

船舶及海洋工程装备

多功能复合金属涂层损伤检测
与评价的研究进展赵元新¹, 吴连锋², 王波², 卞贵学³, 齐建涛^{1*},
黄海亮³, 宁亮², 王贤明², 王飞²

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 海洋化工研究院有限公司海洋涂层国家重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 总结了近年来涂层损伤检测与评价的研究进展, 首先简要介绍了多功能复合涂层的分类及其优缺点, 阐述了金属涂层损伤的类型与机理。然后详细介绍了几种涂层损伤检测方法, 包括附着力测试、扫描电镜观察法、金相法 3 种有损检测技术, 从基本原理、工艺应用以及对材料的危害程度等角度, 阐述了用来测量金属涂层损伤的超声波检测、近红外热成像检测、涡流测试、激光剪切成像、微波测试 5 项无损检测技术。另外, 介绍了损伤评价指标以及相关的理论模型。最后对未来金属涂层损伤检测与评价技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 多功能复合涂层; 涂层损伤; 检测方法; 评价指标; 理论模型; 无损检测

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)12-0094-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.012

Research Progress on Damage Detection and Evaluation of
Multifunctional Composite CoatingsZHAO Qixin¹, WU Lianfeng², WANG Bo², BIAN Guixue³, QI Jiantao^{1*}, HUANG Hailiang³,
NING Liang², WANG Xianming², WANG Fei²

(1. School of New Energy, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China;

2. State Key Laboratory of Marine Coatings Marine Chemical Research Institute Co., Shandong Qingdao 266071, China;

3. Naval Aviation University (Qingdao Campus), Shandong Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the research progress of coating damage detection and evaluation in recent years. Firstly, the classification of multifunctional composite coatings and their advantages and disadvantages were briefly introduced, and the types and mechanisms of metal coating damage were described. Then, several coating damage detection methods were introduced in detail, including three kinds of lossy detection techniques, such as adhesion test, scanning electron micro-

收稿日期: 2024-07-15; 修订日期: 2024-09-19

Received: 2024-07-15; Revised: 2024-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(51701239); 教育部产学研协同育人项目(BINTECH-KJZX-20220831-35)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51701239); Ministry of Education's Industry-University-Research Collaborative Education Project (BINTECH-KJZX-20220831-35)

引文格式: 赵元新, 吴连锋, 王波, 等. 多功能复合金属涂层损伤检测与评价的研究进展[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 94-102.

ZHAO Qixin, WU Lianfeng, WANG Bo, et al. Research Progress on Damage Detection and Evaluation of Multifunctional Composite Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 94-102.

*通信作者 (Corresponding author)

scope observation method, and metallographic method. Five non-destructive testing techniques, such as ultrasonic testing, near-infrared thermography testing, eddy current testing, laser shear imaging, microwave testing, which were used to measure the damage of the metal coatings, were described in the perspectives of the basic principle, the application of the process, and the degree of harm to the material. In addition, damage evaluation indexes and related theoretical models were introduced. Finally, the future development trend of metal coating damage detection and evaluation technology was outlooked.

KEY WORDS: multi-functional composite coating; coating damage; detection method; evaluation index; theoretical model; non-destructive testing

涂层作为一种有效的防护手段,广泛应用于航空航天、汽车、船舶、能源等领域,其作用包括防腐、耐磨、隔热、绝缘等^[1-2]。然而,在复杂的服役环境中,涂层容易受到机械磨损、化学腐蚀、热循环等因素的作用而发生损伤,从而降低其防护性能^[3-4]。因此,了解涂层损伤的类型与机制,发展有效的涂层损伤检测与评价技术对于保障涂层的可靠性和安全性至关重要。

1 多功能复合涂层

多功能复合涂层是一种集成了多种不同功能特性的涂层体系。相较于传统单一功能涂层,多功能涂层将多种特定性能的涂层有机地结合在一起,形成完整作用体系,从而实现多种功能的协同作用。这个复合体系中,包含如防污涂层、防菌涂层、杀菌涂层、隐身涂层、耐热涂层和柔韧性涂层等各类功能涂层。防污涂层能够有效阻止污垢、杂质在表面的附着和积聚;防菌涂层可以抑制细菌的滋生和繁衍;杀菌涂层则具有直接杀灭细菌和微生物的能力;隐身涂层通过对电磁波的特殊作用,降低物体被探测和识别的概率;耐热涂层在高温环境下保持稳定的性能,防止涂层的损坏和失效;柔韧性涂层赋予涂层在弯曲、拉伸等情况下不易破裂和脱落的特性。

这些不同功能的涂层相互融合,形成了一个综合性能优越的整体。然而,多功能复合涂层在实际应用中同样会面临各种损伤情况,因此需要其进行特定的损伤检测,以确保其各项功能的持续有效发挥。根据其组成,可以将多功能复合涂层分为有机/无机复合涂

层、纳米复合涂层^[5-7]、功能性复合涂层等^[8]。有机/无机复合涂层主要是由无机颗粒物和有机聚合物混合制备而成,具有高抗腐蚀性能和良好的力学性能^[9]。纳米复合涂层主要是通过将纳米颗粒与聚合物混合,形成纳米级别的涂层,具有优异的物理、化学和力学性能^[10-11]。功能性复合涂层则是针对不同的使用需求,针对特定的功能进行组合,如防污^[12]、防水防静电^[13]、自修复^[14]等。

目前国内外的多功能复合涂层研究多聚焦于应用最广的金属设备用涂层,下面将对多功能复合金属涂层损伤的类型与检测技术展开介绍。

2 金属涂层损伤的类型与机理

2.1 机械损伤

机械损伤主要包括划痕、磨损和冲击等。在摩擦、刮擦或高速冲击作用下,涂层表面可能出现微观裂纹、剥落和材料去除等现象。划痕通常是由于尖锐物体在涂层表面划过而产生的线性损伤。当尖锐物体与涂层表面接触时,会产生局部的高压和剪切力。如果涂层的硬度和韧性不足以抵抗这种压力和剪切力,涂层材料就会发生塑性变形、断裂甚至剥落,从而形成划痕,如图 1 所示。较硬和尖锐的物体更容易造成深而宽的划痕。硬度高但韧性差的涂层容易出现脆性断裂,而韧性好但硬度低的涂层则容易发生塑性变形。同时,较大的加载力和特定的加载方向会增加划痕的严重程度。

磨损是指涂层表层材料在相对运动过程中,受到

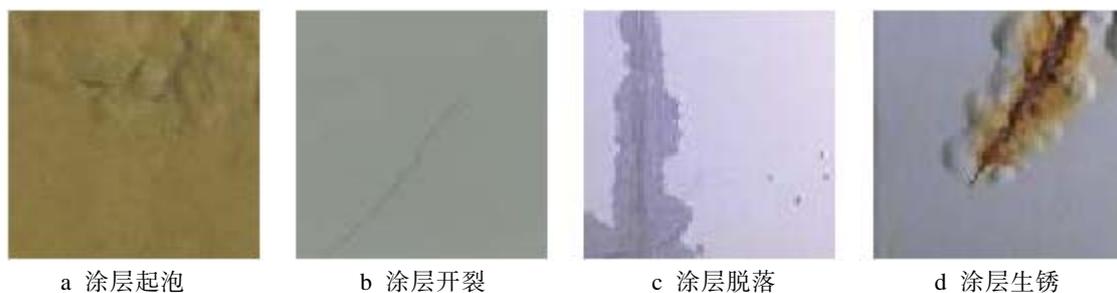


图 1 4 种常见的涂层损伤类型

Fig.1 Four common types of coating damage: a) blistering of coatings; b) cracking of coatings; c) peeling of coatings; d) rusting of coatings

摩擦所产生的材料逐渐损失。由于磨擦的不断进行,涂层表层的材质也会出现黏着损耗、磨粒损耗、疲劳磨损等不同的损耗机理^[15]。黏着损坏是指材料在2个接触表面的高电压下出现的相互黏着,随后材料在相对运动时,黏着点被撕裂,使得材料由一个表面迁移到另一表面。磨粒损坏则是硬的粒子在涂层表面的刮擦和磨削,从而造成了涂层材料的去除。疲劳磨损由于循环载荷作用下,涂层表面产生疲劳裂纹,裂纹扩展并导致材料剥落。材料受冲击过程中,如果应力波的强度超过涂层的承受能力,涂层就会发生开裂、分层甚至破碎。

2.2 化学损伤

化学损伤通常是由于涂层与环境中的化学物质发生反应导致的。例如,腐蚀介质的侵蚀会引起涂层的腐蚀,是造成涂层起泡和脱落的原因之一。腐蚀是涂层与环境中的腐蚀性介质发生化学反应而导致的损伤。常见的腐蚀类型包括电化学腐蚀、化学腐蚀和微生物腐蚀。电化学腐蚀指的是在电解质溶液中,涂层和基体形成原电池,发生电化学反应,导致涂层的阳极溶解和阴极反应。化学腐蚀是涂层直接与腐蚀性气体或液体发生化学反应,形成腐蚀产物。微生物腐蚀是因为微生物在涂层表面附着和生长,其代谢产物会加速腐蚀过程成为微生物腐蚀。环境介质的性质、涂层的孔隙率和渗透性、涂层的化学稳定性是影响涂层发生化学腐蚀的重要因素。同样,在高温或有氧环境中,涂层中的金属元素容易与氧气发生氧化反应,形成氧化物的氧化过程也属于涂层的化学损伤。氧化物的体积通常比原始金属大,会导致涂层内部产生应力,从而引发裂纹和剥落。

2.3 热损伤

热循环和高温环境可能导致涂层的热膨胀系数不匹配,从而产生热应力,引发金属涂层的裂纹和分层。热循环是指涂层在反复的加热和冷却过程中受到的损伤。由于涂层和基体的热膨胀系数不同,在温度变化时会产生热应力。当热应力超过涂层的屈服强度时,涂层会发生塑性变形、裂纹萌生和扩展。高温环境下,涂层表面与氧气发生氧化反应,随着氧化的持续进行,氧化物层不断增厚,同时内部应力也不断增加。当氧化物层的应力超过其结合强度时,涂层剥落并露出新的涂层表面,进一步加速氧化过程。除热应力损伤外,热损失还包括高温环境造成的涂层热老化。在高温环境下,涂层中的分子运动加剧,导致化学反应速率加快。这些反应可能包括氧化、分解等,使得涂层中的化学键断裂,材料结构发生变化。涂层热老化主要涉及高温加速化学反应、热应力与变形、氧化与降解、交联与固化以及水分与湿气的影 响,多种因素共同作用导致涂层老化,性能减退,最终失效。涂层损伤的主要类型与机制总结见表1。

表1 金属涂层损伤的主要类型与机理

Tab.1 Main types and mechanisms of metal coating damage

金属涂层 损伤类型	损伤机理
机械损伤	在摩擦、刮擦或高速冲击作用下,涂层表面可能出现微观裂纹、剥落和材料去除
化学损伤	由于涂层与环境中的化学物质发生反应导致的涂层腐蚀、氧化等
热损伤	热循环和高温环境可能导致涂层的热膨胀系数不匹配,从而产生热应力,引发涂层产生裂纹和分层。高温环境同时会导致热老化,涂层性能下降,最终失效。

3 涂层损伤检测方法

目前,常用的涂层检测技术可分为有损检测技术和无损检测技术。有损检测技术包括附着力测试、扫描电镜观察法和金相等。有损检测方法都会破坏待测试件本身,且扫描电镜观察法和金相法成本较高,较难实现。无损检测技术主要有超声法、涡流法、X射线法和红外热成像法等。无损检测方法可以在避免测试件受损的情况下完成检测,有效降低检测后样品无法继续使用的经济成本。同时,各类无损检测技术由于检测原理、检测步骤的不同,其各自适用状况也有所不同,因此涂层损伤检测技术的选定需要结合待测件材料、性能、应用环境等因素综合判断。

3.1 有损检测技术

3.1.1 附着力测试

常用附着力测试包括划格法和拉开法。划格法通过在涂层表面划格,然后观察涂层的剥落情况来评估附着力;拉开法是用胶黏剂将试柱与涂层黏结,然后测定拉开时的力来确定附着力。传统涂层损伤检测手段大多对涂层所在的材料或器件造成损伤与破坏,导致检测后涂层无法正常使用,因此无损检测技术倍受重视。目前,新兴无损检测技术在医疗、军事、航空等领域的高精度检查中发挥重要作用。

3.1.2 扫描电镜观察法

在涂层损伤检测中,扫描电镜通过发射聚焦的高能电子束扫描样品表面,激发产生各种物理信号,如二次电子、背散射电子等。这些信号被探测器收集并转化为图像,从而呈现出涂层表面和内部的微观结构和形态。使用扫描电镜观察涂层损伤时,首先需要对样品进行精心的制备,包括切割、镶嵌、研磨、抛光以及镀导电膜等步骤,以确保样品能够在电镜中清晰成像,并防止电荷积累对成像质量的影响。通过扫描电镜,可以直观地观察到涂层中的各种损伤情况,如裂纹的萌生和扩展、涂层的剥落、孔隙和夹杂的分布

等, 并且能够对损伤的特征进行详细的定量分析, 例如测量裂纹的长度、宽度和深度, 评估剥落区域的面积等。然而, 扫描电镜观察法也存在一些局限性, 除了上述提到的样品制备复杂、检测范围有限、设备昂贵等问题外, 对于一些动态的损伤过程难以实时捕捉。尽管如此, 扫描电镜观察法在涂层损伤检测中仍然具有不可替代的作用, 为深入研究涂层的失效机制和优化涂层性能提供了重要的微观信息。

3.1.3 金相法

金相法主要是通过对样品进行切割、镶嵌、研磨、抛光和腐蚀等一系列处理后, 用金相显微镜来观察涂层及其与基体的界面微观结构。金相法能够清晰地显示涂层与基体的结合情况, 包括是否存在分层、孔隙等缺陷。同时, 可以观察涂层的微观组织, 如晶粒大小、相分布等, 有助于分析涂层的性能和损伤机制, 操作相对较为简便, 成本相对较低。然而, 样品制备

过程较为繁琐, 且制备过程中的操作不当可能引入新的损伤; 检测结果受样品制备质量和腐蚀剂选择的影响较大; 只能观察到二维的微观结构, 对于一些复杂的三维损伤形态可能难以准确评估。在实际应用中, 金相法常与其他检测方法相结合, 以更全面、准确地评估涂层的损伤情况。

3.2 无损检测技术

无损检测技术是在不破坏或不干扰被检查物体使用性能的情况下, 通过物理、化学等方式, 利用最先进的工艺和设备仪器, 对试件内或外表的构造、性能、形态等进行检查和测量的技术方法^[16-17]。本文从基本原理、工艺应用以及对材料的危害程度等角度阐述了用来测量金属涂层损伤的超声波检测、近红外热成像检测、涡流测试、激光剪切成像、微波测试等 5 项无损检测技术。5 项无损测试的优点汇总见表 2。

表 2 5 种无损检测技术优缺点

Tab.2 Advantages and disadvantages of five NDT techniques

无损检测方法	优点	缺点
超声法	检测速度快、灵敏度高、设备轻便	对待测试件表面粗糙度要求高、需要耦合剂; 对小而薄的工件检测困难、无法实现多层结构试件的厚度检测
红外热成像法	非接触、检测速度快、检测面积大	检测精度易受试件表面粗糙度及背景噪声干扰; 检测深度有限、不适用于厚度较厚及多层结构试件检测; 会在一定程度上加速涂层材料老化
涡流法	操作简单、精确度高	对待测试件表面平整度、粗糙度要求高; 仅限于表面及近表面检测, 很难检测到试件表面以下较深的缺陷; 易受环境因素干扰, 不适合大面积表面形貌绘制
激光剪切成像法	非接触、高敏感度、可检测表面变形	无法检测材料内部的变形和缺陷, 该方法的信噪比较低, 妨碍了准确评估
微波检测法	非接触、检测速度快、穿透能力强	检测精度易受干扰且检测信号分辨率有限不适用于微小损伤和缺陷的检测设备结构复杂且经济成本高; 容易受到外界环境中电磁干扰影响结果准确性

3.2.1 超声波检测 (UT)

超声波测试 (UT) 的特点是利用超声波的机械能来检测复合材料中的缺陷^[18-19], 如图 2 所示。该技术使用的频率范围高于“人体发热”(0.5~20 MHz)。这种短波长的信号可以穿过固体、液体和气体, 进而能够探测涂层损伤的程度。

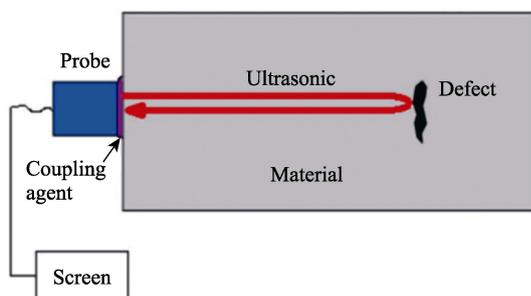


图 2 超声波无损检测的基本原理^[19]

Fig.2 Basic principles of ultrasonic non-destructive testing^[19]

超声波检测装置向探头发送电压脉冲以产生超声波脉冲, 通过耦合剂传播到被检测材料中, 当遇到缺陷时, 超声波会发生部分反射。反射通过相同的路径返回, 探头接收到反射信号后, 将其转换为电信号, 并显示在屏幕上。通过分析反射脉冲的位置和振幅, 可以确定检测到的缺陷的位置和大小^[20]。根据被检测材料的厚度和结构, 在检测时应使用不同的频率进行检测。同时, 实际应用中, 材料结构不同会导致缺陷反射的声波所产生的衰减效应不同, 因此超声波振幅也需要进行调整, 以克服衰减效应^[2]。李冰^[21]采用超声波检测技术, 结合多元高斯声束模型对海底管道外涂层缺陷进行研究, 成功开发了一套远程超声波无损检测系统, 证实了超声波无损检测技术对涂层损伤的检测效果。

3.2.2 红外热成像 (IRT)

红外热成像 (IRT) 是一种瞬态无损检测方法, 通过确定涂层表面的温度变化来检测缺陷^[22]。红外热

能在被检测材料中传播时会产生热梯度,可根据发射率系数确定是否存在缺陷^[23]。IRT 可分为被动 IRT,即根据被测材料表面在自然条件下发出的热辐射来监测被测材料的状况^[24]。另一方面,主动 IRT 利用外部来源在待测区域之间产生温差^[25-26]。

主动红外热成像测试的基本设置如图 3 所示。在被测涂层上方放置 2 个加热器,红外辐射会导致样品表面温度升高。随后,随着红外热开始在材料中传播,表面温度开始下降。样品上方的红外热像仪会捕捉到温度的变化。通过图像处理装置对这些变化进行处理,就能检测到任何杂质或缺陷,因为它们会导致样品内部的热流发生变化^[27]。缺陷的形状可以从缺陷区域和其周围区域的温度分布差异中推断出来。例如,当涂层某区域发生损伤时,该区域内的温度衰减速度将慢于未受同一缺陷影响的其他区域。根据外部热源的类型,可通过多种方法实现主动 IRT,如光学刺激热成像、超声波刺激热成像和涡流刺激热成像^[28]。在振动热成像仪中,将焊接喇叭压在被测材料样品表面,从而引起材料内部振动,在缺陷区域产生摩擦热,通过红外摄像机捕捉到热量,进而找到缺陷区域^[29]。在大多数情况下,仅使用 IRT 无法对复合材料进行无损检测。首先,一些 IRT 方法需要较长的处理时间,而且深度分辨率有限。其次,检测过程所需的高加热功率可能会导致表面受热不均匀,容易对样品造成部分损坏。

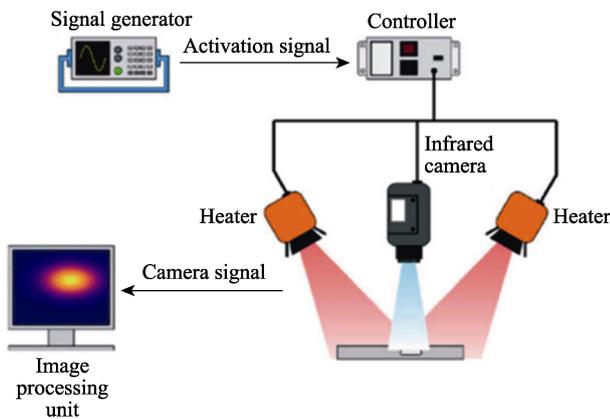


图 3 红外热成像 (IRT) 的结构^[19]
Fig.3 Structure of infrared thermography (IRT)^[19]

3.2.3 涡流检测 (ECT)

涡流检测 (ECT) 是一种利用电磁感应理论检测导电复合材料的方法,原理如图 4 所示^[30-32]。通过使用一个发射线圈在被测材料附近产生一个原磁场,根据法拉第定律可知,材料中会感应出涡流^[33]。同时,材料中也会产生二次磁场,与线圈产生的磁场相互作用,如图 5 所示。

使用上述布置进行材料检测时,可以执行涡流热成像技术,该技术依靠电磁诱导涡流产生热量。热扩散波将受到涡流的刺激,并与材料内部的缺陷相互作用。

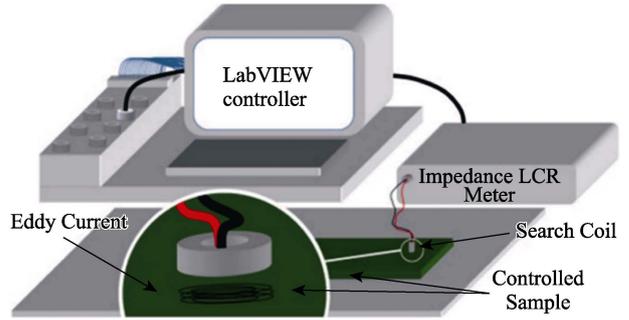


图 4 涡流测试示意图^[33]
Fig.4 Schematic diagram of eddy current testing^[33]

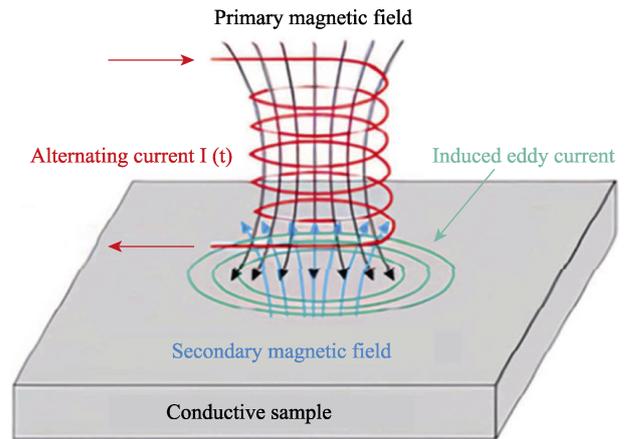


图 5 导电材料中的感应电流^[34]
Fig.5 Induced currents in electrically conductive materials^[34]

用。热扩散波将受到涡流的刺激,并与待检测材料内部的缺陷相互作用。另一方面,ECT 也可以通过检测复合材料中的二次磁场来进行,被检测材料内部缺陷的存在会导致材料中的二次磁场涡流中断。因此,可以通过观察二次磁场较弱的被测样品部分来确定缺陷区域。检测内部缺陷还可以通过跟踪被检测区域阻抗的变化来实现,因为它与涡流的强度有关。ECT 目前是一种广泛应用的检测方法,经常用于蒸汽发生器管、给水加热器管、涡轮叶片和转子等的结构的检测^[34]。它还被广泛用于检测飞机工业中使用的 CFRP 和金属基复合材料。然而,这种无损检测方法只能用于检测表面和近表面导电型材料涂层缺陷^[35-36]。因此,它无法检测任何绝缘体或电介质包裹样品。此外,在进行 ECT 之前还需要考虑许多条件,例如确定探针与材料之间的最佳距离以及用于检测的脉冲频率^[18,37]。

3.2.4 激光剪切成像 (LS)

激光剪切成像 (LS) 利用相干和单色激光的特性来照射被测复合材料的表面。这些特性会使缺陷区域粗糙表面的反射光产生斑点图案,并由相机捕捉^[28]。LS 测试装置如图 6 所示。干涉测量图像的处理是通过使用 2 束波长相同的激光来实现的。电荷耦合器件 (CCD) 视频传感器捕捉被检测样品的状况。因此,斑点图案可以根据材料固有的表面粗糙度产生。施加

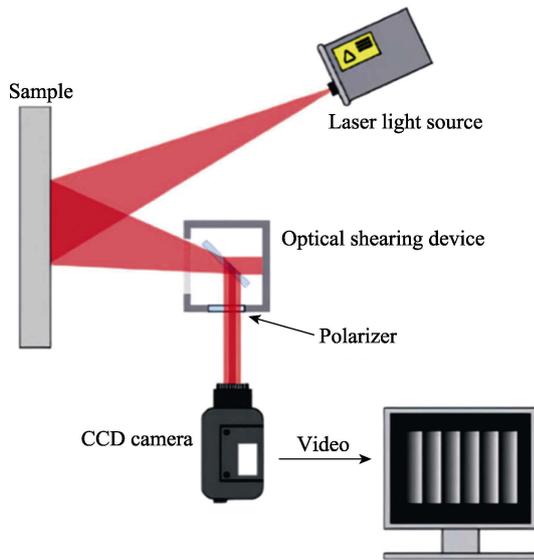


图 6 激光剪切成像 (LS) 设置系统^[20]
Fig.6 Laser shear imaging (LS) setup system^[20]

外部负载会导致被检测材料表面变形, 从而使斑点图案发生变化。采用真空等加载系统, 通过对样品施加

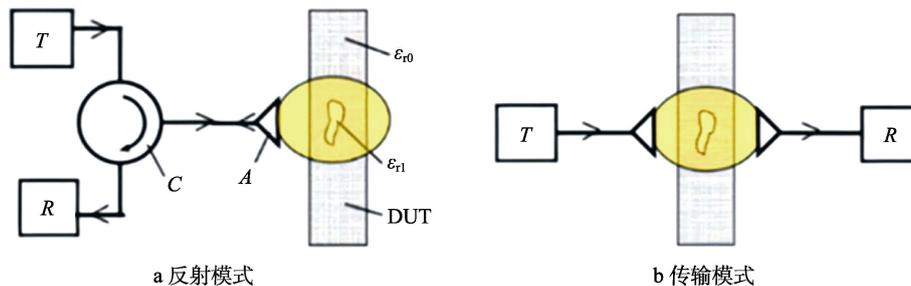


图 7 反射模式和传输模式下的微波测试^[33]
Fig.7 Microwave test in reflection mode and transmission mode^[33]: a) reflection mode; b) transmission mode

4 涂层损伤评价指标

4.1 传统评价指标

在涂层损伤评价方面, 传统指标主要包括有外观评价、厚度评价、微观结构分析、力学性能指标与防护性能指标。外观评价主要包括涂层的颜色变化、光泽度损失、剥落面积等。厚度评价是只通过测量涂层损伤前后的厚度变化, 以评估损伤的程度。微观结构分析则是通过扫描电子显微镜 (SEM)、原子力显微镜 (AFM) 等手段观察涂层的微观结构变化, 如裂纹扩展、孔隙形成等。力学性能指标如硬度、附着力、耐磨性等通过力学性能的变化反映涂层的损伤情况。防护性能指标例如腐蚀电流密度、极化电阻等电化学参数, 用于反映并评价涂层损伤后的防腐性能。研究发现, 涂层厚度、基体材料性能等对涂层损伤后的性能具有重要影响。涂层对划伤速度高的载荷具有更高的抵抗划伤能力, 当涂层厚度越高, 其抗划伤能力越强, 而基体材料性能和基体厚度对涂层抗划伤能力的

表面真空应力, 使其产生体“膨胀”效应, 从而突出复合材料的缺陷^[27]。LS 方法有许多优点, 但也存在一些局限性。首先, 该方法无法检测材料内部的变形和缺陷^[36]。其次, 该方法的信噪比较低, 妨碍了准确评估。

3.2.5 微波检测

微波检测法使用的频率为 300 MHz~300 GHz, 一般高于涡流技术使用的频段^[37]。这些频率范围内的电磁波可以穿透介电材料, 并与其内部结构相互作用^[38]。此外, 在使用这种非电离波时, 额外安全措施的成本也会降低^[39]。

微波检测可以在 2 种模式下进行, 即再探测模式和传输模式。在反射模式下, 微波信号穿过被检测材料。材料的内部结构反射被收集起来, 并根据幅度和/或相位行为进行处理。循环器用作双工器, 使同一探头可用于发射和接收, 如图 7a 所示。另一方面, 传输模式使用一个探头从样品的一侧传输微波信号, 另一个探头从其背面接收信号, 如图 7b 所示。

影响相对较小^[24]。

4.2 涂层损伤理论模型评价

涂层损伤理论模型是用于描述和预测涂层在各种条件下损伤行为的数学或物理模型。通过断裂力学模型、有限元分析模型、多物理场耦合模型等反映涂层损伤后性能指标进而对涂层破损程度做出评价。涂层损伤理论模型可以更好地理解涂层的损伤机制、分析涂层损伤后各方面性能指标, 为涂层材料的优化设计、性能评估和寿命预测等提供理论支持。

4.2.1 断裂力学模型

断裂力学模型是基于连续损伤等力学理论, 分析涂层中的裂纹扩展规律和损伤演化过程, 进而评价涂层破损程度的有效方式。以连续损伤力学 (CDM) 的涂层损伤理论模型为例, 将连续损伤力学引入到涂层抗划伤能力的有限元分析中^[40], 流程如图 8 所示。建立一个基于损伤力学的材料模型, 然后通过有限元软件提供的子接口, 将该材料模型嵌入到求解器中。有限元分析模型通过建立涂层的有限元模型, 模拟涂

层在不同载荷和环境条件下的应力分布和变形情况,预测涂层的损伤行为。该模型不仅可以捕捉涂层的应

力分布,还能预测涂层在载荷作用下裂纹的产生和扩展趋势。

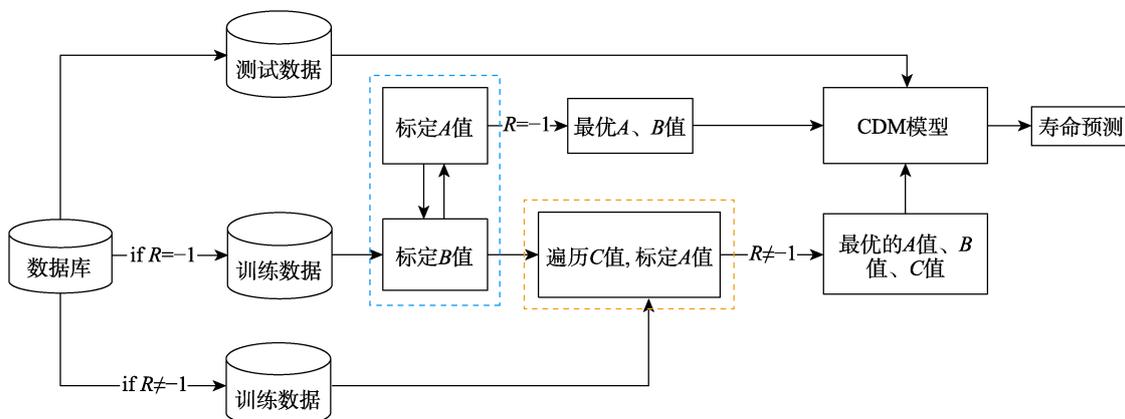


图8 CDM模型流程^[41]

Fig.8 Flowchart of CDM model^[41]

4.2.2 多物理场耦合模型

多物理场耦合模型需要考虑机械、化学、热等多物理场的相互作用,建立涂层损伤的综合模型。不同的涂层损伤理论模型需要针对具体的涂层类型和应用场景进行构建和优化。例如,对于热障涂层,其破坏理论与评价技术是一个重要的研究领域。当涂层长时间处于极端环境下,如高温、高速燃气冲击、旋转离心力、疲劳、蠕变、腐蚀等条件时,相关模型需要考虑氧化反应、热失配与生长应力、高温等因素的相互影响以及涂层的微结构、几何形状等特性给力学性能表征和数值模拟带来的挑战^[42]。以内河码头钢构件防腐涂层冲蚀特性及损伤模型为例,研究人员通过物理模型试验确定冲蚀试验参数,模拟现场钢构件涂层受含沙水流冲蚀的情况,重点研究不同冲角、冲蚀时间、含沙量等条件下与冲蚀量的关系。基于试验结果和现有冲蚀理论,改进防腐涂层冲蚀损伤模型公式,以有效计量涂层的损伤量^[43-44]。

目前,理论模型则多侧重模拟涂层受力和环境作用下的损伤演化。然而,大多涂层损伤检测方法对微小早期损伤检测有限,理论模型与实际情况尚有差距。未来还需改进技术,优化理论模型,以更精准评价涂层损伤。

5 总结与展望

近年来,金属涂层损伤检测与评价技术取得了显著进展,无损检测技术不断创新和完善,检测精度和效率不断提高。同时,多学科交叉的研究方法使得对涂层损伤机制的理解更加深入,理论模型也更加准确和实用。X射线衍射、红外热成像、激光扫描等在涂层损伤检测中得到了应用,这些技术各有优缺点,适用于不同的检测场景和需求。本文总结未来的研究方

向主要包括:开发更加灵敏、高效、便携的检测设备和技术,如等离子体增强磁控溅射(PEMS)、改进后的PECDVD技术等,为制备高性能涂层提供了新途径;进一步完善涂层损伤评价指标体系,提高评价的准确性和全面性;随着人工智能、大数据等技术的不断发展,涂层损伤检测技术将向智能化方向发展。通过引入机器学习算法,实现检测数据的自动分析和处理,提高检测效率和准确性。深入研究涂层损伤的多物理场耦合机制,建立更加精确的理论模型;加强涂层损伤的在线监测和实时诊断技术的研究,实现涂层性能的智能化管理。涂层损伤检测与评价是保障涂层可靠性和安全性的重要手段。随着科技的不断进步,各种检测技术和评价方法不断涌现和发展。未来,需要进一步加强研究,综合运用多种技术手段,实现对涂层损伤的准确检测和全面评价,为涂层的设计、制造和使用提供有力的支持。

参考文献:

- [1] SHAH K, PINKERTON A J, SALMAN A, et al. Effects of Melt Pool Variables and Process Parameters in Laser Direct Metal Deposition of Aerospace Alloys[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25(12): 1372-1380.
- [2] 王飞, 张超, 周隐玉, 等. 表面涂层技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(10): 21-24.
WANG F, ZHANG C, ZHOU Y Y, et al. Research Status of Surface Coating Technology[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(10): 21-24.
- [3] 杨红艳, 张瑞谦, 彭小明, 等. 铝合金包壳表面涂层研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 69-77.
YANG H Y, ZHANG R Q, PENG X M, et al. Research Progress Regarding Surface Coating of Zirconium Alloy Cladding[J]. Surface Technology, 2017, 46(1): 69-77.

- [4] 梁海峰. 飞机表面涂层重新喷涂的工艺与实施[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(22): 1183-1187.
LIANG H F. Process for Repainting External Surface of Aircraft and Its Implementation[J]. Electroplating & Finishing, 2016, 35(22): 1183-1187.
- [5] WU Y H, WEI J M, SHI X L, et al. Achieving Anti-Corrosion and Anti-Biofouling Dual-Function Self-Healing Coating by Natural Carrier Attapulgite Loading with 2-Undecylimidazoline[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 148: 222-234.
- [6] QIANG Y J, RAN B Y, LI M J, et al. GO-Functionalized MXene towards Superior Anti-Corrosion Coating[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 642: 595-603.
- [7] YU S F, YANG Y W, MA L M, et al. SiC Nanowires Enhanced Graphene Composite Coatings with Excellent Tribological and Anticorrosive Properties[J]. Tribology International, 2023, 188: 108894.
- [8] 杲广尧, 曹凤婷, 高雅, 等. 金属表面有机防腐涂层研究进展[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(2): 251-264.
GAO G Y, CAO F T, GAO Y, et al. Research Progress of Organic Anti-Corrosive Coatings on Metal Components[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(2): 251-264.
- [9] MA Y Q, HUANG H W, ZHOU H D, et al. Superior Anti-Corrosion and Self-Healing Bi-Functional Polymer Composite Coatings with Polydopamine Modified Mesoporous Silica/Graphene Oxide[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 95: 95-104.
- [10] 于芳, 王翔, 张昭. 纳米填料在环氧防腐涂层中的应用研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(2): 220-230.
YU F, WANG X, ZHANG Z. Research Progress of Nanofillers for Epoxy Anti-Corrosion Coatings[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(2): 220-230.
- [11] 徐朝阳, 余红伟, 陆刚, 等. 微胶囊的制备方法及应用进展[J]. 弹性体, 2019, 29(4): 78-82.
XU C Y, YU H W, LU G, et al. Preparation and Application of Microcapsules[J]. China Elastomerics, 2019, 29(4): 78-82.
- [12] CHEN Y X, ZHANG G L, ZHANG G Z, et al. Rapid Curing and Self-Stratifying Lacquer Coating with Anti-fouling and Anticorrosive Properties[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 421: 129755.
- [13] GU J T, ZHENG M R, ZHU T X, et al. Electrostatic-Modulated Interfacial Crosslinking and Waterborne Emulsion Coating Toward Waterproof, Breathable, and Antifouling Fibrous Membranes[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 454: 140439.
- [14] LIU N N, WAN B L, ZHANG Z, et al. Self-Healing Waterborne Polyurethane Coatings with High Transparency and Haze *via* Cellulose Nanocrystal Stabilized Linseed Oil Pickering Emulsion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 235: 123830.
- [15] 罗平. 点焊电极表面电火花原位沉积 ZrB₂-TiB₂ 复相涂层及涂层缺陷控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
LUO P. In Situ Deposition of ZrB₂-TiB₂ Composite Coatings on Spot Welding Electrode Surface by EDM and Control of Coating Defects[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [16] 刘贵仲, 钟文华, 高原. 激光熔覆涂层缺陷的形成及防治[J]. 表面技术, 2012, 41(5): 89-92.
LIU G Z, ZHONG W H, GAO Y. Formation and Resolving Method of the Structure Defect about Laser Cladding Coatings[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 89-92.
- [17] YONG L, CHEN Z M, MAO Y, et al. Quantitative Evaluation of Thermal Barrier Coating Based on Eddy Current Technique[J]. NDT & E International, 2012, 50: 29-35.
- [18] GUPTA M, KHAN M. Advances in Applications of Non-Destructive Testing (NDT): A Review[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2021, 8: 2286-2307.
- [19] LI S, SHI K, YANG K, et al. Research on the Defect Types Judgment in Wind Turbine Blades using Ultrasonic NDT[C]// Proceedings of the Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM 2015), Beijing: [s. n.], 2015.
- [20] TOWSYFYAN H, BIGURI A, BOARDMAN R, et al. Successes and Challenges in Non-Destructive Testing of Aircraft Composite Structures[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 771-791.
- [21] 李冰. 临海管道涂层损伤检测技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
LI B. Research on Coating Damage Detection Technology for Offshore Pipelines[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [22] BENEDICT Z, DAYAL V. Progress Towards the Development of a Compact Calibration Set for Quantitative NDE Inspection of Aerospace Composites[C]// Proceedings of Composites and Advanced Materials Expo. [s.l.]: The American Society for Nondestructive Testing, 2016.
- [23] SHARATH D, MENAKA M, VENKATRAMAN B. Comparison of Pulse and Lock-In Thermography Techniques for Debond Detection in Ni-B Coatings[J]. Mater Eval, 2019, 77: 1450-1462.
- [24] LINKE M, CHAKRABORTY S, GÖBEL H, et al. On the Accuracy of Monitoring Inter-Fibre Fractures in Composites Using Passive Infrared Thermography Extended by Microscopic Analysis[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2021, 36(6): 654-666.
- [25] RAMZAN B, MALIK M S, MARTARELLI M, et al. Pixel Frequency Based Railroad Surface Flaw Detection Using Active Infrared Thermography for Structural Health Monitoring[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 27: 101234.

- [26] THEODORAKEAS P, CHEILAKOU E, FTIKOU E, et al. Passive and Active Infrared Thermography: An Overview of Applications for the Inspection of Mosaic Structures[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, 655: 012061.
- [27] GRYZAGORIDIS J, FINDEIS D, VUKEYA N B. Vacuum Excitation in Shearographic NDT[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2007, 49(2): 98-101.
- [28] BOSSI R H, et al. Nondestructive Testing of Composites[J]. *NDT World*, 2019: 44-51.
- [29] ALHAMMAD M, AVDELIDIS N P, DEANE S, et al. Diagnosis of Composite Materials in Aircraft Applications: Towards a UAV-based Active Thermography Inspection Approach[C]// *Proceedings of the Thermosense Thermal Infrared Applications XLIII 11743*. [s.l.]: National Research Council Canada, 2021.
- [30] FIERRO G P M, CALLA D, GINZBURG D, et al. Nonlinear Ultrasonic Stimulated Thermography for Damage Assessment in Isotropic Fatigued Structures[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 404: 102-115.
- [31] HAIGLER T. Introduction of NDT Methods and Techniques in Power Plants[J]. *Materials Evaluation*, 2020, 78(10): 1094-1102.
- [32] AOUF A, BOUCHALA T, ABDOU A, et al. Eddy Current Probe Configuration for Full Rail Top Surface Inspection[J]. *Instrumentation MeasureMétrologie*, 2021, 20(2): 65-72.
- [33] XIE S J, TIAN M M, XIAO P, et al. A Hybrid Nondestructive Testing Method of Pulsed Eddy Current Testing and Electromagnetic Acoustic Transducer Techniques for Simultaneous Surface and Volumetric Defects Inspection[J]. *NDT & E International*, 2017, 86: 153-163.
- [34] DUCHARNE B. *Barkhausen Noise for Non-Destructive Testing and Materials Characterization in Low Carbon Steels*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020: 223-238.
- [35] LI Z, MENG Z Z. A Review of the Radio Frequency Non-Destructive Testing for Carbon-Fibre Composites[J]. *Measurement Science Review*, 2016, 16(2): 68-76.
- [36] SHE S B, CHEN Y F, HE Y Z, et al. Optimal Design of Remote Field Eddy Current Testing Probe for Ferromagnetic Pipeline Inspection[J]. *Measurement*, 2021, 168: 108306.
- [37] CASE J T, KENDERIAN S. MW NDT: An Inspection Method[J]. *Mater Eval*, 2017, 75: 338-346.
- [38] SHRIFAN N H M M, AKBAR M F, ISA N A M. Prospect of Using Artificial Intelligence for Microwave Nondestructive Testing Technique: A Review[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 110628-110650.
- [39] HINKEN JH. Microwave Testing: An Overview[J]. *Non-destruct Test*, 2016, 8: 1-7.
- [40] 庄蔚敏, 王鹏跃, 解东旋, 等. 基于连续损伤力学的铝车身涂层抗划伤能力[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49(3): 829-835.
- [41] 王谔斌, 甘磊, 淦志强, 等. 数据与连续损伤力学双驱动的增材疲劳寿命预测模型[J]. *固体力学学报*, 2024, 45(4): 427-440.
- [42] 周益春, 杨丽, 朱旺. *热障涂层破坏理论与评价技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [43] 刘明维, 曾丽琴, 余杰, 等. 内河码头钢构件防腐涂层冲蚀特性及损伤模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(10): 115-122.
- [44] 聂晋峰, 金绪良, 殷爱鸣, 等. 海上升压站涂层老化在线监测系统的设计研究[J]. *材料保护*, 2023, 56(8): 177-183.
- ZHUANG W M, WANG P Y, XIE D X, et al. Scratch Resistance of Aluminum Automotive Coatings Based on Continuum Damage Mechanics[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(3): 829-835.
- WANG A B, GAN L, GAN Z Q, et al. Data-Driven and Continuum Damage Mechanics-Based Approach for Predicting Fatigue Life in Additive Manufacturing[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2024, 45(4): 427-440.
- ZHOU Y C, YANG L, ZHU W. *Thermal Barrier Coating Damage Theory and Evaluation Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- LIU M W, ZENG L Q, YU J, et al. Erosion Characteristics and Damage Model of Anti-Corrosion Coating on Steel-Structure in Inland River Wharf[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(10): 115-122.
- NIE J F, JIN X L, YIN A M, et al. Design of Online Monitoring System of Coating Degradation for Offshore Booster Station[J]. *Materials Protection*, 2023, 56(8): 177-183.