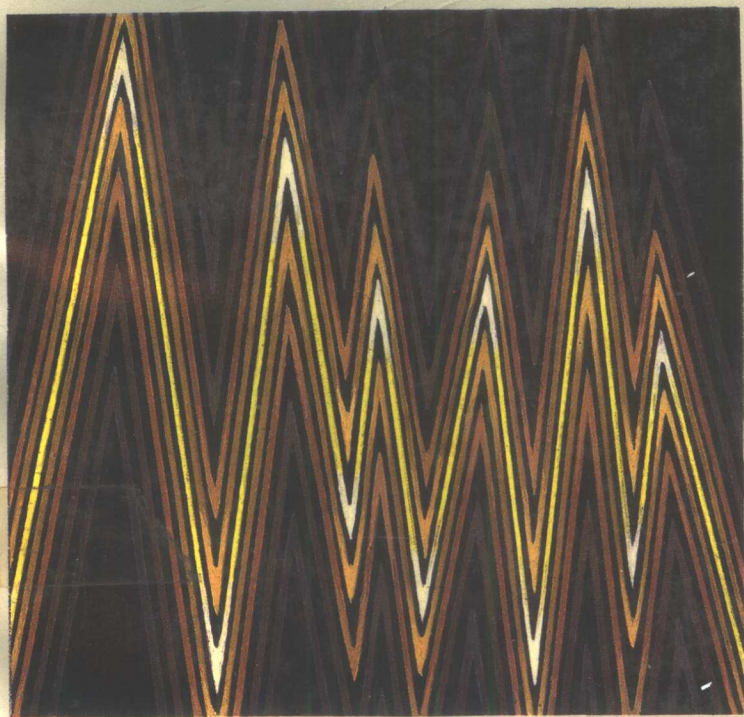


# 声发射技术基础

王祖荫 著



山东科学技术出版社

# 声发射技术基础

王祖荫 著

山东科学技术出版社

# 声发射技术基础

王祖荫 著

\*

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路)

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂德州厂印刷

\*

850×1168毫米32开本 4.25印张 87千字

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数 1—780

ISBN 7—5331—0617—2/G·94

定价 3.35 元

“泰山科技专著出版基金”顾问、评审  
委员会、编辑委员会

**顾 问** 宋木文 伍 杰 苗枫林

**评审委员会** (以姓氏笔画为序)

卢良恕 吴阶平 杨 乐 何祚庠  
罗沛霖 高景德 唐敖庆 蔡景峰  
戴念慈

**编辑委员会**

**主任委员** 杜秀明 石洪印

**副主任委员** 梁 衡 邓慧方 王为珍

**委 员** (以姓氏笔画为序)

邓慧方 王为珍 卢良恕 石洪印  
刘韶明 吴阶平 杨 乐 何祚庠  
杜秀明 罗沛霖 林凤瑞 唐敖庆  
高景德 梁 衡 梁柏龄 蔡景峰  
戴念慈

7935366

## 我们的希望（代序）

进行现代化建设必须依靠科学技术。作为科学技术载体的专著，正肩负着这一伟大的历史使命。科技专著面向社会，广泛传播科学技术知识，培养专业人才，推动科学技术进步，对促进我国现代化建设具有重大意义。它所产生的巨大社会效益和潜在的经济效益是难以估量的。

基于这种使命感，自1988年起，山东科学技术出版社设“泰山科技专著出版基金”，成立科技专著评审委员会，在国内广泛征求科技专著，每年补贴出版一批经评选的科技著作。这一创举已在社会上引起了很大反响。

但是，设基金补助科技专著出版毕竟是一件新生事物，也是出版事业的一项改革。它不仅需要在实践中不断总结经验，逐步予以完善；同时，也更需要社会上有关方面的大力扶植，以及学术界和广大读者的热情支持。

我们希望，通过这一工作，高水平的科技专著能够及早问世，充分显示它们的价值，发挥科学技术作为生产力的作用，不断推动社会主义现代化建设的发展。愿“基金”支持出版的著作如泰山一样，耸立于当代学术之林。

泰山科技专著评审委员会

1989年3月

# 前 言

目前，声发射技术已引起人们越来越多的注意。

1985年，我受重庆大学机械工程系原主任、机械工程研究所原所长江裕金副教授之托，为他所指导的课题——机械声学  
与机械失效预报——的研究生介绍声发射技术，目的在于使广大青年学生尤其是高等工院校机械类专业学生、研究生对声发射技术有一基本的了解。

学习声发射技术需要声学、超声学、力学，以及测试技术方面的基础知识。对于机械类专业学生而言，前两方面一般比较薄弱，可在学习过程中加以补充。

由于此稿原是以研究生为阅读对象的，所以注意基础性材料的选取，一些应用上的细节则予舍去；并详细列出了参考文献，而对于所征引的内容则不加评述。

遵照中华人民共和国国务院1984年12月27日发布的《关于在我国实行法定计量单位的命令》，本书使用中华人民共和国法定计量单位。法定计量单位未涉及的单位包括含有这些单位的合成单位，本书用文字表示。

在成书过程中，笔者除得到江裕金老师的帮助与支持外，还得到航空航天部621所袁振明高级工程师、大庆石油学院张宝琪副教授和四川空气分离设备厂林福舜总工程师以及其他一些同志的支持与帮助。谨在此表示最深切的谢意。

王 祖 荫



**王祖荫**，北京市人，  
1936年1月生。中国民主  
同盟盟员。1957年毕业于  
天津大学化工机械专业。  
以后在成都科技大学任  
教至1982年。现任四川轻  
化工学院机械系副教授、化  
工机械教研室主任。

# 目 录

绪 言	1
第一章 声发射的激发	7
§ 1—1 位错运动与塑性变形	8
§ 1—2 裂纹的形成和扩展	14
§ 1—3 断裂	20
§ 1—4 马氏体相变	27
§ 1—5 磁声发射	28
§ 1—6 声发射信号	29
第二章 弹性波理论入门	33
§ 2—1 弹性体基本方程	33
§ 2—2 膨胀波与切变波	36
§ 2—3 瑞利表面波	39
§ 2—4 Lamb波	43
§ 2—5 波的辐射	50
§ 2—6 声发射波的传播特点	54
第三章 声发射检测系统	56
§ 3—1 概述	56
§ 3—2 声发射测量参数	56
§ 3—3 声发射换能器	64
§ 3—4 声发射检测仪器	70
§ 3—5 空间滤波技术	80
§ 3—6 模拟声发射源	83



第四章 声发射技术的应用 .....	84
§ 4—1 概述 .....	84
§ 4—2 在材料性能检测中的应用 .....	87
§ 4—3 在压力容器方面的应用 .....	93
§ 4—4 在旋转机械监视中的应用 .....	104
§ 4—5 在泄漏检测中的应用 .....	107
§ 4—6 在工艺过程中的应用 .....	117
结束语 .....	118
参考文献 .....	119

# 绪 言

## 一、定义

近若干年来，“声发射”（Acoustic Emission, AE）这一术语已日益为人们所熟悉。

一般讲，声发射是材料受外力或内力作用而产生变形或断裂时，以弹性波的形式释放能量的现象〔1~3〕。但是，笔者认为，Liptai 等人的说法更有概括性。他们指出：

“Acoustic emission may be defined as the stress or pressure waves generated during dynamic processes in materials.”〔4〕

材料的塑性变形、材料中裂纹的发生与扩展、材料的断裂、金属的马氏体相变等都是这里所说的dynamic process（动态过程），其中均伴随着声发射现象。虽然声发射并不是这些动态过程中唯一的发射〔5〕，却是至今研究最多的发射现象。此外，可以认为，锡鸣（tin cry）和地震是人们很早就观察到的声发射现象。

这就是声发射的基本定义或严格定义。

注意不要只从字面出发，将一切发声现象都视为声发射。一般地说，声发射现象具有以下两个特征：

1. 声发射信号起源于材料内部，是局部发生的非稳定状态导致的瞬态事件。

2. 声发射信号具有较宽的频率范围，而其声级（level，过

去译为“音平”）却较低。

因此，在研究声发射时，就需要采用一些不同于研究一般声学现象的方法。

声发射也称为“应力波发射”（Stress Wave Emission, SWE），因为在物理学上微幅机械振动在介质中的传播称为“声”，所以，声发射与应力波发射这两个名词并无不同。有人将声频范围内的发射现象称为应力波发射，将超声频范围内的发射现象称为声发射〔6〕。显然，从声学理论的观点来看，这样的划分带有任意性。

近年来，随着声发射技术应用范围的拓宽，声发射的定义也得到扩展，已广泛地将诸如撞击、湍流、泄漏、喷注等过程在结构中诱发的应力波归入声发射中〔71, 72〕。这些过程的共同点是，应力波的激发并不伴随着结构材料性能的永久性变化，结构只起到波导的作用。此种应力波也被称为“二次声发射”（Secondary AE），过去则称为“声撞击”〔9〕。

## 二、历史与现状

人们对材料在断裂、变形、相变时的发声现象早已有所观察。但是，直到1950年才开始对岩石以外的材料的声发射进行系统的研究。

1953年，金属物理学家J. Kaiser完成了常用工程材料的声发射现象的首创性研究。他证实了在金属永久变形过程中伴随有声发射现象，且指出在此情况下的声发射是不可逆的（即Kaiser效应）。

继Kaiser之后，美国R.H. Schofield, C.A. Tatro, J.R. Frederick等人也对声发射进行了广泛的研究〔1〕。

大多数早期研究人员采用Kaiser所用频率范围进行研究，

即不超过60kHz，在此范围内需严格防止环境噪声的干扰。*H. L. Dunegan*等人将试验扩展到几百千赫和兆赫的范围，以有效地排除外界噪声的干扰。试验证明，使用高频同样可以得到令人满意的结果，从此便打开了声发射技术付诸实际应用的大门。

1964年，美国研制成功实用的声发射监测系统，并用于纤维增强塑料（FRP）制造的固体燃料火箭发动机壳体的水压试验。这是将声发射技术用于压力容器现场水压试验监测的第一个成功的例子。也是声发射从物理过程研究进入技术应用研究的开端。这一成功显示了声发射技术作为断裂力学研究手段和结构健全性评估工具的生命力，因而引起了材料科学工作者和工程界的广泛兴趣。

在声发射的研究和技术应用领域内，美国至今仍居世界领先地位。众多的学术组织给予这个领域以相当的重视。美国声学会（ASA）注意声发射的理论研究。美国机械工程师学会（ASME）在其制订的带有广泛权威性的《锅炉及压力容器规范》（Boiler and Pressure Vessel Code）中列有声发射检测的专门章节。美国材料试验学会（ASTM）举办了国际声发射会议并出版论文集。美国无损检测学会（ASNT）的刊物《材料评价》（Materials Evaluation）经常刊载有关声发射研究与应用的论文。1983年，由美国声发射工作组（AEWG）、欧洲声发射工作组（EWGAE）和美国增强塑料声发射委员会（CARP）共同主办的《声发射学报》（Journal of Acoustic Emission）正式出刊。美国国家标准局（The National Bureau of Standards）在声发射传感器的校准方面做了大量工作。1975年起，在美国宾夕法尼亚州立大学倡导与主持

下，举行了多次国际地质结构与材料声发射和微震活动 (Acoustic Emission/Microseismic Activity) 会议。此外，在声发射仪器，尤其是必须采用计算机辅助测试 (CAE) 技术的用于大型构件完整性评价的多通道声发射检测系统制造技术方面，美国一直居于世界领先地位。

进入70年代，日本开始在声发射技术的研究和应用领域内急起直追，目前已有与美国并驾齐驱之势。日本非破坏检查协会设有声发射 (006) 特别研究委员会。日本机械学会、日本高压协会、日本钢铁协会等对声发射领域也很重视。日本已制订了压力容器的声发射检测规范。国际声发射会议曾在日本举办过多次，在日本倡导下，成立了泛太平洋无损检测委员会 (PPCNDT)，并在1976年举行了首次会议，以后每两年举行一次。这个会议的报告中，涉及声发射者占一定比例。此外，日本在声发射仪器的制造技术上进展很快，不过与美国相比则还有差距。

欧洲各国如英、德、苏、波等对声发射技术也逐渐给予重视。EWGAE已经制订出几个有关声发射检测的一般性规范。

近年来，声发射的研究与应用越来越广泛，其涉及范围包括：

1. 声发射的源机理。例如，材料在断裂过程中，裂纹前沿非金属夹杂对声发射信号的影响，磁声发射，源的模拟等。

2. 波传播机理的研究与计算机模拟。

3. 检测系统方面，如传感器的校准技术，CAE技术的采用以及更加完善化，检测方法的标准化等。

4. 应用范围的扩展，如泄漏、金属切削刀具的磨损、旋转

件故障等的检测以及在地质、采矿部门中的应用等。

我国在声发射领域内的研究开始于70年代初。虽然起步并不算迟，但由于“文化大革命”的严重干扰，进展不够迅速。1978年成立了中国无损检测学会，下设声发射专业委员会。该委员会兼隶属于中国仪器仪表学会，挂靠单位是航空航天部621所和长春试验机研究所等。中国科学院沈阳金属研究所，机械电子工业部合肥通用机械研究所等在声发射领域内也进行了许多重要的研究工作。此外，还有一批高等院校在声发射领域内就不同课题（如断裂力学试验，金属材料、非金属材料及复合材料性能，压力容器完整性评价，磁声发射，地震波，金属切削过程监测及泄漏检测等）进行了试验研究。在国际性学术会议上以及国外出版物上，我国的声发射工作者发表了一批有水平的论文。在规范制订方面，我国提出了《金属构件加载过程中声发射检测方法》。为了检阅我国在声发射技术方面的进展，曾于1980年、1983年、1986年召开过三次全国声发射学术会议。此外，我国还制造出一系列声发射仪器（包括36通道声发射检测系统）。其主要研制者是长春试验机研究所和沈阳电子研究所。

我国的声发射技术研究开始于核工业部门，至今仍以国防工业为主。石油化工部门近年来很重视声发射技术的应用，燕山石化总公司、大庆石油学院在这方面做了不少工作。但总的来讲，发展是不平衡的。从地域分布来看，近年来国内所提出的声发射方面的论文，北方明显多于南方，且东部多于西部。

在仪器供应方面，一般的小型仪器，国内基本可以解决。在大型构件的完整性评价方面，主要还需依靠进口仪器。

### 三、发展前景

预计今后对声发射技术的研究将包括以下几个方面：

1. 材料声发射特性的研究。迄今为止，这是声发射研究领域中最引起最广泛兴趣的一个方面。各种材料在不同试验条件下表现出的声发射特性有很大差别。分析声发射信号有助于了解材料的内部状态，除了在断裂力学研究方面的应用以外，磁声发射、马氏体相变所引起的声发射将吸引人们更多的注意力。

2. 声发射技术用于结构完整性评价及失效预报已经取得不少成果，但在某些方面（例如桥梁结构）还有必要进一步开拓研究的深度与广度。在我国，尤其需要建立健全有关的规范。

3. 开拓新的应用领域的试验研究。在声发射技术的应用领域内，以断裂力学研究和压力容器完整性评价比较成熟。其他如泄漏检测、旋转机械监测和金属切削过程监测等都处在开发阶段，需要进一步地深入研究。

4. 进一步进行声发射信号分析技术、声发射波的传播等方面的研究。

5. 进一步采用先进技术，开发新型高效能的声发射检测仪器。

声发射技术是一项新兴的现代化检测技术，还处在边研究、边应用、边发展的过程中。它不仅包含丰富的应用技术内容，也包含艰深的科学理论内容。我们期望它在今后得到更大的发展。

## 第一章 声发射的激发

声发射的激发过程与机理极为复杂，至今还未被人们充分认识。一般认为，以下几种过程将产生严格定义上的声发射：

1. 金属材料中的位错运动与塑性变形；
2. 裂纹的形成、扩展及材料的断裂；
3. 马氏体相变；
4. 磁性效应。

为便于比较，下面给出由不同过程产生的声发射信号的相对幅值〔7〕：

位错运动 1~10；

相变 5~1000；

裂纹形成 20~1000。

更为具体地说〔75〕：材料在屈服时发生连续型声发射信号，其幅值甚小而发射率甚高，传感器所接收到的信号电压约为数微伏。在滑移线和塑性区边界上的位错雪崩及脆性夹杂物所导致的微断裂，可使传感器产生数十微伏的突发型信号。单个晶粒尺度上的相变、孪生和微观开裂也可产生同样数量级的信号或者更强一些。对于高脆性的材料，突发的宏观开裂（0.01~100mm）可产生数毫伏乃至数十伏的信号。



## § 1—1 位错运动与塑性变形

正如固体物理<sup>[8]</sup>所指出的，实际晶体并不像理想的那样完美无缺，而是存在着各式各样的缺陷，它们对于晶体的性能有着相当大的影响，当晶体内沿某一条线上附近的原子排列与完整晶格不同时就会形成线缺陷。位错就是这样一种缺陷。晶体中最简单的位错有刃型位错和螺型位错两种。

根据现代的塑性力学概念，塑性变形过程中位错的滑移起着决定性作用。按照这个概念所计算的临界剪切应力值与实验结果有相同的数量级。

计算表明，高速运动的位错产生高频率、低幅值的声发射信号，而低速运动的位错则产生低频率、高幅值的声发射信号。据估计，大约100个到1000个位错同时运动可产生仪器能检测到的连续型信号；几百个到几千个位错同时运动可产生突发型信号。

通常，稳定的晶体位错处于最低能态。在外力作用下，位错滑移需超过高能态的位垒才能达到相邻的下一个低能态。这时，晶格将释放弹性能，因而在材料内部产生点阵振动波，这是位错运动产生声发射的基本机理。

显微裂纹 (micro crack) 的萌生与塑性变形有密切关系。显微裂纹虽不致显著影响材料的健全性，但在外力作用下有可能发展成为宏观裂纹 (macro crack)。这样的过程可以产生强烈的声发射信号。

孪生是金属变形的一种特殊方式，它以滑移面为镜面，以原子排列成镜面对称的方式进行变形。锡、镁、锌和钛等都以