

# 混凝土材料声发射技术研究综述

纪洪广<sup>1</sup> 裴广文<sup>2</sup> 单晓云<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(北京科技大学土木与环境工程学院 北京 100083)

<sup>2</sup>(河北开滦集团公司钱营煤矿 唐山 063009)

<sup>3</sup>(河北理工学院数理系 唐山 063009)

2001年3月15日收到

**摘要** 本文对混凝土材料声发射技术研究的历史、现状及涉及的领域进行了概括与总结。对混凝土材料声发射机理、声发射参数与力学参数间的关系、声发射在断裂力学中的应用、混凝土材料的凯塞效应与应用以及现代非线性理论和方法与声发射技术的结合等问题进行了评价与展望。

**关键词** 混凝土, 声发射, 综述

## Technique of acoustic emission for concrete material

JI Hongguang<sup>1</sup> PEI Guangwen<sup>2</sup> SHAN Xiaoyun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083)

<sup>2</sup>(Qianying-Mining of Kailuan Coal Group Corp, Tangshan 063009)

<sup>3</sup>(Hebei Institut of Technology, Tangshan 063009)

**Abstract** The history and present status of study on the Acoustic Emission (AE) technique of concrete are reviewed. The developments of research on the mechanism of AE in concrete, the relationships between AE signals and mechanical parameters, the application of AE to fracture mechanics, the Kaiser-effect and its applications, the cooperation of modern non-linear theories and methods and the AE technique are analysed and prospected.

**Key words** Concrete material, Acoustic Emission, Review

### 1 混凝土声发射技术研究的历史与现状

最早在工程材料方面对声发射进行研究的当属1941年的Obert和1942年的Hodgson, 他们不仅提出了声发射检测的基本思想, 而且研究了发现破裂点的定位技术, 并想据此确定岩石中的最大应力区。声发射技术用于混凝土

的无损检测则要晚一些。1959年, Rusch对混凝土受力后的声发射信号首次进行了研究, 并证实, 在混凝土材料中, 凯塞效应仅存在于极限应力的70-85%以下的范围内。1959年和1960年, L·Hermite报导了关于混凝土在变形过程中的噪音(即声发射)的研究成果。1965年Robinson研究了砂浆体及不同骨料掺量、不同骨料粒径时混凝土的声发射特征, 并

发现,产生自混凝土的声发射信号有两个主频率,即 2kHz 和 13-14kHz,这两个主频信号主要发生在混凝土的声速和泊松比发生改变的荷载水平。并指出,声发射检测与其他惯用方法相比有两个优点,一是实时和动态,二是对结构的影响小。

1970 年 Wells 制造了一个用来记录混凝土在变形状态下产生的声发射的仪器,利用该仪器可在 2-20kHz 的频率范围内“读”值。并用砂浆试块和混凝土试块进行了试验,成功记录下了检测到的噪音的波形。1970 年 Green 发表了当时较为全面的研究工作的结果,他用了 12 个  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  的混凝土试块,分 4 组采用不同的骨料(石灰石、砂岩及黑硅石),按照 ASTM 标准,对混凝土的抗压强度、弹性模量、泊松比和劈裂抗压强度等指标进行了声发射的实时监测。另外,还对一个用预应力混凝土制成的压力容器模型在顶部进行加载,并同时测出了声发射过程。最后指出,声发射技术可以用来对混凝土破坏的全过程实施监测。产生自混凝土内部的声发射信号是混凝土破坏的先兆。利用声发射的不可逆性可以确定结构以前所经受过的应力的的大小。此外,还用声发射定位技术指出了结构缺陷所在的位置。1988 年,日本学者 Enoki 和 Kisch 进一步发展了由 Aki 和 Richards 提出的定量声发射理论,使混凝土中的微裂纹的位置大小和方向完全能用张量来表征。并将反分析技术用于声发射源的特征的研究。

从大的方面讲,过去和现在对混凝土声发射技术的研究主要集中在四个方面<sup>[1-4]</sup>,即(1)对混凝土材料声发射基本属性的研究,其中包括配合比、水灰比、骨料特性、龄期、加载方式等对声发射行为的影响。(2)对混凝土中裂纹的产生、扩展的规律及混凝土的失稳模式同声发射间的关系的研究,包括混凝土材料的损伤机理、断裂机理及断裂预报等。(3)裂纹缺陷定位技术的研究。(4)凯塞效应的机理及其在混凝土材料中的应用的研究。而且这

四个方面的研究互为条件,相互促进。所取得的成果也是令人振奋的。在这方面,每年都有大量研究论文、论著发表,也有大量有关工程实践的报道。更为可喜的是,声发射技术已经逐渐成为工程技术领域中的一项常规的无损检测技术。尤其是近些年来,随着科技的发展,对混凝土声发射技术的研究也发展很快,这主要表现在,所使用的仪器设备测试能力不断增强,功能日趋完善,不仅开发出了为混凝土材料专用的实验室声发射仪器,而且开发出了供野外大型工程结构实行监测的专用仪器。在对混凝土的声发射研究内容方面也日趋深入,从单轴状态到三轴状态,从单因素分析到多因素分析,从材料现象的表述到材料本构关系的表达等。

### 1.1 混凝土材料声发射机理的研究

对混凝土受载后的声发射机理的研究一直是人们关注的热点问题之一。人们通过大量的实验研究发现,同其他材料的声发射机理一样,混凝土受载后声发射的产生,也主要是由于晶体的位错运动、晶体间的滑移、弹性和塑性变形、裂纹的产生和扩展以及摩擦作用等。但这种解释仅仅只是对混凝土中可能成为声发射源的几种因素的一般性描述,而没有触及到声发射信号(声发射参数)同材料的特性及力学过程间的关系,尤其是定量关系。有些研究者企图把地震学中的震源机制分析技术应用到声发射源的特征分析当中,通过对观测信号的反演分析来建立声发射源的特征量。但由于材料特征的复杂性,通过反演所得出的结论与实际相差甚远。因此,目前这项技术还只停留在理论分析阶段。因而对材料在变形和破坏过程中的声发射因何会表现出不同的特性不能给出较为理想的解释。文献[5]根据断裂力学中裂纹的开裂条件和扩展机理,对变形及裂纹开裂过程中声发射现象产生的机理进行了分析与探讨。但不过只是很初步的解释,实际情况则要复杂得多。

### 1.2 声发射参数与力学参数间的关系

声发射技术是理论落后于实践的少数学科之一,其主要原因就在于迄今尚没建立起力学参数同声发射参数间的关系,因而在实际应用上缺少理论依据。最利于声发射参数和力学参数沟通的是损伤力学的观点。因为根据损伤的概念,材料产生声发射本身就意味着损伤。文献 [6] 利用随机损伤理论从统计学的角度推导出了岩石的损伤参量同声发射参数间的关系,并获得单轴应力状态下岩石的本构方程。文献 [7]、[8] 和 [9] 分别对如何根据混凝土材料的声发射检测来评价材料的损伤程度以及如何根据声发射检测动态测定损伤因子等问题进行了探讨。但我们知道,声发射参数的获得同时与仪器的性能、人为的操作及材料的性能有关。因此,若欲建立损伤参量同声发射参数间的关系,必须同时将这众多因素考虑在内。这还有大量问题有待进一步研究。

### 1.3 声发射在断裂力学中的应用

断裂力学分析是以主裂纹为研究对象,从而建立起了开裂的判据和扩展的条件。而对于混凝土这类复合材料来说,因其内部含有许多不同性质的缺陷、裂纹及微观构造上的不均匀性,从而使得其在受载后的断裂破坏过程是一个由原生裂隙开裂到微裂纹扩展,最后出现宏观断裂的连续过程。因此,当采用断裂力学理论解决混凝土的断裂力学问题时,一个很重要的问题就是如何确定临界状态。大量实验证明,混凝土材料在断裂过程中的不同阶段,声发射信号的空间位置、信号强度等都会发生许多相应的变化,根据这些变化,可以较准确的判断此时此刻材料所处的状态和是否达到临界状态的“特征点”。文献 [10] 和 [11] 曾经对混凝土试块在拉伸和三点弯曲状态下声发射源的空间演化特性进行观测和分析。文献 [12] 和 [13] 就如何根据混凝土断裂过程中的声发射特征、构造特征函数、提取断裂临界状态的识别特征等问题进行了讨论。通过这方面的研究,有望为断裂力学在混凝土材料方面的应用提供新的实验依据,为混凝土材料破坏的声发射检测和预

报提供理论基础。

### 1.4 混凝土材料的凯塞效应

凯塞效应在混凝土中的机理及应用,一直是研究的一个中心问题。对此也存有不同的观点。Wells<sup>[14]</sup> 和 Rusch<sup>[15]</sup> 分别通过实验验证了混凝土中凯塞效应的存在。而 John Nielsen 和 D. F. Griffin<sup>[16]</sup> 则在经过大量实验研究后认为,凯塞效应并不能完全有效地显示混凝土的受力历史。尽管如此,有一点是肯定的,就是混凝土材料在一定应力水平以内才有凯塞效应存在,只是这个作为界限的应力水平不是固定不变的和确定的,因而才使得凯塞效应的应用受到怀疑。文献 [17] 通过实验,详细考察了不同应力水平时声发射的不可逆程度,发现混凝土材料声发射的凯塞效应不仅有应力界限,而且声发射的不可逆程度同时还与损伤程度有关。

### 1.5 混凝土材料的定位检测技术

声发射的定位检测技术是通过声发射信号的传播时间、传播速度特征的分析来确定声发射源位置的方法。由于声发射信号源与材料内部的变形以及断裂、损伤等力学行为的“变化”相对应,因此,声发射定位观测技术变成检测材料断裂和损伤,尤其是裂纹、损伤的演化的有效手段。在实验室中,利用声发射定位检测技术可以有效地“跟踪”材料内部裂纹地开裂及发展情况,进而对裂纹的形式进行动态的描述<sup>[10]</sup>。在工程中,利用声发射定位监测技术可以确定出结构中“弱面”的位置及其在荷载作用下的“表现”,进而判断结构在给定荷载下的可靠性。由于声发射的定位仅仅通过声发射信号的“有”或者“无”就能做到,故此,定位观测技术是非常可靠的。

## 2 关于混凝土材料声发射技术发展的分析、评价与展望

纵观声发射技术的发展历程,不管是对于混凝土材料,还是对于其它工程材料,有关声发

射技术的研究之所以进展缓慢,主要是由于:

(1) 由于声发射信号同时受到材料性能、形变特征、损伤繁衍等多种静态因素和动态因素的共同影响,而且这多种因素之间又相互牵扯、相互影响,因而也就决定了声发射信号最根本的特性就是它的非线性和随机性,包括检测设备的非线性、传播介质的非线性和作为声发射源的材料内部结构演化行为的非线性等等。所以,无论是对它的产生机制、传播机理的描述,还是物理力学特征、信息赋载特征的提取与分析,都没有相应的理论依据和有效的方式、方法,现有的基础理论,包括波动传播理论、时、频域信号分析技术,波形处理技术及参数处理技术等,都不能完全反映声发射信号的真实特性。这就使得在声发射参数同其它参数,比如材料性能参数、力学参数等之间关系的“解释”方面缺乏相应的理论依据和切实有效的技术手段。

(2) 声发射信号本身复杂多变,不同材料或同种材料在不同条件下所发出的信号特性相差很大,频率范围从次声、可听声到超声,振幅、波长等参数亦相差很大。另外,实际中所能测得的也只是声发射源所发出的纵波、横波以及它们传播至界面上的各种波形转换后的一系列波的总和。这就给信号的测试、记录、分析以及声发射信号中有效信息的提取造成很大困难。

(3) 在声发射参数方面,对声发射的表示方法尚没有统一的物理量。不同的研究者都是根据自己拥有的仪器、对自己感兴趣的参数进行测试与分析,在参数的取舍上存有很大的随意性,因而使得试验结果缺少可比性。

(4) 尽管随着微电子技术和计算机科学的发展,检测仪器、检测设备已有很大发展,包括信号采集、传输过程的数字化、多通道并行连续数据采集及实时处理等先进技术的应用等等。以人工智能技术为代表的模式识别技术、智能性模糊信息处理技术也已经开始被用于声发射信号的识别和处理。但声发射技术的关键

在于信息的捕捉和特征的识别。由于分析技术的落后,作为这种处理模型输入端的声发射信号特征如果只是经过简单统计处理而获得的一般性声发射参数,而在有效特征的提取方面没有大的突破的话,那么在对声发射信号的识别与处理方面就不能发挥应有的潜力。

所以,声发射技术一方面由于独具动态、实时、可测、方便等特点,应用范围正在越来越广泛。另一方面由于基础理论研究的滞后,使其应用和发展受到严重束缚。这就越来越迫切需要寻求新的理论依据、探求新的研究方法。

文献 [18], [19] 证明,声发射序列在时间和空间上的分布具有分形特征。文献 [20] 则证明,混凝土材料声发射序列在受力过程中的不同状态下也都具有明显的分形特征,而且声发射序列的分维数随着应力状态的变化而变化。文献 [21] 对混凝土材料断裂过程中声发射序列所包含的从微裂纹扩展到宏观断裂状态转变时的“突变”信息进行了分析。

所有这些工作虽然只是探索性的,但却标志着人们已经开始从与以往不同的角度去重新认识声发射这种特殊的物理现象,并将声发射技术的发展和变革寄希望于这种探索。

## 参 考 文 献

- 1 Feineis N. Anwendung der Schallemission analyse(SEA) als zerstörungsfreies Pruefverfahren fuer Beton, Dissertation TH Darmstadt(1982).
- 2 McCabe W M, Korner R M, Lord A E. ACI Journal, 1976, 73.
- 3 Jax P, Gaar H. *Glastechnik*, Berlin, 1977, 50(9).
- 4 Schickert G. Acoustic Emission Technique Applied to Tests with Concrete Cubes, 2nd International Rilem Symposium on “ew Development in Non-destructive Testing of Non-metallicMaterial”, Constanta, Rumaniem(1974).
- 5 纪洪广, 贾立宏, 李造鼎. 东北大学学报, 1995, 16(6).
- 6 唐春安, 徐小荷. 地震研究, 1990, (2): 204-213.
- 7 JI Hongguang, JIA lihong, LI Zaoding. *Chinese Journal of Acoustics*, 1996, 15(2).
- 8 纪洪广, 贾立宏, 李造鼎. 声学学报, 1996, (增刊), 25.
- 9 纪洪广, 张天森, 蔡美峰. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2).

- 10 Maji A K, Shah S P. *Experimental Mechanics*, 1988, **28**.
- 11 Nomura N, Mihashi H, Suzuki A. *The Japaness Society for NDI*, 1990.
- 12 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料声发射非线性特征研究概述, 中国第七届声发射会议, 1997. 10 北京怀柔.
- 13 纪洪广, 蔡美峰. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(2).
- 14 Wells D. *Nuclear Engineering and Design V*, 1970, (12).
- 15 Rusch H. *Zement-Kalk-Gips*, (Wiesbaden), 1959, **12**(1).
- 16 Nielsen J, Griffin D F. *J.of Testing and Evaluation*, 1977, **5**(6): 467-483.
- 17 纪洪广, 李造鼎. 应用声学, 1997, **16**(6): 30-33.
- 18 Takayuki Hirata. *Geophysics J.R.*, (Austr) 1987, **90**.
- 19 谢和平. 分形 — 岩石力学导论. 科学出版社. 1997.
- 20 纪洪广. 混凝土材料声发射技术研究与应, 东北大学博士学位论文(沈阳), 1996 年 11 月.
- 21 纪洪广, 贾立宏等. 声学学报, 1996, **21** (6).

~~~~~

(上接第 43 页)

频率选用 db15 小波进行分析) 将信号分解后再重构, 这样来分离出其中的高频信号, 即是我们进行诊断所需用的信号。从图中可以明显看出: 无论是正常工况(图 4), 还是失火工况(图 5), 声压信号用 db15 小波 5 层分解后再进行一层高频重构的系数, 基本反映了振动信号所包含的信息, 这样我们再利用成熟的振动诊断方法就可以成功地判断出柴油机的运行工况, 即失火故障。这说明利用声压信号进行故障诊断的有效性(图 4 中详细标出了各缸燃爆及进排气门在相位上的依次排列关系)。

#### 4 结论

从上述的实验结果和分析过程, 我们可以看出利用近场声压法可以定位并诊断出柴油机各缸的工况, 其具体过程可以从分为两步: 首先, 根据原始声压信号幅值大小粗略定位出各

缸所对应的信号。其次, 用小波分析技术对原始声压信号进行分析, 具体诊断各缸的工况。这样在以后利用声压信号进行故障诊断时, 只需根据一个声压信号就可以完全确定出柴油机各缸的工作状况, 使得我们在以后的测试中就可以不必再利用油压信号和振动信号来定位并分析各缸对应的信号。因此, 本方法较之以往的振动诊断法更加方便、快捷, 具有很好的实用和推广价值。

#### 参 考 文 献

- 1 郑治真, 张少芬. 瞬态谱估计理论及其应用: 地震出版社, 1993.
- 2 孙月明, 唐任仲. 机械振动学(测试与分析): 浙江大学出版社, 1991.
- 3 [澳] 诺顿 M P. 工程噪声和振动分析基础: 航空工业出版社, 1993.
- 4 杨玉致. 机械噪声测量和控制原理: 航空工业出版社, 1983.
- 5 赵松年, 熊小芸. 子波变换与子波分析: 电子工业出版社, 1996.