

图 1、2 分别给出三类玻璃在高压下声速的变化(统一选取在 0.5GPa 以内)。图 1 中三类玻璃的  $V_l$  都是随压力增加而增加,图 2 则表明碳玻璃、氧化物玻璃与金属玻璃的  $V_s$  有完全不同的压力依赖关系,前两类的  $V_s$  随压力增加而减小,金属玻璃的  $V_s$  却有正的压力系数。碳玻璃声速随压力的变化量比金属玻璃和氧化物玻璃大得多,约为氧化物玻璃的 10 倍。

非晶态结构中具有的某些程度的短程序和晶态的长程序在最近邻原子间的相互关系(如键长、键角)等方面有类似之处。制备碳玻璃的石墨晶体,每层中的 C-C 键是共价键叠加金属键,层间为范德瓦耳键,三种键型同时存在。根据碳玻璃在静水压和单轴压力超声实验<sup>[5]</sup>,得到二阶和三阶弹性常数,计算出表征原子振动非简谐性质的 Grüneisen 常数:  $\gamma_l = 1.25$  (对应纵向振动),  $\gamma_s = -0.27$  (对应横向振动), 平均的  $\gamma_{av} = 0.24$ 。  $\gamma_s$  为负,表明与横波相对应的振

动频率在高压下不断减小,是一种软模行为。实验中选用的窗口玻璃和水白玻璃主要成分是  $\text{SiO}_2$  (约含 72%), 这种氧化物玻璃主要靠共价键结合,由共价键组成的空旷网络结构其键角结构容易改变,在压力作用下会导致横波速度减小。而形成金属玻璃的合金至少由一种过渡金属和一种类金属元素构成,保持长程的金属键合,因此兼有金属的特征,除声速和弹性常数与金属相近外,声速的压力依赖关系也与金属材料相同,  $V_l$  和  $V_s$  都具有正的压力系数。

#### 参考文献

- 1 Gilman J J., J. Appl. Phys., 1975; 46(4): 1625
- 2 Papadakis E P., J. Acoust. Soc. Am., 1967; 42: 1045
- 3 Meskimin H J., J. Acoust. Soc. Am., 1961; 33: 12
- 4 Meskimin H J., Ultrasonic methods for measuring the mechanical properties of liquids and solids, Physical Acoustics (Part 1) (Mason WP, Eds.) New York, Academic Press, 1964
- 5 王积方,王汝菊. 高压物理学报, 1988; 2(1): 34

## 大气核爆炸次声波远距离传播和监测

谢金来 (中国科学院声学研究所,北京·100080)

谢照华 (中国科学院计算机网络信息中心,北京·100080)

### 1 引言

次声监测已被联合国列入全面核禁试条约的国际监测系统。次声波远距离传播和实时检测是众所周知和公认的一种非常有效、既经济又实用的方法。一套完善、可靠、实时的监测系统和及时发布公报能为现场核查提供依据。即最新的次声监测系统和先进的分析方法能有效地监督全球核试验。它可对大气层核爆炸,尤其是陆地上空的大气层爆炸进行检测和定位。此外,水声系统和次声系统的结合,对于发生在洋域上空的核爆炸可产生有益的协同作用。

在核禁试会议中,次声监测专家组提出国际次声监测系统<sup>[1]</sup>,包括探测系统的灵敏度为  $0.01\text{Pa}$ , 频响  $0.02 \sim 5\text{Hz}$ , 动态范围  $80\text{dB}$ ,  $300$  米长管抗干扰,  $4$  元电容微音器阵组成的台站,精密的网络设计,全球建  $60$  个次声台阵台站,几小时之内发出公告,定位精度为  $1$  千吨当量的爆炸在  $1000$  公里远处探测,定

声学技术

溯源方位偏差在  $100$  公里之内。数据处理与国际数据中心联网,提供次声信号到达时间、周期、幅度、视速度、相关系数、定位、三维动态谱、识别等信息。

1995 年 5 月 15 ~ 18 日在美国弗吉尼亚州的 Chantilly 召开核禁试监测学术国际会议,纷纷发表次声监测学术论文,力争为全球次声监测作贡献。如高空风对次声信号传播的影响;监测大气声重力波用宽频带压力传感器系统,  $3\text{dB}$ ,  $0.01 \sim 10\text{Hz}$ , 用于研究各种地球物理现象,如雪崩和灾害性天气产生的次声波,并形成实际应用;洛斯阿拉莫斯国家实验室用次声微音器阵探测地下核试验,1989 年中心转移到核不扩散监测,1995 年进入全面核禁试条约监测的研究;澳大利亚北部的腾南特克里克 Warramunga 有一高灵敏度的次声阵,作为非线性大气波动现象的扩充研究项目,强调次声技术开发用于全面核禁试条约核查系统;对流星观测核次声阵系统等。

反映了当今大气核爆炸次声监测的动向,包括:

- (1) 检测远距离核爆炸用次声传感器系统的频响,灵敏度和动态范围;
- (2) 次声信号的检测,到达时间,最大幅度和频率;
- (3) 次声信号的处理技术,相关分析,频谱分析,定位,识别;
- (4) 大气核爆炸次声波远距离传播特性。

在全面禁止核试验的今天,次声监测技术在联合国裁军谈判会议上倍受重视并意见一致。中、美、俄、英、法等国在进行方案论证时,各自阐明了次声研究成果和提出行之有效的监测方案。我所已建成一套独具特色的大气核爆炸次声监测系统<sup>[2]</sup>,并曾荣获中国电子学会,中国核学会与核探测技术分会授予96 优秀学术论文奖。在全球次声监测网中我国拥有2个次声站(北京,昆明)。

## 2 核爆炸次声传播特性

次声频率很低,低于1Hz的次声波,衰减小,在大气声道中(从地面到50公里高空)可以传播几千公里而没有明显的能量损失。有的甚至可绕地球数周后由灵敏的次声微音器检测到。源的声线在50公里高层与地面之间来回反射,波在相当冷的同温层花许多传播时间,所以地面声速平均为300米/秒。

频率更低的情况,地球的重力场影响声传播,特别影响相速。大幅度扰动波的传播有两种传播方式,其一,受重力惯性作用传播;其二,以大气的压缩特性传播。因此,我们称这些扰动波为声重力波。重力传播方式对声传播方式而言,它具有较高的波速和较长的周期(几分钟的量级),声传播方式,作远距离传播时,其周期的上限约为2分钟。因为大气密度是分层的,两种传播方式均出现频散。波速是波周期的函数。核爆炸声波具有这种特征,如图1所示,这是昆明次声阵接收到的大气核爆炸次声波,离爆心2200多公里,波周期先后分别为332s, 228s, 170s, 148s, 82s, 60s, 58s, 54s。是很典型的频散波列,它可提供识别之用。

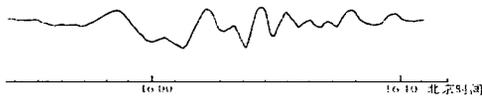


图1 大气核爆炸次声波

## 3 核爆炸远距离次声监测

图2是昆明次声站试验用正交直列阵,阵尺度

为40公里,其中部署11个接收设备。它对研究次声波传播规律、波的相干性、定位等有重要意义。

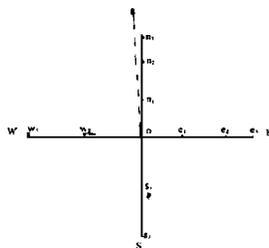


图2 昆明次声站试验用次声阵示意图

在地震学、海洋学、磁学和声学中,阵技术已经成功地应用于检测波动和跟踪他们的源。在确定声重力波水平视速度的第一步是计算阵中每对传感器信号的互相关函数。

### 3.1 相关计算求时差

$$C_{ij}(\tau) = \frac{[\int_{-T}^T P_i(t) \cdot P_j(t+\tau)] dt}{[\int_{-T}^T P_i^2(t) dt \cdot \int_{-T}^T P_j^2(t) dt]^{1/2}}$$

它是两个压力-时间序列  $P_i(t)$  和  $P_j(t)$  之间时延  $\tau$  的相干测量。积分时间  $2T$  要足够长,以致包含整个信号波列。互相关函数  $C_{ij}(\tau)$  最大时的  $\tau$  值提供计算相干波传播从传感器  $i$  到  $j$  的延迟。因此提供了在这个方向上的视速度。沿着阵的任何两臂的视速度给出到达波矢的估计。倘若阵尺度对所考虑的平面波阵面足够小时,对远距离源是可用的。

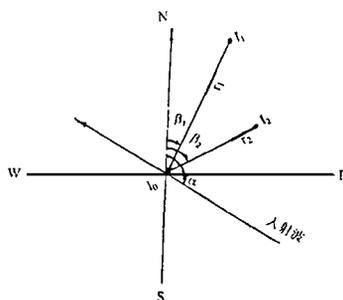


图3 三点阵定向示意图

### 3.2 方位角计算

由4个次声微音器组成的方阵可构造4个直角三角形。在这个阵中各测点的最佳间隔约为半波长。这给出的时滞对于精确计算波矢足够长,而对于避免4个波记录配比时的不明确性又足够短。这里取间距为1.5公里,可以很好地定出源的方向。图3是三点阵定向示意图。声信号入射方位角由下式给出。

$$\alpha = \arctan\{[(r_1/r_2)(\Delta t_2/\Delta t_1) - \cos(\beta_2 - \beta_1)]\}$$

$$/ \sin(\beta_2 - \beta_1) \} + \beta_1$$

### 3.3 爆心位置的计算

计算出阵的方位角后,利用两个以上阵的方位角交会出爆心的位置。计算机对皖南、昆明次声阵进行定位计算,测得爆心位置偏离实际爆心约  $0.7^\circ$ ;即偏离 70 多公里。

### 3.4 当量计算

(1)对大气中的爆炸,压力扰动幅度、周期等波形特征和当量之间建立了如下的近似理论关系<sup>[3]</sup>:

$$E = 13P_{FPT} [r_e \sin(r/r_e)]^{1/2} H_s (cT_{1,2})^{3/2}$$

其中  $E$  是能量释放,  $P_{FPT}$  是第一个峰到谷的压力幅度,  $r_e$  是地球半径,  $r$  是从爆炸点到观察点的大圈距离,  $H_s$  是低层大气的标高,  $c$  是声速,  $T_{1,2}$  是第一个峰到第二个峰之间的时间间隔。

(2)从简振波理论出发,根据实际条件作简化处理后,我们得到一个近似计算大气层低空核爆炸当量的公式:

$$Y_{KT} = 0.02 \times \overline{P_{p-p}} \times \overline{T} \times \frac{\overline{R}}{R}$$

其中  $Y_{KT}$  = 当量,单位千吨 TNT;  $\overline{P_{p-p}}$  = 测得次声波波列前三个波的声压(峰-峰值)的平均值,单位帕;  $\overline{T}$  = 相应声压的平均周期,单位秒;  $R$  = 爆心与测点之间大圆弧的距离,单位千公里。式中的  $\overline{P_{p-p}}$  值,在实用中,是取前六个半波作五次平均而得。这种取平均值的方法已证明较之取波列的第一个波的幅值

或最大值要优越得多,平均周期  $\overline{T}$  和信号谱的主周期是接近的。

公式的应用范围为  $R = 500 \sim 5000$  公里,爆高 =  $0 \sim 3$  公里。这和实际使用条件是大致符合的。

## 4 结 论

(1)定位精度 2 千公里偏离在 70 公里以内,比国际监测系统要求的 1 千公里偏离在 100 公里范围内更精确。

(2)计算当量时,经验公式比理论公式更实用,并把所有阵和单点记录都进行计算,然后取其平均值,其结果更接近实爆当量。

(3)昆明次声站的记录中,波频散现象是很明显的,因此可根据信号的频散图,波矢速度和频率结构从背景噪声中识别信号。

感谢:作者衷心感谢国家自然科学基金委数理科学部的资助,本文是核爆炸次声远距离传播特性研究项目的一部分。

### 参考文献

- 1 裁军谈判会议文件 CD/NTB/WP: 156(1994, 8, 6); 176(1994, 8, 24); 181(1994, 9, 6); 184(1994, 11, 30); 212(1995, 2, 13); 224(1995, 3, 16); 283(1995, 12, 15)
- 2 谢金来, 谢昭华. 第八届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 1996; 571 ~ 574
- 3 Posey J. W., Pierce A. D. Nature, 1971; 232: 253

## 反射超声无损测温<sup>①</sup>

于洪斌 王鸿樟

(上海交通大学, 生命科学技术学院, 生物医学工程系 · 200030)

### 1 引 言

近年加热治癌愈益受到重视。热疗(Hyperthermia)是使癌组织升温到  $43 \sim 46^\circ\text{C}$ , 保持适当时间, 以抑制癌肿, 达到治疗目的。热疗中测温和控温是关键。现今用热电偶作有损测温, 有导至癌转移可能, 影响热疗推广。高强度聚焦超声(HIFU)在不到几秒内使癌肿升温到  $70^\circ\text{C}$  以上, 也需作监测。反射式超声无损测温便于结合热疗应用。本文试图用波群分解处理回波超声以检测深部温度。

### 2 波群分解

对于任意信号  $f(x)$ , 可以得到展开式

$$f(x) = \sum_{k=1}^N a_k g_k(x) \quad (1)$$

其中非正交函数  $g_k(x)$  可以由正交函数展开为

$$g_k(x) = \sum_{i=1}^M b_{k,i} \phi_i(x) \quad (2)$$

并有  $\int \phi_i(x) \phi_j(x) dx = \delta_{ij}$  (3)

系数  $a_k$  有唯一解的条件是:  $g_k(x)$  必须线性无关

$$\left( \sum_{k=1}^N \lambda_k g_k(x) = 0 \right), \text{ 于是有 } f(x) = \sum_{i=1}^M c_i \phi_i(x) \quad (4)$$

① 本工作得到国家自然科学基金资助, 项目号: 39670216