**《石墨基体陶瓷涂层厚度无损检测方法》**

Non-Destructive Testing method for thickness of ceramic coatings on graphite

T/CBMF XXXX-2025

**编制说明**

《石墨基体陶瓷涂层厚度无损检测方法》标准编制组

2025年1月

# 工作简况

## 1.1 任务来源

石墨是一种轻质的高熔点材料，适用于高温环境，价格便宜，在高温部件应用中具有广泛的前景。在光伏及半导体产业的高温、腐蚀性工作环境应用中，石墨易与其他物质发生反应，石墨的纯度和化学稳定性会直接影响到产品及性能，其应用受到限制。在石墨基体上通过涂覆或沉积工艺制备陶瓷涂层，可以提高材料的硬度、耐磨性、耐腐蚀性、抗氧化性和耐高温性能等。然而，陶瓷涂层与石墨基体存在热膨胀系数差异，并且陶瓷涂层石墨基体作为结构件必须具有一定的尺寸精度和均匀性。因此，石墨基体陶瓷涂层厚度的无损检测尤为重要。目前，石墨基体陶瓷涂层厚度的检测多采用扫描电子显微镜测量断面厚度为主，无法在产线中产品检测中采用，而涡流法可以有效解决此问题。

石墨基体陶瓷涂层制品是光伏及半导体生产设备中的重要部件，我国市场需求量占国际需求量的85%以上。产品和技术被西方发达国家控制，是卡脖子产品。石墨基体陶瓷涂层是列入国家产业政策等国家支撑的项目，在02专项《极大规模集成电路制造装备及成套工艺》、十三五《重点基础材料技术提升与产业化》、十四五《光刻机高端装备用精密结构陶瓷部件研制与应用》、《中国制造2025》均有做出相应规划和布署。石墨基体陶瓷涂层生产与应用技术已成为我国第三代半导体材料重要发展战略之一。自九五以来我国即重视石墨基体陶瓷涂层技术及制品的研发，近几年来，已经取得了较大的技术突破，部分产品已经验证并导入使用。

但是，石墨基体陶瓷涂层产品的应用环境及尺寸技术指标具有特殊性，工作在高温及腐蚀性动态环境中，经常与晶圆等高纯、超平材料接触，同时具备腐蚀防护和热传导的功能，具有极高的尺寸精度和均一性的尺寸技术指标要求。另外，涂层与石墨还存在热膨胀系数错配，在使用过程中存在热疲劳损伤。因此，石墨基体陶瓷涂层产品必须具有均一、特定的厚度，才能保证正常使用和寿命。然而，采用化学气相沉积工艺制备的石墨基体陶瓷涂层产品由于设备及尺寸的不同，单个产品及不同批次产品涂层厚度存在差异，影响客户产品品质稳定性。因此，石墨基体陶瓷涂层厚度的无损测试极为重要。

目前，石墨基体陶瓷涂层厚度的检测方法主要有扫面电子显微镜、台阶仪、三坐标等仪器设备，其中扫面电子显微镜与台阶仪需要破坏性检测，三坐标检测厚度时需要重复确认石墨尺寸坐标，而石墨基体陶瓷涂层制品往往是全涂覆包裹的，操作复杂，工作量大。目前，并没有一种标准方法用作石墨基体陶瓷涂层制品的无损检测。

为了规范石墨基体陶瓷涂层厚度的无损检测，方便研发及生产单位与人员在涂层厚度无损检测的及时性、方便性和准确性，并在检验石墨基体陶瓷涂层厚度时有一个统一的测试方法亟需一个规范性标准。

本标准提出了一种针对石墨基体陶瓷涂层厚度的无损测试方法，给出了测试方法及精确计算公式。测试方法针对石墨基体陶瓷涂层的典型结构特征，给出了具体的操作手段和工具，具有操作更方便、数据更准确等特点，特别适合于毫米和微米级石墨基体陶瓷涂层，标准编制对推动石墨基体陶瓷涂层产品的工程化生产与应用具有重要意义。

## 主要工作过程

标准编制组在申请本标准前，对石墨基体陶瓷涂层厚度无损测试方法的行业状况和国内外相关标准文件进行了广泛调研分析，随后各单位与企业的专家代表确定了初步的方案，在制作与验证了大量的样品后，对本标准内容进行了修正，并形成标准征求意见稿，主要工作过程参考表1。

表1 主要工作过程

|  |  |
| --- | --- |
| 2024年1月~2024年3月 | 成立项目组，国内外状况调研，可行性分析 |
| 2024年3月~2024年5月 | 石墨基体陶瓷涂层厚度无损测试方法初稿与验证方案确定 |
| 2024年5月~2024年8月 | 石墨基体陶瓷涂层样品采集与制作 |
| 2024年8月~2024年11月 | 石墨基体陶瓷涂层厚度无损测试方法验证 |
| 2024年11月~2025年1月 | 石墨基体陶瓷涂层厚度无损测试方法修订与再次验证 |
| 2025年2月 | 形成标准征求意见稿，进行公示征求意见 |

## 1.3 主要参加单位和工作组成员及其所做的工作

本标准的主要参编单位及其分工如下：

（1）湖南联合半导体科技有限公司：主要负责标准立项、标准讨论会组织及筹备、标准相关文献搜集及分发、行业征求意见汇总、标准正文的编写及修改等。还负责部分涂层产品样品的采集，负责石墨涂层产品涂层厚度的无损测试，数据归集及验证比对。

（2）湖南三安半导体有限责任公司与[中科汇珠半导体有限公司](http://www.baidu.com/link?url=UXMZSybfUftwlaglqvcvcXsXWGlvI1qAJgv6uWLKU13Q_sS8WTY4OukXvgF5Fc9hLhXo8dn0N9IHCs9uqVCb-q" \t "https://www.baidu.com/_blank)为本标准提供了大量的验证试验样品，并提供涂层厚度比对数据，以及生产工艺和实际工程应用相关的大量材料。

（3）中国建筑材料科学研究总院有限公司，[中国国检测试控股集团股份有限公司](http://www.baidu.com/link?url=4c_888xXns4Acih4rNIO4TRDKdNY4_7HGKJ1cOOEruu" \t "https://www.baidu.com/_blank)，清华大学，北京量子信息科学研究院，中国民航大学，湘潭大学等负责石墨涂层产品涂层厚度的破坏性检测与分析，并在本标准制定过程中提供了大量技术支持和最新的科技查新资讯。

# 2 标准编制的原则和主要内容

## 2.1 标准制定的原则

本标准按照GB/T 1.1-2020给出的规则起草。遵从以下规则：贯彻执行国家的政策、法规，与现行其他国家标准协调一致的原则；技术指标制定先进可行、规范合理的原则；标准制定突出产品特性，促进行业健康发展和产品推广的原则。标准制定过程中参考了国内相关标准和各生产企业标准。试验方法尽量采用现行的国家标准和行业标准，以保证标准中技术指标的准确性、科学性与可操作性，各项指标值兼顾目前现状和发展需求。

## 2.2 标准的主要内容

**2.2.1 标准的适用范围**

本标准规定了采用涡流法无损测量石墨基体陶瓷涂层厚度的术语和定义、试验设备、试样、试验、计算公式及测试报告等。

本文件适用于石墨基体上厚度为0.02mm~0.50mm陶瓷涂层厚度的无损测试。主要用于半导体及光伏用热场零部件领域。

**2.2.2 引用文件**

本标准在制定过程中主要引用和参考了以下标准：

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/T12604.6 无损检测 术语 涡流检测

GB/T28705 无损检测 脉冲涡流检测方法

GB/I 4956—2003 磁性基体上非磁性覆盖层 覆盖层厚度测量 磁性法

GB/T4957—2003 非磁性基体金属上非导电覆盖层覆盖层厚度测量 涡流法

JJG 818—2018 磁性、电涡流式覆层厚度测量仪

GB/T12334 金属和其他非有机覆盖层关于厚度测量的定义和一般规则

GB/T6463 金属和其他无机覆盖层度测量方法评述

GB/T6462 金属和氧化物覆盖层厚度测量 显微镜法(ISO 1463，IDT)

ISO 3543 金属和非金属覆盖层覆盖层厚度测量β射线反向散射法

ISO 3868 金属和其他无机覆盖层 覆盖层厚度测量裴索多光束干涉法

**2.2.3 术语和定义**

本标准采用 GB/T 12334 规定的术语和定义。

**2.2.4 规格尺寸**

本标准适用于石墨基体上陶瓷涂层厚度为0.02mm~0.50mm的样品，其他规格尺寸不做限制。

**2.2.5 分类与标记**

按石墨基体上陶瓷涂层的材质进行分类，标记的标准为陶瓷涂层化学式-C的方式，如：碳化硅涂层石墨（标记SiC-C）、碳化钽涂层石墨（TaC-C）等。

**2.2.6 原材料要求**

在实际应用中，需对原材料石墨和陶瓷涂层的纯度进行管控，以保证测量结果的准确性。

**2.2.6.1 石墨基体**

石墨基体按照其纯度分为三类，优选Ⅰ类石墨作为基体：

I类（Type I）：超高纯石墨，石墨灰分小于5PPM，常用于半导体、航天领域。

II类（Type II）：高纯石墨，石墨灰分小于20PPM ，常用于耐火、冶金、导电等工业领域。

III类（Type III）：普通石墨，石墨灰分300PPM左右，常用于普通制造领域。

石墨杂质含量要求及分析方法参考表3。

表3 石墨杂质含量要求

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 成分元素 | 普通石墨 | 高纯石墨 | 超高纯石墨 | 分析方法 |
| Al | 0.48 | ＜0.08 | ＜0.01 | ICP-MS |
| B | 1.5 | 1.0 | ＜0.1 | ICP-MS |
| Ca | 74 | ＜0.04 | ＜0.01 | ICP-MS |
| Fe | 15 | 0.06 | ＜0.02 | ICP-MS |
| Ni | 1.7 | ＜0.1 | ＜0.005 | ICP-MS |
| Si | 23 | 0.2 | ＜0.1 | 紫外分光法UV |
| Ti | 28 | ＜0.09 | ＜0.002 | ICP-MS |
| V | 7.6 | ＜0.07 | ＜0.001 | ICP-MS |
| 总灰分 | 300 | ＜20 | ＜5 | 燃烧法 |

**2.2.6.2 陶瓷涂层**

陶瓷涂层应在厚度、外观、内部、纯度等方面满足以下要求。

陶瓷涂层厚度应在0.02~0.50mm。

陶瓷涂层待检测面的外观应该满足无石墨漏出、无崩边、无裂纹、无粉末、无油渍、无水印、无指纹印、无脏污、无橘皮、无影响测量结果疵点与划痕等。

陶瓷涂层内部不得有气孔、夹杂等类型的缺陷。

陶瓷涂层纯度方面应满足以下表4要求。

表4 陶瓷杂质含量要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 规格 | | 测量方法 |
| 杂质含量 | Na | ＜0.02 | ICP-MS |
| Al | ＜0.01 |
| Fe | ＜0.02 |
| B | ＜0.15 |
| Cr | ＜0.1 |
| Ni | ＜0.01 |

**2.2.7 技术要求及检测方法**

本标准为了提高石墨基体上陶瓷涂层厚度检测结果的准确性，在制定过程中对检测的技术原理、方法及其他相关要求进行了规定。

**2.2.7.1 原理**

涡流测厚仪‌的工作原理基于电涡流原理，通过高频交流信号在测头线圈中产生电磁场，当测头靠近导体时，会在其中形成涡流。测头离导电基体越近，涡流越大，反射阻抗也越大。这个反馈作用量表征了测头与导电基体之间的距离，也就是导电基体上非导电覆层厚度的大小，即石墨基体上陶瓷涂层厚度。

其工作原理总结可归纳为以下三点：

①‌电磁场产生‌：高频交流信号在测头线圈中产生电磁场。

②‌涡流形成‌：当测头靠近导体时，电磁场会在导体中诱导产生涡流。涡流的大小与测头到导电基体的距离有关，距离越近，涡流越大。

③‌阻抗变化‌：涡流的存在会影响线圈的阻抗，通过测量这种变化可以确定覆层的厚度。

**2.2.7.2 仪器设备要求**

涡流测厚仪仪器要求一般包括一个涡流发生器，一个连接测量系统和显示幅值、相位变化能力的检测器，通常应能直接读出覆盖层厚度。

**2.2.7.3 检测方法**

①检查涡流测厚仪的外观是否完好，仪器是否正常开机；

②检查被测样品表面的清洁情况，确保无杂质和污垢；

③将涡流测厚仪与被测物体表面平行放置，并确保测量头与表面接触良好；

④打开涡流测厚仪，并设置所需的测量参数，如厚度范围、单位等；

⑤将测量头平稳地移到被测物体表面，直至仪器发出信号或显示厚度数值；

⑥记录测量结果，并根据需要进行多次测量并取平均值，以提高测量准确性；

⑦用无水乙醇清洁测量头，以确保下次测量的准确性；

⑧将涡流测厚仪关机，并妥善存放，以防止损坏或丢失。

**2.2.7.4 样品要求**

按照2.2.6中要求的石墨基体和陶瓷涂层的要求执行。

**2.2.7.5 可测量性要求**

涡流测厚仪对样品的可测量性要求较低，可适用于较多平面或某块区域为平面类型的样品测量，但对于表面的不连续性较为敏感，因此，太靠边缘或内转角处的测量将是不可靠的，除非仪器已经或附有专门的校正程序。

**2.2.7.6 样品外观要求**

陶瓷涂层待检测面的外观应该满足无石墨漏出、无崩边、无裂纹、无粉末、无油渍、无水印、无指纹印、无脏污、无橘皮、无影响测量结果疵点与划痕等。

陶瓷涂层内部不得有气孔、夹杂等类型的缺陷。

**2.2.7.7 样品表面颗粒要求**

样品表面尺寸较大的颗粒或较多颗粒对测量结果有一定的影响和误差，建议参考表5的标注对陶瓷涂层表面颗粒进行要求，必要时可进行清洗以达到要求，而后再进行膜厚测量。

表5 表面颗粒水平spec

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 颗粒尺寸 | 0.1μm~0.2μm  （0.1μm） | 0.2μm~0.3μm  （0.2μm） | 0.3μm~1.0μm  （0.3μm） | 1.0μm~3.0μm  （1.0μm） | 3.0μm~5.0μm  （3.0μm） | 5.0μm  （5.0μm） |
| 颗粒数  （ea/cm2） | ≤15 | ≤3 | ≤1 | 0 | 0 | 0 |

**2.2.8 检测规则与判定**

**2.2.8.1 检验仪器与项目**

检验仪器：涡流测厚仪；

检验项目：石墨基体陶瓷涂层的厚度。

**2.2.8.2 批量与抽样**

由于每一个样品的石墨基体上陶瓷涂层厚度都不一样，所以采取批量检测的方式，抽样方式不适用。

**2.2.8.3 检验规则**

对于样品某一个面的陶瓷涂层厚度检测一般由多个点的陶瓷涂层厚度结果平均值代表。样品在同一个点测量陶瓷涂层厚度应最少进行3次，建议5次或更多次的方式，并剔除离群值后求平均值的方式表示该点的陶瓷涂层厚度结果。

**2.2.8.4 判定**

检验结果的判定应结合结果与实物的具体情况判断结果是否正确。

**2.2.9 标志、包装、运输和贮存**

**2.2.9.1 标志**

每个样品的标志上必须有信息卡，标明企业名称、生产批号、生产日期、数量、产品型号、质量检验合格或其他需要的标志。

产品若采用包装箱包装，其包装标志应符合GB/T 191及GB/T 6388的规定。

**2.2.9.2 包装**

样品包装一般分为三大类：内层包装、中层包装、外层/运输包装。

内层包装：用于保持洁净度、防腐蚀性、防静电等作用，应于到达零部件使用点后进行拆除。

中层包装：用于防尘、缓冲作用，根据零部件特点，可在洁净室缓冲区移除或保护零部件至使用点。

外层/运输包装：用于保护零部件或中层包装不受运输过程影响损坏或脏污，在零部件到达装货码头/接收区时移除。

**2.2.9.3 运输**

在运输过程中，包装必须在运输工具（如：汽车、船、飞机）上进行固定，避免零部件之间或零部件与运输工具之间发生挤压、碰撞。同时纸箱、泡沫箱、塑料箱、胶合板箱严禁人员踩踏、坐压。

**2.2.9.4 贮存**

产品应放于有温湿度监控的室内，按品种、规格、批次分别堆放贮存在干燥通风处。

# 3 主要试验验证情况分析与指标确定

为保证标准指标要求的合理性，编制工作组对不同类型的石墨基体陶瓷涂层的样品进行了制作，并进行了相关的测量验证与数据分析。各样品清单如表6所示。

表6 陶瓷涂层石墨样品清单

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 样品编号 | 样品种类 | 涂层厚度 |
| SiC-C 1 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 陶瓷涂层厚度≤20μm |
| SiC-C 2 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 3 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 4 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 陶瓷涂层厚度20~50μm |
| SiC-C 5 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 6 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 7 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 陶瓷涂层厚度50~100μm |
| SiC-C 8 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 9 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 10 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 陶瓷涂层厚度100~250μm |
| SiC-C 11 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 12 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 13 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 陶瓷涂层厚度250~500μm |
| SiC-C 14 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 15 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 16 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 陶瓷涂层厚度500~750μm |
| SiC-C 17 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| SiC-C 18 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 |
| TaC-C 1 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 陶瓷涂层厚度≤20μm |
| TaC-C 2 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 |
| TaC-C 3 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 |
| TaC-C 4 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 陶瓷涂层厚度20~50μm |
| TaC-C 5 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 |
| TaC-C 6 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 |
| TaC-C 7 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 陶瓷涂层厚度50~100μm |
| TaC-C 8 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 |
| TaC-C 9 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 |

## 3.1 验证试验数据分析

**3.1.1 样品外观结果**

对陶瓷涂层后的样品外观结果进行了检验，以判断样品是否符合进行陶瓷涂层厚度检测的要求，检测结果标明样品均可用，具体检测结果见表7。

表7 陶瓷涂层石墨样品外观检测结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | 样品  种类 | 石墨漏出 | 崩边 | 裂纹 | 粉末 | 油渍 | 水印 | 指纹印 | 脏污 | 橘皮 | 疵点 | 划痕 | 气孔 | 夹杂 |
| SiC-C 1 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 2 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 3 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | ≤20mm，2ea，测量厚度时可规避 | 无 | 无 |
| SiC-C 4 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 5 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 6 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 0.1~0.25mm  3ea，测量厚度时可规避 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 7 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 8 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 9 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 10 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | ≤20mm，1ea，测量厚度时可规避 | 无 | 无 |
| SiC-C 11 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 12 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 13 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 0.1~0.25mm  6ea，测量厚度时可规避 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 14 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 15 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 16 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 17 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 0.1~0.25mm  9ea，测量厚度时可规避 | 无 | 无 | 无 |
| SiC-C 18 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| TaC-C 1 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| TaC-C 2 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| TaC-C 3 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | ≤20mm，1ea，测量厚度时可规避 | 无 | 无 |
| TaC-C 4 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| TaC-C 5 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| TaC-C 6 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| TaC-C 7 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 0.1~0.25mm  5ea，测量厚度时可规避 | 无 | 无 | 无 |
| TaC-C 8 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 |
| TaC-C 9 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | 无 | ≤20mm，2ea，测量厚度时可规避 | 无 | 无 |

**3.1.2 石墨基体杂质含量**

为保证测量结果准确，且不受石墨基体的批次性影响，样品均使用同一批次的石墨进行陶瓷涂层的制作。在样品制作前，对该批次的石墨基体的杂质含量进行了多次测定，符合超高纯石墨的杂质含量要求，结果见表8。

表8 石墨基体杂质测量结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 成分元素 | 分析方法 | 标准（ppm） | 结果1 | 结果2 | 结果3 | 结果4 | 结果5 |
| Al | ICP-MS | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 |
| B | ICP-MS | ＜0.1 | 0.06 | 0.03 | 0.07 | 0.04 | 0.08 |
| Ca | ICP-MS | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 | ＜0.01 |
| Fe | ICP-MS | ＜0.02 | 0.018 | 0.013 | 0.015 | 0.012 | 0.011 |
| Ni | ICP-MS | ＜0.005 | ＜0.005 | ＜0.005 | ＜0.005 | ＜0.005 | ＜0.005 |
| Si | 紫外分光法UV | ＜0.1 | 0.07 | 0.06 | 0.08 | 0.04 | 0.05 |
| Ti | ICP-MS | ＜0.002 | ＜0.002 | ＜0.002 | ＜0.002 | ＜0.002 | ＜0.002 |
| V | ICP-MS | ＜0.001 | ＜0.001 | ＜0.001 | ＜0.001 | ＜0.001 | ＜0.001 |
| 总灰分 | 燃烧法 | ＜5 | 1.7 | 2.4 | 1.5 | 2.1 | 1.9 |
| 结果 | | | 符合要求 | 符合要求 | 符合要求 | 符合要求 | 符合要求 |

**3.1.3 陶瓷涂层杂质含量**

为保证测量结果准确，对所制作的样品的陶瓷涂层杂质含量进行了测量，符合陶瓷涂层杂质含量要求，结果见表9。

表9 陶瓷涂层杂质测量结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | 样品  种类 | Na  ＜0.02ppm | Al  ＜0.01ppm | Fe  ＜0.02ppm | B  ＜0.15ppm | Cr  ＜0.1ppm | Ni  ＜0.01ppm | 结果 |
| SiC-C 1 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.06ppm | 0.07ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 2 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.09ppm | 0.05ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 3 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.09ppm | 0.07ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 4 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.04ppm | 0.08ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 5 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.06ppm | 0.06ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 6 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.03ppm | 0.08ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 7 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.07ppm | 0.09ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 8 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.05ppm | 0.07ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 9 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.10ppm | 0.07ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 10 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.08ppm | 0.07ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 11 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.05ppm | 0.09ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 12 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.04ppm | 0.06ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 13 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.07ppm | 0.05ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 14 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.08ppm | 0.06ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 15 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.10ppm | 0.05ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 16 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.06ppm | 0.04ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 17 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.10ppm | 0.08ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| SiC-C 18 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.7ppm | 0.05ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| TaC-C 1 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.08ppm | 0.03ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| TaC-C 2 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.07ppm | 0.04ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| TaC-C 3 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.04ppm | 0.08ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| TaC-C 4 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.06ppm | 0.09ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| TaC-C 5 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.09ppm | 0.08ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| TaC-C 6 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.07ppm | 0.05ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| TaC-C 7 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.05ppm | 0.08ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| TaC-C 8 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.10ppm | 0.08ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |
| TaC-C 9 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | ＜0.01ppm | 0.06ppm | 0.03ppm | ＜0.01ppm | 符合要求 |

**3.1.4 陶瓷涂层表面颗粒水平**

为保证测量结果准确，对所制作的样品的陶瓷涂层表面颗粒水平进行了测量，符合表面颗粒水平spec要求，结果见表10。

表10 表面颗粒水平测量结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | 样品  种类 | 0.1μm~0.2μm  （0.1μm）  ≤15ea/cm2 | 0.2μm~0.3μm  （0.2μm）  ≤3ea/cm2 | 0.3μm~1.0μm  （0.3μm）  ≤1ea/cm2 | 1.0μm~3.0μm  （1.0μm）  =0ea/cm2 | 3.0μm~5.0μm  （3.0μm）  =0ea/cm2 | 5.0μm  （5.0μm）  =0ea/cm2 | 结果 |
| SiC-C 1 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 8 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 2 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 3 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 4 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 15 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 5 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 12 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 6 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 7 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 8 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 9 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 9 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 10 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 11 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 12 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 13 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 12 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 14 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 13 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 15 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 16 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 17 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 12 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| SiC-C 18 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| TaC-C 1 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| TaC-C 2 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 11 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| TaC-C 3 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 15 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| TaC-C 4 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 12 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| TaC-C 5 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| TaC-C 6 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| TaC-C 7 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 10 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| TaC-C 8 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |
| TaC-C 9 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 符合要求 |

**3.1.5 陶瓷涂层厚度结果**

使用涡流测厚仪对各样品进行了石墨基体上的陶瓷涂层厚度的检测，每个样品进行了5次的测量，以平均值代表检测结果。结果标明，在陶瓷涂层厚度20~500μm之间时，本标准适用；当陶瓷涂层厚度低于20μm或高于500μm时，测量的陶瓷涂层厚度值仅作为参考，存在较大的误差。样品的具体陶瓷涂层厚度结果见表11所示。

表11 石墨基体上陶瓷涂层厚度测量结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品编号 | 样品  种类 | 陶瓷涂层厚度区间 | 1st测量结果 | 2nd测量结果 | 3rd测量结果 | 4th测量结果 | 5th测量结果 | 结果 |
| SiC-C 1 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | ≤20μm | 3.2μm | 5.8μm | 9.1μm | 14.7μm | 17.6μm | ＞±3%  NG |
| SiC-C 2 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 4.5μm | 6.9μm | 10.4μm | 13.8μm | 18.9μm | ＞±3%  NG |
| SiC-C 3 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 2.7μm | 8.3μm | 11.2μm | 15.6μm | 17.4μm | ＞±3%  NG |
| SiC-C 4 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 20~50μm | 21.0μm | 21.6μm | 22.2μm | 22.9μm | 23.5μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 5 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 25.0μm | 25.8μm | 26.5μm | 27.3μm | 28.0μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 6 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 30.0μm | 30.9μm | 31.8μm | 32.7μm | 33.6μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 7 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 50~100μm | 56.3μm | 57.8μm | 55.4μm | 58.1μm | 56.9μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 8 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 62.5μm | 64.1μm | 61.2μm | 63.7μm | 60.8μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 9 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 71.4μm | 73.2μm | 70.1μm | 72.5μm | 71.9μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 10 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 100~250μm | 230.8μm | 235.9μm | 225.4μm | 232.7μm | 229.3μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 11 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 123.4μm | 126.1μm | 120.7μm | 124.5μm | 122.3μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 12 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 150.7μm | 154.2μm | 147.1μm | 152.3μm | 149.6μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 13 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 250~500μm | 471.3μm | 482.5μm | 459.8μm | 475.1μm | 466.7μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 14 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 302.7μm | 310.1μm | 295.9μm | 305.4μm | 299.8μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 15 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 382.4μm | 391.7μm | 374.2μm | 385.9μm | 378.3μm | ≤±3%  OK |
| SiC-C 16 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 500~750μm | 512.1μm | 534.6μm | 678.2μm | 589.7μm | 712.3μm | ＞±3%  NG |
| SiC-C 17 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 601.8μm | 543.5μm | 723.9μm | 658.4μm | 576.1μm | ＞±3%  NG |
| SiC-C 18 | 碳化硅陶瓷涂层石墨 | 592.7μm | 645.3μm | 741.6μm | 568.2μm | 693.8μm | ＞±3%  NG |
| TaC-C 1 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | ≤20μm | 12.6μm | 15.4μm | 7.8μm | 3.1μm | 9.5μm | ＞±3%  NG |
| TaC-C 2 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 11.2μm | 18.7μm | 5.6μm | 2.9μm | 14.3μm | ＞±3%  NG |
| TaC-C 3 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 6.8μm | 16.5μm | 10.4μm | 1.7μm | 13.2μm | ＞±3%  NG |
| TaC-C 4 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 20~50μm | 35.0μm | 36.1μm | 37.1μm | 38.2μm | 39.2μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 5 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 40.0μm | 41.2μm | 42.4μm | 43.6μm | 44.8μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 6 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 45.0μm | 46.4μm | 47.7μm | 49.1μm | 50.0μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 7 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 50~100μm | 85.6μm | 87.9μm | 83.4μm | 86.8μm | 84.5μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 8 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 92.3μm | 94.5μm | 90.1μm | 93.7μm | 91.2μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 9 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 78.7μm | 80.9μm | 76.4μm | 79.8μm | 77.5μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 10 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 100~250μm | 106.2μm | 108.5μm | 103.9μm | 107.3μm | 105.1μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 11 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 201.5μm | 206.1μm | 196.3μm | 203.7μm | 200.2μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 12 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 178.9μm | 183.1μm | 174.8μm | 180.4μm | 177.5μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 13 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 250~500μm | 341.5μm | 350.2μm | 333.8μm | 344.7μm | 337.6μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 14 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 425.8μm | 435.9μm | 416.7μm | 429.4μm | 421.1μm | ≤±3%  OK |
| TaC-C 15 | 碳化钽陶瓷涂层石墨 | 265.3μm | 271.2μm | 259.4μm | 267.8μm | 263.1μm | ≤±3%  OK |

# 4 标准中涉及专利情况说明

目前，针对石墨基体陶瓷涂层厚度的无损检测方法主要有：GB/T4956磁性基体上非磁性覆盖层覆盖层厚度测量磁性法、GB/T4957非磁性基体金属上非导电覆盖层覆盖层厚度测量 涡流法、GB/T6463金属和其他无机覆盖层度测量方法评述、GB/T12334金属和其他非有机覆盖层关于厚度测量的定义和一般规则、GB/T18719热喷涂术语、分类等。另外，破坏性检测方法有：金属覆盖层覆盖层厚度测量轮廓仪法GB/T 11378-2005与金属和氧化物覆盖层厚度测量显微镜法GB/T 6462-2005。‍然而。无损检测方法是针对磁性或非磁性金属基体上陶瓷涂层而规定的，破坏性检测方法不适用于产品检测。对于石墨基体陶瓷涂层厚度的测试在测试参数的选择、样品需求、测试精度均满足不了要求或存在不合理性。

到目前为止，也没发现其他涡流法测试石墨基体陶瓷涂层厚度测量相关文献、专利及测试标准等。

# 5 产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况

**5.1 经济效益、社会效益、产业规模、推广应用、工程应用情况、预期达到的经济、社会效益**

**5.1.1 经济效益**

随着制造业的快速发展，对产品质量控制的要求日益提高，涡流测厚仪作为高精度、非接触式的测量工具，在金属加工、汽车制造、航空航天、石油化工等多个领域展现出巨大的经济价值。其快速响应、高精度测量的特性，有效降低了废品率，提高了生产效率和产品质量，为企业带来了显著的经济效益。预计在未来几年内，随着技术的不断进步和应用领域的拓展，涡流测厚仪的市场需求将持续增长，其经济效益也将进一步提升。

**5.1.2 社会效益**

涡流测厚仪的广泛应用，不仅提高了工业生产的效率和产品质量，还促进了节能减排和环境保护。通过精确测量涂层厚度，企业可以优化材料使用，减少不必要的浪费，降低生产成本。同时，涡流测厚仪的非接触式测量特性，避免了传统测量方法可能对被测物体造成的损伤，延长了设备的使用寿命，减少了维修和更换的频率，从而间接降低了能源消耗和环境污染。

**5.1.3 产业规模**

根据市场研究机构的数据，涡流测厚仪行业在过去几年中保持了快速增长的态势。2023年全球涡电流测厚仪市场销售额达到了显著水平，预计到2030年，市场销售额将实现进一步增长，年复合增长率保持在较高水平。中国市场作为全球重要的涡流测厚仪市场之一，其产业规模也在不断扩大，吸引了众多国内外企业的关注和投资。

**5.1.4 推广应用**

涡流测厚仪的推广应用正在逐步深入各个工业领域。在机械制造、汽车制造、航空航天、石油化工等行业，涡流测厚仪已成为不可或缺的质量检测工具。随着技术的不断进步和成本的降低，涡流测厚仪的应用范围将进一步扩大，特别是在新兴领域如新能源、轨道交通等方面，其推广应用前景广阔。

**5.1.5 工业应用情况**

在工程应用中，涡流测厚仪以其高精度、快速响应的特点，赢得了广泛的认可。例如，在金属板材、管材的生产过程中，涡流测厚仪用于实时监测产品厚度，确保产品符合质量标准；在金属表面处理（如电镀、喷涂等）后，涡流测厚仪用于测量涂层厚度，保证产品的防腐性能和外观质量。此外，在航空航天领域，涡流测厚仪还用于测量发动机叶片等关键部件的涂层厚度，确保发动机的性能和安全性。

**5.1.6 预期达到的经济、社会效益**

展望未来，涡流测厚仪行业将继续保持快速增长的态势，为全球经济和社会发展做出更大贡献。在经济方面，随着涡流测厚仪的广泛应用，将进一步提升工业生产的效率和产品质量，降低生产成本，增加企业利润；在社会方面，涡流测厚仪的推广应用将促进节能减排和环境保护，推动制造业向绿色、可持续方向发展。同时，涡流测厚仪技术的不断进步和创新，还将为相关领域的技术升级和产业升级提供有力支持

**5.2 本标准指标的技术先进性以及本标准的发布对行业及社会发展的促进作用，即与“宜业尚品造福人类”的相关性**

**5.2.1 技术先进性**

在2025年的今天，涡流膜厚仪作为无损检测技术的杰出代表，其在陶瓷涂层厚度检测领域展现出了卓越的技术先进性。涡流膜厚仪采用高频交流电在涂层表面产生的涡流效应来测量厚度，这种非接触式的测量方法不仅提高了检测的精度和效率，还避免了传统破坏性检测对陶瓷涂层及基材的损害。此外，涡流膜厚仪还具备以下技术特点：

‌高精度测量‌：涡流膜厚仪能够精确测量陶瓷涂层的厚度，误差范围小，满足高精度检测需求。

‌非破坏式检测‌：无需破坏被测物体，避免了传统测量方法可能造成的损伤，延长了设备和涂层的使用寿命。

‌实时在线监测‌：涡流膜厚仪能够实现对陶瓷涂层厚度的实时在线监测，为生产过程提供了及时、准确的质量控制手段。

‌智能化操作‌：随着物联网技术的发展，涡流膜厚仪正逐步集成更多的智能功能，如无线数据传输、实时数据分析等，提高了检测的自动化和智能化水平。

**5.2.1 对行业及社会发展的促进作用**

涡流膜厚仪无损检测陶瓷涂层厚度的技术，不仅推动了相关行业的技术进步，还对社会发展产生了积极的促进作用，与“宜业尚品造福人类”的理念高度契合。

‌提升产品质量与安全性‌：通过精确测量陶瓷涂层的厚度，涡流膜厚仪帮助生产企业及时发现并处理质量问题，确保产品的耐用性和性能，提高了产品的市场竞争力。同时，对于涉及高温、高压等恶劣工况的应用场景，精确的涂层厚度检测还直接关系到设备的安全运行，保障了人民生命财产的安全。

‌促进节能减排与环境保护‌：涡流膜厚仪的非接触式检测特性避免了传统破坏性检测对环境的污染和资源的浪费。通过优化涂层厚度，企业可以减少不必要的材料消耗和能源消耗，降低生产成本，同时减少废弃物排放，促进节能减排和环境保护。

‌推动制造业转型升级‌：涡流膜厚仪等先进检测技术的应用，推动了制造业向智能化、绿色化方向发展。通过提高生产效率和产品质量，降低生产成本和能耗，增强了制造业的核心竞争力，为制造业的转型升级提供了有力支持。

‌造福人类生活‌：涡流膜厚仪在陶瓷涂层厚度检测中的应用，不仅提升了相关产品的质量和安全性，还为人们创造了更加舒适、安全、环保的生活环境。例如，在建筑装饰、汽车制造等领域，精确的涂层厚度检测确保了产品的美观性和耐用性，提高了人们的生活品质。

综上所述，涡流膜厚仪无损检测陶瓷涂层厚度的技术先进性及其对行业和社会发展的促进作用，充分体现了“宜业尚品造福人类”的理念，为推动制造业高质量发展、促进社会可持续发展做出了积极贡献。

# 6 采用国际标准

目前石墨基体上陶瓷涂层厚度的检测在国内外没有相关的国家标准和行业标准，属于一个全新的方法和概念。但本标准在制定过程中有参考以下国际标准：

ISO 2360，该标准规定了非磁性金属基体上非导电覆盖层厚度的涡流测量方法，涵盖仪器校准、操作程序和测量精度要求‌，典型应用包括铝、铜、锌等有色金属基体上的油漆、塑料、橡胶涂层或阳极氧化膜厚度的测量。

ASTM E376，美国材料与试验协会（ASTM）发布的标准实施规程，规定了使用涡流法测量金属基底涂层厚度的通用要求和测试方法‌，该标准与ISO 2360互补，为工业领域的应用提供了更广泛的操作指导‌。

以上标准共同构成了本标准的技术体系，确保其在工业检测中的准确性和一致性‌。

# 7 与现行相关法律、法规、规章及相关标准的协调

本标准中内容均依照国内现行各类相关法律、法规、规章、标准予以要求。与现行相关法律、法规、规章及相关标准的协调一致。

# 8 重大意见分歧的处理依据和结果

无。

# 9 标准性质的建议说明

建议《石墨基体陶瓷涂层厚度无损检测方法》作为推荐性产品标准发布实施。

# 10 贯彻标准的措施建议

建议在本标准正式出台后，各生产厂家、科研单位、检测机构以及地方管理部门能够依据本标准中的相关规定对石墨基体陶瓷涂层厚度无损检测方法进行统一的评价和管理。具体实施措施建议如下：

（1）加大标准宣传力度，提高认知度，建立信息公共平台，将有参考价值的案例、好的做法和经验等在行业内部公开发布，引起有关部门领导和相关企业单位的重视，使相关单位能够积极主动的购买标准和资料、参加培训、结合本单位实际情况学习研究标准并准备贯彻实施标准。

（2）标准归口单位进行贯标指导，组织标准宣贯培训班，由标准制定人员主讲。设立专门的答疑或咨询部门或网站，为贯标企业排忧解难，组织有关人员积极参加行业协会组织的各项活动，培训班等。及时了解标准制、修订信息。

（3）鼓励行业相关企业成立标准贯彻实施小组，组员由标准化技术人员、产品主管设计人员、工艺主管设计人员、检验人员、车间技术人员等工作人员组成，进行明确的分工合作，适时组织标准宣贯会，使有关人员拥有标准、了解标准、熟悉标准，执行标准。产品主管设计人员、工艺主管设计人员、检验人员、车间技术人员、操作人员均须按照细则要求进行相应工作。

（4）标准化技术人员全面负责贯标实施工作，跟踪服务对贯标中出现的技术问题进行协调处理作好贯标记录，并进行长期监督检查工作。

（5）尤其要向石墨、陶瓷涂层行业加大宣传力度，促进石墨、陶瓷涂层行业采用本标准进行相关测量。

# 11 废止现行有关标准的建议

无。

# 12 其他应说明的事项

无。