



综合介绍 声纤技术的发展及其应用*

尹爱国 陈守六

(中国科学院声学研究所)

1990年1月16日收到

本文综述了声纤技术作为一门新学科的发展现状;并在理论上和应用上同光纤技术进行了比较。作者认为,作为声学波导和光纤技术的学科结合,声纤技术不仅有许多研究,应用价值,而且是很潜力的传感手段。尤其在材料的自动监测,无损探伤等方面将有广阔的应用前景。

一、引言

历史上对声学波导的研究着重于各种声波导的结构,特性及其弹性波传播等理论性分析,属于声学范畴,未涉及声波导作为传感、监测等手段的应用研究。

随着光纤技术的兴起,尤其是光纤传感技术在各应用领域的迅速发展,人们自然对具有类似光纤结构的包层纤维声波导,即声纤的研究和应用产生兴趣。声波可以低损耗、低色散地传播于声纤中,其强度、相位、时间延时、分子位移极化取向等皆可随外界物理微扰作用而变化,此即声纤传感技术的机理。相应的,对声纤这种特殊声波导作进一步的理论探索亦是必然的。

本文在论述了声纤技术是声波导理论与光纤传感技术结合的基础上,较详细地讨论了声纤技术在传感、材料监测等众多领域应用的可能性及发展前景。

二、声纤波导的发展与现状

1. 声纤波导理论发展概况

早在1969年, Waldron^[1]通过对几种特殊应用声学

结构声波导的分析,总结了一般结构波导的特性。指出电磁波导中的电磁波与声学波导中的弹性波是不可比拟的,但它们皆有模式按位移函数的性质分类、模谱存在截止现象等类似特点。Waldron对图1中各种波导的研究表明: 1) 圆形棒波导中存在三个系列的导模 T_{pq} , F_{pq} , R_{pq} , 即扭转模,弯曲模,径-轴向模,其中 T_{00} 模具有零截止频率。2) 非均匀圆波导在 $\rho_2/\mu_2 < \rho_1/\mu_1$ 的充要条件下可传导声模 T_{0q} , F_{pq} , R_{0q} , 这里 $\rho_1, \mu_1, \rho_2, \mu_2$ 分别为声纤芯及包层的密度及切变模量, p, q 取整数。3) 圆形空腔波导中不存在声波的传导模式。

Jai-lue Lai^[2]在与Waldron同时期的报告中分析了包层棒的简谐波传播,从三维线性各向同性弹性理论得出了复合圆形棒中导模的频率方程,并在相应条件下分别简化为扭转模,弯曲模及径-轴向模的频率方程。Jai-lue Lai的分析表明,对包层棒中非轴对称运动,其径向、轴向、角向位移是相互耦合的;而轴对称运动却有非耦合的独立纵模,扭转模。

1978年, Thurston^[3]在综述报告“棒及包层棒中的弹性波”一文中,详尽地分析了包层棒中可能存在的声波模式,存在条件及特性。文章

* 国家自然科学基金资助项目

指出,包层棒中存在导模的必要条件为 $V_{s2} > V_{s1}$, V_{s2} , V_{s1} 分别为包层及纤芯的平面切变波速; T_{0q} , R_{0q} , F_{pq} 为包层棒中传输的主要有用模式,图二即为各导模按频率的分布。

上述研究结果给出了声纤的波导理论基础。但在六、七十年代,包层棒波导主要应用于超声延迟线,它具有信号与外界表面相隔离、低色散等优点,并且较大截面的包层棒亦可获得单频传输。Boyd^[4] 给出了熔融硅包层纤维延迟线的理论分析与实验结果,提出用制作光纤

件为

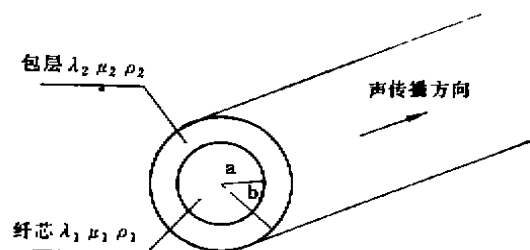
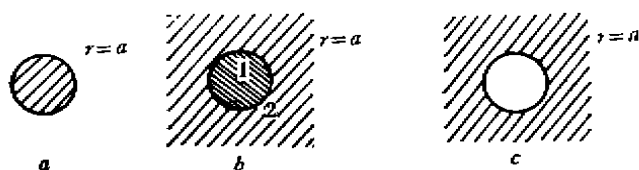


图3 声纤波导结构



a) 圆形棒波导 b) 非均匀圆波导 c) 圆形空腔波导
图1 声波导截面

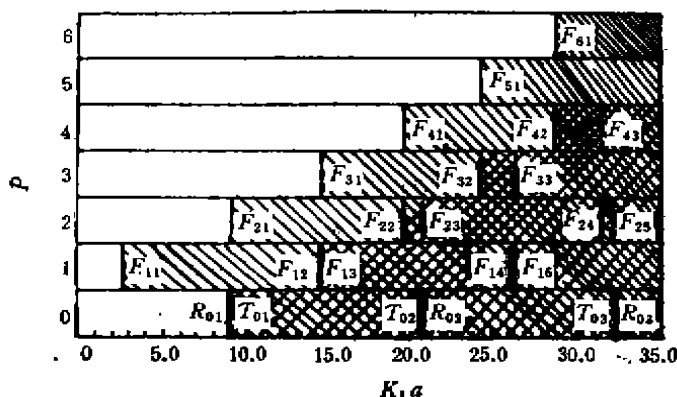


图2 导模按截止频率的排列

类似的技术来制作包层纤维声延迟线;用适当压电材料,适当极化方式制得的体波换能器粘接于纤维端面,即可激发或探测包层纤维中的特定声模。

2. 声纤波导与光纤维波导的异同处

近年来,光纤传感技术日趋成熟,促使了光纤状声波导(图3)在传感、监测等方面的应用研究。

因为弱波导光纤亦可用作弱波导声纤,就首先成为研究人员的考察重点。声纤的弱导条

$$\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \ll 1, \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1} \ll 1;$$

无限厚包层近似条件为 $b/a \geq 3$ 。在这些条件下,求解下面波动方程:

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{V_l^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{\psi} - \frac{1}{V_t^2} \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} = 0$$

我们即可得到弱导声纤中的扭转模(T),弯曲模(F)及径-轴向模(R),它们分别与光纤中横电场模(TE)混合模(HE, EH)及横磁场模(TM)相对应,其色散关系,截止条件亦对应相同,如图4所示。图中, n_1 , n_2 分别为光纤纤芯及包层的折射率, β 为传播常数, R_0 为真空中传播常数, a 为光纤的纤芯半径。图5表示对应声模与光模的位移与横向电场分布。上面波动方程中的 ψ , $\vec{\psi}$ 分别为标量势函数与矢量势函数。

弱导条件下,声纤中除横向导模外,还存在另一类模,即当满足 $\frac{V_{L2} - V_{L1}}{V_{L1}} \ll 1$ 时,它主

要是纵向的,记作 L_{nm} 。此模是泄漏模,其衰减特性跟纤芯与包层的切变声速差 ΔV_s 有关,而传输特性则与 ΔV_s 无关。此模在光纤中无对应模式。

正如 Jen^[5] 指出,无论在结构上,制作技术上,还是在导波传输特性上,声纤与光纤具有许多相同或相似之处;因而,现有的光纤理论和光

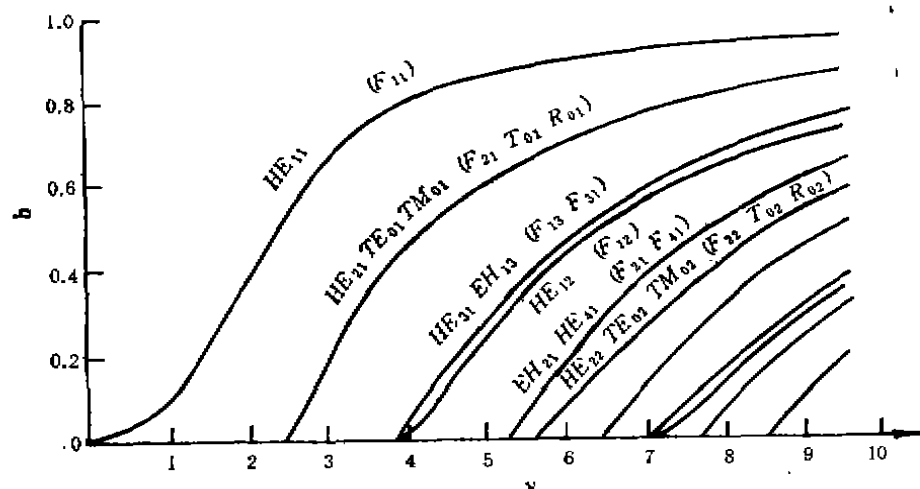


图4 声波导模色散曲线

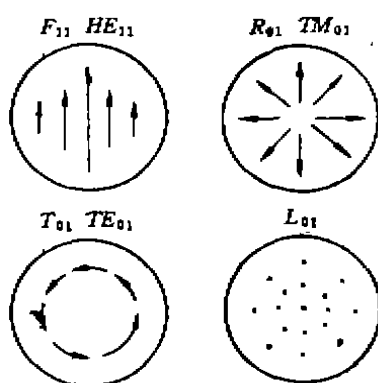


图5 位移及电场分布

纤传感技术,可供声纤技术的研究与应用借鉴。

三、声纤技术的应用

1. 几种典型的声纤传感技术

类似于光纤传感器^[4],图6表示了差分相位型声纤传感器示意图,传感臂置于压力,温度,应变等监测处,接收信号的相位因扰动发生变化。

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= \beta\Delta L + L\Delta\beta \\ &= \beta\Delta L + L\left(\frac{d\beta}{d\mu}\Delta\mu + \frac{d\beta}{d\lambda}\Delta\lambda\right. \\ &\quad \left.+ \frac{d\beta}{d\rho}\Delta\rho\right) + L\frac{d\beta}{da}\Delta a\end{aligned}$$

应用声学

此处, β 为传播常数, θ 为相位, L 为传感臂长度, a 为纤蕊直径, ρ 为密度, λ , μ 为拉姆常数。若有压力变化 ΔP , 由弹性理论, 得:

$$\Delta L = \epsilon_r L = -(1-2\sigma)L\Delta P/Y$$

$$\Delta a = \epsilon_r a = -(1-2\sigma)a\Delta P/Y$$

其中, σ , Y 分别为声纤材料的泊松比和杨氏模量。

强度型声纤传感器同光纤传感器一样, 可以有许多形式, 如微弯曲, 瞬衰场, 反射型等。图7给出以导波反射量来监测样品弹性特性的例子。图中左侧的 S 代表被测试样; 右侧的 S 代表传感器的敏感头, 当外界环境变化影响传感头的声阻抗变化时, 可通过声纤中的反射能量来检测。设反射能量与入射能量之比为:

$$P_r/P = \left(\frac{Z_F - Z_S}{Z_F + Z_S}\right)^2 = \left(\frac{\rho_F V_F - \rho_S V_S}{\rho_F V_F + \rho_S V_S}\right)^2$$

这里, P_r , P 分别为反射声功率与总的入射声功率, Z_F , Z_S 分别为声纤及试样 (或传感头) 的声阻抗。这样, 原则上即可由反射声功率的测量来估计被测试样的声阻抗特性。

传统的声学检测方法, 基于声波传播特性 (诸如频散, 衰减, 声速, 散射等) 与弹性介质的性质有关 (诸如弹性常数, 粘滞性, 应力, 应变, 密度, 温度, 颗粒尺寸, 裂缝大小等), 常用的超声无损检测, 声发射技术等即是如此, 并已成

功地用于材料科学。但这些方法,不可避免地存在换能器与被测材料表面的声耦合问题;这或多或少要产生声束的散射,频散等,导致信

噪比的下降及实验结果解释的困难。对恶劣环境或实验空间受限时,问题会更多些^[7]。

但若用声纤传感技术,把声纤埋于待测材料中(图8),则上面所说传统声学方法的不足可以避免;且对声纤周围材料特性的变化更敏感。Harrold^[7]在用声纤监测环氧、冻胶的固化过程实验中,所用声纤直径为1.5mm,工作频率为74kHz。固化过程完成时,声信号衰减为原先的1%(图9),

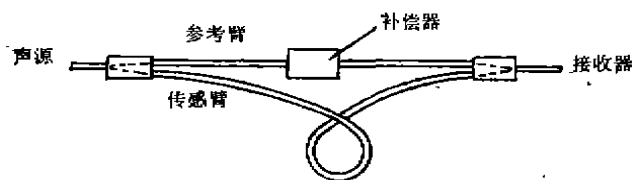


图6 相位型声纤传感器

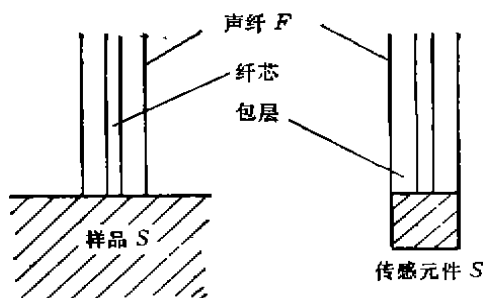


图7 反射型声纤传感器

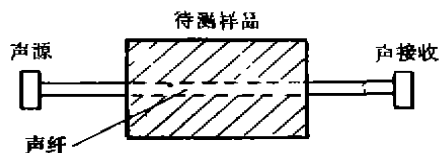


图8 声纤检测材料特性示意

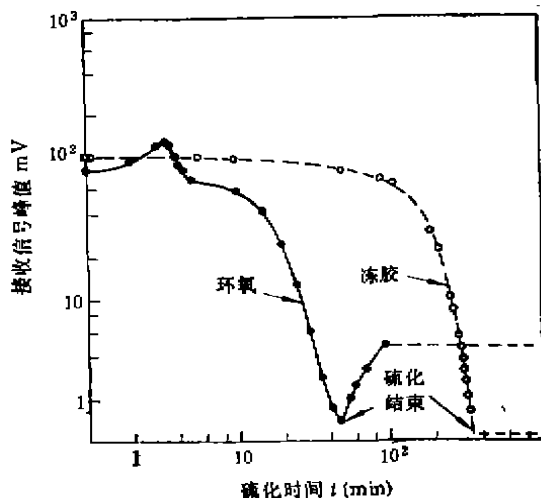


图9 环氧、冻胶固化过程曲线

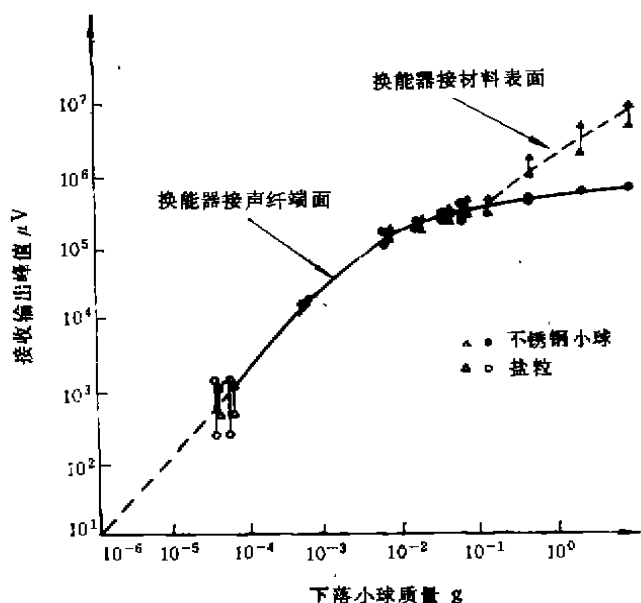


图10 声纤检测材料应力状态

这表明声纤监测材料固化过程极其灵敏。在另一个实验中,以不锈钢小球或盐粒,自25cm高处落至埋有声纤的环氧-石墨复合材料上,0.1mg重的微粒即可产生1mv.电信号(图10)。

2. 发射、接收声信号的耦合技术

声纤中声波的激发与检测,是声纤传感技术中的重要环节。通常用压电材料来制作换能器。与光纤传感技术中仅可用有限的光源频率不同,声换能器的谐振频率可通过改变尺寸来调整,故工作频率选择范围更宽,更方便。现在采用的大致有以下几种耦合方式:

(1) 换能器通过声匹配胶,粘接于抛光的声纤端面以激发或检测特定模式声波。

(2) 直接真空溅射薄膜换能器于声纤端面。

(3) 用声透镜将声能聚焦于声纤端面, 这要求声透镜材料与耦合液体介质, 液体介质与声纤波导材料之间的声阻抗能有效匹配。一般用液态金属作为耦合介质。

(4) 声能等分声纤耦合器。原理上, 这与光纤耦合器相似, 事实上即借用光纤耦合器的技术来制作。图 11 即为控制声纤耦合器熔接过

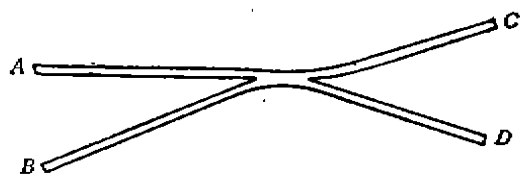


图 11 声纤耦合器
程示意图, 一边熔接, 一边监测, 要使 A 端输入

的声能等量地由 C、D 端输出。

3. 声纤技术的其它应用

声纤除可用于传感技术与超声延迟线外, 由于它还存在很强的声光相互作用^[10], 还可制作声-光频偏器, 图 12 给出频偏器示意图, 弯曲模声波使得光波模式 LP_{01} 与 LP_{11} 之间发生 100% 的转换, 实现频偏 w_a 。

液蕊声纤^[11]是一种特殊的声纤波导, 其中只能激发 Stoneley 波及轴向-径向模。一般说, 液蕊声纤有衰减大, 色散强, 机械强度低的缺点; 但如用特种液体, 如镓, 水银等作纤蕊, 用不锈钢作包层的声纤, 不仅可克服上述缺点, 而且由于具有较高的温度系数而特别适于作温度传感。

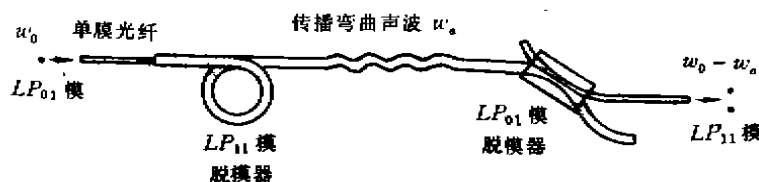


图 12 声-光频偏器

声纤波导在医学上也已有应用, 主要用作检查活性组织的声敏探针和导管^[10], 以及外科手术器具, 高频波束成像所必需的微型监听器等^[11]。

四、小 结

声纤技术是最近几年才兴起的新学科, 目前尚属起步阶段; 但已在监测材料固化过程及应力状态等方面, 显示出诱人的生命力。

制作光纤, 材料需要透明性; 但制作声纤, 对材料无此要求, 所以可供选择的材料更广。单模声纤的纤蕊可达数毫米, 这使得声纤传感器的制作及应用, 比光纤传感器要简单些。仿照光纤制作技术, 可采用纤蕊向外扩散包层材料, 或包层向内扩散纤蕊材料, 或单晶纤蕊外延生长包层及光纤拉丝方法来制作低色散, 低损耗, 高机械强度的声纤。

声纤不仅能用于固化过程, 应力状态的监

测, 还可实时监测材料内部温度、应力、浓度、结构变化、化学变化等物理与化学状态。可以预言, 声纤技术必将成为材料科学研究的重要工具。

参 考 文 献

- [1] Waldron, *IEEE Trans. on microwave theory and techniques*, MTT, 17-11(1969), 893—904.
- [2] Lai Jai-lue, *J. Acous. Soc. Am.*, 491-1(part 2) (1971), 220—228.
- [3] THurston R. N., *J. Acous. Soc. Am.*, 64-1(1978), 1—37.
- [4] Boyd G. D., *IEEE Trans on Sonics & Ultrasonics*, SU24-4(1977), 246—252.
- [5] Jen C. K., *IEEE 1985 Ultrasonics Symposium*, 1128—1133.
- [6] Hocker G. B., *Appl. Opt.*, 18-9(1979), 1415—1443.
- [7] Harrold R. T., *Polymer Engineering and science*, 26-5(1986), 367—372.
- [8] Kim B. Y., *Opt. Lett.*, 11-6(1986), 389—391.
- [9] Safaai-jazi A., *J. Acous. Soc. Am.*, 81-5(1987), 1273—1278.
- [10] Nilholson N. C., *Ultrasonics*, 26-1(1988), 27—30.
- [11] Woodward B., *J. Biomed. Eng.*, 5(1983), 343—348.