

ICS 号

中国标准文献分类号

团 体 标 准

T/CMES XXXX—20XX

无损检测 热障涂层厚度太赫兹时域光谱 检测方法

Nondestructive testing thermal barrier coatings thickness
terahertz time-domain spectroscopy detection method
(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会团体标准管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

中国机械工程学会标准征求意见稿

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

目 次	II
前 言	IV
引 言	V
1 范围	6
2 规范性引用文件	6
3 术语和定义	6
4 方法原理	7
5 检测人员要求	7
6 检测工艺规程	8
7 检测设备和器材	8
7.1 系统组成	8
7.2 太赫兹时域光谱系统	8
7.3 标准窗片	8
7.4 二维扫查模块	9
7.5 定期校准或核查	9
8 检测程序	9
8.1 放置待测量热障涂层样品	9
8.2 设置扫查参数	9
8.3 获取测量信号	9
8.4 获取参考信号	9
8.5 数据保存	9
9 检测结果处理	9
9.1 波形数据分析	9
9.2 检测结果处理	10
10 检测记录和检测报告	11
10.1 检测记录	11
10.2 检测报告	11

图 1 太赫兹时域光谱检测原理图	7
图 2 热障涂层厚度太赫兹时域光谱检测系统	8
图 3 参考信号	10
图 4 测量信号	10

中国机械工程学会标准征求意见稿

前 言

本标准依据 T/CAS 1.1—2017《团体标准的结构和编写指南》的有关要求编写。

本标准起草单位：XXXXXXXXXX。

本标准起草人：XXXXXXXXXXXX。

考虑到本标准中的某些条款可能涉及专利，中国机械工程学会不负责对其任何类别专利的鉴别。

本标准首次制定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

引 言

本标准的发布机构提请注意，声明符合本标准时，可能涉及到 ZL 202010835289.4 《一种基于太赫兹脉冲的卡规式厚度测量装置及方法》相关的专利的使用。

中国机械工程学会标准征求意见稿

无损检测 热障涂层厚度太赫兹时域光谱检测方法

1 范围

本标准规定了热障涂层中氧化物陶瓷层厚度太赫兹时域光谱检测的技术要求，检测工艺流程，检测结果处理。

本标准适用于热障涂层中氧化物陶瓷层厚度太赫兹时域光谱检测。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 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

GB/T 20737-2006 无损检测 通用术语和定义

GB/T 9445-2015 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 42259-2022 金属及其他无机覆盖层 热障涂层耐热循环与热冲击性能测试方法

T/CAS 1.1-2017 团体标准的结构和编写指南

3 术语和定义

GB/T 20737-2006、GB/T 9445-2015、GB/T 42259-2022 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

热障涂层 thermal barrier coating;TBC

包含金属粘结层和氧化物陶瓷面层的双层结构涂层，旨在降低从陶瓷面层外向基材的传热。

[GB/T 42259-2022，定义 3.1]

3.2

太赫兹时域信号 terahertz time domain signal

指脉冲太赫兹波通过空气或者样品测量得到的太赫兹电场强度随时间的变化信息。

注：时域是描述数学函数或物理信号对时间的关系。

3.3

飞行时间 time of flight

指脉冲太赫兹波通过一定厚度的样品所经过的时间延迟。

3.4

折射率 refractive index

光在空气中的传播速度与光在该材料中的传播速度之比。

3.5

参考信号 reference signal

未放置材料时获得的太赫兹时域信号。

3.6

测量信号 measurable signal

放置材料时获得的太赫兹时域信号。

4 方法原理

热障涂层的氧化物陶瓷层厚度太赫兹时域光谱检测原理如图 1 所示，包括太赫兹时域光谱系统、标准窗片组成。

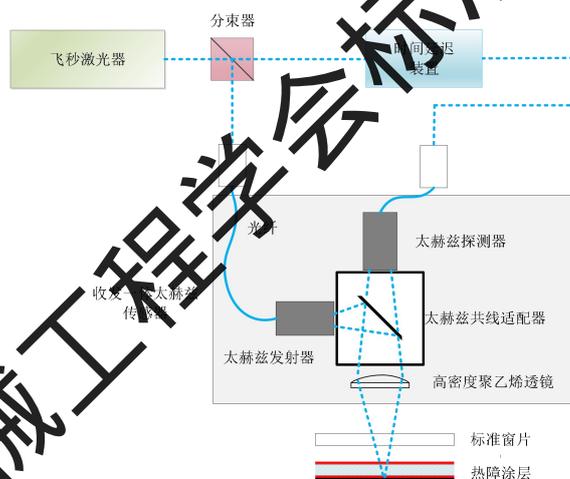


图 1 太赫兹时域光谱检测原理图

太赫兹时域光谱系统主要由飞秒激光器、分束器、时间延迟装置、收发一体太赫兹传感器组成。其中，收发一体太赫兹传感器由光电导太赫兹发射器、太赫兹探测器、太赫兹共线适配器、高密度聚乙烯透镜组成。飞秒激光入射到光电导天线激发太赫兹波，通过时间延迟装置采样探测器接收的太赫兹信号，获得太赫兹脉冲电场的波形。

太赫兹波穿透高密度聚乙烯透镜依次在标准窗片、待测量热障涂层的氧化物陶瓷层上、下表面产生反射和透射并在热障涂层基体发生全反射，各界面反射信号依次被探测器接收。

在标准窗片下，分别测量有、无热障涂层样品时的太赫兹信号，作为测量信号和参考信号，通过计算测量信号和参考信号各界面反射信号的飞行时间差即可获得热障涂层的厚度和折射率。

5 检测人员要求

5.1 按本文件实施检测的人员，应按照 GB/T 9445 或合同各方同意的体系进行资格鉴定，进行岗位培训和操作授权。

5.2 按本文件实施检测的人员，应熟悉所使用的太赫兹时域光谱检测设备及器材。

5.3 按本文件实施检测的人员，应熟悉被检热障涂层样品的相关制造工艺过程和工作条件。

6 检测工艺流程

从事太赫兹时域光谱检测的单位应按本文件的要求指定检测工艺流程，其内容至少应包括如下要素：

- a) 范围；
- b) 依据的标准、法规或其他技术文件；
- c) 检测人员要求；
- d) 检测设备和器材；
- e) 检测程序；
- f) 检测结果处理；
- g) 检测记录和检测报告。

7 检测设备和器材

7.1 系统组成

热障涂层厚度太赫兹时域光谱检测系统应能满足规定厚度的热障涂层太赫兹时域光谱检测的基本要求，通常包括太赫兹时域光谱系统、标准窗片、二维扫查模块等，如图 2 所示。



图 2 热障涂层厚度太赫兹时域光谱检测系统

7.2 太赫兹时域光谱系统

太赫兹时域光谱系统主要用于产生和探测太赫兹时域信号，主要由飞秒激光器、时间延迟模块、收发一体太赫兹传感器组成，是系统的核心组成部分，推荐光纤集成式太赫兹时域光谱系统，建议时间分辨率 $\leq 0.1\text{ps}$ ，光谱范围 0.1~2THz，探测范围可根据待检测热障涂层厚度进行选择。

7.3 标准窗片

标准窗片建议选择厚度为 1mm 的石英玻璃，要求标准窗片具有光滑、平整表面，标准窗片与探测器之间建议通过连接工装进行固定。

7.4 二维扫查模块

二维扫查模块主要用于热障涂层的厚度检测及成像，一般为二维移动平台式扫查装置，二维扫查模块的重复定位精度应小于 0.1mm，扫描范围建议大于 300mm*300mm。

7.5 定期校准或核查

检测设备应进行定期校准或核查，一年不少于一次，确认设备是否满足检测要求。

8 检测程序

8.1 放置待测量热障涂层样品

将待测量热障涂层样品放置于二维扫查模块的扫查区域内，调节二维扫查模块的水平状态，需要确保其平行于金属基体。

8.2 设置扫查参数

控制二维扫查平台 X 轴运动和 Y 轴运动，保证扫描范围能够完全覆盖，确定并输入扫描起始点和终止点位置。实际检测时，将扫查行列步距设置为 1mm。

8.3 获取测量信号

设置扫查参数后，采用光栅扫描方式对检测区域进行测量，并逐点采集太赫兹时域信号。

8.4 获取参考信号

移出待测量热障涂层样品，在设定检测区域放置表面光滑金属板，采用相同扫查参数再次进行扫查，并逐点采集太赫兹时域信号。

8.5 数据保存

根据待测量热障涂层编号建立无损检测数据库系统，保存每一件热障涂层的太赫兹无损检测数据、检测结果等相关文件及文档目录清单。

9 检测结果处理

9.1 波形数据分析

9.1.1 参考信号

如图 3 所示为标定太赫兹时域信号， P_1 为空气-标准窗片反射信号， P_2 为标准窗片-空气反射信号， P_3 为金属板反射信号。

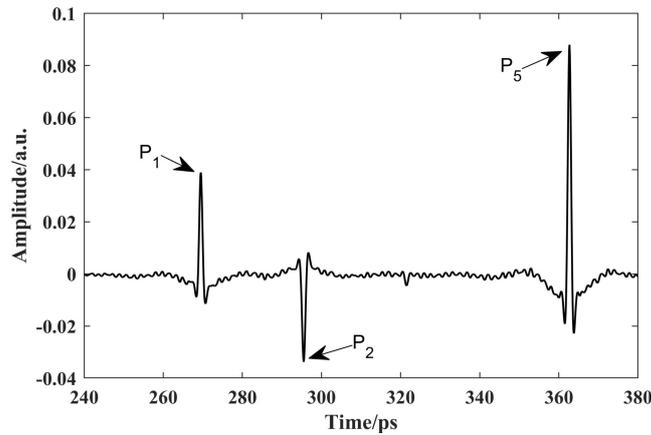


图3 参考信号

9.1.2 测量信号

如图4所示为放置热障涂层样品后获得的太赫兹时域信号， P_1 为空气-标准窗片反射信号， P_2 为标准窗片-空气反射信号， P_3 为空气-热障涂层中氧化物陶瓷层的反射信号， P_4 为热障涂层基体反射信号。

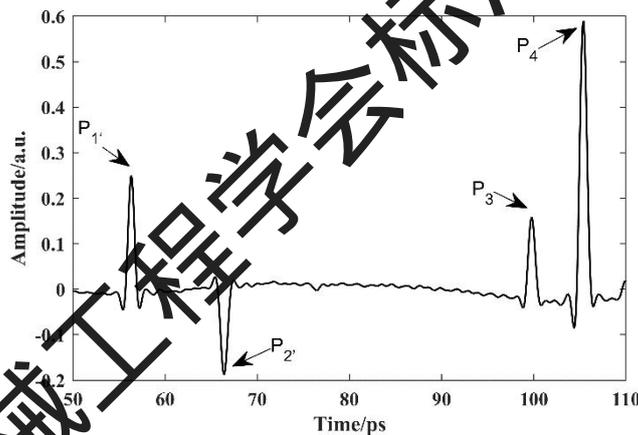


图4 测量信号

9.2 检测结果处理

9.2.1 参考信号飞行时间

选取参考信号中， P_5 反射信号与 P_2 反射信号间的飞行时间 Δt_1 见式(1)：

$$\Delta t_1 = T_{P_5} - T_{P_2} \quad (1)$$

式中：

T_{P_5} —— P_5 金属板反射信号对应的横坐标时间，单位为皮秒（ps）；

T_{P_2} —— P_2 标准窗片-空气反射信号对应的横坐标时间，单位为皮秒（ps）。

9.2.2 测量信号飞行时间

获取测量太赫兹时域信号中， P_4 反射信号与 P_2 反射信号间的飞行时间 Δt_2 见式(2)， P_4 反射

信号与 P_3 反射信号间的飞行时间 Δt_3 见式 (3)；

$$\Delta t_2 = T_{P4} - T_{P2} \quad (2)$$

$$\Delta t_3 = T_{P4} - T_{P3} \quad (3)$$

式中：

T_{P2} —— P_2 标准窗片-空气反射信号对应的横坐标时间，单位为皮秒 (ps)；

T_{P3} —— P_3 空气-热障涂层中氧化物陶瓷层反射信号对应的横坐标时间，单位为皮秒 (ps)；

T_{P4} —— P_4 热障涂层基体反射信号对应的横坐标时间，单位为皮秒 (ps)；

9.2.3 热障涂层厚度及折射率

热障涂层中氧化物陶瓷层的厚度 d 见式 (4)：

$$d = \frac{(\Delta t_2 - \Delta t_1) \cdot c}{2n_a} \quad (4)$$

式中：

c ——光在真空中传播速度，单位为米每秒 (m/s)；

n_a ——空气折射率，无量纲。

材料的折射率 n_s 为：

$$n_s = \frac{c \cdot \Delta t_3}{2d} \quad (5)$$

计算热障涂层厚度图像中的最大值、最小值、均值、方差及厚度分布直方图。

10 检测记录和检测报告

10.1 检测记录

a) 应按本文件要求记录检测数据及信息，除此之外，还应至少包括检测报告中的内容，并按照相关标准或合同要求保存所有记录。

b) 检测前检查热障涂层表面是否有损伤，检测时如发现波形或检测图像出现异常，应如实记录，并在检测结果中注明。

10.2 检测报告

检测报告应包括以下内容：

- a) 热障涂层编码；
- b) 热障涂层名称；
- c) 检测方法标准；
- d) 检测设备名称和型号；
- e) 记录检测结果：最大值、最小值、均值、方差及厚度分布直方图；
- f) 结论；
- g) 检测单位、人员、检测日期；
- h) 检测签字。