# 测量　粗糙表面对兰姆波传播影响的测量

达米安·勒迪克[1], 布鲁诺·莫尔旺，帕斯卡尔·帕雷日，让-路易·伊兹比基超声声学与电子学实验室（*L.A.U.E.*），法国国家科学研究中心混合研究单位 *6068*，勒阿弗尔大学，罗伯特·舒曼广场，邮政信箱 4006，76610 勒阿弗尔，法国

摘要

本研究探讨了兰姆波对板粗糙度的敏感性。通过采用空气耦合换能器系统开展实验研究。利用信号处理提取兰姆波的特征参数：相速度和衰减。采用光学表面轮廓仪获取板表面的形貌。最后，将声学特性与表面形貌联系起来。

PACS：43.35.Cg，43.35.Zc.

关键词：兰姆波、粗糙表面、表面形貌。

## 1. 引言

如今，利用超声波控制胶粘接合已十分普遍（例如参见 [1]）。在大多数胶粘接头中，涂敷胶粘剂之前都会对基材表面进行处理，目的是提高接触界面的能量

[1] 通讯作者：电话：+332 32 74 47 18；传真：+332 32 74 47 19电子邮箱：damien.leduc@univ-lehavre.fr

区域。存在许多不同的化学处理或机械处理方法，其中大多数都旨在增加基材表面粗糙度。事实上，表面粗糙度的增加能够扩大物理接触面积，并提高粘接强度。若不理解粗糙度对超声波传播的影响，就无法通过声学方法评估接头质量。在粘接结构中，板的粗糙一侧位于界面处，因此，当然无法通过表面波（即瑞利波类型）直接评估该表面。这就是为什么兰姆波似乎是未来研究的合适选择。尽管这些波将从板的外侧激发，但它们可能使我们能够获取板的内侧粘接表面的信息。

许多研究探讨了粗糙度对流体-固体界面处超声波反射的影响（[2], [3]）。只有少数研究关注导波的传播（[4], [5]）。Brekhovskikh [6] 提出了一种分析方法，可预测瑞利波在周期性粗糙表面上传播时，在特定频带内的衰减。Chimenti 和 Lobkis [7] 表明，对于浸没板材，导波阻尼会随表面粗糙度和频率的增大而增加。然而，粗糙度不会影响兰姆波的相速度。

本研究通过空气耦合测量，对粗糙板上的兰姆波进行了实验研究。信号分析使我们能够提取兰姆波沿 x 方向传播时，在给定频率下的实部和虚部波矢分量。波数的实部给出波的相速度，而虚部则给出振幅衰减。我们将研究这些参数随粗糙度参数的变化。

$k_x$

$k_x'$

首先，研究多个样品的表面形貌。随后，在下一节中报告并讨论声学测量结果。最后，给出简要结论。

## 2. 表面形貌

### 2.1 研究样品的表征

研究样品为边长 200 mm、厚度为 d = *5* 毫米的玻璃板。测得的声学参数包括玻璃密度：2490 kg $m^{-3}$ ，以及横波和纵波速度：$c_T$ = *3485* m $s^{-1}$ 和 $c_L$ = *5825* m $s^{-1}$。除一块作为参考板的玻璃板外，其余玻璃板仅对一侧进行处理，以获得粗糙表面。所有样品的另一侧表面均无粗糙度，且完全相同：该表面作为参考表面。采用两种截然不同的技术来制备表面粗糙度：打磨和喷丸处理。我们可以借助光学表面轮廓仪观察所研究表面的形貌。分析的表面区域约为 25 $mm^2$。x 和 y 方向的分辨率为 5 μm，z 方向的分辨率为 10 nm。

### 2.2 使用光学轮廓仪进行表面定量评估

我们使用常用的统计参数 $R_a$、$R_q$ 和 $R_t$[8] 来表征粗糙度。

$R_a$ 称为粗糙度平均值；它是所测高度偏差绝对值的算术平均值。高度偏差 $Z_{ij}$ 是相对于平均表面测量的。$R_a$ 的数学表达式为：

$$R_a = \frac{1}{MN}\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}\left|Z_{ij}\right| \tag{1}$$

wh其中，M 和 N 分别是所分析表面在各个方向上的数据点数量 .

$R_q$，也称为均方根粗糙度（RMS），其计算方法是将评估区域内每个 $Z_{ij}$ 值平方，再取其平均值的平方根：

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} Z_{ij}^{\,2}} \tag{2}$$

$R_t$ 是最大峰谷高度，即表面最高点与最低点之间的垂直距离。四个研究样品的统计参数列于表1中。这些平均值是根据每块板上不同区域的六次采集计算得出的。如表1所示，粗糙度值涵盖了较大的$R_q$范围。

## 3. 声学测量

### 3.1 实验装置

图1所示为实验装置。脉冲发生器向 Panametrics™ 发射压电复合换能器施加一个非常短的脉冲电压（约300 V，持续300 ns）。通过楔块法产生兰姆波。接收换能器是 Sofratest™ 空气耦合压电换能器。空气耦合换能器检测再辐射信号。发射换能器保持不动，而接收换能器沿兰姆波的传播方向平移。对于此类研究，使用接收空气耦合换能器非常有意义。实验具有良好的可重复性，因为我们避免了换能器与样品接触所带来的所有问题（在测量过程中保持耦合凝胶的厚度和换能器上的压力不变）。此外，空气耦合测量可实现电动平移和自动数据采集。

两个换能器均置于非粗糙面上。位移振幅在 x = *10* mm 至 x = *90* mm 的范围内采集，步长为 0.1 mm（原点 x = *0* 对应楔块的位置）。对于空气耦合换能器的每个位置，均以 10000 个采样点采集一段时长为 200 μs 的信号。为提高信噪比，我们对连续采集的 1000 次信号进行了平均。

## 3.2 信号处理

图2展示了对时间信号先进行空间快速傅里叶变换、再进行时间快速傅里叶变换 [9] 的结果。由于采用脉冲激励产生波，我们获得了宽频带的兰姆波。接收端空气耦合换能器的带宽比发射端接触式换能器的带宽窄，因此能够检测厚度-频率积处于 5 至 15 MHz mm 范围内的信号。图中叠加了理论色散曲线与实验数据。可以识别出四种兰姆模态：A1 和 A2 反对称模态，以及 S1 和 S2 对称模态。参考样品（无粗糙度）的实验波数与理论波数接近。下一段将比较粗糙样品中兰姆波的波数与参考样品中的波数。

$$k_x'$$

### 3.2.1 不同表面粗糙度下兰姆波的演化

此前针对参考样品的研究现已应用于粗糙度逐渐增加的三块板材。我们注意到，对于粗糙度最高的样品，在以上没有激发任何模态。这可能是由于在粗糙板材中传播的高频模态受到衰减所致。在高频下，Lamb模态的波长

13f d 兆赫毫米 =

变得与粗糙度的尺寸相当。此时可能发生多重散射过程，因此无法检测到兰姆模态的传播。这就是比较仅针对前三个模态 A1、S1 和 A2 进行的原因。实验值是 ( $k_x'$ ,f)表示中信号的最大值。通过这种方式，我们评估了每个受研究样品的兰姆波值，并将其报告在图3a中。在给定频率下，各样品的实验值彼此接近。图3b显示了 S1 模态的结果：理论值与实验值之间的偏移随粗糙度增大而增大。

$k_x'$

$k_x'$

$k_x'$

$k_x'$

定义的相对差异为：

$$\frac{\Delta k_x'}{k_x'(ref)} = \frac{k_x'(rough) - k_x'(ref)}{k_x'(ref)} \tag{3}$$

粗糙样品与参考样品之间的相对差异见表 2。该差异不会因模态不同而显著变化，换言之，它与频移无关。不过，随着粗糙度增加，该差异也会增大，但其变化并非线性。事实上，喷丸处理板的 $R_q$ 系数是打磨板的 5 倍（表 1），而相对差异几乎相同。相反，喷丸处理板与强喷丸处理板之间的 $R_q$ 值大了两倍，相对差异则从 2 % 增至 4.6 %。对于两个最光滑的样品，相对差异的变化处于可检测范围内。对于最粗糙的板，其相对差异值超出了实验误差范围，因此可以得出结论：粗糙度较大时，确实会对该值产生影响。尽管如此，该值似乎并不是区分不同粗糙度的良好判据。下一段将研究粗糙度对兰姆波衰减的影响。

$k_x'$

$k_x'$

3.2.2 兰姆波衰减的比较

为了分离出单一模态以便进一步表征，采用空间短时傅里叶变换（STFT）。首先，对信号$s(x,t)$ 进行时间快速傅里叶变换，从而获得空间频率域中的 信号。随后，利用在整个空间域（80 毫米）内滑动的空间窗，分离出与所研究模态相对应的频率。对每个位置计算空间快速傅里叶变换，从而获得 信号。因此，可以在$(x,k)$空间中观察发射换能器与接收换能器之间的距离所对应的振幅衰减。

$$\tilde{s}_{xf}(k,f)$$

经过短时傅里叶变换处理后，得到各模态的振幅，并将其绘制在图4和图5中，以传播距离为横坐标。在图中，1级对应初始位置。对于给定的模态，这种归一化使我们能够比较不同板材的衰减。

首先，我们聚焦于一种特定模态，研究不同粗糙度下波振幅随传播距离 x 的演变（图4）。粗糙度较低时（$R_q < 6$ 微米），这种演变几乎呈线性。参考样品也存在衰减，其衰减程度与打磨样品相近。这主要是由于发射换能器尺寸有限而产生的衍射现象所致。值得注意的是，部分能量也会重新辐射至周围介质中。这种衰减可称为“表观衰减”。随着频率升高，衍射的影响减弱，但粗糙样品仍存在这种衰减。对于给定频率，衰减随粗糙度增大而增大（图4a、4b和4c）。这一现象已针对每种所研究的模态通过实验加以验证。

其次，图5展示了选定粗糙度下不同模态的振幅演变。我们注意到，频率越高，衰减越大。例如，传播距离为70毫米时，喷丸处理板的衰减从3.5分贝（5.9兆赫·毫米）增至6.9分贝（13.1兆赫·毫米）。因此，在高频范围内，对粗糙度的敏感性更强。

作为部分结论，与数值相反，衰减似乎是区分不同粗糙度的良好参数。$R_x$

## 4. 结论

在首先确定表面形貌、其次研究粗糙度对超声波的影响之后，我们将这两部分工作结合起来。正如第3.2.1节所述，数值仅受到算术平均粗糙度参数的轻微影响，而衰减则被选作一种有效的声学参数。因此，我们绘制了给定兰姆模态下衰减与统计粗糙度参数之间的关系（图6）。这种表示方式明确地关联了声学参数与表面形貌。显然，要获得校准曲线，还需要开展一项涵盖更多样品且粗糙度范围更广的大规模研究。$k'_z$

未来的工作将研究粘接界面，以评估粗糙度对粘接质量的影响。

## 致谢

作者谨向 Pascal Rembert 致谢，感谢其提供 Matlab™ 方面的帮助；感谢 Liot Techni-verres 提供样品；感谢 CRITT Analyses and Surfaces 提供表面形貌数据。

参考文献

[1] Guyott CCH、Cawley P、Adams RD。胶粘结构的无损检测：综述。《粘接学报》1986；20：129-159。[2] Nagy PB、Adler L。表面粗糙度引起的反射与透射超声波衰减。《美国声学学会杂志》1987；82(1)：193-197。[3] Boyd ML、Deavenport RL。粗糙表面的前向散射与镜面散射：理论与实验。《美国声学学会杂志》1972；53(3)：791-800。[4] Nagy PB、Adler L。利用导波对粘接接头进行无损评估。《应用物理杂志》1989；66(10)：4658-4663。

[5] Kundu T、Maslov K、Karpur P、Matikas TE、Nicolaou PD。利用兰姆波扫描法绘制 [0/90] 钛基复合材料中的缺陷分布图。Ultrasonics 1996；34：43–49。

[6] Brekhovskikh LM，弹性体不平整边界上的表面瑞利波传播。《苏联声学物理学》1960；5：288-295。[7] Chimenti DE，Lobkis OI。粗糙表面对板材中导波的影响。《超声学》1998；36：155-162。[8] ASME B46.1-1995 表面纹理、表面粗糙度、波纹度和纹理方向。美国机械工程师学会。

机械工程师学会，1995 年。

[9] Alleyne D，Cawley P. 一种用于测量传播多模态信号的二维傅里叶变换方法。《美国声学学会杂志》1991；89(3)：1159–1168。

表格标题

表 1：研究样品的粗糙度统计参数。

表 2： 粗糙样品与参考样品之间的相对差值。对于强喷丸处理样品，$\hat{x}$ S2 模态的衰减过于严重。

# 图注

图1：实验装置。

图2：参考样品在对偶空间 (k,f) 中的信号表示。曲线对应理论色散曲线：实线表示反对称模态，点线表示对称模态。实验数据以灰度显示。它们与理论数据几乎重合。

图3：不同样品的比较：$k_x'$

a. 对于给定模态，无论样品如何，其数值几乎保持不变。b. S1 模态数值的放大图。数值呈现出轻微变化，但该变化与实验误差处于同一数量级。$k_x$

$k_x'$

图4：兰姆波衰减随传播距离的变化：

a. A1模式，b. S1
模态，c. A2 模式。

图5：喷丸处理板在多个频率下兰姆波衰减的变化。

图6：不同传播距离下（x = 30，50或70毫米），声学归一化振幅随 $R_q$ 表面参数的变化：

a. A1模式，
b. S1 模态，
c. A2 模式。

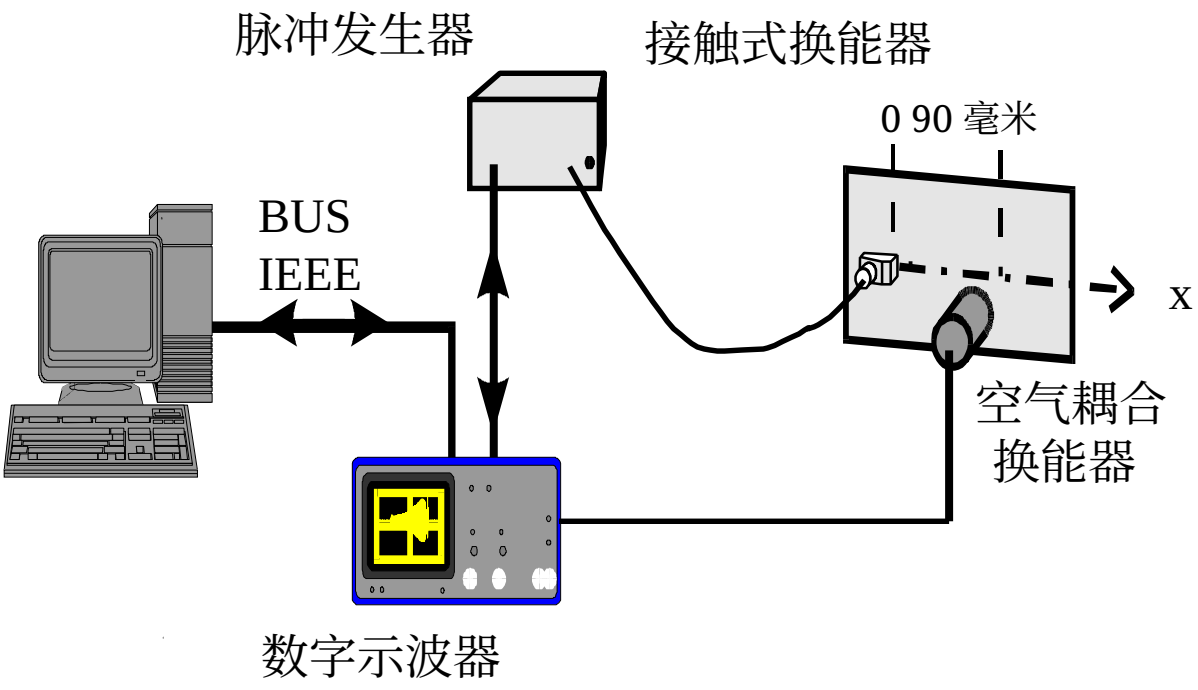
表 1

| | Ra （μm） | Rq(μm) | Rt (μm) |
|---|---|---|---|
| **non** 处理过的 | < 0.01 | < 0.01 | 0.10 |
| 打磨处理 | 4.8 | 6.0 | 39.8 |
| **shot** 喷砂处理 | 23.3 | 29.8 | 202 |
| 强 **shot** 喷砂处理 | 52.4 | 67.4 | 573 |

表 2

| | $\frac{x - x_{ref}}{x_{ref}}$ (%) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 打磨处理 | 喷丸处理 | 强烈的镜头效果 喷砂的 |
| **mode** | **A1** | 2.0 | 2.1 | 4.5 |
| | **S1** | 2.0 | 2.5 | 4.6 |
| | **A2** | 2.1 | 2.2 | 4.4 |
| | **S2** | 2.1 | 2.4 | X |

图 1


脉冲发生器
接触式换能器
0 90 毫米
BUS
IEEE
x
空气耦合
换能器
数字示波器

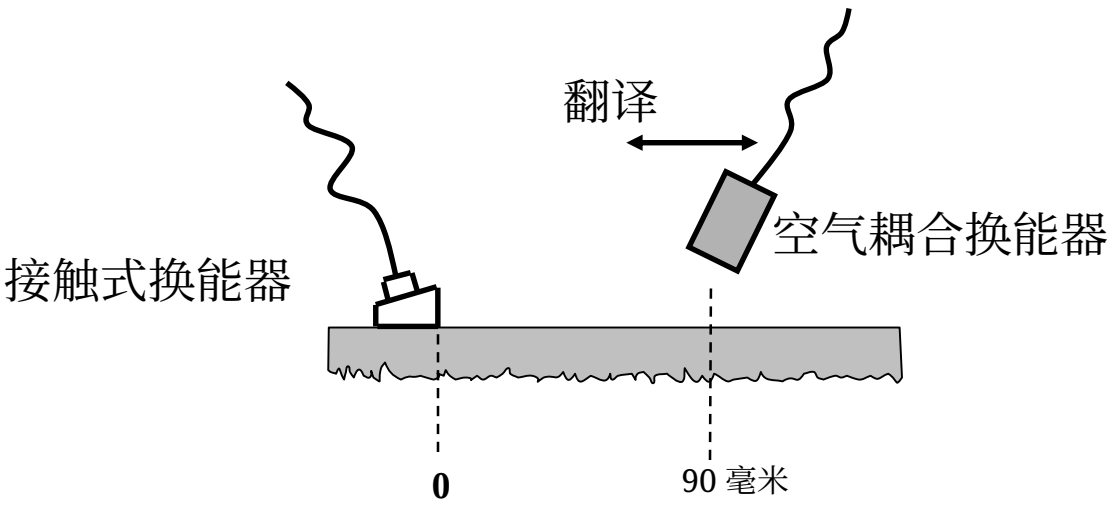

翻译
空气耦合换能器
接触式换能器
0
90 毫米

图2

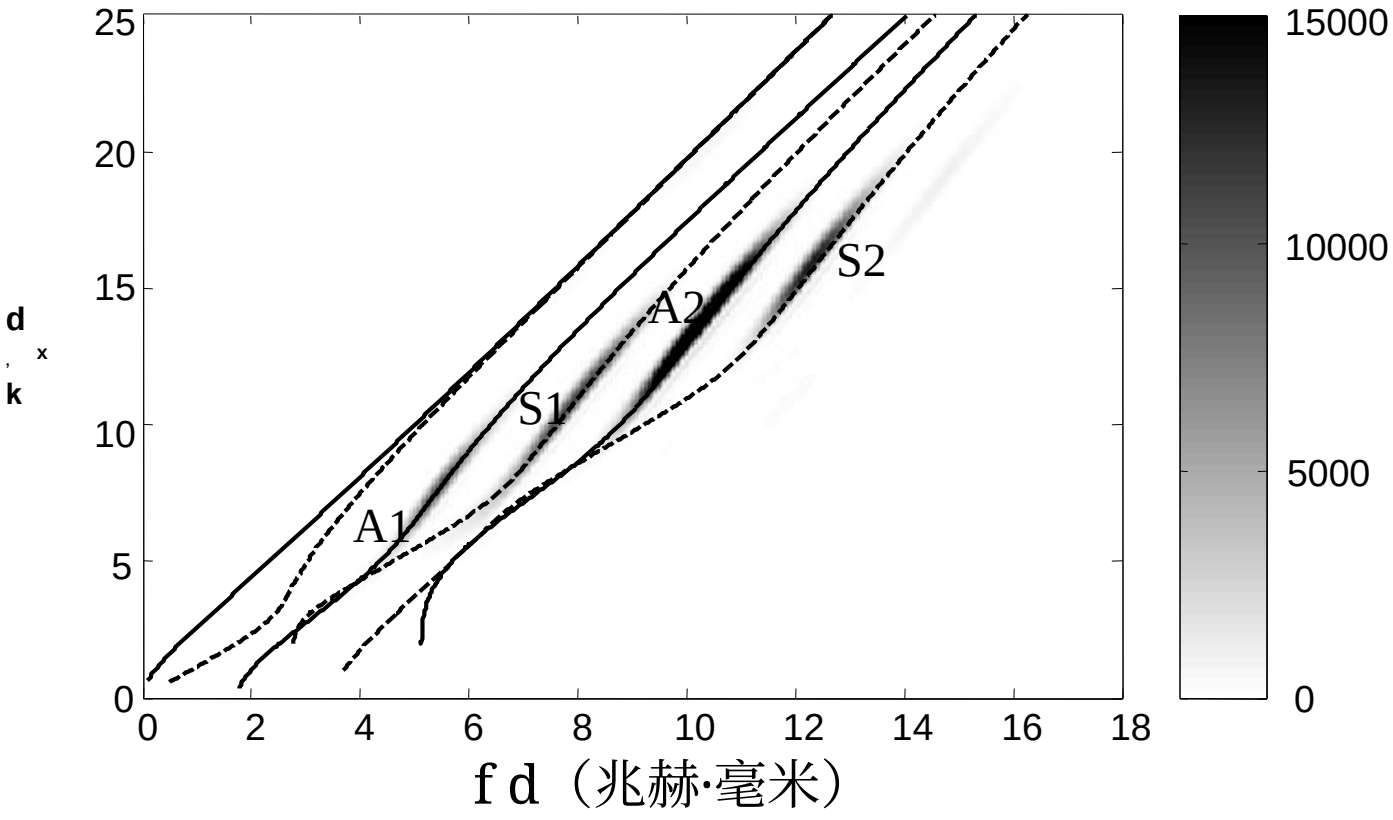
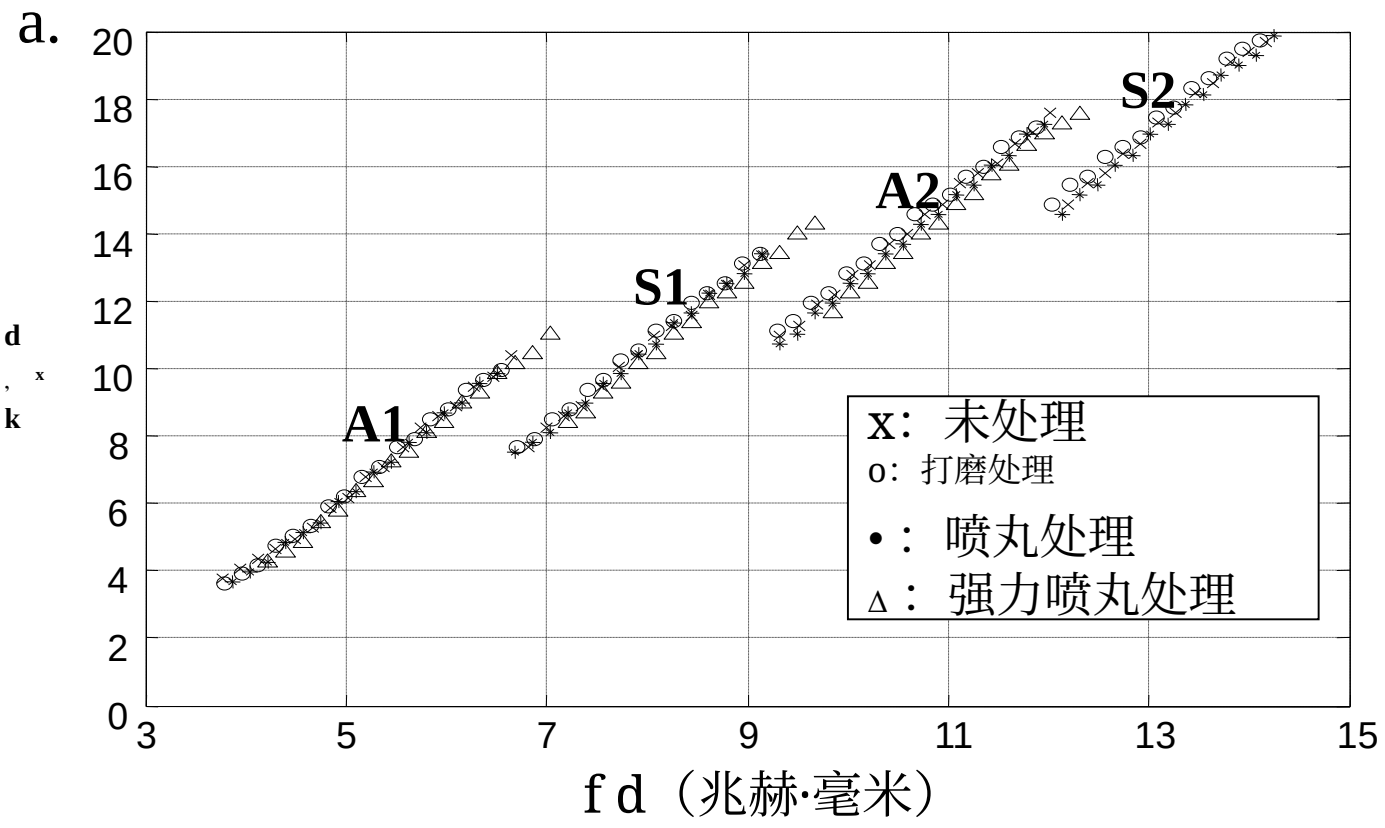

25
20
15
10
5
0
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
d
x
k
A1
S1
A2
S2
15000
10000
5000
0
f d（兆赫·毫米）

图 3


a.
A1
S1
A2
S2
x：未处理
o：打磨处理
•：喷丸处理
△：强力喷丸处理
f d（兆赫·毫米）

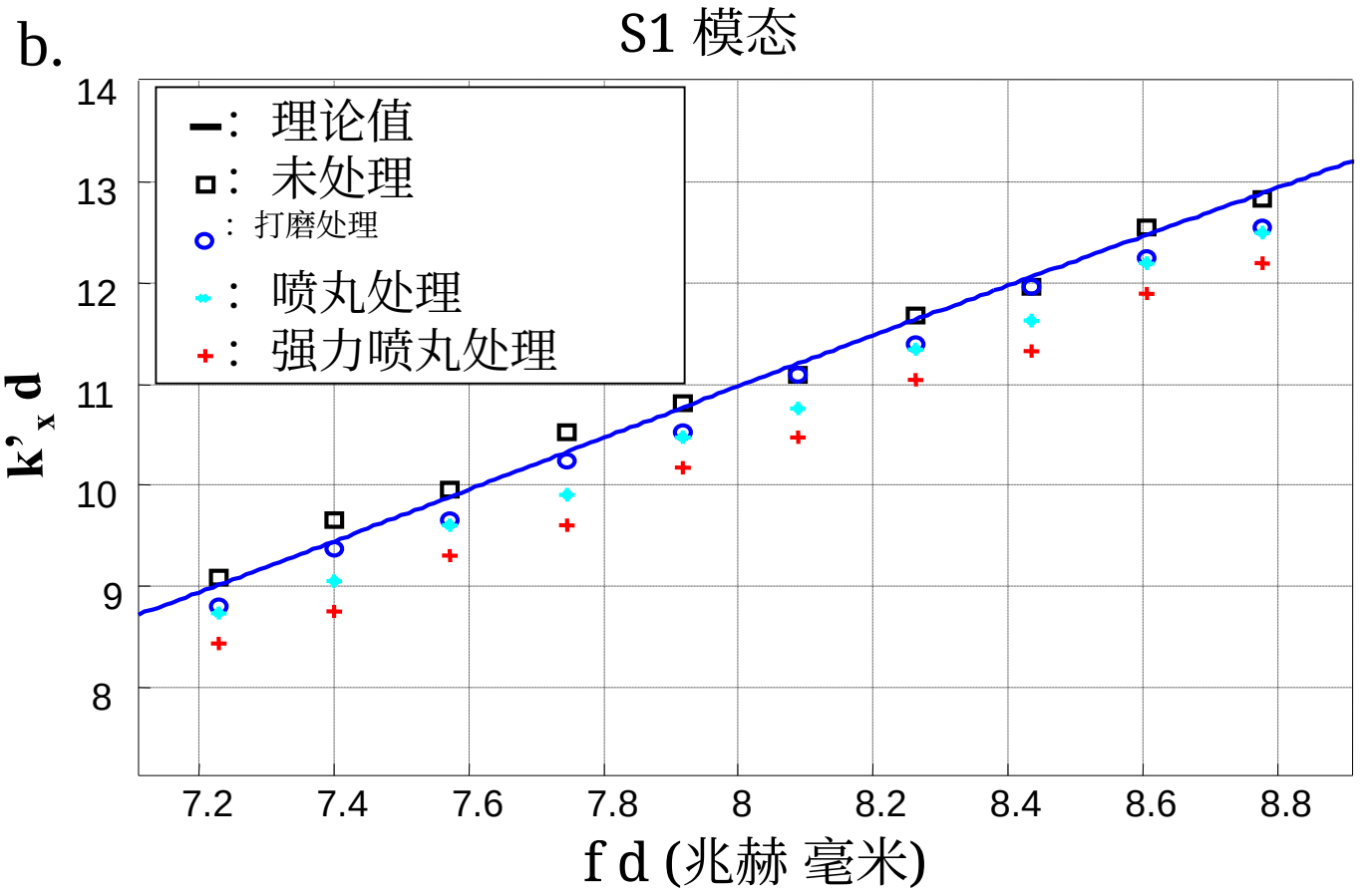
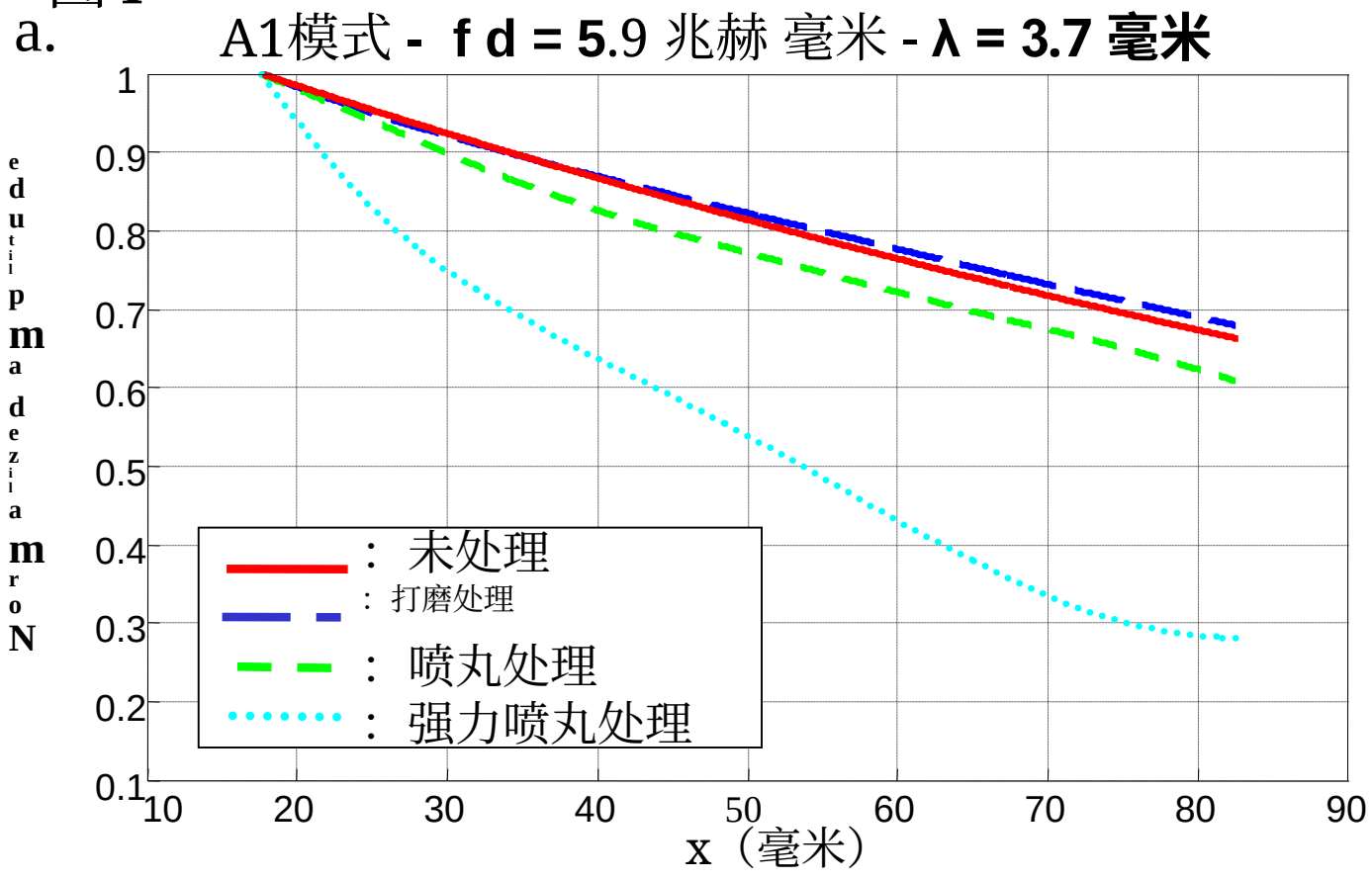
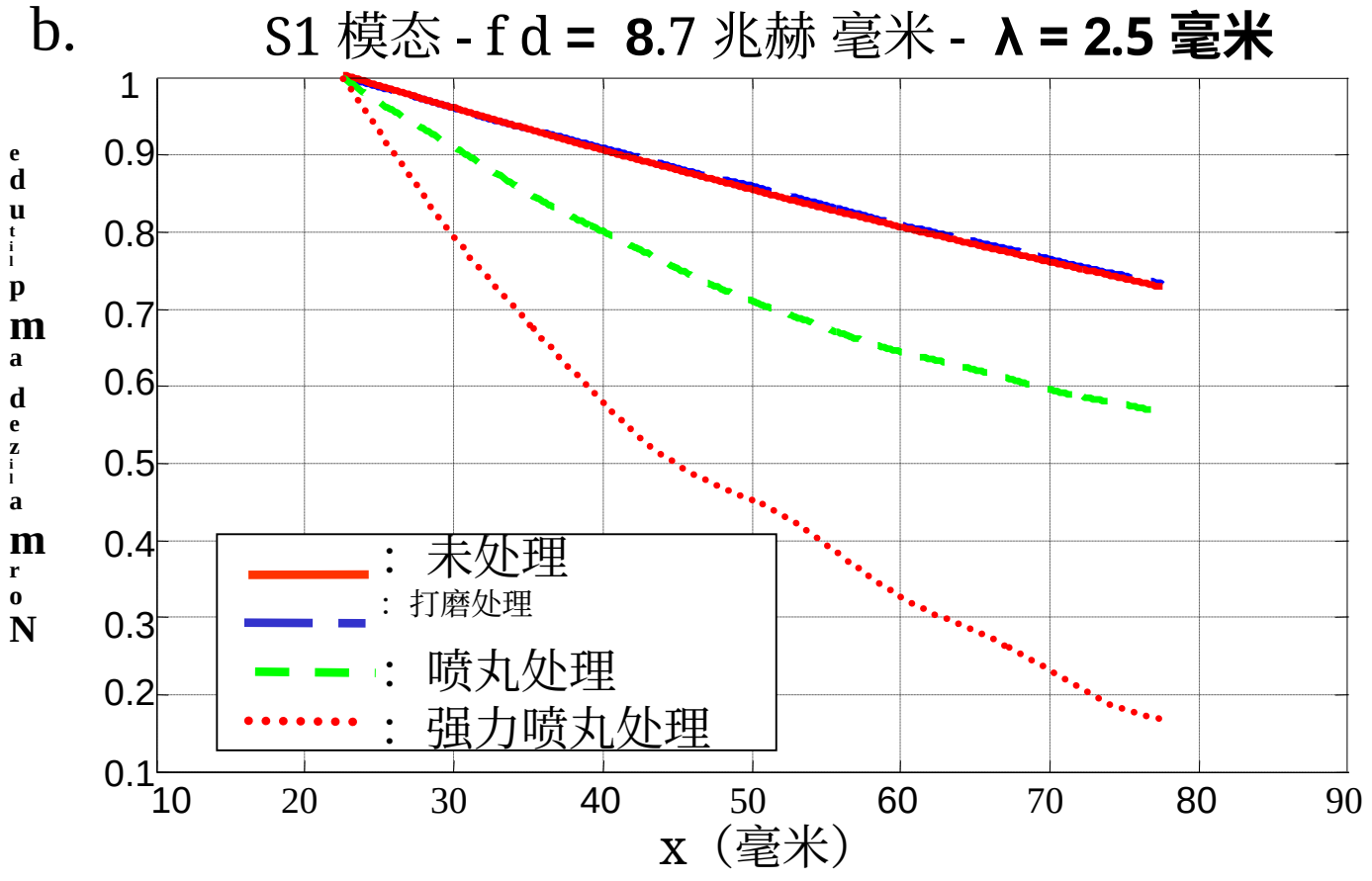

b.
S1 模态
—：理论值
□：未处理
○：打磨处理
：喷丸处理
+：强力喷丸处理
f d (兆赫 毫米)

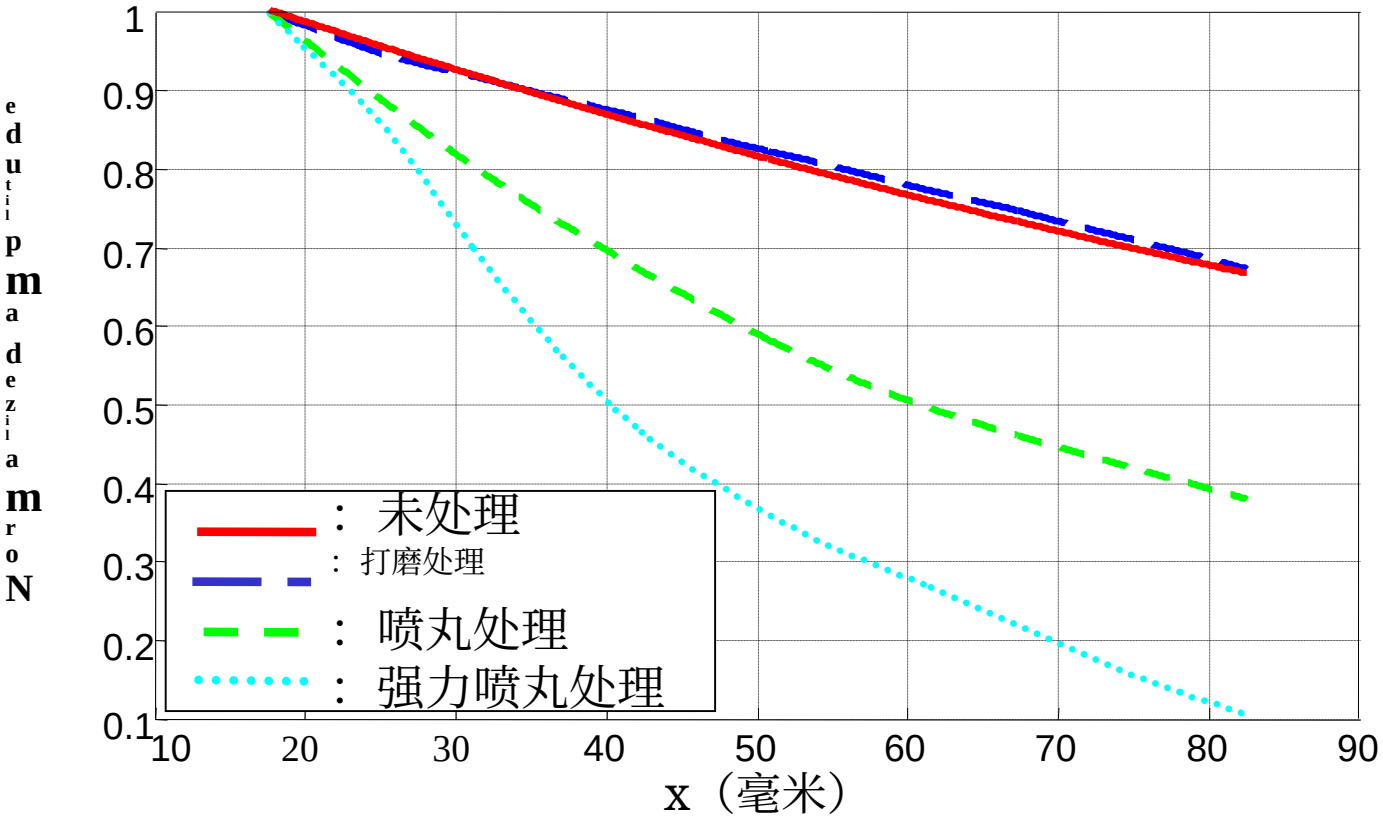
图4

a.


A1模式 - f d = 5.9 兆赫 毫米 - λ = 3.7 毫米
edutilpmadezialmroN
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
10
20
30
40
50
60
70
80
90
x（毫米）
：未处理
：打磨处理
：喷丸处理
：强力喷丸处理

b.


S1 模态 - f d = 8.7 兆赫 毫米 - λ = 2.5 毫米
edutilpmadezialmroN
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
10
20
30
40
50
60
70
80
90
x（毫米）
：未处理
：打磨处理
：喷丸处理
：强力喷丸处理



c.
A2 模式 -f d = 10.8 兆赫 毫米 - λ = 2.1 毫米
Normalized Amplitude
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
10
20
30
40
50
60
70
80
90
x（毫米）
：未处理
：打磨处理
：喷丸处理
：强力喷丸处理

图 5

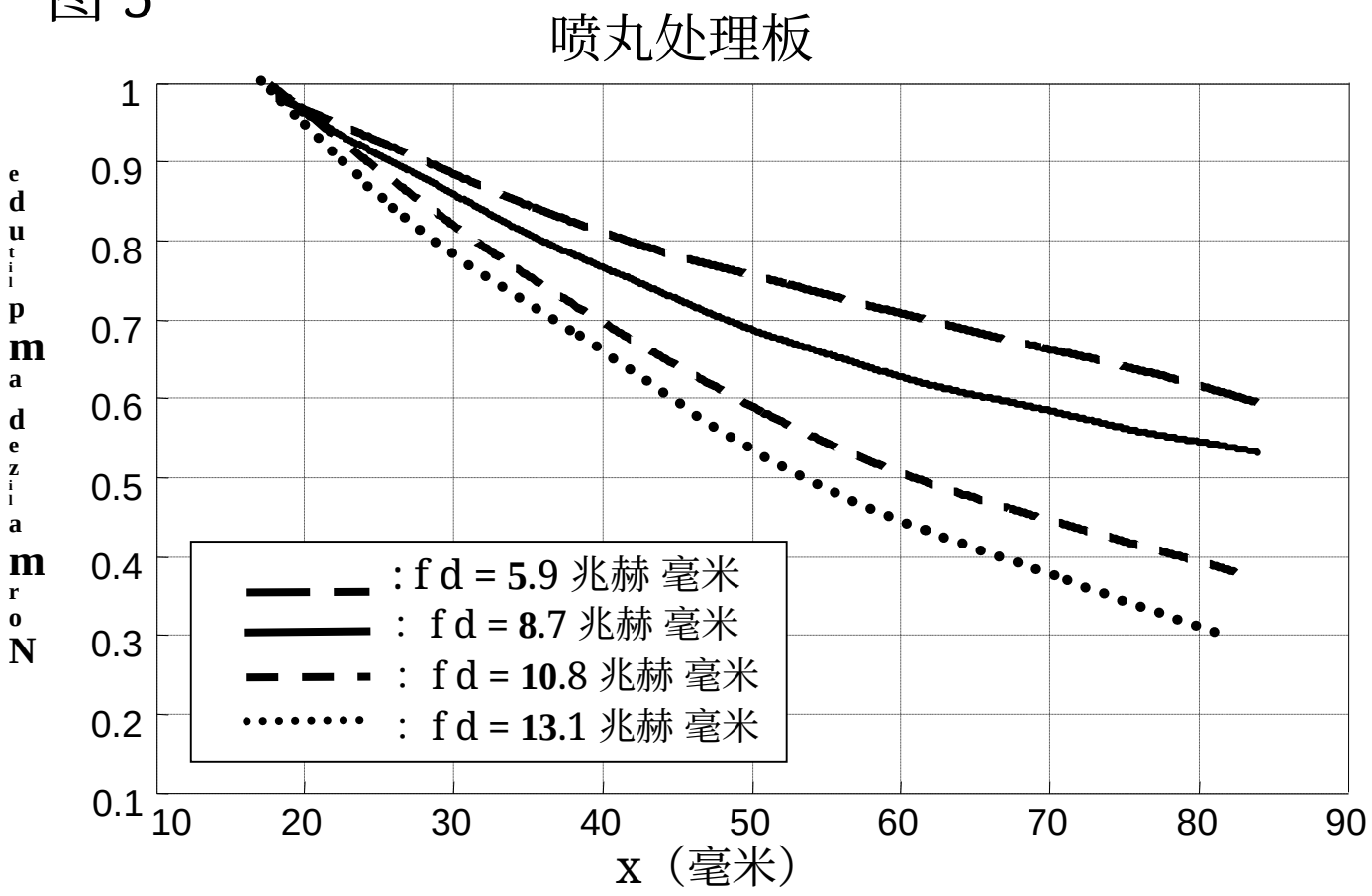
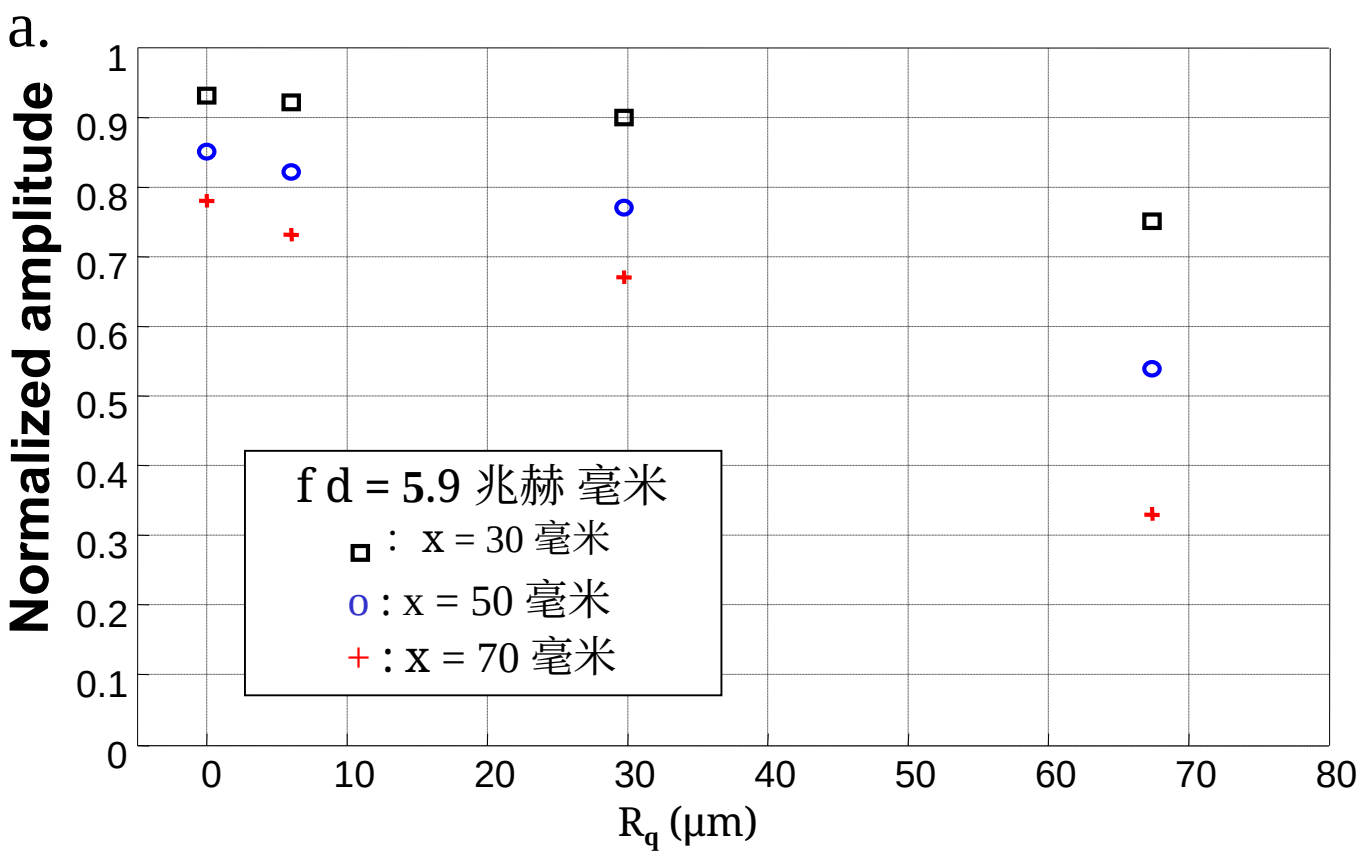
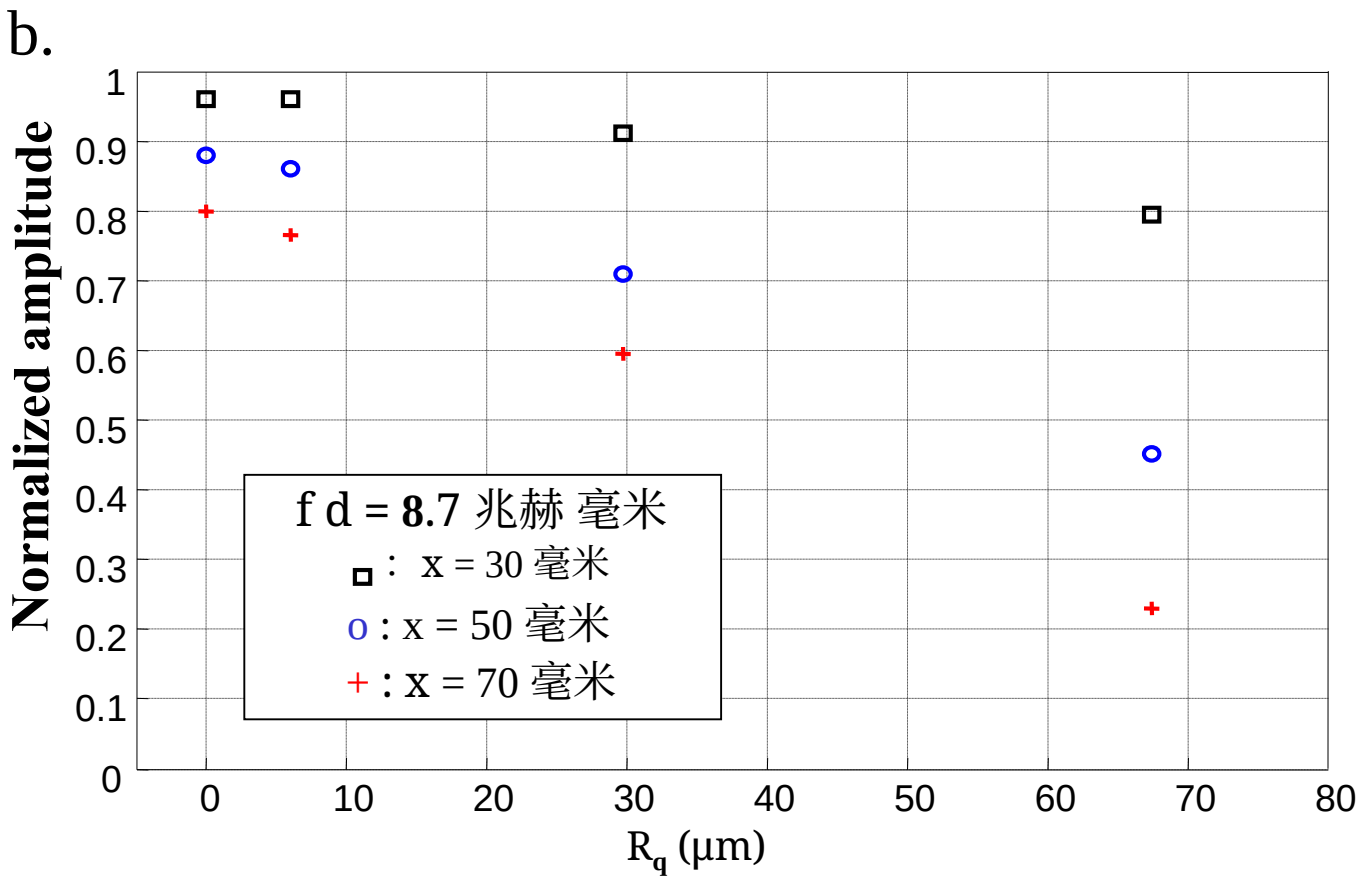
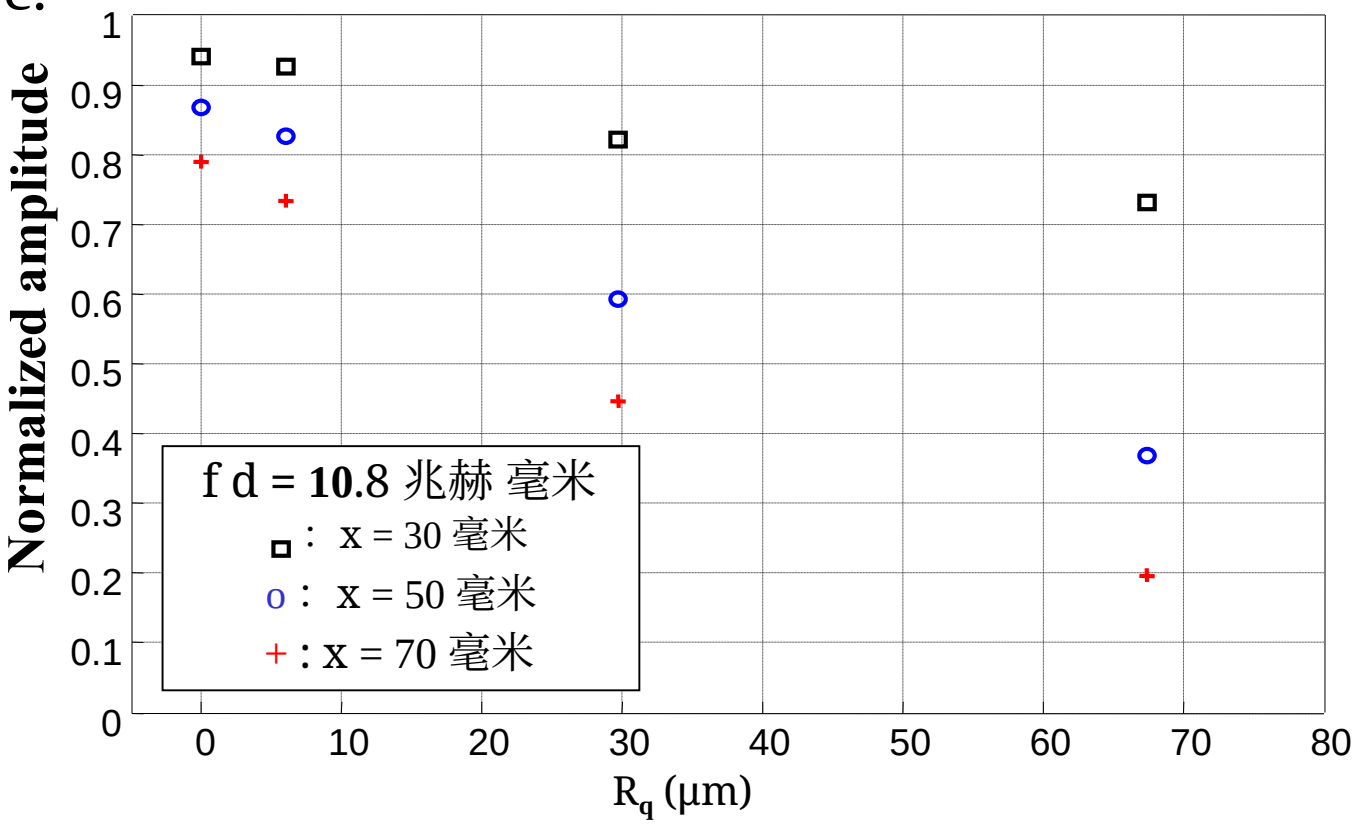

喷丸处理板
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
10
20
30
40
50
60
70
80
90
x（毫米）
: f d = 5.9 兆赫 毫米
: f d = 8.7 兆赫 毫米
: f d = 10.8 兆赫 毫米
: f d = 13.1 兆赫 毫米

图6


a.
Normalized amplitude
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
$R_q$ (μm)
f d = 5.9 兆赫 毫米
□ : x = 30 毫米
o : x = 50 毫米
+ : x = 70 毫米


b.
Normalized amplitude
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
$R_q$ (μm)
f d = 8.7 兆赫 毫米
□ : x = 30 毫米
o : x = 50 毫米
+ : x = 70 毫米

C.


Normalized amplitude
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
$R_q$ (μm)
f d = 10.8 兆赫 毫米
□： x = 30 毫米
o： x = 50 毫米
+ : x = 70 毫米