地震局地球物理研究所王宝善研究员、和泰名副研究员、宋丽莉副研究员、杨微博士、朱维硕士在实验室实验方面提供的大力支持和帮助。感谢河南义马煤业集团千秋煤矿魏向志总工程师、杨

超科长、苏士杰副科长、王江技术员、卫超技术员在现场试验中给予的帮助和协作。本书在撰写过程中参阅了大量的国内外相关研究领域的文献,在此谨向文献的作者表示诚挚的感谢。最后,感谢中国矿业大学出版社于世连、何晓惠编辑及相关工作人员为本书的出版所付出的辛勤劳动。

本书在微震震源定位的影响因素及其作用机理方面虽然取得了一些的成果,但还有很多内容需要今后进一步深入研究和完善。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

2015 年 7 月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 微震监测技术研究现状	3
1.3 微震震源定位研究现状	9
1.4 微震震源定位存在的主要问题	14
1.5 研究方法及其研究内容	15
2 微震震源定位理论与方法	16
2.1 微震震源定位方法分类及基本理论	16
2.2 到时不同震源定位的优化分析方法	21
2.3 到时不同震源定位方法	23
2.4 本章小结	33
3 微震震源定位关键影响因素分析	35
3.1 传感器空间坐标	35
3.2 到时时间	35
3.3 波速模型	38
3.4 微震传感器台网	39
3.5 微震震源定位方法	40
3.6 微震震源定位双曲线控制方程(MHGE)	41
3.7 本章小结	44
4 微震震源定位的关键影响因素实验研究	46
4.1 实验内容及方案	46
4.2 震源定位实验系统	56
4.3 震源定位实验结果	58
4.4 关键因素对震源定位的影响分析	79
4.5 本章小结	88
5 关键因素对微震震源定位的作用机理	90
5.1 传感器台网与微震震源多解	90
5.2 微震震源定位双曲线域几何特征	98
5.3 微震传感器台网对震源定位的作用机制	99

5.4	波速误差和到时误差传播特征	109
5.5	本章小结	111
6	微震到达波类型自动识别与单纯形震源定位方法	113
6.1	微震到达波类型自动识别模型	113
6.2	基于 APSIM 的单纯形震源定位方法	118
6.3	现场试验验证	123
6.4	本章小结	142
7	震源定位可靠性综合评价体系	144
7.1	微震震源定位可靠性	144
7.2	震源定位可靠性评价指标	145
7.3	震源定位可靠性综合评价体系	149
7.4	SLRES 实验验证	150
7.5	本章小结	160
8	微震震源定位与可靠性综合评价系统应用	162
8.1	微震震源定位与可靠性综合评价系统	162
8.2	应用矿井概况	166
8.3	微震震源定位与可靠性综合评价系统应用	171
8.6	本章小结	185
参考文献		187

1 绪 论

1.1 引 言

我国是世界上最大的产煤国,同时也是发生煤矿灾害事故最严重的国家之一。至 2010 年底,全国煤炭保有查明资源储量为 13 412 亿 t(中国煤炭网,2012)。从表 1-1 中可以看出,近十年来中国煤炭产量呈现逐年上升的态势,其中,2010 年中国煤炭产量首次突破 30 亿 t,达到 32.4 亿 t。根据《BP 世界能源统计 2011》,2010 年我国煤炭产量占全球煤炭产量的 48.3%;2011 年我国煤炭产量为 35.2 亿 t,同比增加 2.8 亿 t,煤炭在一次能源生产结构中的比重接近 80%。国家《2004~2020 年能源中长期发展规划纲要》(草案)中明确提出坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的战略。《煤炭工业“十二五”发展规划》也指出煤炭是我国的主体能源,在一次能源结构中占 70%左右。在未来相当长时期内,煤炭作为主体能源的地位不会改变。煤炭工业是关系国家经济命脉和能源安全的重要基础产业,并要求 2015 年末将全国煤炭产量控制在 39 亿 t。因此,煤炭产业在未来相当长的时期内将有着广阔的前景,这就要求了必须保证煤炭的高效安全开采。

我国 95%以上煤炭生产是井工作业,加之煤炭资源赋存条件复杂,生产技术条件和装备总体比较落后,人员素质参差不齐且技术管理水平较低(王超,2011),煤矿安全仍是制约我国煤炭工业发展的突出问题。表 1-1 给出了我国 2003~2014 年原煤产量与百万吨死亡率统计情况,从表中可知,尽管全国煤矿死亡人数及百万吨死亡率呈逐年下降趋势,但是死亡人数和百万吨死亡率依然偏高,我国煤炭安全生产仍然存在着很多问题。

表 1-1 2003~2014 年全国原煤产量与百万吨死亡率

时间	煤炭产量/亿 t	死亡人数	百万吨死亡率
2003	17.4	6 434	3.710
2004	19.4	6 009	3.100
2005	21.2	5 938	2.811
2006	23.3	4 746	2.041
2007	25.2	3 786	1.485
2008	27.2	3 210	1.182
2009	30.5	2 721	0.892
2010	32.4	2 428	0.749
2011	35.2	1 973	0.564
2012	36.4	1 366	0.374
2013	39.7	1 067	0.293
2014	38.7	931	0.257

近年来,随着煤矿开采深度的增加和开采强度的提高,我国中东部产煤区浅部煤炭资源已逐渐枯竭,目前平均开采深度已达 600 m 左右,并且每年以 10~20 m 的速度向深部延伸(晏玉书,1996;何满潮,2004;何满潮等,2005)。矿山地震(矿震)、顶板大面积垮落、煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩动力灾害日趋严重。其中冲击地压作为采矿诱发的破坏性矿震,长期以来一直是威胁我国矿山安全高效生产的重大灾害之一(窦林名等,2001;潘一山等,2003;何满潮等,2007;Li et al.,2007)。许多原来没有发生过冲击地压灾害的矿井,现在开始发生冲击地压灾害;原来发生过冲击地压灾害的矿井,现在的冲击地压的强度越来越大,频率也越来越高(潘一山等,2003;Li et al.,2007;巩思园,2011)。例如,2005 年 2 月 14 日,阜新孙家湾煤矿发生冲击地压引发瓦斯爆炸事故,死亡 214 人;2006 年 1 月 3 日,开滦赵各庄矿发生冲击地压,震级达 3.6 级,造成煤层整体突出、巷道阻塞等;2011 年 11 月 3 日,河南省义马煤业集团股份有限公司千秋煤矿发生一起重大冲击地压事故,死亡 10 人(Li et al.,2007;路菜平,2007)。

冲击地压通常是在煤岩力学系统达到强度极限时,聚积在矿井巷道和采场周围煤岩体中的能量突然急剧释放,产生的动力将煤岩体抛向巷道,同时发生强烈声响,造成煤体震动和破坏、支架和设备损坏、部分巷道垮落破坏、人员伤亡等,严重时将造成地面震动和建筑物破坏等(李玉生,1982;窦林名等,2001;钱鸣高等,2010)。此外,冲击地压还可能引发其他矿井灾害,如瓦斯异常涌出、煤与瓦斯突出、瓦斯与煤尘爆炸、矿井火灾、水灾等(窦林名等,2001;潘一山等,2003;何满潮等,2007;钱鸣高等,2010)。矿震是采矿诱发的地震活动。在各类诱发地震中,由于采掘空间距离震源较近,矿震烈度远大于同级天然地震烈度,危害非常严重,直接关系到矿山的安全问题。顶板滑移失稳、断裂,地表塌陷,冲击地压等均属于矿震的范畴。冲击地压属于破坏性矿震,它与矿震的关系为(窦林名等,1999;窦林名等,2001):每一次冲击地压的发生都伴随着较大强度的矿震,但并非每一次矿震都能引发冲击地压。由此可见,冲击地压的发生伴随着众多小能量级别的矿震活动(或称“微震”Micro-seismic Activities),而这些微震活动则是研究冲击地压等破坏性矿震的重要信息。

微震监测技术是指利用岩体破裂过程中产生的微震信号来研究和评价岩土工程中岩体稳定性的一种地球物理实时监测技术(陈颢,1977;Hardy,2003;Ge,2005)。通过分析煤岩体损伤破裂过程中产生的微震信号,并对微震事件进行震源定位,微震监测技术可监测采场围岩内部的应力分布状态和顶底板活动规律、空间破裂形态以及释放的能量(陈颢,1977;窦林名等,2002;曹安业等,2007b;陆菜平等,2010)。近年来,采用微震技术对煤矿冲击地压、顶板大面积垮落等微震活动进行监测监控已经成为一个重要的研究方向(陈颢,1977),国内多家煤矿也安装了微震监测系统,例如:山东能源新汶矿物集团华丰煤矿安装了北京科技大学与澳大利亚联邦科学工业研究院勘探采矿局(CSIRO)共同研制开发的适合井下使用的微地震监测系统(姜福兴等,2002;姜福兴等,2006);大同煤矿集团忻州窑煤矿安装了波兰矿山研究总院采矿地震研究所的 SOS 微震监测系统(陆菜平等,2010);义马煤业集团公司千秋煤矿引进加拿大 ESG 公司的微震定位监测系统和波兰矿山研究总院的 ARAMIS 微震监测系统对矿震活动进行日常监测监控(张书敬等,2012)。

通常,微震监测技术主要包括监测方案的制订和监测系统的优化、微震信号的接收和处理、微震震源定位等方面的研究,其中震源定位是微震监测技术的基本问题,被认为是微震监测技术优于其他方法的重要特征(陈颢,1977;Ge,1988;Hardy,2003;Ge,2005)。微震震

源定位是利用传感器记录的波形信号和到时数据计算微震事件的空间坐标和发震时刻,并对震源定位结果进行评价(陈颢,1977;Hardy,2003;Ge,2005)。准确的微震震源定位能够确定煤岩体破裂区域和时间,是微震监测技术应用的基础(Hardy,2003;Ge,2005;姜福兴等,2006;朱权浩等,2013)。然而,在实际应用中震源定位精度并不理想,而且缺乏评价震源定位结果优劣的有效方法,震源定位的影响因素及作用机制、震源定位可靠性评价方法是当前亟须解决的关键科学和技术问题。

基于上述关键科学技术问题,本书围绕微震传感器台网、波速模型和到时等关键因素对震源定位的作用机制及震源定位可靠性评价展开研究。基于到时不同震源定位理论,建立震源定位双曲线控制方程(MHGE);通过实验和理论研究关键因素对震源定位的影响规律和作用机制。在上述研究的基础上,建立微震到达波类型(P波、S波、延迟波和外部异常波)自动识别模型(APSIM)和基于 APSIM 的单纯形震源定位方法(APSIM-Simplex);提出评价震源定位可靠性的事件残差指标、敏感度指标和触发序列指标,建立震源定位可靠性综合评价体系(SLRES);进行了实验验证和现场应用。通过以上研究,在进一步认识关键因素对微震震源定位的作用机制、提高震源定位精度和稳定性、推动微震监测技术在矿山安全领域的应用等方面具有重要理论意义和应用价值。

1.2 微震监测技术研究现状

1.2.1 微震监测技术概述

大多数固体材料在受外力或内力作用产生变形或断裂过程中以弹性波形式向外界释放出应变能的现象称为声发射/微震活动(Acoustic Emission/Microseismic Activities)(袁振明等,1985;腾山邦久,1996;Hardy,2003)。微震监测技术就是利用这种现象研究岩土工程中岩体变形破裂等问题的一种地球物理学方法,该技术最早被用于研究硬岩矿井中岩爆和煤矿中的冲击地压问题(Obert et al.,1942;Cook,1964;Obert,1975;Hardy,2003)。近年来,微震监测技术在岩土工程中得到了广泛应用,例如,对矿井、隧道、天然气和石油的储存、地热工程、核废料处理等地下工程以及边坡、路基、堤坝等露天工程中结构的稳定性进行监测监控与评价(Hardy,2003)。事实上,无论在现场还是在实验室,声发射/微震活动的测试都非常简单,首先选择合适的传感器,将其固定在将要进行监测的部位,然后通过信号传输系统将传感器连接到声发射/微震监测系统,当被监测的对象因内力或者外力产生变形破坏时,内部产生的声发射/微震信号将被记录下来。声发射/微震监测系统并不能直接获取监测对象的应力、应变等力学参数,而是利用试样在受力或者变形过程中的声发射/微震信息对其受力状态、稳定性等进行评价,因此声发射/微震监测技术是一种间接的测量技术(Hardy,2003)。下面介绍一些声发射/微震研究领域的基本概念。

(1) 声波技术

在众多利用声波研究材料性质的技术中,根据声波的来源不同,可将其分为两大类(陈颢,1977;Hardy,2003),如图 1-1 所示。一类是声波探测技术图[1-1(a)],另一类是声发射/微震监测技术[图 1-1(b)]。声波探测技术通常利用两种作用不同的传感器,一种传感器发射波信号,信号在介质中传播后再被另一种传感器接受,通过比较发射波信号与接收波信号

的到时、相位、振幅等参数来反演介质的情况。自然界的地震勘探、地壳测深,实验室中试样的超声波探伤、弹性波速测量等都属于声波探测技术。声发射/微震监测技术只采用接受传感器(一个或多个),它不主动发射声波信号,而是被动接收材料自身产生的震动波信号。众所周知,声发射/微震活动是材料在受力和发生形变过程中产生的,因此,根据震动波信号可以了解材料的受力状态和损伤破裂过程。天然地震的监测、冲击地压的微震监测预警、实验室岩石材料损伤破裂的声发射特征等都属于声发射/微震监测研究范畴。

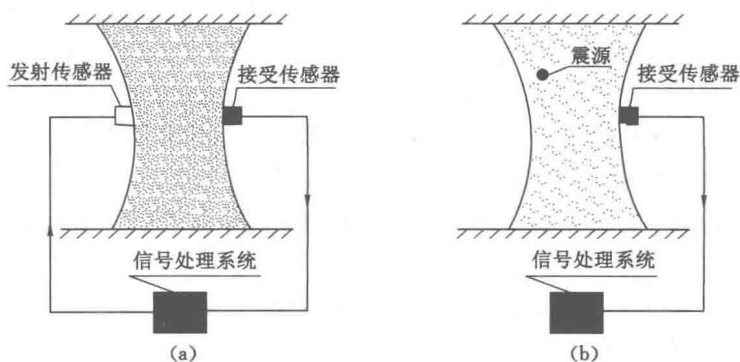


图 1-1 两种不同的声波技术

早在 20 世纪 30 年代末期,美国矿业局(U. S. Bureau of Mines, USBM)的研究人员 Obert 和 Duvall 就已经采用声波探测技术在具有岩爆倾向性的矿井进行岩石力学的相关研究(Obert et al., 1942)。他们将一对声波发射器和接受器分别安装在矿柱的两侧,试图通过测量声波速度的变化规律来研究矿柱内应力的变化,然而当他们将声波发射器拆除后,接受传感器仍然能接收到声波信号,声发射/微震监测技术就此诞生并快速发展,在很多领域得到了广泛的应用(Obert et al., 1942; Obert, 1975)。

声波探测技术通过对比分析发射和接受的声波对材料的裂缝、断层等缺陷进行探测。声发射/微震监测技术通过接受材料自身在损伤破裂过程中产生的震动波信号,对波形信号进行分析并计算破裂的发生时间和位置,因此它不但能够监测材料内部的缺陷,还能够推断缺陷的形成过程和发展趋势。声发射/微震监测技术的上述特征优势使得它在岩土力学和工程中得到了快速发展和广泛应用。

(2) 声发射/微震源

声发射/微震活动是材料在变形破坏过程中应变能的一种突然释放现象。声发射/微震源是材料产生声发射/微震活动的源泉,它既包含产生声发射/微震事件的时空信息,又包含声发射/微震活动的产生机制。对于金属材料的声发射活动,国内外大量学者进行了大量细致的研究(Bassim et al., 1987; Wadley et al., 1987; 耿荣生等, 1996; 王丽君等, 2002; 沈功田等, 2003)。一般认为,金属材料的塑性变形是最主要的声发射源。从宏观角度来讲,裂纹扩展、疲劳损伤、应力腐蚀开裂和氢脆是主要的声发射源;从微观角度来讲,声发射信号的产生一般与位移、微裂隙的形成和扩展、晶粒尺寸效应、马氏相变、流固界面的存在等有关。相对于金属材料而言,岩石材料产生声发射/微震信号的机理目前还没有统一的认识(Hardy, 2003)。总体来讲,岩石材料的声发射/微震信号主要是由晶体错动、晶界运动、裂纹的形成和扩展等引起的。

(3) 声发射/微震信号

岩石材料受力变形产生的声波,比人耳听得见的声音频率范围广泛得多,既有人耳能听到的频率约为 $20 \sim 20\,000$ Hz 的声音,也有超声波和次声波(陈颢,1977)。一般而言,所研究的对象越大,岩石声发射的主频率就越低,如天然地震的频率可低至 0.01 Hz,而实验室中岩石试样的声发射频率一般高于 50 kHz。岩石力学实验中所遇到的声波信号大多属于超声的范围,人耳不能直接听到,必须用灵敏的电子仪器才能测到。声波信号的频率分布以及对应的研究领域如图 1-2 所示(陈颢,1977;Hardy,2003)。

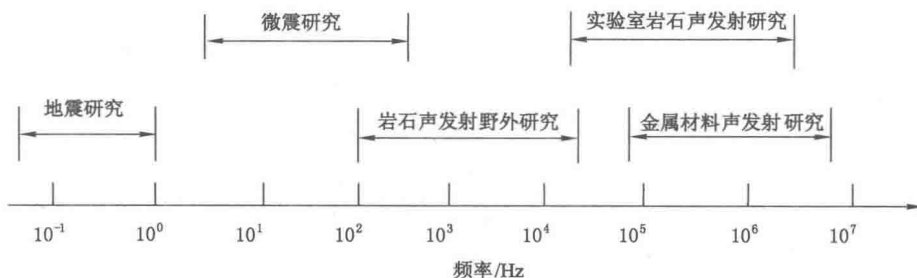


图 1-2 声波信号频率分布以及对应的研究领域

需要指出的是,传感器接收到的声发射/微震信号往往包含多种波型,其中最常见的是 P 波和 S 波。图 1-3 表示的是一个典型的波形信号。通过对同一声发射/微震事件的波形信号进行频谱分析后发现它包含不同频率的波形,这主要是由于震源机制和信号从震源传播到传感器过程中经过的波形变换所造成,另外不同材料、不同受力状态下产生的声发射信号频率也不相同(Hardy,2003)。McKavangh(McKavangh et al.,1978)和 McCabe(McCabe,1978)研究发现,在实验室条件下烟煤的声发射信号频率要比现场条件下声发射信号频率高得多。声发射/微震信号的频率特征主要取决于震源机制、震源到传感器的距离、波形信号在介质中传播的衰减特性、传感器的主频率以及传感器和监测系统的灵敏度。

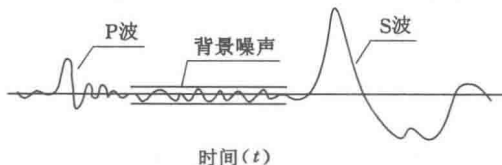


图 1-3 典型 P 波、S 波和背景噪声信号

(4) 震源定位

震源定位是指微震监测系统利用采集到的震动波信号,通过特定的震源定位算法,反演微震监测区域范围内微震事件的空间位置和发震时刻,并对震源定位结果的可靠性进行评价(陈颢,1977;Hardy,2003;Ge,2005)。震源定位是微震监测技术最重要的优势功能,它能够描述不稳定区域的活动范围和时间特征。微震监测区域中所有传感器台站以及它们之间的空间形态构成了一个完整的微震监测台网,震源定位所需要的输入数据主要包括微震监测台网中各传感器空间坐标、各传感器的到达波到时和微震波在监测介质中的传播速度等数据。

准确的震源定位是顶板断裂、冲击地压等破坏性矿震微震监测研究的基础。第一,传感器接受到的微震信号既可能是距离传感器较近的微弱震动引起的,也可能是距离传感器较远的剧烈震动引起的,如果没有准确的震源位置,就不能得到微震释放能量的大小和震级;第二,准确的震源定位是研究震源机制和震源分布、煤岩层内部构造的基础;第三,准确的震源定位对冲击地压等破坏性矿震的监测预警,冲击危险性的评定,冲击发生后矿井内部的破坏情况,灾后的减灾、救灾工作等具有重要的现实意义。

1.2.2 微震监测技术研究现状

20 世纪 30 年代末期,美国矿业局的研究人员(Obert et al., 1942; Obert, 1975)在采用声波探测技术研究矿井岩爆问题时,偶然发现了受载岩石会向外界发射声波的现象,他们当时把这种现象称之为“Rock Talk”。随后,大量的实验室和现场实验都验证了这种被称为“Rock Talk”的现象,即声发射/微震活动现象(Hardy, 2003)。随后,国内外研究人员对声发射/微震进行了大量卓有成效的研究,声发射/微震监测技术现已在岩土力学和工程以及其他众多研究领域得到了广泛应用。

20 世纪 40 年代末期,德国人 Kaiser 将这种“Rock Talk”现象应用到金属材料的力学性质研究中(Kaiser, 1950)。他发现,对材料进行重复加载时,只有当载荷接近或达到材料先前所受的最大载荷后,才会有明显的声发射信号产生,这就是著名的 Kaiser 效应(Kaiser, 1950; Kaiser, 1953)。Kaiser 效应的发现标志着声发射技术开始应用于材料科学领域,但是直到 20 世纪 60 年代,声发射技术作为一种金属和非金属材料无损检测技术才开始用于监测和评价工程构件以及岩体结构的稳定性。在此之前,无论在科学界还是技术领域关于声发射研究的文献并不多见(Hardy, 2003)。

20 世纪 60 年代初期,南非的学者开始利用微震研究硬岩矿井深部开采过程中的岩爆问题,这些研究表明微震监测技术能够对矿山岩爆进行定位,极大地推动了微震监测技术在矿山岩爆中的应用(Cook, 1963; Cook, 1964)。20 世纪 60 年代中期,为了使微震监测技术真正成为矿山安全监测的一种有效手段,美国矿业局在微震监测技术应用方面进行了重点研究,通过系统深入研究,微震监测硬件和软件系统都得到快速发展(Leighton et al., 1970);再加上这期间对声发射/微震监测理论、实验研究和现场测试工作的相继开展,为微震监测技术的工业化应用奠定了基础(Leighton et al., 1970; Leighton et al., 1972)。20 世纪 80 年代中期到 90 年代初期,加拿大一些矿井发生多起岩爆事故。在加拿大联邦政府、安大略湖省政府以及一些矿业公司的资助下,从 20 世纪 80 年代后期到 90 年代,加拿大的研究学者对如何有效利用微震监测技术对冲击地压和岩爆等煤岩动力灾害进行监测监控进行了大量的研究,这些研究极大地推动了微震监测技术在加拿大采矿业的应用。从此,微震监测技术作为一种研究矿山压力和岩层控制的重要手段,在监测监控矿山压力和岩层活动中得到了广泛应用,到 20 世纪 90 年代,加拿大有超过 20 个具有岩爆倾向性的矿井安装了微震监测系统(Young et al., 1989a; Young et al., 1989b; Young et al., 1989c; Hasegawa et al., 1989)。

与此同时,世界上其他国家的研究学者对微震监测技术进行了大量的研究。Brady 和 Leighton(Brady et al., 1977)在美国矿业局的资助下,研究了硬岩矿井发生岩爆前后的微震信号特征,研究发现,在发生矿震之前微震信号强度持续增加,之后很短的时间内出现突然

下降的趋势,随之发生岩爆事故。Phillips 等(Philips et al., 2002)分析了石油和地热工程中不同深度、不同岩性情况下的大量微震监测事件,发现不同破裂模式下微震现象完全不同。加拿大的 Legge(Legge et al., 1987)等采用现场测试和数值分析研究了深部金矿采场空间内围岩破裂过程中的能量释放和微震活动的时空效应,探讨了围岩破裂过程中能量释放的增长速率,验证了 Gutenberg-Richter 关系式和微震活动的分形特征。

Heick 等(Heick et al., 1989)研究了德国 Hope 地区一座被水淹没的钾矿发生矿震时微震活动的时空序列,并利用微震频率范围来估算震源的半径。法国的 Senfaute 等(Senfaute et al., 1997)分析了两千多个微震事件的时空分布规律,发现矿山开采支护与微震事件分布之间具有直接联系。波兰的 Lasocki(Lasocki, 1993)研究了单个掘进工作面条件下矿震产生的统计学模型,基于三种不同的理论提出采用三个变量来描述矿震能量的分布规律,并将此模型用来预测预报工作面附近的矿震活动规律。Glowacka 等(Glowacka et al., 1989)研究了微震活动与矿产回采率之间的统计学关系,并采用给定时间段内微震能量释放量来评价煤矿的矿震危险性,研究成果在上西里西亚矿区的一些煤矿得到了应用。Lurka. A(Lurka, 2008)利用层析成像法对波兰 Zabrze Bielszowice 煤矿 306 长壁工作面的冲击地压危险性以及矿震高发区域进行评估,发现 P 波波速与区域的矿震危险性呈正相关。除此之外,其他学者还研究了 P 波波速与岩层应力之间的关系,发现纵波波速随应力的增加而增高,并认为这主要是由于岩体内空隙和裂隙在高应力状态下闭合造成的(Adams et al., 1923; Wyllie et al., 1958; Toksoz et al., 1976; Seya et al., 1979; Young et al., 1992; Maxwell et al., 1997; Shalev et al., 1998)。

日本地震学家 Mogi(Mogi, 1962a; Mogi, 1962b; Mogi, 1962c)通过研究地震现象讨论了岩石破裂过程中弹性震动的声发射活动。1986 年 1 月 29 日,日本 Sunagawa 煤矿发生了一次大的瓦斯突出事故, K. Sato 等利用微震系统记录到的 27 次微震事件对这次瓦斯突出过程中的突出机制、能量大小、震源分布等问题进行了研究,认为位于突出地点的正断层是造成这次事故的主要原因(Sato et al., 1989)。McGarr 等(McGarr et al., 1989)采用宽频动态数字化地震仪研究了南非两个地质背景不同的矿区发生较大矿震后的地层运动情况,研究结果表明,两个矿区的震源机制和地层运动均存在本质区别:存在断层滑移的 Klerksdorp 矿区,矿震震级高达 5.2 级,其震源机制和地层运动也更加接近天然地震;没有大量断层存在的 Carletonville 矿区,矿震震级一般不会高于 4 级,但是矿震引发的地震应力降以及地层运动均高于同震级下的天然地震。Frid 等(Frid et al., 2005)在澳大利亚 Moonee 煤矿采用高频电磁辐射以及低频声发射监测顶板的垮落过程,研究发现,在顶板垮落前超过一小时就开始监测到高频电磁辐射信号,与低频声发射信号相比表现出明显的时间优势。Shen 等(Shen et al., 2007)利用微震技术研究了澳大利亚某长壁工作面顶板垮落时位移、应力的变化规律以及顶板垮落时的微震前兆信息,结果发现微震信息较位移、应力更能揭示顶板的垮落过程。

加拿大、波兰、南非等国分别研发了矿山微震监测系统,并形成了全国矿山微震监测网络系统(Henry et al., 1989; Ge, 2005; Aleksander et al., 2010; Durrheim, 2010)。

1959 年,北京门头沟矿用中国科学院地球物理所研制的 581 微震仪(哈林地震仪改装)监测冲击地压活动(李世愚等, 2004)。20 世纪 70 年代,国内开始研发以耳机收听或录音机记录岩石声发射频度的便携式地音仪,长沙矿山研究院开发了 DYF-1、DYF-2 型便携式智

能地音分析仪以及 STL-1、STL-2 型多通道声发射检测系统(刘国清,2005)。李世愚等人(李世愚等,2005;李世愚等,2006a;李世愚等,2006b;和雪松等,2007)综述了地震学在煤矿防灾减灾中的应用,进行了矿山地震监测速报系统和分析预测研究,在抚顺老虎台煤矿周围建立了矿山地震监测系统,认为矿震的研究不仅对于煤矿安全具有重要意义,而且为研究构造地震成因和震前地球物理场的变化提供了千米尺度实验依据。

窦林名等(曹安业等,2007a;窦林名等,2008;陆菜平等,2008a)与波兰矿山研究总院合作引进了 SOS 微震监测系统,采用微震技术研究了高应力集中区域以及冲击地压过程中的矿震活动规律,通过微震信号的时频分析技术,总结提炼了不同微震信号的重要波形特征,提出了冲击地压危险的分级预测准则,应用综合指数法、微震法、电磁辐射法和钻屑法,形成冲击地压的时空分级预测技术体系。陆菜平等(陆菜平,2007;陆菜平等,2008b;陆菜平等,2010)实验研究了组合煤岩的冲击倾向性与煤岩体物理力学参数之间的变化规律,揭示了组合煤岩的冲击倾向性与微震信号特征参数之间的相关关系,尤其是冲击破坏前兆的微震效应,研究表明,试样冲击破坏之前,微震信号的主频谱向低频段移动,且振幅开始急剧增加可以作为煤岩体冲击破坏的一个前兆信息。谭云亮等(谭云亮等,2000)对冲击地压声发射前兆模式进行了初步研究,提出了冲击地压的声发射四种前兆模式:单一突跃型、波动型、指数上升型和频繁低能量前兆型。谢和平(Xie et al.,1992;谢和平,1993;谢和平,1996;谢和平等,2004;谢和平等,2008)将微震事件分布与岩石破裂的分形特征结合起来,认为冲击地压实际上等效于岩体内破裂的一个分形集聚,其能量耗散随分维数的减少而按指数规律增加,当分维数减至最小值时意味着能量耗散最剧烈从而产生冲击。微震事件的分布也具有分形特征,因此,可以通过微震事件位置的分布来计算岩体破裂过程中分形维数,从而利用微震事件的分布来预测冲击地压。王恩元等(王恩元,1997;王恩元等,1999;王恩元等,2004;王恩元等,2005;李楠等,2010;王恩元等,2011;Wang et al.,2011;Li et al.,2015)系统研究了煤岩体在不同加载路径下的声发射信号及频谱特征,认为受载煤岩体的变形破裂及声发射信号并不连续,声发射信号符合赫斯特统计规律;在受载煤岩体的破裂过程中,声发射信号基本呈现出逐渐增强的趋势,声发射的频谱特征变化与煤体变形破裂过程密切相关;并将声发射作为对比信号研究了煤岩电磁辐射的时域、频域和非线性特征、影响因素和产生机理以及煤矿采掘过程中煤岩电磁辐射规律、煤岩动力灾害演化过程的电磁辐射规律及影响因素,发明了煤岩动力灾害声电瓦斯实时监测预警技术方法及系列装备并成功应用于冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害的监测预警。

唐春安等(赵兴东等,2005;徐奴文等,2011)将矿山微震活动信息与采动应力相结合,借助大规模科学计算,分析了采场以及巷道围岩内部岩体的应力积累、应力阴影和应力迁移过程,建立了以应力场分析为背景的微震活动分析方法,对冲击地压和边坡稳定性进行预测预报。姜福兴等(姜福兴等,2002;姜福兴等,2003;姜福兴等,2006)与澳大利亚联邦科学与工业研究院勘探采矿局合作,引进了用于岩层破裂监测的微震监测系统,并对此系统进行了软件和硬件的改进,设计了适用于井下的微震定位监测系统,用于实时监测岩体破裂灾变过程及采动应力场的分布变化过程。潘一山等(潘一山等,2007)研制了一套矿区千米尺度破坏性矿震监测定位系统,用于监测每天矿震发生的时间、次数、位置、震级,并对其进行统计分析,可对未来的矿震进行预测。

除此以外,凡口铅锌矿引进了加拿大 ESG 公司的微震定位监测系统对矿山动力灾害以

及大爆破后的余震活动进行监测监控(李庶林等,2005a;李庶林等,2005b)。冬瓜山铜矿和云南会泽矿区引进的南非 ISS 微震监测系统对岩层活动规律和岩爆进行监测预报,并开展了矿震信号识别、矿震活动分析方法等研究,取得了初步成果(唐礼忠等,2006a;唐绍辉等,2009;唐礼忠等,2010)。

综上所述,微震监测技术研究在国外开展较早,并对其进行了大量系统深入的研究,尤其是在金属矿山岩爆、边坡稳定性监测监控及评价方面取得了一系列成果,开发了多套比较完善的微震监测系统,无论是在基础理论方面还是在实际应用方面都相对成熟。近年来,国内学者围绕微震监测技术基本理论和工程应用开展了大量的研究工作,取得了一些成果。但我国在微震监测技术方面的研究才刚刚起步,与波兰、加拿大、澳大利亚等国相比差距较大,尤其是在微震震源定位基础理论方面还缺乏系统深入的研究,需要继续加大微震技术研究领域的科研投入,才能满足微震监测预警的需求。

1.3 微震震源定位研究现状

1.3.1 微震震源定位方法研究现状

微震震源定位是在天然地震定位原理基础上发展而来的,是微震监测技术中最经典、最基本的问题之一,同时也是微震监测技术的优势功能之一。微震震源定位是利用传感器记录的波形数据和到时数据,通过特定的微震震源定位算法,计算微震事件的空间坐标和发震时刻,并对震源定位结果进行评价。根据微震震源定位原理的不同,可以将微震震源定位方法分为两大类,一类是基于三分量传感器的震源定位方法,另一类是基于到时不同理论的震源定位方法(Ge,2003a;Ge,2003b)。

三分量传感器震源定位方法只需一个传感器就能求得震源位置,在需要进行超长距离打钻作业安装传感器和其他一些布置传感器难度较大的情况下,采用三分量传感器震源定位方法可以节省大量的人力、财力和物力(Ge,2003a)。此外,该方法同时使用 P 波和 S 波到时,对于微震传感器台网外部微震事件的定位相对稳定;它可以分析三个方向上的岩层运动状态,这对研究震源机制和震级大小具有重要意义。然而,三分量传感器定位方法的前提是精确的分离 P 波和 S 波,并分别拾取 P 波和 S 波到时。微震监测范围相对较小,并且常存在较多的背景噪声,此时精确分离 P 波和 S 波的难度非常大,因此该方法在地震和超深作业中应用较多,而在微震领域应用较少。例如:Brink 等(Brink et al.,1983)采用此方法对深部矿井的岩爆进行监测预警,Albright 等(Albright et al.,1979;Albright et al.,1982)将该方法应用于石油储备网络的稳定性分析中,Baria 和 Niitsuma(Baria et al.,1985;Niitsuma et al.,1985)则将该方法应用于地热工程的研究中。

到时不同震源定位原理是利用传感器监测的微震波到时、波速和传感器空间坐标,通过特定的震源定位算法,计算微震事件空间坐标和发震时刻。基于到时不同理论发展起来的震源定位方法种类繁多,是应用最广的一类震源定位方法。例如 USBM 震源定位方法(Leighton et al.,1970;Leighton et al.,1972)、Inglada 震源定位方法(Inglada,1928)、经典的 Geiger 法(Geiger,1910;Geiger,1912)、Thurber 法(Thurber,1985)、Powell 法(唐国兴,1979)、单纯形定位算法(Prugger et al.,1988;Gendzwill et al.,1989)、双重残差法