

声发射

(AE)技术的应用

[日] 勝山邦久 编著

冯夏庭 译 雷兴林 校

冶金工业出版社

71 563

690

1

D6-3:102

声发射 (AE) 技术的应用

(日) 勝山邦久 编著

冯夏庭 译 雷兴林 校

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书详尽地论述了 AE 技术的基本理论,介绍了日本的一些具有代表性的 AE 测量系统及金属材料和复合材料的 AE 特性、岩石和混凝土的 AE 特性、地应力测量的 AE 方法以及 AE 技术在工程监测上的应用,最后大篇幅地介绍了日本的 AE 技术的现场应用实例,包括:大型结构的 AE 试验、基于 ASME 规定的大型压力容器的 AE 试验、折爪隧道掘进工程中的围岩松弛区的 AE 测量、用 AE 测量评价硐室围岩的松弛变形、地下发电站建设工程中的 AE 测量、AE 技术在检测隧道岩爆方面的应用、大谷石采石场的塌陷前的 AE 评价、软岩竖井掘进过程中的 AE 监测、地下空间利用时的 AE 特性、用 AE 法测量地应力、煤矿水压致裂过程的 AE 测量、地热开发方面的 AE 特性、送电铁塔基础变形的 AE 测量、野外钢筋混凝土结构的 AE 测量、铁塔基础模型试验体拉拔试验时的 AE 测量、边坡滑坡的 AE 监测、弧状掘进施工法的钻头位置定位的 AE 方法,还介绍了美国在大型压力容器等的 AE 测量实例。

本书可作为金属材料、土木工程、采矿、铁道建设、水利建设、地热开发、新材料、航空、机械、化工厂等领域的大专院校师生、研究单位研究者和现场工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

声发射 (AE) 技术的应用 / (日) 胜山邦久编著; 冯夏庭译, 雷兴林校. —北京: 冶金工业出版社, 1997. 7

ISBN 7-5024-2068-1

I. 声… II. ①胜…②冯… III. 声发射-应用 IV. TB5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 10078 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

文物出版社印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行;

1996 年 12 月第 1 版, 1996 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 24.25 印张; 586 千字; 372 页; 1-1500 册

50.00 元

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01—97—0284

译者的话

声发射 AE (Acoustic Emission) 技术是一种对结构物进行无损检测、监测的新技术。由于计算机技术的迅速发展,波形存储的容量和数据处理的速度得到了很大的提高,开发出了许多新的 AE 测量系统,对现场进行的 AE 测量越来越引起人们的关注。这种现场 AE 测量不只是限于金属材料与岩体,在混凝土、机械、超导材料、植物、木材、航空设备等许多方面都有一些应用的实例。但充分论述这种现场 AE 测量实例的著作却不易找到。

庆幸的是,日本资源环境技术综合研究所胜山邦久博士,于 1994 年编著出版了《AE 技术的应用》一书。该书由 27 位多年从事 AE 技术研究和现场测量的研究者执笔完成。本书是这些作者多年来对 AE 技术的研究成果和研究经验的总结,内容系统而广泛。书中论述了 AE 技术的基本理论与 3 维 AE 层析技术,介绍了日本的一些代表性的 AE 测量系统,金属材料 and 复合材料的 AE 特性、岩石和混凝土的 AE 特性、机械制造领域的 AE、地应力测量的 AE 方法以及 AE 技术在边坡稳定、混凝土施工和注浆等工程监测上的应用,并大篇幅地介绍了 AE 技术的现场应用实例。包括:大型结构健全性的 AE 诊断、大型压力容器提货前的 AE 检查、折爪隧道掘进工程中的围岩松弛区的 AE 测量、用 AE 测量评价硐室围岩的松弛变形、地下发电站建设工程中的 AE 测量、AE 技术在检测隧道岩爆方面的应用、大谷石采石场的塌陷前的 AE 评价、软岩竖井掘进过程中的 AE 监测、地下空间利用时的 AE、用 AE 法测量地应力、煤矿水压致裂过程的 AE 测量、地热开发方面的 AE、送电铁塔基础变形的 AE 测量、野外钢筋混凝土结构的 AE 测量、铁塔基础模型试验体拉拔试验时的 AE 测量、边坡滑坡的 AE 监测、弧状掘进施工法的钻头位置定位的 AE 方法。最后还介绍了美国在航空飞机等 11 个方面的 AE 现场测量的实例等。

译者在读完了本书之后,倍受触动,因此,决定将它翻译成中文,把书中先进的 AE 测量技术和现场测量经验介绍给广大的 AE 技术爱好者,希望有利于将 AE 技术更广泛的应用于我国现场测量领域。

本书由冯夏庭教授翻译,雷兴林博士进行了非常详细、认真的校对,并进行了必要的修改。原书编著者胜山邦久博士和濑户政宏博士对书中的一些专业名词和外来语作了解释。对原著中的一些错误,经与编著者本人商量,在中译本中已做了更正。筑波大学的张翠微在日语语法和疑难语句的翻译方面给予了译者极大的帮助,东京大学的张爱华博士、NEDO 特别研究员 Msui 博士、地质调查所的李小春博士等也给予了不少帮助,使得本书的翻译工作得以顺利的完成。在此,向他们表示衷心的感谢。

由于时间紧,翻译工作量大,再加上一些外来语及英文用中文表达未必那么自然,所以,书中难免会有许多不尽人意的地方,恳请读者多多指正,本书如能促进我国的 AE 技术的发展,我们将感到非常荣幸。

译者

1996 年 3 月 1 日

序

近年来，世界上各项技术的进步很显著，特别是在计算机领域，与 10 年前相比差别很大。因此，测量 AE 时，有了很大变化。人们还记得，十几年前，为了记录 AE 波形，要换数个 640KB 的软盘，一次实验要准备 200 张软盘，如今用一个 600MB 的光盘就可以记录、处理数次的实验数据。并且，测量用计算机在从微机到工作站，处理速度也显著加快，十几年前，即使理论上可能但不现实的技术，如今在现场已成了能充分使用的可能。

AE 方面的著作有：以日本非破坏检查协会特别委员会的尾上守夫原委员长为首的诸多有识之士的《AE 的基础与应用》，天津政康先生的《AE 的特性与理论》。近来，如前所述，由于测量系统的进步等原因，对现场进行的 AE 测量越来越引起人们的关注。不只是金属，在岩体、混凝土、机械、超导、植物、木材等很多领域虽然正在被大量应用，但充分论述这种现场 AE 测量例子的著作却不易找到。

筑波学园研究都市有好多对 AE 感兴趣的研究者。于是，总结迄今为止的研究成果、出版至今没有的对现场有用的著作已成为可能。因得到许多有经验人的支持，决定出版此书。

因执笔者人数很多，书中的单位、语句缺乏统一性，SI 单位也未被现场充分掌握，外来语由于用日语表示有不自然之处，没有进行统一，由执笔者自行处理。这些想在下一次统一。本书如能对 AE 技术的应用有一点帮助，我们将感到很荣幸。

编著者

执笔者一览

- 编著者 勝山邦久 工业技术院 资源环境技术综合研究所 安全工学部
- 执笔者 青木谦治 鹿岛建设(株) 技术研究所 (50音顺)
石桥晃睦 日本工营(株) 中央研究所
稻叶孝子 (株) 间组 技术研究所
岩井邦夫 日铁技术(株) AE 技术事业部
岩井孝幸 (株) 熊谷组 技术研究所
蛭子清二 (株) 奥村组 筑波研究所
大津政康 熊本大学 工学部
金川 忠 (财) 电力中央研究所 我孙子研究所
川上 纯 大成建设(株) 技术研究所
木下直人 清水建设(株) 技术研究所
小林秀男 工业技术院 资源环境技术综合研究所 地壳能源研究室
齐藤正克 筑波大学 构造工学系
筱原 茂 (株) 奥村组 筑波研究所
清水勇芳 (株) NF 回路设计 AE 系统事业部
濑户政宏 工业技术院 资源环境技术综合研究所 安全工学部
竹村友之 三井金属矿业(株) 资源开发部
秩父显美 (株) 藤田 技术研究所
中田文雄 川崎地质(株) 技术本部
中野正章 千代田化工建设(株) 先进技术中心
畑浩二 (株) 大林组 技术研究所
平田笃夫 西松建设(株) 技术研究所
村上祐治 (株) 间组 技术研究所
茂住洋史 神冈矿业(株) 矿山部
汤山茂德 日本物理声学(株)
横山幸也 应用地质(株) OYO 中心实验室
吉冈武雄 工业技术院 机械技术研究所 基础机械部

目 录

1 绪论	(勝山邦久)	1
1.1 引言		1
1.2 AE 的历史		2
1.3 AE 与地震		4
1.4 材料与 AE		7
1.5 异常诊断与 AE		8
1.6 AE 的未来		9
2 弹性波与 AE 理论		12
2.1 弹性理论	(勝山邦久)	12
2.1.1 弹性		12
2.1.2 弹性波的反射、折射与表面波.....		17
2.1.3 弹性波传播的光弹实验.....		21
2.1.4 弹性波动数值模拟.....		23
2.2 AE 波动理论	(大津政康)	28
2.2.1 解析理论.....		28
2.2.2 模拟分析.....		31
2.2.3 逆褶积分析.....		32
2.2.4 矩张量分析.....		34
3 AE 监测系统		41
3.1 AE 信号的特性	(大津政康)	41
3.2 信号处理.....		45
3.3 位置定位.....		48
3.3.1 初动的自动检测	(勝山邦久)	48
3.3.2 神经网络	(稻叶孝子)	51
3.3.3 位置定位法.....		57
3.4 最新的现场测量仪器.....		63
3.4.1 NF 回路设计	(清水勇芳)	63
3.4.2 日本物理声技术	(汤山茂德)	66
3.4.3 千代田化工建设(株)的 AE 测量系统 C-AEAS	(中野正章)	73
3.4.4 日铁 TEKUNOS	(勝山邦久)	76
4 金属、新材料等的 AE 特性	(齐藤正克)	84
4.1 金属材料.....		84
4.1.1 线性断裂力学.....		84
4.1.2 弹塑性断裂力学.....		86
4.1.3 破坏韧性试验与 AE		87

4.2	复合材料	90
4.2.1	微观机制与 AE	91
4.2.2	纤维强化复合材料	91
5	岩石、混凝土的 AE 特性	93
5.1	单轴压缩应力下的 AE 特性 (濑户政宏)	93
5.1.1	应力水平与 AE 发生频率的关系	93
5.1.2	破坏过程中的振幅与频率分布的变化	94
5.1.3	AE 发生的位置	97
5.2	弯曲应力、拉伸应力下的 AE 特性	99
5.2.1	岩石在弯曲应力作用下裂纹扩展时的 AE 特性	99
5.2.2	裂纹尖端的 AE	101
5.2.3	破坏韧性试验与 AE	103
5.3	受围压作用时的岩石 AE 特性	104
5.3.1	围压作用下的 AE 监测方法	104
5.3.2	AE 源分布与发震机制	105
5.3.3	岩石内 AE 的分形特性	107
5.4	不连续各向异性岩石的 AE 特性	111
5.4.1	不连续性岩石的 AE	111
5.4.2	各向异性岩石水压破裂时的 AE	114
5.5	孔隙率与 AE	119
5.5.1	试验体与浸渍条件	119
5.5.2	破坏试验	120
5.5.3	AE 特性	120
5.6	有温度变化的岩石 AE 特性 (木下直人)	122
5.6.1	与温度变化相关的岩石 AE 特性	122
5.6.2	均匀温度变化的岩石 AE 特性	125
5.6.3	热应力作用时的岩石 AE 特性	128
5.7	劣化混凝土的 AE 特性 (竹村友之)	128
5.7.1	劣化原因分析	129
5.7.2	盐害	129
5.7.3	碱性骨料反应	129
5.7.4	中性化	129
5.7.5	海水成分劣化混凝土的 AE 特性	130
5.7.6	中性混凝土的 AE 特性	131
5.7.7	混凝土劣化诊断的速率过程分析	132
5.7.8	受疲劳载荷作用的钢筋混凝土劣化程度判断	132
5.8	3 维 AE 层析技术 (勝山邦久)	134
6	机械领域的 AE 技术 (吉冈武雄)	139
6.1	机械零件的异常诊断	139

6.1.1	滚动轴承的异常诊断	139
6.1.2	滑动轴承的异常诊断	148
6.2	机械零件材料的评价	149
6.2.1	滚动轴承材料的评价	149
6.2.2	滑动轴承材料的评价	152
6.3	机械制造线的质量管理	154
6.4	流体渗漏的检测	155
6.5	结语	158
7	地应力测量与 AE (濑户政宏)	160
7.1	地应力测量方法的分类	160
7.2	地应力的现场测量	160
7.2.1	应力解除法	160
7.2.2	利用破裂岩体的方法	162
7.3	地应力的室内测量	165
7.3.1	AE 法	165
7.3.2	DRA 法	165
7.3.3	DSCA 法	165
7.4	用 AE 法测地应力	166
7.4.1	岩石试件的准备	166
7.4.2	加载方法与 AE 测量方法	166
7.4.3	从 AE 测量数据预测地应力的方法	168
7.5	AE 法测定地应力过程中经历时间的影响	171
7.5.1	凯塞效应的时问依赖性	171
7.5.2	岩石受反复加载时的 AE 特性	174
7.6	AE 法测定地应力时侧向压力的影响	176
7.6.1	岩石试件与预应力	176
7.6.2	试验方法	176
7.6.3	受侧压和轴压作用的岩石在反复加载时的 AE 特性	176
7.7	AE 法测定垂直地应力分量	180
7.7.1	岩芯的采取	180
7.7.2	试验方法	180
7.7.3	根据岩芯测定的垂直地应力分量	180
7.8	用 AE 法确定 3 维地应力状态	184
7.9	今后的研究方向	185
8	AE 在工程监测中的应用 (大津政康)	188
8.1	概述	188
8.2	边坡监测	189
8.3	混凝土施工监测	190
8.4	地下注浆监测	192

9 现场的 AE 测量实例	194
9.1 大型结构的 AE 试验	(中野正章) 194
9.1.1 概述	194
9.1.2 AE 试验方案	194
9.1.3 AE 试验的应用实例	196
9.1.4 结语	202
9.2 基于 ASME 规格的大型压力容器的 AE 检测	(汤山茂德) 203
9.2.1 概述	203
9.2.2 试验方法	203
9.2.3 实验前准备	206
9.2.4 试验结果与说明	207
9.2.5 结语	209
9.3 折爪隧道掘进时松弛区域的 AE 测量	(岩井孝幸) 211
9.3.1 概述	211
9.3.2 折爪隧道的概述	211
9.3.3 AE 监测点的状况	212
9.3.4 AE 监测	212
9.3.5 测量结果	214
9.3.6 考察	215
9.3.7 结语	217
9.4 用 AE 评价储藏罐周边围岩的松弛变形	(青木谦治) 218
9.4.1 概述	218
9.4.2 松弛变形发生的机理	219
9.4.3 AE 参数	219
9.4.4 岩石试验的 AE 测量结果	221
9.4.5 岩体试验的 AE 测量结果	221
9.4.6 在隧道松弛变形监测中的应用	222
9.4.7 大硐室(岩体储藏罐)的松弛变形监测中的应用	226
9.4.8 结语	229
9.5 地下发电站建设过程中的 AE	(金川 忠) 230
9.5.1 地下发电站概述	230
9.5.2 岩体内的 AE 测量方法	230
9.5.3 岩石、岩体的 AE 测量结果	232
9.6 AE 法在隧道岩爆监测中的应用	240
9.6.1 概述	240
9.6.2 关越隧道及雁坂隧道的岩爆	240
9.6.3 AE 测量系统	240
9.6.4 施工管理	241
9.6.5 测量结果的评价	242

9.6.6	应力分析与考察	244
9.6.7	结语	247
9.7	大谷石采石场基地塌陷前的 AE (中田文雄)	248
9.7.1	概述	248
9.7.2	大谷石的开采方法	248
9.7.3	最新塌陷地的概要	248
9.7.4	空硐周围的岩体变形与观测对象的 AE	249
9.7.5	观测系统的概述	250
9.7.6	确定震源位置的方法	252
9.7.7	观测波形	253
9.7.8	塌陷发生前的 AE 活动	253
9.7.9	AE 与振动的发生场所	254
9.7.10	结语	255
9.8	软岩竖井掘进时的 AE (濑户政宏)	257
9.8.1	测量概要	257
9.8.2	测量方法	257
9.8.3	测量结果	258
9.8.4	结语	260
9.9	AE 在地下空间中的应用 (茂住洋史)	263
9.9.1	概述	263
9.9.2	大型矿山采掘时的岩体监控	263
9.9.3	AE 在神冈地下空间中的应用	265
9.10	用 AE 法测量地应力实例 I (横山幸也)	269
9.10.1	概述	269
9.10.2	测量方法	270
9.10.3	验证实验	271
9.10.4	受热作用过的岩石的 AE 测定实例	272
9.10.5	地下发电站地点的 AE 测量实例	276
9.10.6	地热发电站地点的 AE 测量实例	276
9.10.7	各种岩石的测量实例	277
9.10.8	关于地应力记忆时间的实验实例	278
9.11	用 AE 法测量地应力实例 II (畑浩二)	282
9.11.1	概述	282
9.11.2	测量装置	282
9.11.3	预备试验	282
9.11.4	本试验	283
9.11.5	主应力计算方法	284
9.11.6	测量实例	285
9.12	煤矿水压致裂时的 AE (濑户政宏)	292

9.12.1	概述	292
9.12.2	现场水压致裂试验方法	292
9.12.3	AE 测量结果与解释	294
9.12.4	结语	301
9.13	地热开发与 AE (小林秀男)	303
9.13.1	概述	303
9.13.2	地热开发的现状与 AE 测量	303
9.13.3	天然地热储热层产生的 AE	305
9.13.4	高温岩体开发与 AE 观测	308
9.13.5	观测 AE 波形分析	312
9.13.6	结语	313
9.14	送电铁塔的变形与 AE 特性 (村上祐治)	315
9.14.1	概述	315
9.14.2	实验概要	315
9.14.3	实验结果	316
9.14.4	结语	320
9.15	AE 在野外钢筋混凝土结构上的应用 (石桥晃睦)	320
9.15.1	概述	320
9.15.2	野外测量的准备	321
9.15.3	噪声的识别、除去与位置定位	324
9.15.4	AE 测量结果与建筑物的老化	327
9.15.5	结语	327
9.16	铁塔基础模型试验体拉拔试验时的 AE (篠原 茂·蛭子清二)	328
9.16.1	概述	328
9.16.2	试验方法	328
9.16.3	分析方法	330
9.16.4	试验结果与考察	331
9.16.5	结语	334
9.17	滑坡时的 AE (川上 纯)	335
9.17.1	概述	335
9.17.2	新 WG 的特征	335
9.17.3	滑坡实验的概要	336
9.17.4	滑坡发生状况	338
9.17.5	AE 测量结果与讨论	339
9.17.6	结语	342
9.18	人工边坡中的 AE (秩父显美)	343
9.18.1	概述	343
9.18.2	AE 测量概要	343
9.18.3	测量结果	343

9.18.4	结语	347
9.19	弧状掘进施工法中的钻头的位置定位 (稻叶孝子)	347
9.19.1	引言	347
9.19.2	弧状掘进施工法	348
9.19.3	位置定位法与校准	348
9.19.4	掘进时的钻头位置定位	350
9.19.5	用假想声源法进行钻孔钻头位置的推断	352
9.19.6	结语	354
9.20	海外的现场 AE 测量实例 (汤山茂德)	356
9.20.1	引言	356
9.20.2	各种应用实例	357
9.20.3	结语	369

1 绪 论

1.1 引言

AE (Acoustic Emission) 从字面上来看是声音放出的意思, 为材料变形或者破坏时积蓄起来的应变能所释放的声音的传播现象^[1,2]。但近来其外延已进一步扩大, 比如说泄漏声音、轴承的滑动声音、木材干燥时产生的声音^[3]、甜瓜茎中的流体的声音等也都被称为 AE^[4], 这些广义解释的 AE 情形较多, 而且研究成果也非常多。

AE 现象我们在小时候便从大自然里知道, 尤其是可听频率域的 AE。比如邻居的玻璃窗破裂时的声音、铅笔芯折断时的声音、方便筷掰开时的声音等等都是 AE 现象。

因为 AE 被广义地解释, 那么身边的许多现象便能被解释为 AE 了。例如, 在京都的知恩院 (1234 年建立, 现存为 1639 重建)、二条城 (1603 竣工) 的走廊, 人走动时会发出吱吱嘎嘎的声音, 在享受那种声音的同时, 也可用于发现入侵的坏人。这个张合板在剪切应力作用下发生 AE 的现象, 很久以前便被利用, 现在仍被用来检查木材的结疤。

积极利用积蓄能量释放所产生的声音传播的装置中, 有一种简单的驱鸟装置。将切下的竹筒中央在支点上支住, 往一端切口里灌入水, 使其渐渐变重。由于这种重量, 竹筒的切口端下降, 水流出, 水流出后, 另一端由于自重加速下降, 与其下的石头撞击而发出声音, 这本来是为了赶走田野里的鸟、野兽而设计的, 现在有人将它放在庭院里, 享受其音色。

水壶里的水沸腾时发出“霏霏”的声音的装置在欧洲很早以前就被使用, 最近在日本家庭中也开始出现了。这是由于热在水壶里积蓄能量, 水变成水蒸气, 水蒸气泄漏, 发生笛鸣, 这也是广义的 AE。

不管说什么, 最被人熟知的 AE 应该说还是地震, 地震是地球内的岩石破坏造成的“声音”的放出, 因为破坏面大, 且震源远, 波动的频率为数赫兹到数十赫兹。

只要开始 AE 的研究, 就会举出锡弯曲时发出“锡鸣”的例子。有一次, 为了听这种声音, 到隔壁的研究室要了锡粒, 将其溶解, 作成薄板状, 试着弯曲一下, 果然发出“啾啾”的声音。将“锡鸣”想象成“铃鸣”, 本以为声音会稍好听一些, 但结果并非如此。

超声波探伤法是利用与 AE 相同的超声波来探索物体内部缺陷的技术, 两种比较的概念图如图 1 所示。图 1 表示, 超声波探伤法与雷达一样从发射超声波信号的信号发生器发射脉冲, 信号接收器接收从缺陷处反射回来的发射波, 来确认有无缺陷, 信号发生器与信号接收器是相同的。比如说即使有缺陷, 如果超声波不接触到它, 这种缺陷也检查不出来。因此, 信号发生器和信号接收器必须对要检查的部分进行全面扫描, 并且, 能够发现缺陷的大小受超声波频率的影响。小的缺陷需要高频率, 但是由于高频率信号的振幅衰减大, 因此受到限制。但能积极地发现缺陷是其优点。

而用 AE 法来发现缺陷时, 没有必要给其施能量, 只要设置几个 AE 变换器, 等待缺陷发出的波即可。需要的只是设置 AE 变换器作业, 即使从 AE 变换器到缺陷之间也有距离, 只要波到达了就有效。根据 AE 波到达的时间差, 可以确定 AE 发生源的位置。而超声波探伤法不同, 即使有缺陷, 如果不施加外力, 就不产生 AE, 也就不能发现缺陷。最优越的一

点是,如果不发生 AE,也能表示既存的缺陷不扩展,可以说很安全。超声波探伤法、放射线、炭粉探伤、浸透法等的非破坏检查法都必须停止作业中的设备再进行检查,这是他们最大的缺点,而 AE 法不停止作业就能发现缺陷,也就是说,AE 法有能够在线监测的优点。

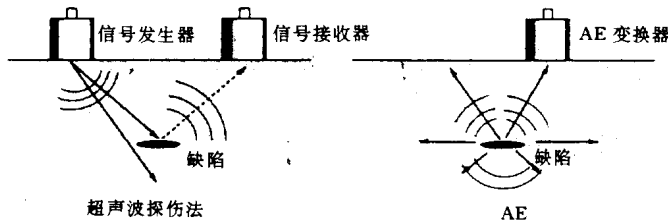


图 1 AE 与超声波探伤法

如果仅要发现固体内部的缺陷的大小,就不必要用超声波探伤法。大家还记得电影“铁道员”中年老的铁道员一边用锤子敲火车车轮,一边跑步的姿态吧。如果车轮发生裂纹,锤子敲车轮时发出的声音就与正常时的声音不同,这种异常也就能被发现。为了发现矿山、岩土中的坑道、隧道等掘进后的浮石,和铁道员一样,用锤子敲打岩壁可进行浮石崩落灾害的预报预防,这也是声波探伤法的一种。原来这种只停留在浮石探查水平的技术,随着计算机技术的进步,现在正在向地层、岩体中的断层的变化的 2、3 维的图像化技术——地层层析技术方向发展,并且在 AE 技术中得到应用,开发了根据 AE 测量反演材料的劣化程度的 AE 层析技术,可见 AE 技术与超声波探伤技术可以互相补充、互相完善。

1.2 AE 的历史

现在 AE 已被广泛地解释,并且在众多的领域中应用,因此要想论述 AE 的起源很困难。下面就学习 AE 时出现的几个用语来试着追溯 AE 的起源。

虽然人们不清楚发现“锡鸣”的具体时间^[8],但使用锡本身非常久远。锡与铜的合金青铜已有数千年历史。根据三岛的《100 万人的金属学》^[9],中国早在 5000 年前的周代便有了相当于现在的 JIS 一样的标准。将青铜据其用途分成 6 种,即所谓“金的六齐”^[10]。其中之一的锡鼎(铜铎)中锡的含量为 14 (w/o)。日本的钟中,锡的含量在 10 (w/o) 以上的不多。西洋的钟中锡的含量较多,为 20~25 (w/o),因此质硬、声音高,且脆易碎。日本的钟很少听说有裂的,而西洋的钟正如邮票里都有的那样,如美国自由钟就有裂纹。锡鸣在实验室里就可以很简单的听到,所以人们推定从青铜发达那个时候就已经被知道了。

虽然房屋有时会吱吱嘎嘎作响的现象似乎很早以前就被知道,但是积极地使用外力使木板弯曲,考虑到摩擦、声音而制作的走廊却是在江户时代的初期才有的事。

据中国后汉书记载,张衡发明的可以报知地球中哪个方向发生了 AE (地震)的地动仪是在 132 年(后汉阳嘉元年)。进而,地震一词最初出现在日本历史书《地震》中是公元 419 年(允恭 5 年)。但是,作为研究,是从明治初期为了追赶欧美的技术雇用了很多外国教师的时代开始的。他们来到日本感到最惊奇的事情是在本国很少经历的地震在日本很多。1872 年(明治 5 年),外国教师 G. F. Verbeck 在光滑的大理石板上放置 4 个水晶球,又在其上面放上重板,想测量大地与板之间的相对运动。虽然因为摩擦力大而失败了,但这被称为日

本地震观测的第一次^[11]。

脆性材料裂纹的扩展速度与表面波之一的瑞雷波的传播速度有关。表明这种瑞雷波存在的理论虽然在 1885 年就已出现，但因为当时没有好的地震计，不能在记录上识别。德国 Gettingen 大学的 E. (威克特 Wiechert) 教授从 1900 年开始组装新的地震计，用了 2~3 年的时间，完成了威克特地震计的研究与组装，该地震计被设置在欧洲各地，能够清楚的识别第 1 波、第 2 波、长波，并分别命名为 *P* 波、*S* 波、*L* 波。到清楚地认定 *P* 波是纵波、*S* 波是横波、*L* 波是表面波时，又经过了数年。

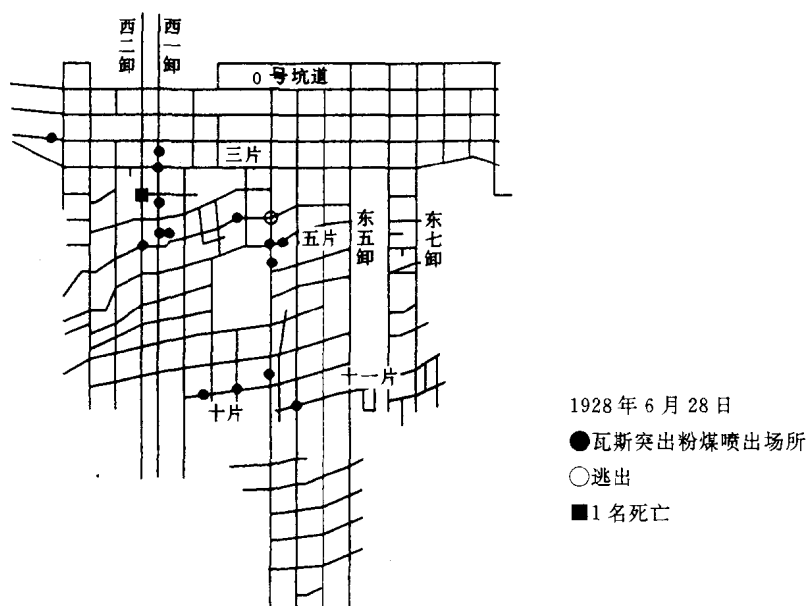


图 2 昭和初期瓦斯突出位置 (三井三池煤矿四山坑)

山体中的破坏虽然并未达到影响地球的程度，但是也有岩爆、瓦斯突出等现象的发生。人们也许还清楚记得最近的一次大规模瓦斯突出，即 1981 年（昭和 56 年）发生在北海道夕张新矿夺走了 93 人生命的事件。地下深部具有很大的地压，如果在地下掘进新坑道或采煤，岩体中的平衡就会被破坏，严重时就会发生岩爆、瓦斯突出。在突然爆发之前，有“山鸣”、“煤鸣”等前兆，这也是 AE。根据日本煤矿中的瓦斯突出灾害事故率的报告，如图 2 所示，最严重的一次是发生在 1926 年（大正 15 年）的三井三池煤矿四山坑的瓦斯突出^[13]。在那之前，曾认为在日本完全没有瓦斯突出现象。那次突出时，发出了“嗵”的“煤鸣”声，崩落下了 2~3t 的煤炭。1927 年（昭和 2 年）2 月 3 日坑道中央天井处发出很剧烈的煤鸣，采煤工逃出近 2 间（3.6m）的距离时，喷出了约 4t 的粉煤。幸运的是没有发生伤亡；同年 3 月 29 日，在发出像远处打雷和夹杂机关枪发射时的混杂声音的同时，大量的煤炭（粉煤）喷了出来，采矿中的 2 名采矿工被掩埋致死。这是瓦斯突爆造成的第 1 号事故。

瓦斯突出的前兆之一是，数日或数小时前频繁发生被称为“山鸣”的爆破般的振动和声音。虽然没用测量仪器，佐山在 1935 年提出了山鸣、瓦斯突出的对策^[14]，这种声音就是

现在的 AE。因此,1927 年 2 月 3 日死里逃生的采煤工用自己的耳朵——防爆型生物探头测量出了 AE,这也可认为是最初的灾害预测预防。

1932 年,美国克罗拉多矿业学院的 C. A. 海格兰 (Heiland) 考虑了如图 3 所示的地声探测器^[15]。在那之前的地音探测器是用耳朵来听铅、云母、镍等的薄膜振动的方式,据说用耳朵可听到 900m 远处用大锤打击岩石的声音。海格兰的新地音探测器是用反射镜的振动来转换声音的振动,属于光学地音测量方法。为了知道地音源位置,用 2 个地音探测器。

1936 年,福里斯特 (Forster) 用测量仪器测量了马氏体相变中的 AE^[16,17]。美国矿山局的 L. 奥贝特 (Obert) 用测量仪器测量了岩体内的 AE^[18,19]。从那时开始,真正的开始了有意识地测量伴随破坏的弹性波,但并没有被称为 AE,而是被称为具有各专业特征的属语,如应力波发生、微震活动等。

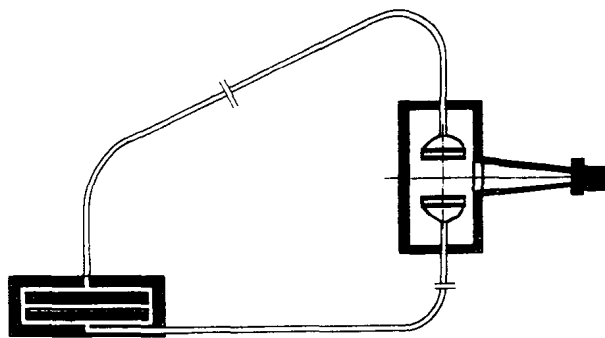


图 3 C. A. Heiland 提出的地音仪 (1932)

在现代 AE 技术中,1953 年繆汉工科大学的 V. J. 凯塞 (Kaiser)^[20]发表的关于金属在拉伸实验中发生的 AE 的论文占有重要的地位。不仅在金属领域,而且在岩石、混凝土等所有领域都有极大的影响。1958 年,佐佐木、山门参考了美国矿山局的奥贝特的结果,开始了关于岩石中破坏应力的研究^[21]。这是我国岩石中 AE 研究的开始。1959 年,鲁施在混凝土中检出了 AE^[22]。此后,关于矿山、混凝土领域的 AE 的论文也相继发表^[23~26]。茂木开始了根据岩石中发生的 AE 的举动来调查地震发生机理的研究^[27]。进而,随着 P. W. 布里德曼 (Bridgman)^[28]等发现了岩石在一个方向受压时破坏前的膨胀现象,扩容现象的研究也取得了进展。在这个领域因提出地震预测的扩容理论而著名的肖尔茨 (Scholz)^[29]在 60 年代活跃,直到如今。

1.3 AE 与地震

根据现在的世界地震观测台网,世界上任何地方发生的 5M 以上的地震度都可以进行震源定位。将震中位置表示在地图上以表示地震活动模样的图叫做地震图 (Seismicity Map)。图 4 为美国地质调查所编制的世界震中分布。可鲜明地看到太平洋周围的环太平洋地震带,从东南亚经中近东,穿过地中海的欧亚地震带。而且,可以从美国大陆和欧美大陆之间中的地震带了解以板块构造为代表的地球全体规模的运动。

如果对岩石试件施加外力,在达到破坏之前,内部将产生许多微小破坏,即发生 AE。肖尔茨获得了单轴压缩下的花岗岩的微小破坏的震源分布^[30],表明如果接近主破坏,那么