

利用激光超声技术研究表面微结构材料中瑞利波的传播特性

王敬时^{1,2}, 徐晓东², 程 莹², 刘晓峻²

(1. 南通大学电子信息学院, 江苏南通 226019; 2. 南京大学近代声学重点实验室, 江苏南京 210093)

摘要: 利用激光超声无损检测的实验方法, 观察记录了瑞利波在具有不同表面微结构厚铝板中的传播过程, 研究了表面微结构的声传输特性。对具有不同结构参数的微结构样品进行了分组对比实验, 结果表明在一定深度范围内, 表面微结构具有明显的分频效应。瑞利波中相对高频的部分被反射, 反射信号通带带宽主要受制于微结构的深度, 其能量主要受微结构宽度影响。相对低频部分沿表面继续传播, 因此表面微结构同时具有一定的低通滤波效应。

关键词: 激光超声; 分频; 表面微结构; 瑞利波; 低通滤波

中图分类号: TN249 O426

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-06-0512-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.06.007

Laser-ultrasonic investigation on Rayleigh wave propagation in surface micro-structures

WANG Jing-shi^{1,2}, XU Xiao-dong², CHENG Ying², LIU Xiao-jun²

(1. School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, Jiangsu, China;

2. Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract: The propagation of laser-generated Rayleigh wave on a thick aluminum plate with the surface micro-structure has been investigated by experiment. Experimental results have proved that the surface micro-structure act as a frequency divider for the Rayleigh wave within a certain depth range. The high-frequency part of the Rayleigh wave is reflected. Bandwidth of the reflected pass band is closely related to the depth of the surface micro-structure, and advanced by increasing the depth of the micro-structure. The amplitude of the reflected acoustic wave is suppressed by increasing the width of surface micro-structure. The low-frequency part propagates of the Rayleigh wave on the sample surface without disturbance, and the surface micro-structure works as a low-pass filter.

Keywords: laser-ultrasonic; frequency divider; surface micro-structures; Rayleigh waves; low-pass filter

0 引言

瑞利波属于广义声表面波, 仅在固体材料表面和近表面传播, 随着深度的增加迅速衰减。由于瑞利波的近表面传播特性, 目前已被广泛地应用于传播介质表面和近表面性质表征方面, 如微结构、边界特征、均一性等^[1]。一方面, 利用瑞利波在非均匀介质中的色散效应可以反演传播介质的弹性性质^[2]; 另一方面, 瑞利波脉冲对介质表面结构非常敏感, 通过检测反射波的响应时间, 实现对表面和近表面缺陷的检测和定位^[3], 为特殊材料和微结构

的检测提供一种新方法。目前, 人们对于介质表面和近表面的瑞利波传导过程和动力机制做了一定理论研究^[4,5], 并建立了利用介质表面微结构调制声波传输特性的相关理论模型^[6-10]。然而, 很少有关于表面微结构声传输特性方面的实验验证和研究的报道, 仍有许多问题值得深入分析。

随着声学技术、激光技术和微弱信号检测技术的发展, 光声光热技术在理论研究和实际应用两个领域都获得了迅速发展, 其中热弹机制下的激光超声检测技术由于不损伤介质表面, 已成为无损检测的重要手段之一。本文中利用热弹效应和光偏转法建立激光超声无损检测实验系统, 利用激光束作为探针检测传播介质表面位移, 表征其中声波的传播特性, 记录并研究了具有不同结构参数表面微结构的厚铝板中瑞利波的传播过程。通过对瑞利波波形和频谱的分析证实了材料表面缺陷具有明显的低通滤波效应, 探讨了表面微结构参数对透射声波传

收稿日期: 2014-07-02; 修回日期: 2014-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11204145)、南通市科研项目(12R012)。

作者简介: 王敬时(1985—), 女, 江苏睢宁人, 博士, 讲师, 研究方向为激光超声和复杂介质中的声传播。

通讯地址: 王敬时, E-mail: wjsh@ntu.edu.cn

播的影响。

1 激光超声检测系统的构成及原理

本文引入一种改进的激光超声检测系统，其示意图如图 1 所示。样品两端和顶端自由，底端固定在光学减震平台上。将 Nd:YAG 激光器发出的高能脉冲激光经过三棱镜(P1)、柱面透镜(L1)聚焦为单线源照射在样品上表面，激发声波信号，激发脉冲上升时间为 4 ns、能量为 170 mJ、聚焦线源半宽度为 0.1 mm。检测信号为激光二极管产生空间上按高斯分布的激光束，并通过一个聚焦透镜(L2)聚焦为尽量小的光斑照射在样品表面。反射光束再次通过一个透镜(L3)准直照射在两块可调平面镜(M3)上，反射光束将被一分为二形成两束检测光。两束检测光通过透镜(L4)聚焦后由光电平衡器(BPR)的两个光敏二极管接收，其中 BPR 的前置放大电路由一个差分放大器构成。

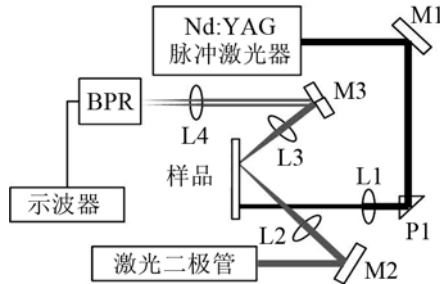


图 1 激光超声检测系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of the Laser-ultrasonic detection system

样品表面静止时，通过仔细调节光路使检测光束被 M3 的两块平面镜平分，BPR 接收到的两束检测光能量相等，示波器输出为零，系统处于平衡状态。瑞利波传播过程中，样品表面发生形变，由样品表面反射的检测光束随之偏转，照射在 M3 上的光斑也会随之发生位移，分别如图 2(a)和 2(b)中所示。BPR 两个输入端的光电平衡将被破坏，两个输入端所接收的信号强度的差值与反射光路偏转角度即样品的形变程度和声波的传播特性密切相关。这一差值的变化由光敏二极管转换成电信号为示波器显示并记录。

如图 2(b)中所示，以 M3 的中心为坐标原点，平面镜 M3 上下沿平行方向为 x 方向，垂直方向为 y 方向，建立笛卡尔坐标系。系统处于平衡状态时，经透镜 L3 聚焦后的光斑中心落于坐标原点时，检测信号的能量分布可以表示为：

$$E(x, y) = \frac{E_0}{2\pi R^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

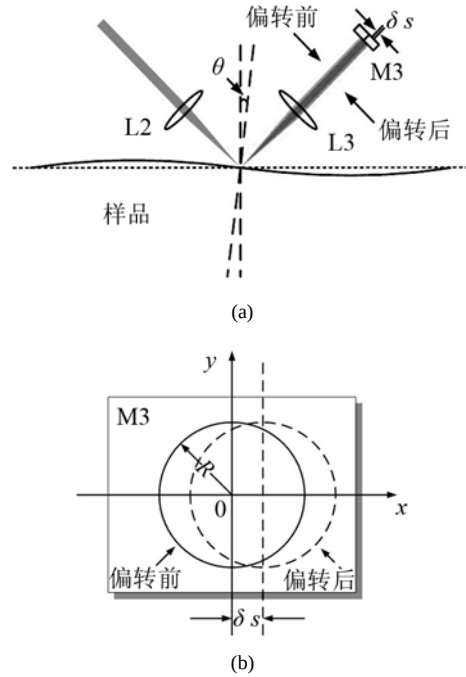


图 2 (a) 样品表面反射光路偏转示意图；(b) 反射检测光束横截面在 M3 上的偏转

Fig.2 The deflection of the reflected probe beam (a) on the sample surface; (b) in the cross section

其中： E_0 为检测激光束中心能量幅值； R 为检测激光束照射在 M3 上的光斑半径。光束被 M3 两块平面镜分开后，两部分光强可以分别表示为：

$$P_1 = \int_s^R \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} E^2(x, y) dx dy \quad (2)$$

$$P_2 = \int_{-s}^R \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} E^2(x, y) dx dy \quad (3)$$

其中， s 是光斑中心相对于坐标原点的偏移。系统处于平衡状态时仔细调节光路，使 s 趋于零。

当声波信号通过检测点时，照射在 M3 上的光斑也将随之偏移，令其为 δs ，如图 2(b)中虚线所示，此时，M3 的两个反射镜的反射光强的变化可分别表示为：

$$\Delta P_1 = \frac{2E_0^2(1-\exp(-1/2))\delta s}{R} \quad (4)$$

$$\Delta P_2 = -\frac{2E_0^2(1-\exp(-1/2))\delta s}{R} \quad (5)$$

两束检测光经聚焦后分别照射在 BPR 的两个光敏二极管上，令两个光敏二极管的转换效率为 η_i ，则差分后的输出信号 i 可表示为

$$i = \Delta P_1 - \Delta P_2 = \eta_i \frac{4E_0^2(1-\exp(-1/2))\delta s}{R} \quad (6)$$

另一方面，考虑样品表面的情况，瑞利波的传播导致样品表面发生微小形变，并导致反射光束的偏转，如图 2(a)所示。令波传播的方向为 x 方向，深度方向为 y 方向，样品中声场可以表示为：

$$\begin{aligned}\Phi &= \Phi_a e^{-\alpha y} e^{j(\omega t - kx)} \\ \psi &= \psi_a e^{-\beta y} e^{j(\omega t - kx)}\end{aligned}\quad (7)$$

式中: k 为 x 方向传播的波数; $\alpha^2 = k^2 - k_L^2$, $\beta^2 = k^2 - k_T^2$, k_L 和 k_T 分别为板中纵波和横波的波数。将式(7)代入声波动方程, 样品表面质点位移 u 的实数解可表示为

$$u(x, t) = u_0 \cos(\omega t - kx) \quad (8)$$

其中: u_0 为声波幅值; ω 为角频率。按小角度近似法, 样品表面形变导致的光束偏转角 θ 可表示为

$$\theta = \frac{\partial u}{\partial x} = k u_0 \sin(\omega t - kx) \quad (9)$$

令聚焦透镜 L3 的焦距为 F_3 , 由几何光学中小角度近似可知, 光斑的偏移 δs 可表示为

$$\delta s = F_3 \cdot \theta \quad (10)$$

将式(6)、(10)联立, BPR 输出信号 i 可表示为:

$$i = \frac{4\eta_i E_0^2 F_3 \theta}{R} (1 - \exp(-1/2)) \quad (11)$$

对于由多频率成分组成的声波信号, 式(11)可展开为:

$$\begin{aligned}i &= \frac{4\eta_i E_0^2 F_3}{R} (1 - \exp(-1/2)) \sum_{i=1}^n \theta_i \\ \theta_i &= k_i u_{0i} \sin(\omega_i t - k_i x)\end{aligned}\quad (12)$$

其中: ω_i 、 k_i 、 u_{0i} 分别为宽带声表面波的角频率、波数和幅值。

2 样品检测和结果分析

利用激光溶蚀的方法在铝块上表面加工特定结构参数的空气槽, 检测中使聚焦后的激光光源与表面空气槽平行, 在样品表面传播的声波可以近似为平面波, 将三维问题化简为二维问题。实验中使用厚铝板作为基体, 定义表面微结构深度为 d 、宽度为 w , 反射声波检测点 A 距激发点距离为 x_1 , 透射声波检测点 B 距激发点距离为 x_2 , 结构示意图如图 3 所示。实验中使用的样品的结构参数和系统位置参数如表 1 所示。实验中使用的示波器采样频率为 50 MHz。

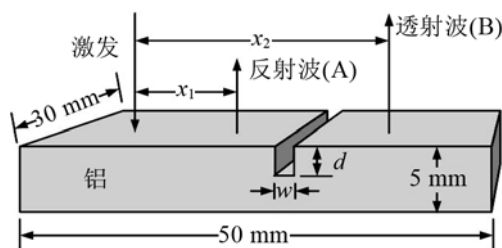


图 3 样品结构示意图

Fig.3 Structure diagram of the sample

表 1 实验样品结构参数和系统位置参数表

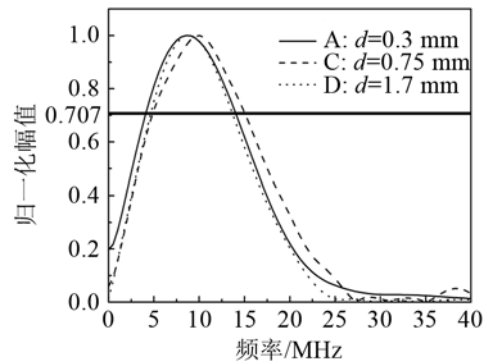
Table 1 The structure and location parameters of samples

序号	A	B	C	D	E
d/mm	0.3	1.9	0.75	1.7	0.75
w/mm	2	1	2	2	0.5
x_1/mm	7	7.5	8.8	10	8
x_2/mm	16	6.85	-	-	-

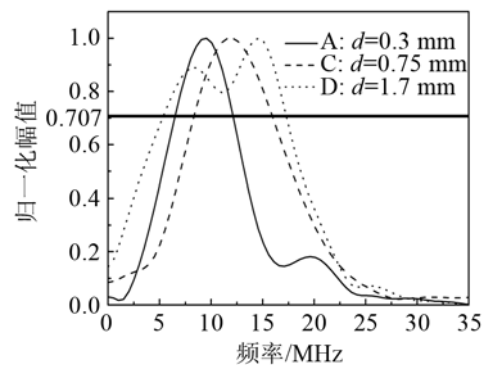
2.1 表面微结构深度对反射频谱的影响

瑞利波沿介质表面传播, 并随着深度的增加按指数衰减, 故而表面微结构对样品中的声波有很强的反射和散射作用。选取具有相同宽度 $w = 2 \text{ mm}$, 不同深度表面结构的样品 A($d = 0.3 \text{ mm}$)、样品 C($d = 0.75 \text{ mm}$)和样品 D($d = 1.70 \text{ mm}$)探讨微结构参数对反射声信号的影响。

图 4(a)、4(b)分别为样品 A、C 和 D 表面检测到的瑞利波入射信号和反射信号频响曲线归一化后的对比图, 黑色粗实线与频谱曲线交点为信号通带的频率截止点。三次实验中保持相同的激光脉冲激发, 三个样品表面探测到受激产生的入射信号通带带宽基本相同, 约为 9.5 MHz。由于三次实验光路校准和光学聚焦中的些许不同以及样品加工精度导致的物理属性的细微差别, 入射信号通带位置



(a) 入射 $w = 2 \text{ mm}$



(b) 反射 $w = 2 \text{ mm}$

图 4 样品 A、样品 C 和样品 D 中入射波、反射波归一化频响曲线对比
Fig.4 Comparisons of normalized frequency response curves of incident waves and reflection waves in sample A, sample C and sample D

略有不同, 相应的反射信号也存在一定的频移。图 4(b)中显示, 随着微结构深度的增加, 探测点 A 处接收到的反射信号通带不断扩展, 瑞利波在样品表面传播时所受的阻挡越来越强, 更多频率成分被表面结构反射。

如图 4 所示, 具有同宽表面结构的样品中, 当微结构深度为 0.3 mm 时(样品 A), 入射信号通带带宽为 9.92 MHz, 反射信号带宽为 5.49 MHz, 反射比(反射信号带宽与入射信号带宽比值)为 55.34%; 当微结构深度增加到 1.7 mm 时(样品 D), 入射信号带宽为 9.08 MHz, 变化不大, 反射信号带宽增加到 11.91 MHz, 反射比提高到 131.17%, 此时, 反射信号带宽已超过入射信号, 反射比大于 1。这主要是由于样品对在其表面传播声波各频率成分反射系数不同, 反射信号的通带带宽可能超过入射信号。样品 C 表面结构深度介于样品 A 和 D 之间, 检测到的反射声波带宽和反射比也介于两者之间。可见, 微结构的深度对反射信号的通带带宽有明显影响。瑞利波在传播过程中遇到表面微结构, 低频部分由于波长较长, 在衍射作用下可直接跨过继续传播, 而高频成分在微结构处发生反射和散射, 故而反射信号的通带带宽主要受制于表面结构的深度。

2.2 表面微结构宽度对反射频谱的影响

比较图 5 中两组曲线可得, 样品 C($w=2.0$ mm)中入射信号通带为 4.89~15.04 MHz(带宽 10.15 MHz); 反射信号通带为 8.32~15.93 MHz(带宽 7.61 MHz)。样品 E($w=0.5$ mm)中入射信号通带为 4.24~13.22 MHz(带宽 8.98 MHz); 反射信号通带为 6.30~13.12 MHz(带宽 6.82 MHz), 如图 5(a)、5(b) 中所示。样品 C 和样品 E 的反射比分别为 0.75 和 0.76, 两者近似相等, 样品 C 中略小。这主要是由于较宽的表面微结构对声波信号的散射作用更强, 相对于较窄的微结构, 声脉冲的频率成分损失会更多。两次检测中检测点距离表面微结构均为 2 mm, 两个样品表面瑞利波传播过程中随距离的衰减差别可以忽略。对比图 6(a)和 6(b), 瑞利波遇到较宽微结构(样品 C)所得反射信号能量与入射信号能量之比明显小于较窄的情况(样品 E)。可见, 表面微结构的宽度对反射信号能量的影响较大, 对反射信号通带带宽和系统反射比的影响很小。

2.3 表面微结构的分频效应

分别检测了具有不同表面微结构的样品 A($d=0.3$ mm, $w=2$ mm)和样品 B($d=1.9$ mm, $w=1$ mm)。由于随着表面微结构深度的增加, 更多的信号成分被反射或散射, 透射波幅值逐渐衰减, 样品

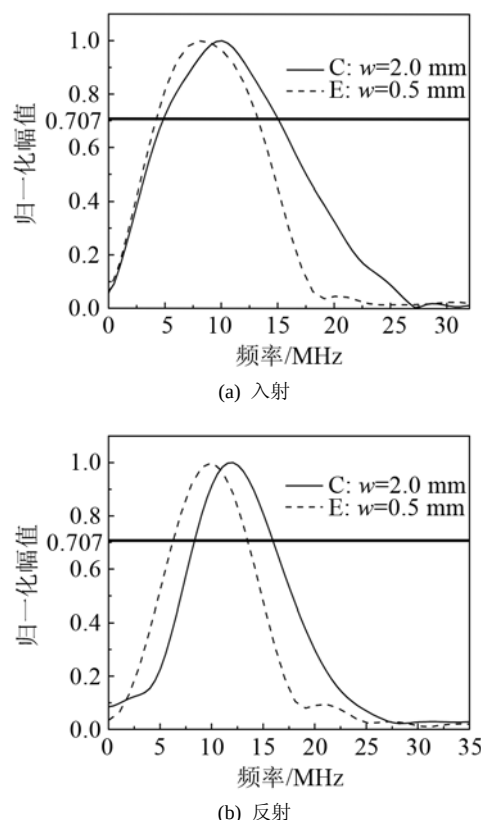


图 5 样品 C 和样品 E 中入射波、反射波归一化频响曲线对比
Fig.5 Comparisons of normalized frequency response curves of incident waves and reflection waves in sample C and sample E

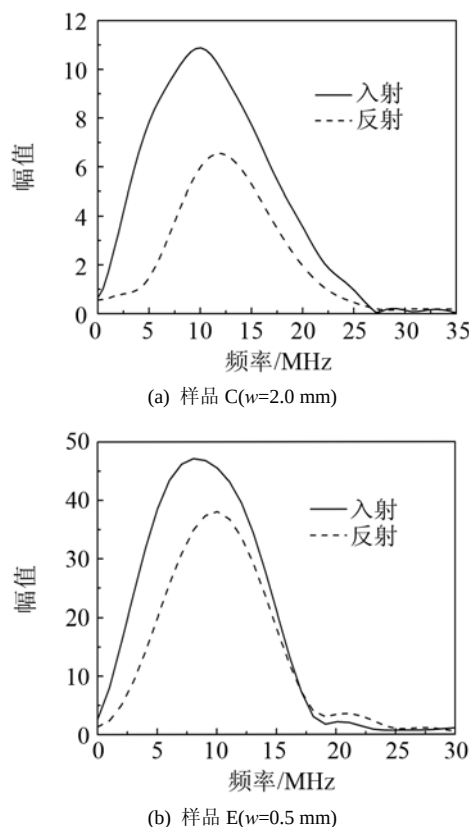


图 6 样品表面入射信号和反射信号频响曲线
Fig.6 Frequency response curves of incident waves and reflection waves in sample C($w=2.0$ mm) and sample E($w=0.5$ mm)

B 表面检测到的透射信号已近乎被噪声湮没。因此本文中仅选取样品 A 的入射、反射和透射信号,研究其中瑞利波的反射和透射特性。

图 7(a)展示了样品 A 表面检测到的入射、反射和透射声波的频响曲线,并对该结果做了归一化,如图 7(b)中所示。由波长、频率和声速的关系可知,在样品 A 表面传播的入射声波通带频率对应的瑞利波波长大约为 $0.2 \sim 0.8 \text{ mm}$ 。声波中频率较低的部分,即对应波长近似大于 0.8 mm 的频率成分,可以经衍射越过微结构保持原来的振动方式继续传播;而频率较高的部分,即对应波长近似小于 0.51 mm 的频率成分则主要被微结构反射,表面微结构表现出明显的低通滤波效应。并且透射波通带与反射波通带并不重合,表面微结构有明显的分频作用。图 7(a)显示,样品 A 表面的透射信号能量比重明显小于反射信号,主要是由于样品 A 表面的透射信号通带已经低于入射信号的通带范围,由图 7(a)中能量分布可知,距离通带越远则该频率成分的能量越低。可见,由于受到入射信号带宽的限制以及材料本身的阻尼效应,在一定结构参数范围内,表

面微结构对样品表面传播的瑞利波起到低通滤波和分频的作用,微结构深度过大时透射信号因能量太弱很难被检测(样品 B)。

3 结 论

本文对脉冲激光激励下产生的瑞利波在具有不同表面微结构厚铝板中的传播行为进行了较为系统的实验研究,分析了微结构结构参数对瑞利波传播的影响。实验结果显示,瑞利波通过表面微结构时,表面微结构具有明显的分频作用和低通滤波效应,声波中的低频成分可以跨过微结构沿样品表面继续传播,而高频成分则被反射。微结构宽度对反射信号通带带宽影响不大,但由于边界散射作用,通带内声波能量会随着结构宽度的增加而迅速衰减。

参 考 文 献

- [1] Hu W X, Qian M L, Cantrell J H. Thermoelastic generation of cylindrical Rayleigh waves and whispering gallery modes by pulsed-laser excitation[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(18): 4031-4033.
- [2] Xiao X, You X Y, Yao S Y. Dispersion feature in arbitrary direction of surface acoustic wave applied to property characterization of ultra-large-scale integrated circuit interconnect films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 2428-2433.
- [3] Zhang J Z. *Nondestructive Testing Technology and Its Application*[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [4] Arias I, Achenbach J D. A theoretical model for the ultrasonic detection of surface-breaking cracks with the scanning laser source technique[J]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2003, **20**(22A&22B): 281-288.
- [5] Cho Y H, Rose J L. An elastodynamic hybrid boundary element study for elastic guided wave interactions with a surface breaking defect[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, **37**(30): 4103-4124.
- [6] Wang J S, Xu X D, Liu X J, et al. A tunable acoustic filter made by periodical structured materials[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(18): 181908-1-181908-3.
- [7] Wang J S, Xu X D, Liu X J, et al. Low pass effect of surface defect metal based on laser ultrasonic[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12): 7765-7769.
- [8] Sokolova E S, Kovalev A S. Acoustic waves guided by the intersection of a surface and an interface of two elastic media [J]. *Wave Motion*, 2012, **49**(2): 388-393.
- [9] Fang G F, Li Y, et al. A novel concept of acousto-optic ring frequency shifters on silicon-on-insulator technology[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, **63**: 62-63.
- [10] Schneider D, Hofmann R, et al. Evaluating surface hardened steels by laser-acoustics[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, **206**(8-9): 2079-2088.

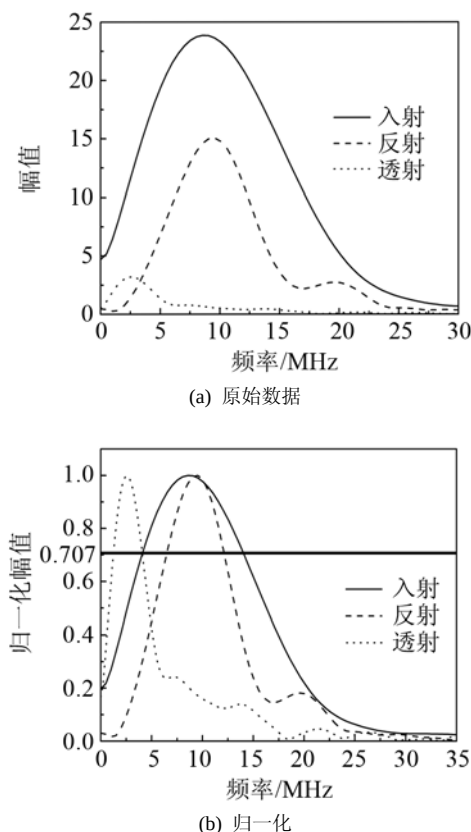


图 7 样品 A 中入射、反射和透射信号频响曲线
Fig.7 Frequency response curves of incident waves, reflection waves and transmission wave in sample A