

基于耦合锥结构的光纤超声传感器优化设计

邹子杰¹, 秦忠宝^{1*}, 李易依², 刘琦¹, 陈渐伟³

¹火箭军工程大学基础部, 陕西 西安 710025;

²中国人民解放军 96863 部队, 河南 洛阳 471000;

³火箭军工程大学导弹工程学院, 陕西 西安 710025

摘要 为了进一步提高耦合锥结构光纤超声传感器的整体性能,使其更好地服务于光纤超声无损检测,用有限元分析法仿真分析了耦合锥体材料参数对传感器响应灵敏度的影响。以此为依据挑选出4种超声聚能效果优越的锥体材料,并计算出与其匹配的最佳响应锥尖角度,优化设计了4款基于74°铝锥、30°有机玻璃锥、130°聚苯乙烯锥、126°天然橡胶锥的光纤超声传感器。实验结果表明,这4款传感器均能够有效检测频率为1 MHz的超声波信号,相比现有的传感器在响应灵敏度方面有较大提升,可以有效改善传感器的传感性能;且结构更小巧轻便,能够应用的场合更广泛。

关键词 传感器; 光纤光栅; 耦合锥; 材料参数; 锥角

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2306004

Optimization Design of Fiber Optic Ultrasonic Sensor Based on Coupling Cone Structure

Zou Zijie¹, Qin Zhongbao^{1*}, Li Yiyi², Liu Qi¹, Chen Jianwei³

¹Department of Basic, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, shannxi 710025, China;

²The 96863 Army of the Chinese People's Liberation, Luoyang, Henan 471000, China;

³College of missile engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, shannxi 710025, China

Abstract In order to further improve the overall performance of the coupling cone structure optical fiber ultrasonic sensor and make it better serve the optical fiber ultrasonic nondestructive testing, the influence of the material parameters of the coupling cone on the response sensitivity of the sensor is simulated and analyzed by using the finite element analysis method in this paper. Based on this, 4 kinds of cone materials with excellent ultrasonic energy accumulation effect are selected and the best response cone angle is calculated to match with them. 4 optical fiber ultrasonic sensors based on 74° aluminum cone, 30° plexiglass cone, 130° polystyrene cone, and 126° natural rubber cone are optimized and designed. Experimental results show that these 4 sensors can effectively detect ultrasonic signals with a frequency of 1 MHz, and compared with the existing sensors, have a greater improvement in response sensitivity, which can effectively improve the sensor's sensing performance. Moreover, the structures are smaller and lighter, which can be used in more extensive occasions.

Key words sensors; fiber grating; coupling cone; material parameter; cone angle

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 280.4788

1 引 言

光纤超声无损检测是近年来一种新兴的复合检测技术手段,其结合了光纤、超声无损检测方法的优势,具有检测精度高、抗干扰能力强、复用性能好、响应频带宽等特点^[1-3]。因此,该技术在无损检测及结

构健康管理领域得到了广泛的应用^[4]。光纤超声传感器作为光纤超声无损检测技术的信号接收端,其响应灵敏度直接决定了检测效果,是极其重要的核心部件^[5]。Webb等^[6]研制了光纤布拉格光栅(FBG)超声波传感器,并先后实现了对频率为950 KHz及10 MHz高频超声波的检测,同时发现

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-07-25; 录用日期: 2020-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51605481)、军内科研重点项目

* E-mail: 799449341@qq.com

了光栅长度与 FBG 灵敏度之间的关系。Wu 等^[7]利用平衡光电检测器(BPD)提高了 FBG 传感器的响应灵敏度,主要原理是利用 BPD 消除了系统的传输光噪声,同时可以放大超声信号,是目前常见的信号处理方法。陈雪峰等^[8]利用 FBG 传感器对复合材料进行了检测,有效检测出了材料内部的损伤缺陷,且能识别损伤类型,拓宽了光纤无损检测技术的应用范围。

由于传统的裸光纤传感器暴露在外界环境中,其机械强度不足且易受到破坏,声固耦合效率也相对较低^[9-14]。为解决这些问题,邵志华^[15]提出了一种基于声耦合锥型的光纤超声传感器,在测定 FBG、相移 FBG(PS-FBG)传感器与锥体耦合后对声波响应灵敏度的影响时发现,PS-FBG 比 FBG 传感器更灵敏。原因是其边带斜率更大,但其边带滤的波动态范围小于 FBG 传感器,还发现基于轴向耦合的传感器灵敏度优于侧向耦合。史镜明等^[16]设计了一种锥形光纤超声传感器,测定了不同光栅长度对超声波探测性能的影响,并实现了对 6061 型铝合金板的损伤检测。Fisher 等^[17]通过实验表明,当光纤光栅的栅区长度小于超声波波长的一半时,光纤超声传感器能有效检测出超声波。

超声波的频率决定了其对固体的穿透能力以及对缺陷损伤的辨析程度,超声波频率越高其穿透力越差,但分辨率越高。针对压力容器、储罐等壳体结构的特种装备及板件而言,频率为 1 MHz 的超声波同时兼具较好的穿透力及分辨率,是现行超声检测的主流频率。为了提高光纤超声传感器的响应灵敏度,探究锥体材料的各项参数及锥尖角度对耦合锥聚焦性能的影响,本文采用有限元分析法对不同锥角、不同材料的耦合锥依次进行仿真计算,总结出针对传感器的选材步骤,并设计出 4 款具有最佳响应振幅的传感器。实验结果表明,相比现有的传感器,优化后的传感器对超声波的响应灵敏度更高,且结构更灵巧轻便,有效提升了声耦合锥型光纤超声传感器的整体性能。

2 光纤超声传感器的响应原理

声耦合锥的工作原理是在超声波和传感光纤之间进行耦合,相当于聚能器,可提高超声波耦合光纤的效率。超声波通过耦合锥底部耦合进入锥体,到达锥顶后传输到光纤。耦合锥可增强传递至光纤传感单元的超声能量,进而提高传感器的响应灵敏度。光纤栅区的折射率调制可表示为^[18-20]

$$n(r) = n_0 + \Delta n_{\max} \cos \frac{2\pi m L}{\Lambda}, m = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

式中, n_0 为光纤的初始折射率, Δn_{\max} 为折射率调制的最大值, L 为光纤栅区的长度, Λ 为折射率的调制周期, m 为倍频。根据光纤光栅的耦合模理论,若导模的传播常数为空间频率的一半,则会出现反耦合,可表示为

$$\begin{cases} \Delta\beta = ik_0 \Delta n_{\max} - \beta_s = 0 \\ \lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $\Delta\beta$ 为传播常数的变化量, k_0 为光纤的基模耦合系数, β_s 为光纤的 s 阶模传播常数, λ_B 为光纤的中心波长, n_{eff} 为光纤有效折射率。则光纤光栅的反射率 R 和透射率 T 可表示为

$$\begin{cases} R = \tanh^2 \frac{\pi L \Delta n_{\max}}{\lambda_B} \\ T = \cosh^{-2} \frac{\pi L \Delta n_{\max}}{\lambda_B} \end{cases}. \quad (3)$$

光纤光栅反射谱的半峰全宽(FWHM)是评定传感器精度的一项重要参数,可表示为

$$\left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}\right)^2 = \left(\frac{\Delta n_{\max}}{2n_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{L}\right)^2. \quad (4)$$

由上述分析可知,超声波主要影响光纤光栅的中心波长 λ_B ,导致 λ_B 发生漂移,主要包括 FBG 的周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 两个方面的变化。可将超声波引起的 FBG 中心波长漂移 $\Delta\lambda_B$ 表示为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Delta\Lambda + 2\Lambda \Delta n_{\text{eff}}. \quad (5)$$

根据弹光效应理论,当振动作用于光纤光栅上时,光纤光栅的波长相对变化量取决于光纤的弹光系数和光纤上的应变。因此, $\Delta\lambda_B$ 还可以表示为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e) \epsilon \lambda_B, \quad (6)$$

式中, P_e 为光纤的弹光系数,取决于光纤本身, ϵ 为光纤上的应变。

光谱边带滤波法是现行对光纤超声传感器接收的超声信号进行解调的最佳方法,具有响应速度快、操作简单等优点,其原理如图 1 所示。

利用光纤的光谱边带对入射的光功率进行调制滤波处理,将超声波导致的光纤光谱变化转变为光功率变化,进而转换为输出,实现对超声信号的解调。当超声波(ΔP)作用于光纤超声传感器时,传感器的光谱发生了漂移($\Delta\lambda$),光谱边带对可调谐激光源(TSL)的光功率起到了线性滤波作用,因此,在传感器上输出的光功率也发生了相应的变化(ΔI)。可将超声波信号(ΔP)对光谱的影响($\Delta\lambda$)转化为

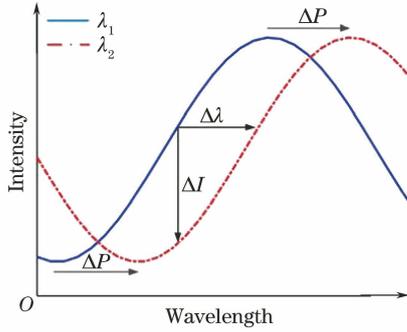


图 1 光谱边带滤波法的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of spectral sideband filtering method

FBG 上输出的光功率变化 (ΔI)。传感器输出的光功率变化可表示为

$$\Delta I / \Delta \lambda = k(\varphi), \quad (7)$$

式中, $k(\varphi)$ 为传感器的光谱边带斜率, φ 为斜角角度。传感器的超声波响应灵敏度可表示为

$$\frac{\Delta I}{\Delta p} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta P} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta \lambda} = k(\varphi) \cdot \frac{\Delta \lambda}{\Delta P}. \quad (8)$$

综上所述, 超声光纤传感器对超声波的响应灵敏度与滤波的光谱边带斜率及自身的结构参数有关。基于 $\Delta I / \Delta p$ 与 ϵ 之间的线性相关性可知, 声耦合锥在传递超声波时对能量有聚焦作用, 能大大增强 FBG 上的振动幅度, 导致 FBG 中心波长的漂移量变大, 传感器的响应灵敏度也有所提升。

3 材料参数对耦合锥聚焦性能的影响

为研究材料参数对声耦合锥聚焦性的影响, 用有限元分析法建立声耦合锥的二维轴对称几何模型。仿真参数: 构建高为 10 mm、顶角为 30° 的直角三角形, 宽为 0.0625 mm、长为 10 mm 的矩形光纤并插入三角形顶部约 1 mm, 以三角形的高为对称轴施加轴对称旋转命令, 建立耦合锥传感器模型。为了保证计算精度, 网格划分时按照自由四面体网格模式, 限制网格最大单元为 0.2 mm, 并在耦合锥与光纤的接合部进行局部细化处理, 如图 2(a) 所示。在锥体底部施加频率为 1 MHz 的时谐边界压力, 模拟输入的超声信号, 计算得到传感器的振动幅值分布如图 2(b) 所示。可以发现, 在受到时谐边界压力的作用后, 光纤处的振幅呈现周期性波动, 且整个光纤超声传感器的振幅最大部位出现在传感光纤上。这表明耦合锥达到了超声能量聚焦的效果, 且传感光纤能有效采集到超声信号, 建立的仿真模型是可靠的。

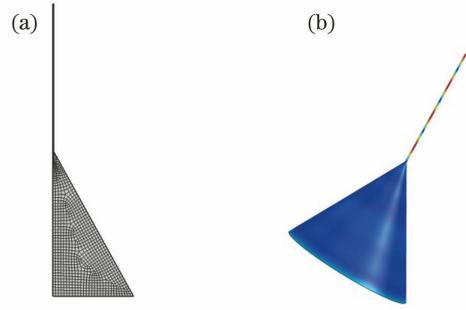


图 2 光纤超声传感器有限元模型。(a) 网格; (b) 振幅分布
Fig. 2 Finite element model of fiber optic ultrasonic sensor.

(a) Grid; (b) amplitude distribution

3.1 杨氏模量对耦合锥聚焦性能的影响

光纤的振幅 ϵ 与锥体材料的杨氏模量 E 以及泊松比 μ 有关。为了探究二者对耦合锥聚焦性能的影响, 遵循单一变量原则, 固定其中一项材料的参数、改变另一项参数, 依次计算不同情况下光纤轴向振动的最大幅值。结合实际生活中常用材料的泊松比及杨氏模量的取值范围, 设泊松比为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5, 杨氏模量的变化范围为 0.01 ~ 1000 GPa (步长为 0.01 GPa)。为更好地展现材料参数与光纤振动幅值之间的数值关系, 取对数后以相对振动幅值 ϵ_R 及相对杨氏模量 E_R 分别替代实际数值, 可表示为

$$\begin{cases} E_R = \lg E \\ \epsilon_R = \lg \epsilon \end{cases}. \quad (9)$$

为保证曲线准确可靠, 使曲线上每一点的数值与真实值之间的方差最小, 设置相对杨氏模量为自变量、相对振幅为因变量, 按照最小二乘法原则分别绘制 5 条拟合曲线, 如图 3 所示。可以发现, 随着相对杨氏模量的增大, 相对振幅呈先增大后平稳波动的变化趋势, 原因是杨氏模量决定了固体材料抵抗变形的能力。当杨氏模量较小时, 锥体应变虽然较

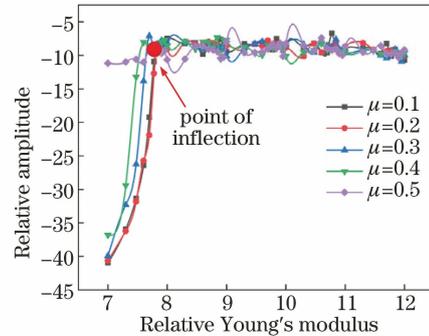


图 3 相对振幅随相对杨氏模量变化曲线

Fig. 3 Curve of relative amplitude with relative Young's modulus

大,但与光纤材料的杨氏模量相差也较大,难以将超声能量耦合进光纤,导致光纤上的振动很小;随着相对杨氏模量的增大,聚焦进光纤内部的能量也会随之增多,光纤振幅呈上升趋势;当杨氏模量增大到一定数值时,耦合锥传入光纤内的超声能量达到稳定,光纤振幅呈平稳波动的状态,此时杨氏模量的增大对耦合锥聚焦性能的影响不明显。图3中5条曲线由上升到平稳过程的拐点坐标约为(7.7, -7.5)。经(9)式反演后得到该点的杨氏模量约为0.06 GPa。因此,为保证耦合锥的聚焦能力,待选材料的杨氏模量应大于0.06 GPa。

3.2 泊松比对耦合锥聚焦性能的影响

为分析泊松比对耦合锥聚焦性能的影响,根据图3得到的结论,设定杨氏模量分别为0.7, 7, 20, 70, 200 GPa,泊松比的变化范围为0.01~0.5,步长为0.01,以泊松比为自变量,相对振幅为因变量绘制了5条拟合曲线,如图4所示。可以发现,随着泊松比的增大,相对幅值不断波动,形成了多个波峰,每条曲线上的波峰数量如表1所示。可以发现,随着杨氏模量的增大,泊松比曲线的波峰数量逐渐减少,最后稳定在2个波峰,即杨氏模量越大,泊松比曲线中的波峰越少。原因是在相同条件下,杨氏模量越大,耦合锥的传声性能也越稳定,受泊松比的

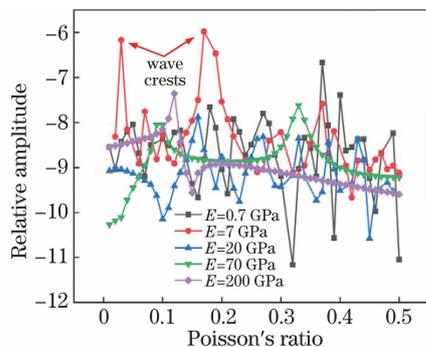


图4 相对振幅随泊松比变化曲线

Fig. 4 Curve of relative amplitude with Poisson's ratio

表1 不同杨氏模量下曲线的波峰数量

Table 1 Number of peaks of the curves under different Young's modulus

E /GPa	0.7	7	20	70	200
Number of wave crests	11	10	7	2	2

影响也就越小。同时可在图4中杨氏模量分别为70 GPa、200 GPa的两条曲线上找到两个稳定的波峰区间(按峰值衰减一半为标准确定波峰区间的两端),因此,在确定需要较大杨氏模量的前提下,待选的泊松比区间数更少,数值更易确定。对比图3和图4发现,泊松比越大,曲线达到平稳波动状态的速度越快。原因是泊松比为固体结构的横向正应变数值与轴向正应变数值之比,在相同杨氏模量下,材料的泊松比越大,物体的横向应变也越大,耦合锥能更好地将超声能量传递给光纤。

综上所述,在声耦合锥的制作材料选取方面,不宜使用杨氏模量过小的柔性材料。若因结构强度等方面要求较大数值的杨氏模量,则与其最优匹配的泊松比更易寻找。此外,超声波在耦合锥中传递时,也会受到材料的阻滞作用。因此在耦合锥的材料选择上,还应考虑材料的声阻抗参数,即应选择低声阻抗的材料。针对于耦合锥材料的选择,具体步骤如下。

1) 确定杨氏模量:可根据其他相关技术要求选取,但选择材料的杨氏模量应大于0.06 GPa。

2) 确定泊松比的范围:选定杨氏模量后,在相应的泊松比曲线上找到波峰区间,结合实际材料的泊松比,确定材料的类型。

3) 确定声阻抗:实际中,应将声阻抗较小的材料确定为最终目标。

4 锥尖角度对耦合锥聚焦性能的影响

结合实际工程中常见的材料种类,选取铝、有机玻璃(PMMA)、聚苯乙烯、天然橡胶材料作为研究对象,其材料性能参数如表2所示。

表2 耦合锥材料的参数

Table 2 Parameter of coupling cone material

Material	Aluminum	PMMA	Polystyrene	Natural rubber
E /GPa	70	3	3.2	0.1
μ	0.33	0.32	0.35	0.49
Density ρ /($g \cdot cm^{-3}$)	2.7	1.18	1.05	0.93
Acoustic impedance / [$10^6 kg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$]	17	3.1	1.7	2

探究耦合锥锥角对传感器响应灵敏度的影响时,固定耦合锥的锥高为10 mm,以改变锥底半径的方式,获得不同的耦合锥锥角。为限制传感器的总体结

构大小、减少后期加工制作的难度,锥角不能太大也不能太小。实验设置锥角的变化范围为 $20^\circ \sim 140^\circ$ 。以锥角角度为自变量,光纤最大相对振幅为因变量,

绘制了 4 种材料的拟合曲线,如图 5 所示。可以发现,4 种材料制作的传感器,光纤最大相对振幅均随锥角的增大呈上下波动的变化趋势。原因是在不同的锥角下,耦合锥有不同的几何结构和自有频率,当

自有频率接近超声信号的振动频率时,会发生共振效应,导致光纤处的振幅发生突变。因此,在每种材料曲线上,都能获得一处拥有最大振幅的锥角,即该材料在锥高为 10 mm 时的最佳匹配锥角。

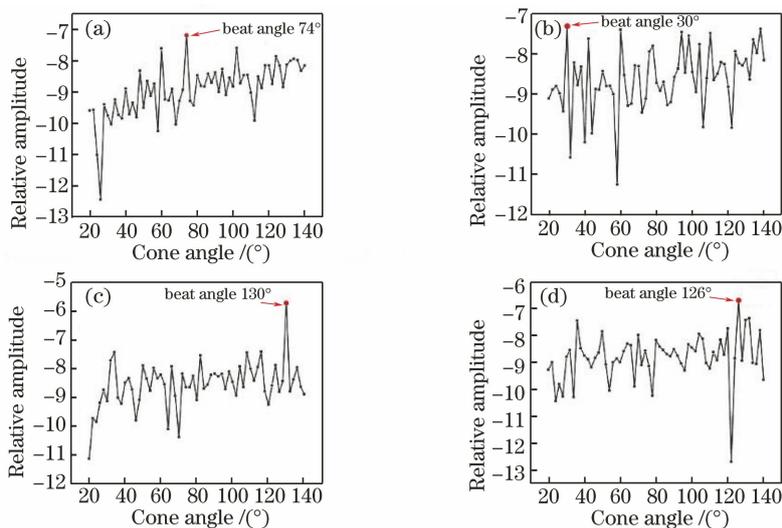


图 5 相对振幅随锥角变化曲线。(a)铝;(b)有机玻璃;(c)聚苯乙烯;(d)天然橡胶

Fig. 5 Curve of relative amplitude with cone angle. (a) Aluminum;(b)PMMA;(c) polystyrene;(d) natural rubber

探究 4 种材料在最佳锥角状态下光纤栅区对超声波的响应差异时,因超声波的波长与光纤栅区长度相近,作用于光纤栅区的应力分布也相对均匀,可选取每种光纤振幅的最大点作为对比参考点,仿真计算了 4 种材料在最佳锥角下的时域特征,如图 6 所示。可以发现,6 种材料下的声耦合锥光纤传感

器对频率为 1 MHz 时谐边界压力超声源的响应表现出高度的一致性,均呈正弦时域曲线,且采集到的信号频率皆为 1 MHz,与超声源一致。由于耦合锥的制作材料及结构均不相同,传感器的响应幅度也不同,在时域图上可直接读取各传感器的响应峰值。

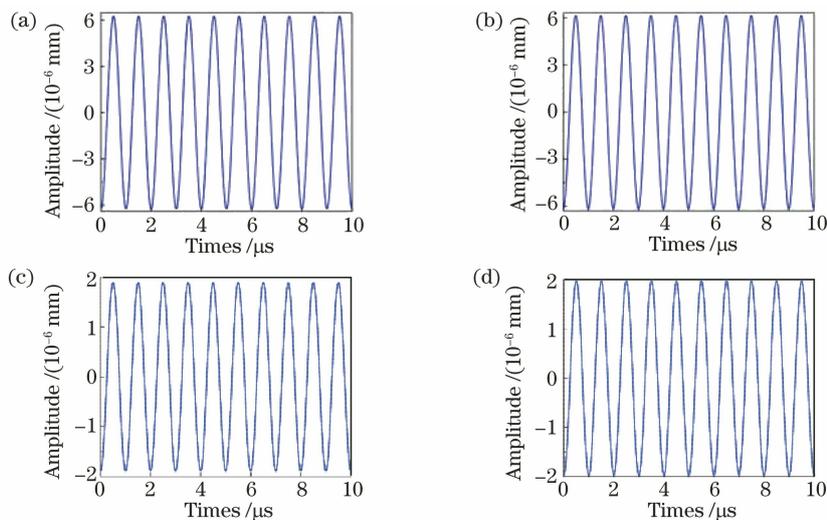


图 6 传感器光纤振幅最大点的时域图。(a)铝;(b)有机玻璃;(c)聚苯乙烯;(d)天然橡胶

Fig. 6 Time domain spectrum of optical fiber amplitude maximum point. (a) Aluminum;(b) PMMA;(c) polystyrene;(d) natural rubber

4 种材料耦合锥的最佳锥角及对应的光纤振幅如表 3 所示,可以发现,4 种传感器在各自最佳锥角下均响应出了较大光纤振幅,且相比其他传

感器,采用聚苯乙烯制备的 130° 耦合锥传感器具有显著的优势。对比文献[15]设计的 PMMA 锥传感器(振幅峰峰值为 2.6×10^{-7} mm),实验设计

的聚苯乙烯锥光纤超声传感器在光纤振幅上提高了超 1 个数量级;采用相同材料的铝锥传感器(振幅峰峰值为 3.4×10^{-8} mm),本方案比文献[15]

中的方案提高了约 4 倍。4 种材料当中,聚苯乙烯的声阻抗最小,在实际应用中的表现也应该是最好的。

表 3 各传感器最佳角度及其光纤最大振幅

Table 3 Optimum angle and maximum amplitude of each sensor

Coupling cone material	Aluminum	PMMA	Polystyrene	Natural rubber
Angle / (°)	74	30	130	126
ϵ /mm	1.25×10^{-7}	9.66×10^{-8}	3.8×10^{-6}	3.94×10^{-7}

5 实验验证与讨论

5.1 传感器制作

本课题组对光纤光栅的粘接位置进行研究后发现,光纤沿轴向布置于锥尖要优于侧向布置,且光栅与锥尖的距离对传感器的性能影响极小。在此基础上,实验还讨论了粘接剂的选择。

传感器制作过程中采用三维(3D)打印和机械加工相结合的方式分别制作 4 种耦合锥的锥体以及封装外壳。为探究粘接剂的种类对传感器性能的影响,以铝锥为载体,用工程当中常用的环氧树脂(AB 胶)、玻璃胶(硅酸钠混合物)、502 胶对锥体、光纤进行粘接,粘接后的传感器 3D 模型及其实物如图 7 所示。

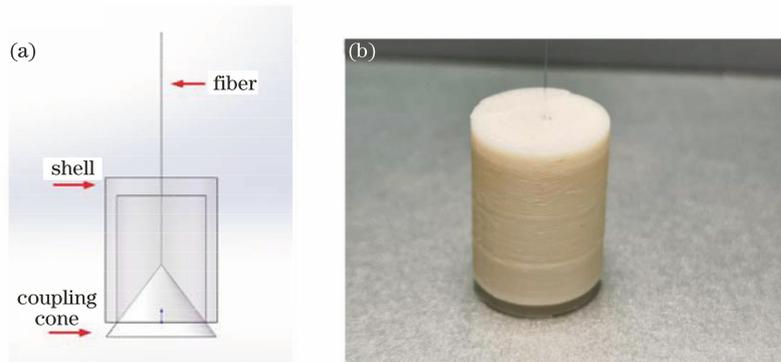


图 7 光纤超声传感器。(a) 3D 模型;(b)实物图

Fig. 7 Optical fiber ultrasonic sensor. (a) 3D model; (b) physical image

利用光纤超声检测系统,逐一测试了用 3 种胶体粘接后的铝锥传感器性能。光纤超声检测系统主要由函数发生器、压电换能器、可调谐激光器、超声光纤传感器、环形器、光电探测器、示波器组成。函数发生器输出高频脉冲电压,驱动压电换能器发射超声波信号并直接作用于光纤超声传感器;可调激光器发射窄线宽激光经环形器导入光纤超声传感器内部,并将激光器的输出波长调至光栅光谱 3 dB 带宽处;光纤内的光信号受到超声波的调制作用后,搭载了超声波所传输的信息,再一次经过环形器进入光电探测器中转化为电压信号,最后由示波器显示。为保证实验与仿真设置外部条件的一致性,将压电陶瓷直接作用于光纤超声传感器底部(即耦合锥底部),并在接合部涂抹凡士林以保证超声信号能高效耦合进入传感器,整体的实验设备如图 8 所示。

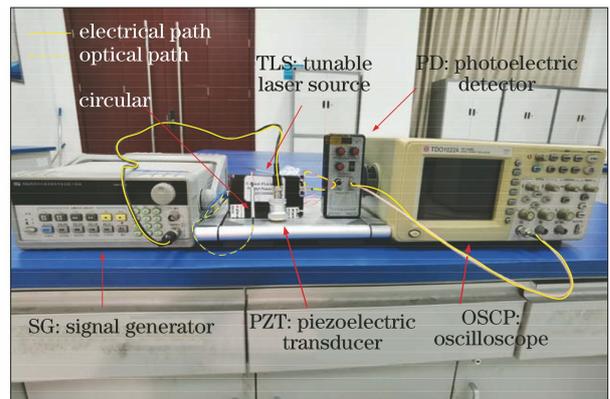


图 8 实验设备

Fig. 8 Experimental equipment

实验中,函数信号发生器发射频率为 1 MHz、重复频率为 200 Hz、强度为 400 V 的驱动电压;可

调谐激光器输出功率为 20 mW 的窄线宽激光;光电探测器设置的带通滤波为 300 kHz~3 MHz,信号增益为 300。3 种铝锥光纤超声传感器采集的超声波信号如图 9 所示,可以看出,3 种铝锥传感器采集的超声信号只有略微的差异,AB 胶的直达波电压峰峰值稍高,原因是环氧树脂的声阻抗最小,对信

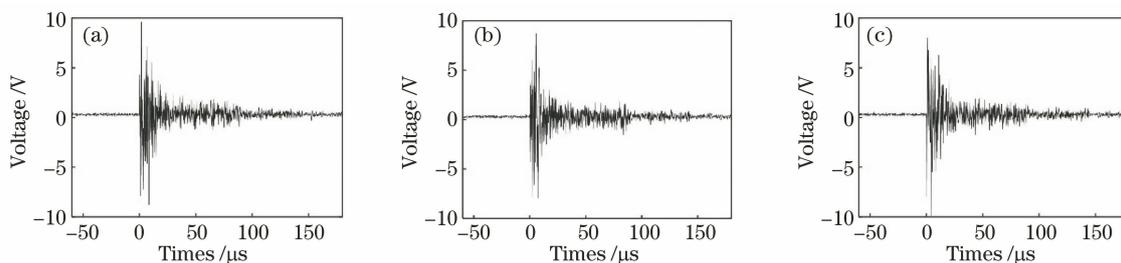


图 9 3 种铝锥传感器的超声波信号。(a) AB 胶;(b) 502 胶;(c)玻璃胶

Fig. 9 Ultrasonic signals of 3 types of aluminum cone sensors. (a) AB glue; (b) 502 glue; (c) glass glue

号的阻滞作用相应也最弱。此外,在粘接过程中,AB 胶的固化速度相对适中,使用起来更方便。因此,实验后续的传感器粘接均使用这类胶水。

5.2 传感器性能测试

为验证 4 种不同材料耦合锥结构超声光纤传感器的实际灵敏度,进一步分析传感器对超声波信号的响应情况,利用光纤超声检测系统对 4 款传感器进行了性能测试,结果如图 10 所示。将图 10 中的时域信号经傅里叶变换后,可获得信号相对应的频域图谱,如图 11 所示。可以发现,4 款传感器响应出的电压信号经短暂起振后瞬间达到峰值,经多次振荡后逐渐衰减。原因是实际中压电陶瓷发出的是—种多频谐波,这些杂波同样会被传感器接收;超声波作用后,光纤栅区还有余振,因此不会立即衰减至 0;外界环境反射波不可避免地也会影响传感器的信号接收。图 11 中 4 款传感器采集的超声信号均集中在 1 MHz 左右,且距该频率越远强度衰减得越厉害,这表明传感器对频率为 1 MHz 的超声信号十分敏感。由于实验设备无法直接测量声压,不能用 $\Delta I/\Delta p$ 进行对比,因此用信噪比(SNR)作为评价 4 款传感器对频率为 1 MHz 超声信号的实际响应灵敏度,其大小取决于信号峰值电压 V_s 以及检测系统噪声 V_n (实验环境的系统噪声约为 2 mV),可表示为

$$R_{SN} = 20 \lg \frac{V_s}{V_n} \quad (10)$$

以体积、质量参数为评价指标,评定传感器的便捷性,结果如表 4 所示。可以发现,基于 130°聚苯乙烯锥光纤超声传感器响应的信噪比最大,与仿真计算结果相吻合。实际数据与文献[15]设计的 PMMA 传感器相比,信噪比提高了 24.81%;同样使用铝材的情况下,实验设计的 74°铝锥传感器在

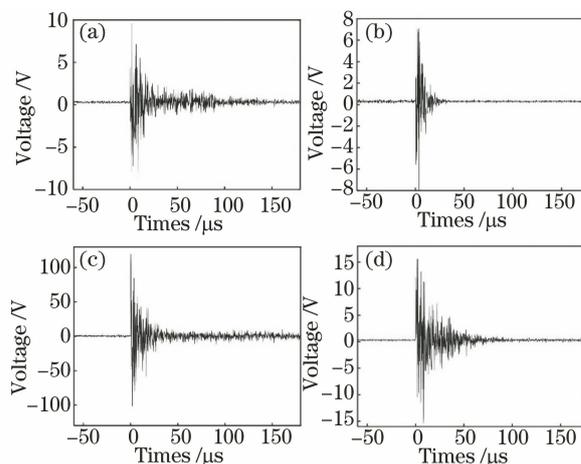


图 10 4 款传感器的测试结果。(a) 铝;

(b) 有机玻璃;(c) 聚苯乙烯;(d) 天然橡胶

Fig. 10 Test results of 4 sensors. (a) Aluminum;

(b) PMMA; (c) polystyrene; (d) natural rubber

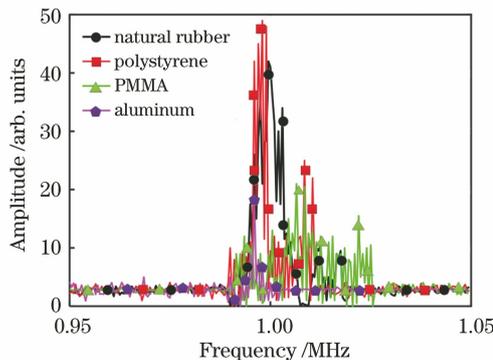


图 11 不同传感器采集的信号频谱

Fig. 11 Signal spectra collected by different sensors

信噪比提高 4.03% 的同时,体积及质量减小了 63.7%,整体结构更紧凑、轻便;而 30°PMMA 锥传感器与文献[15]设计的 PMMA 锥传感器相比,在信噪比较小的情况下,整体结构、质量减小了 95.41%,能适应的场合更多,且适合于微小空间。

表 4 不同传感器的 SNR、体积及质量
Table 4 SNR, volume and quality of different sensors

Sensor type	Sensor of our paper				Existing sensor	
	74°Aluminum	30°PMMA	130°Polystyrene	126°Natural rubber	PMMA	Aluminum
SNR /dB	77.57	75.59	98.48	81.06	78.90	74.50
Volume /mm ³	1780	225	14433	12062	4906	4906
Quality /g	4.81	0.27	15.15	11.22	5.79	13.25

6 结 论

针对现有光纤超声传感器在无损伤检测应用中存在响应灵敏度不足、机械强度不够、结构不小巧等问题,采用理论分析、有限元仿真、实验验证相结合的方法,从耦合锥锥体材料参数(杨氏模量、泊松比)、耦合锥锥尖角度两个方面,归纳总结出该类型传感器的设计步骤,并设计了 4 款性能优越的声耦合锥形光纤超声传感器。实验结果表明,设计出的 74°铝锥、30°有机玻璃锥、130°聚苯乙烯锥、126°天然橡胶锥光纤超声传感器均能有效检测频率为 1 MHz 的超声波,且相比现有传感器,响应灵敏度有较大提升,几何尺寸及重量也有大幅减小,适用范围更广。其中,聚苯乙烯传感器的响应灵敏度最佳、有机玻璃传感器结构最小巧,特别适合对壳体结构及板件的缺陷探伤。下一步还需研究该型传感器的宽频响应,以得到性能更佳的光纤超声传感器。

参 考 文 献

- [1] Luo B B, Xie L, Wang Y J, et al. Performance optimization of excessively tilted fiber grating cantilever beam vibration sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0806006.
罗彬彬, 谢浪, 王亚杰, 等. 极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感器性能优化 [J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0806006.
- [2] Wei L, Liu Z, Li H C, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for “土”-shaped beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106004.
魏莉, 刘壮, 李恒春, 等. 基于“土”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1106004.
- [3] Shao Z H, Qiao X G, Rong Q Z, et al. Fiber-optic magnetic field sensor using a phase-shifted fiber Bragg grating assisted by a TbDyFe bar [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 261: 49-55.
- [4] Zhang S H, He J P, Yu Q F, et al. Multi-scale load identification system based on distributed optical fiber and local FBG-based vibration sensors [J]. *Optik-*

International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 219: 165159.

- [5] Tsuda H, Sato E, Nakajima T, et al. Acoustic emission measurement using a strain-insensitive fiber Bragg grating sensor under varying load conditions [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2942-2944.
- [6] Webb D J. An ocean model code for array processor computers [J]. *Computers & Geosciences*, 1996, 22(5): 569-578.
- [7] Wu Q, Okabe Y. High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28353-28362.
- [8] Chen X F, Yang Z B, Tian S H, et al. A review of the damage detection and health monitoring for composite structures [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(1): 1-10, 202.
陈雪峰, 杨志勃, 田绍华, 等. 复合材料结构损伤识别与健康监测展望 [J]. *振动·测试与诊断*, 2018, 38(1): 1-10, 202.
- [9] Shao Z H, Qiao X G, Chen F Y, et al. Ultrasonic sensitivity-improved fiber-optic Fabry-Perot interferometer using a beam collimator and its application for ultrasonic imaging of seismic physical models [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(9): 094218.
- [10] Shao Z H, Qiao X G, Rong Q Z. Highly sensitive intensity-interrogated gas refractometer using slotted photonic crystal fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(22): 9263-9270.
- [11] Guo H, Xiao G, Mrad N, et al. Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms [J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 2687-3705.
- [12] Li H, Dong B, Zhang Z, et al. A transparent broadband ultrasonic detector based on an optical micro-ring resonator for photoacoustic microscopy [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4496.
- [13] Zhou R X, Yin X L, Qiao X G. Ultrasonic imaging of seismic physical models using fiber Bragg grating Fabry-Perot probe [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 103235S.
- [14] Qiao X G, Shao Z H, Rong Q Z, et al. Indirect coupling conic fiber grating ultrasonic sensor: CN105424163A [P]. 2016-03-23.
乔学光, 邵志华, 荣强周, 等. 间接耦合锥形光纤光

- 栅超声传感器: CN105424163A[P]. 2016-03-23.
- [15] Shao Z H. Novel high-performance fiber-optic ultrasonic sensors[D]. Xi'an: Northwest University, 2019: 29-46.
邵志华. 新型高性能光纤超声波传感器研究[D]. 西安: 西北大学, 2019: 29-46.
- [16] Shi J M, Zheng D, Pan W, et al. Fiber grating ultrasonic sensor based on coupling cone structure and its application in nondestructive detection [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206004.
史镜名, 郑狄, 潘炜, 等. 基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器及其无损检测研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206004.
- [17] Fisher N E, Surowiec J, Webb D J, et al. In-fibre Bragg gratings for ultrasonic medical applications[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(10): 1050-1054.
- [18] Othonos A. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing[M]. London: Artech House Publishers, 1999, 27-55.
- [19] Butter C D, Hocker G B. Fiber optics strain gauge [J]. Applied Optics, 1978, 17(18): 2867-2869.
- [20] Minardo A, Cusano A, Bernini R, et al. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2005, 52(2): 304-312.