

光学学报

利用太赫兹时域光谱对覆盖层下钢板锈蚀厚度的无损检测

江雪雷, 许颖*

哈尔滨工业大学(深圳)深圳市城市与土木工程防灾减灾重点实验室&深圳市土木工程智能结构系统重点实验室,
广东 深圳 518055

摘要 由于锈蚀层分布不均匀和覆盖层材料的影响,现有无损检测技术很难实现对钢板锈蚀厚度的精确检测。基于太赫兹(THz)波对非极性材料的高透射性及对极性金属材料的反射性,介绍了一种利用太赫兹时域光谱(THz-TDS)实现对覆盖层下钢板锈蚀厚度的无损检测方法。实验表明:在有效频率 0.2~1.2 THz 内,锈蚀产物和覆盖层材料环氧树脂、橡胶、水泥净浆的折射率分别为 2.80, 1.94, 2.18 和 2.04。THz 透射谱中样品和参考信号的延迟时间差与材料的折射率呈线性关系。THz 反射信号可以识别钢板表面锈蚀层,且能够准确测定大于 40 μm 的锈蚀层厚度。覆盖层材料下的钢板锈蚀可以从 THz 反射信号中幅值的数量和衰减进行判断,通过幅值对应延迟时间差实现准确率大于 90% 的覆盖层和锈蚀层的厚度测定,证明了 THz-TDS 用于覆盖层下钢板锈蚀厚度检测的实用性和准确性。

关键词 太赫兹时域光谱; 锈蚀厚度; 锈蚀层; 覆盖层; 无损检测

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1312001

Nondestructive Testing of Corrosion Thickness of Steel Plates Under Coatings by Terahertz Time-Domain Spectroscopy

Jiang Xuelei, Xu Ying*

Shenzhen Key Laboratory of Urban & Civil Engineering Disaster Prevention & Reduction, Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Structure System in Civil Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, Guangdong, China

Abstract Due to the unevenness of the corrosion layer and effect of the coatings, it is difficult to accurately detect the corrosion thickness of steel plates by the existing nondestructive testing (NDT) approaches. Based on the properties of the high transmission to non-polar materials and reflection on the surface of polar metal materials of terahertz (THz) wave, a nondestructive terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) is utilized to detect the corrosion thickness under coatings in this paper. The experimental results show that in the effective frequency range of 0.2-1.2 THz, the refractive index of corrosion products, epoxy resin, rubber and cement paste is 2.80, 1.94, 2.18 and 2.04, respectively. The delay time difference between the sample and the reference signals in transmission THz-TDS exhibits a linear relationship with the refractive index. The reflected THz signal can identify the corrosion layer on steel plate surface, and accurately measure the corrosion layer with thickness greater than 40 μm . The corrosion of steel plates under coatings can be judged by the number and attenuation of signal amplitude in reflection THz-TDS. The thicknesses of the coatings and corrosion layer are determined with accuracy greater than 90% by the delay time difference corresponding to the signal amplitudes. The application and accuracy of THz-TDS for NDT corrosion thickness detection of steel plates under coatings are therefore proved.

Key words terahertz time-domain spectroscopy; corrosion thickness; corrosion layer; coatings; nondestructive testing

收稿日期: 2021-12-02; 修回日期: 2021-12-22; 录用日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778191, 52078173)、深圳市重点实验室筹建启动项目(ZDSYS20200810113601005)

通信作者: *cexyx@hotmail.com

1 引言

由于具有储量丰富、价格低廉、机械性能优良等优点,钢板在土木工程领域被广泛应用于超高层、大跨钢结构、钢制桥梁等结构建筑。受使用龄期和外界温度、湿度、氯离子(Cl^-)侵蚀等因素^[1-2]的影响,钢板表面会发生锈蚀。然而,锈蚀过程通常发生在钢板覆盖层材料下^[3-4],现有无损检测(NDT)技术^[5-7]很难实现对钢板锈蚀程度的准确测定。因此,研发一种能够透过覆盖层并对钢板锈蚀程度实现高精度测量的无损检测技术具有较重要的工程实际意义。

太赫兹(THz)波是频率范围在 100 GHz~10 THz 之间的电磁波,波长范围为 0.03~3 mm。THz 波在非极性材料界面发生透射和反射,并在金属类极性材料界面处发生反射,该性能特点较好满足了钢结构覆盖层无损检测中对缺陷识别和成像的技术需求^[8-9]。因此,学者对太赫兹时域光谱(THz-TDS)在锈蚀无损检测方面的应用进行了研究。Zhao 等^[10]对不同锈蚀程度的钢板进行 THz 反射谱测定,探究反射信号强度与锈蚀程度的函数关系。Akihisa 等^[11]利用 THz-TDS 对涂层下不同锈蚀产物 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 进行物相识别。Fuse 等^[12]利用锈蚀区域反射的 THz 信号强度,实现覆盖层下锈蚀区域的识别和锈蚀程度的表征。Mikhnev 等^[13]基于 THz 波干涉增强技术,提高涂层下锈蚀区域的识别敏感度。上述文献均证明 THz-TDS 用于锈蚀检测的可行性,然而却局限于对锈蚀区域或锈蚀程度的定性表征,其测定结果受其他因素影响较大。由于锈蚀厚度很大程度上影响钢板截面的强度和刚度,因此实现锈蚀厚度的定量检测具有工程实际意义。在对锈蚀厚度的测定方面,Fuse 等^[14]通过 THz 反射信号幅值对锈蚀层厚度进行了表征,但计算厚度值误差较大;同时,该团队通过 THz 反射信号中延迟时间差计算环氧树脂层和锈蚀层的厚度,但未系统展开^[15]。Dong 等^[16]对 THz 反射信号进行反卷积特征识别,实现了锈蚀、水泡和分层损伤的成像,然而锈蚀厚度的准确度受到涂层的影响,还需进一步的验证工作。另一方面,一些学者证明通过反射 THz 信号中的延迟时间差可以实现对钢板覆盖层材料厚度的准确测定^[17-19]。

因此,基于现有研究现状的不足及 THz-TDS 对钢板覆盖层材料厚度测量的可行性,本文提出利用反射 THz 信号中延迟时间差计算钢板表面层厚度的方法,用于覆盖层下锈蚀层厚度的无损测定。首先,对锈蚀产物和常见覆盖层材料环氧树脂、橡胶以及水泥净浆进行 THz 透射谱测定;其次,通过 THz 反射光谱对不同锈蚀周期的钢板样品进行锈蚀层厚度测定,并与游标卡尺测定厚度标准值进行对比;最后,对锈蚀和未锈蚀钢板样品分别以环氧树脂、橡胶以及水泥净浆进行覆盖,进行 THz 反射光谱测定。

2 理论

2.1 光学参数提取理论

基于菲涅耳公式,对 THz-TDS 信号中材料光学

参数进行提取^[20-21]。通过透射式 THz-TDS 得到参考信号和样品信号,分别记为 $E_{\text{ref}}(t)$ 和 $E_{\text{sam}}(t)$,经傅里叶变换后得到样品和参考频谱信号 $E_{\text{sam}}(\omega)$ 和 $E_{\text{ref}}(\omega)$ 。样品的光谱响应函数为

$$H(\omega) = \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} = A(\omega) \exp[-j\varphi(\omega)] = \frac{4\tilde{n}_b}{(1+\tilde{n}_b)^2} \exp\left[-j\frac{\pi\omega(\tilde{n}_b-1)d}{c}\right], \quad (1)$$

式中: $A(\omega)$ 为样品与参考信号的振幅比; j 为虚部单位; $\varphi(\omega)$ 为虚部频率谱; \tilde{n}_b 为样品的复折射率, $\tilde{n}_b = n(\omega) - jk(\omega)$,其中, $n(\omega)$ 为折射率, $k(\omega)$ 为消光系数; c 为光速; d 为穿透厚度; ω 为频率。进一步,可得样品的折射率 $n(\omega)$ 和吸收系数 $\alpha(\omega)$,分别描述了样品的色散和吸收特性,并记为

$$n(\omega) = \frac{\phi(\omega)c}{\omega d} + 1, \quad (2)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{A(\omega)[n(\omega)+1]^2} \right\}, \quad (3)$$

式中: $\phi(\omega)$ 为样品与参考信号的相位差。通过上述理论公式可以得到透射材料的光学参数,详细计算流程为:首先,可通过透射式 THz-TDS 得到样品和参考信号的时域波形,进而对时域信号进行傅里叶变换得到样品和参考信号的频谱信号、振幅和相位。然后,计算得到样品和参考信号的振幅比 $A(\omega)$ 和相位差 $\phi(\omega)$ 。最后,将上述参数代入式(2)和式(3),求得测定材料的折射率和吸收系数。

2.2 钢板表面层厚度计算理论

光学参数的求解理论公式较多适用于透射式 THz-TDS。样品和参考反射表面之间位移导致固有相移误差难以克服,这使得式(1)~式(3)在反射式 THz-TDS 中的应用存在局限性。因此,基于 THz 波在非极性材料界面的反射和透射特性,及在极性金属材料界面的反射特性,可将 THz-TDS 用于钢板材料覆盖层或锈蚀层的厚度测定。以文中钢板表面环氧树脂单层和锈蚀钢板表面环氧树脂双层材料的测定为例,如图 1 所示,对 THz 信号的传输路径进行了详细说明。首先,如图 1(a)所示,太赫兹仪器产生的 THz 信号由氮气环境中入射到覆盖层环氧树脂上表面,并发生反射和透射。其中,反射 THz 信号被 THz 探测器接收,记为反射信号 1;透射 THz 信号穿透环氧树脂层,并在钢板材料表面发生反射,进而再次穿透环氧树脂层后被 THz 探测器接收,记为反射信号 2。被 THz 探测器接收的反射信号 1 和 2 的时域谱如图 1(b)所示。由于反射信号 2 的传输路径与反射信号 1 相比多了环氧树脂层厚度的 2 倍,因此两个反射信号幅值存在延迟时间差。同理,如图 1(c)和图 1(d)所示,THz 信号分别在环氧树脂上表面、锈蚀层上表面以及钢板表面发生反射,反射信号分别被 THz 探测器接收,并记为反射信号 1,2,3。相邻反射信号幅值对应的延迟时间差与覆盖层环氧树脂层和锈蚀层的厚度有关。因此,

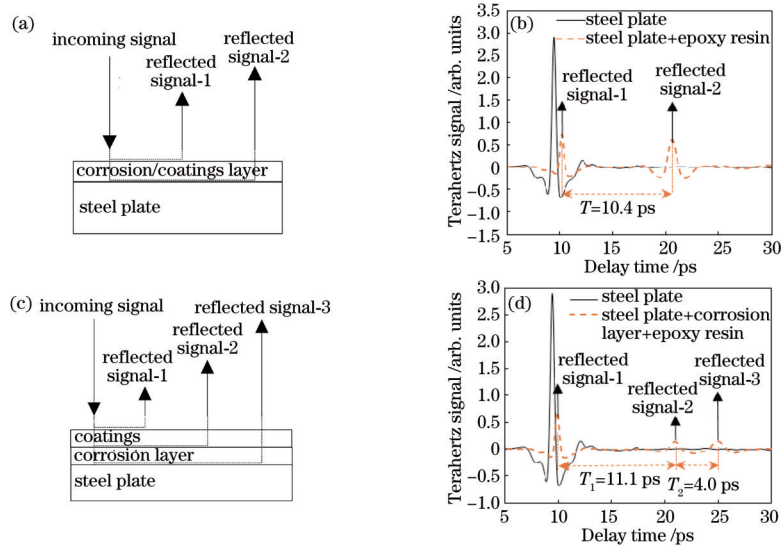


图 1 THz 反射信号路径及接收结果。(a) 单层太赫兹信号路径; (b) 单层太赫兹信号的接收 (以环氧树脂+钢板样品为例); (c) 双层太赫兹信号路径; (d) 双层太赫兹信号的接收 (以环氧树脂+锈蚀钢板样品为例)

Fig. 1 THz reflected signal path and received results. (a) THz signal path of monolayer; (b) reflected THz signal of monolayer (epoxy resin+steel plate sample as an example); (c) THz signal path of double layers; (d) reflected THz signal of double layers (epoxy resin+corroded steel plate sample as an example)

基于现有延迟时间差与厚度的简化公式^[17,22], 可实现对各层厚度值的计算:

$$d' = \frac{cT}{2n}, \quad (4)$$

式中: d' 为覆盖层或锈蚀层厚度; T 为各层延迟时间差; n 为材料在测定有效频率范围内的折射率值标量。

3 实 验

3.1 THz 反射光谱测定实验

为验证 THz-TDS 对覆盖层下钢板锈蚀厚度检测的可行性, 对锈蚀钢板\有覆盖层的锈蚀和未锈蚀钢板分别进行 THz 反射光谱测定。首先, 对不同锈蚀程度的钢板样品进行 THz 反射光谱测定。实验中使用 Q235 普通碳素钢板, 尺寸为 45 mm×45 mm×1 mm, 并对其中一个钢板样品的表面进行模拟盐雾试验。盐

雾试验使用质量分数为 5%±1% 的 NaCl 溶液, 控制温度为 (25±2) °C。锈蚀周期为 0, 1, 3, 7, 15, 28 d 的钢板样品如表 1 所示。如图 2(a) 所示, 对每个锈蚀周期钢板样品的锈蚀区域内随机取点进行 THz 反射光谱测定, 测定点不少于 10 个。同时, 为验证 THz-TDS 的厚度测定准确度, 利用重复精度为 0.01 mm 的数显式游标卡尺对钢板锈蚀层厚度进行测定。如图 2(b) 所示, 利用游标卡尺从不同位置及深度对锈蚀钢板进行厚度测量 (厚度值记为 d_1)。刮取钢板表面锈蚀层后, 采用同样方式对去除锈蚀层的钢板样品进行厚度测量 (记为 d_2)。通过实际测定, 各龄期钢板样品的 d_2 厚度值离散性较小, 进而, 对各龄期锈蚀钢板的 d_2 取平均值 (记为 d_3)。通过刮取锈蚀层前后厚度值对比, 可得到不同锈蚀龄期钢板的锈蚀层厚度值 ($d=d_1-d_3$)。

表 1 不同锈蚀时间的钢板样品

Table 1 Steel plates with different corrosion time

Corrosion time /d	0	1	3	7	15	28
Image						

接着对不同覆盖层材料的锈蚀和未锈蚀钢板进行 THz 反射光谱测定。锈蚀 28 d 的钢板样品和未锈蚀

钢板分别以环氧树脂、橡胶以及净浆材料作为覆盖层。利用自制中间区域尺寸为 25 mm×25 mm, 外部尺寸

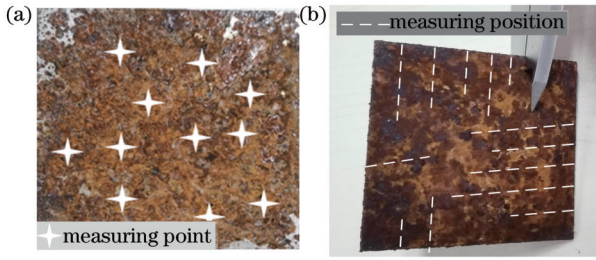


图 2 锈蚀钢板样品的测定。(a)太赫兹反射谱测定;(b)游标卡尺测定锈层厚度

Fig. 2 Detection of corroded steel plates. (a) Reflection THz-TDS; (b) vernier caliper

为 45 mm×45 mm,厚度为 1 mm 的空心钢模板制备覆盖层为环氧树脂、橡胶以及净浆的钢板样品,如表 2 所示。实验中使用的环氧树脂和橡胶分别由湖南把兄弟

表 2 不同覆盖层材料覆盖的钢板样品

Table 2 Steel plates with the different coating materials

Category	Without coatings	Epoxy resin	Rubber	Paste
Un-corroded steel plate				
Corroded steel plate				

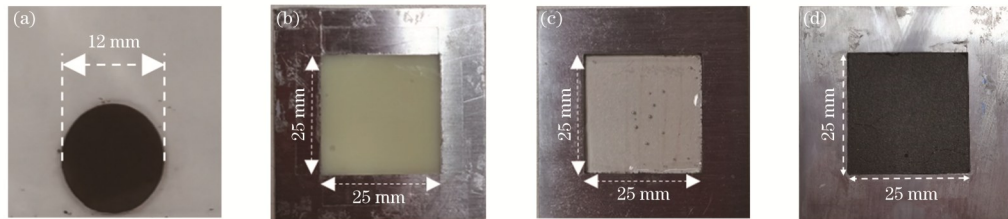


图 3 THz-TDS 测定样品。(a)锈蚀产物;(b)环氧树脂;(c)橡胶;(d)净浆

Fig. 3 Samples for transmission THz-TDS. (a) Corrosion products; (b) epoxy resin; (c) rubber; (d) paste

太赫兹时域光谱仪 Terapulse 4000 由 TeraView 公司生产,并由深圳市太赫兹技术与创新研究所提供。该仪器详细相关参数信息如文献[23]所示。根据太赫兹时域光谱仪 Terapulse 4000 将样品的探测模式分为透射型和反射型。在进行透射谱和反射谱测定过程中,测定的密封室中连续充氮,使相对湿度小于 5%,温度保持在 298 K 左右。

4 实验结果分析与讨论

4.1 光学参数测定

通过对钢板表面锈蚀产物、环氧树脂、橡胶以及净浆样品进行透射式 THz-TDS 测定,得到各材料的光学特征信息。如图 4 所示,锈蚀产物、环氧树脂、橡胶

新材料股份有限公司和深圳市奥斯邦股份有限公司提供。水泥材料为 P-II-42.5R 普通硅酸盐水泥,水灰质量比为 0.5。利用 THz 反射光谱在样品区域内随机取点,且测定次数不少于 10 次。

3.2 THz 透射光谱测定实验

对锈蚀产物和常用覆盖层材料进行 THz 透射光谱测定。为消除锈蚀产物的种类和含量变化,实验中,对锈蚀钢板样品进行 THz 反射信号测定后,刮取表面锈蚀产物,并直接进行 THz 透射光谱测定。将锈蚀产物在 1.0 t/cm² 的压力下压缩 1 min,制成直径为 12 mm,厚度为 1.0 mm 的药丸片状样品,如图 3(a)所示。同时,利用不锈钢模板制备尺寸为 25 mm×25 mm×1 mm 的环氧树脂、橡胶以及净浆片状样品,如图 3(b)~图 3(d)所示。每个样品测定次数不少于 10 次,以消除偶然误差的影响。

和净浆的样品信号与参考信号相比,THz 信号幅值出现不同程度的衰减,即锈蚀产物、环氧树脂、橡胶和净浆的样品幅值从参考信号幅值 2.23 分别衰减至 0.39, 1.29, 0.80, 1.23; 幅值衰减百分比分别为 82.5%, 42.2%, 64.1%, 45.0%。同时,锈蚀产物、环氧树脂、橡胶和净浆样品信号幅值对应接收时间与参考信号相比出现延迟,延迟时间差分别为 6.60, 3.42, 3.99, 3.53 ps。

基于理论部分中光学参数式(2)和式(3),对测定材料的折射率和吸收系数进行求解。图 5(a)为锈蚀产物、环氧树脂、橡胶和净浆材料的折射率值,且在有效频率 0.2~1.2 THz 范围内均近似为常数,对应折射率值分别为 2.80, 1.94, 2.18, 2.04。材料样品的折射

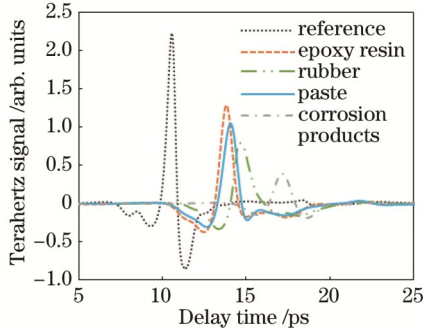


图 4 时域波形信号

Fig. 4 Time-domain waveforms signals

率大小直接影响 THz 波的传播路径,进而导致传播时间的延迟。因此,4 种材料的折射率和信号延迟时间

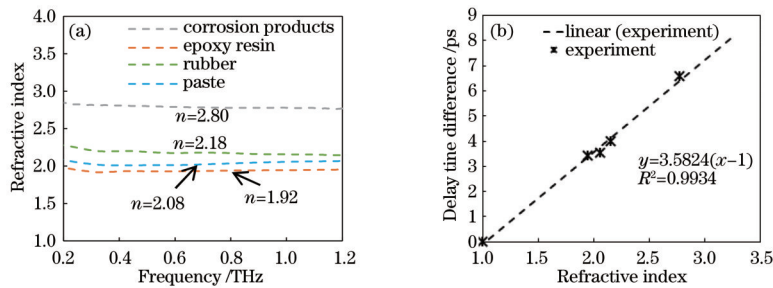


图 5 材料的折射率。(a) 折射率; (b) 折射率与延迟时间的关系

Fig. 5 Refractive index of samples. (a) Refractive index; (b) relationship of refractive index and delay time difference

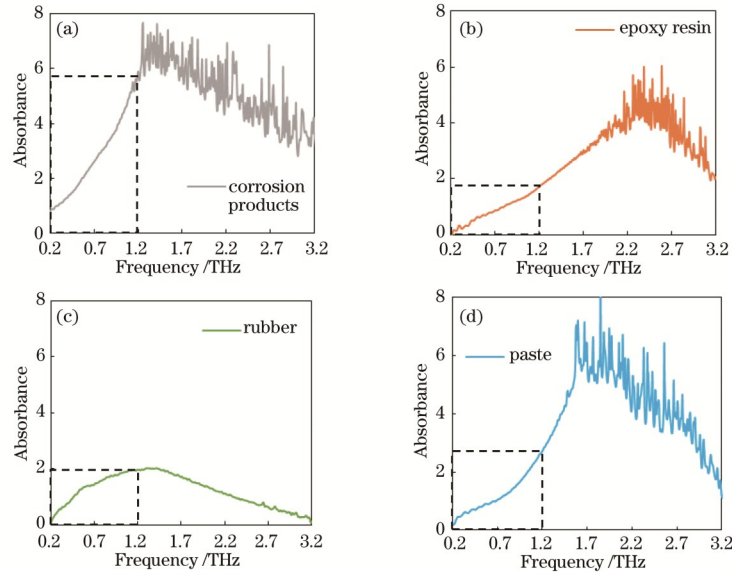


图 6 样品的吸收系数。(a) 锈蚀产物; (b) 环氧树脂; (c) 橡胶; (d) 净浆

Fig. 6 Absorption coefficient of the samples. (a) Corrosion products; (b) epoxy resin; (c) rubber; (d) paste

4.2 锈蚀钢板的 THz 反射谱及锈蚀厚度表征

对锈蚀周期为 1, 3, 7, 15, 28 d 的钢板样品进行反射式 THz-TDS 测定, 结果如图 7(a) 所示。仪器发射的 THz 信号在未锈蚀钢板表面发生反射, 反射信号强度基本无衰减, 因此, 将未锈蚀钢板样品的反射信号作为参考信号。通过与参考信号对比可知, 钢板表面锈蚀层的存在, 使 THz 时域信号出现时间延迟, 并随锈

差如图 5(b) 所示, 延迟时间差随材料样品的折射率增大而线性增加。从图 6 材料的吸收系数结果可知, 4 种材料的吸收系数测定结果可分成两类: 1) 锈蚀产物、环氧树脂以及净浆材料的吸收系数在有效频率范围内呈线性增大的趋势; 2) 对于橡胶材料来说, 在频率 0.2~3.2 THz 内, 吸收系数先增大后降低。这一现象可能与材料不同光学特征有关。在有效频率 0.2~1.2 THz 内, 4 种材料的吸收系数值相对大小排序依次为锈蚀产物、橡胶、净浆、环氧树脂。从理论上说, 接收到的 THz 信号强度的衰减主要与 THz 波在样品表面的反射衰减和样品内部的吸收衰减有关。透射 THz 信号中信号幅值的衰减与测定样品的吸收系数大小呈正相关关系。THz 反射衰减的影响较小的原因可能与测定的样品具有较为平滑的表面有关。

蚀龄期的增加, THz 信号幅值出现衰减。除锈蚀 1 d 的样品外, 各锈蚀龄期样品的反射 THz 信号中均出现 2 个信号幅值。THz 信号传输路径如图 1(a) 所示。通过提取 THz 反射信号中幅值对应延迟时间差, 代入式 (4) 对钢板样品的锈蚀层厚度进行计算。图 7(b) 中总结了 THz-TDS 和游标卡尺对锈蚀层厚度测定的 10 次数据结果, 并通过厚度平均值进行数据拟合。由于 1 d

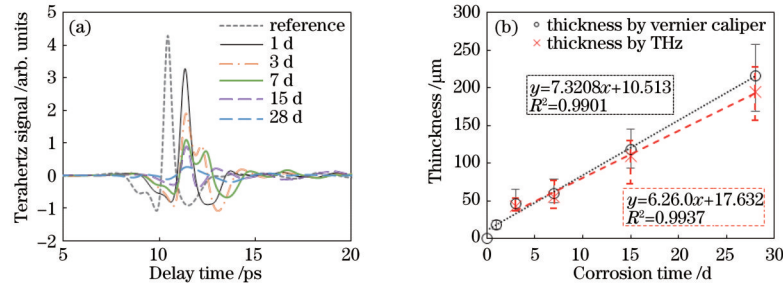


图 7 锈蚀层的厚度测定。(a) THz 反射信号;(b) THz-TDS 和游标卡尺的检测结果对比

Fig. 7 Detection of corrosion thickness. (a) Reflected THz signals; (b) comparison of detection results by THz-TDS and vernier caliper

锈蚀周期的钢板锈蚀层厚度较小, THz 反射信号对此厚度不敏感, 因此, 1 d 锈蚀层厚度值未包含在 THz-TDS 测定结果内。

从锈蚀层厚度的测定结果可知, 随锈蚀周期的增加, 锈蚀层厚度整体呈线性递增的趋势; 相同龄期的锈蚀层厚度值在一定的区间范围内波动。锈蚀厚度值离散性随锈蚀龄期的增加而增大, 此由钢板材料的锈蚀具有较大的随机性和不均匀性而造成。THz 反射信号可以识别厚度大于 40 μm 的钢板表面锈蚀层。以游标卡尺测定的锈蚀层厚度值为标准厚度值, 可知: 1) 通过反射式 THz-TDS 测定的锈蚀层厚度值略小于标准厚度值, 但基本分布在标准测定值范围内; 2) THz-TDS 测定的锈蚀层厚度的平均值与标准厚度平均值相比, 其测定厚度值的准确率达到 90% 以上。综上所述, 通过 THz-TDS 可以实现对钢板表面锈蚀层厚度的高精度测定, 证明了该技术对锈蚀厚度无损检测的适用性和可行性。

4.3 钢板覆盖层和覆盖层下锈蚀厚度的测定

在 4.2 节中验证了 THz-TDS 可用于钢板表面锈蚀层的厚度测定, 而钢板的锈蚀通常发生在覆盖保护层材料下。因此, 为进一步验证该技术用于覆盖层材料下钢板锈蚀厚度测定的可行性和准确性, 对覆盖层材料下的两种钢板样品 (锈蚀 28 d 和未锈蚀钢板) 进行 THz 反射谱测定。其中, 图 8(a) 为未锈蚀钢板 + 覆盖层材料的 THz 反射信号谱, 图 8(b) 为锈蚀 28 d 钢板 + 覆盖层材料的 THz 反射信号谱。从图 8(a) 可知, 当钢板未锈蚀时, THz 反射谱中有 2 个反射信号幅值, 其对应延迟时间差与覆盖层材料厚度有关。与参考 THz 信号相比, 钢板 + 覆盖层材料的 THz 反射信号第 2 幅值明显降低。已知环氧树脂、橡胶以及净浆样品的折射率值分别为 1.94, 2.18 以及 2.04, 进而提取反射信号中各材料的延迟时间差为 10.4 ps、14.3 ps 以及 14.64 ps, 求解可得 3 种钢板覆盖层材料的厚度值为 804.1 μm 、983.9 μm 以及 1076.5 μm 。

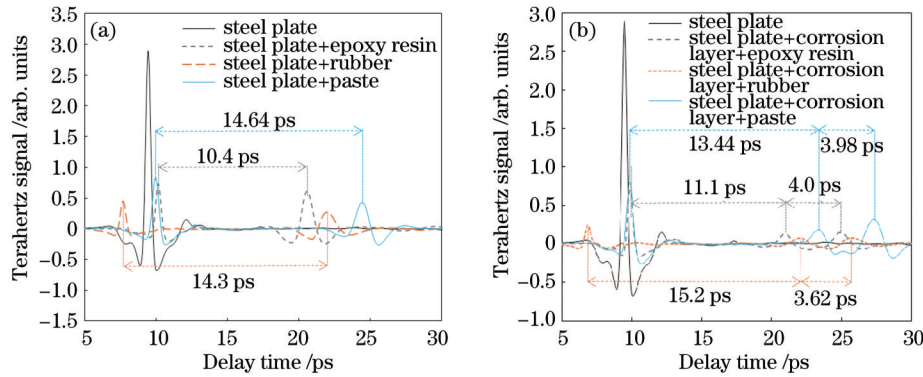


图 8 不同覆盖层材料的 THz 反射信号。(a) 未锈蚀钢板;(b) 锈蚀 28 d 钢板

Fig. 8 Reflected THz signals of different coating materials. (a) Un-corroded steel plates; (b) steel plates corroded for 28 d

图 8(b) 为锈蚀钢板 + 覆盖层材料 (环氧树脂、橡胶、水泥净浆) 的反射式 THz-TDS。与图 8(a) 未锈蚀钢板样品信号相比, 锈蚀层的存在使锈蚀钢板 + 覆盖层材料的反射信号谱中出现 3 个信号幅值, 其分别由覆盖层上表面、覆盖层与锈蚀层界面以及锈蚀层与钢板基体界面对 THz 信号的反射形成, 信号传输路径如图 1(b) 所示。信号幅值的延迟时间差分别对应覆盖层材料和锈蚀层厚度。同时, 锈蚀层的存在进一步使得 THz 反射信号的第 2 和第 3 幅值降低。对各样品进

行延迟时间的提取和厚度值计算, 可得: 对钢板 + 锈蚀层 + 环氧树脂样品而言, 环氧树脂层和锈蚀层对应时间延迟差分别为 11.1 ps 和 4.0 ps, 对应厚度计算值分别为 858.2 μm 和 214.3 μm ; 对钢板 + 锈蚀层 + 橡胶样品而言, 橡胶层和锈蚀层对应时间延迟差分别为 15.2 ps 和 3.62 ps, 对应厚度计算值分别为 1045.9 μm 和 193.9 μm ; 对钢板 + 锈蚀层 + 净浆样品, 净浆层和锈蚀层对应时间延迟差分别为 13.44 ps 和 3.98 ps, 对应厚度计算值分别为 988.2 μm 和 213.2 μm 。

通过对各样品 THz 反射信号中延迟时间的提取和厚度值计算,总结如表 3 所示,可知:

1) 当环氧树脂、橡胶以及水泥净浆作为钢板覆盖层材料时,THz 反射信号均能够穿透覆盖层材料,并实现对覆盖层材料厚度的测定。锈蚀钢板样品的覆盖层,如环氧树脂层、橡胶层和净浆层的厚度测定值分别为 858.2 μm 、1045.9 μm 以及 988.2 μm 。与未锈蚀钢板样品覆盖层厚度值(环氧树脂层 804.1 μm ,橡胶层 983.9 μm 及净浆层 1076.5 μm)相比,THz 反射光谱测定的厚度值偏差在 10% 以内。

2) 覆盖层材料的存在不影响 THz-TDS 对覆盖层下钢板锈蚀层厚度的测定。覆盖层下钢板锈蚀层测定值分别为 214.3 μm 、193.9 μm 以及 213.2 μm 。从 4.2

节可知,THz 技术测定 28 d 锈蚀层厚度值分布区间为 157~228 μm ,锈蚀层厚度平均值为 195.0 μm 。因此,覆盖层材料下钢板锈蚀层厚度的测定值均分布在合理区间,且测定准确率达到 90% 以上。

3) 利用 THz-TDS 可以实现对覆盖层材料下钢板的锈蚀判断和对锈蚀层的厚度测定。当环氧树脂、橡胶或净浆为钢板覆盖层时,锈蚀层的存在,使得反射谱中出现第 3 个信号幅值,并且使第 2 和第 3 信号幅值降低。进而,根据信号幅值对应延迟时间差的提取可实现对覆盖层和锈蚀层厚度的准确测定。实验结果证明了 THz-TDS 技术用于覆盖层下钢板锈蚀厚度无损检测的适用性和准确性。

表 3 基于反射 THz-TDS 的厚度测定值
Table 3 Thickness determination results by reflection THz-TDS

Sample	Coating	Delay time difference / ps	Refractive index	Thickness / μm	Corrosion layer	Delay time difference / ps	Refractive index	Thickness / μm
Steel plate + corrosion layer + epoxy resin	Epoxy resin	11.1	1.94	858.2		4.0		214.3
Steel plate + corrosion layer + rubber	Rubber	15.2	2.18	1045.9	Corrosion layer	3.62	2.8	193.9
Steel plate + corrosion layer + paste	Paste	13.44	2.04	988.2		3.98		213.2
Steel plate + epoxy resin	Epoxy resin	10.4	1.94	804.1				
Steel plate + rubber	Rubber	14.3	2.18	983.9				
Steel plate + paste	Paste	14.64	2.04	1076.5				

5 结 论

通过 THz 透射光谱测定了常见覆盖层材料(环氧树脂、橡胶、和水泥净浆)和锈蚀产物的光学参数;同时,利用 THz 反射光谱中延迟时间差对不同锈蚀程度钢板、具有覆盖层的锈蚀和未锈蚀钢板样品进行了厚度测定。研究结果证明 THz-TDS 用于钢结构锈蚀厚度无损检测领域的适用性和准确性。主要结论如下:

1) 在有效 THz 频率范围 0.2~1.2 THz 内,钢板锈蚀产物、环氧树脂、橡胶和净浆材料的折射率分别为 2.80, 1.94, 2.18 和 2.04。THz 透射谱中样品信号与参考信号之间的延迟时间差和测定样品的折射率呈线性关系,并且样品信号幅值的衰减与样品的吸收系数具有正相关关系。

2) 通过模拟盐雾试验加速锈蚀得到的锈蚀层厚度与锈蚀周期呈线性关系。钢板材料的锈蚀层分布具有较大的随机性和不均匀性。THz 反射信号可以准

确识别大于 40 μm 的锈蚀层厚度,且具有 90% 以上的测定准确度。

3) 通过 THz 反射光谱中信号幅值数量和衰减可对覆盖层材料(环氧树脂、橡胶以及净浆)下钢板的锈蚀进行判断,由延迟时间差同时实现对覆盖层和锈蚀层的厚度计算。THz 反射光谱对不同覆盖层材料下钢板的覆盖层和锈蚀层厚度测定值均具有 90% 以上的准确度。该结果证明了 THz-TDS 用于覆盖层下钢结构锈蚀厚度无损检测方面的适用性和准确性。

参 考 文 献

- [1] 陈健, 陈玉鑫, 黄涛, 等. 不同铬含量耐候钢在高湿热模拟环境中的耐腐蚀性能[J]. 机械工程材料, 2019, 43(4): 53-58.
Chen J, Chen Y X, Huang T, et al. Corrosion resistance of weathering steels with different Cr content in simulated high temperature and humidity environment[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(4): 53-58.

- [2] Zhang Z Z, Song S F, Huang J, et al. Investigation of corrosion caused by constituents of refinery wastewater effluent used as circulating cooling water[J]. *Water Environment Research*, 2003, 75(1): 61-65.
- [3] Khattab T A, Mowafi S, El-Sayed H. Development of mechanically durable hydrophobic lanolin/silicone rubber coating on viscose fibers[J]. *Cellulose*, 2019, 26(17): 9361-9371.
- [4] Sun W, Wu T T, Wang L D, et al. The role of graphene loading on the corrosion-promotion activity of graphene/epoxy nanocomposite coatings[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 173: 106916.
- [5] Cheng Y Y, Zhao C Y, Zhang J, et al. Application of a novel long-gauge fiber Bragg grating sensor for corrosion detection via a two-level strategy[J]. *Sensors*, 2019, 19(4): 954.
- [6] Sodsai K, Noipitak M, Sae-Tang W. Detection of corrosion under coated surface by eddy current testing method[C]//2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON), March 6-8, 2019, Hua Hin, Thailand. New York: IEEE Press, 2019: 19228706.
- [7] Goffin B, Banthia N, Yonemitsu N. Use of infrared thermal imaging to detect corrosion of epoxy coated and uncoated rebar in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120162.
- [8] 钟一帆, 任姣姣, 李丽娟, 等. 基于条纹抑制技术的脉冲太赫兹无损检测层析成像[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1014001.
- Zhong Y F, Ren J J, Li L J, et al. Pulsed terahertz nondestructive detection tomography based on fringe suppression technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1014001.
- [9] 李铁军, 孙跃, 邵桂芳, 等. 陶瓷基复合材料的太赫兹无损检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061101.
- Li T J, Sun Y, Shao G F, et al. Terahertz nondestructive detection method of ceramic matrix composites[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061101.
- [10] Zhao H, Wu D B, Zhan H L, et al. Detection of iron corrosion by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9795: 97953J.
- [11] Moriguchi A, Tanaka T, Sakagami T, et al. Nondestructive evaluation of steel plate coated with corrosion protection paint utilizing transmission property of THz wave[C]//13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCM-XIII), May 20-24, 2013, Le Mans, France. [S.l.: s.n.], 2013.
- [12] Fuse N, Takahashi T, Fukuchi T, et al. Detection of rust in coated steel plates using terahertz waves[C]//Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 6-10, 2011, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2011: 444-447.
- [13] Mikhnev V A, Vainshtein S N, Kostamovaara J T. Time-domain terahertz imaging of layered dielectric structures with interferometry-enhanced sensitivity[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(5): 531-539.
- [14] Fuse N, Fukuchi T, Takahashi T, et al. Quantitative characterization of rust in coated steel plates using terahertz waves[C]//The 2nd International Symposium on Terahertz Nanoscience, July 4, 2014, Okinawa, Japan. [S.l.: s.n.], 2012.
- [15] Fuse N, Fukuchi T, Takahashi T, et al. Evaluation of applicability of noncontact analysis methods to detect rust regions in coated steel plates[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, 2(2): 242-249.
- [16] Dong J L, Locquet A, Citrin D. 3D quantitative damage characterization in the coating of a metal substrate with terahertz waves[EB/OL]. [2021-02-03]. <https://dr.lib.iastate.edu/server/api/core/bitstreams/07bd3a9e-49d8-40b1-91c3-71be8671ad68/content>.
- [17] 程滨, 任姣姣, 顾健, 等. 基于太赫兹传播仿真模型的涂层高精度厚度检测[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1312001.
- Cheng B, Ren J J, Gu J, et al. High-precision thickness detection of coatings based on terahertz propagation simulation model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1312001.
- [18] 李晨毓, 张宏飞, 曲亮, 等. 太赫兹飞行时间成像在漆盒上的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0604001.
- Li C Y, Zhang H F, Qu L, et al. Application of terahertz time-of-flight imaging to lacquer box[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0604001.
- [19] 林玉华, 何明霞, 赖慧彬, 等. 太赫兹脉冲光谱法测量微米级多层油漆涂层厚度技术[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(11): 3332-3337.
- Lin Y H, He M X, Lai H B, et al. Study on terahertz pulse spectra technology to measure the thickness of micro-scale multilayer coatings[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(11): 3332-3337.
- [20] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 739-746.
- [21] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(7): 1562-1571.
- [22] 李迎, 张朝晖, 赵小燕, 等. 非金属涂层缺陷的太赫兹时域谱检测[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11): 129-136.
- Li Y, Zhang Z H, Zhao X Y, et al. Terahertz time-domain spectrum detection of non-metallic coating defects[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11): 129-136.
- [23] 王辰, 魏丞昊, 王志琪, 等. 太赫兹波谱在冬虫夏草检测中的应用[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2019, 36(2): 213-220.
- Li C, Wei C H, Wang Z Q, et al. Authenticity assessment of *Cordyceps sinensis* using terahertz spectroscopy[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2019, 36(2): 213-220.