

矩形铝板 2.52 THz 后向散射强度测量研究

樊长坤, 李琦, 赵永蓬, 陈德应

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 太赫兹后向散射强度是描述目标对太赫兹散射能力的一个重要参数。首先通过测量校准目标验证了 2.52 THz 后向散射特性测量系统的可行性, 并测得了系统的信噪比。在此基础上, 对 6 种尺寸铣削和喷砂加工矩形铝板的相对后向散射强度进行测量, 测量范围为 $0^\circ \sim 3^\circ$ 。实验结果表明: 测量的最大动态范围为 32.25 dB; 不同尺寸喷砂铝板的相对后向散射强度之差较铣削铝板更明显; 在 0° 处, 相同表面积的铣削和喷砂铝板回波的平均偏差分别约为 1.35 dB 和 0.51 dB。

关键词 散射; 后向散射; 太赫兹; 散射测量; 粗糙度

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1214001

Measurement for 2.52 THz Back Scattering Intensity of Rectangular Aluminum Plate

Fan Changkun, Li Qi, Zhao Yongpeng, Chen Deying

State Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract Terahertz back scattering intensity is a very important index to represent the scattering ability of targets to terahertz. Firstly, the feasibility of 2.52 THz back scattering properties measurement system is proved by the measurement of the calibration target, and the signal-to-noise ratio of the system is measured. The relative back scattering intensities of rectangular milling and sand blasting aluminum plate with six kinds of sizes are measured in the measurement range of $0^\circ \sim 3^\circ$. The experiment results show that the measured maximum dynamic range is 32.25 dB, back scattering intensity difference between sand blasting aluminum plate with different sizes is more obvious than that between milling aluminum plate, the average errors of milling and sand blasting aluminum plates with same surface area at 0° are 1.35 dB and 0.51 dB, respectively.

Key words scattering; back scattering; terahertz; scattering measurement; roughness

OCIS codes 290.1350; 120.5820; 120.6660

1 引 言

太赫兹技术作为一个新兴的研究内容, 近些年已成为国内外专家研究的重点课题^[1-2], 其中太赫兹后向散射特性的研究受到了广泛关注^[3-5]。目前, 太赫兹后向散射测量的目标主要包括不同形状的标准体和复杂体的缩比模型。其中, 标准体主要包括圆柱体、方板、圆盘和球体等^[5-10], 复杂体主要军用飞机、坦克和战舰等^[11-14]。McGowan 等^[6]利用太赫兹时域光谱系统对圆柱体进行了测量, 该系统波长范围为 0.2~1.4 THz, 圆柱体直径分别为 3 mm 和 6.36 mm; 实验结果与理论计算结果比较吻合。Jansen 等^[7]利用频率分别为 0.3, 0.5, 1 THz 的测量系统对边长为 15 mm 的金属方板进行了实验; 同时运用物理光学法对边长为 30 mm

收稿日期: 2017-06-22; **收到修改稿日期:** 2017-08-09

作者简介: 樊长坤(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹散射特性测量方面的研究。

E-mail: hit_fanchangkun@qq.com

导师简介: 李琦(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光雷达及太赫兹成像方面的研究。

E-mail: liqi2013@hit.edu.cn(通信联系人)

的金属板进行了仿真计算。杨洋等^[8]对球体目标在微波、红外、太赫兹等不同波段的雷达散射截面进行了探讨;之后又利用反波管振荡器源搭建的206.2 GHz测量系统对圆形粗糙铝平板进行了测量,圆板直径为3 mm,测量范围为 $0^{\circ}\sim 12^{\circ}$,扫描步长为 1° ^[9]。蒋彦雯等^[10]基于太赫兹时域光谱系统对光滑和粗糙圆柱体的雷达散射截面进行了研究。美国亚毫米波技术实验室采用CO₂激光抽运气体激光器完成了飞机、坦克等缩比模型的成像实验^[11-12]。梁达川等^[14]利用钛宝石飞秒激光器搭建的0.1~1.3 THz宽频时域太赫兹雷达系统测量了装甲车模型、辽宁号航空母舰模型和F-22隐形战斗机模型。

本课题组曾搭建了频率为2.52 THz的目标散射特性测量系统,并利用该系统测量了不同粗糙度(1.6, 3.2, 6.3, 12.5 μm)和不同尺寸(40 mm \times 40 mm, 45 mm \times 45 mm)的铣削加工铝方板^[15];实验结果表明,相同尺寸不同粗糙度铝板的后向散射强度最大值变化很小,随着粗糙度增大,后向散射强度从高点下降,斜率有增大的趋势。

目前,尚未有人针对不同粗糙度铣削和喷砂加工矩形板的2.52 THz后向散射特性测量开展研究,而且面积相同但高度不同的目标的后向散射特性也尚未有文献报道。因此,本课题组利用已搭建好的2.52 THz后向散射特性测量系统对以上提及的2类加工方式的4种粗糙度、6种尺寸矩形铝板进行测量。为了进一步验证系统的可行性,首先对校准目标进行测试。另外,对测量系统的信噪比也进行了测量。

2 测量系统介绍

2.52 THz后向散射特性测量装置如图1所示^[15]。在实验中,选择工作频率为2.52 THz的SIFIR-50激光器作为太赫兹光源。光束经过准直放大系统后的束宽约为100 mm,目标(T)散射回波由离轴抛物面镜P5聚焦到单元高莱探测器上,由数据采集卡读取数据。离轴抛物面镜P4至目标距离约为1200 mm。增添校准物(CT)是为了降低激光器输出功率波动和背景噪声对测量结果的影响。由于实验中不可能完全 0° 角接收后向散射信号,此系统入射光路与收集光路的夹角约为 6.5° ,测量结果中的 0° 对应收集光路的光轴方向;实验中微调目标下的精密运动平台,当回波最大时夹角视为 0° 。因此,本系统测得的后向散射是与入射目标波束约成 6.5° 夹角的结果。利用探测器测得目标处光斑均值和标准偏差分别为35 mV和12 mV。

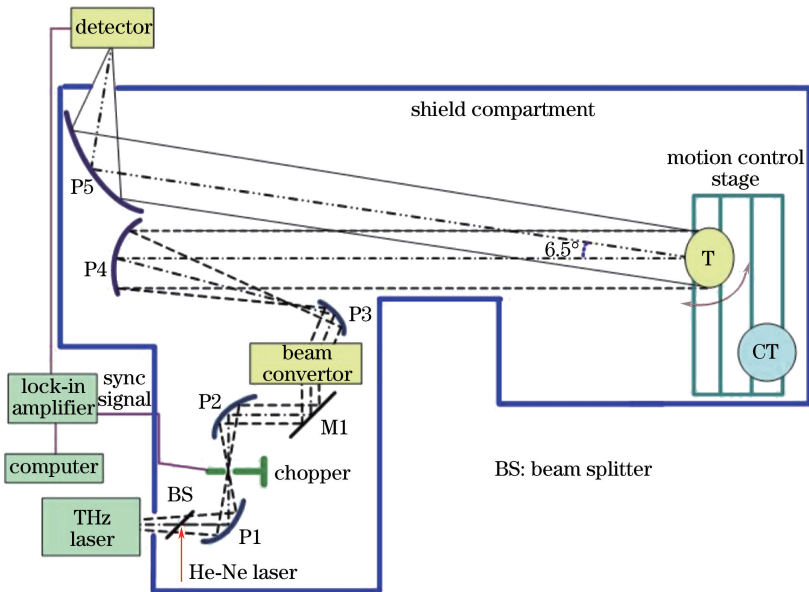


图1 测量装置图^[15]

Fig. 1 Schematic of measurement setup^[15]

采用本课题组编写的计算机软件控制目标体、校准物的移动和转动,以及数据的采集^[16],控制测量软件总界面如图2所示。在输入测量角度范围和测量步长后,该软件可根据预设步骤自动移动物体,并对信号进行采集。可以设定斩波器频率、采样倍率、幅值选择和测量次数等参数。

通过旋转目标改变回波角度,在每个角度下多次测得校准目标和待测目标的散射回波,并计算其各自的

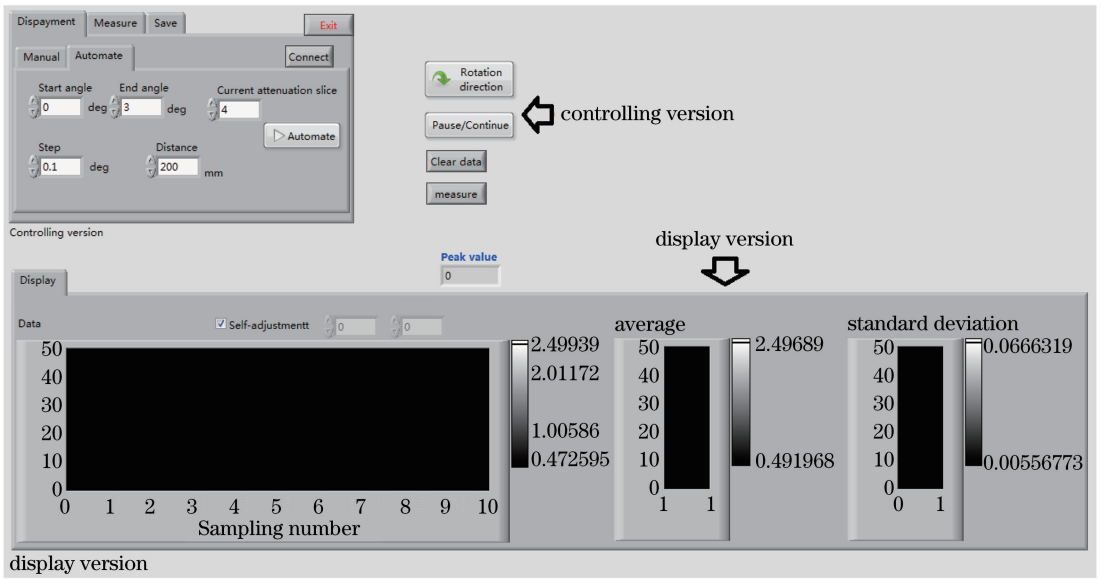


图 2 控制测量软件总界面^[16]

Fig. 2 Total interface of controlling measurement software^[16]

平均值 S_n 和 S_o ，以及相应的标准偏差 V_n 和 V_o 。最后，采用表达式

$$\sigma = 10\lg(S_o/S_n), \tag{1}$$

$$V = \frac{10}{\ln 10} \sqrt{\frac{1}{S_n^2} V_o^2 + \frac{S_o^2}{S_n^4} V_n^2} \tag{2}$$

计算待测目标的相对散射强度 σ 和标准差 V ^[15]。

3 系统性能的测量

3.1 校准物的测量

实验中校准物选取直径 D 为 50 mm 的铝质小球。为了验证校准物的准确性以及整个测量系统的可行性，对直径分别为 50, 55, 60, 65, 70 mm 的球体进行测量。实验中对每个球体进行 5 次测量，所得电压 U 的平均值和标准差如图 3 中的点及误差棒所示。

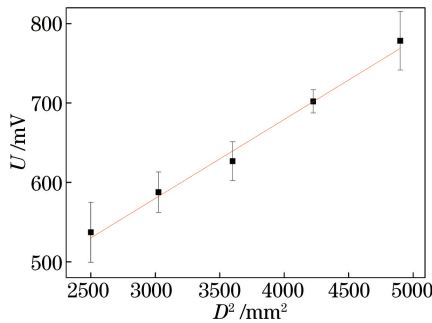


图 3 不同直径球体的测量结果

Fig. 3 Measurements result of balls with different diameters

后向散射强度和散射电磁场的功率是线性关系，而实验中探测器所测电压值 U 与入射到探测器的电磁场的功率成正比，因此 U 正比于后向散射强度。根据 Mie 理论，当波数 k 与小球半径 r 乘积远大于 1 时，即 $kr \gg 1$ 时，铝质小球的后散射强度 $\sigma_o = \pi r^2$ ，即后向散射强度正比于小球直径 D ，所以 $U \propto D^2$ 。

对图 3 的点进行线性拟合，得到的拟合曲线(见图 3 中的红线)表达式为 $f(x) = 0.09984x + 282$ 。从拟合优度分析可知，误差平方和为 313，复相关系数为 0.9914，均方根误差为 10.21。由此可见此拟合曲线能很

好地拟合所测数据。

结合拟合曲线图像和拟合优度分析可以看出,在误差允许范围内,不同直径小球的回波强度与直径的平方成正比关系。这也验证了此测量系统的可行性。

3.2 系统信噪比的测量

对实验装置的校准物进行信噪比测量。首先测量 10 次校准物小球散射回波信号强度,求其平均值并记为 S_a ,标准差为 V_s 。将校准物小球移走,测量 10 次背景噪声,求其平均值并记为 N_a ,标准差为 V_n 。故信噪比 $R_{SN} = 10\lg(S_a/N_a)$,信噪比误差为

$$V_{SN} = \frac{10}{\ln 10} \sqrt{\frac{V_s^2}{N_a^2} + \frac{S_a^2}{N_a^4} V_n^2} \quad (3)$$

对校准物小球的信噪比进行了 10 组测量,计算得到了信噪比及信噪比误差,如表 1 所示。可以看出,此测量系统的平均信噪比为 6.28 dB,最小信噪比为 6.10 dB,信噪比的测量最大误差为 0.40 dB。

表 1 校准物信噪比的测量结果

Table 1 Measurement results of signal to noise ratio for calibrator

Number	Signal-to-noise ratio /dB	Error /dB
1	6.45	0.35
2	6.44	0.30
3	6.42	0.28
4	6.12	0.20
5	6.23	0.34
6	6.10	0.35
7	6.47	0.31
8	6.23	0.27
9	6.14	0.40
10	6.19	0.31
Average	6.28	0.31

4 实验结果及分析

实验中采用厚度均为 3 mm 的 6 种尺寸的矩形铝板进行实验,铝板的表面尺寸分别为 40 mm×60 mm、60 mm×40 mm、40 mm×70 mm、70 mm×40 mm、50 mm×80 mm 和 80 mm×50 mm。分别采用铣削和喷砂两种加工方法对铝板表面进行处理,制成粗糙度分别为 1.6,3.2,6.3,12.5 μm 的表面。测量时,目标沿乘号前的边长的中线转动。实验中目标的扫描范围均为 $0^\circ \sim 3^\circ$,扫描步长为 0.2° 。

4.1 铣削铝板表面的测量结果

首先,对铣削铝板表面的相对后向散射强度 σ 进行测量。图 4 给出 4 种粗糙度铣削铝板(60 mm×40 mm)的实物照片。矩形板下方突出部分是为了方便夹具夹持铝板而预留的,不会被测量。测量时,沿 60 mm 长边的中线转动。从图 4 中可以看出,铝板表面上除了铣削加工的纹理外,还有轻微的划痕或斑印。本课题组所用铣削加工铝板上的纹理均沿着长边方向。

实验测量了不同尺寸铣削铝板的 2.52 THz 相对后向散射强度曲线(σ 曲线),结果分别如图 5 所示。在 60 mm×40 mm 铣削铝板的 σ 曲线中,不同粗糙度铝板的 σ 曲线在开始部分重合得较好;但在末端时,1.6 μm 铝板的曲线明显低于其他曲线,低约 3 dB。在 40 mm×60 mm 铝板的 σ 曲线中,中间部分出现了分离,6.3 μm 和 1.6 μm 铝板的曲线与其他曲线约相差 4 dB。在 70 mm×40 mm 铝板的 σ 曲线中,12.5 μm 铝板的曲线在中间部分比 1.6 μm 和 3.2 μm 铝板的曲线低约 6 dB,6.3 μm 铝板的曲线在中间部分比 1.6 μm 和 3.2 μm 铝板的曲线低约 2 dB。在 40 mm×70 mm 铝板的 σ 曲线中,大部分曲线基本重合,12.5 μm 铝板在 $0.5^\circ \sim 1.5^\circ$ 之间的曲线比另外三条曲线低约 5 dB。在 80 mm×50 mm 铝板的 σ 曲线中,几条曲线基本重合,没有曲线明显高于或低于其他曲线。在 50 mm×80 mm 铝板的 σ 曲线中,3.2 μm 铝板的曲线在中间部

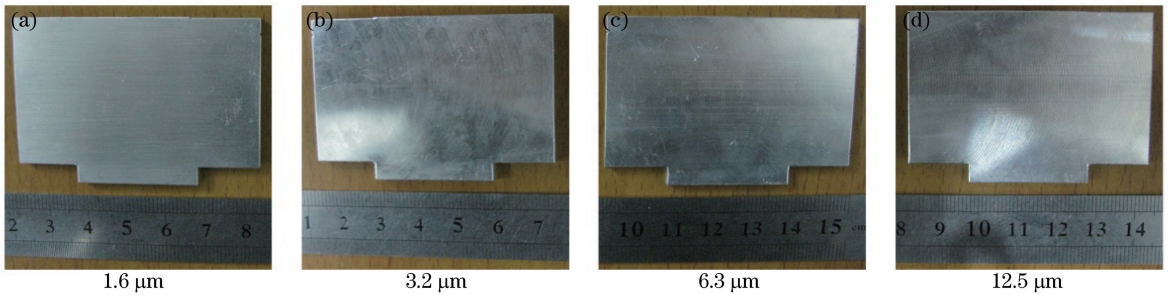


图 4 不同粗糙度铣削铝板(60 mm×40 mm)的照片

Fig. 4 Photographs of milling plates (60 mm×40 mm) with different roughnesses

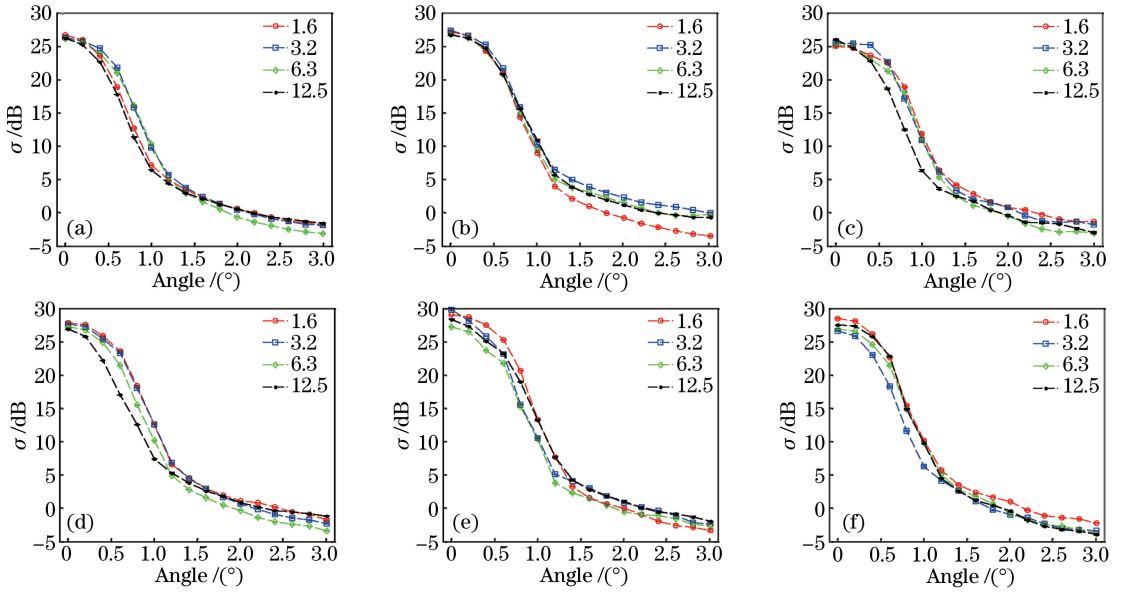


图 5 不同尺寸铣削铝板的 σ 曲线。(a) 60 mm×40 mm; (b) 40 mm×60 mm; (c) 70 mm×40 mm; (d) 40 mm×70 mm; (e) 80 mm×50 mm; (f) 50 mm×80 mm

Fig. 5 Relative back scattering intensity curves of milling aluminum plate with different sizes. (a) 60 mm×40 mm; (b) 40 mm×60 mm; (c) 70 mm×40 mm; (d) 40 mm×70 mm; (e) 80 mm×50 mm; (f) 50 mm×80 mm

分比其他曲线低约 4 dB, 1.6 μm 铝板曲线在最后部分比其他曲线高约 2 dB。

不同粗糙度铣削铝板的 σ 曲线如图 6 所示。当粗糙度为 1.6 μm 时, 60 mm×40 mm 和 40 mm×60 mm 铣削铝板的最大 σ 分别为 27.11 dB 和 26.79 dB, 相差 0.32 dB; 70 mm×40 mm 和 40 mm×70 mm 铣削铝板的最大 σ 分别为 27.88 dB 和 24.75 dB, 相差 3.13 dB; 80 mm×50 mm 和 50 mm×80 mm 铝板的最大 σ 分别为 28.99 dB 和 28.37 dB, 相差 0.62 dB。显然, 在相同的表面积下, 沿长边中心线旋转的目标散射回波强于沿短边中心线旋转的结果。造成偏差的主要原因可能是铣削加工的条纹不均匀和照射目标光斑不均匀, 因为所用铣削加工目标纹理均沿着长边方向。根据所有不同粗糙度、相同表面积目标的回波偏差统计结果可以得出, 0° 处相同表面积目标的平均回波偏差约为 1.35 dB。

4.2 喷砂铝板的测量结果

尺寸为 60 mm×40 mm 不同粗糙度喷砂铝板的实物照片如图 7 所示。在相同条件下测量其相对后向散射强度(2.52 THz), 得到的实验结果如图 8 所示。

对于尺寸为 60 mm×40 mm 的喷砂铝板, 不同粗糙度铝板的 σ 在 0° 处相差较大, σ 最大的为 3.2 μm 铝板, 其次为 1.6 μm 铝板、6.3 μm 铝板和 12.5 μm 铝板; 3.2 μm 和 1.6 μm 铝板、1.6 μm 和 6.3 μm 铝板、6.3 μm 和 12.5 μm 铝板的 σ 之差分别为 2.4, 4.5, 4.7 dB; 当角度为 3° 时, 12.5 μm 铝板的曲线比其他曲线高约 2 dB。对于尺寸为 40 mm×60 mm 的喷砂铝板, 1.6 μm 铝板的曲线和 6.3 μm 铝板的曲线比较靠近;

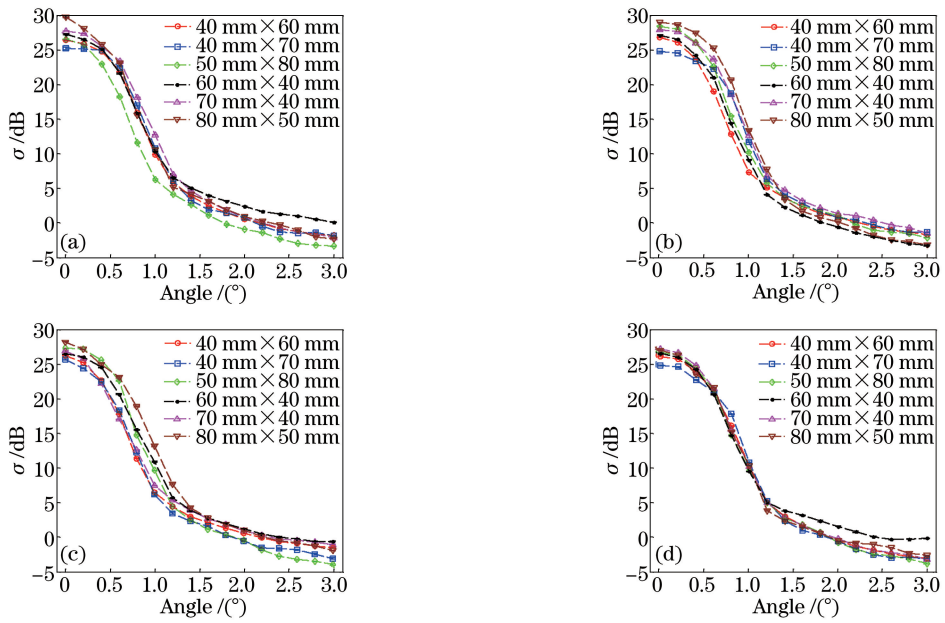


图 6 不同粗糙度铣削铝板的 σ 曲线。(a) $1.6 \mu\text{m}$; (b) $3.2 \mu\text{m}$; (c) $6.3 \mu\text{m}$; (d) $12.5 \mu\text{m}$
 Fig. 6 Relative back scattering intensity curves of milling aluminum plate with different roughnesses.
 (a) $1.6 \mu\text{m}$; (b) $3.2 \mu\text{m}$; (c) $6.3 \mu\text{m}$; (d) $12.5 \mu\text{m}$

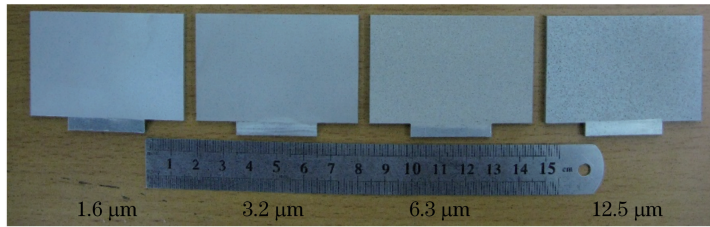


图 7 尺寸为 $60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 不同粗糙度喷砂铝板的照片

Fig. 7 Photographs of sand blasting aluminum plate with size of $60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ and different roughnesses

$3.2 \mu\text{m}$ 铝板的曲线整体上比其他曲线都高,随着角度增大, σ 之差增大,最大约为 5 dB ; 在 0° 处, $12.5 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 比其他粗糙度铝板低约 8 dB ; 在 3° 处, $12.5 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 比 $6.3 \mu\text{m}$ 铝板低约 2.4 dB , 比 $1.6 \mu\text{m}$ 铝板和 $6.3 \mu\text{m}$ 铝板高约 2.5 dB 。当粗糙度为 $1.6 \mu\text{m}$ 时, $60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 和 $40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 铝板的最大 σ 分别为 23.35 dB 和 24.60 dB , 相差 -1.25 dB 。

对于 $70 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的喷砂铝板, 在 0° 处, $12.5 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 比 $6.3 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 低约 3 dB , 比 $1.6 \mu\text{m}$ 和 $3.2 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 低约 7.5 dB 。对于 $40 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 的喷砂铝板, 当角度大于 0.8° 后, $1.6, 3.2, 6.3 \mu\text{m}$ 铝板的曲线基本重合; 在 0° 处, $3.2 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 比 $1.6 \mu\text{m}$ 铝板高约 1.8 dB , $1.6 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 比 $6.3 \mu\text{m}$ 铝板高约 1.4 dB , $6.3 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 比 $12.5 \mu\text{m}$ 铝板高约 11 dB ; 当粗糙度为 $1.6 \mu\text{m}$ 时, $70 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 铝板和 $40 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 铝板的最大 σ 分别为 26.78 dB 和 26.34 dB , 两者相差 0.43 dB 。

对于 $80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的喷砂铝板, $12.5 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 在 0° 处比其他铝板低约 4 dB ; $6.3 \mu\text{m}$ 和 $12.5 \mu\text{m}$ 铝板在 $0.4^\circ \sim 1.6^\circ$ 处比 $1.6 \mu\text{m}$ 和 $3.2 \mu\text{m}$ 铝板曲线低约 6 dB ; $12.5 \mu\text{m}$ 铝板在 3° 处的 σ 比其他铝板高约 3 dB 。对于 $50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的喷砂铝板, 在 0° 处, $1.6 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 比 $3.2 \mu\text{m}$ 和 $6.3 \mu\text{m}$ 铝板高约 5 dB , $12.5 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 比 $3.2 \mu\text{m}$ 和 $6.3 \mu\text{m}$ 铝板低约 9 dB ; $6.3 \mu\text{m}$ 和 $12.5 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 曲线在 1.5° 之后几乎保持水平, $6.3 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 约为 3 dB , $12.5 \mu\text{m}$ 铝板的 σ 约为 1 dB ; $1.6 \mu\text{m}$ 和 $3.2 \mu\text{m}$ 铝板的曲线一直保持着单调递减的趋势; 当粗糙度为 $1.6 \mu\text{m}$ 时, $80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 铝板和 $50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 铝板的最大 σ 分别为 27.80 dB 和 28.79 dB , 相差 -0.99 dB 。

计算可得出, 在 0° 处的相同面积喷砂铝板回波的平均偏差约 0.51 dB 。由于喷砂铝板回波是漫散射, 不像铣削加工铝板的条纹一样会使回波具有一定的方向性, 因此这部分误差可能来源于照射目标光斑的不均

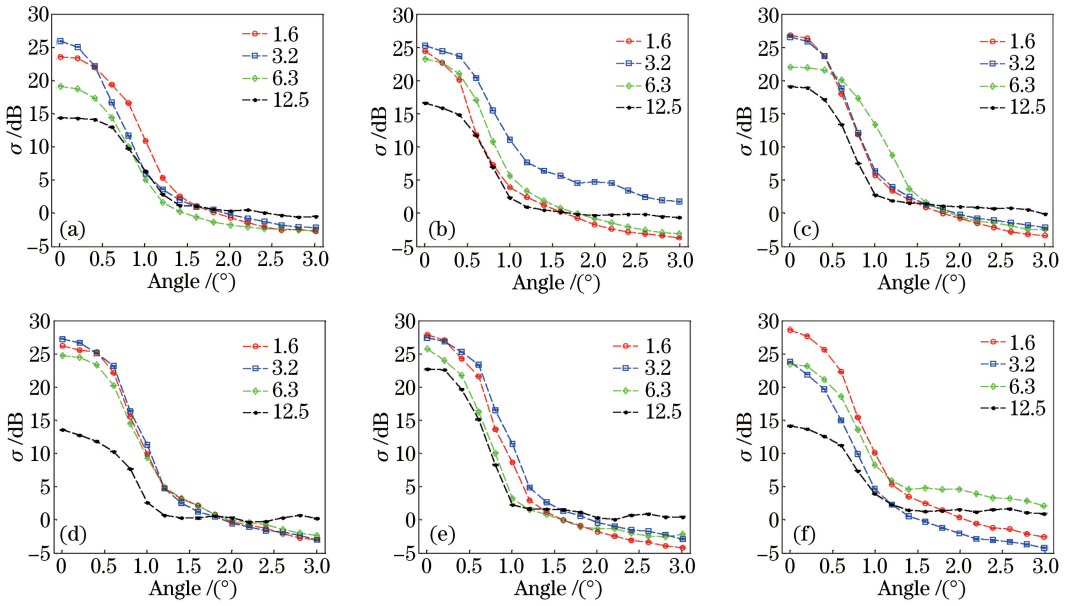


图 8 不同尺寸喷砂铝板的 σ 曲线。(a) 60 mm×40 mm;(b) 40 mm×60 mm;(c) 70 mm×40 mm;(d) 40 mm×70 mm;(e) 80 mm×50 mm;(f) 50 mm×80 mm

Fig. 8 Relative back scattering intensity curves of sand blasting aluminum plate with different sizes. (a) 60 mm×40 mm;(b) 40 mm×60 mm;(c) 70 mm×40 mm;(d) 40 mm×70 mm;(e) 80 mm×50 mm;(f) 50 mm×80 mm

匀性,即垂直方向上光斑能量分布偏少。此偏差比铣削加工的偏差低约 0.84 dB。因此可以推知铣削加工工件表面的纹理对后向散射具有一定影响。在此测量系统中,纹理对后向散射的影响略大于光斑能量不均匀对后向散射的影响。

从以上铣削加工和喷砂加工铝板的所有实验结果可以看出:所有 σ 曲线的趋势类似,均单调递减,且下降趋势先缓慢后变快,最后再变缓并接近水平;喷砂铝板 σ 曲线随粗糙度变化得更明显;铣削加工和喷砂加工矩形铝板测量的动态范围分别为 32.25 dB 和 32.02 dB。

由于粗糙度目标的后向散射特性很难仿真,因此以 1.6 μm 粗糙度实验结果与理想矩形铝板理论公式的计算结果进行比较。以直径为 50 mm 的标准球体为基准,计算得到 0°入射且 0°散射时 60 mm×40 mm、80 mm×50 mm 和 70 mm×40 mm 铝板的 σ 分别约为 52.1,56.6,53.5 dB;这与铣削加工相应的最大 σ 值之差分别约为 25,27,28 dB;与喷砂加工相应的最大 σ 值之差分别约为 29,27,29 dB。这种误差主要源于测量系统的入射光路与收集光路存在约 6.5°的夹角,本应按 0°入射、6.5°散射计算此时的相对回波(即测量中的 0°),但 6.5°并不是准确数字,因此理论计算也有误差。另外,理论计算时没有考虑铝板的厚度,而在非 0°时会有较大侧壁绕射和反射的影响。由于同一位置不同大小的铝板目标回波差固定,因此本课题组对不同尺寸铝板的最大 σ 值之差进行比较。表 2 给出了 60 mm×40 mm 和 80 mm×50 mm 板分别与 70 mm×40 mm 板的最大 σ 值之差的实验结果、理想矩形平板仿真结果及它们的比较。由表 2 可知,喷砂铝板测量结果与仿真结果间的误差最大,约为 ± 2.1 dB;铣削铝板的最大 σ 值之差低于模拟值,70 mm×40 mm 与 60 mm×40 mm 喷砂铝板的最大 σ 值之差为 3.43 dB,明显高于铣削加工的 0.77 dB,并高于模拟值 2.09 dB。这主要是由 60 mm×40 mm 喷砂板因加工或放置误差而导致 σ 的测量结果相对偏低造成的。

表 2 矩形铝板 σ 值的测量与仿真结果

Table 2 Measured and simulated relative back scattering intensity of rectangle aluminum plate

Size / (mm×mm)	Simulation /dB	Experiment-milling /dB	Error-milling /dB	Experiment-sand blasting /dB	Error-sand blasting /dB
60×40 and 70×40	1.34	0.77	-0.57	3.43	2.09
70×40 and 80×50	3.10	1.11	-1.99	1.02	-2.08

5 结 论

首先验证了已经搭建好的入射与收集光路有 6.5° 夹角的 2.52 THz 后向散射强度测量系统的可行性,测得系统的信噪比为 6.10 dB。然后,对铣削和喷砂矩形铝板进行后向散射强度测量,得到了 $0^\circ\sim 3^\circ$ 范围内相同尺寸不同粗糙度和相同粗糙度不同尺寸铝板的相对后向散射强度曲线。实验结果表明:测量的最大动态范围达到了 32.25 dB;实验与理想仿真的最大误差为 ± 2.1 dB;喷砂铝板的相对后向散射强度随粗糙度的变化较铣削加工铝板更明显;在 0° 处,相同表面积铣削和喷砂铝板回波的平均偏差分别约为 1.35 dB 和 0.51 dB;铣削加工铝板的表面纹理对后向散射强度具有一定影响。

为了进一步提高后向散射强度测量的精度,应尽量减小测量装置中入射光路与收集光路间的夹角;同时要较为准确地测量此角度,以便更好地与理论仿真结果进行对比。在理论仿真方面,应加强实际目标入射角与散射角在不同情况下的模拟计算,从而深入理解所测结果中蕴藏的原理。

参 考 文 献

- [1] Li Wenjun, Wang Tianyi, Zhou Yu, *et al.* Terahertz non-destructive inspection of air defect within adhesive layers of multi-layer bonded structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0111002.
李文军, 王天一, 周宇, 等. 多层胶接结构胶层空气缺陷的太赫兹无损检测[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0111002.
- [2] Liu Yan, Fan Fei, Chen Sai, *et al.* Terahertz optical properties of nematic liquid crystals depended on different external fields[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0226001.
刘岩, 范飞, 陈赛, 等. 外场下向列相液晶太赫兹光学性质[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0226001.
- [3] Williams R J, Gatesman A J, Goyette T M, *et al.* Radar cross section measurements of frequency selective terahertz retroreflectors[C]. SPIE, 2014, 9102: 91020R.
- [4] DiGiovanni D A, Gatesman A J, Giles R H, *et al.* Backscattering of ground terrain and building materials at millimeter-wave and terahertz frequencies[C]. SPIE, 2013, 8715: 871507.
- [5] Li Qi, Xue Kai, Li Huiyu, *et al.* Advances in research of terahertz radar cross section measurements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060001.
李琦, 薛凯, 李慧宇, 等. 太赫兹雷达散射截面测量研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060001.
- [6] McGowan R W, Chevillat R A, Grischkowsky D R. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2000, 48(3): 417-422.
- [7] Jansen C, Krumbholz N, Geisb R, *et al.* Alignment and illumination issues in scaled THz RCS measurements[C]. 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009.
- [8] Yang Yang, Yao Jianquan, Song Yukun, *et al.* Radar scattering cross section in different wave band for spherical targets[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 552-556.
杨洋, 姚建铨, 宋玉坤, 等. 球型目标在不同波段的雷达散射截面[J]. *激光与红外*, 2011, 41(5): 552-556.
- [9] Yang Yang, Yao Jianquan, Wang Li, *et al.* Experimental study on the radar cross section of low-frequency terahertz standard target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 985-989.
杨洋, 姚建铨, 王力, 等. 低频太赫兹标准目标雷达散射截面的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 985-989.
- [10] Jiang Yanwen, Deng Bin, Wang Hongqiang, *et al.* RCS measurement of cylinders in terahertz band based on the time-domain spectroscopy system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2223-2227.
蒋彦雯, 邓彬, 王宏强, 等. 基于时域光谱系统的太赫兹圆柱 RCS 测量[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2223-2227.
- [11] Goyette T M, Dickinson J C, Gorveatt W J, *et al.* X-band ISAR imagery of scale-model tactical targets using a wide bandwidth 350 GHz compact[C]. SPIE, 2004, 5427: 227-236.
- [12] Goyette T M, Dickinson J C, Waldman J, *et al.* A 1.56 THz compact radar range for W-band imagery of scale-model targets[C]. SPIE, 2000, 4053: 615-622.
- [13] Jagannathan A, Gatesman A J, Horgan T, *et al.* Effect of periodic roughness and surface defects on the terahertz scattering behavior of cylindrical objects[C]. SPIE, 2010, 7677: 7671E.
- [14] Liang Dachuan, Wei Minggui, Gu Jianqiang, *et al.* Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale models[J]. *Acta Physic Sinica*, 2014, 63(21): 214102.
梁达川, 魏明贵, 谷建强, 等. 缩比模型的宽频时域太赫兹雷达散射截面(RCS)研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(21):

214102.

- [15] Fan Changkun, Li Qi, Zhou Yi, *et al.* Measurement of 2.52 THz back scattering in aluminum plates with four kinds of roughness[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 111201.
樊长坤, 李琦, 周毅, 等. 4种粗糙度铝板的2.52 THz后向散射测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 111201.
- [16] Fan C K Li Q, Zhou Y, *et al.* Controlling software development of CW terahertz target scattering properties measurements based on LabVIEW[C]. *SPIE*, 2016, 10153: 101530P.