

导波声发射及次声波监测 在矿山应用的理论与试验

赵奎 何文 曾鹏 著

北 京
冶金工业出版社
2018

前 言

本书主要分为三大部分，内容包括：导波声发射技术在排土场应用的理论与模拟试验研究；导波声发射技术在岩质边坡应用的理论与模拟试验研究；次声波技术在矿山应用的理论与试验研究。第一部分提出在排土场这类松散介质体中埋设波导介质，通过对排土场模型滑移破坏过程中的导波声发射信号参数与波形特征的研究分析，提出排土场模型滑移破坏的导波声发射预测方法，为排土场滑移破坏失稳的监测、预测提供一种新的技术方法；第二部分提出在岩质边坡中埋设波导介质，并进行相关理论与模拟试验研究，通过研究导波声发射信号波形和参数特性，为进一步实现岩质边坡滑移失稳的导波声发射监测、预测技术提供基础依据；而第三部分则是作者尝试对岩石、充填体损伤破裂过程的次声信号的波形及参数特征进行分析，从而为基于次声波技术预判围岩体破坏失稳提供一定的理论基础。

本书研究工作得到了国家自然科学基金项目（编号：51364012 和 51604127）的资助。研究工作是排土场、岩质边坡滑移破坏失稳及围岩体失稳灾变的新监测、预测技术的前期理论与试验探索，今后还有许多工作有待展开及深入挖掘。

由于作者水平有限，书中不足之处，敬请读者批评指正。

赵奎 何文 曾鹏

2017 年 7 月

目 录

第一部分

导波声发射技术在排土场应用的理论与模拟试验研究

第1章 绪论	3
1.1 研究的目的与意义	3
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 排土场稳定性研究现状	4
1.2.2 声发射技术在矿山中的应用现状	7
1.3 主要研究内容	8
1.3.1 排土场声发射试验材料及波导器	8
1.3.2 排土场滑移破坏过程不同阶段声发射参数特征	8
第2章 排土场试验模型及导波声发射相关理论	9
2.1 引言	9
2.2 模型试验原理	9
2.2.1 模拟条件	9
2.2.2 模拟材料选择的原则	10
2.3 工程概况	10
2.4 模型试验设计与试验方案	11
2.4.1 排土场边坡模型设计	11
2.4.2 模拟材料的制作	11
2.4.3 模型滑移方案设计	13
2.4.4 模型试验方案	14
2.5 波导杆选择	15
2.6 声发射监测试验	18
2.6.1 试验仪器	18
2.6.2 声发射监测方案	19
2.7 本章小结	20

第3章 排土场模型破坏过程导波声发射基本参数特性	21
3.1 引言	21
3.2 排土场破坏过程综合分析	21
3.2.1 滑移破坏过程描述	21
3.2.2 排土场破坏过程分析	23
3.3 声发射相关参数	24
3.3.1 声发射事件率	24
3.3.2 振铃计数	25
3.3.3 幅度	25
3.3.4 能量	25
3.4 排土场模型滑移破坏过程声发射参数变化特征	25
3.4.1 声发射幅值	25
3.4.2 声发射事件率	26
3.4.3 声发射能率	28
3.4.4 声发射振铃计数率	30
3.5 排土场模型滑移破坏过程累计声发射参数变化特征	32
3.5.1 累计声发射事件率	32
3.5.2 累计声发射能率	33
3.5.3 累计声发射振铃计数率	34
3.6 不同位置声发射参数特性对比分析	35
3.6.1 声发射参数对比分析	36
3.6.2 累计声发射参数对比分析	36
3.7 本章小结	39
第4章 排土场模型破坏过程的导波声发射分形维数及 $\Sigma N/\Sigma E$ 值特征	41
4.1 引言	41
4.2 分形特征分析	41
4.2.1 关联维数的计算	41
4.2.2 m 值确定及分形特征判断	43
4.2.3 声发射分形关联维数计算结果及分析	44
4.3 滑移破坏前后 $\Sigma N/\Sigma E$ 特征分析	46
4.4 本章小结	48
第5章 排土场模型破坏过程的导波声发射频带能量分布特征	49
5.1 引言	49

5.2 排土场破坏过程声发射频带能量分布特征	49
5.2.1 频带能量分析方法的选择	49
5.2.2 小波包分解及各频带能量表征	51
5.2.3 各频带能量表征结果及分析	52
5.3 排土场边坡滑移破坏声发射预测方法	57
5.4 本章小结	59
第6章 第一部分结论与展望	60
6.1 结论	60
6.2 展望	61

第二部分

导波声发射技术在岩质边坡应用的理论与模拟试验研究

第7章 绪论	65
7.1 研究背景及意义	65
7.2 国内外研究现状	65
7.2.1 边坡稳定性监测技术	65
7.2.2 声发射监测技术在边坡中的应用现状	67
第8章 导波声发射技术在岩质边坡中的影响因素及实例	70
8.1 引言	70
8.2 声发射结合波导杆监测岩质边坡的影响因素	70
8.2.1 耦合材料	70
8.2.2 波导杆选型	70
8.2.3 传感器布置形式	71
8.3 国外边坡声发射监测实例	71
8.3.1 工程概况	71
8.3.2 声发射信号分析	73
8.3.3 降雨的影响	74
8.4 存在的问题	75
8.4.1 硬件设备及软件	75
8.4.2 定位精度	75
8.5 讨论	76
8.6 本章小结	76

第9章 模态声发射理论	77
9.1 引言	77
9.2 模态声发射	77
9.2.1 导波理论	77
9.2.2 自由圆钢波导杆结构中的纵向导波理论	80
9.2.3 水泥砂浆锚固波导杆结构中的纵向导波理论	88
9.3 本章小结	91
第10章 岩质边坡模拟试验中的导波声发射波形特征研究	93
10.1 引言	93
10.2 拉剪破坏声发射试验	93
10.2.1 试验目的	93
10.2.2 试件制备	93
10.2.3 试验系统	95
10.2.4 声发射系统参数设置	96
10.3 试验过程	97
10.4 试验现象	101
10.5 声发射信号波形分析	102
10.5.1 小波阈值去噪	102
10.5.2 短时傅里叶变换	103
10.6 本章小结	110
第11章 岩质边坡模拟试验中的导波声发射参数特征研究	112
11.1 引言	112
11.2 波导杆选择	112
11.3 耦合材料选择	113
11.4 传感器布置方式	113
11.5 试件制作	114
11.6 声发射监测试验	114
11.6.1 试验仪器	114
11.6.2 剪切试验	115
11.6.3 三点弯曲试验	116
11.7 试验过程	116
11.8 试件破坏过程分析	117
11.9 声发射试验结果分析	118

11.9.1 声发射试验数据	118
11.9.2 声发射事件特性分析	118
11.9.3 声发射幅值分析	128
11.9.4 声发射能量分析	133
11.9.5 声发射振铃计数分析	139
11.10 本章小结	151
第 12 章 岩质边坡模拟试验中的导波声发射分形关联维数和 r 值特征	152
12.1 引言	152
12.2 试件破坏过程声发射参数分形特征分析	152
12.2.1 关联维数的计算	152
12.2.2 m 值确定及分形特征判断	152
12.2.3 剪切破坏关联维数的计算结果及分析	154
12.2.4 三点弯曲破坏关联维数的计算结果及分析	156
12.3 试件破坏过程声发射 r 值特征分析	158
12.3.1 声发射 r 值的计算	158
12.3.2 剪切破坏声发射 r 值分析	158
12.3.3 三点弯曲破坏声发射 r 值分析	161
12.4 本章小结	163
第 13 章 耦合材料断裂过程数值模拟分析	165
13.1 引言	165
13.2 PFC 数值模拟分析	165
13.3 声发射定位分析	168
13.4 本章小结	169
第 14 章 第二部分结论和展望	170
14.1 结论	170
14.2 展望	171

第三部分

次声波技术在矿山应用的理论与试验研究

第 15 章 绪论	175
15.1 研究背景及意义	175
15.2 研究现状和进展	175

第 16 章 单轴压缩下红砂岩峰值应力前后次声信号波形特征	178
16.1 引言	178
16.2 试验简介	178
16.2.1 岩样制备	178
16.2.2 试验仪器及加载方案	179
16.3 单轴压缩下红砂岩次声试验数据分析	182
16.3.1 力学试验数据	182
16.3.2 次声信号数据	184
16.4 本底信号分析	185
16.4.1 小波基函数	185
16.4.2 小波基选取	187
16.4.3 小波分解层数确定	189
16.4.4 本底信号分析	190
16.5 应力-次声时域信号特征	191
16.5.1 次声时域信号特征	191
16.5.2 部分岩样应力-次声时域特征	192
16.6 应力-次声时频特征	196
16.6.1 短时傅里叶变换 (STFT)	197
16.6.2 部分岩样应力-次声时频特征	199
16.7 本章小结	206
第 17 章 单轴压缩下红砂岩峰值应力前后次声信号特征参数	207
17.1 引言	207
17.2 应力-次声累计振铃计数特征	207
17.2.1 门槛值的确定	207
17.2.2 岩石应力-次声累计振铃计数特征	207
17.3 应力-次声能率特征	212
17.3.1 能率计算方法	212
17.3.2 岩石应力-次声能率特征	212
17.4 本章小结	215
第 18 章 不同加载方式下红砂岩破坏过程次声信号特征	217
18.1 引言	217
18.2 试验仪器及方案	217

18.2.1	试验仪器	217
18.2.2	试验对象	217
18.2.3	单轴压缩试验	218
18.2.4	剪切试验	218
18.2.5	劈裂试验	219
18.2.6	单轴循环加卸载试验	219
18.3	岩石破坏次声信号波形参数分析	220
18.3.1	实验室本底噪声及数据分析	220
18.3.2	单轴压缩试验结果分析	220
18.3.3	剪切试验结果分析	223
18.3.4	劈裂试验结果分析	224
18.3.5	单轴加卸载试验结果分析	225
18.3.6	试验结果综合分析	230
18.4	岩石次声信号波形特性分析	230
18.4.1	频带能量分布特征	230
18.4.2	能量分形特征	234
18.5	本章小结	237
第 19 章	单轴压缩下尾砂胶结充填体次声波特性研究	239
19.1	引言	239
19.2	单轴压缩下尾砂胶结充填体次声波测试试验	240
19.2.1	试件制备	240
19.2.2	试验方案	242
19.3	次声波信号数据处理方法	243
19.3.1	次声波信号滤波方法	243
19.3.2	累计振铃计数	244
19.3.3	能率分析方法	244
19.3.4	短时傅里叶变换时频分析方法	245
19.4	试验数据分析	245
19.4.1	室内环境本地信号分析	245
19.4.2	充填体单轴压缩次声波数据分析	247
19.5	试验分析结果	252
19.6	本章小结	254

第 20 章 第三部分结论与展望	255
20.1 结论	255
20.2 展望	256
参考文献	258

第一部分

导波声发射技术在排土场应用的 理论与模拟试验研究

第1章 绪论

1.1 研究的目的是与意义

矿山开采过程中会产生大量的松散介质废弃物,形成排土场。矿山排土场具有占地面积广、堆放量大、易引发危害的特点。据统计,我国金属露天矿山排土场的平均占地面积为矿山总占地面积的 39%~55%,每年仅金属矿山排土场排放的废石就达到 20 多亿吨,占地面积达 5500 多公顷^[1]。随着矿山生产积累排土场的规模越来越大,由于管理不当、连续降雨等原因造成的安全事故时有发生,而这往往会给人民的生命、财产等造成巨大伤害和损失。据不完全统计,我国近几十年来矿山排土场发生事故多达上千起,死亡人数超过 3000 人。如 1979 年攀钢兰尖铁矿排土场发生滑坡,滑坡量 2000km³,冲垮了处于正前方的主平硐,迫使兰尖采区停产 6 个月^[2]。2008 年山西尖山铁矿排土场垮塌事故,造成 45 人死亡和失踪,1 人受伤,引发直接经济损失 3080 万元^[3]。排土场内部离散分布的废石土杂乱无章,颗粒之间具有部分流动性,抗拉强度很低或者为零,其稳定性同时受排土工艺、山坡坡度、基底强弱、堆积物料的物理力学性质、排土高度等因素的影响。因此,排土场的稳定性是矿山普遍关注的重要安全问题。

目前,排土场稳定性主要是通过监测各种位移、变形来实现的。位移、变形监测可分为表面监测和内部监测。其中,表面监测是在大量松散介质已经发生移动的基础上,测出排土场表面出现宏观破坏特征,才能确定其状态变化。而内部监测存在难以确定监测变形的方向,以及位移、变形量与整体破坏的判据的关系等,且监测范围具有一定的局限性,无法准确反映松散介质体颗粒间的滑动情况。正是由于目前的排土场稳定性监测技术无法反映松散介质体内部滑移及失稳过程,排土场稳定性还难以进行准确的监测和预测。

材料损伤、破坏、失稳过程会释放出大量的声发射(acoustic emission, AE)现象。声发射技术是岩土工程界普遍运用于监测预警的一种重要手段。排土场滑移会产生大量的声信号,但声发射传感器不能直接捕捉到这种声信号。本书中采用波导杆作为导波介质,声发射传感器接收由排土场滑移引起的波导杆中传递的弹性波,通过分析声发射动态监测信息,实现排土场变形破坏失稳等灾害源的识别、预警是一条重要的技术途径。而实现这一途径的重要前提和基础则是寻求排土场变形破坏失稳过程中的声发射特征。

本部分进行排土场变形破坏失稳的声发射室内试验和理论研究,研究其变形破坏失稳过程的声发射参数特征,揭示松散介质颗粒间微观滑动至宏观变形的机理,由此寻求排土场松散介质堆积体失稳的声发射判据,对矿山排土场及其他工程实际中松散介质堆积体的失稳监测、预测具有一定的理论和现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 排土场稳定性研究现状

1.2.1.1 排土场稳定性影响因素

排土场是矿山大型松散介质堆积工程体,大都是由采场采掘剥离排弃的废石堆积而成。排土场属于矿山重大危险源,其稳定性不仅影响矿山企业的安全生产和经济效益,也关乎矿山企业附近的道路交通和居民生活,一旦出现失稳滑移,极易引发泥石流、滑坡等灾害,对国家、社会造成难以估量的损失。因此,对排土场这类矿山危险源的稳定性研究一直未曾中断。

大量研究表明,影响排土场稳定性的主要因素包括排土场堆积体自身的物理力学性质、排土场选址的地基岩土体结构及其物理力学特性、排土场整体设计、地表水、地下水和周围爆破振动等其他施工干扰^[4]。

排土场等松散介质堆积体,因松散材料不同,其稳定性差异明显。散体介质的物理力学特性试验研究表明^[5]:松散体材料的工程力学特性由其在剪切试验中颗粒的完整性决定,越破碎则散体材料的工程力学特性越差。排土场堆积松散体的颗粒破碎退化影响松散体强度特性,从而影响排土场稳定性,超高排土场表现尤为明显^[6]。王光进等^[7,8]将松散体粒径进行分级,然后建立排土场边坡模型,模拟分析粒径分级对排土场边坡的稳定性影响,结果表明排土场在堆存过程中对松散体进行粒径分级有利于提高排土场的稳定性。当考虑粒径分级或增加大粒径散体物料的含量时,排土场的安全系数明显增大。

排土场基底岩土体结构也是影响排土场稳定性的内部因素之一,排土场堆积松散体物料在基底软弱区时容易因排土场基底承载质量小而引发排土场边坡失稳形成滑坡^[9]。文献[10]对黄土基底浸水排土场稳定性进行了探究,研究表明若基底及排弃物底部排水条件好,并且摩擦系数大,在其顶上的松散堆积体更不易失稳滑塌。另外,排土场黄土基底在蠕变特性影响下其边坡容易发生基底型滑坡^[11]。汪海滨等^[12]在工程类比的基础上,结合实地勘察、监测及跟踪调查等多种研究手段,研究分析了在黄土软弱斜坡地基上堆排形成的排土场的滑坡孕育演化机制,并采用理论分析计算得出排土场安全运行的最大堆排高度。

排土场在堆排过程中形成的堆高、边坡角、堆排顺序等因素也会影响排土场整体的稳定性。廖国华、Khandelwal等国内外学者^[13,14]研究发现,排土场松散岩土体的堆载高度与其稳定性密切相关,排土场堆积超过极限高度会造成其失稳形

成滑坡等灾害。魏朝爽^[15]、石建勋^[16]等结合工程实例数值模拟了不同堆积坡高情况下排土场边坡的稳定性,得出堆高与稳定性之间的关系。国新^[17]针对排土场不同位置进行不同边坡倾角条件下的边坡稳定性分析,在基底倾角和堆排高度一定的情况下,边坡倾角越小,排土场边坡的稳定性越高。孟星吟^[18]建立相应的地质模型,结合排土场堆积物料性质、堆排情况和即将堆排的设计状况,对排土场进行动态分析其稳定性并提出相应可行的优化措施。淮筱斌^[19]以不同堆置方式形成的排土场模型为分析基础,提出了排土场各区域堆置过程中堆置参数优化设计。韩流^[20]采用原位试验测定了露天矿排土场不同排弃时间及排弃位置的混合物料物理力学参数,并借助数值软件分析研究了废石土等松散体堆积的排土场动态发展过程的稳定性变化规律。

水是引发排土场失稳滑坡等的外因之一^[21]。文献[22]研究显示,在有水作用的情况下排土场和基底的各类力学强度指标都会降低,抗滑力下降,引发排土场失稳。郑开欢等^[23]模拟排土场碎石土边坡在短时强降雨条件下的稳定性,研究结果表明,边坡会在雨后的一个较短时间内发生浅层滑坡。文献[24]以降雨时期排土场的整体稳定性为研究对象,分析了在不同降雨条件下的排土场散体边坡内部渗流情况。张雪岩^[25]利用数值模拟软件分析研究排土场边坡稳定性随降雨强度、降雨历时、地震烈度变化而变化的一般规律,并在此基础上探究排土场发生矿山泥石流的影响因素及一般性规律。

爆破作业产生的振动还有周围施工的干扰也是影响排土场稳定性的另一外部因素。矿山生产过程中的爆破振动波传播到排土场等人工巨型碎石土堆积体,降低了排土场堆积体内部颗粒间的黏聚力,促使松散堆积体边坡的松动滑移加速甚至失稳垮塌,影响排土场整体稳定性^[26]。曹东磊^[27]对排土场爆破振动监测研究发现排土场的稳定性与矿山正常生产爆破振动震距有定向关系。文献[28]采用数值软件模拟研究不同爆破水平振动强度对排土场边坡的影响,在爆破水平振动作用下边坡的稳定性随振速增加而下降直至失稳。

1.2.1.2 排土场稳定性分析方法

矿山排土场管理不当或在连续暴雨、地震等自然灾害下容易失稳坍塌。对排土场灾害的防控与治理,既关系到矿山的安全生产,又关系到人民生命财产安全和环境保护,因而在矿山生产过程中对排土场进行稳定性分析,可确保其安全长久运行。

排土场的稳定性分析主要是采用力学分析和数值计算方法确定边坡岩体在自重应力、地应力、构造应力、扰动(采掘、爆破)应力、静/动水压力等作用下的受力状态和位移状态。这类松散介质堆积体的边坡稳定性分析方法,可分为定性分析和定量分析两大类。定性分析方法包括工程类比法和图解法。定量分析方法包括极限平衡法、极限分析法等。其中,极限平衡法主要有瑞典法、Janbu法、

Bishop 法、Morgenstern-Price 法、罗厄法及 Spencer 法等；极限分析法主要有有限元法、边界元法、离散元法及有限差分法等。其他结合现代数学的方法，如模糊数学分析法、灰色理论分析法、可靠度分析法及神经网络分析法等，也被应用于排土场边坡稳定性分析。文献 [29, 30] 采用可靠度分析理论对影响排土场边坡稳定性的不确定因素进行分析，建立排土场边坡可靠度分析流程，对排土场边坡的稳定性进行了可靠度分析。

1.2.1.3 排土场模型研究

排土场的稳定性关系重大，排土场堆排量极大，一旦出现垮塌将会产生不可估量的损失。目前，针对排土场稳定性的研究也呈现多样化，部分学者结合排土场实际情况建立室内模型进行相似模拟试验研究；部分学者利用数值软件进行数值模拟探究。任伟^[31]等采用不同粒径的散体材料模拟排土料在倾倒过程中的自然分选过程，建立了松散体堆积的排土场内部级配分布模型，从而对排土场稳定性进行研究。王俊等人^[32]建立了饱水黄土基底排土场模型，采用底部注水的方式模拟地下水入渗基底软弱黄土层对边坡稳定性的影响，研究分级填筑、软弱基底以及在饱水条件下黄土基底排土场边坡裂缝开展和发育特征以及边坡破裂面的空间形态特点。周维垣等^[33]建立了一个可整体转动的边坡模型，可通过改变排土场模型的边坡角度调整自重场和下滑力来模拟边坡开裂破坏试验，通过改变边坡的自重场和下滑力来研究边坡的稳定性。文献 [34] 采用 FLAC 软件建立三维地质整体边坡模型，数值模拟排土场在降雨、爆破振动等不同工矿条件下整体稳定性分析。

1.2.1.4 排土场稳定性监测

目前，排土场边坡的监测内容主要包括位移监测和应力监测。常用的位移监测元件有简易伸长计、多点位移计、水准仪、测距仪、全站仪/光电测距仪、摄影经纬仪和激光扫描仪等，针对大型边坡的位移监测还有的应用遥感 (RS)、GPS 和光纤传感技术。边坡常用的应力监测元件有钢弦压力盒、液压枕、电阻应变计和光弹应力计等。文献 [35] 对松散介质堆积体边坡需监测区域布设 GPS 监测点监测网络实时监测排土场边坡的稳定性状态和位移状况，确保排土场安全稳定运行。李焕强等人^[36]将光纤传感技术应用于边坡模型试验，监测坡面位移变化探究边坡在降雨作用下的变形规律。孙华芬^[37]在尖山磷矿边坡建立 TM30+ GeoMos 自动监测系统探究边坡变形时空演化规律、变形特征和失稳模式。邬凯等^[38]基于 GPRS 集成位移和降雨量监测装置建立边坡变形监测预报系统，实现在线远程监控。还有如变形监测机器人、地面摄影测量方法、自动化全站仪监测网络、激光测距扫描技术、合成孔径雷达干涉测量技术、全球定位系统监测技术、数字成像监测技术和地理信息系统监测技术等，结合电子信息计数的多学科交叉融合监测技术被应用于边坡地表位移监测，这些融合多学科新技术的出现为

排土场的稳定性带来更加便捷、有效的监测方案措施。

1.2.2 声发射技术在矿山中的应用现状

声发射 (acoustic emission, AE) 的定义可分为广义和狭义两种。通常, 狭义中的理解为材料受外力作用下, 其内部由于局部应变能的快速释放而产生的瞬时弹性波的一种物理现象, 有时也称“应力波发射”、“应力波振动”等; 而广义上的理解则是在泄漏等外力作用下, 激发能量波在材料中传播的一种物理现象。通常又把利用声发射仪器接收声发射信号, 对材料或构件进行检测的这项技术, 称为声发射技术^[39,40]。

声发射技术主要应用于矿山中的地应力测量、工程岩体稳定性监测等方面。其中, 声发射法测量地应力是根据岩石对先前应力记忆效应 (Kaiser 效应) 原理测量原岩应力, 通常在测点处沿六个不同方向获得岩芯, 将岩芯加工成岩石试件进行室内声发射试验。有人提出声发射测量得到的是先前最大应力, 不是现今地应力, 还有人提出通过声发射可获得先前最大应力和现今应力, 该方法测量精度和可靠性尚未得到公认, 一般用于地应力估测; 在矿山开采活动中, 对岩石产生的声发射信号进行监测, 称为矿山声发射监测。当岩石受力变形时, 岩石中原来存在的或新产生的裂纹周围应力集中, 应变能较高, 当外力增加到一定大小时, 在有裂纹的缺陷地区产生了微观屈服和变形, 裂纹扩展, 从而使应力弛豫, 储存的一部分能量以弹性波的形式释放出来, 并由源点向四周传播, 通过声发射仪器接收岩石产生的这种弹性波信号, 并对接收的声发射信号进行相关分析, 就可以对岩石破裂状态等进行评估。国内外学者^[41-53]的大量研究表明, 根据声发射前兆特征参数变化判别岩体失稳的方法切实可行^[44]。

此外, 部分学者^[3,54-57]利用波导杆作为导波介质来监测破碎岩体的声发射信号。如邹银辉等人^[54,55]根据弹性力学和波动动力学的相关理论, 对岩体声发射传播过程的波动方程进行研究推导, 由此建立一维波导器的弹性力学模型, 并探究了声发射信号在波导器中的传播规律。李建功等人^[56]利用数值软件模拟了声发射在波导器中的传播, 研究分析了声发射应力波在波导器中传播过程中的衰减规律; 吕贵春等人^[57]借助数值模拟和室内试验探究了波导器的直径和长度对波导器接收声发射信号规律及其优化, 并利用现场试验对波导器安装工艺进行了优化。李俊亮^[3]将波导杆穿过煤岩层松动圈安装在原始煤岩体中, 利用声发射监测技术监测煤岩体稳定性, 现场结果显示, 危险工作面煤岩体的稳定性监测效果良好。

排土场是由松散介质排放的堆积体, 发生滑移失稳的过程是内部松散介质间逐步滑动最终导致宏观变形破坏, 颗粒介质间的错动滑移摩擦会产生大量的声信号, 但这种信号不能直接通过声发射传感器捕捉到。上述研究表明, 波导杆作为