

团 体 标 准

T/CMES XXXX—20XX
代替 T/CMES XXXX—20XX

无损检测 涂层脱粘电磁超声 相控阵表面波检测方法

Non-destructive testing—Phased Array EMAT Method for
Surface Wave Inspection of Delamination in Coating
System

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

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
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
3.1 线圈	1
3.2 饼形线圈.....	1
3.3 跑道型线圈.....	1
3.4 环形线圈.....	1
3.5 柔性磁场线圈.....	2
3.6 柔性相控阵激励线圈阵列.....	2
3.7 柔性检出线圈阵列.....	2
3.8 柔性阵列电磁超声表面波探头.....	3
3.9 相控阵激励延时法则.....	3
3.10 机械扫查.....	3
3.11 电子扫查.....	3
3.12 信号矩阵.....	3
3.13 信号后处理.....	3
4 方法概要.....	3
4.1 检测原理.....	3
4.2 优点.....	4
4.3 局限性.....	5
5 安全要求.....	5
6 人员要求.....	5
7 检测工艺流程.....	5
7.1 检测工艺流程制定.....	5
7.2 检测工艺流程验证.....	6
8 检测设备和器材.....	6

8.1 检测系统.....	6
8.2 长脉冲励磁电流源.....	6
8.3 多通道电磁超声检测模块.....	6
8.4 柔性阵列电磁超声表面波探头.....	6
8.5 控制分析软件.....	7
8.6 检测辅助装置.....	7
8.7 检测系统的维护和校准.....	7
9 对比试样.....	7
9.1 用途.....	7
9.2 一般要求.....	8
9.3 对比试块的检测.....	8
10 检测程序.....	8
10.1 检测前准备.....	8
10.2 检测步骤.....	8
11 检测结果评价.....	8
11.1 涂层脱粘缺陷评价.....	9
12 检测记录和报告.....	9
12.1 检测记录.....	9
12.2 检测报告.....	9
图 1 典型的柔性磁场线圈.....	2
图 2 典型的表面波柔性相控阵激励线圈阵列.....	2
图 3 典型的柔性检出线圈阵列（饼形线圈阵列）.....	3
图 4 检测原理示意图.....	4

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：西安交通大学，中国特种设备检测研究院、清华大学、中科院沈阳金属所、华中科技大学、西安石油大学、中核武汉核电运行有限公司、爱德森（厦门）电子公司、硕德（北京）科技有限公司、机械工程学会无损检测分会等。

本标准起草人：陈振茂、裴翠祥、邓洁、张远舸、陈洪恩、解社娟、李勇、方阳、全宗飞、曲印强、郭威、单申、贾晨宇、陈雪瑗、沈功田、黄松岭、蔡桂喜、康宜华、王波、朱冰、祁攀、林俊明、香勇、张君娇等。

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该类专利的鉴别。本标准首次制定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

无损检测 涂层脱粘电磁超声相控阵表面波检测方法

1 范围

本标准规定了使用电磁超声相控阵表面波检测方法对金属结构非金属涂层的脱粘缺陷的定量无损评价方法。

本标准适用于金属基体上非导电涂层的脱粘缺陷检测。

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 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义

GB/T 32563 无损检测 术语 超声检测 相控阵超声检测方法

GB/T 34885 无损检测 术语 电磁超声检测 总则

JB/T 9214 无损检测 A 型脉冲反射式超声检测系统工作性能测试方法

3 术语和定义

GB/T 34885、GB/T 32563 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了 GB/T 34885、GB/T 32563 中的某些术语和定义。

3.1 线圈 coil

电磁声换能器中用于辐射和接收电磁波的元件。

[GB/T 34885-2017, 定义 3.4]

3.2 饼形线圈 pancake coil

按不同半径等间距绕制形成回路，外形呈中空多圈圆形的线圈。

[GB/T 34885-2017, 定义 3.5]

3.3 跑道型线圈 racetrack coil

具有较长平行段，平行段间采用弧形连接形成回路，外形像体育场跑道的线圈。

[GB/T 34885-2017, 定义 3.7]

3.4 环形线圈 annular coil

按不同半径等间距绕制形成回路，外形呈中空多圈圆形的线圈。

[GB/T 34885-2017, 定义 3.6]

3.5 柔性磁场线圈 flexible magnetic coil

线圈本身具有柔性，且线圈固定于柔性基底上，可贴合被检曲面试件表面放置，在柔性电磁超声检测中用于产生偏置磁场的电磁铁（图 1 所示）。



图 1 典型的柔性磁场线圈

3.6 柔性相控阵激励线圈阵列 flexible phased array coils

2 个以上线圈按一定规则排列的线圈组合，单个线圈本身具有柔性且线圈组合固定于柔性基底上，可贴合被检曲面试件表面放置，在柔性电磁超声相控阵表面波检测中用于产生多个感应涡流（图 2 所示）。



一维跑道型线圈阵列



二维环形线圈阵列

图 2 典型的表面波柔性相控阵激励线圈阵列

3.7 柔性检出线圈阵列 flexible pickup coil array

2 个以上线圈按一定规则排列的线圈组合，单个线圈本身具有柔性且阵列组合固定于柔性基底

上,可贴合被检曲面试件表面放置,在柔性电磁超声相控阵表面波检测中用于接收多个探测信号(图3所示)。



图3 典型的柔性检出线圈阵列(饼形线圈阵列)

3.8 柔性阵列电磁超声表面波探头 flexible surface wave array EMATs

柔性阵列电磁超声表面波探头是柔性磁场线圈、柔性相控阵激励线圈阵列和柔性检出线圈阵列的组合,在阵列检出柔性电磁超声相控阵表面波检测中用于超声表面波相控阵激励和多个信号接收。

3.9 相控阵激励延时法则 phased array excitation law

通过控制柔性相控阵激励线圈阵列中被激励线圈的数量及线圈被射频脉冲触发的时间,实现超声表面波波束偏转和聚焦的法则。

3.10 机械扫查 mechanical scan

以机械方式实现对工件的扫查,即通过移动探头实现波束的移动,使之扫过工件中被检测区域。
[GB/T 32563-2016, 定义 3.8]

3.11 电子扫查 electronic scan

以电子方式实现对工件的扫查,即通过相控阵激励延时法则改变射频脉冲触发时间实现表面波波束的偏转和聚焦,使之扫过工件中被检测区域。

3.12 信号矩阵 signal matrix

检测过程中通过机械扫查或电子扫查获得多组检测信号形成的数据矩阵。

3.13 信号后处理 signal post-processing

对信号矩阵中的多个 A 扫信号做分析处理,实现目标区域成像和缺陷的定位定量。

4 方法概要

4.1 检测原理

将柔性阵列电磁超声表面波探头贴合被检工件表面放置,如图4示,在柔性磁场线圈中通入长脉冲来提供偏置磁场,在柔性相控阵激励线圈阵列的各通道线圈中按相控阵激励延时法则依次通入射频脉冲来产生感应涡流,通过电-磁-声相互作用在金属基底表面实现电磁超声相控阵表面波激励。表面波遇到脱粘缺陷发生反射、散射、幅值变化等现象,采用柔性检出线圈阵列在工件表面对超声表面波进行接收,通过机械扫查和电子扫查的方法获得信号矩阵,对信号矩阵进行后处理,通过信

号特征提取和成像，实现脱粘缺陷定位和定量。

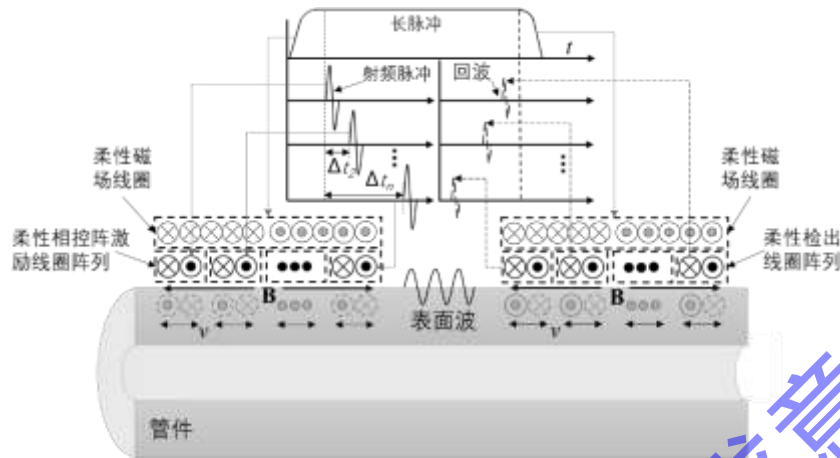


图 4 检测原理示意图

4.1.1 相控阵激励延时法则

相控阵激励延时法则是指柔性相控阵激励线圈阵列中选用线圈个数及其中通入射频脉冲的先后顺序。控制各线圈产生超声波的先后顺序，使得各个波阵面发生干涉，形成能量增强的超声表面波。针对不同构型的柔性相控阵激励线圈阵列，声程差的计算不同。对于一维表面波柔性相控阵激励线圈阵列（图 2 所示），其激励的超声表面波扩散角度较小，声程差可近似为相邻线圈间距。对于二维表面波柔性相控阵激励线圈阵列（图 2 所示），其激励的超声表面波可聚焦于一个较小区域形成焦点，声程差由各激励线圈位置坐标和焦点坐标通过几何关系换算所得。其它构型激励线圈阵列声程差计算以此为参考，若有不同，需经有效性验证后再使用。

4.1.2 信号矩阵采集及扫查计划

采用一维柔性相控阵激励线圈阵列激励表面波，柔性检出线圈阵列接收表面波时，每一个机械扫查位置进行一次表面波的相控阵激励和多通道接收，在一个或多个扫查位置获取多组接收信号构成信号矩阵。采用二维柔性相控阵激励线圈阵列激励表面波，柔性检出线圈阵列接收表面波，激励阵列和检出线圈阵列位置固定，通过延时法则设置实现相控阵激励将超声表面波能量聚焦在焦点处，通过改变延时法则变换焦点位置实现电子扫查，每一个聚焦位置进行一次表面波的相控阵激励和多通道接收，获取的多组接收信号构成信号矩阵。

当检测区域较大，阵列探头垂直表面波传播方向的尺寸无法一次性覆盖对应检测区域的长度，或者在表面波传播方向尺寸较大，远距离传播使得表面波能量衰减到 60% 以下，需要制定扫查计划进行分区域检测，以保证整个区域被有效检测。相邻分区域之间应有至少 10% 的区域重叠。

4.1.3 信号后处理

对信号矩阵中的多个 A 扫信号做分析处理，提取缺陷特征信号并成像显示，对脱粘缺陷进行定位和定量。成像结果中的像素点间距应小于要求检出最小脱粘缺陷的尺寸。

4.2 优点

电磁超声相控阵表面波检测方法的优点：

- a) 非接触检测，无需耦合剂，适用于表面覆有涂层、表面粗糙、高温下的检测，同时避免了工件表面存在耦合剂对检测灵敏度的影响；

- b) 双线圈结构的柔性阵列电磁超声表面波探头具有柔性且体积小，适用于曲面金属结构检测和检测空间狭小的工况；
- c) 对表面、近表面的缺陷检测灵敏度高，相控阵激励增强超声表面波的激励能量，信号后处理技术对缺陷特征信号进行增强显示，都可提高检测灵敏度；
- d) 可高效检出表面、近表面的缺陷，部分应用场景可替代渗透和磁粉等方法；
- e) 大多数情况下可用于在线检测。

4.3 局限性

电磁超声相控阵表面波检测方法的局限性：

- a) 不适用于非导电材料的检测；
- b) 电磁超声换能效率受被检材料电磁特性影响较大，需要更严格的对比试块。

5 安全要求

电磁超声相控阵表面波检测在对覆有涂层的金属工件检测时，需要确保相关操作和实施符合一系列安全要求，以保障人员安全、设备完整性和数据准确性。本章没有列出所有的安全要求，检测过程中的安全要求至少包括以下要素：

- a) 在实施检测前，应对检测过程中可能伤害检测人员的各种危险源加以辨别，并对检测人员进行培训和采取必要的保护措施；
- b) 检测人员应遵守被检工件现场的安全要求，根据检测地点的要求穿戴防护工作服和佩戴有关防护设备；
- c) 在进行在线检测时，应制定特别的安全措施；
- d) 在封闭空间内进行操作时，应考虑氧气含量等相应因素，并采取必要的保护措施；
- e) 在高空进行操作时，应考虑人员、检测设备器材坠落等因素，并采取必要的保护措施；
- f) 在低温、高温等极端环境下操作时，应考虑人员冻伤、烫伤等因素，并采取必要保护措施；
- g) 仪器操作中，应注意仪器本身和导线高压漏电检查，避免高压放电对人体或物品造成伤害；
- h) 提供紧急撤离程序和事故应急预案，确保操作人员在危急情况下能够安全撤离。

6 人员要求

采用本标准进行检测的人员，应按照 GB/T 9445 或合同各方同意的体系进行资格鉴定与认证，并由雇主或其代理对检测人员进行岗位培训和操作授权。

为确保检测人员能够熟练掌握标准规范和技术要求，雇主或其代理应提供全面的岗位培训，以帮助人员理解和应用检测程序，提升其专业技能和实际操作水平。培训内容可能涵盖电磁超声检测通用知识、设备操作、安全规程、报告编写等方面。还应根据实际检测工艺规程，在具有代表性的、包含与被检缺陷类似的自然或人工反射体的被检工件上进行培训和考试，应记录培训和考试结果。

7 检测工艺规程

7.1 检测工艺规程制定

按照本标准制定涂层脱粘电磁超声相控阵表面波检测工艺规程，其内容至少包括以下要素：

- a) 工艺规程版本号；

- b) 适用范围；
- c) 依据的标准、法规或其他技术文件；
- d) 检测人员的资格；
- e) 检测设备和器材；
- f) 探头类型：频率、线圈数量和尺寸、线圈间距；
- g) 检测对比试块信息；
- h) 被检工件信息及检测前准备要求：材质、几何形状与尺寸、设计与运行参数、表面状态；
- i) 检测条件：温度；
- j) 检测时机；
- k) 检测方法和检测步骤：相控阵激励延时法则、扫查计划、信号后处理方法；
- l) 检测的标记和数据记录的要求；
- m) 检测后的操作要求；
- n) 检测结果的评价和处理方式；
- o) 检测记录、报告和资料存档；
- p) 编制（级别）、审核（级别）和批准人；
- q) 编制日期。

7.2 检测工艺流程验证

工艺流程应经验证。当重要因素或其他对检测灵敏度有严重影响的因素发生变化时，工艺流程应重新验证。

8 检测设备和器材

8.1 检测系统

电磁超声相控阵表面波检测系统包括长脉冲励磁电流源、多通道电磁超声检测模块、柔性阵列电磁超声表面波探头、控制分析软件和计算机系统，必要时还应有扫查装置和操作辅助装置。

8.2 长脉冲励磁电流源

长脉冲励磁电流源具备输出矩形长脉冲来驱动柔性磁场线圈产生偏置磁场的功能。电流源应至少能提供毫秒级别长度的长脉冲电流，以保证在脉冲峰值稳定时间段内完成超声表面波的相控阵激励和多通道接收。

8.3 多通道电磁超声检测模块

多通道电磁超声检测模块包含多通道射频激励部分（至少 2 个通道）和多通道信号接收部分（至少 2 个通道）。其中多通道射频激励部分具备输出多路射频脉冲电流来驱动柔性激励线圈阵列以在被检工件表层产生感应涡流的功能，且还具备延迟触发控制功能来实现相控阵激励延时法则，延时步进不大于 10 ns。多通道接收部分具备检测信号的放大、滤波、采集等功能，采样频率应至少大于激励频率的 5 倍，应具有不小于 60 dB 的连续可调增益，增益步进不大于 2 dB，60 dB 增益最大累计误差不超过 1 dB。

8.4 柔性阵列电磁超声表面波探头

8.4.1 概述

柔性阵列电磁超声表面波探头应包括柔性磁场线圈、柔性相控阵激励线圈阵列和柔性检出线圈阵列。

8.4.2 柔性磁场线圈

线圈具有柔性，贴合被检工件表面放置，检测时至于激励线圈阵列和检出线圈阵列上方，为检测提供偏置磁场。磁场线圈根据检测需要的磁场强度、磁场分布、激励线圈阵列和检出线圈阵列的尺寸来选择，应保证有效磁场完全覆盖所调用的线圈阵列。

8.4.3 柔性相控阵激励线圈阵列

激励线圈阵列具有柔性，贴合被检工件表面放置，检测时至于柔性磁场线圈下方。在依据相控阵激励延时法则对多个线圈按一定次序分别通入射频脉冲电流后，在被检工件表层先后感应产生多个涡流。激励线圈阵列的选择需考虑材料特性、几何形状、环境温度和需要被检缺陷的尺寸及类型等。

8.4.4 柔性检出线圈阵列

检出线圈阵列具有柔性，贴合被检工件表面放置，检测时至于柔性磁场线圈下方。检出线圈阵列用于接收工件近表面多个位置的超声表面波信号。检出线圈阵列的选择需考虑材料特性、几何形状、环境温度、激励线圈阵列的频率及声场分布、需要被检缺陷的尺寸及类型等。

8.5 控制分析软件

控制分析软件应至少包含以下功能：检测参数设置、所有通道 A 扫信号实时显示、信号分析和成像显示、A 扫信号和成像结果存储及回放、信号定位和成像结果标尺测量。

8.6 检测辅助装置

检测辅助装置包括：

- a) 手动或自动扫查辅助装置；
- b) 扫查时应配备位置记录装置；
- c) 高温表面检测操作辅助装置。

8.7 检测系统的维护和校准

检测系统的维护和校准应至少包括：

- a) 制定书面规程，对检测设备进行周期性维护和检查，以保证系统功能；
- b) 每次检测前，检查仪器设备和探头外观、线缆连接情况、信号显示等是否正常；
- c) 按 JB/T 9214 测试系统垂直线性和水平线性，测试时使用对比试块；
- d) 每年至少要对仪器及探头组合性能进行一次校准并记录；
- e) 设备维修后必须对仪器设备进行校准和记录。

9 对比试样

9.1 用途

对比试块用于调节检测系统的幅度和（或）时基线，也用于金属基体上非导电涂层的脱粘缺陷检测等级评定。由于曲面金属基体制造成型工艺多样、工件曲率多变，检测过程无法采用标准试块，

因而检测系统的评定和校准直接采用对比试块。

9.2 一般要求

- a) 对比试块应与被检工件的规格相同：材质、形状尺寸、热处理和运行过程等；
- b) 对比试块表面状况应与被检件表面状况相同；
- c) 对比试块应根据验收标准或合同方商议设置涂层脱粘人工模拟缺陷。

9.3 对比试块的检测

对比试块制作完成后，应选择有能力的检测机构对试块进行检测并出具合格证明，满足要求后方可使用。

10 检测程序

10.1 检测前准备

10.1.1 资料查验

- a) 查验被检工件的设计加工图纸、工艺流程图等产品制造文件资料，以了解被检工件的材质特性、结构特征等；
- b) 查验被检工件的服役时间、服役条件、服役环境以及运行中出现的异常记录、维修改造文件和历次检验记录等资料。

10.1.2 检测工艺流程

应根据合同各方要求，结合使用的检测设备和实际工况，在检测前按照第 7 章所述的检测工艺流程编制电磁超声相控阵表面波检测工艺流程。

10.1.3 表面清理

应清除被检工件表面上的锈蚀产物、毛刺飞边、金属碎屑等影响表面波传播或损坏探头的杂物；

10.2 检测步骤

- a) 根据被检工件材质、形状和检测要求，选择合适的探头、对比试块，确定检测覆盖区域、扫查计划、信号后处理方法；
- b) 检查仪器设备和探头外观、线缆连接情况，无异常后开启仪器；
- c) 检测参数确定：首先进行对比试块的检测，通过对试块中人工脱粘缺陷的检测和评价，确定长脉冲电流的长度、射频脉冲电流的频率、相控阵激励延时法则，信号放大增益。将能检测到对比试块中要求检出的最小人工缺陷且定位定量准确时的设置参数作为检测参数；
- d) 被检工件检测：采用步骤 c 中确定的参数对被检工件进行检测，确保 100% 覆盖被检区域；
- e) 有异常的检测位置，通过改变激励和检出阵列位置调整入射表面波方向，在不同方向（至少 2 个互相垂直方向）对异常区域进行复测，对脱粘缺陷在不同方向的尺寸进行确定，选择最长尺寸及其垂直方向的尺寸作为脱粘缺陷的大小当量；
- f) 在被检工件表面上确定存在脱粘缺陷的异常位置并进行标识。

11 检测结果评价

11.1 涂层脱粘缺陷评价

根据验收标准或合同方检测要求，选择合适的对比试块进行检测，检测参数是能检出验收要求的对比试块中最小人工脱粘缺陷且定位定量准确时的设置参数。采用此检测参数对被检工件进行检测和评价。对有异常的检测位置，还需通过改变激励和检出阵列位置来调整入射表面波方向，在不同方向（至少 2 个互相垂直方向）对异常区域进行复测，对脱粘缺陷在不同方向的尺寸进行确定，选择最长尺寸及其垂直方向的尺寸作为脱粘缺陷的大小当量。

12 检测记录和报告

12.1 检测记录

按检测工艺规程的要求记录检测数据、参数和有关信息。

12.2 检测报告

检测报告的内容应根据检测要求制定，应至少包括以下内容：

- a) 委托单位、检测单位；
- b) 报告编号、检测工艺规程编号；
- c) 执行标准、参考标准；
- d) 被检工件信息：名称、编号、规格、材质、表面状态；
- e) 对比试块信息：名称、编号、规格、材质、表面状态、人工缺陷；
- f) 检测设备：仪器、探头等；
- g) 检测参数及过程：长脉冲电流长度、射频脉冲电流频率、扫查计划、信号后处理方法；
- h) 检测结果及评定、验收条件；
- i) 缺陷记录及工件附图；
- j) 检测日期、检测人员及审核人员签名；
- k) 形成检测报告日期及人员。