

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号



# 中国机电一体化技术应用协会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

## 隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法

Insulation tile bonding defect detection Terahertz time domain spectroscopy

(工作组讨论稿)

(本草案完成时间: 2024 年 3 月)

在提交反馈意见时, 请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国机电一体化技术应用协会 发布

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由××××提出。

本文件由中国机电一体化技术应用协会归口。

本文件起草单位：中国运载火箭技术研究院、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、

本文件主要起草人：张铁犁、刘林、宋金城、刘华、姜黎、于淼、杜鹏昊、杜孟新

# 隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法

## 1 范围

本标准规定了基于太赫兹时域光谱技术的隔热瓦粘接缺陷检测的检测依据、检测目的、检测项目、检测要求、检测条件及设备、检测程序与方法、检测数据的处理、检测结果的分析及评定等。

本标准适用于应用太赫兹时域光谱技术进行隔热瓦粘接缺陷的检测。其他非金属、非极性粘接类材料体系粘接缺陷检测可参照使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 4249 产品几何技术规范（GPS） 基础 概念、原则和规则

GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义

JJF 1603 （0.1~2.5）THz太赫兹光谱仪校准规范

## 3 术语和定义

GB/T 4249、GB/T 20737、JJF 1603界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 太赫兹辐射

频率在0.1THz~10THz之间，波长在30 μm~3mm范围的电磁辐射。处于微波与红外之间的过渡区域，也称太赫兹波或太赫兹。

（JJF 1603 （0.1~2.5）THz太赫兹光谱仪校准规范 第2.1节内容）

### 3.2

#### 太赫兹时域光谱技术

通过测量太赫兹脉冲电场时域波形，利用傅里叶变换算法，得到太赫兹脉冲在频域的光谱和相位的技术。

（JJF 1603 （0.1~2.5）THz太赫兹光谱仪校准规范 第2.2节内容）

### 3.3

#### 太赫兹回波脉冲

太赫兹脉冲通过光学元件传播时，在元件前后表面往复反射后被探测到的时域脉冲。太赫兹回波脉冲与主脉冲在时域产生时间延迟，在频域产生光谱干涉。

（JJF 1603 （0.1~2.5）THz太赫兹光谱仪校准规范 第2.3节内容）

### 3.4

#### 隔热瓦粘接结构

隔热瓦为块状多孔隔热材料，表面涂有隔热涂层，瓦通过硅橡胶粘接于应变隔离垫，瓦与应变隔离垫粘接结构通过硅橡胶粘接于飞行器表面。

## 4 检测依据

检测依据为技术条件和相关技术规范等。

## 5 检测目的

识别隔热瓦粘接缺陷。

## 6 检测项目

检测项目如下：

- a) 脱粘缺陷面积；
- b) 夹杂缺陷面积；
- c) 胶层厚度均匀性。

## 7 检测要求

检测要求如下：

- a) 所有检测项目的测试内容应符合设计任务书、出厂报告或其他相关规范的要求；
- b) 被测样品交付时应包括必要的工程文件及工装；
- c) 检测场地应具有安全防护措施及装置；
- d) 被测样品反馈的检测信号应有清晰的反射峰；
- e) 被测样品表面应清洁，目测无粘污物和附着物等；
- f) 检测人员应了解被测样品的材料、结构特性以及制作工艺方法；
- g) 扫描过程中观察执行机构，如有意外紧急停机，避免人员及物品损害。

## 8 检测条件及设备

### 8.1 检测条件

检测条件如下：

- a) 环境温度：10℃～50℃；
- b) 相对湿度：不大于 70%；
- c) 操作环境应无太赫兹频段电磁辐射、强震动干扰。

### 8.2 检测设备

检测所用仪器设备应经过计量技术机构检定（或校准），满足检测使用要求，并在有效期内。检测的设备及技术要求的见表 1。

表 1 检测设备及技术要求

设备名称	技术参数	用途
太赫兹时域光谱测量系统 (包含执行机构)	检测厚度分辨率：30μm 执行机构横向分辨率：1mm	用于隔热瓦粘接缺陷检测

## 9 检测程序与方法

### 9.1 检测前准备

隔热瓦粘接缺陷检测前准备步骤如下：

- a) 根据被测样品大小合理划分单次扫描区域、扫描步进，根据被测样品平面或者曲面分别选择二维扫描台或机械臂作为执行机构。当选择机械臂作为执行机构时，采用三维设计软件求得每个扫描点法向量，根据每个点法向量设计机械臂工具端运动姿态与路径；
- b) 微调探头与被测样品角度，保证被测样品胶层面法向量与太赫兹探测光路角度偏差在 5° 以内。

### 9.2 预检测

隔热瓦粘接缺陷预检测步骤如下：

- a) 开机预热 30min，使测量仪器内飞秒激光器运行至稳定状态；

- b) 以低速运行执行机构扫描路径，确认被测样品、固定工装与执行机构工作范围，确保不发生碰撞；
- c) 微调探头固定工装，观察反射峰位置，确保被测面距镜头距离与镜头焦距一致；
- d) 调试太赫兹信号处理系统的信号处理参数，获得清晰、可辨的反射峰图形。

### 9.3 检测

隔热瓦粘接缺陷检测步骤如下：

- a) 启动执行机构对被测样品进行扫描，通过执行机构、太赫兹系统的 I/O 面板进行时序统一，用于标记每个扫描点的定位信息和太赫兹信号，将每个扫描点的原始数据存储在硬盘；
- b) 按公式（3）计算原始数据的脱粘面积或夹杂面积，按 11.1 和 11.2 分析与判定被测样品的缺陷类型，查阅原始数据中缺陷的脉冲间隔，将结果记录在附录 A 格式 A.2 中；
- c) 先按公式（2）计算单点胶层厚度，再按公式（4）计算胶层厚度标准差，将结果记录在附录 A 格式 A.2 中。

### 10 检测数据的处理

太赫兹辐射在介质交界面产生太赫兹回波，透射的太赫兹波在隔热瓦不同材料层上、下表面反射，探测器检测到携带样品信息的太赫兹回波脉冲，通过分析太赫兹回波脉冲及其时间间隔可获得被测胶层的缺胶面积、脱粘面积，夹杂，厚度均匀性等信息。隔热瓦内部层级结构如图 1 所示，共分为涂层、隔热材料、胶层、应变隔离垫、基底等 6 层。涂层涂覆于隔热材料表面，隔热材料通过胶层与应变隔离垫粘接，应变隔离垫通过胶层与基底粘接。以上胶层、下胶层的上下共 4 个界面为例，太赫兹脉冲在各层界面反射示意图及回波信号如图 2 所示。

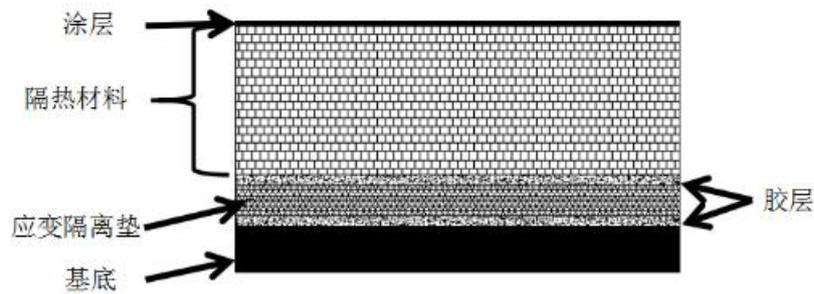


图 1 隔热瓦组件内部层级结构示意图

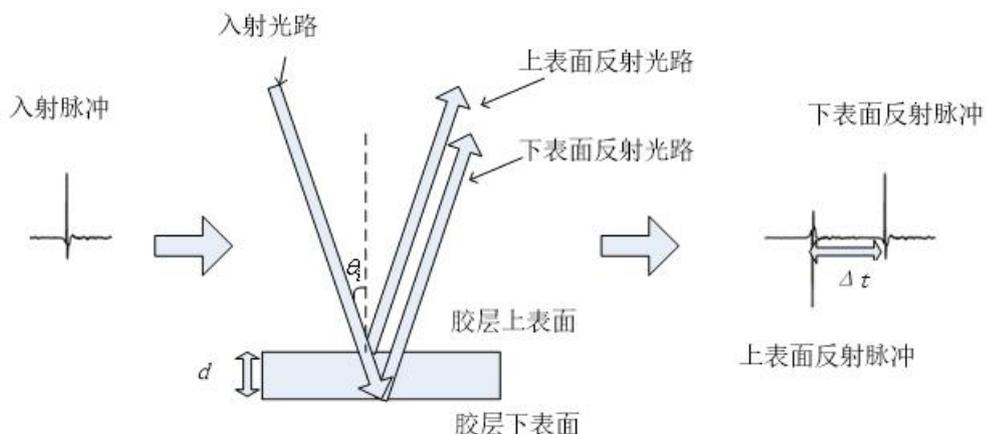


图 2 图太赫兹脉冲在胶层上下表面反射示意图及回波信号

太赫兹波以角度  $\theta_i$  入射，在胶层上表面产生太赫兹回波，透射的太赫兹波在胶层下表面反射，携带样品信息的太赫兹回波，两次回波时间间隔为  $\Delta t$ 。根据太赫兹波的传播理论，建立了反射式单点 Z 轴方向胶层厚度提取模型见公式 (1)。

$$d = \frac{c\Delta t}{2\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_i}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$d$ ——胶层 Z 轴方向厚度，单位为毫米 (mm)；

$\Delta t$ ——两次回波时间间隔，单位为秒 (s)；

$n_0$ ——空气折射率；

$n$ ——胶层样品折射率；

$c$ ——光在空气中的传播速度，单位为米/秒 (m/s)。

当太赫兹波垂直入射时，单点厚度模型可简化为公式 (2)。

$$d = \Delta t \frac{c}{2n} \dots\dots\dots (2)$$

若已知胶层样品复介电常数实部  $n$ ，探测两个脉冲之间的时间间隔就可以求出样品 Z 轴方向内外形面差值，即单点样品厚度。

执行机构逐点进行扫描成像，如图 3 所示，每一个像素点覆盖面积近似为正方形，边长为扫描步进  $l$ ，则缺陷面积  $s$  为缺陷区域像素点累计之和按公式 (3) 计算。

$$s = il^2 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$s$ ——缺陷面积，单位为平方毫米 (mm<sup>2</sup>)；

$i$ ——缺陷像素点个数；

$l$ ——扫描步进，单位为毫米 (mm)。

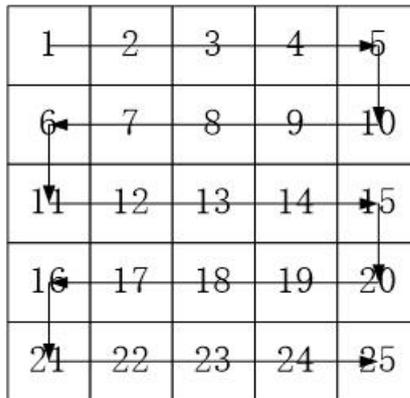


图 3 逐点扫描示意图

对被测样品进行逐点扫描测量，胶层厚度标准差  $\sigma$  按下式计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$n$ ——测量总点数；

$d_i$ ——第  $i$  次测量时胶层厚度；

$\bar{d}$ —— $n$ 次测量的胶层厚度平均值；  
 $\sigma$ ——胶层厚度标准差。

## 11 检测结果的分析与评定

### 11.1 脱粘缺陷面积分析与评定依据

通过反射峰数量、强度对脱粘面积进行分析与判定，具体依据如下：

- 粘接良好的胶层上下表面各具有清晰的一个反射峰；
- 脱粘情况下胶层附件有空气层，引入额外反射峰，原反射峰附近位置出现多余反射峰；
- 按公式（3）计算缺陷面积，通过上述判据确定缺陷种类。

### 11.2 夹杂缺陷面积分析与评定依据

通过反射峰数量、强度对夹杂进行分析与判定，具体依据如下：

- 粘接良好的胶层上下表面各具有清晰的一个反射峰；
- 有多余物情况下引入反射峰，在横向上多余物附近反射峰不连续；
- 按公式（3）计算缺陷面积，通过上述判据确定缺陷种类。

### 11.3 胶层厚度均匀性分析与评定依据

通过对各个测量点胶层厚度的计算进行均匀性分析，具体依据如下：

- 单点胶层厚度按公式（2）计算；
- 胶层厚度标准差依据单点胶层厚度及公式（4）计算。

### 11.4 检测报告

经检测的样品应出具检测报告。检测报告至少应包括下列信息：

- 标题（如：检测报告）；
- 实验室名称和地址；
- 开展实验室活动的地点（包括：客户设施、实验室固定设施以外的地点、相关的临时或移动设施内）；
- 客户名称、地址和联络信息；
- 所用方法的识别；
- 被测物品的描述、识别，物品的状态（必要时）；
- 被测物品的接收日期；
- 检测日期、检测条件、检测依据文件等；
- 报告发布日期；
- 检测结果，带有测量单位（适当时）、有关声明（结果仅于被检测物品有关，并仅适用于收到的样品；当客户提供的信息可能影响结果的有效性时，应由免责声明；未经实验室批准不得部分复制报告）；
- 报告检测人、核验人和批准人的识别（能够追溯的标识，如手写签名、电子签名或其他等效标识）。

## 附录 A

(资料性)

## 基于太赫兹时域光谱技术的隔热瓦粘接缺陷检测原始记录格式

示例 1：检测原始记录封面格式。

基于太赫兹时域光谱技术的隔热瓦粘接缺陷检测原始记录

客 户		检测时间	年 月 日		
被 检 设 备		环境温度	℃		
型号/规格		相对湿度	%		
编 号		有效期至	年 月 日		
制 造 商		检测地点			
证书编号					
检测依据文件					
所用测量设备	型号/规格	出厂编号	溯源单位/证书编号	不确定度或准确度等级或最大允许误差	有效期至
					年 月 日
					年 月 日
					年 月 日
					年 月 日
					年 月 日
					年 月 日

检测人：

核验人：

示例 2：检测原始记录内页格式

## 检测结果

检测项目				结论								备注
外观和附件	外观完好			是 ( )				否 ( )				
	附件齐全			是 ( )				否 ( )				
脱粘缺陷 面积	编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	
	缺陷位置 (mm)											
	缺陷面积 (mm <sup>2</sup> )											
	脉冲间隔 (ps)											
夹杂缺陷 面积	编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	
	缺陷位置 (mm)											
	缺陷面积 (mm <sup>2</sup> )											
	脉冲间隔 (ps)											
胶层厚度标 准差												

附 2

# 隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光 谱法

(征求意见稿)

编 制 说 明

2024年9月

## 目 录

1. 任务来源 .....	3
2. 起草单位 .....	3
3. 编制背景 .....	3
4. 主要工作过程 .....	3
5. 编写规则 .....	4
6. 标准的主要内容 .....	7
7. 标准制定的目的 .....	8
8. 有关专利的说明 .....	8
9. 关于标准性质 .....	9

## 1.任务来源

《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》团体标准编制工作，来源于工业和信息化部“2022年太赫兹无损检测技术开发及应用项目”（内部）。通过编制团体标准，有助于在突破太赫兹无损检测技术核心技术基础上，形成科学性强的设备开发及工程化应用规范，强化相关仪器设备的生产制造和应用推广，有效满足我国在航空航天、半导体和集成电路、新材料等高端制造业细分领域的研究制造需求。

## 2.起草单位

《基于传感器的电炉炼钢产线 智能化建设导则》团体标准起草单位包括中国运载火箭技术研究院、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所。

## 3.编制背景

随着材料科学的迅猛进步，复合材料和高分子材料在航空航天等高科技领域得到了广泛的应用。鉴于这些材料的独特属性，常规的探伤技术难以对其进行有效检测。太赫兹波，一种波长介于3毫米至30微米、频率介于100吉赫兹至10太赫兹的电磁波，作为一种新兴的无损检测技术，能够与传统检测方法相辅相成，为复合材料的无损检测提供更为全面的技术支持。太赫兹波对多数非金属、非极性材料

具有良好的穿透性，通过结合成像技术，可以对这些材料的内部缺陷进行无损探伤，且不会引起被检测对象的光电离，从而确保了更高的安全性。

近年来，复合材料领域取得了显著的发展，越来越多的复合材料被应用于航空航天、船舶、汽车以及核工业等高新技术领域。利用太赫兹波对复合材料进行无损检测的趋势也应运而生。为了确保材料在后期使用过程中的可靠性，对复合材料在生产、加工、使用等环节进行缺陷检测显得尤为重要。太赫兹无损检测技术能够在上述环节中有效地识别复合材料可能出现的各种缺陷。目前，太赫兹检测技术的工业化应用及其检测设备的小型化研究已成为无损检测领域的研究焦点。尽管国内外已有太赫兹无损检测技术在复合材料检测方面的成功应用案例，但总体而言，太赫兹无损检测技术尚处于起步阶段，成像质量、成像速度、硬件设备等方面仍有待进一步完善。此外，行业内部缺乏针对太赫兹检测技术的统一技术标准，以规范检测仪器的生产制造、应用场景、使用方法等。因此，本项目针对当前行业的这一短板，对太赫兹时域光谱技术的缺陷检测方法进行标准化，旨在为相关应用场景提供必要的参考和指导。

#### **4.主要工作过程**

2023年6月25日，在北京天泰宾馆召开了2022年太赫兹无损检测技术开发及应用项目工作组会议，会上对拟立项的太赫兹时域光谱技术缺陷检测方法相关技术标准规范可行性进行了讨论。结合项目

成果物要求，初步确定继续开展技术研究，拟推进基于太赫兹时域光谱法技术的无损检测相关标准规范研究制定工作。

2023年10月30日，在北京长征宾馆召开了太赫兹时域光谱技术缺陷检测方法相关技术标准规范编制交流会。会上通过讨论，确定推进以《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》为主题的团体标准编制工作。会上确定了标准参与单位、参与人员及相关工作流程的初步时间节点。标准牵头起草单位为中国运载火箭技术研究院，参与单位包括机械工业仪器仪表综合技术经济研究所等。

2023年11月30日，在北京长征宾馆召开了《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》标准工作组会，会上讨论确定了标准技术框架，并同步确定进行现场调研的需求应用单位，拟通过现场调研的方式确定标准中关于检测的流程步骤及相关技术方法/参数等。

2023年12月22日，《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》团体标准获批立项。

2024年1月中旬，标准工作组相关成员赴中电科思仪、青源峰达、首师大开展太赫兹无损检测仪及关键技术部件调研，明确相关设备架构及技术指标参数。同期赴西安航天化学、上海飞机制造有限公司、有研半导体开展调研，明确需方应用太赫兹无损检测仪的场景需求及检测步骤流程。调研后根据相关结果对标准条款内容进行了编制和梳理，形成《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》首稿草案。

2024年4月26日，在北京长征宾馆召开了《隔热瓦粘接缺陷检

测 太赫兹时域光谱法》标准工作组会，工作组内部对第一稿标准草案进行了相关讨论。确定草案包含检测依据、检测目的、检测项目、检测要求、检测条件及设备、检测程序与方法、检测数据的处理、检测结果的分析与评定等具体章节及内容，并邀请需方单位对标准条款中所提到的技术指标进行了确认和补充完善。会后通过进一步修改完善形成《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》第二稿草案。

2024年6月11日，在北京长征宾馆召开了《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》标准工作组第一次专家指导会，会上对现有标准草案编制情况及内容进行了详细汇报，并邀请天津大学、青岛青源峰达太赫兹科技有限公司、北京航空航天大学、首都师范大学、北京北分瑞利分析仪器（集团）有限责任公司技术专家及标准化专家对团体标准草案进行了指导及评审。与会专家进行了热烈的讨论，提出若干意见和建议，并对部分标准条款和技术参数进行了调整。会后，工作组成员对标准进行了修改，形成《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》第三稿草案。

2024年8月26日，项目牵头单位在长征宾馆召开了《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》团体标准第二次专家咨询指导会。会上对标准草案编制情况及相关内容进行了汇报，邀请天津大学、青岛青源峰达太赫兹科技有限公司、北京航空航天大学、首都师范大学、北京北分瑞利分析仪器（集团）有限责任公司技术专家及标准化专家对标准内容条款进行了进一步指导和建议。与会专家针对现有标准编制情况，提出少许优化建议。会后工作组成员对标准进行了修改，形

成《隔热瓦粘接缺陷检测 太赫兹时域光谱法》征求意见稿。

## 5.编写规则

本标准按照 GB/T 1.1—2009 的规则起草。

## 6.标准的主要内容

本标准主要规定了基于太赫兹时域光谱技术的隔热瓦粘接缺陷检测的检测依据、检测目的、检测项目、检测要求、检测条件及设备、检测程序与方法、检测数据的处理、检测结果的分析及评定等。适用于应用太赫兹时域光谱技术进行隔热瓦粘接缺陷的检测。其他非金属、非极性粘接类材料体系粘接缺陷检测可参照使用。其具体章节条款如下：

### 前言

1. 范围
2. 规范性引用文件
3. 术语和定义
4. 检测依据
5. 检测目的
6. 检测项目
7. 检测要求
8. 检测条件及设备
- 8.1 检测条件

## 8.2 检测设备

## 9. 检测程序与方法

### 9.1 检测前准备

### 9.2 预检测

### 9.3 检测

## 10. 检测数据的处理

## 11. 检测结果的分析与评定

### 11.1 脱粘缺陷面积分析与评定依据

### 11.2 夹杂缺陷面积分析与评定依据

### 11.3 胶层厚度均匀性分析与评定依据

### 11.4 检测报告

附录 A 基于太赫兹时域光谱技术的隔热瓦粘接缺陷检测原始记录格式

## 7. 标准制定的目的

本规范主要阐述了基于太赫兹时域光谱技术的隔热瓦粘接缺陷检测的相关依据、目的、项目、要求、条件及设备、程序与方法、数据处理、结果分析及评定等方面。其主要作用在于指导和规范利用太赫兹时域光谱技术进行非金属、非极性材料粘接缺陷检测的操作，从而在一定程度上推动新材料领域以及集成电路、半导体、航空航天等高端制造业的生产制造及质量控制能力的提升。

## 8.有关专利的说明

本标准不涉及专利。

## 9.关于标准性质

建议作为推荐性团体标准执行，用于借助太赫兹时域光谱技术开展隔热瓦粘接缺陷检测以及扩展至其他非金属、非极性材料粘接缺陷检测的指导和规范，提供科学的检测方法和流程步骤。