

结构陶瓷材料的超声 无损检测

沈建中 (中国科学院声学研究所) (北京材料工艺研究所) 1992 年 5 月 15 日收到

结构陶瓷材料有着优异的热学和机械特性,然而对其无损检测提出了高难度的要求.本文综述了 应用超声方法对结构陶瓷无损检测的部分研究工作.并介绍了在对结构陶瓷超声无损检测中广泛应用 的甚高频超声检测方法和有关研究工作的发展动向.

一、引 言

结构陶瓷材料,例如热压烧结碳化硅 (Si₃N₄),碳化硅(SiC),塞隆(SiAlON)等,硬 度大、密度小,机械强度高、耐高温性能好。它 们在切削刀具,耐磨部件,高效率发动机等方面 的应用表现出极好的性能。美国政府自70年 代初就开始支持应用结构陶瓷于透平机的研究 工作,日本亦将结构陶瓷的研制开发列人于 1981年建立的"下世代产业基础技术研究开发 体制"。其它一些国家,如德,英、法等国也先后 开展起这方面的研究工作。我国的本项研究工 作起步较晚,大约开始于80年代的中后期。目 前,陶瓷透平机已用于火箭、航天飞机等高技术 领域。陶瓷发动机可以大辐度地节省燃料^{III}。

结构陶瓷材料是一种高脆性材料,加上其 弹性模量大,使之对微小缺陷十分敏感。同时, 它们通常工作在高温高压条件下,几十微米大 小的缺陷就有可能造成断裂。对于结构陶瓷的 无损检测,需要有极高的检测灵敏度。

对于结构陶瓷材料的无损检测的研究工作,在美国是与这类材料本身的研究工作同步进行的,在70年代初就得到高度重视,研究工作比较全面深入^[2-5]. 日本则在 81 年开始的 "下世代研究开发体制"中侧重于新材料制造方 法的研究开发.尽管目前日本在制造高温高强 度结构陶瓷方面已经达到世界最高水平,但他 们仍将提高无损检测技术的水平列为今后的开 发任务⁽⁶⁾.其它的一些国家,如德、英、法等国, 在结构陶瓷材料的无损检测方面的研究 工 作, 多数在侧重于建立、完 善 测 试 设 备 系 统 方 面^[7-9].德国近年来已开展起改进检测方法和 质量的深入一步的研究^[10].

检测结构陶瓷可以用许多传统的无损检测 方法. 比如用称量法来测知材料的平均密度; 用渗透染色法检测表面裂纹或表面缺陷;用聚 焦 x 射线法、x 射线 CT 和各种超声检测方法 检查材料内部缺陷等等. 各种方法互有长短. 综合使用多种检测方法,常可以改善检测效果 和提高检测可靠性. 当然,这要以增加费用和 时间为代价.

超声无损检测方法几乎可以检测结构陶瓷 中所有类型的缺陷,并且具有对缺陷定位、定量 的能力和检测可信度较高的特点,得到了较多 的重视。本文从下述几个方面评述有关的超声 无损检测研究: 1.陶瓷材料中缺陷种类、大小 与引起陶瓷材料、部件失效之间的关系;2.缺陷 的检出能力;3.无损检测方法;4.检测结果的可 靠性。此外,分析了当前结构陶瓷材料无损检 测研究的一些动向。

应用声学。

• 1 •

二、结构陶瓷材料的检测要求

研究陶瓷材料中的缺陷种类、性质以及它 们与材料失效之间的关系,确定了结构陶瓷无 损检测的对象和范围⁽¹¹⁾,是无损检测研究的先 行工作。

结构陶瓷材料在其制造、加工、运输及使用 过程中,会产生各种各样的缺陷。它们可分为 表面缺陷和内部缺陷两大类。制造陶瓷材料及 部件,一般要经过制粉、坯料成形,烧结、机械加 工等过程。表面缺陷主要在加工、运输和负荷 工作中产生,内部缺陷则主要在制造过程中产 生。缺陷的种类大致可分为:裂缝、气泡、结 块、夹杂、针状大晶粒、疏松多孔体等。它们又 可分为离散型缺陷和分布型缺陷两大类。

缺陷的潜在危险性与缺陷的种类、大小、取 向和位置等密切相关。大量的破坏性统计试验 表明,分布型缺陷例如疏松多孔,会大大降低材 料所能承受的应力。 对于致密的结构陶 瓷 材 料,气泡、裂缝及针状大晶粒等缺陷是导致其失 效的主要原因。在高温状态下,金属夹杂的危 险性急剧增长^[12]。

结构陶瓷具有高脆性和很大的杨氏 模量, 从而可产生很大的内应力,使之对微小缺陷十 分敏感。图1示出了引起氮化硅陶瓷断裂的缺 陷大小,即临界尺寸,与缺陷的种类以及外加的 应力强度之间的关系^[13]。由图1可见,表面裂 缝,气泡,硅、碳夹杂的临界尺寸较小。在典型 设计应力下,为保证安全,这些缺陷的允许大小 仅在几十微米的量级。

由于应力集中效应,缺陷产生的应力大小 还与缺陷的位置、取向及几何形状等因素有关。 图 1 中示出了气泡型缺陷所产生应力的典型变 动范围。

因此,对于结构陶瓷,有很高的无损检测要 求.不仅要求能检测出线度在 10—100 μm 量 级的缺陷,还要求确定它们的位置、形状和分 布.并且希望达到几毫米(比如 5—10mm)的 检测深度.当然,检测结果还必须有足够的可

• 2 •



靠性.

三、陶瓷材料中缺陷的检出能力

结构陶瓷的检测需要达到极高的检测灵敏 度,自然也需要极高的检测分辨力。对缺陷的 检出能力的研究是对结构陶瓷无损检测的理论 基础和实验基础。

首先,对缺陷的检出能力与被检测对象自 身的物理、几何性质有关.比如,1.母材料的性 质,2.母材料的微结构,3.缺陷的种类和性质, 4.缺陷的位置、大小、形状,5.被检样品的表面 形状、光洁度等因素,都与缺陷的可检出性有着 密切的关系。

其次,对缺陷的检出能力与所用的检测方 法和原理有关.不同方法往往利用被检对象的 不同的物理性质,因而有着不同的检出缺陷的 能力.

每种检测设备的实际检出能力还与其它许 多因素有关.比如电子线路和机械结构质量的 优劣会极大地影响无损检测所达到的指标.表 1是一些作者使用超声方法获得的对结构陶瓷 的检测结果.目前,使用超声显微镜已可检测 出 20μm 大小的内部缺陷,最大检测深度可达 8mm 以上.对于表面或表面检测,可以检测 出 2μm 或更小一些的缺陷.

11 卷 6 期

作者	时间	检測灵敏 度 (µm)	检测深度 (mm)
A. Dussoulier 等 ^[14] (美)	1986	30—50	8
B. Nongaillard 等[*](法)	1986	100	5
S. Pangraz 等 ^[21] (徳)	1989	30	3

表1 文献报道的超声检测水平

表 2 几种材料的声速和声阻抗率

	纵波波速 m/s	横波波速 血/8	纵波声阻抗 率・10 ⁶ kg/ m ² s	横波声阻抗 率・10 ⁶ kg/ ^{血's}
氮化硅 (熱压烧结)	10500	5980	35.0	19.9
碳化硅 (热压烧结)	12250	7700	38.5	24.2
塞隆 (SiA1ON)	10530	600 0	33.7	19.2
钢	5810	3100	45.3	24.2

在超声检测中,材料的声学性质是至关重 要的.表 2 列出了氮化硅陶瓷、碳化硅陶瓷的声 速和声阻抗率与钢材的声学性质的对比¹¹⁴。由 于陶瓷材料的刚度大而密度小,它们一般都有 很大的声速。其纵波声速约为普通钢材中纵波 声速的两倍,从而在同样的工作频率下,陶瓷 中的声波长也是钢材中的两倍。当频率为 100 MHz 时,碳化硅陶瓷中的纵波波长约 为 120 µm,这仍比所要求达到的检测灵敏度几十微米 大很多.这给用超声方法检测结构陶瓷带来较 大的困难,并决定了必须使用较高的工作频率. 此外,为保证有较高的检测灵敏度和分辨力,往 往使用各种扫描显微成象技术.

超声在介质中的衰减是影响超声检测的另一个重要因素。声衰减随频率的增加而增加。 在结构陶瓷材料中超声衰减主要包括材料对超 声的吸收和陶瓷晶粒对超声的散射。 幸运的 是,对于致密的结构陶瓷,它们对超声的吸收和 散射都不大。对于致密的热压烧结氮化硅或热 压烧结碳化硅,工作频率直到 400MHz,其晶粒 对超声的散射仍是很小的^[3]。但对于疏松多孔 的陶瓷或晶粒很大(几微米以上)的陶瓷,微气 孔造成很强的声吸收,气孔或晶粒的散射会产 生背景噪声,降低对缺陷的检测能力.

然而,在超声测量中,通常用水作耦合介 质。水对高频超声有很强的吸收。图2是蒸馏 水对超声的吸收与声程及频率的关系^[15]。在高 频段,声吸收系数随频率的平方而增加。在 100MHz时,蒸馏水的吸声系数可达 2.2 dB/ mm^[16]。因此,在结构陶瓷的超声检测中,应尽 量缩短在水中的声程。对于宽频带的声信号, 水对不同频率的声吸收不同还会造成信号频谱 向低频方向偏移,影响缺陷特征频谱的测量。

缺陷对超声的散射强度亦与频率有关.许 多超声检测方法直接或简接地利用缺陷对超声 的散射特性.图3示出在氮化硅陶瓷中球形气 孔散射功率与频率的关系^[17].由图可见,100 MHz 左右的工作频率对检测 10 µm 以上的气 孔是较为适宜的.孔越大,工作频率可以越低.

不同种类的缺陷有 不 同 的 散 射 频 谱 曲 线^{u71}。然而,由于缺陷的形状、大小、种类均未 知,由散射频谱来确定缺陷的种类大小还有一







定困难.

各种具体的超声检测方法对检测能力的影 响将在下节中阐述。由于上面分析到的原因, 各种方法中都采用了较高的工作频率。一般来 说,对检测体内缺陷,采用几十到一百兆赫左 右;对检测表面及亚表面的缺陷,工作频率可高 达三百至四百兆赫。对于结构陶瓷超声检测的 需求,促进了高频超声检测技术的发展。

四、结构陶瓷材料的无损检测方法

对结构陶瓷的无损检测,包括对坯料和烧 结后的样品或构件的检测。对于陶瓷坯料的无 损检测,也十分有意义,但目前尚未找到合适的 超声检测方法。这里,我们只讨论已烧制成的 结构材料的无损检测。

文献[18—20,14,7,16] 等对多种可用于 检测结构陶瓷的方法作了比较. 有些方法的综 合比较见表 3.

许多常用的无损检测方法,可以直接或经 过改进用于检测结构陶瓷.测定陶瓷平均孔隙 率(致密度)的最简单的方法是用称量法测量材 料的相对密度.孔隙率分为总孔隙率和开口孔 隙率两种.对于孔隙率太大的材料,作进一步 的无损检测的意义就不大了.

对于有严重损害的陶瓷部件的表面 缺 陷,可用渗透染色法检测。该方法的优点是可以检 测外形复杂的部件,其缺点是灵敏度不高和有 残留染料。它很难检出小于 300 µm 的缺陷。

检测结构陶瓷最常用的方法有微焦点 X 射 线成像或 CT 成像和各种超声显微检测方法. 在 POD/CL (检出概率/可信度水平,详见下 节)==0.90/0.95 时,对于内部气孔,微焦点 X 射 线技术的检测灵敏度约为样品厚度 的 0.6%— 2%,因而较适用于检测薄工件. X 射线 CT 可 以提高检测灵敏度很多,且可对缺陷定量和定 位,但检测速度慢而且费用高.

X射线技术可以检测陶瓷坯料,这是它的特出优点.运用X射线微焦点检测,可以监视结构陶瓷生产工艺的全过程.这对于优化陶瓷

• 4 •

的生产工艺是十分有用的。

超声方法几乎可以检测已烧结的结构陶瓷 中所有类型的缺陷,包括内部缺陷和表面缺陷。 检测结构陶瓷有许多不同的方法,各自有着特 定的应用范围和检测能力. 各种现役的方法 中,都采用几十兆赫到几百兆赫的较高的工作 频率,有着很高的检测灵敏度和分辨力.而且, 几乎无一例外地应用了现代的计算机控制和数 据处理技术.并且,绝大多数采用了显微成像 的方法.

较常见的方法有超声C扫描,机械扫描超 声显微镜(SAM),激光扫描超声显微镜 (SLAM),激光超声显微镜(PAM),电子束超 声显微镜(SEAM)等方法. PAM 和 SEAM 有时统称为热声显微镜(TAM).

超声C扫描和 SAM 方法都应用一个聚焦 换能器产生和接收声波,并使声透镜相对于样 品作栅格式机械扫描,然后记录在时间取样闸 门中声回波信号的振幅和相应的空 间 位 置 坐 标,送进显示器以灰阶的方式或以伪彩色的方 式显示出图象。缺陷造成的声阻抗失配会导致 回波振幅的变化,因而在图象上缺陷被显示出 来.机械扫描、数据的采集、存贮和显示均由一 台计算机控制.

通常的C扫描工作频率较低,一 般 在 10 MHz 以下,因而检测分辨力和灵敏度都较低. 普通的机械扫描声显微镜 (SAM)的焦距较短, 并且扫描面积很小,一般水中焦距只有几毫米, 扫描面积只有几个平方毫米,因而检测深度很 小,检测速度也较慢.为检测结构陶瓷的内部 缺陷,声透镜的焦距常需达几十毫米.因此,结 构陶瓷的检测装置,是工作频率可为 20MHz— 200MHz 的显微C扫描.以下文中的 SAM 均 指这种显微C扫描装置.

SAM 的检测灵敏度和分辨率都 较高,可 以测较厚的结构陶瓷器件.其表面或亚表面的 检测分辨率可达 1-2 µm. 对 8mm 厚的陶瓷 样品,检测灵敏度可达 20 µm.此外, SAM 可 以检测具有弯曲表面的样品.声透镜的质量和 被测样品的表面粗糙度对 SAM 的检测质量有

11 卷 6 期

	分辨率 (μm)				
检测方法	裂缝	气 泡		应用与限制	
SAM (显微C扫描)	可测	20	20	横向分辨率高,可测曲面样品, 纵向分辨率低,灵敏度与检测深 度有关,一般不实时显示.	
SLAM	可测	25	25	薄片型简单形状的样品、工作 速度较 SAM 快几百倍、实时显示,可信度较 SAM 差.	
РАМ (ТАМ)	可冽	25	25	近表面、小区域检测、受样品表 面化学性质、吸热性能影响较大	
SEAM (TAM)	1	10	10	分辨率较 PAM 高,其余同 PAM,表面常需要涂复其它材料	
微焦点X 射线	与取向有关	1-2%	0.5%	样品厚度越大、分辨率越低、取 决于对X射线吸收的差值、实时, 可测复杂形状和坯料	
 染色法	300			测量表面大缺陷、对表面有污染。	

表 3 几种检测方法的比较

很大影响。SAM 需要液体声耦合剂。 被检样 品愈厚 SAM 要求的水中声程也越长。而水对 高频超声的强吸收限制了检测深度和检测分辨 率的提高。

激光扫描声显微镜 (SLAM) 是应用高频 超声波 (比如 100MHz) 穿透样品,同时应用扫 描的聚焦激光束来检测样品由于声波穿透而引 起的表面的位移振幅和相位的分布,从而检测 出样品内部的缺陷. 因此 SLAM 只应用未聚 焦的平面声波,对样品的表面光洁度要求极高. 由于利用激光束扫描,其工作速度较快,可达 SAM 的 300 倍^{LG}. SLAM 可实时显示而 SAM 则不能.SLAM 的 POD/CL 较 SAM 的低很多, 其检测灵敏度和可靠性较 SAM 低.SAM 能在 POD/CL = 0.90/0.95 的水平上检测氮化硅中 深度为 1mm、直径为 20 μm 的气孔. 要达到同 样的水平, SLAM 所检出的气孔直径要在 400 μm 以上^{LOI}.SLAM 较适用干检测薄片型材料。

热声显微镜 (TAM) 测量被检样品表面和 近表面热学性质的非均匀性。 TAM 分 PAM 和 SEAM 两种。 PAM 用一个强度受调制的 聚焦激光束在样品表面作栅格式扫描, 受激光 束照射的样品局部表面被周期性地 加 热 和 冷

却,由于热弹效应产生频率等于激光调制频率 的弹性波。SEAM 用聚焦电子束代替聚焦激光 束来产生热弹性波,热弹性波的接收可以有很 多方法,比如用聚焦微音器接收样品附近的空 气介质的振动,用贴在样品背面的压电换能器 接收,或者用激光束来检测样品表面的位移,或 者用红外光热计来测量样品表面的热发射[22]。 各种接收方法得到的结果是有所差别的。TAM 的检测能力主要取决于材料中的热穿透深度。 热穿透深度反比于激光强度的调制频率的平方 根,并正比于受检材料的热扩散系数的平方根. 在氮化硅、碳化硅陶瓷材料中,当调制频率为 30kHz 时, 热穿透深度约为 60 µm^[23]. 因此, TAM 适宜于材料的表面和亚表面检测。 检测 分辨率则主要取决于激光束焦斑的大小,可达 10µm 量级。随着检测深度的增加, TAM 检 测的可信度急速下降.

在上面各种超声检测方法中,对受检样品的表面光洁度的要求都较高.

五、无损检测的可靠性

传统的无损检测判断缺陷的有无以及缺陷

应用声学

的位置、大小和取向等。这些都是对单个缺陷 而言的指标。众所周知,对于许多检测样品,缺 陷的检出与否有一定的误报率和漏报率。这种 情形也出现在对陶瓷材料这类可能含有大量离 散的或分布的缺陷的材料的检测中。因此,引 人"检出概率/可信度(POD/CL)"的评价指标, 从统计学的观点来评价检测质量。设N为缺陷 的总数,s 是实际检测到的缺陷数, P_L 是检出 概率 G 为检测结果的可信度,根据统计理论, 它们之间有关系^[19]

$$1 - G = \sum_{x=1}^{N} \frac{N!}{x!(N-x)!} P_{L}^{x} (1 - P_{L})^{N-x}$$

因此,检测灵敏度、分辨率、检测深度等都应该 理解为在确定的可信度标准和检测概率意义上 的参量。上式可由指定的检测可信度和实际的 检测结果来估算出概率,也可由事先指定的检 出概率和可信度来确定需要达到的实际缺陷检 出率。对于 POD/CL = 0.90/0.95 的检测要 求,即希望达到在 95% 的可信度上,检测结果 具有 90% 的检出概率,实际的缺陷检出率必须 高于 95%。这种检测要求是很高的. POD/ CL = 0.90/0.95 也可以理解为有 5% 的可能性 对 90% 的检出概率估计过高.

六、结构陶瓷超声无损检测 的一些动向

国外预测,结构陶瓷在 90 年代的市场,可 望以年递增率 18.1%的速度增长。到 2000 年, 其市场可达 18 亿美元,占精细陶 瓷 市 场 的 20%^[24]。目前,对结构陶瓷材料的无损检测技 术还不很成熟,开发及完善对于结构陶瓷的无 损检测技术,不仅对结构陶瓷的开发和应用,而 且对于其它精细陶瓷材料以及陶瓷基复合材料 的开发和应用都有着重要的意义。

为了提高超声方法的检测能力,我们认为 大致可从以下几个方面去努力.

 1.寻找较好的检测原理和方法和对超声成 像方法新原理的研究。例如,寻找和选用对缺 陷最敏感的参数作检测判据的特征扫描成像方 法(F 扫描).

2. 目前来说,显微C扫描技术(SAM)在陶 瓷无损检测中应用最广。研究高性能的聚焦探 头:长焦距、细长焦束,可变焦,低插入损耗等 要求,是改进本方法的关键之一。 最早的甚高 频探头用压电单晶作振子。现在、美国、德国等 用高分子压电材料 PVDF 制作了频率达 80 MHz-100MHz 的聚焦探头。 探头结构方面 的改进也还有较大的潜力。

3. 借用现代信息处理技术,是十分有前途的研究工作.有人曾试用编码激励的方式来代替通常的尖脉冲激励方以提高检测信噪比;试用傅氏变换综合孔径超声成像技术(FT-SAFT)来提高检测灵敏度等.时域频域综合分析技术可望改进对结构陶瓷的检测性能.这方面的研究依赖于现代高速模数变换技术和计算机技术的开发.

4. 开展电子计算机的应用研究. 移植通用的信号处理和图像处理方面的大量研究成果, 使超声检测的结果更加直观和规范化.

此外,研制配用高质量的电子线路系统和 高性能的精密机械系统也是提高超声方法检测 能力的必不可少的手段。总之,利用现有材料 科学中和超声学中的最新技术和成就,是开发 结构陶瓷无损检测技术的必要手段。

参考文献

- [1] Dave Carruthers and Jim Wimmer. Aerospace America, May (1988), 22-26.
- [2] AD-A033004, A. G. Evans and B. R. Tittmann.
- [3] AD-A060785, A. G. Evans.
- [4] AD-A043959, T. Derkacs, I. M. Matay and W. D. Brentnall.
- [5] AD-A059063, H. R. Baumgartner, R. H. Brockelman and P. M. Hanson.
- [6] 文兰、高技术新材料快报,105(1992),1-4,编译自《工 业材料»3-2(1991).
- [7] A. Erhard, J. Goebbels, E. Nabel and M. Hentschel, Ceram. Forum. Int. 65-1, 2(1988), 16-22, and 65-3, 4(1988), 87-90.
- [8] A. K. Som and L. J. Bond, Non-Destructive Testing (Proc. 12th World Conference) 1989, 1661-1666.
- [9] B. Nongaillard, P. Logette, J. M. Rouvaen, H. Saisse and H. Fevrier. NDT International. 19-2(1986), 77-82.

11卷6期

• 6 •

- [10] U. Netzelmann, R. Herzer, H. Stolz and W. Arnold, Abstracts of 19th International Symposium on Aconustical Imaging, NT 1.3, 1991.
- [11] AD-A078234, R. W. Rice and J. J. Mccholsky.
- [12] W. A. Sanders and G. Y. Baaklini, 10th Ceramic Engineerings and Sciences Proceedings, 1986, 839-859.
- [13] A. G. Evans, Proceedings of the first China-US Seminar on Microsturctures and Properties of Ceramic Materials, 1987, 236-251.
- [14] A. Dussoulier, J. Desmaison and M. Meurtin, Journal De Physique, 47-2(1986), c1-623-628.
- [15] A. Erhard and B. Rotter, 中国和德国的材料无损检测, 1990, 98-117.
- [16] L. W. Kessler, IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, SU-32-2(1985), 136-138.
- [17] A. G. Evans, Proceedings of the Workshop on Cera-

mics for Advanced Heat Engines, 1977, 268–277. [18] O. R. Gericke, Fracture Mechnics of Ceramics, Vol.

- 1977, 117-160.
 A. Vary, Structural Ceramics. Proceedings of a Workshop Sponsored by NASA Lewis Research Center, 1986, 35-46.
- [20] G. Y. Baaklini, S. J. Klima and W. A. Sanders, Lewis Structures Technology, Vol. 3, 1988, 123-133.
- [21] S. Pangraz and W. Arnold, Third Course on Ultrasonic Singnal Processing, 451-461.
- [22] G. Busse, IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, SU-32-2(1985), 355-364.
- [23] B. Hoffmann and W. Arnold, 12th World Conference of Non-Destructive Testing, 1989, 1573-1578.
- [24] 羽卒,高技术新材料快报,89(1991),4,摘自《日经新 料»,92(1991).



激光超声中首达纵波脉冲的一种新解释

当脉冲激光辐射到样品物体上时,会产生脉冲超 声波(包括体波和表面波). 利用脉冲激光作为激励 源,可避免与样品的机械接触,可对样品实行远距离的 非接触式无损检测.

传统的光声理论利用了经典热弹耦合方程(CTE) 该理论假设热扩散的速度为无限大,它的热传导方程 是一个抛物型方程。人们利用这个方程在解释实验上 所观察到的光激超声的首达纵波脉冲(precursor)现象 时,认为这是由于光穿透及热扩散所产生的有限大小 热源导致的结果。

最近几年,A. McDonald 采用了一种较全面的光 激超声的理论,它是基于广义热弹理论(GEE)。该理 论考虑到热波的传播速度是有限的这一事实,引入热 波的相速度 C_T (一般接近于纵波相速度),将热传导方 程写成一个双曲型的方程。通过结合位移势的波动方 程,在给定边界条件下通过应用 Hankel-Laplace 积分 变换,可解出超声波在变换域的位移场,然后利用数值 反演技术,将位移场反演到时空域中来. McDonald 采 用 GEE 理论,对首达纵波脉冲作了新的解释.

作为物理说明, McDonald 求解了埋藏于表面下

2.6处的脉冲点热源在半无限空间中 = 轴上任一点所产 生轴向位移.这个解的各项物理意义清晰:它包括直 达声波项和表面反射声波项、直达热波项和表面反射 热波项、由表面边界上模式转换而产生的项(纵波项和 横波项),更包括由边界上热-声横式转换而产生的项 (纵波项和横波项).当热源处于表面时(z。=0),直 达声波项与表面反射声波项抵消,但直达热波项和表 面反射热波项并不相互抵消,只是由于它们衰减得较 快,故一般不考虑它们的贡献.值得注意的是,由边界 上热-声模式转换而产生的项数值较大;但若点热源离 开表面,它们将迅速衰减.

为了解释首达纵波脉冲的实验 结 果, McDonald 研究了强度呈高斯分布,有一定脉冲宽度的表面热源 所产生的位移场. 结果表明,考虑了边界上热-声模 式转换而产生的位移波形图与实验所测结果吻合得较 好. McDonald 认为,光激超声的首达纵波脉冲主要 是因表面边界上热-声模式转换而产生的.

(张鹏智摘译自Appl.Phys.Lett.,54-16(1989), 1504—1506; J.NDE, 9-4(1990);223—228.)

应用声学

• 7 •