文章编号:1674-2974(2026)01-0130-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026012

基于太赫兹光谱的混凝土内部钢筋早期锈蚀表征

许颖[1,2†],江新丰[1,2],江雪雷[1,2]
[1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院,广东 深圳 518055;
2. 哈尔滨工业大学(深圳)广东省土木工程智能韧性结构重点实验室,广东 深圳 518055]

摘 要:为了实现混凝土结构内部钢筋的精确定位和早期锈蚀状态的准确检测,本文介绍了一种太赫兹反射光谱技术,系统探究了其在结构锈蚀无损检测中的应用潜力.研究结果表明,该技术可实现结构内部钢筋的精确定位以及保护层厚度的准确测量,其中对钢筋位置的测定精度在距钢筋的1.2 mm范围.同时,该技术对锈蚀层厚度的最小测量精度达45 μm,达到了对钢筋早期锈蚀有效检测的厚度范围.本方法还实现了扫描区域内保护层与锈蚀层厚度的定量可视化成像,排除了保护层厚度分布不均匀的影响,为混凝土内部钢筋的早期锈蚀表征提供了一种创新且高效的方法.

关键词:太赫兹光谱;钢筋混凝土;钢铁锈蚀;早期锈蚀;锈蚀厚度;无损检测
中图分类号:TU37 **文献标志码**:A

Early corrosion characterization of internal steel bars in concrete based on terahertz spectroscopy

XU Ying[1,2†],JIANG Xinfeng[1,2],JIANG Xuelei[1,2]
(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology,Shenzhen, Shenzhen 518055, China;
2. Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Harbin Institute of Technology,Shenzhen, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To achieve precise positioning of steel bars inside concrete structures and accurate detection of early corrosion status, this article introduces a terahertz reflectance spectroscopy technique and systematically explores its potential application in non-destructive testing for structural corrosion assessment. The research results indicate that this technology can achieve precise positioning of steel bars inside the structure and accurate measurement of the thickness of the protective layer, with a positioning accuracy within 1.2 mm of the steel bars. Meanwhile, the minimum measurable thickness of the corrosion layer reaches 45 μm, which is sufficient for effective detection of early corrosion of steel bars. Terahertz technology can achieve quantitative visualization imaging of the thickness of the protective layer and corrosion layer within the scanning area, eliminating the influence of uneven distribution of

* **收稿日期**:2024-12-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078173), National Natural Science Foundation of China (52078173);广东省土木工程智能韧性结构重点实验室资助项目(2023B1212010004), Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering (2023B1212010004);广东省自然科学基金面上项目(2024A1515011980), Guangdong Provincial Natural Science Foundation General Project (2024A1515011980);深圳市基础研究专项(自然科学基金)面上项目(JCYJ20240813110505008),General Program of Shenzhen Basic Research Project (Natural Science Foundation) (JCYJ20240813110505008)
作者简介:许颖(1977—),女,浙江宁波人,哈尔滨工业大学(深圳)副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: cexyx@hotmail.com

protective layer thickness and providing an innovative and efficient method for early corrosion characterization of reinforced concrete structures.

Key words: terahertz spectroscopy; reinforced concrete; steel corrosion; early corrosion; corrosion thickness; non-destructive examination

钢筋混凝土结构作为现代建筑的主要形式,其安全性和耐久性对保障人民生命、财产安全具有重要意义.随着服役龄期的增加及各类不利因素(如混凝土保护层的碳化、Cl^-侵蚀、结构缺陷等)的影响[1],结构内部钢筋极易发生锈蚀.实现内部钢筋的精确定位和锈蚀状态的准确检测是结构健康监测的重要内容.钢筋混凝土结构检测中常用无损检测技术(包括红外线成像检测技术[2]、超声波检测技术[3]、电磁感应检测技术[4]等),主要依赖声、磁、电等性质.然而这些方法大都要等到钢筋锈蚀进入第二阶段末期甚至第三阶段(大量锈蚀产物膨胀对外部混凝土体积产生影响,保护层出现裂缝,其锈蚀程度已经较为严重),才能检测到锈蚀.而在实际工程中,锈蚀层厚度仅为几十微米(50~100 μm[5])时,混凝土可能已出现裂纹,且这些方法大都只能定性分析钢筋是否发生锈蚀,不能定量确定锈蚀程度.故目前常用的钢筋锈蚀检测方法由于技术本身的局限性,难以及时有效实现钢筋锈蚀的早期监测和定量表征.因此,有必要开发一种针对混凝土结构内部钢筋早期锈蚀定量表征的无损检测技术手段.

太赫兹波是一种电磁波,其频率为0.1~10 THz,波长为3~0.03 mm.太赫兹时域光谱技术具有瞬态性、高信噪比、高穿透性、频带宽、低能量性等特征[6],近年来,在多个领域[7-8]展现出广阔的应用前景.太赫兹波束由空气场进入保护层介质时,将同时发生反射和透射.透射光能够穿透保护层,并在混凝土保护层与钢筋界面处发生衰减较小的反射[9].目前,部分学者采用太赫兹光谱技术在土木工程的无损检测领域进行了相关探究工作.在土木工程混凝土材料的太赫兹透射性探究方面,部分学者[9-10]证明了太赫兹波相较于探地雷达、超声波、射线等传统技术,表现出更高的穿透能力,且混凝土和沙子具有相似的衰减系数,大多数石头样品具有较混凝土更低的衰减.基于太赫兹光谱信号的传输机理,证明了太赫兹光谱技术可以确定结构内部的钢筋位置[11-12].

结构的完整性和耐久性较大程度上受截面位置锈蚀程度的影响,因此,实现锈蚀的准确表征是无损检测技术具有实际工程意义的关键,其包含了对锈蚀的定性识别和定量表征.文献[13]实现了锈蚀混合物中特定锈蚀产物晶体的定性识别,因此,还需实现锈蚀厚度的定量测定.Hassan等[14]通过实验和模拟手段探究了钢筋混凝土中钢筋锈蚀层和覆盖层厚度对散射电场的影响.Fuse等[15]证明了太赫兹光谱信号可用于锈蚀层的厚度测量.Jiang等[16]实现了锈蚀层厚度测定,并实现了锈蚀层的厚度成像.综上所述,太赫兹光谱技术具有锈蚀成像的无损检测能力,然而,上述研究较多基于钢板等平面基体材料,而非钢筋基体界面.

鉴于此,本研究提出一种太赫兹反射时域光谱技术的钢筋混凝土结构早期锈蚀无损检测方法,以实现内部钢筋的位置确定、保护层和锈蚀层的厚度测定和成像表征.本文首先探究了太赫兹光谱信号对钢筋精确定位和保护层厚度测量方面的能力;然后评估了其对钢筋早期锈蚀下锈蚀层厚度的测量能力;最后实现了太赫兹光谱对保护层和锈蚀层厚度的成像表征.

1　实验设计与计算理论

研究中,采用Tera View Co., Ltd.制造的Tera pulse 4000的THz-TDS系统进行太赫兹光学参数测定.该系统光谱信噪比高达65 dB以上,其光谱覆盖范围为0.06~4.00 THz,光谱分辨率为1.2 cm^{-1}.太赫兹波束形状是高斯光束,透射模块聚焦后的波束大小为10 mm,反射模块聚焦后的波束大小为2 mm,发散角为±12.5°.

本研究的前置研究[17]中,制备了水泥净浆样品和锈蚀产物样品,利用太赫兹透射光谱技术,分别测定了其折射率,其中水泥净浆折射率为2.04,锈蚀产物折射率为2.80.可以看到,锈蚀产物的折射率明显

高于水泥净浆,说明太赫兹电磁波能够有效分辨覆盖层材料下的锈蚀层,也构成本研究的基础.

1.1 计算理论

太赫兹波对常见的非极性材料具有较高的透过率,在不同介质中传播时,由于折射率不同,在相邻介质界面处会发生折射,并在金属等极性材料表面发生衰减极小的反射.对于水泥净浆覆盖层-钢筋模型,太赫兹波从激光发射器射出后,首先在净浆表面发生反射和折射.入射到净浆中的太赫兹波继续传播直至遇到钢筋基体,随后再次发生发射.对于已经产生锈蚀的净浆层-锈蚀层-钢筋模型,太赫兹波会在净浆-锈蚀层界面多发生一次反射和折射.

当太赫兹波垂直入射时,可根据太赫兹波在多层介质中的传播理论,较为简便地计算出测定点处覆盖层介质厚度.理论上,光学时间差和层厚度之间的计算公式[18]可表示为:

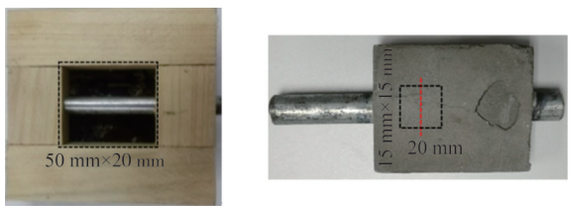
$$D = \frac{c \times \Delta T}{2n} \tag{1}$$

式中:D为测定点处介质层厚度,mm;c为真空光速,约为3×10^8 m/s;ΔT为介质层在太赫兹反射时域谱中的延迟时间;n为介质材料的光学参数折射率的标量.

1.2 实验设计

为探究太赫兹反射时域光谱在土木工程无损检测领域的适用性,制备了光圆钢筋混凝土结构,旨在实现对内部钢筋的定位和保护层厚度的测定.在制备过程中使用定制模板,其中内部样品大小为50 mm×20 mm×20 mm,钢筋直径为12 mm,如图1所示.混凝土结构采用水灰比为0.5的水泥净浆浇筑.湿养护3 d后拆除模板,继续湿养护7 d,使混凝土内部充分水化,结构固化.最后,取出样品干燥3 d,消除内部水分,并利用砂纸将样品表面打磨平整,以便太赫兹反射时域光谱的扫描测定.在太赫兹测定工作中,在钢筋方向的垂直正上方划定线扫描测定位置.测定点间隔0.4 mm,测定点数为50,测定长度为20 mm.测定点分别命名为X1,X2,…,X50.同时,对钢筋混凝土结构表面划定太赫兹波扫描区域,尺寸为15 mm×15 mm,扫描点数为95×95,扫描间距为0.16 mm,总点数为9 025.

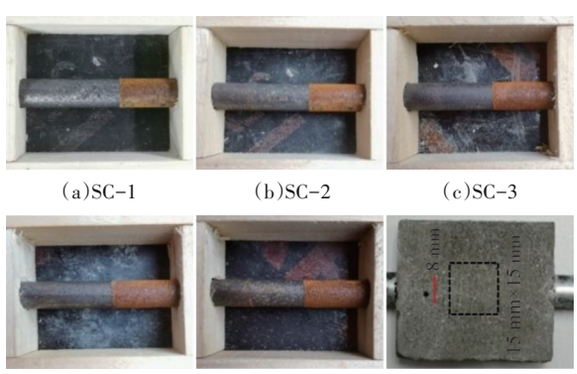
为了直观对比钢筋的锈蚀和未锈蚀区域,对钢筋的一端进行了加速锈蚀处理.锈蚀周期为1周、2周、3周、4周和5周,分别记为SC-1、SC-2、SC-3、SC-4和SC-5,制备得到的钢筋结构样品如图2(a)~(e)所示.在测定过程中,钢筋混凝土结构样品的大小、内部钢筋直径、净浆材料和水灰比等参数均与图1中未锈蚀混凝土结构样品一致.对各样品进行线扫描和面扫描测定,包括对垂直钢筋位置处的线扫描和锈蚀钢筋位置上方的面扫描.以图2(f)中的样品为例,在垂直锈蚀钢筋位置处进行线扫描,测定点间隔0.16 mm,共设置了50个测定点,覆盖了一个8 mm的长度范围.测定点分别命名为X1,X2,…,X50,其提供了沿垂直钢筋方向的太赫兹信号分布情况.此外,对样品进行面扫描,以获取锈蚀和未锈蚀钢筋区域的太赫兹反射时域光谱信号信息.太赫兹扫描区域尺寸为15 mm×15 mm,扫描点数为95×95,扫描间距为0.16 mm,总扫描点数为9 025.



(a)钢筋混凝土模具 (b)钢筋混凝土样品

图1 钢筋混凝土样品

Fig.1 Steel concrete samples



(a)SC-1 (b)SC-2 (c)SC-3

(d)SC-4 (e)SC-5 (f)测定实验

图2 锈蚀钢筋混凝土样品的制备和太赫兹扫描实验设计

Fig. 2 Preparation of corroded reinforced concrete and scanning determination of terahertz reflection spectroscopy

2 讨论和结果

2.1 结构内部的钢筋定位和保护层厚度测量

采用太赫兹反射时域光谱技术对钢筋混凝土结构样品进行了线扫描测定,扫描方向垂直于钢筋正上方,以确保准确测定钢筋位置及其保护层厚度.由图3可知,各测定点位置的太赫兹反射时域光谱信号呈现出两类特征.大部分位置处的太赫兹反射时域光谱信号中仅存在一个反射时域幅值,这主要归

因于净浆上表面对太赫兹信号的反射. 其次,在X24至X32这一特定区域内,光谱信号中出现了第二个反射时域幅值,意味着该区域位置即钢筋所在位置,其上表面发生对太赫兹信号的反射. 值得注意的是,在钢筋所在位置,太赫兹反射时域光谱信号中的第二信号幅值并非均匀分布,而是呈现出先增大后减小的趋势,其在瀑布图中表现为拱形分布. 这种变化模式与内部钢筋基体的曲面结构密切相关,反映了太赫兹信号在不同曲面位置处发生的反射现象.

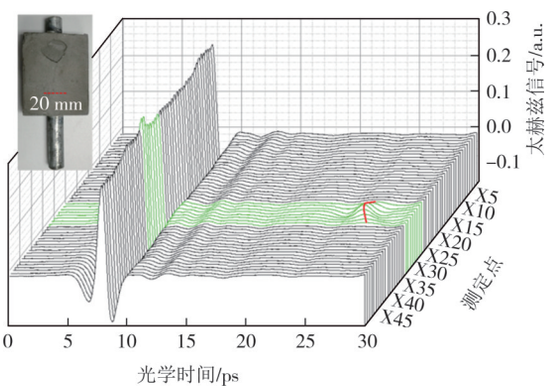


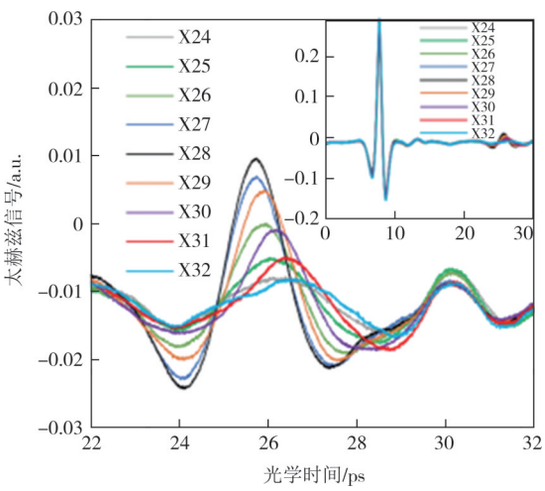
图 3　线扫描位置上太赫兹时域信号瀑布图

Fig.3　Waterfall plot of terahertz time-domain signals at various points in line scanning

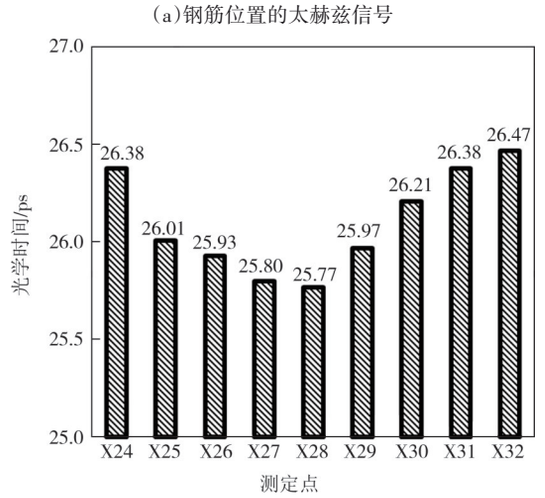
为精确计算钢筋混凝土结构的保护层厚度,进一步提取了钢筋位置处的太赫兹反射时域光谱信号. 如图4所示,在X24至X32区间内,第二信号幅值的大小随位置变化先增大后减小,且在X28点处达到最大值. 同时,对比各位置点第二幅值对应的光学时间[图4(b)],可以发现光学时间值呈反拱形分布,同样在X28点处取得最小光学时间值. 这一现象同样可以由内部钢筋的曲面结构来解释. 不同位置处的太赫兹反射时域光谱信号中第一信号幅值对应的光学时间基本一致. 这表明在X28点位置处,第一和第二信号幅值对应的光学时间差取得最小值,即该位置处取得结构的保护层厚度. 在该点位置处,太赫兹电磁波信号首先在保护层外表面发生反射和透射,反射信号形成第一信号幅值;透射信号则继续穿透保护层,直至到达钢筋曲面上表面并发生反射,形成第二信号幅值. 由于该位置处的传输距离最短,因此在时域谱中第二信号幅值最大,而对应光学时间最小. 精确提取第一和第二信号幅值对应的光学时间,得到在净浆中的传播时间为 18.05 ps,将真空光速 3×10^8 m/s 和净浆折射率 2.04 代入公式(1),有:

$$D=\frac{3\times10^{8}\times18.05\times10^{-12}}{2\times2.04}=0.001\,327\,2\ \mathrm{m}$$

得到净浆保护层厚度为 1 327.2 μm. 此外,根据保护层位置处第二信号幅值的大小及光学时间变化,可以推断出太赫兹反射时域光谱技术对内部钢筋位置的有效识别精度为 1.2 mm(0.4 mm×3). 该结果证明太赫兹反射时域光谱技术为钢筋混凝土结构中钢筋定位和保护层厚度测量提供了有效手段.



(a)钢筋位置的太赫兹信号



(b)第二信号幅值对应光学时间

图 4　线扫描钢筋处的反射信号及特征值

Fig.4　Terahertz time-domain signals at the position of steel bar in line scanning and its characteristic values

2.2　结构内部钢筋的锈蚀测定

为准确确定锈蚀钢筋的位置并测定锈蚀层的厚度,本研究对样品中发生锈蚀的区域进行了垂直钢筋位置处的扫描测定工作. 图 5 展示了线扫描位置处的太赫兹反射时域信号的瀑布图. 测定的线扫描区域包括了钢筋混凝土结构样品中的两类太赫兹反射时域光谱信号(未存在钢筋位置处反射信号和锈蚀钢筋位置处反射信号). 由于内部锈蚀钢筋的存在,太赫兹反射时域光谱信号中存在锈蚀层和钢筋

曲面对太赫兹信号的反射信号幅值2和3. 通过对比分析这些信号谱的差异,可精确定位钢筋位置. 此外,基于钢筋曲面基体对太赫兹信号的影响规律,发现钢筋曲面基体对应的信号幅值3在保护层位置(即钢筋曲面距净浆表面厚度最小的位置处)取得最大值,且对应的光学时间最短. 锈蚀层上表面反射的信号幅值2在幅值和对应光学时间上的差异较小,可能与锈蚀层的厚度不均匀及对太赫兹信号反射强度较弱有关.

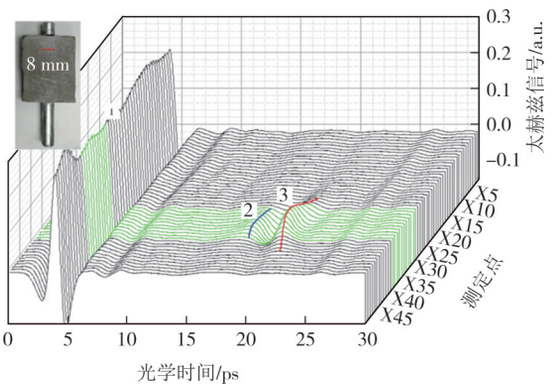


图5 锈蚀钢筋线扫描位置上的太赫兹反射信号瀑布图

Fig.5 Waterfall plot of terahertz time-domain signals in line scanning

由太赫兹反射时域信号的瀑布图,能够确定内部钢筋和保护层厚度位置. 由不同锈蚀龄期的钢筋混凝土样品保护层所在位置处的太赫兹反射时域反射信号(图6),可进一步提取时间幅值对应的光学时间,并计算得到保护层和锈蚀层厚度. 其中,锈蚀1周样品中未能得到第三信号幅值,其原因与锈蚀龄期较短和生成的锈蚀层厚度较薄有关. 通过太赫兹反射时域光谱信号的厚度计算公式(1),可计算得到保护层和锈蚀层的厚度值. 具体而言,锈蚀2周、3周、4周和5周的太赫兹波锈蚀层传播时间分别为0.85 ps、2.94 ps、3.22 ps和3.28 ps,分别代入公式(1),有:

$$D_2 = \frac{3 \times 10^8 \times 0.85 \times 10^{-12}}{2 \times 2.80} = 45.5\ \mu\text{m}$$

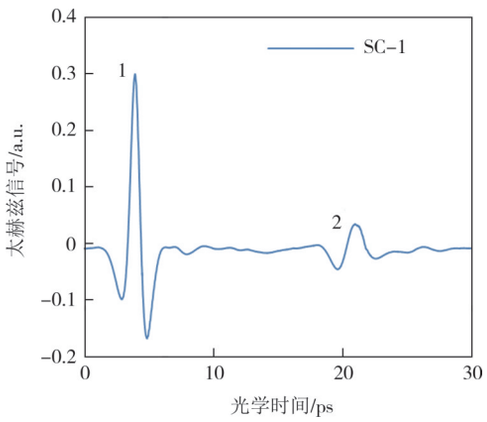
$$D_3 = \frac{3 \times 10^8 \times 2.94 \times 10^{-12}}{2 \times 2.80} = 157.5\ \mu\text{m}$$

$$D_4 = \frac{3 \times 10^8 \times 3.22 \times 10^{-12}}{2 \times 2.80} = 172.5\ \mu\text{m}$$

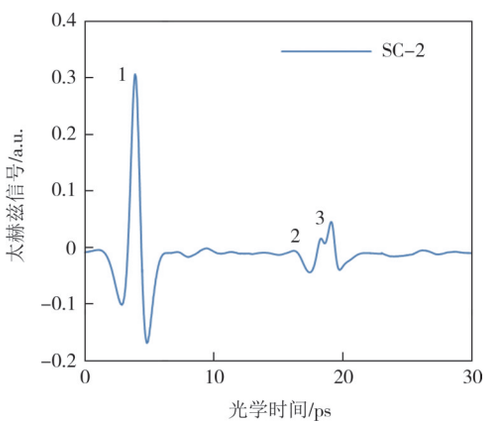
$$D_5 = \frac{3 \times 10^8 \times 3.28 \times 10^{-12}}{2 \times 2.80} = 175.7\ \mu\text{m}$$

即锈蚀2周、3周、4周和5周的锈蚀层厚度分别为45.5 μm、157.5 μm、172.5 μm和175.7 μm.

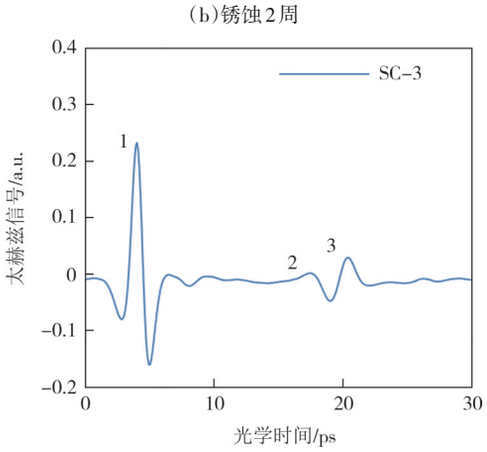
实际上,钢筋混凝土从开始锈蚀到锈蚀导致保护层胀裂主要包括三个阶段:铁锈自由发展阶段、保



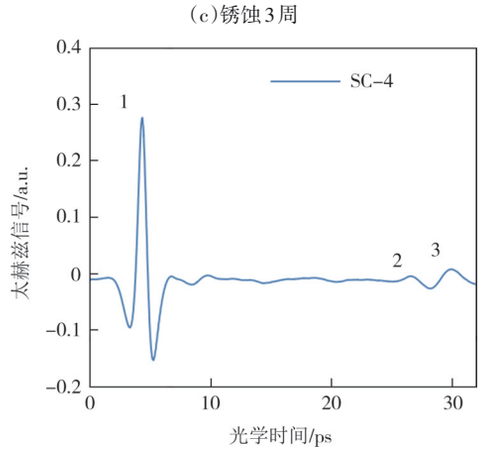
(a)锈蚀1周



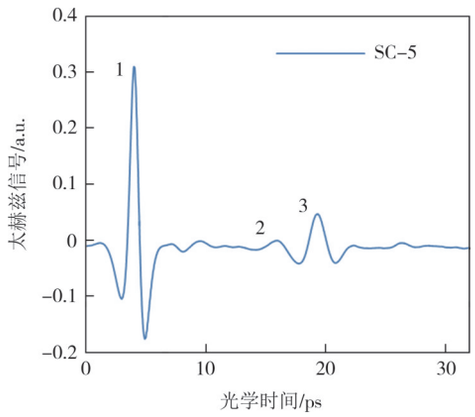
(b)锈蚀2周



(c)锈蚀3周



(d)锈蚀4周



(e)锈蚀5周

图6　不同锈蚀龄期保护层位置处的太赫兹信号

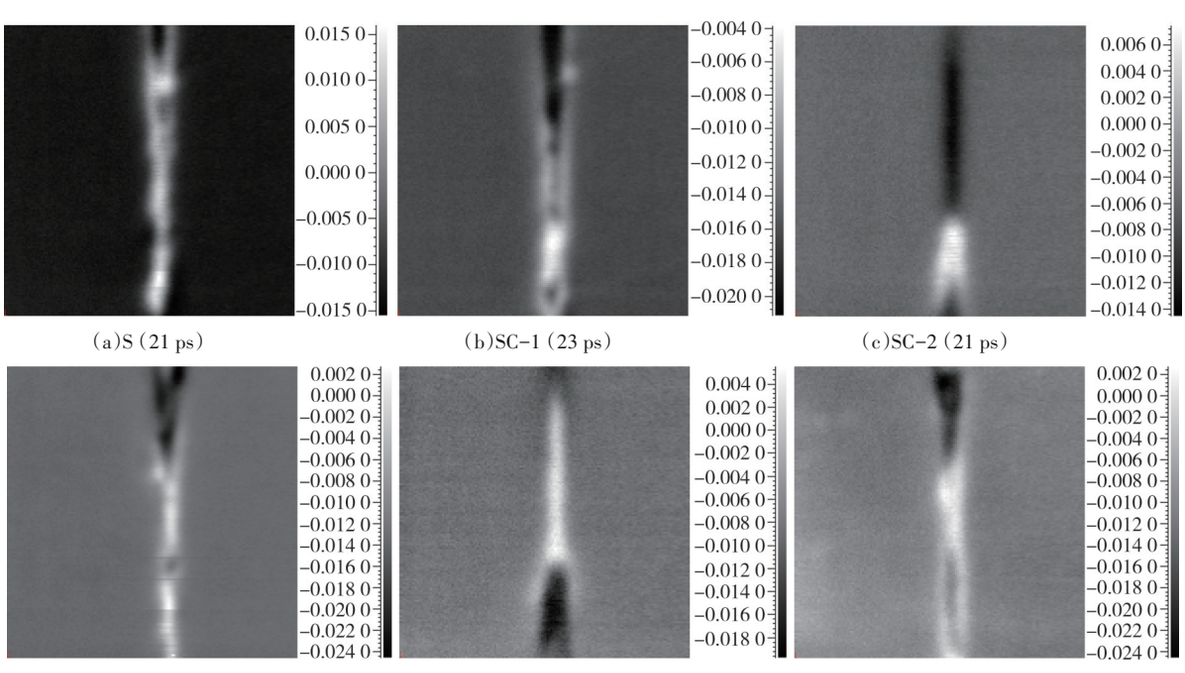
Fig.6　Terahertz time-domain signals at the position of protective layer with different corrosion times

护层受拉应力阶段和保护层胀裂裂缝阶段.混凝土内部钢筋发生局部点锈时,引发径向开裂的临界锈蚀层厚度为30~272 μm;而发生均匀锈蚀时,临界厚度为3~74 μm[5,19].当锈蚀深度小于0.1 mm时,锈蚀程度为轻度.此外,实际检测数据表明钢筋锈蚀深度小于50 μm时,对于普通钢筋混凝土承重构件常用钢筋型号而言,锈蚀深度仅为0.09%~0.20%,结构仍处于早期锈蚀阶段[20].本研究中,太赫兹光谱技术对锈蚀层的最小可测精度低于45 μm,仍处于钢筋早期锈蚀阶段,故该技术可用于结构内部钢筋早期锈蚀的检测.

现有锈蚀测定技术中,半电池电位法需要裸露钢筋,破除混凝土保护层时会对结构造成局部破坏,只能对锈蚀进行定性评估,无法定量表征锈蚀程度.光纤传感器能够有效地监测钢筋的早期锈蚀,但需预先埋置在结构中,无法测量既有结构的钢筋锈蚀情况.漏磁检测一般用于定性分析,目前难以监测损伤程度,且一般用于形状复杂的构件[21].因此,该技术对混凝土内部钢筋早期锈蚀无损检测具有极大优势与应用潜力.

2.3　钢筋混凝土结构的太赫兹厚度成像

为直观评价混凝土结构中钢筋位置处的保护层厚度,利用太赫兹反射时域光谱技术对结构样品进行了扫描表征.通过提取扫描区域内所有位置点太赫兹反射时域光谱中固定时间处的信号幅值大小[20],可实现钢筋混凝土结构样品的时域成像结果(图7).不同样品在对应特征光学时间位置处得到的成像结果分别为S(21 ps)、SC-1(23 ps)、SC-2(21 ps)、SC-3(21.5 ps)、SC-4(29.5 ps)和SC-5(16 ps).根据图7中的灰度值变化,可以确定内部钢筋的位置.对未锈蚀钢筋混凝土样品(S)来说,钢筋位置处的信号幅值强度明显高于两侧区域,如图7(a)所示.而对于锈蚀钢筋混凝土样品,未存在钢筋区域的信号幅值介于锈蚀钢筋区域和未锈蚀钢筋区域之间.钢筋发生锈蚀后,其所在区域的信号相对幅值显著降低,如图7(b)



(a)S (21 ps)　(b)SC-1 (23 ps)　(c)SC-2 (21 ps)

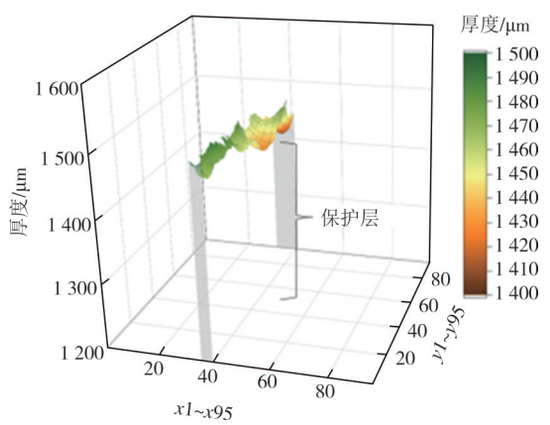
(d)SC-3 (21.5 ps)　(e)SC-4 (29.5 ps)　(f)SC-5 (16 ps)

图7　不同锈蚀龄期样品的太赫兹时域成像

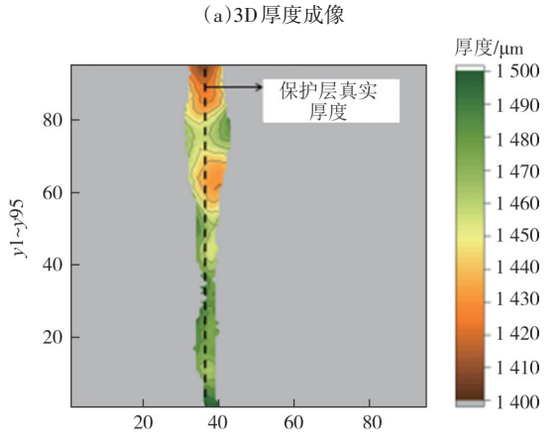
Fig.7　Terahertz time-domain images of different corrosion times

~(f)所示.太赫兹反射时域成像结果受保护层厚度分布不均匀的影响较大,会影响对内部钢筋是否发生锈蚀的准确判断.同时,该成像方法仅能说明扫描区域内存在灰度值差异,不能实现对锈蚀程度的准确定量表征.

基于太赫兹光谱技术的厚度测定能力,可进一步结合扫描测量实现厚度定量成像表征.以样品S的太赫兹光谱信号为例,扫描区域内的数据集可分为有钢筋数据集和无钢筋数据集.无钢筋存在时,太赫兹光谱信号中仅观察到由净浆上表面反射的信号幅值;而存在钢筋时,光谱信号中则出现两个信号幅值,其中第二信号幅值由钢筋界面反射产生.通过数据处理,可以得到扫描区域内保护层厚度成像结果,如图8所示.从成像结果可以看出,只有在扫描区域内存在钢筋时,才能提取到钢筋所在位置的净浆保护层厚度值.尽管成像结果中的厚度分布与钢筋位置相符,但成像形状分布无明显规律,这主要与成像方法中对第二信号幅值的有效提取阈值有关.总体



(a)3D厚度成像



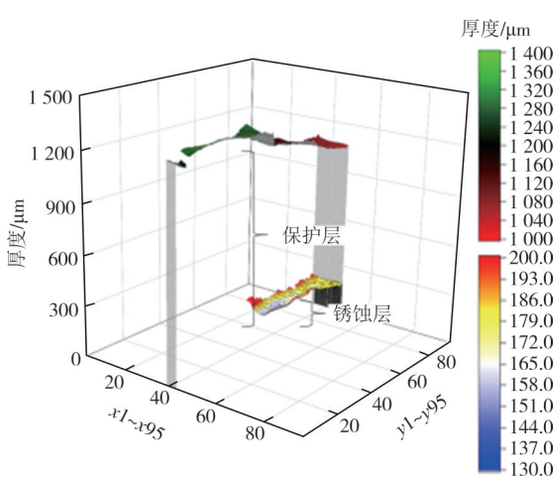
(b)2D厚度成像

图8 未锈蚀钢筋混凝土样品的层厚度成像

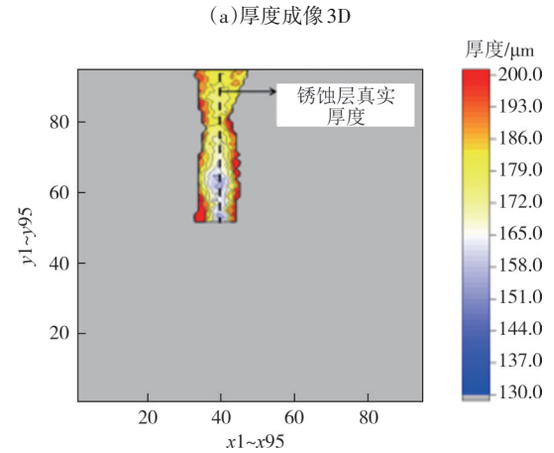
Fig.8 Thickness imaging of protective layer of un-corroded reinforced concrete

而言,在平行于钢筋轴向方向的正上方,计算厚度值呈现两侧大、中间小的分布特征.同时,在最小厚度值位置处对应钢筋混凝土结构中的保护层厚度.研究结果证明,太赫兹光谱技术不仅能够精确定位混凝土内部的钢筋位置,还能实现保护层厚度的成像表征,为混凝土结构的无损检测提供了一种有效手段.

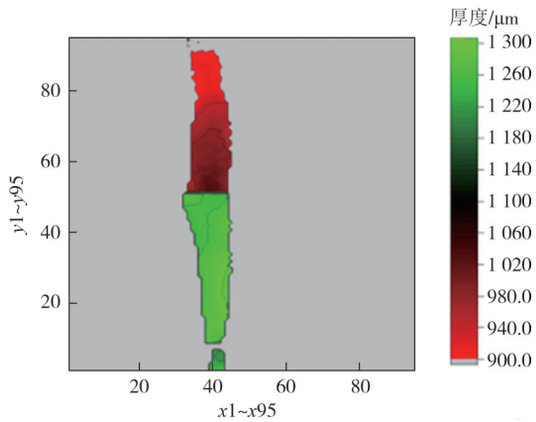
通过利用不同层介质对太赫兹光谱信号的反射特性,能够实现覆盖层和锈蚀层厚度的精确测量.以锈蚀钢筋混凝土样品(SC-3)为例,对扫描区域内数据进行详细处理,成像结果如图9所示.在样品制备过程中,对上端钢筋进行了加速锈蚀,因此成像结果中清晰地展示了锈蚀和未锈蚀两个区域.结果中可视化地展示了锈蚀层和保护层的相对位置和厚度大小.厚度成像结果显示出层厚度呈中间小、两侧大的分布特征,其类似于图8中未锈蚀结构的处理结果.同时,在x方向上厚度曲面的最小值对应真实的锈蚀层和保护层厚度值.这一现象与钢筋的曲面基体结构密切相关.综上所述,太赫兹锈蚀成像表征方法作



(a)厚度成像3D



(b)锈蚀层2D成像



(c)保护层2D厚度成像

图 9　锈蚀钢筋混凝土样品的层厚度成像

Fig. 9　Thickness imaging of protective layer of corroded reinforced concrete

为一种新型的无损检测技术,在钢筋混凝土结构内部钢筋的位置确定、保护层位置处净浆层和锈蚀层的厚度计算和成像表征方面展现出了巨大的应用潜力.

3　结 论

本文利用太赫兹光谱信号的传输机理,确定了该技术可用于土木工程钢筋混凝土结构的无损检测.得到如下结论:

1) 太赫兹反射时域光谱技术对内部钢筋的有效识别精度在1.2 mm范围内,为钢筋混凝土结构中钢筋的精确定位和保护层厚度的准确测量提供了有效手段.

2) 太赫兹反射时域光谱技术对锈蚀层的最小可测厚度达45 μm,仍处于锈蚀早期阶段,证明该技术具有对混凝土内部钢筋早期锈蚀无损检测的潜力.

3) 在可视化方面,该技术能够定量可视化钢筋所在位置处的保护层厚度和钢筋表面的锈蚀层厚度,排除了常规成像方法中保护层厚度分布不均匀的影响,为太赫兹无损检测技术在土木工程钢筋混凝土中的应用奠定了基础.

本研究处于太赫兹技术在钢筋混凝土锈蚀检测应用研究的初期阶段,后续研究将通过提高太赫兹发射功率、调整太赫兹波参数等方法,结合数值模拟手段,进一步考虑真实工况下混凝土保护层厚度、混凝土材料的复杂性、锈蚀分布不均匀性以及钢筋表面形状(带肋)对散射特性影响等问题.

参考文献

[1] MA Y F, GUO Z Z, WANG L, et al. Probabilistic life prediction for reinforced concrete structures subjected to seasonal corrosion-fatigue damage [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(7): 04020117.

[2] PEDRAM M, TAYLOR S, HAMILL G, et al. Objective characterisation of reinforced concrete with progressive corrosion defects through clustering and thresholding of infrared images[J]. Measurement, 2024, 225: 114017.

[3] YANG Z Y, YANG H J, TIAN T, et al. A review on guided-ultrasonic-wave-based structural health monitoring: From fundamental theory to machine learning techniques [J]. Ultrasonics, 2023, 133: 107014.

[4] LEI I, JIN X Y, TIAN Y, et al. Numerical simulation of a magnetic corrosion detector for corrosion detection of steel rebar in concrete[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2022, 12(1): 1-14.

[5] KIM S, SUREK J, BAKER-JARVIS J. Electromagnetic metrology on concrete and corrosion[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2011, 116(3): 655.

[6] ZHONG S C. Progress in terahertz nondestructive testing: a review [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019, 14(3): 273-281.

[7] ZHANG H, YAN Q. Synchrotron-based temperature-dependent terahertz and far-infrared spectroscopy of aerographite and single-walled carbon nanotube aerogel [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2022, 43(1): 195-212.

[8] YOUNG J J, HERNANDEZ-SERRANO A I, HARDWICKE J, et al. In vivo terahertz sensing of psoriasis and eczema patients[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 17546.

[9] ABINA A, PUC U, JEGLIČ A, et al. Applications of terahertz spectroscopy in the field of construction and building materials [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2015, 50(4): 279-303.

[10] 廉泽, 李新禹, 俞华, 等. 基于太赫兹时域光谱的XLPE不同尺度缺陷研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(4): 100-108.
LIAN Z, LI X Y, YU H, et al. Study on different scales of defects in XLPE based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. Insulating Materials, 2024, 57(4): 100-108. (in Chinese)

[11] 毕凌志, 袁明辉, 朱亦鸣. 利用太赫兹波检测建筑物内钢筋的方法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0125003.
BI L Z, YUAN M H, ZHU Y M. Method of measuring steel bar in building by THz wave[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0125003. (in Chinese)

[12] KOBAYASHI C, NISHIWAKI T, TANABE T, et al. Non-

destructive testing of reinforced concrete structures using sub-terahertz reflected waves [J]. Developments in the Built Environment, 2024, 18: 100423.

[13] JIANG X L, XU Y, LI E N, et al. Characteristic identification of steel corrosion products based on terahertz transmission spectroscopy [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 107996.

[14] HASSAN A M, MARTYS N S, GARBOCZI E J, et al. Measurement and simulation of millimeter wave scattering cross-sections from steel-reinforced concrete [J]. AIP Conference Proceedings, 2014, 1581(1): 773-780.

[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] JIANG X L, XU Y, ZHAO D C. Terahertz non-destructive testing and imaging of corrosion in coated steel plates [J]. Construction and Building Materials, 2023, 385: 131427.

[17] JIANG X L, XU Y, HU H, et al. Nondestructive testing of corrosion thickness in coated steel structures with THz-TDS [J]. Measurement, 2023, 217: 113088.

[18] 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. (in Chinese)

[19] DUTHINH D. Cracking of concrete due to corrosion of reinforcing bars. NIST Technical Note, 7714 [R], Washintong D C: U.S. Government Printing Office. 2010.

[20] 王胜利, 刘华, 郑山锁, 等. 一般大气环境下钢筋锈蚀深度的RBF神经网络预测模型研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(2): 269-277.
WANG S L, LIU H, ZHENG S S, et al. RBF neural network prediction model for steel bar corrosion depth under general atmospheric environment [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(2): 269-277. (in Chinese)

[21] 周佳骏, 李丹. 混凝土结构钢筋锈蚀无损检测方法研究进展[J]. 现代交通与冶金材料, 2024, 4(2): 62-76.
ZHOU J J, LI D. Research progress on non-destructive testing methods for rebar corrosion in concrete structures [J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2024, 4(2): 62-76. (in Chinese)