



中华人民共和国国家标准

GB/T 42870—2023/ISO 18249:2015

无损检测 纤维增强聚合物的声发射 检测方法和评价准则

Non-destructive testing—Specific methodology and general evaluation criteria
for acoustic emission testing of fibre-reinforced polymers

(ISO 18249:2015, Non-destructive testing—Acoustic emission testing—
Specific methodology and general evaluation criteria for testing of
fibre-reinforced polymers, IDT)

2023-08-06 发布

2023-08-06 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 人员资格 2

5 声发射源和声特性 2

6 仪器和监测原则 5

7 检测方法 6

8 声发射检测结果/源机理的分析与解释 12

9 检测报告 12

参考文献 14

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。

本文件等同采用 ISO 18249:2015《无损检测 声发射检测 纤维增强聚合物的检测方法和评价准则》。

本文件做了下列最小限度的编辑性改动：

——为与现有标准协调，将标准名称改为《无损检测 纤维增强聚合物的声发射检测方法和评价准则》；

——增加了“注 2：Hsu-Nielsen 源是指铅笔芯断裂产生的声发射源”（见 5.2）。

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。

本文件由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、上海材料研究所有限公司、安徽华工智能科技研究院有限公司、航天材料及工艺研究所、河北大学、北京科海恒生科技有限公司、清诚声发射研究(广州)有限公司、山东科捷工程检测有限公司、河南启兴格电子科技有限公司。

本文件主要起草人：张君娇、苑一琳、沈永娜、沈功田、丁杰、张鹏飞、刘然、刘哲军、薄柯、吴占稳、胡斌、骆辉、周伟、陈谋财、刘时风、李寰、梁玉梅、沈克兴。

无损检测 纤维增强聚合物的声发射 检测方法和评价准则

1 范围

本文件描述了纤维增强聚合物材料(FRP)部件和结构的声发射检测的一般原则,用于 FRP 的材料性能表征和验证试验、部件和结构的制造质量控制和服役性能在线检测以及健康监测等。

本文件描述了采用声发射技术评估纤维增强聚合物部件或结构的完整性,或识别加载过程中严重累积损伤或损伤加剧主要区域的具体方法。

本文件描述了通用的 FRP 声发射检测评价准则,并给出了建立评价准则的程序。

本文件提供了用于在线检测和事后分析中声发射测试数据的定性评价准则格式,给不同测试地点和测试机构获得的声发射测试结果进行简化比对带来方便。

注:基于声发射的结构完整性评价不能仅根据本文给出的评价准则进行评估,很多情况下还需要进一步的测试和评估(例如使用其他无损检测方法或断裂力学计算等)。

2 规范性引用文件

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。

ISO 9712 无损检测 人员资格鉴定与认证(Non-destructive testing—Qualification and certification of NDT personnel)

注:GB/T 9445—2015 无损检测 人员资格鉴定与认证(ISO 9712:2012, IDT)

ISO 12716:2001 无损检测 声发射检测 词汇(Non-destructive testing—Acoustic emission inspection—Vocabulary)

注:GB/T 12604.4—2005 无损检测 术语 声发射检测(ISO 12716:2001, IDT)

EN 13477-1 无损检测 声发射 设备特性 第 1 部分:设备描述(Non-destructive testing—Acoustic emission—Equipment characterisation—Part 1:Equipment description)

EN 13477-2 无损检测 声发射 设备特性 第 2 部分:操作特性验证(Non-destructive testing—Acoustic emission—Equipment characterisation—Part 2:Verification of operating characteristic)

EN 14584 无损检测 声发射 金属承压设备验证试验中的检验 声发射源的平面定位(Non-destructive testing—Acoustic emission—Examination of metallic pressure equipment during proof testing—Planar location of AE sources)

EN 15495 无损检测 声发射 金属承压设备验证试验中的检验 声发射源的区域定位(Non-destructive testing—Acoustic emission—Examination of metallic pressure equipment during proof testing—Zone location of AE sources)

3 术语和定义

ISO 12716:2001 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

纤维 fibre

细长的固体材料。

注：典型的纤维长径比不小于 5 且拉伸模量不小于 20 GPa。常见的连续(丝状)纤维或不连续短纤维包括玻璃纤维、碳纤维或酰胺类纤维。

3.2

聚合物基体 polymer matrix

包裹纤维的大分子物质。

注：聚合物基体通常是热固性材料(例如环氧树脂, 乙烯基酯聚酰亚胺或聚酯)或高性能热塑性塑料[例如聚(酰胺酰亚胺)、聚(醚醚酮)或聚酰亚胺]。聚合物基体的机械性能受温度、时间、老化和环境的影响显著。

3.3

纤维层压板 fibre laminate

由不少于两层(每层均由相同取向的同一材料构成)的纤维增强聚合物组成的二维结构单元。

注：纤维层压板在密封的环境下通过加热和/或加压的方式压实。层压板是由平面状或弯曲状的聚合物基体单向纤维或编织纤维层不断堆叠而成的。各层能具有不同厚度, 并由相同或不同的纤维和聚合物基体材料组成, 层与层的纤维取向也能不同。

3.4

纤维增强聚合物材料 fibre-reinforced polymer material; FRP

相对于某些参考方向具有一个或多个纤维取向的聚合物基体复合材料。

注：FRP 通常是指连续纤维层压板。连续纤维的典型结构包括单向、正交、斜交和编织织物。但 FRP 也由不连续纤维制成, 例如短纤维、长纤维或随机条状、片状、块状的增强相。

3.5

分层 delamination

在不同加载模式下复合材料的层内或者层间断裂(裂纹)。

注：在诸如静载、重复循环载荷(疲劳)或冲击载荷下, 分层主要发生在层压板上粘接最弱或者应力最集中的纤维层之间。分层造成大量微观损伤产生的同时带来裂纹面摩擦等次级效应。分层在复合材料内部发展, 尽管从表面上不易察觉, 但通常与材料刚度和强度等机械性能的显著下降相关。

3.6

(复合材料)微观损伤 micro-fracture (of composites)

在微观层面上发生的如基体失效(小裂纹, 开裂), 纤维/基体界面失效(脱粘)或纤维拔出, 以及纤维失效(断裂, 屈曲)之类的局部失效机制。

注：微观损伤是由复合材料的局部过载引起的。多个微观损伤的累积导致宏观破坏, 也由此确定极限强度和寿命。

4 人员资格

按本文件实施检测的人员, 宜按照 ISO 9712 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其进行岗位培训和操作授权。

5 声发射源和声特性

5.1 声发射源机制

微观和宏观断裂机制导致的 FRP 损伤产生高活度和高强度的声发射信号, 因此适用于声发射检测(AT)。

声发射检测到的常见 FRP 损伤机制包括以下方面:

- 基体开裂；
- 纤维/基体界面脱粘；
- 纤维拔出；
- 纤维断裂；
- 层内或层间裂纹扩展(分层/劈裂)。

来自于FRP产生的声发射结果取决于多种因素,如材料成分、层压板铺层工艺、制造工艺、不连续性、外加载荷、几何形状和环境检测条件(温度、湿度、液体或气体介质或紫外线辐射)。对给定条件下声发射现象的解释应注意这些影响因素,并具备已知应力条件下对特定材料和结构进行声发射检测的经验。

FRP在断裂时产生具有很高活度的突发型声发射;然而很可能表现为连续型声发射。

对于某些类型的结构,在给定条件下出现分布广泛的基体或界面微观断裂声发射源属于正常现象。这尤其在新制造的FRP结构的第一次加载试验期间出现,当检测过程中首次出现显著声发射现象时,其对应的综合应变在0.1%~0.3%之间。

高刚度优化的复合材料由于基体应变低,可在相对较高的应力下产生第一次显著的声发射。

对于高强度复合材料,通常在材料极限强度的40%~60%的应力水平下,除去其他声发射源外,首次观察到显著区别于其他声发射源的纤维断裂声发射。

FRP结构的一种正常声发射现象还表现为在不同区域声发射活度高低交替变化,这是由于局部应力重新分布而导致更高应力水平不断集中变化而产生的。

材料中的严重不连续或其他严重应力集中是FRP结构失效的一种主要影响因素,这些结构局部也正是声发射活度的集中部位。

相反,由于测试而保持不受应力集中影响的局部区域中的不连续以及在非重要结构的不连续将不产生异常声发射。

5.2 波的传播和衰减特性

在大型结构中传播的声发射波受频散和衰减效应的影响。

聚合物基体复合材料是一种不均匀的各向异性材料,在许多应用场合,多被设计为薄板或壳体结构。薄板或壳体中的声波主要以板波模态(如兰姆波)进行传播。纤维的体积和排列方向导致了材料的各向异性,这也导致板波的速度、衰减和大频散均具有一定的方向性。

声波在FRP中的传播,其振幅和频率随距离变化显著,变化程度将取决于传播方向、材料特性、厚度和测试对象的几何形状。

对测试对象的典型区域进行衰减特性测量,应符合EN 14584中的规定。

应量化喷嘴和辅助附件的遮蔽效应,并应通过试验测试流体介质对传导的影响。

衰减特性应在不同的方向上测量,特别是平行和垂直于纤维主要取向的方向。对于有部分填充的测试对象,应在液面上方和下方分别测量衰减。

对于FRP层压结构,波传播500 mm左右的距离,突发信号峰值幅度衰减可能在20 dB~50 dB的范围内。垂直于纤维方向的衰减通常相比平行方向高得多。

注1:来自Hsu-Nielsen源的峰值振幅能随着FRP材料在结构的不同区域中的特定粘弹性特性而变化。

注2:Hsu-Nielsen源是指铅笔芯断裂产生的声发射源。

5.3 检测温度

如果试验温度接近基体的转变温度范围,如韧性—脆性转变(半结晶基体的 β -弛豫)或玻璃—橡胶转变(无定形基体的 α -弛豫),则FRP结构的机械特性(刚度、强度)和声学特性(波速、衰减)以及声发射活度和声发射波的特性(波形、频谱)将发生极大变化。

声发射检测结果的数据评价和解释应注意加载过程检测温度的变化。

5.4 源定位

对 FRP 结构中的声发射源精确定位很难。复合材料衰减严重,在实际监测时声发射撞击仅被最近的传感器获取,源定位信息通常为区域定位。当声发射源具有足够的能量使各个传感器获取信号,且到达不同位置传感器的时间不同,声发射源的线性定位或平面定位可作为有用的补充,主要用于高能量声发射源的定位。在进行时差定位时应特别注意声速和衰减通常随 FRP 传播的方向不同而变化。

对 FRP 使用定位方法时应注意,FRP 材料具有的很高发射率将产生严重的撞击重叠,使得来自不同声源的撞击被鉴别为一个声发射定位事件,从而严重影响时差定位的有效性和准确性。

合理选择声发射传感器间距和布置方式宜考虑以下因素:

a) 传感器频率范围

频率低的传感器可检测范围大,但也更容易接收噪声信号。对 FRP 检测时,通常将高频传感器(100 kHz~300 kHz)用于监测高应力的局部区域,而将低频传感器(30 kHz~60 kHz)用于构件的整体监控。通常同时使用两种频率范围的传感器进行检测。

在 FRP 板的声发射检测中,不同频率的传感器典型检测范围如下:150 kHz 传感器的监测范围为 400 mm~700 mm;60 kHz 传感器的监测范围为 600 mm~1 200 mm;30 kHz 传感器的监测范围为 900 mm~2 000 mm 或更高。具体检测范围主要取决于材料本身。

对于声发射源机制的研究,可优先使用宽频带声发射传感器。

b) 传播和衰减的方向性

受衰减的影响,在衰减较高的方向应布置更多的声发射传感器。采用与方向相关波速的定位技术时将获得更高的定位精度。在系统软件不能处理方向速度的情况下,使用虚拟传感器定位技术可改善定位性能。定位有效性的检查宜采用 Hsu-Nielsen 法或其他声发射模拟源。

c) 定位性能

对低能量的声发射信号进行平面定位时,应使用更多的声发射传感器以满足平面定位所需的最少三次的撞击。

对于小试样或大型结构的局部区域进行监测时,使用平面定位更有效。

5.5 纤维增强聚合物的声发射信号分析

纤维增强聚合物的声发射信号分析包含以下方法:

a) 基于撞击、能量和有效值电压(Root Mean Square,RMS)的数据处理

对于大多数应用场合,被检件都不宜临近失效,FRP 与金属材料的声发射信号处理技术没有明显差异。其主要区别在于,由于混响反射较少的缘故,高频信号持续时间明显缩短。当损伤开始萌生,声发射发射率将明显高于金属材料。

应设置合适的检测参数以便适应这种信号的采集与处理,例如设置较短的鉴别时间。如遇到非常严重的损伤可能以连续声发射信号的形式表现,在这种情况下,宜对信号进行连续信号表征参数的补充分析,例如采用 RMS、平均信号电平(Average Signal Level,ASL)或绝对能量等特征参数。

b) 实时分析

实施监测在反馈加载条件下的安全状况时,应使用明确的标准进行声发射实时分析。如有必要,应绘制声发射特征参数和其他参数的实时图表以帮助决定是否停止检测。

c) 事后分析

事后分析通过对已知噪声源的滤除,并使用一些可能无法在实时分析时使用的分析工具,实现对声发射数据的深入了解。

6 仪器和监测原则

6.1 仪器

检测使用的声发射仪器,包括硬件和软件应符合 EN 13477-1 和 EN 13477-2 的规定。
仪器应根据检测要求进行实时数据采集和分析。

6.2 传感器

根据声发射检测目的和 5.4 的规定进行声发射传感器频率的选择。

宽频带传感器可能适合对损伤机制和声波传播特性的研究,但也引入了板波在不同速度下传播作为频率函数的附加变量。

选择宽频带传感器时宜考虑其特性与层压厚度相匹配,以及宽频带传感器潜在的低灵敏度的影响。

6.3 传感器位置和间距

当适用的标准无特殊规定时,声发射传感器的位置通常根据以下要求选取:

- a) 结构的高应力区域使用 150 kHz 的传感器进行监测;
- b) 若 150 kHz 的传感器未覆盖全部测试区域,则使用 30 kHz~60 kHz 的传感器监测剩余区域,并考虑可能受外界噪声干扰的影响;
- c) 传感器间距根据不同方向的衰减测量值确定,并且应遵循面定位(EN 14584)或区域定位(EN 15495)中传感器最大允许间距的要求。

评价门槛设置见 6.5。

6.4 传感器耦合和安装

为了更好地传导声发射信号,传感器应使用不与复合材料发生化学或物理反应(如引起龟裂、膨胀、开裂或其他微观损伤机制)的试剂进行耦合。耦合剂选用硅氧烷基高真空油脂或黏合剂,如冷硬化硅橡胶。

在传感器安装的区域,不对复合材料结构进行机械加工以产生平坦光滑的表面,因此也应接受因用于平滑表面粗糙度或曲率而涂覆较厚的耦合剂层带来较高的声衰减。

耦合剂的选择取决于测试条件(温度、湿度、最大表面变形、表面粗糙度等),以及长期测试所需的稳定性。在所有可能的测试温度和最大变形状态下,耦合剂自身不应产生声发射。

使用胶带、弹簧夹、松紧带、弹性橡皮筋等固定传感器时应保证传感器的机械稳定性,并应防止传感器在结构表面移动或在加载时传感器自身因其他固定原因而产生噪声。

在检测前应校验仪器操作的正确性,符合 EN 14584 的规定,使用 Hsu-Nielsen 源或电子脉冲自激发传感器进行测试验证。每个通道响应的幅度值与所有通道的平均幅度值之差不宜超过 ± 6 dB,如果可能,应检查并修正任何超过 ± 6 dB 的偏差。考虑到加载过程中可能的损伤引起的衰减增加,应在测试结束时再次进行校准并记录相应的数值。

6.5 检测和评价门槛

检测门槛设置为高于背景噪声峰值 X dB,但不应高于评价门槛。

应设置检测门槛,以避免某些类型层压板的正常行为产生过多数据。

在新的结构(无应力)的第一次加载期间,高频次的微观损伤导致高活性的声发射活跃度。由于声发

射高活度和低检测门槛,获取的声发射信号表现为连续声发射,而基于突发信号定义的声发射撞击数(和撞击率的计算)将失效。

对于这种情况,宜适当采取调整措施,例如采集波形流、提高检测门槛(使到达时间的采集误差增加并降低定位性能),或使用并行的更高检测门槛的通道采集或采用连续信号特征参数进行分析。

在检测前应采取必要的措施屏蔽或消除由加载过程引起的外界噪声,如同服液压试验机或承压设备的泵噪声或泄漏、夹具与试样之间的摩擦等。如果不能有效屏蔽或消除噪声,则在事后分析期间使用数据滤波器或定位程序能从数据中删除识别出的噪声信号。

6.6 加载

根据检测目的、检测对象、加压介质和操作安全要求确定加载。

加载过程应确定最大试验载荷、加载速率、分段载荷级别和保载时间,必要时,还要确定卸载/重复加载步骤以计算费利西蒂比。

在线检测时,若最大试验载荷没有显著高于日常最大工作载荷,则应在声发射检测前进行较长时间的降载运行,使得日常最大工作载荷显著低于声发射最大试验载荷。

加载应特别指出声发射数据开始采集的载荷水平。

加载速率应注意 FRP 固有的高声发射活度和撞击重叠导致连续声发射的可能性。

加载速率和保载时间应适用于每次的检测应用。还应注意极低的应变速率和过长的保载时间可能导致蠕变(松弛)效应。

6.7 实时监测的图表

实时监测宜包括以下步骤:

- a) 评价声发射的活度,如声发射撞击率和累计数或定位事件,以及它们与时间或载荷的相关性;
- b) 评价声发射的强度,如突发信号峰值幅度、突发信号能量、连续信号参数及其负载下的特征;
- c) 声发射源定位。

用于实时观察和分析声发射特性的图表取决于检测应用类型。

7 检测方法

7.1 部件尺寸

小试样与大型部件和结构的检测存在差异和特有的问题。

应注意 5.2 规定的声发射波在 FRP 中的频散和衰减效应。

7.2 试样的检测

对 FRP 试样进行试验的目的是进行材料表征和复合材料关键结构部件的设计优化。

声发射监测的目的是通过纤维间的损伤模式(纤维/基体脱粘和基体开裂)和纤维断裂和/或不稳定分层导致的最终宏观失效来检测并表征初始损伤。

与 FRP 结构相比,试样检测主要存在声发射源和传感器之间的距离短、声发射源定位精度高、声波衰减小等优势。

声发射检测试样时的一个主要问题是,来自试样边缘的反射波再次传播到传感器并与直接传播到传感器的声发射波相叠加,从而影响声发射信号。

由于声发射波在试样上以近似一维方式进行传播,因此进行线性定位设置足以在试样长度方向上

确定声发射源的位置。

声发射背景噪声(液压、摩擦或电气)能够通过安装在试样上至少两个传感器(每个夹具或支撑件安装一个)并以线定位的方式滤除。

7.3 部件和结构的检测

7.3.1 资料审查

在检测前,应审查以下信息:

- a) 检测目的和局限性;
- b) 检测对象的类型和尺寸;
- c) 材料(成分和机械性能);
- d) 设计载荷,工作温度;
- e) 使用或操作条件;
- f) 检测对象运行资料(最大工作载荷、温度等);
- g) 局部监测区域(损伤区域或高应力区域);
- h) 检测条件(加载类型和顺序);
- i) 检测现场的环境条件和安全规定;
- j) 潜在的干扰噪声源(机械、电气、过程噪声等);
- k) 历次检测结果,如有;
- l) 已识别的不连续的类型,尺寸和位置,如有。

结果解释应参考相关的实验数据库。对于声发射响应特性未知的罕见结构材料,应使用相同材料的试样在受控检测条件下进行定性分析,以相同方式制造试样并尽可能模拟原始因素导致的不连续和工作应力条件。

7.3.2 检测准备

应满足检测地点和检测人员的安全要求。应采取预防措施防止意外性的结构破坏,安全装置、结构部件失效或潜在危险流体泄漏产生灾难性后果的发生。

对于压力容器,宜进行液压试验。如需进行气压试验,应采取特殊的安全要求。例如正常工作负载包括叠加的气压还是仅包括气压。

由于费利西蒂效应,当试验载荷没有显著高于之前的最大工作载荷时,已经受到工作载荷应力影响的结构应在声发射检测时不出现显著的费利西蒂效应。因而降低工作载荷并维持足够时间宜确保被检结构具有足够的应力松弛和明确的费利西蒂比。一般工作载荷减少90%时至少保持12 h或更长,工作载荷减少40%时则至少保持7天。

7.3.3 加载曲线

加载程序取决于声发射检测的应用对象和检测目的。加载应减少噪声带来的影响。保载时间是评价声发射检测结果的关键。基于加载程序,加载初期一般主要用于背景噪声增加情况的监测检查。

保载期间的应变速率和时间应与具体应用情况相适应,应注意极低的应变速率和过长的保载时间可能导致的蠕变效应。典型的复合材料的保载时间为4 min~10 min。为了确定特定载荷水平下的费利西蒂比,应设计卸载和重复加载程序。在卸载期间,基于摩擦的声发射源指示损伤存在。常见的加载曲线示例见图1和图2。

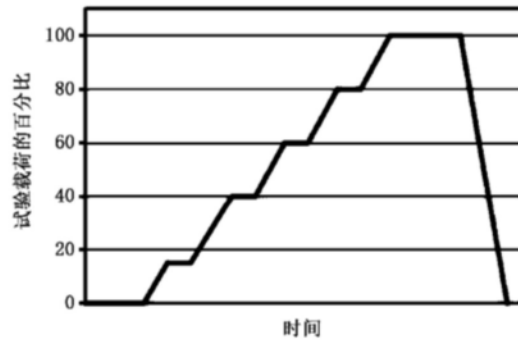


图 1 分级加载曲线

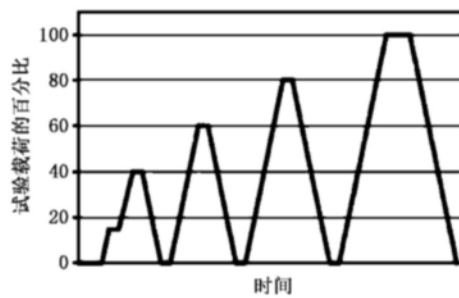


图 2 加载曲线(加载—保载—卸载)

纤维增强储罐、真空容器和压力容器的加载程序示例见图 3~图 5。

示例：纤维增强储罐和容器加压，宜保证每分钟最大应变率不超过主应变的 0.005%。加载过程中，中间保载阶段应为 4 min，最终保载应为 30 min。

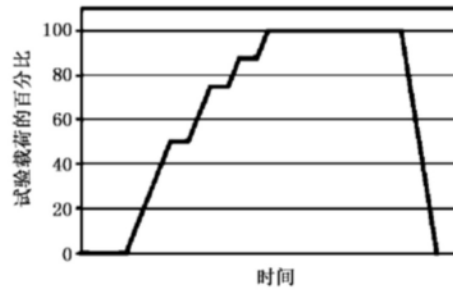


图 3 储罐的加载曲线

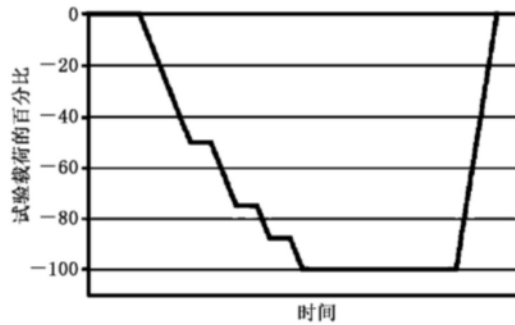


图 4 真空容器的加载曲线

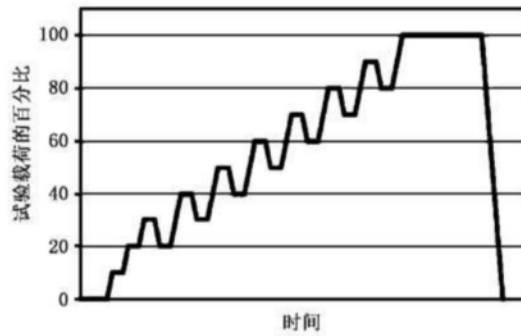


图 5 压力容器的加载曲线

7.3.4 检测工艺流程

从事声发射检测的机构应制定声发射检测工艺流程，其内容应至少包括以下基本信息和内容：

- a) 传感器类型、频率和制造商；
- b) 传感器安装方法；
- c) 耦合剂类型；
- d) 声发射仪器类型及主要特性；
- e) 能量测量方法；
- f) 检测覆盖范围及传感器阵列确定；
- g) 仪器验证程序的说明；
- h) 现场验证的说明(见 EN 14584)；
- i) 加载的类型和程序,复合材料的温度范围；
- j) 波形采集和分析,如有必要；
- k) 记录的数据和记录方法；
- l) 可用的在线数据显示；
- m) 实时停止和评价标准；
- n) 采用滤波技术的后分析程序(如使用)；
- o) 最终报告要求；
- p) 人员的资格鉴定/认证。

检测工艺流程的准备应符合 ISO 9712 中的规定。

7.3.5 评价准则

结构的声发射监测通常使用声发射活跃度、强度、费利西蒂比和/或声发射源定位结果来评价结构完整性(见表 1)。

表 1 FRP 的声发射评价准则

评价要素	声发射特征和信息
a) 损伤发展过程的声发射现象	<p>从材料损伤萌生到持续演化的整个发展过程中,会连续观察到声发射撞击率和撞击能量的持续增长。</p> <p>在较低应力下,通常表现为纤维间的微观损伤,如基体开裂、纤维/基体脱粘等。</p> <p>当利用费利西蒂比确定了材料处于严重损伤状态时,往往会同时观察到与纤维断裂和分层扩展增长的相关声发射事件</p>

表 1 FRP 的声发射评价准则 (续)

评价要素	声发射特征和信息
b) 声发射活度和强度	<p>声发射活度和强度由撞击计数、振铃计数或信号能量以计数率或累积计数的形式进行表示,例如:</p> <ul style="list-style-type: none"> ——指数表示方法。该方法给出了利用因子 α 描述复合材料的温度和应变率与声发射累积计数或计数率的关系式:[Brunner et al. (1995)]: $AE_{cumulative} = k \cdot e^{\alpha \cdot t}$ $AE_{rate} = k \cdot \alpha \cdot e^{\alpha \cdot t}$ <ul style="list-style-type: none"> ——具有“阶跃”式增长的曲线中的“阶跃点”,往往与快速发展的纤维内失效和/或新失效机制导致的渐进损伤有关,如纤维断裂; ——该值等于或超过统计上确定的“正常”声发射活度均值和标准差;该因子的数值来源于基于统计的“正常”声发射活动所确定的名义数值或标准差; ——卸载期间的声发射计数增加则表明损伤区域存在可逆性的界面摩擦类损伤,如分层缺陷的表面摩擦
c) 保载期间的声发射	<p>保载期间声发射活度或强度恒定或稳定增加</p> <ul style="list-style-type: none"> ——表示大范围损伤和不稳定的损伤阶段;表示存在大量的损伤,预示着正处于不稳定的损伤阶段; ——通常与基体开裂有关
d) 突发信号峰值幅度或能量	<p>注 1: 突发信号峰值幅度或能量的累积分布:</p> <ul style="list-style-type: none"> ——幅度累积分布曲线形态能通过 b[Pollock (1981)]按照如下公式进行幅度分布表征: $\lg N = a - b \cdot A (dB_{AE})$ <p>计算该数据曲线的斜率可以发现:</p> <ul style="list-style-type: none"> ——斜率与失效机制的数量和类型相关; ——斜率的变化预示着记录到高幅度或高能量声发射撞击,预示产生了新的失效机制,如纤维束断裂或不稳定的分层和/或临界破坏。 <p>注 2: 如果材料是各向同性且均匀的,则所有峰值幅度会均匀衰减,那么测量的信号幅度分布的斜率 b 与声发射源至传感器的间距不相关。但对于 FRP 结构来说,明显各向异性且衰减特性复杂,因此测量的信号幅度分布的斜率 b 与声发射源至传感器的间距是相关的。</p> <p>注 3: FRP 声发射源的区域定位不允许突发信号峰值幅度进行距离修正,因此用仪器采集得到的信号峰值幅度就直接认定为该源定位下得到的信号源幅度</p>

表 1 FRP 的声发射评价准则 (续)

评价要素	声发射特征和信息
<p>e) 费利西蒂比 FR</p> $FR = \frac{L_{reload}^{AE}}{L_{max}}$	<p>费利西蒂比 [Fowler (1977); Downs, Hamstad (1986, 1992, 1995, 1998); Summerscales (1986); Whittaker et al. (1990)]:</p> <p>——描述在相同检测条件下,重复加载出现显著声发射现象的载荷 (L_{reload}^{AE}) 与之前施加的最大载荷 (L_{max}) 的比值,用于测量损伤严重程度;比值越低,损伤越严重;</p> <p>——用于非预期失效预警。</p> <p>注 1: FR 分析可以基于由区域、线性或平面定位模式确定的最活跃区域内的声发射事件或撞击信号的数量、能量或它们的组合进行累积并触发。</p> <p>注 2: FR 会受多重变量的影响。如温度、加载和卸载速率、施加载荷与极限强度的比值(应力比)、保载时间、循环载荷间隔时间(聚合物基体的应力松弛期)、FRP 松弛和摩擦特性等。</p> <p>注 3: 由于加压介质不同,受声发射波在气体中传播模式少于液体且衰减等传播特性差异较大,因此在液体介质试验时获得的 FR 相较气体介质要低,这可能会导致对损伤严重程度的高估</p>
<p>f) 历史指数 $H(t)$</p> $H(t) = \frac{N \sum_{i=K+1}^{i=N} S_{0i}}{N - K \sum_{i=1}^{i=N} S_{0i}}$ <p>式中:</p> <p>$H(t)$ ——时间 t 的历史指数;</p> <p>N ——时间 t 内的撞击数(按时间排序);</p> <p>S_{0i} ——第 i 个撞击的信号强度;</p> <p>K ——经验导出的因子,其随着撞击数而变化。</p>	<p>历史指数 [Fowler et al. (1992, 1995)] 是指:</p> <p>——该指数是对历史数据趋势进行数据显著性统计的公式;</p> <p>——在声发射突发信号累积能量与历程时间关系曲线中灵敏地发现曲线突变“拐点”的方法;</p> <p>——该指数有助于确定新损伤机制的发生;</p> <p>——该指数与检测对象大小无关</p>
<p>g) 严重程度 S_r</p> $S_r = \frac{1}{J} \sum_{m=1}^{m=J} S_{0m}$ <p>式中:</p> <p>S_{0m} ——第 m 次撞击信号强度;</p> <p>J ——经验导出的一个取决于结构材料的常数。</p>	<p>严重程度值 [Fowler et al. (1992, 1995)] 是指:</p> <p>——指定数量 (J) 的最大突发信号强度的平均值;</p> <p>——结构损伤程度的度量。</p> <p>严重程度的增加往往与由费利西蒂比测量得到的新结构损伤相呼应</p>
<p>h) 强度图</p>	<p>以对数表示的严重程度对应每个通道的历史指数的对数所获得的强度图,可以给出不同强度的区域对应的不同损伤程度</p>
<p>i) 声发射定位集中区</p>	<p>基于声发射定位集中区数据进行评价;</p> <p>集中区域内出现高声发射活度和/或强度预示该区域出现损伤;</p> <p>FRP 结构的优选定位技术是区域定位;</p> <p>分析区域定位的声发射强度用于评价损伤严重程度;</p> <p>可使用线性或平面定位声发射技术,这可以方便利用声发射源和传感器位置间的衰减来校正信号幅度,并可由定位结果确定由结构薄弱区域、分层扩展、冲击损伤、缺陷等产生的声发射区域的大小、形状和扩展方向</p>

7.3.6 中止检测准则

中止检测准则用于防止结构失效等意外发生,可能包含以下内容:

- 声发射活度或强度随载荷的变化率逐渐递增;
- 保载期间声发射活度或强度参数变化率持续或稳定增加;和
- 费利西蒂比低于结构材料特定的 FRC 临界值。

中止检测应基于通道和区域定位情况,如使用线性或平面定位声发射技术,中止检测也可基于定位集中区。

当评定区域的任意一个达到或超出中止检测准则,应立即停止加载,并应卸载到安全载荷水平。

在继续加载之前,应对高声发射活度和强度的区域进行其他无损检测方法检测。

声发射活度、强度、费利西蒂比和中止检测准则的计算方法应在声发射检测机构的检测工艺规程中进行定义。

中止检测准则根据加载形式,复合材料的温度范围、检测对象和结构的不同而不同。

7.3.7 健康监测

定期或连续的健康监测适用于检测疲劳和环境老化机制、突发撞击损伤等。

监测方法和评价准则参照本文件执行,但应与过程和环境参数的相关性来进行损伤评估。

8 声发射检测结果/源机理的分析与解释

为识别声发射源并区分不同的损伤机制与外界噪声源的目标,需对声发射检测结果进行分析。以下工具可用于声发射分析:

a) 波形特征的相关图[CARP Recommended Practice (1999)]

- 1) 观察突发信号持续时间(或振铃计数)的对数与峰值幅度的相关图。小试样中稳定的分层扩展引起的微观损伤产生中幅度或高幅度且持续时间短的突发声发射事件;不稳定拼接或主要分层损伤则可能产生高幅度和持续时间长的突发信号;滑动或摩擦机制则可产生低幅度、持续时间长的突发信号。其他声源如泄漏、电磁干扰(EMI)和射频干扰(RFI)产生持续时间极短的突发信号。

注: EMI 和 RFI 的另一个显著特点是所有通道的到达时间相同。

- 2) 观察突发信号峰值幅度的累积分布,峰值幅度分布的斜率不同可能对应不同的声发射源产生机制。*b* 即为按特定间隔计算的图形斜率。

b) 检测后的滤波

检测后对时间、通道、幅度或能量等进行滤波,用于去除外部噪声数据,如风噪声、机械滑动、冲击、泄漏和来自操作阀的噪声。

9 检测报告

检测报告应至少包括以下内容:

- a) 委托单位和检测地点;
- b) 检测对象;
- c) 检测工艺规程;
- d) 与检测工艺规程的偏离;
- e) 参考相关程序文件,包括检测目的、检测对象等;

- f) 检测仪器和设备、传感器频率和灵敏度；
- g) 现场操作条件；
- h) 现场传感器灵敏度验证；
- i) 加载程序；
- j) 分析方法；
- k) 检测结果；
- l) 测试结果的分析,包括声发射源的定位和严重程度,如可能,画出定位源示意图；
- m) 检测地点、日期和时间；
- n) 检测人员、报告编写人和审核人签字及资格证书编号。

最终检测报告宜符合 ISO/IEC 17025:2005 中的规定。

参 考 文 献

- [1] ISO 472 Plastics—Vocabulary
- [2] ISO/IEC 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- [3] ISO 1043 Plastics—Symbols
- [4] ISO 3673 Plastics—Epoxy resins
- [5] EN 12654 Textile glass—Yarns—Part 1 to 3
- [6] EN 12971 Reinforcements—Specification for textile glass chopped strands—Part 1 to 3
- [7] EN 13002-2 Carbon fibre yarns—Part 2: Test methods and general specifications
- [8] EN 13003 Para-aramide fibre filament yarns—Part 1 to 3
- [9] EN 13417 Reinforcement—Specifications for woven fabrics—Part 1 to 3
- [10] EN 13473 Reinforcement—Specifications for multi-axial multi-ply fabrics—Part 1 to 3
- [11] EN 13677 Reinforced thermoplastic moulding compounds—Specification for GMT—Part 1 to 3
- [12] EN 14020 Reinforcements—Specification for textile glass rovings—Part 1 to 3
- [13] EN 14118 Reinforcement—Specifications for textile glass mats (chopped strand and continuous filament mats)—Part 1 to 3
- [14] ASTM D3039/D3039-M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, American Society for Testing and Materials International 15.03 (2006)
- [15] ASTM E1067 Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Fibreglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels, American Society for Testing and Materials International 03.03 (2007)
- [16] ASTM E1888/E1888M Standard Test Method for Acoustic Emission Examination of Pressurized Containers Made of Fiberglass Reinforced Plastic with Balsa Wood Cores, American Society for Testing and Materials International 03.03 (2002)
- [17] ASTM E2076 Standard Test Method for Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Fan Blades Using Acoustic Emission, American Society for Testing and Materials International 03.03 (2005)
- [18] ASTM E2191 Standard Test Method for Examination of Gas-Filled Filament-Wound Composite Pressure Vessels Using Acoustic Emission, American Society for testing and Materials, International 03.03 (2002)
- [19] ASTM Subcommittee ASTM standard E 2661/E 2661M, ASTM standard E 2661/E 2661M, Standard Practice for Non-Waveform Based Acoustic Emission Examination of Plate-like and Flat Panel Composite Structures Used in Aerospace Applications
- [20] ASNT. Acoustic Emission Testing, in Miller R K, v K Hill E, Moore P O, ASNT Handbook of Nondestructive Testing, Vol. 6 (3rd ed.) American Society for Nondestructive Testing (2005)
- [21] Application of Fracture Mechanics to Polymers, Adhesives and Composites, European Structural Integrity Society, 33, Edit. D. Moore, Elsevier, Dec-2003
- [22] CARP Reports (1993), Guidance for Development of AE Applications on Composites, Committee on Acoustic Emission from Reinforced Plastics (CARP), Aerospace/Advanced Composites Subcommittee, J. Acoustic Emission, 1993, 11(3) pp. C1-C24
- [23] CARP Reports (1999), Recommended Practice For Acoustic Emission Evaluation Of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Tanks And Pressure Vessels, Committee on Acoustic Emission from Reinforced Plastics (CARP), a Division of the Technical Council of The American Society for Nondestructive

tive Testing, Inc., Columbus, Ohio, Draft I, October 1999

[24] Brunner A.J., Nordstrom R., Flüeler P. A Study of Acoustic Emission-Rate Behavior in Glass Fiber-Reinforced Plastics. *J. Acoustic Emission*, 1995, 13 (3-4) pp. 67-77

[25] Downs K.S., & Hamstad M.A. Correlation of Acoustic Emission Felicity Ratios and Hold-Based Movement and Burst Strength. *J. Acoustic Emission*, 1995, 13(3-4) pp.45-55

[26] Downs K. S., & Hamstad M. A. Acoustic Emission from Depressurization to Detect/Evaluate Significance of Impact Damage to Graphite/Epoxy Pressure Vessels. *J. Composite Materials*, 1998, 32(3) pp.258-307

[27] Fowler T.J. (1977): "Acoustic Emission Testing of Fiber Reinforced Plastics", Preprint 3092, ASCE Fall Convention and Exhibit, San Francisco, California, American Society of Civil Engineers, Oct. 17-21, 1977

[28] Fowler T.J., Blessing J. A., S trauser F. E. (1992):—Intensity Analysis. Proc. Fourth Intern. Symposium on Acoustic Emission From Composite Material—AECM-4, Seattle 1992, American Society for Nondestructive Testing, Columbia, Ohio 1992; 237-246

[29] Fowler T.J. (1995):—Revisions to the CARP Recommended Practice for Tanks and Vessels. Proc. Fifth Intern. Symposium on Acoustic Emission From Composite Material—AECM-5, Sundsvall 1995, American Society for Nondestructive Testing, Columbia, Ohio 1995; 263-271

[30] Gorman M.R.—Plate wave acoustic emission. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, 90 (1) pp.358-364

[31] Gorman M.R., & Ziola S.M.—Plate waves produced by transverse matrix cracking. *Ultrasonics*, 1991, 29 pp.245-251

[32] Gorman M. R., & P rosser W. H.—AE Source Orientation by Plate Wave Analysis. *J. Acoustic Emission*. 1991, 9 pp.283-288

[33] Gorman M.R. (1996):—Modal AE: A New Understanding of Acoustic Emission. Technical Publication DWC 96-002

[34] Hamstad M.A.—A Discussion of the Basic Understanding of the Felicity Effect in Fiber Composites. *J. Acoustic Emission*, 1986, 5(2) pp.95-102

[35] Hamstad M.A. (1992):—An examination of acoustic emission evaluation criteria for aerospace type fiber/polymer composites, Proc. Fourth Intern. Symposium on Acoustic Emission from Composite Materials, AECM-4, Seattle 1992, American Society for Nondestructive Testing, Columbia, Ohio 1992; 436-49

[36] Mal A.—Elastic waves from localized sources in composite laminates. *Int. J. Solids Struct.* 2002, 39 pp.5481-5494

[37] Pollock A. A. (1981): "Acoustic Emission Amplitude Distributions". *International Advances in Nondestructive Testing* (Editor: Warren J. McGonnagle), Volume 7, pp. 215-240, May 1981. Reprinted as Technical Report DE 79-10, Dunegan/Endevco, San Juan Capistrano, California. Redistributed as PAC TR-103-91-5/89

[38] Prosser W.H., Jackson K.E., Kellas S., Smith B. T., McKeon J., Friedman A.—Advanced Waveform-Based Acoustic Emission Detection of Matrix Cracking in Composites. *Mater. Eval.* 1995, 53 p.1052

[39] Prosser W. H.—Advanced AE Techniques in Composite Materials Research. *J. Acoustic Emission*, 1996, 14 pp.S1-S11

[40] Prosser W. H., Seale M. D., Smith B. T.—Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes. *J. Acoust. Soc. Am.* 1999, 105 (5) pp.2669-2676

[41] Summerscales J. (1986):—The Felicity Effect in Acoustic Emission from Composites, Proc.Intern. Symposium Composite Materials and Structures, Beijing, 1986, pp.978-982

[42] Suzuki H., Takemoto M., Ono K.—A Study of Fracture Dynamics in a Model Composite by Acoustic Emission Signal Processing. J. Acoustic Emission. 1993, 11 (3) pp.117-128

[43] Whittaker J.W., Brosey W.D., Hamstad M.A.—Felicity Ratio of Pneumatically and Hydraulically Loaded Spherical Composite Test Specimens. J. Acoustic Emission. 1990, 9 (2) pp.75-83

[44] Whittaker J.W., Brosey W.D., Hamstad M.A.—Correlation of Felicity Ratio and Strength Behavior of Impact-Damaged Spherical Composite Test Specimens. J. Acoustic Emission. 1990, 9 (2) pp.84-90

[45] ISO/TR 13115:2011 Non-destructive testing—Methods for absolute calibration of acoustic emission transducers by the reciprocity technique

[46] EN 13554:2011 Non-destructive testing—Acoustic emission—General principles

中华人民共和国
国家标准
无损检测 纤维增强聚合物的声发射
检测方法和评价准则

GB/T 42870—2023/ISO 18249:2015

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.net.cn

服务热线: 400-168-0010

2023年8月第一版

*

书号: 155066 · 1-73133

版权专有 侵权必究



GB/T 42870-2023



码上扫一扫 正版服务到