

学校编码: 10384  
学号: 25320141151775

分类号\_\_\_\_密级\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕士学位论文

# 声发射与微震信号特征及有用信号提取分析

Analysis of Acoustic Emission and Microseismic Signal

Characteristics and Useful Signal Extraction

高 真 平

指导教师姓名: 李 庶 林 教 授

专 业 名 称: 岩 土 工 程

论文提交日期: 2017 年 4 月

论文答辩时间: 2017 年 5 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席:

评阅人:

2017 年 4 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

- ( ) 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。
- ( ) 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

声发射技术与微震监测技术是两门先进的高科技技术，可应用与岩土工程、水电工业、建筑工程、交通运输、矿业开发等重要领域，是一种动态的立体范围的空间监测方法，可进行全天候监测。基于声发射技术的室内岩石破坏声发射试验是研究岩石破裂机制、内部损伤演化、破坏前兆特性等的重要途径，这对岩石本身性质的研究和对工程现场的应用都有实用价值和指导意义。而在矿产资源开采的工程中，矿山作业的安全开展关系着矿业的可持续发展、工作人员的生命安全以及对社会和谐的影响，微震监测技术在安全监测中扮演着重要角色，其在信号辨识处理、有用信号提取方面仍有待研究。本文从室内岩石声发射试验和矿山现场微震监测信号入手，基于室内试验探讨声发射信号的特征分布及变化情况，基于香炉山现场微震监测系统收集统计各类震源信号特征，分析处理汇总成数据库，并将其应用于信号辨识和有用信号的提取中，同时引入相关理论进行信号去噪、辨识和提取的深入研究，作者主要完成的研究内容如下：

(1) 进行了多种岩样的室内岩石破坏声发射试验，得到了岩样在不同加载路径下振幅-频度、峰值频率、能率和 RA 值的变化特征，但是具体分析时是根据实际情况选取的合适岩样进行，每个特征的分析对象不包含所有岩样或加载路径，针对所分析的情况，结果表明：随着应力水平的增大，大振幅 AE 事件会逐渐增多，AE 事件峰值频率的低频成分会有所增加，能率逐渐增强在最终破坏时突增，RA 值的变化分两种，一种在破坏前 RA 值突增，之后又降低并保持在较低水平直至岩石破坏，第二种为 RA 值在破坏时突增。

(2) 针对香炉山钨矿，列出了矿山的主要震源信号种类，以经验识别法和现场对接法采集了大量各类震源信号，分别进行了直观特征分析，包括接收到信号的传感器个数、信号上升时间、持续时间、衰减时间、振幅、起跳模式、到时差、间隔时间等内容，得到了各类震源信号直观特征的主要分布情况和变化情况，进行了规律性的总结记录和对比较分析。同时针对微震定位事件和爆破事件参与定位的信号进行了单独的统计和分析，研究了信号特征的分布范围以及随信号振幅减小的变化情况，为爆破事件与微震定位事件的辨识提供了直观特征参考。

(3) 基于相对能量理论和傅里叶变换理论，通过 MATLAB 软件编程，对收集的所有震源信号分别进行了相对能量的计算和傅里叶变换，得到了各类震源信号的相对能量

和主频大小，总结分析和记录了二者主要的分布情况，并针对不同种类的震源信号的不同结果进行了对比，与统计的直观特征一起制成了可为信号辨识和有用信号提取提供指导和参考的数据库。同时针对微震定位事件和爆破事件参与定位的信号进行了计算分析，得到了信号能量和主频的变化趋势及分布范围，进一步为二者的辨识提供了有效参考。

(4) 以统计的信号特征数据库为基础，给出了几个典型事件信号辨识的案例分析，展示了数据库的使用，体现了数据库存在的必要性以及其应用价值和工程意义。然后在信号数据库形成的基础上，针对信号去噪和有用信号的提取对阈值去噪、数字滤波去噪和小波阈值去噪三种方法进行了讨论，同时比较了三种方法的适用对象和条件，结果表明信号能在小波去噪后与原始信号保持相同的平滑性，很大程度地保留了有效信息，在微震信号的辨识和有用信息的提取上有重要作用。

**关键词：**声发射；微震技术；信号特征；数据库；信号处理

## Abstract

Both acoustic emission technology and microseismic monitoring technology are advanced high-tech technologies, which can be applied to geotechnical engineering, hydropower industry, construction engineering, transportation, mining development and other important areas. It's a dynamic monitoring method, with the advantage of all-weather real-time monitoring. The indoor acoustic emission test of rock failure based on acoustic emission technology is an important way to study the mechanism of rock fracture, internal damage evolution and precursor characteristics of failure, which is valuable and meaningful for the research of rock itself and the guidance of engineering site. In the mining of mineral resources, the safety of mine operation is related to the sustainable development of mining, the life safety of staff and the influence on social harmony. Microseismic monitoring technology plays an important role in safety monitoring, which remains to be studied in the signal identification, processing and the extraction of useful signals. In this paper, the study start from the indoor acoustic emission of rock test and the microseismic monitoring signals of mine site. Based on the indoor experiment, the characteristic distribution and the change of the acoustic emission signals are discussed. Based on the microseismic monitoring system in siite, the characteristics of various types of seismic source signals are collected and analyzed and processed into a database, and it is applied to the identification of signal and the extraction of useful signals. At the same time, the relevant theory is introduced to carry out the research of signal denoising, identification and extraction. The main research contents are as follows:

(1)Based on a variety of indoor acoustic emission experiment of rock failure, the variation characteristics of amplitude-frequentness, dominant frequency, energy rate and RA value of rock samples under different loading paths are obtained, but the specific analysis is carried out according to the actual situation and the appropriate sample, the analysis of each feature does not contain all the rock samples or loading paths. According to the analysis, the results show that: With the increase of the stress level, the large amplitude AE event will increase gradually, the low frequency component of the dominant frequency of the acoustic emission event will increase, the energy rate increase gradually and increase suddenly in the

final failure, the RA value changes in different ways, one before the final failure the RA value increase suddenly, and then reduce and maintain at a lower level until the rock fail, the second in the final failure the RA value increase suddenly.

(2) Aiming at the Xianglushan tungsten mine, the main source signals of the mine are listed. A large number of various source signals are collected by experience identification method and site docking method. Based on these signals, The intuitive characteristics are analyzed, including the number of sensors that receive the signal and the signal rise time, duration, decay time, amplitude, take-off mode, arrival time difference, interval time and so on. The main distribution and change of the intuitive characteristics of various types of source signals are obtained, and the regular summary, records and comparative analysis are carried out. At the same time, the signals of microseismic location events and blasting events are analyzed and counted separately. The distribution range of signal characteristics and the variation of signal amplitude are studied, which provide a intuitive characteristic reference for the identification of microseismic locating events and blasting events .

(3) Based on the relative energy theory and Fourier transform theory, the relative energy calculation and Fourier transform are carried out for all the source signals collected through MATLAB software. The relative energy and frequency of each type of source signal are obtained. The summary, analysis and records of the main distribution of the energy and frequency are carried out. And for different types of source signals the different results are compared. Then a database is formed together with the results and the statistical intuitive characteristics, which can provide guidance and reference for signal identification and extraction of useful signals. At the same time, the signals of the microseismic location events and the blasting events are calculated and analyzed. The change trend and distribution range of the energy and frequency of signals are obtained, which further provide an effective reference for the identification of the two kinds of events.

(4) Based on the statistical feature database, the studies of signal identification cases of several typical events are presented, which shows the use of the database and reflects the necessity of database and its application value and engineering significance. And then aiming at the signal denoising and extraction of useful signal, based on the signal database, three kinds of methods, such as threshold denoising, digital filtering denoising and wavelet

threshold denoising, are discussed. At the same time, the applicable objects and conditions of the three denoising methods are compared. The results show that the wavelet can keep the same smoothness with the original signal after denoising, and the effective information is preserved to a large extent. So the wavelet analysis plays an important role in the identification of the microseismic signal and the extraction of useful information.

**Key words:** Acoustic Emission; Microseismic Technology; Signal Characteristics; Database; Signal Processing

## 目录

摘要.....	I
<b>第 1 章绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1 选题背景与研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 室内岩石破坏声发射试验研究现状.....	2
1.2.2 微震监测技术应用与研究现状.....	4
1.3 本文主要研究思路和内容.....	6
<b>第 2 章工程背景.....</b>	<b>7</b>
2.1 香炉山钨矿工程概况.....	7
2.1.1 矿区地理位置及自然条件.....	7
2.1.2 矿床地质条件.....	7
2.1.3 矿区开采现状.....	8
2.2 香炉山钨矿微震监测系统的组成与建立.....	9
2.2.1 微震监测技术原理.....	9
2.2.2 微震监测系统的组成.....	10
2.2.3 传感器布置原则.....	12
2.2.4 微震监测系统的建立.....	13
2.4 小结.....	16
<b>第 3 章室内岩石破坏声发射试验信号特征研究.....</b>	<b>17</b>
3.1 引言.....	17
3.2 试验方案.....	17
3.2.1 岩样描述与制备.....	17
3.2.2 试验设备与方法.....	17
3.3 试验内容.....	20
3.4 试验结果与分析.....	20
3.4.1 岩石破裂信号振幅-频度变化特征分析.....	20
3.4.2 岩石破裂信号峰值频率变化特征分析.....	26
3.4.3 岩石破裂信号能量变化特征分析.....	31
3.4.4 岩石破裂信号 RA 值变化特征分析.....	35
3.5 小结.....	37
<b>第 4 章矿山震源信号特征统计分析研究.....</b>	<b>40</b>
4.1 引言.....	40
4.2 震源信号波形采集.....	40
4.2.1 震源信号类型.....	40
4.2.2 信号波形采集.....	43

4.3 信号波形直观声学特征统计分析.....	45
4.3.1 震源信号特征.....	45
4.3.2 信号直观特征统计与分析.....	46
4.4 震源信号相对能量统计分析.....	73
4.4.1 相对能量理论.....	74
4.4.2 相对能量统计与分析.....	74
4.5 震源信号主频统计分析.....	77
4.5.1 傅里叶变换理论.....	77
4.5.2 信号主频统计分析.....	78
4.6 震源信号特征对比与分析.....	85
4.7 小结.....	87
<b>第 5 章 矿山震源信号辨识案例及去噪分析.....</b>	<b>88</b>
5.1 引言.....	88
5.2 基于信号特征统计的案例分.....	88
5.3 阈值去噪.....	93
5.4 数字滤波去噪.....	94
5.4.1 低通滤波.....	94
5.4.2 高通滤波.....	95
5.4.3 带通滤波.....	96
5.4.4 带阻滤波.....	96
5.5 小波阈值去噪.....	97
5.5.1 小波变换理论.....	97
5.5.2 小波阈值去噪分析.....	99
5.5.3 去噪方法对比分析.....	103
5.6 小结.....	103
<b>第 6 章 结论与展望.....</b>	<b>104</b>
6.1 主要研究成果.....	104
6.2 展望.....	105
<b>参考文献.....</b>	<b>107</b>
<b>致谢.....</b>	<b>111</b>
<b>攻读硕士期间发表的论文与参加的科研项目.....</b>	<b>112</b>

## Contents

<b>Abstract.....</b>	<b>I</b>
<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Background and Significance of the Thesis.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Research Status at Home and Abroad.....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Research Status of Indoor Acoustic Emission Test of Rock Failure.....	2
1.2.2 Application and Research Status of Microseismic Monitoring Technology.....	4
<b>1.3 Mainly Study Ideas and Contents of This Article.....</b>	<b>6</b>
<b>Chapter 2 Engineering Background.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 General Situation of Xianglushan Tungsten Mine Project.....</b>	<b>7</b>
2.1.1 Geological Location and Natural Conditions of Mining Area.....	7
2.1.2 Geological Conditions of Deposits.....	7
2.1.3 Mining Present Situation of Mining Area.....	8
<b>2.2 Composition and Establishment of Microseismic Monitoring System for Xianglushan Tungsten Mine.....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Theory of Microseismic Monitoring Technology.....	9
2.2.2 Composition of microseismic monitoring system.....	10
2.2.3 Principle of Sensor Arrangement.....	12
2.2.4 Establishment of Microseismic Monitoring System.....	13
<b>2.4 Summary.....</b>	<b>16</b>
<b>Chapter3 Study on Signal Characteristics of Indoor Acoustic Emission Test of Rock Failure.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Test Plan.....</b>	<b>17</b>
3.2.1 Description and Preparation of Rock Samples.....	17
3.2.2 Test Equipment and Methods.....	17
<b>3.3 Test Contents.....</b>	<b>20</b>
<b>3.4 Test Results and Analysis.....</b>	<b>20</b>
3.4.1 Analysis of Amplitude-Frequentness Variation Characteristics of Rock FailureSignal.....	20
3.4.2 Analysis of Peak Frequency Variation Characteristics of Rock FailureSignal...	26
3.4.3 Analysis of Energy Variation Characteristics of Rock FailureSignal.....	31
3.4.4 岩 Analysis of RA Value Variation Characteristics of Rock FailureSignal.....	35
<b>3.5 Summary.....</b>	<b>37</b>
<b>Chapter4 Statistical Analysis of Signal Characteristics of Mine Seismic</b>	

<b>Source.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1 Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>4.2Acquisition of Source Signal Waveforms.....</b>	<b>40</b>
4.2.1 Source Signal Type.....	40
4.2.2 Acquisition of Signal Waveforms.....	43
<b>4.3 Statistical Analysis of Intuitive Acoustic Characteristics of Signal Waveforms... </b>	<b>45</b>
4.3.1 Characteristics of Source Signals.....	45
4.3.2 Statistical Analysis of Intuitive Characteristics of Signals.....	46
<b>4.4Statistical Analysis of Relative Energy of Source Signals.....</b>	<b>73</b>
4.4.1Theory of Relative Energy.....	74
4.4.2 Statistical Analysis of Relative Energy.....	74
<b>4.5 Statistical Analysis of Dominant Frequency of Source Signals.....</b>	<b>77</b>
4.5.1 Theory of Fourier Transform.....	77
4.5.2 Statistical Analysis of Dominant Frequency of Signals.....	85
<b>4.6 Comparison and Analysis of Seismic Source Signals.....</b>	<b>87</b>
<b>4.7Summary.....</b>	<b>88</b>
<b>Chapter5Identification Cases of Mine Source Signals and Denoising</b>	
<b>Analysis.....</b>	<b>88</b>
<b>5.1 Introduction.....</b>	<b>88</b>
<b>5.2 Case Analysis Based on Signal Characteristic Statistics.....</b>	<b>88</b>
<b>5.3Threshold Denoising.....</b>	<b>93</b>
<b>5.4Digital filter denoising.....</b>	<b>94</b>
5.4.1 Low-passFiltering.....	94
5.4.2 High-pass Filtering.....	95
5.4.3 Band-pass Filtering.....	96
5.4.4 Band-stop Filtering.....	96
<b>5.5 Wavelet Threshold Denoising.....</b>	<b>97</b>
5.5.1 Theory of Wavelet Transform.....	97
5.5.2 Wavelet Threshold Denoising Analysis.....	99
5.5.3 Comparison and Analysis of Denoising Methods.....	103
<b>5.6 Summary.....</b>	<b>104</b>
<b>Chapter6Conclusion and Outlook.....</b>	<b>104</b>
<b>6.1 Main Research Conclusion.....</b>	<b>104</b>
<b>6.2 Outlook.....</b>	<b>105</b>
<b>References.....</b>	<b>107</b>
<b>Acknowledgements.....</b>	<b>111</b>
<b>Research Work and Achievement During Pursue Master Degree.....</b>	<b>112</b>

## 第 1 章 绪论

### 1.1 选题背景与研究意义

声发射与微震监测的主要目的是对被检测和被监测对象进行破坏程度、破坏趋势和安全性评估。通过监测获得声发射和微震事件源的信号信息、确定声发射源和微震震源的空间位置、声发射和微震事件各参数随时间的变化特点,进一步分析声发射源和震源的力学性质,最终达到对被测对象的破坏程度、安全性评估的目的。

岩石声发射为岩石材料在受力作用时其内部原生裂纹或缺陷的扩展以及新的微破裂孕育、萌生、演化、扩展和断裂所释放的能量以弹性波形式释放出来的现象<sup>[1]</sup>。在室内试验中,每个声发射信号均含有大量有用信息,对这些信息进行处理可以分析岩石内部裂纹的萌生及发展过程。室内试验研究可以为工程现场提供指导和依据,是现场情况的简化和浓缩。目前为止,已有不少通过声发射率、事件率、能率等声发射参数的变化情况与岩石受力变形过程的对照来进行岩石破坏或前兆特性的研究。但在了解信号波形本身的特征和分布规律及其与岩石种类和试验加载方式的关系方面,还需要更多拓展,在此基础上扩大试验研究的领域,拓宽试验分析的层面,这些内容对深入岩石的破裂类型、破坏前兆等其他方面的研究都具有十分重要的价值,能使试验结果反馈出更多的有用信息,从而更好地将试验分析结果应用于工程实践中。

针对工程现场,目前国内外已有许多地下工程采用多通道微震监测技术进行实时监测和预警分析。微震监测技术有着特有的优点,它的实时监测和定位等功能使之发展成现今最先进的监测矿山地压的技术<sup>[2]</sup>。而矿山现场监测的主要对象是岩体破裂时产生的弹性波信号,不论是采区各类工作所造成的还是停采区岩层错动所引起的岩石破裂等情况都对矿山的稳定安全及监测预警有着重要影响,所以通过对微震监测系统所接收到的有用信号进行分析处理,可为矿山的安全预警提供一条良好的途径。而开展这一切工作的可行性前提是需要接收到的数据中有针对性地辨识出、提取出有效信号,并对信号的各项特性进行进一步的分析处理,得到所需要的信息。但是,由于矿山的监测环境十分复杂,各种作业震动源都会产生大量的震动噪音信号,如凿岩设备、生产爆破、铲运设备、人为作业敲击、溜井倒矿与电气设备运行等,也被监测系统记录下来,导致监测得到的信号多为含噪的复杂信号。而要通过软硬件从这些信号中自动辨识提取出有效信

号始终是微震监测全自动化的一个难题<sup>[3]</sup>。这种情况下要辨识或分离出有用信号，就需要对各类信号的特性有比较清晰和准确的了解，这样才能保证信号辨识和分离的可行性，提高准确性。另一方面，也只有保证了信号的准确性，才能提高预警分析的准确性，从而达到矿山安全生产这一最终目的。综上所述，一切工作的基础是矿山各震源信号的相关特征的明确，在此基础之上对信号进行准确的辨识和有用信息的提取，为现场的监测预警分析提供一个行之有效的信号辨识和有用信号提取的参考数据库，这对矿山工作的安全开展有着极其重要的工程实用价值和意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 室内岩石破坏声发射试验研究现状

声发射技术是一种可对荷载作用下脆性材料内部微裂产生和发展进行连续实时监测并对其进行定位的良好工具和途径<sup>[4]</sup>。目前为止，应用声发射技术通过室内试验探寻岩石破坏过程和前兆特征规律的研究已有很多，其中有不少研究是通过试验过程中声发射参数的变化情况进行分析。

在岩石受简单加载破坏全过程的声发射特性研究方面，不少学者已经做了相应的研究。Lockner 和 Byerlee 等<sup>[4]</sup>通过声发射试验研究了脆性岩石的破坏过程，因为许多实验试样破坏之前，非弹性变形发生在近乎恒定的应力时，他们控制声发射保持在恒定速率，结合 AE 信号和振幅利用声发射定位技术给出了详细的岩石破坏成核和发展的视图，这为未来地震动力学和预测的研究提供了大量可能。此后，Lockner<sup>[5]</sup>进一步对岩石的前兆特性进行了研究，指出虽然地震不能可靠预测，但是在实验室内可以预测破坏，应变率和声发射率的增加就是一个很好的趋近破坏的现象。Mansurov<sup>[6]</sup>还利用声发射技术研究了岩石破坏过程，分析了检测方法和数据采集系统及其记录的相关信息，从而得以预测岩石的破坏类型。李庶林等<sup>[7]</sup>通过岩石单轴受压试验研究了声发射参数随岩石应力与时间的变化情况，得出声发射特征会因受岩石破坏形式的影响而不同。吴永胜等<sup>[8]</sup>和陈宇龙等<sup>[9]</sup>通过单轴压缩试验针对岩石的声发射特性进行了研究，得到了试验加载初期声发射率和能率等的变化情况。黄玉仁等<sup>[10]</sup>通过单轴加载试验研究了两类岩石破坏过程的声发射特性，将特定声发射参数的变化特性作为岩石破坏的前兆。

在循环加卸载条件下岩石声发射特性的研究也已有不少，李庶林等<sup>[11]</sup>通过声发射实

验研究分析了加卸载时岩石在卸载以及重复加载过程中的声发射特性,得到了声发射特性受试验加载路径影响的结论。Mogi<sup>[12]</sup>对岩石在两种加载条件下的声发射特性进行了研究,分别为增量循环加卸载和恒压加卸载。李世愚等<sup>[13]</sup>通过岩石的单轴加卸载试验研究对试验过程中 Kaiser 效应和 Felicity 效应的出现及其机理进行了分析,并针对卸载时的声发射特性进行了讨论。纪洪广等<sup>[14]</sup>对岩石进行了不同应力水平下的加卸载试验,对不同应力状态下岩石受到加卸载扰动时的声发射特征进行了分析,结果指出在不同应力水平和应力状态下为不同声发射信号,且反映的是不同的材料本构特征。李庶林等<sup>[15]</sup>还通过岩石声发射试验研究了声发射参数中的事件率、能率以及空间位置分布的分形特征,结果表明空间分布分形特征最显著。

通过声发射特性对岩石破裂机制、裂纹演化、疲劳受损等进行研究的也不少,朱波等<sup>[16]</sup>通过声发射试验研究了声发射特征和材料断裂韧性之间的关系,得到材料断裂时的应力波能和宏观断裂能有线性关系。刘勇峰等<sup>[17]</sup>通过单轴载荷试验研究了声发射特性和岩石内部裂纹演化过程的相关关系,并通过声发射参数拟合了能反映岩石损伤演化的应力应变曲线,对岩石破坏预测有重要意义。M.Cai 等<sup>[18]</sup>通过岩石受载过程中的声发射事件特性研究了岩石内部初始裂纹的开裂时间。Ganne<sup>[19]</sup>等通过对岩石进行宏观压缩和宏观拉伸试验,研究了岩石峰前损伤演化情况以及微裂纹和 AE 之间的关系,以此来探索岩石破坏失稳的前兆特性。Sondergeld 和 Estey<sup>[20]</sup>通过对不套封花岗岩进行单轴循环加载声发射试验,研究了花岗岩在循环加载过程中微破裂的发展情况,发现声发射开始出现在很早的应力循环中,这个应力明显低于能达到的峰值应力。蒋宇等<sup>[21]</sup>关于岩石疲劳破坏过程的研究中,将岩石声发射特征与其破坏过程的变形规律结合起来分析,提出以变形作为基准来度量岩体的破坏和强度。

除了这些反映的岩石本身性质的研究外,针对试验过程中声发射信号特征的研究也已逐渐增加。王统浚等<sup>[22]</sup>指出了声发射信号频谱分析系统存在的问题并提出了几项改进。李楠等<sup>[23]</sup>对两种加载条件下岩石损伤到破坏过程的频谱特性展开了分析,指出在加载过程的不同应力阶段,岩石声发射主频、主频带宽度会随着应力变化呈现出一定的规律。刘新平等<sup>[24]</sup>针对两种不同岩样在受压变形过程中的 AE 信号做了频谱分析,分析了其振幅谱的分布范围以及随应力的变化情况。纪洪广等<sup>[25]</sup>通过对花岗岩受压破裂过程进行研究,分析了在不同阶段 AE 信号的频率特性和高频、低频信号特征,同时与细砂岩进行了比较。张艳博等<sup>[26]</sup>通过对花岗岩进行岩爆的模拟试验研究了花岗岩的时频特性和 RA 值的变化特征,发现信号主频会随着岩爆的演化过程而呈下降趋势,而 RA 值在时间序

列上也明显具有阶段性特征。苗金丽等<sup>[27]</sup>通过花岗岩岩爆试验过程中的信号频谱特性和 RA 值的变化情况对岩石的微观断裂机制进行了分析和讨论,并得出在岩爆前 RA 值会增加的结论。

然而针对多种不同岩样在不同加载路径下的岩石破裂声发射信号特征的变化和分布情况还需进一步的深入和更多的探讨,不同岩样的信号特征是否相同,不同加载路径下是否有相同变化趋势,信号特征对岩石破坏类型和前兆特性等是否有参考性,这些内容对室内岩石破坏试验的探索研究都具有很重要的意义。本文将针对这些要点进行讨论,进一步扩展室内岩石声发射试验的研究内容,分析整个过程中 AE 信号特征的具体变化及分布情况,为岩石破坏和前兆特性的研究提供更多的参考,为实际工程现场的应用提供更多有效的依据。

### 1.2.2 微震监测技术应用与研究现状

微震监测技术为用微震监测仪器探测、记录、分析微震信号并以此来推断微震源相关特征的技术,该技术以地震监测技术为基础,与声发射监测技术在原理上相同<sup>[2, 28]</sup>。我国是从上世纪 80 年代展开微地震研究工作的,我国矿山地压监测的第一套全数字型微震监测系统由李庶林教授带领的课题组在凡口铅锌矿建立,截止目前,该项技术越来越广泛地应用于各类地下工程中。

由于矿山作业环境十分复杂,微震监测软件得到的信号种类繁多,要有针对性的识别和提取有用信号是矿山安全生产监测的主要任务,所以一直以来对信号辨识、有用信号提取、信号去噪的研究在逐渐增加。曹安业等<sup>[29]</sup>针对不同微震信号的波形在频率、持续时间和能量上的特征进行了总结,研究得到冲击矿压信号波形有振幅大、衰减快以及尾波发育和频带分布窄等显著特点。赵旭生等<sup>[30]</sup>对矿山作业噪声进行了归纳分类,然后提出了通过工艺技术及软硬件相结合的综合滤噪方法,在较大程度上达到了滤噪目的。杨作林<sup>[31]</sup>在学位论文中叙述了关于电信号的干扰信号、风机、放矿机、多段爆破以及 P 波、S 波明显的微震信号的识别方法,并举例给出了大微震事件和单段爆破信号之间的区别。马举<sup>[32]</sup>建立了沙坝矿的人工识别数据库,并通过 FISHER 线性判别方法和模糊识别数学模型对爆破与微震信号进行识别。唐礼忠<sup>[33]</sup>选取快速傅里叶变换方法针对爆轰波和地震波信号的频谱特征进行了研究。陆菜平等<sup>[34]</sup>针对顶板和煤层卸压爆破信号分别进行了功率谱和幅频特征分析,通过两种信号在频谱的差异来加以辨识。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库