

ICS

CCS

团 体 标 准

T/CMES XXXX—20XX

代替 T/CMES XXXX—20XX

无损检测 涂层脱粘涡流红外检测方法

Non-destructive Testing—Eddy Current Thermography

Detection Method for Coating Debonding Defects

(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.....	I
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 涡流红外一体化检测通用术语.....	1
3.2 被测对象一般术语.....	3
4 方法概要.....	3
4.1 检测原理.....	3
4.2 优点.....	4
4.3 局限性.....	4
5 安全要求.....	4
6 人员要求.....	5
7 检测系统.....	5
7.1 高频涡流热激励模块.....	5
7.2 信号采集模块.....	5
7.3 其他辅助操作装置.....	6
7.4 检测系统的维护和校准.....	6
8 检测环境.....	7
9 对比试块.....	7
9.1 用途.....	7
9.2 一般要求.....	7
9.3 对比试块的检测.....	7
10 检测.....	7
10.1 检测准备.....	7
10.2 检测实施.....	8
11 检测结果的评价.....	8

11.1 检测评价准备	8
11.2 检测评价原理	8
11.3 结果评价	8
12 检测工艺流程与报告	9
12.1 检测工艺流程	9
12.2 检测报告	9
图 4-1 涡流红外检测原理图	3
图 4-2 涂层脱粘缺陷导致结构表面温度分布不连续	3
图 4-3 铁氧体磁芯中的磁通及被测工件表面加热状况	4

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出并归口。

本文件起草单位：：西安交通大学、中国特种设备检测研究院、上海材料研究所有限公司、中国机械工程学会无损检测分会、中国科学院金属研究所、爱德森（厦门）电子有限公司、重庆理工大学、华中科技大学、电子科技大学、湖南大学、硕德（北京）科技有限公司。

本标准起草人：解社娟、陈振茂、仝宗飞、贾晨宇、范思危、李勇、沈功田、胡斌、张君娇、丁杰、田贵云、蔡桂喜、林俊明、武新军、高斌、何赞泽、香勇。

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该类专利的鉴别。本标准首次制定。

无损检测 涂层脱粘涡流红外检测方法

1 范围

本标准规定了导电基体上非导电涂层脱粘的涡流红外检测方法。

本标准适用于检测由金属材料、碳基导电材料、导电聚合物材料等导电材料制成的基体和由陶瓷、玻璃钢、非导电聚合物等非导电材料制成的 10-500 微米厚的涂层。

本标准适用于航空航天、能源、化工和特种设备中涂层的定量脱粘检测。

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—2015 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 12604.6—2021 无损检测 术语 涡流检测

GB/T 12604.9—2021 无损检测 术语 红外热成像

GB/T 38883—2020 无损检测 主动式红外热成像检测方法

GB/T 19870—2018 工业检测型红外热像仪

ISO 20669—2017 Non-destructive testing — Pulsed eddy current testing of ferromagnetic metallic components

3 术语和定义

GB/T 12604.6—2021、GB/T 12604.9—2021、GB/T 38883—2020 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 12604.6—2021、GB/T 12604.9—2021、GB/T 38883—2020 中的某些术语和定义。

3.1 涡流红外一体化检测通用术语

3.1.1 涡流 eddy current

交变磁场在导电材料中感应产生的自成闭合回路且呈漩涡状流动的电流。

[GB/T 12604.6—2021，定义 3.1.12]

3.1.2 涡流分布 eddy current distribution

涡流密度的矢量场。

[GB/T 12604.6—2021，定义 3.1.10]

3.1.3 涡流检测 eddy current testing

利用感应涡流的电磁效应评价被检件的无损检测方法。

[GB/T 12604.6—2021, 定义 3.1.11]

3.1.4 激励 excitation

感应 induction

产生涡流（3.1.1）的方式。

[GB/T 12604.6—2021, 定义 3.1.19]

3.1.5 激励线圈 excitation coil

在被检件内部激励产生磁通的线圈。

[GB/T 12604.6—2021, 定义 3.3.39]

3.1.6 芯体 cores

（探头）支撑线圈并可能影响线圈磁通的物理元件。

[GB/T 12604.6—2021, 定义 3.3.19]

3.1.7 铁氧体磁芯 magnetic yokes

具有传导磁路和汇聚磁场能力的铁氧体磁芯（3.1.6）。

3.1.8 激励场 excitation field

激励电流产生的磁场。

[GB/T 12604.6—2021, 定义 3.3.27]

3.1.9 感应加热 induction heating

利用电磁感应原理，通过瞬态激励电流产生的交变磁场在被测工件的导电基体内部产生涡流，根据涡流的磁热效应，使得被测工件产热的现象。

3.1.10 涡流感应加热系统 eddy current induction heating system

提供不同参数电流以产生检测所需涡流的加热系统。

注：涡流加热激发装置包括激励线圈（3.1.5）和铁氧体磁芯（3.1.7），以便更好的传导磁路。

3.1.11 红外热成像 infrared thermography

一种通过获取被测物发出红外辐射并成像的方法。

[GB/T 12604.9—2021, 定义 5.11]

注：红外热成像分为主动式红外热成像和被动式红外热成像。主动式红外热成像（active thermographic testing method）是指需要施加额外热激励的红外热成像检测。[GB/T 38883—2020 定义 3.1]

3.1.12 红外热像仪 inspecting thermal imager

通过红外光学系统、红外探测器及电子处理系统，将物体表面红外辐射转换成可见图像的设备。它具有测温功能，具备定量绘出物体表面温度分布的特点。

[GB/T 19870—2018, 定义 3.1]

3.1.13 温度分布序列图 temperature sequence diagram

用来表征温度随时间变化的图表。

3.2 被测对象一般术语

3.2.1 涂层 coating

特指被检测件导电基体上的任何保护层或绝缘层。

[ISO 20669—2017, 定义 3.1]

3.2.2 脱粘缺陷 debonding defects

在导电基体与涂层之间由于疲劳、热应力失配等原因形成的空气腔结构。

4 方法概要

4.1 检测原理

涡流红外检测方法适用于以导电材料为基体涂层内部出现的脱粘缺陷的损伤检测，其原理如图 4-1 所示。

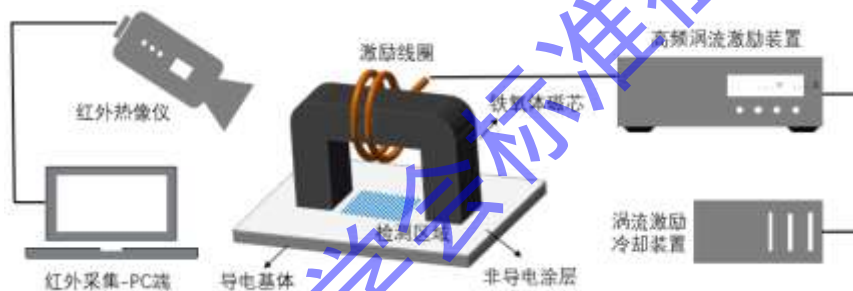


图 4-1 涡流红外检测原理图

在进行涂层脱粘的检测时，高频电流激发装置会施加高频高幅值交变电流，通过激励线圈传递能量产生涡流热。基于电-磁-热相互作用原理，即当交变电流通过激励线圈时，根据 Biot-Savart 定律，空间中产生变化的磁场，进一步根据法拉第电磁感应定律，导电基体中感应产生涡流，由于基体存在电阻，基体中感应的涡流会产生热效应，热量由导电基体通过热交换（含热传导、热辐射、热对流）向四周扩散。在涂层结构中，脱粘缺陷是在结构中发生界面分离的一种缺陷形式，由于层间贴合不紧密从而导致空气腔的存在。而空气是热交换的不良导体，在热量向四周扩散过程中，空气腔的存在会严重影响热扩散，进而对温度场分布产生扰动（如图 4-2）。这种温度场的变化可以通过红外热像仪进行捕捉。其中，红外热像仪是一种非接触式的温度测量设备，能够检测并记录物体表面的温度分布，生成温度分布序列图。

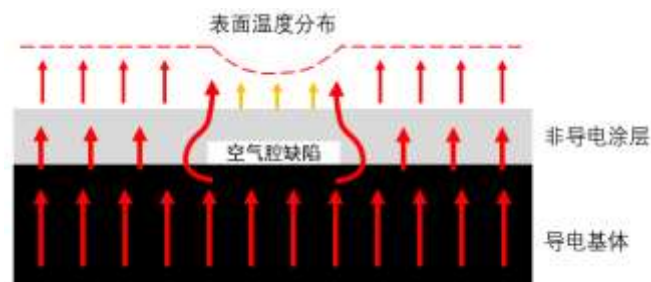


图 4-2 涂层脱粘缺陷导致结构表面温度分布不连续

在检测过程中，红外热像仪在激励施加前后的时间段内，连续采集被测工件检测区域的表面温度场信息。通过分析采集到的温度场信息，可以推断出导电基体涂层中是否存在脱粘缺陷，如果温度场在激励后显示出不连续的温度分布，即表明结构中存在脱粘缺陷。

其中使用铁氧体磁芯搭建传导的磁路可以很好消除激励线圈对检测区域的遮挡，有效传导磁路，更好的汇聚磁场，并实现对被测工件检测区域近似均匀的加热，如图 4-3 所示。

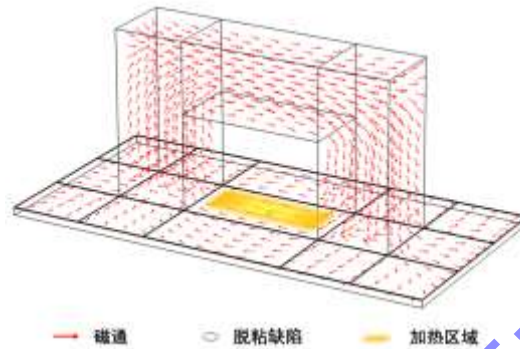


图 4-3 铁氧体磁芯中的磁通及被测工件表面加热状况

4.2 优点

涡流红外检测方法的优点：

- 涡流红外是一种非接触式检测，对被测工件的损伤较少；
- 涡流加热具有良好的加热效率，同时红外热像仪能够快速捕捉物体表面的温度变化，因此能够实现快速检测；
- 涡流的快速加热能够减弱温度场的模糊效应，同时，借助铁氧体磁芯能够实现有效调控，可实现对检测区域近似均匀加热。此外，红外热像仪具有较高的空间分辨率，一般在微米级别。因此，涡流红外检测对近表面缺陷具有较高的检测灵敏度，可实现微小的脱粘缺陷检测；
- 检测结果可视化，利用红外热像仪可以将检测结果以图像形式保存，便于后续的实验数据处理和分析；
- 能够快速实现对导电基体涂层脱粘缺陷的损伤检测，适合在线检测和现场检测；
- 适用范围广，对曲面涂层中脱粘缺陷的检测同样适用；
- 由于是非接触式检测，降低了检测过程中对检测人员的安全风险。

4.3 局限性

涡流红外检测方法的局限性：

- 不适用于非导电基体涂层脱粘的检测；
- 不适用于较远距离的检测。

5 安全要求

涡流红外检测方法在对导电基体涂层检测时，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：

- 在实施检测前，应对检测人员进行培训和采取必要的保护措施，避免检测过程中出现可能

会伤害检测人员的各种危险源；

- b) 检测人员应严格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，应定制特定的安全防护措施，保证检测人员的安全；
- d) 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，并采取相对应的保护措施；
- e) 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；
- f) 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

采用本标准实施检测的人员，应按照 GB/T 9445 或合同方同意的体系进行资格鉴定与认证，取得红外检测人员资格证书，并由雇主或其代理对其进行岗位培训和操作授权，帮助人员理解和应用检测程序，提高其专业技能和实际操作水平。培养内容可涵盖涡流红外检测通用知识、激励涡流相关技术、红外设备操作、安全规程、报告编写等方面，确保他们能够熟练掌握标准规范和技术要求。

7 检测系统

涡流红外检测系统应至少包括高频涡流热激励模块及其控制分析模块、信号采集模块及其控制分析模块和其他辅助操作装置。

7.1 高频涡流热激励模块

高频涡流热激励模块由高频涡流激励电源、圆型激励线圈及其支座、水冷装置、采集控制终端等组成。其中高频涡流激励电源是实现电磁感应加热的核心部件，需要具备输出高频高幅值电流以驱动激励线圈产生变化的磁场，在被测工件导电基体中产生感应涡流的能力。高频涡流激励电源提供的电流范围一般在百安培左右，且能够在毫秒级时间内迅速激发电流产生磁场，使得被测工件导电基体能够实现瞬时局部加热。另外激励线圈的设计需要具备在通入高频高幅值电流时，传导长效稳定的激励电流，并在空间中产生变化的磁场的的能力。水冷装置应具备通过循环冷却液带走高频涡流激励电源在工作中产生大量热量的能力，保证整个设备在高功率下的持续稳定运行。采集控制终端应具备调节输出激励电压、激励频率和激励时间等能力，以适应不同脱粘缺陷大小的检测。另外，在检测过程中，铁氧体磁芯的使用，能够有效地传导磁路、更好的汇聚磁场，并避免了激励线圈对检测区域的遮挡，实现了对被测工件待测区域的近似均匀加热。

7.2 信号采集模块

7.2.1 概述

信号采集模块是由红外热像仪及安装有控制红外热像仪软件的计算机组成。该模块应具备有接收被测工件表面的热辐射信号，并将这些信号传输至计算机进一步分析的能力。

7.2.2 红外热像仪

- a) 红外热像仪根据大气窗口中的波长不同，可以分为短波红外热像仪、中波红外热像仪和长波红外热像仪。通常检测实验在室温下进行，故采用长波或中波红外热像仪；若被测工件处于实际高温的工况下，尽可能使用短波红外热像仪。

- b) 在使用红外热像仪前，应对红外热像仪的探测器单元进行非均匀性校正。一般采用发射率高且均匀的材料（例如黑色海绵）放置在距离热像仪镜头较近的地方（覆盖热像仪现场）进行均匀性校正。
- c) 根据检测要求和被测工件结构确定一次成像视场范围。一般来说，采用大视场时，检测距离（热像仪镜头和被测工件间的距离）较长，检测的空间分辨率较低；采用小视场时，检测距离较短，检测的空间分辨率较高。同时，可更换红外热像仪镜头来获得更高空间分辨率。
- d) 确定视场与检测距离后，应对红外热像仪进行对焦，确保图像清晰。必要时，在检测工作距离处放置对焦辅助参照物（如刻度尺），调节焦距，待参照物细节轮廓清晰可见时，完成对焦。改变检测距离后，应重新对焦。
- e) 设置角度：红外热像仪光学系统轴线方向与垂直被测工件表面的直线间夹角应不小于 45° ；如不能满足，角度最大不能超过 60° （对于使用年限较长的热像仪，角度应尽量控制在 5° 以内）。
- f) 帧频和积分时间：应根据被测工件物理特性、红外热像仪性能和检测要求选择适当的红外热像仪帧频与积分时间，如果被测工件受热激励后温度变化较快，可选择更高帧频。
- g) 设置采集时间：红外热像仪采集时间宜完整覆盖被测工件温度变化过程。检测时间应完全的覆盖热激励加热前后时段。

7.2.3 红外热像仪后端控制系统

计算机需要具备能够安装控制红外热像仪软件并使其正常运行的能力，能够调节红外热像仪的各种参数，如分辨率、采集帧率和采集温度范围等。

- a) 具备控制红外热像仪采集开始和结束的能力；
- b) 具备实时显示红外热像仪捕获的连续温度分布图像的能力；
- c) 具有单帧记录和连续记录温度序列图并存储的能力；
- d) 应具有对已存储温度序列图进行单帧查看或者播放的能力；
- e) 应具有观看任意位置的温度或温度变化曲线并导出该温度数据的能力；
- f) 应具有显示已存储温度分布序列图在采集时的仪器参数设置及检测条件的能力；
- g) 应具有对图像分析的能力：如对测量区域红外辐射强度信号的温度估计，基于红外线热成像系统分辨率的点温度测量，测量区域内平均温度、最小温度和最大温度等能力。

7.3 其他辅助操作装置

检测过程中的辅助操作装置包括：

- a) 红外热像仪设备三脚架；
- b) 拿取被测工件的夹具及手套；
- c) 被测工件的辅助支撑装置；
- d) 涡流信号采集装置，如信号放大器；
- e) 被测工件表面清洁及保护工具：工业用无水乙醇、脱脂棉等。

7.4 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) 每年至少要对仪器及探头组合性能进行一次校准并记录；

- d) 设备维修后必须对仪器设备进行校准和记录。

8 检测环境

检测环境应该满足包括红外热像仪在内全部检测设备所需的温度、湿度及外界热辐射环境要求。考虑被测工件与红外热像仪之间的其他物质对红外光的吸收、散射与反射作用，例如，空气中的温室气体（水蒸气、二氧化碳氧化物等）对红外辐射有显著的吸收效应，会阻挡红外辐射的传播，同时，应排除或者减少周围环境背景的热辐射干扰影响，例如不必要的可见光、被测工件附近的热源。应避免在易燃和易爆的环境中进行作业。

检测环境应具备保证检测人员安全的基本条件，确保电磁用电安全。检测开始前确保所有设备正确接地；检测实验操作环境是否对实验造成影响，如温度、湿度、是否存在磁场干扰等；对于特殊的检测环境，需制定明确的紧急预案，以便在意外发生时能够迅速采取行动，必要时可以配备防护装备，如防护服、防护眼镜和耳塞等，大大减少对检测人员与其他设备的危害。

9 对比试块

9.1 用途

对比试块用于导电基体涂层脱粘缺陷当量的检测等级评定，是对检测设备检验和设定的基准。

9.2 一般要求

- a) 对比试块应与被检工件规格相同：材质、缺陷尺寸和结构、物理属性等；
- b) 对比试块表面状况应与被检件表面状况基本相同；
- c) 对比试块应根据验收标准或合同方商议设置内部脱粘的人工缺陷。

9.3 对比试块的检测

对比试块制作完毕后，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

10.1 检测准备

10.1.1 资格查验

- a) 检测前，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) 检测前，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/保养改造文件和历次检验记录等资料。

10.1.2 被测工件表面状况检查

- a) 检测前，应对被测工件表面状况进行详细检查与记录，及时清理被测工件表面上的锈蚀产物、毛刺飞边、金属碎屑等，以排除表面不清洁导致的伪显示的可能性。
- b) 检测时，不能用手直接接触被测工件表面，防止沾染污渍；

- c) 检测时，移动试件过程中，应注意避免尖锐物品刮擦试件，轻拿轻放。

10.1.3 检测设备检查

- a) 检测前，应注意高频涡流激励电源的安全使用，首先确定设备已经正确接地，防止电气故障和潜在风险；检查电源的电压、电流和频率是否符合设备的额定参数，确认过热、过流和短路等保护装置已正确设置并处于工作状态。
- b) 检测前，检查电源激励发生开关是否能够正常工作，避免出现连接短路或击穿现象。检查设备水冷装置是否正常工作，包括水泵、流量开关、冷却塔/膨胀水箱自动补水装置和自动排气阀，确保冷却液循环畅通，没有泄漏，且水质和水量满足要求。
- c) 检测前，完成 7.2.2 红外热像仪的前期设置后，检查红外热像仪采集系统角度及成像范围区域，确保被测工件出现在画面中。
- d) 检查设备仪器和磁轭、线缆情况，确保每个模块都能够正常工作，确保连接无误方可开机进行检测。

10.2 检测实施

- a) 按照实验要求放置好设备和被测工件，完成热激励的参数设置，并确保磁轭与激励线圈完全无接触；
- b) 触发高频涡流热激励单元对被测工件表面进行激励，激励能量的密度应在被检区域内近似均匀分布；
- c) 在施加热激励的同时，红外热像仪捕获试件表面红外辐射，连接到计算机同步采集，完整记录并保存热激励施加前和后时间段内的温度变化过程；
- d) 在激励发生前后时段内，被测工件与红外热像仪应保持相对静止状态；注意不能出现有遮挡检测区域或红外热像仪镜头的情况；
- e) 如需要对被测工件进行二次检测，应等待被测工件检测区域表面温度均匀无明显偏差后再次重复上述检测步骤。
- f) 完成缺陷检测后，需对试件表面进行保护（如包裹保鲜膜等），并将设备按顺序关闭。

11 检测结果的评价

11.1 检测评价准备

在检测前应保持试件表面光滑清洁，排除被测工件的结构、表面状况或表面反射等造成的影响。在检测评价前，应选取合适的图像显示方式，通过全局或局部的对比度、亮度调整等，使图像便于观察。根据图像上细节特征的灰度、形状和尺寸等情况进行进一步分析。

11.2 检测评价原理

检测主要是从所获取温度场信息图中提取出现温度不连续的信息，得到某一时刻不连续区域温度—时间变化曲线与正常温度连续区域的温度—时间变化曲线进行对比，判断脱粘缺陷的温度不连续区域随激励时间的变化规律；另外，从所获取的红外图像中提取每一像素点的温度信息，形成各个像素点的温度随时间变化的曲线，通过计算信噪比，对导电基体涂层的脱粘缺陷信息进行合理评判。

11.3 结果评价

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。采用此检测参数对被检工件进行检测和红外热成像，温度序列图结果中显示的不连续温度区域即为脱粘缺陷的实际位置和大小。

12 检测工艺规程与报告

12.1 检测工艺规程

金属基材料涂层脱粘缺陷的涡流红外检测方法的应用单位应按照本标准的要求制定通用工艺规程，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) 依据的标准或其他法规文件；
- d) 检测人员的资格要求；
- e) 检测环境的要求；
- f) 检测设备和器材；
- g) 检测对比试块信息：材质、几何形状与尺寸、人工缺陷形状尺寸与位置；
- h) 检测方法原理和检测步骤：涡流激发装置、激励过程、红外热像仪的采集；
- i) 对检测结果的存储和读取的要求；
- j) 检测结果的评价和处理方法；
- k) 检测记录、报告和资料存档；
- l) 编制（级别）、审核（级别）和批准人；
- m) 制定日期。

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) 委托单位和检测单位的名称；
- b) 引用本文件编号、检测工艺流程编号；
- c) 执行标准、参考标准；
- d) 被检工件：名称、编号、尺寸大小、材质、表面状况；
- e) 被检工件的检测区域；
- f) 对比试块：名称、编号、尺寸大小、材质、表面状况、人工缺陷；
- g) 检测设备：仪器、磁芯等；
- h) 热激励：激励功率、时间和电压幅值等；
- i) 检测红外热像仪：型号、成像范围和距离、采集帧率；
- j) 检测环境条件：室温、仪器温度、湿度；
- k) 涡流红外检测结果及评定、验收条件；
- l) 检测人员及审核人员签名；
- m) 记录检测日期并形成检测报告。