

C_f /Al 复合材料无损检测 与质量评价初探

Research on the Non-Destructive Testing and Quality
Evaluation of C_f /Al Composites

哈尔滨工业大学金属复合材料与工程研究所

武高辉 苏 军 苟华松



武高辉

哈尔滨工业大学教授, 博士生导师。自 1981 年涉足金属基复合材料研究, 长期开展金属复合材料设计及其制备与成型一体化技术, 已经开发各种功能型、结构型以及智能型等复合材料 10 余种, 其中 4 种复合材料已经付诸实际应用, 申请国家发明专利 42 项, 授权 24 项。

碳纤维增强铝基(C_f /Al) 复合材料以其高的比强度、比刚度、低的热膨胀系数及高热导率等优点, 已在航空航天领域显示出巨大的应用潜力。随着对 C_f /Al 复合材料应用研究的深入, 其产品缺陷检测及质量评估已成为不可缺少的基础保障。纤维增强金属基复合材料在制备和加工过 C_f /Al 复合材料无损检测与质量评价

通过对 C_f /Al 复合材料进行 X 射线照相和超声波检测研究, 实现对复合材料中的体积型缺陷 (缩孔、疏松和气孔, 纤维排布不均) 和面积型缺陷 (分层、纤维或集体聚集及垂直超声波声束方向裂纹) 的检测, 并逐步建立了缺陷检测和评价的暂行标准。

初探程中, 会产生诸如分层、孔洞、纤维非均匀排布等缺陷。某些缺陷严重地影响构件的力学性能和整体完整性; 另一方面, 金属基复合材料结构要承受冲击、碰撞和疲劳等应力作用; 在恶劣环境条件下, 复合材料会受到酸、碱、潮等因素腐蚀作用, 使材料产生如分层、裂纹和纤维断裂等缺陷, 致使复合材料结构性能下降, 严重影响材料的强度, 甚至导致严重的事故发生。因此需要对材料进行无损检测以确保其质量, 开发验收标准及预测材料服役寿命。无损检测技术在金属、塑料等均质材料上的应用比较成熟, 国内外对树脂基、陶瓷基以及短纤维、晶须和颗粒增强金属基复合材料的无损检测和质量控制有了一定的研究, 形成了部分检测和验收标准; 但是, 目前国内还没有 C_f /Al 复合材料无损检测研究的相关报道, 也没有相应的无损检测规范和质量评价标准。本文分析了复合材料中

常用的无损检测方法, 介绍了作者的研究团队在 C_f /Al 复合材料无损检测及质量评价方面的研究成果。

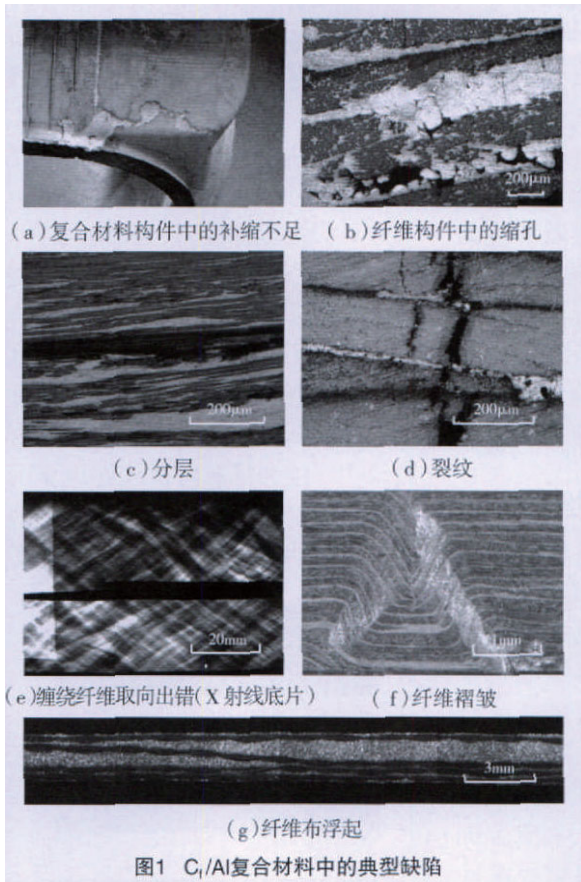
C_f /Al 复合材料中的缺陷

由于制备工艺和复合材料结构的复杂性, 复合材料在铸造和服役过程中会产生比常规材料更多的缺陷, 金属中的缺陷以裂纹、孔隙(气孔、缩孔、疏松等)和夹杂为主, 而在金属基复合材料中, 除了这些缺陷外, 还会出现分层、纤维断裂、纤维排布不均匀、基体聚集等缺陷, 纤维增强树脂基复合材料与纤维增强铝基复合材料中的主要缺陷类型对比如表 1 所示。

哈工大长期开展对金属基复合材料的相关研究, 经过长期积累, 发现采用挤压浸渗法制备的 C_f /Al 复合材料中可能存在以下缺陷。

(1) 缩孔、疏松和气孔类缺陷。

缩孔、疏松和气孔类缺陷是 C_f /



A1 复合材料中常见的铸造缺陷,在排气不畅、补缩不足时可能会出现。尤其是在制备大的复合材料构件时,这种缺陷比较明显,如图 1 (a) 为制备构件时出现的补缩不足,而图 1 (b) 是出现的缩孔缺陷。

(2) 分层、裂纹类缺陷。

C_f/Al 复合材料的裂纹主要存在于纤维和基体的界面上,铝基体富集的区域很少出现裂纹缺陷。这是由于纤维和铝的热膨胀系数的差异以及界面反应产生在铸造和服役过程中容易形成的脆性相,这种裂纹的发展最后就会形成分层,如图 1 (c) 所示。对于复杂的复合材料构件,由于内部较大的内应力,如不能消除,会在应力集中处出现横层裂纹,如图 1 (d) 所示,纤维出现断裂。

(3) 纤维排布不均匀和纤维损伤。

纤维布 C_f/Al 复合材料在渗铝过程中,部分纤维布可能浮起,如图 1 (g) 所示,从而在最后凝固的材料

中纤维分布并不均匀,同时 C_f/Al 复合材料中可能存在纤维在平面排布不均匀,在缠绕中可能出现纤维取向或铺层顺序偏离出错等,如图 1 (e); 纤维在缠绕过程中出现堆积或褶皱,造成纤维损伤,如图 1 (f)。

复合材料无损检测方法研究现状

目前,对于复合材料的无损检测常采用的射线、超声、声发射、声-超声、热成像、涡流、渗透法等,都是针对纤维增强树脂基复合材料的,美国军用标准将射线、超声、声发射以及热成像检测作为纤维增强树脂基复合材料的主要检测手段,而与树脂基复合材料具有相同结构的纤维增强金属基复合材料的无损检测与评价方法在国内还没有相关的研究报道。因此,伴随着纤维增强金属基复合材料的广泛应用,其无损检测与评价方法的建立显得尤为重要。

1 超声波检测方法

超声检测法是广泛用于材料损伤的方法,也是最早用于复合材料无损检测的方法之一。它主要利用复合材料本身或其他缺陷的声学性质对超声波传播的影响来检测材料内部和表面的缺陷,如孔隙、分层、裂纹、脱粘、贫胶等,在纤维增强树脂基复合材料中使用非常广泛。超声探伤具有灵敏度高、穿透性强、检测速度快、成本低和对人体无害等特点。超声波检测法评价复合材料整体性,包括脉冲回波法、穿透法和兰姆波法等。这些方法对于检测和评价复合材料的可靠性和灵敏度是众所周知的。扫描自动化系统和超声信号分

析软件的开发可以获取可重复的 C 扫描图像,显示出非常小的缺陷并可在任意深度进行缺陷定位。

超声衰减是非常重要的指标,通过将超声的衰减同材料的特征建立联系,可以得到材料结构和缺陷的相关信息。如对纤维增强树脂基复合材料超声幅度 C 扫描,可以建立与材料分层、表面不规则、内部损伤、基体分布不均匀、孔隙含量等的联系。

2 X 射线照相法

X 射线照相检测 (Radiography) 是最传统的无损检测方法之一,也是一种得到很好认可与评价,并在工业领域得到广泛应用的检测方法。其原理是根据射线穿过不同材料时衰减量的不同引起透射射线强度的变化,而在胶片上呈现明暗不同的影像,从而检测出被测物体中存在的缺陷。

Grumman 公司在树脂基复合材料中用易蒸发的有机溶剂协助 X 射线法检测加工后材料边缘及加工的钻孔; 美国军用标准对树脂基复合材料的射线检测方法建议在材料制备时加入一根高密度示踪纤维,检测纤维取向; 用有机溶剂渗入检测

表1 两类纤维增强复合材料中的主要缺陷对比

缺陷类型	树脂基复合材料	金属基复合材料
孔隙 / 缩孔	主要	主要
分层	主要	有
疏松	有	主要
纤维基体比值不当或分布不均匀	主要	有
界面分离	主要	少
越层断裂	少	少
夹杂	少	少
微裂纹	少	有
纤维不平直	少	有
纤维取向或铺层顺序	少	少
同层无纤维,端头搭接不良、重叠、或空缺	少	少

区域,增强缺陷的检测效果等。美国McClellan空军基地的萨克拉门托无损检测中心,对型号为HarrierAV-8B的水平尾翼进行了无损检测,利用无损检测的数据和刚度及强度的衰退模型预测出材料的剩余寿命。Harrier AV-8B的结构中大量采用了树脂基复合材料,占总结构的25%,覆盖面积达到50%,因此将X射线照相法和超声检测法作为水平尾翼进行检测的重要手段。

树脂复合材料由于基体和纤维的原子序数小,且差异不大,通常会采用增强剂来增加缺陷的对比度,且采用软X射线。与树脂基复合材料不同,金属的原子序数大(AI的原子序数是13),与碳纤维的原子序数(C的原子序数为6)差异大,纤维对X射线的吸收小,在影像特征上黑度大,采用常规的X射线检测设备就可以对金属基复合材料中的缩孔、疏松和气泡等体积型缺陷进行检测,灵敏度高。

3 其他检测方法

声发射法能对加载过程中缺陷的萌生与扩展进行监控,但检测过程中需要对材料进行加载,不能对缺陷的大小和位置等进行直接测量;热波成像法能对复合材料中的脱粘、分层、裂纹和夹杂等进行检测,并且设备简单,操作方便,但其要求工件传热性能好、表面的发射率高,对材料的限制较大,对于厚度较大的工件检测效果不好;声-超声法能对结构整体性进行评估,但对单个、分散缺陷不敏感,易造成漏检;微波检测法对较大的缺陷灵敏度高,但对于较小的缺陷检测灵敏度低;涡流法只适合于导电材料,属于近表面缺陷探测方法,对较厚工件内部缺陷无法检测。

综上所述,与树脂中常出现的缺陷不同,金属在铸造过程中可能出现的缩孔、疏松、气泡、裂纹类缺陷在我们制备的复合材料中也可能出现,而由于与纤维增强树脂基复合材料具

有相同的结构,所以在结构上存在的缺陷与树脂基复合材料有很多相同的地方,如纤维的排布情况、基体分布不均匀、分层等。因此,在对纤维增强金属基复合材料的无损检测方法上除了要大量借鉴树脂基的检测方法外,对类似金属中容易出现缺陷也需要进行研究。综合各种无损检测方法各自的优缺点,比较适合用X射线照相法和超声波检测方法对C_f/Al复合材料进行无损检测。

C_f/Al 复合材料无损检测研究

作者的研究团队采用X射线照相方法对C_f/Al复合材料中的铸造缺陷(如气孔、缩孔和疏松等缺陷)进行检测。由于碳的射线衰减系数比铝小,有纤维存在的区域透过的射线必然多,底片黑度大,所以底片上可以显示碳纤维的编织纹路和较大范围内的密度的变化等,如图2所示。但是底片上反映的是射线透过试件后的总透射量差异,所以影像表征的是射线透照方向上材料排布的综合效果。该方法对缩孔疏松等缺陷也能有较高的检测灵敏度,如图3所示。通过研究建立了暂行的C_f/Al复合材料的X射线检测方法和规程。

作者的研究团队还开展对C_f/Al复合材料的超声波检测研究,铝聚集层和分层的超声波信号如图4所示。图5是含有铝聚集层和分层2种缺陷试件的尺寸和分布以及对缺陷信号进行的常规幅度C扫描成像,缺陷贯通整个试件,位于试件的中部。可以看出,2种缺陷均可通过常规C扫

描检测出来,但它们的C扫描图像的对比度不明显,不易对缺陷进行识别分类。

作者对缺陷信号进行Chirplet分解,图6是试件的缺陷信号Chirplet参数C扫描成像序列,包括幅度、埋深、中心频率和相位C扫描图像。图6中幅度C扫描提高C扫描图像的对比度;而通过埋深C扫描图像,得到缺陷在深度方向上的分布;通过中心频率C扫描图像将分层部分的图像中纤维的排布特征较好地显示出来。铝聚集层和分层在相位上的差异非常明显,而且同一种缺陷,其

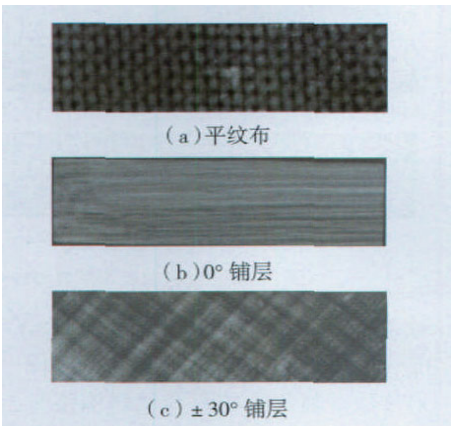


图2 C_f/Al复合材料试样的X射线检测底片

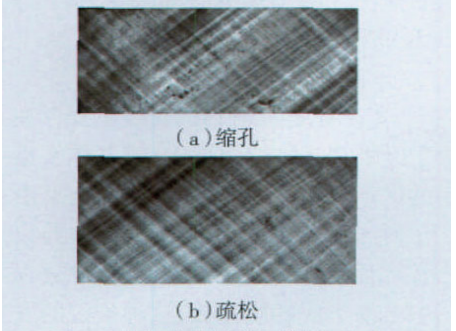


图3 C_f/A复合材料试样中的缺陷

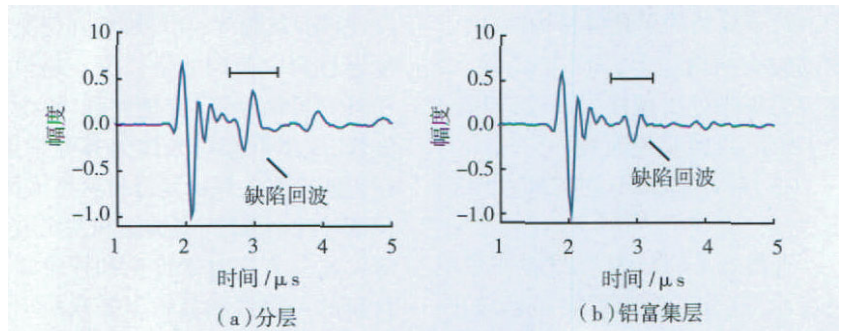


图4 C_f/Al复合材料试样中缺陷的超声信号(闸门内)

值基本不变,对缺陷类型保持较好的依赖性,可以作为评判缺陷类型的依据。因此,通过Chirplet 参数C扫描序列,能更加全面地对缺陷进行识别和分类,实现对缺陷的评价。

通过对 $C_f/A1$ 复合材料进行X射线照相和超声波检测研究,实现对复合材料中的体积型缺陷(缩孔、疏松和气泡,纤维排布不均)和面积型缺陷(分层、纤维或集体聚集及垂直超声波声束方向裂纹)的检测,并逐步建立了缺陷检测和评价的暂行标准。

$C_f/A1$ 复合材料质量评价

采用超声C扫描检测方法成功的检测出 $C_f/A1$ 复合材料的铝聚集层和纤维褶皱,对含有铝层聚集和纤维褶皱的 $C_f/A1$ 复合材料试样进行力学性能测试,铝聚集层使试样的抗弯强度降低16.4%,模量变化不大。说明铝层的聚集对单向 $C_f/A1$ 复合材料性能的影响不大,不必将其归为严重缺陷。而对于含有纤维褶皱的试样,如果其弯曲强度下降了53.4%,模量下降了30.9%,存在这种缺陷的复合材料则必须判废。

由以上分析可知,复合材料中纤维的损伤将极大地降低复合材料的力学性能,如纤维褶皱的存在;而基体中存在的基体层聚集虽然同样会使材料性能降低,但影响较小。在采用超声波进行检测的过程中,两种缺陷都能通过超声波方法检测出来。通过超声检测,能够识别不同的缺陷,通过建立缺陷类型与复合材料性能之间的关系,可以有效地通过超声检测结果整体评价复合材料的质量。同时也发现,缺陷对复合材料性能的影响是比较复杂的,影响因素是多方面的,这方面的研究还需要在今后进一步开展。

结束语

综上所述,X射线和超声波检测两种方法相互补充,可以作为对 $C_f/A1$

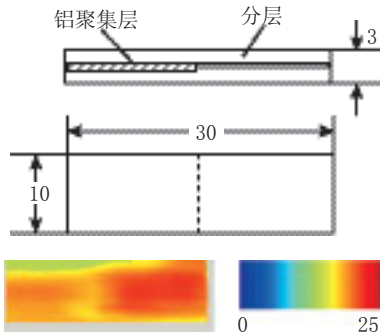


图5 缺陷分布及其常规幅度c扫描图像

$A1$ 复合材料进行缺陷无损检测重要手段。两者的结合将全面控制复合材料中的缩孔、疏松和气泡等体积型缺陷,以及分层、裂纹等面积型缺陷,同时还能检测出纤维排布不均、纤维褶皱等缺陷。随着 $C_f/A1$ 复合材料

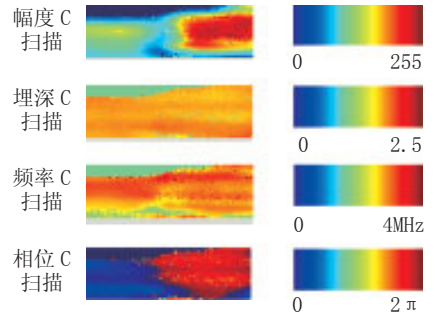
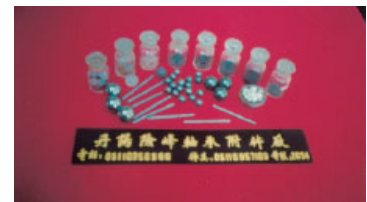


图6 Chirplet参数C扫描(幅度、埋深、中心频率、相位)

应用范围不断扩展,迫切需要建立 $C_f/A1$ 复合材料的无损检测标准。通过对缺陷的无损检测方法和对材料性能的影响规律研究,最终建立 $C_f/A1$ 复合材料的无损检测标准和质量评价标准。(责编 侧卫)

“DXF”丹阳险峰轴承附件厂

系中国轴承工业协会,基础件成套技术公司联营会成员单位、专业生产各种仪器仪表的工厂,有硬质合金测头、测片、圆棒(球)(环)、套,各种硬质合金刀具刀片,挤孔球、砂轮接杆,镶硬质合金条无心磨床托板(从M1010至M10400),球(从 $\Phi 0.8\text{mm}$ 至 $\Phi 75\text{mm}$)特别新开发的DJK-150型电解刻印机,深受广大用户的青睐。



▲ DJK-150型“百灵”牌电解刻印机的技术规格

- 刻印直径: 15 ~ 150mm
- 电 源: 220V,50Hz
- 刻印高度: >4mm 功耗: <40W
- 刻印深度: 5-15mm 净重: 10kg
- 刻印效率: 60件/min(双槽型)
- 膜片寿命: 约10万件/片
- 电解液消耗: 约1.2kg/万件
- 外形尺寸: 320mm × 280mm × 100mm(刻印电源)
- 300mm × 420mm × 80mm(刻印槽)
- 不但在平面上而且在外径上也可使用

本厂生产的硬质合金钢球,于1999年4月28日和2000年7月6日经国家轴承质量鉴定检测中心测定,分别达到G16(8~14mm)、G10($\phi 3 \sim \phi 7.5\text{mm}$),深受用户青睐。

通讯地址: 江苏省丹阳市新桥镇何家村15号
电话: 0511-86356866 86352019
传真: 0511-86357163
手机: 13952839756

邮编: 212322
网址: WWW.XFDJKQ.COM
电子邮箱: Xqzhff@pub.zj.jsinfo.net

广告索引号 10-057