

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2109085

声发射在复合材料贮箱上的应用研究进展*

王奕首¹, 王明华¹, 刘德博², 梁智洪¹, 吴会强², 卿新林^{1,3}

(1. 厦门大学航空航天学院 厦门 361005; 2. 北京宇航系统工程研究所 北京 110017;
3. 福建省智能传感与仪器协同创新中心 厦门 361005)

摘要: 复合材料贮箱作为未来航天运载动力系统的关键部件,其结构的状态监测与性能评价是保证航天器安全运行的关键问题之一。声发射作为一种新型动态无损检测/监测技术为复合材料贮箱结构性能监测提供了一种行之有效的技术手段。本文以复合材料贮箱为背景,首先介绍了复合材料贮箱的失效模式及常见的健康评价技术;其次介绍了声发射检测技术的基本原理,并综述了声发射技术在复合材料贮箱损伤表征上的应用研究现状,最后讨论了声发射技术应用于复合材料贮箱的发展趋势及面临的挑战。

关键词: 复合材料贮箱;声发射;结构健康监测

中图分类号: TH873 TB333 V254 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.99

Research progress on the application of acoustic emission to composite tanks

Wang Yishou¹, Wang Minghua¹, Liu Debo², Liang Zhihong¹, Wu Huiqiang², Qing Xinlin^{1,3}

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 110017, China; 3. Collaborative Innovation Center of Smart Sensing and Instruments in Fujian Province, Xiamen 361005, China)

Abstract: As a key component of the future aerospace vehicle power system, the condition monitoring and performance evaluation of the structure of composite tanks is one of the key issues to ensure the safe operation of spacecraft. Acoustic emission is a new dynamic non-destructive testing/monitoring technique that effectively monitors the structural performance of composite tanks. This paper takes composite tanks as the background. Firstly, the failure modes and common health assessment techniques of composite tanks are introduced. Secondly, the basic principles of acoustic emission detection technology are introduced, and the current status of research on the application of acoustic emission technology to the damage characteristics of composite tanks is reviewed. Finally, the development trends and challenges of acoustic emission monitoring of structural health of composite tanks are discussed.

Keywords: composite tanks; acoustic emission; structural health monitoring

0 引言

相比金属材料,复合材料具有更高比强度和比模量、加工成型方便、可复合设计等优点,因而被广泛应用在航空航天、汽车制造及其他领域^[1-3]。特别是在航天运载器的燃料贮箱轻量化制造上,复合材料贮箱相比金属贮箱减重可达到 20%~40%^[4-5]。此外复合材料结构的制造

与成型工艺方法多种多样,特别是先进成型工艺,大大减少了零部件的组装,缩短了制造周期,生产成本显著降低,适用于制造各种复杂的三维大尺寸结构^[6-8]。轻量化复合材料贮箱已经成为新一代低成本、高运载力、可回收航天器研发的关键部件之一。

复合材料贮箱作为未来航天运载器动力系统和结构系统的关键部件^[9],其结构健康对于航天器系统安全运行有直接的影响,单纯的过载强度试验并不能保证贮箱

后续的使用安全,实现对复合材料贮箱结构健康的实时监测与评价,避免贮箱结构的过早失效是保证航天器高效运作的关键问题之一。而复合材料贮箱不仅承受疲劳载荷、循环载荷、冲击力等复杂载荷,而且还因贮存超低温液氢/氧而承受温差梯度高、湿度大等因素影响,在工作过程中,巨大的温差还会导致组分材料间产生不可忽略的内应力^[10],结构损伤形式较金属材料复杂且隐蔽。目前常见的无损检测方法(目视检测法、射线检测法、红外热成像),在对贮箱这类大型复合材料结构进行损伤检测时,时间成本高且受限于贮箱结构中不可达部位,通常需要对贮箱结构进行拆卸,容易造成贮箱结构二次损伤,具有非常显著的局限性^[11-12]。如何实现复合材料贮箱潜在和实际损伤的检测以及已有损伤扩展的实时监测,并快速评价其结构可靠性,是一个极富挑战性的课题。

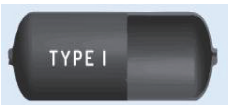
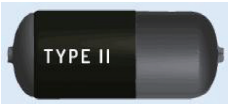
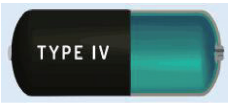
声发射(acoustic emission, AE)是一种不同于常规的无损检测技术,属于无外部激励的声学检测方法,同时兼具在线监测特点,能够依据结构在损伤萌生或扩展过程中产生的应力波特征判断结构/材料的健康状态,不仅为复合材料构件的损伤检测提供了更好评估手段,还提供了损伤定位的可能性^[13-15]。AE已经成为低温贮箱等重要压力容器结构的健康监测和性能评价的重要技术手段^[16]。本文以复合材料贮箱为背景,综述了 AE 技术在复合材料贮箱上应用的研究进展,并讨

论了 AE 技术在复合材料贮箱检测/监测应用上的发展趋势及面临的挑战。

1 复合材料贮箱主要失效模式

从贮箱的发展历程来看,航天运载器贮箱大致可分为 5 种类型^[17],各类型贮箱的基本特征如表 1 所示。Ⅰ型贮箱为全金属结构,载荷由金属结构承担。Ⅱ型和Ⅲ型贮箱在结构上较为相似,都采用了一定比例的金属材料间隔所贮存的流体与复合材料,区别在于Ⅱ型贮箱仅仅在金属筒段利用纤维复合材料以环箍的方式缠绕增强,而Ⅲ型贮箱则是以螺旋和环箍缠绕的方式将整个金属内衬包覆在纤维增强复合材料内部,Ⅳ型贮箱全部由复合材料构成,是目前贮存高压氢的最先进技术,而Ⅴ型复合材料贮箱在贮箱结构轻质化设计与制造方面有巨大的发展潜力,是未来航天运载器贮箱发展方向之一^[18-20]。用于航空航天领域的复合材料贮箱按内部结构组成又可分为两大类:1)含内衬复合材料贮箱,2)无内衬复合材料贮箱。有内衬复合材料贮箱的内衬起到了密封防泄漏的作用,而复合层主要承受载荷作用^[21],在纤维缠绕设计时主要从力学角度出发,保证复合材料的结构强度;而全复合材料贮箱除了考虑复合材料的承载能力之外,还需要充分考虑低温流体泄漏的可能性。图 1 所示为国内外一些典型航空航天复合材料贮箱的研究开发与应用的发展历程。其中,图 1(a)^[4]所示为

表 1 贮箱基本分类
Table 1 Basic classification of tanks

分类	结构特征	局限性
	全金属结构,载荷由金属结构承担	腐蚀 质量大 压力限制
	金属结构,筒段由复合材料缠增强,载荷由金属和复合材料共同承担	腐蚀 质量大 压力限制
	金属内衬,外部由复合材料缠绕性能全包覆增强结构,载荷由复合材料承担	内衬失效 内衬腐蚀 内衬重量
	聚合物内衬,外部外部由复合材料缠绕性能全包覆增强结构,载荷全部由复合材料承担	内衬渗漏 内衬泄露 内衬氢催化
	无内衬复合材料贮箱(全复合材料贮箱),有金属或复合材料端部配件	贮箱渗漏 低传热

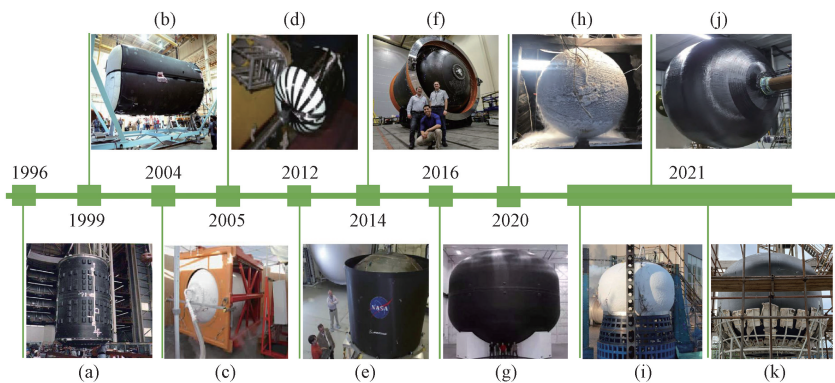


图 1 国内外典型航空航天复合材料贮箱

Fig. 1 Typical aerospace composite tanks at home and abroad

1996 年 MDA 为 DC-XA 亚轨道飞行器研制的 $\Phi 2.4$ m 长度 4.8 m 全复合液氢贮箱^[22]。图 1(b)^[4]所示为 1999 年 LM 公司为可重复使用运载器 X-33 研制的含内衬复合材料液氢贮箱,采用了多瓣蜂窝夹层^[23]。图 1(c)^[9]所示为 2004 年 LM 公司研制的 $\Phi 1.2$ m 无内衬碳纤维全复合材料液氧贮箱,是液氧贮箱研究领域的革命性进展,减重 18%。图 1(d)^[4]所示为 2005 年 Wilson 公司研制的 $\Phi 1.2$ m 长度 1.8 m 壁厚为 2.0~2.6 mm 全复合材料液氧贮箱^[24]。图 1(e)^[9]所示 2012 年为 Boeing 研制的 $\Phi 2.4$ m 低温复合燃料贮箱,减重 30%,制造成本降低 25%,2014 年通过压力和温度测试^[25]。图 1(f)^[23]所示为 2014 年 Boeing 为 NASA 研制的 $\Phi 5.5$ m 全复合材料低温贮箱,被评为 2012 年十大国防材料技术突破之一^[26]。图 1(g)^[26]所示为 2016 年 Space X 研制 $\Phi 12$ m 碳纤维复合材料液氧贮箱,采用了胶螺结构进行防渗漏密封。图 1(h)^[27]所示为 2020 年 ICT 公司研制的无内衬球形低温复合材料贮箱,解决了低温下复合材料高压容器微裂纹的问题。图 1(i)^[27]所示为 2021 年中国航天八院(805 所)研制 3.35 m 直径复合材料液氧贮箱,已通过液氮加压考核验证。图 1(j)^[27]所示为 2021 年大连理工大学武湛君教授团队研制的基于自主开发液氧相容预浸料的 3.35 m 直径复合材料液氧贮箱。图 1(k)所示为 2021 年中国航天一院研制的 3.35 m 直径复合材料液氧贮箱,已成功通过液氮/液氧加压和液氮爆破等考核验证。

复合材料贮箱的结构组成主要包括各种不同缠绕方式的复合材料铺层和充当内衬的复合材料或金属内衬,其结构性能既受到所用复合材料性能影响,又与复合材料缠绕成型工艺相关^[28]。此外,复合材料贮箱服役环境特殊,在服役过程中除了承受力学冲击、机械振动等载荷作用外,还存在温差梯度大导致材料组分内应力,以及存储的液氢导致材料承载能力和延展性显著降低的现象^[29]。因此复合材料的结构损伤是一个十分复杂的过

程,其损伤机制和损伤模式极为复杂,大致分为制造过程缺陷和服役过程损伤两个方面^[30]。复合材料贮箱作为一种典型的复合材料结构,服役过程中的损伤模式主要分为弹性失效、屈服失效、脆性断裂失效、塑性断裂失效、疲劳断裂失效、冲击断裂失效等^[31],其主要表现形式包括贮箱渗漏、内衬失效,纤维断裂,基体开裂、冲击损伤、基体与纤维脱粘等^[32-33]。表 2 为作者根据现文献研究^[34-37],总结的复合材料贮箱在服役过程中常见损伤类型及其主要失效原因。

表 2 复合材料贮箱常见损伤类型及失效原因
Table 2 Common damage types and failure causes of composite tanks

损伤类型	失效原因
基体变形开裂	外部载荷冲击、疲劳载荷作用、振动载荷
纤维断裂	外部载荷冲击、疲劳载荷作用、振动载荷
贮箱渗漏	高梯度温差和载荷冲击导致基体微裂纹形成渗漏路径
基体脱粘分层	高梯度温差导致膨胀系数不匹配的贮箱组分间产生内应力
内衬失效	氢脆效应导致内衬承载能力和延展性降低、外部载荷冲击

复合材料贮箱服役过程产生的结构损伤属于非线性多物理场耦合作用下的渐进损伤。目前,常用的检测和评价技术可以分为传统和新型两大类。传统技术包括电阻应变仪、接触超声、涡流、X 和 γ 射线成像等。其中电阻应变可以机载集成,但只能实现贮箱结构局部应变监测;接触超声可以实现大面积的结构损伤探测但无法实现机载集成;涡流技术只能实现扫描区域内的表面损伤和裂纹的检测,而无法实现贮箱内部分层、脱粘检测;X 和 γ 射线成像可以实现扫描区域内各种损伤模式探测但技术复杂度较高。新型监测技术主要有光纤传感、激

光超声、全息成像、AE 监测等。光纤传感能够实现布设区域内多种类型损伤的实时监测,是目前广泛采用的技术之一;激光超声和全息成像都可以实现扫描区域多种类型损伤检测,但技术复杂程度较高、成熟度待进一步发展;AE 技术兼具无损检测和在线监测的优点,能够实现大面积的损伤检测,在复合材料贮箱性能考核验证和服役过程的实时监测具有重要作用。

2 声发射检测原理及特点

声发射是指材料/结构因局部能量快速释放而发出瞬态弹性应力波的现象,也称为应力波发射(stress wave emission)和微振动活动(micro-seismic activity)等^[38]。

材料/结构在受载时由于材料自身结构的不均匀以及材料缺陷的存在将会出现局部应力集中,造成材料整

体不稳定的应力分布状态。当非稳态应力分布状态下的应变能积累到一定程度时,材料内部便以应力波形式释放应变能以达到低能稳定状态,而其外在表现则是材料变形、裂纹萌生扩展,甚至结构完整性的彻底破坏。因此,AE 源产生的 AE 信号包含了反映材料从高能失稳状态向低能稳态过渡的所有信息,通过这些传播至材料表面的瞬态弹性应力波所蕴藏的信息能够实现对材料的损伤情况及结构完整性的客观评价^[39]。

大部分材料因结构损伤而产生的 AE 信号强度微弱,通过借助安装在材料表面的高灵敏度传感器阵列,实时采集来自材料结构损伤的 AE 信号,并采用有效的信号处理手段对 AE 信号进行分析与处理,提取有效的 AE 表征参数对构件的健康状态及可靠性进行客观评估判断^[40],这就是 AE 检测的基本原理,AE 检测基本过程如图 2 所示。

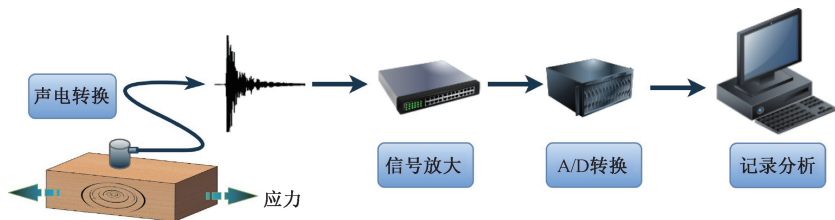


图 2 AE 监测基本过程

Fig. 2 Basic process of AE monitoring

对于 AE 信号的分析处理,常用的有两种^[41-42]:一种是储存和记录 AE 信号波形进行频谱分析,称为波形分析法。其显著优点是适用任何信号类型分析、抗干扰能力强,缺点是复杂性高、工作量大。另一种是基于简化 AE 信号波形的特征参数分析,称为参数分析法。该方法具有简单、快速、直观的特点,因此广泛应用在各种工程检测中,是较为成熟的 AE 信号分析技术,不足之处是丢失了最能反映构件健康状态的原始波形。参数分析法中常用 AE 信号特征参数含义及用途如表 3 所示。

AE 检测技术具有两个明显特征:1) 损伤检测具有实时动态性;2) AE 信号来自材料内部,而非外部引入激励信号。AE 技术与常规的无损检测技术(渗透、磁粉、涡流、射线、超声检测)相比具有以下优点^[43-46]:

1) 可实时动态获取材料结构损伤的信息,并据此信息动态评价材料的损伤程度及材料结构完整性。

2) 对于大型结构件,只需要布置足够多的 AE 传感器就能够在一次试验中实现大面积损伤判定与损伤演变监测。

3) 适用性范围广,几乎所有材料在损伤过程中均有 AE 现象发生,甚至流体泄露、基体摩擦磨损等也会产生 AE 现象,这就使得 AE 检测具有非常广的适用范围。

4) AE 检测对于材料的几何结构形状不敏感,且对于被检测对象的接近要求不高,适用于检测其他方法所不能检测的复杂几何构件及其他无损检测方法不适用的极端环境。

5) 可提供随载荷、时间、温度等外加变量而变化的实时瞬态或连续信号,因而适用于结构损伤过程监控以及早期或临近破坏的预报。

同时,AE 检测技术也存在局限性^[47],主要表现为:

1) 容易受到机电噪声干扰,对于 AE 表征参数的解释依赖于丰富的数据库和现场监测经验。

2) 目前 AE 技术只能给出 AE 源的位置、强度和活性评价,而无法给出损伤及缺陷性质和大小尺度评价,因此在对材料损伤或缺陷进行定性定量评估时,仍需要依赖于其他无损检测方法的共同参与。

3) AE 现象不可逆,利用 AE 技术检测材料结构损伤时具有明显时效性。与其他无损检测方法相比,AE 检测不具有高重复性,实验过程中 AE 信号不可能通过多次加载重复获得。因此,一旦错过或丢失了材料在损伤时的响应信息,就无法有效客观评价材料或结构的健康情况。

表 3 AE 信号特征参数
Table 3 Characteristic parameters of AE signal

参数	含义	特点	应用
撞击和撞击计数	超过门槛并使某一通道获取数据的任何信号称为一个撞击。	反映 AE 活动的总量和频度	AE 活性评价
事件计数	产生 AE 现象的一次材料局部变化称为一个 AE 事件	反映 AE 活动的总量和频度	AE 活性评价
振铃计数	越过门槛信号的振荡次数,分为总计数和计数率	粗略反映信号强度和频度,但受门槛的影响	AE 活性评价
幅值	事件信号波形的最大振幅值,通常用 dB 表示	与信号源的大小直接相关,并决定了 AE 信号的可探测性	波源的类型鉴别、强度及衰减的测量
能量	通常定义为信号检波包络线下的面积	对振幅和持续时间敏感,对阈值和采样频率依赖性较小。	波源的类型鉴别
持续时间	事件信号第一次越过门槛到最终降至门槛所经历的时间间隔,用 μs 表示	取决于信号源的大小和结构声学,粗略反映信号强度	有时用于特殊波源及机电噪声识别
时差	AE 波到达各传感器的时间差,以 μs 表示	取决于波源位置、传感器间距及 AE 信号波速	AE 源定位
有效值电压 RMS	采样时间内,信号电平的均方根值,以 V 表示	与 AE 的大小有关,不受门槛的影响	连续型 AE 活性评价,也用于背景噪声水平的测量

基于上述特点,目前 AE 技术更多应用于以下场合:
1)其他无损检测方法所不适用的对象及环境;2)与其他方法相结合服务于重要构件的综合性能评价。因此,AE 技术并不是取代传统的无损检测方法,而是对现有无损检测方法体系的补充与发展。

3 声发射在复合材料贮箱损伤表征上的研究现状

复合材料贮箱和其他复合材料构件一样,在使用和制造过程中都不可避免会存在一些缺陷和损伤。复合材料贮箱的制造缺陷和损伤类型种类较多,总体而言大致有分层、脱粘、纤维断裂、基体开裂等多种形式^[48-50],这些损伤形式都是复合材料构件 AE 现象的来源。而其他常见的 AE 来源则是流体的泄露、新形成的损伤界面之间的摩擦等。AE 技术正是通过这些 AE 源所释放的应变能来检测复合材料贮箱结构损伤并动态监测结构损伤演变。

3.1 复合材料贮箱的基体损伤 AE 检测

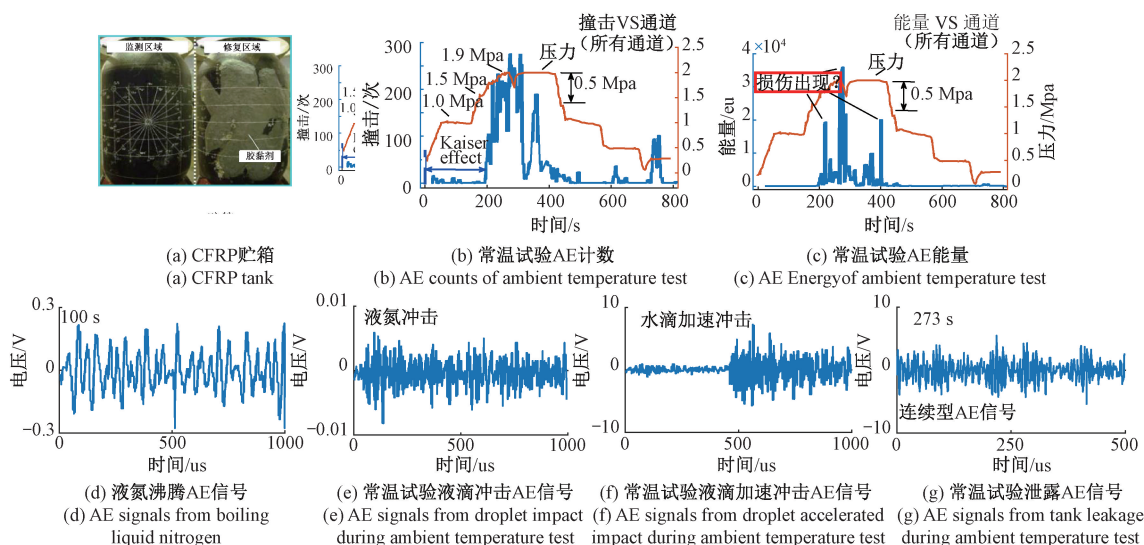
基体损伤主要是构件受载或自身结构缺陷导致的基体相开裂的现象,是复合材料贮箱结构性能评估体系中非常关键的一个环节。

1996 年 Wilkerson^[51] 在美国国家航空航天局 (NASA) 的一份关于用于 DC-XA 运载火箭的液氢贮箱的结构健康 AE 监测的技术备忘录中 (NASA 技术备忘录 108520) 指出,环境温度下贮箱的加载过程中遵循 Kaiser 效应(循环加载过程中,当应力不超过结构先前的所承受最大应力时,没有 AE 现象产生),且树脂基体开裂时产生大量低振幅、短持续时间的 AE 信号;在低温试验中同

样检测到大量低振幅、短持续时间的 AE 信号,但几乎无法从中获取任何关于贮箱结构健康情况的信息,且两次测试产生的 AE 撞击数无明显区别,说明在低温环境下贮箱的加载过程并不遵循 Kaiser 效应。尽管低温环境下 AE 监测并没有达到预期理想的效果,但该研究探索促进了人们对于 AE 技术在复合材料贮箱结构性能表征上的认识,为后续的探索奠定了研究基础。

2002 年日本宇宙开发事业集团^[52-53] (NASDA, 现日本宇宙航空研究开发机构,即 JAXA) 在对无内衬 CFRP 贮箱进行 AE 检测时,发现常温加载过程中贮箱遵循 Kaiser 效应(图 3(b)),且出现 3 次预示贮箱损伤的 AE 能量突变现象(图 3(c)),在随后的气密性检测中发现修复区的确出现了基体损伤。在低温试验前期,液氮沸腾(图 3(d))与常温下液氮冲击贮箱壁产生的 AE 信号(图 3(e))相似,无法判断是否存在结构损伤;低温加压试验时,沸腾液氮在压力作用下产生了和图 3(f) 一样的高振幅连续 AE 信号,与贮箱基体损伤时导致的泄露 AE 信号(图 3(g))具有极高的相似性,因而无法通过统计的 AE 参数判断贮箱是否出现损伤,更无法有效区分贮箱的损伤类型。为此 Mizutani 等^[52] 基于低温试验中获取的原始 AE 信号波形,提出了基于波形分析的 AE 源定位算法进行损伤源定位,超声扫描结果表明在定位点附近,贮箱的确存在低应力损伤,液氮正是通过这些微裂纹发生泄露导致了如图 3(g) 所示的 AE 现象。

国内关于复合材料贮箱结构 AE 监测的研究也取得一些成果。刘哲军等^[54] 对碳纤维复合材料气瓶进行了 AE 监测,发现 AE 计数能够间接反映气瓶在疲劳过程中的损伤程度:疲劳产生的 AE 计数越多,气瓶疲劳

图3 CFRP贮箱AE监测^[52-53]Fig. 3 AE Monitoring of CFRP Tank^[52-53]

损伤严重性程度越高,剩余结构强度越低。在有关AE监测纤维缠绕壳体结构稳定性的研究中发现^[55],壳体在开始加压时,存在大量的AE事件,但随着壳体应力的充分释放,AE事件逐渐减少,AE特性表现为随着压力的增加,AE信号数出现收敛现象,说明纤维缠绕壳体结构性能良好。王飞等^[56]对某型号航天器的碳纤维缠绕气瓶展开了AE检测试验研究,结果表明气瓶在自紧过程中,纤维缠绕层受内压膨胀导致树脂基体及弱界面开裂时,产生大量低于80 dB的低幅值AE信号,而在纤维断裂时主要产生大量高于80 dB的高幅值AE信号。此外通过信号幅值的时域分布特性可以判断贮箱的缠绕质量,当自紧过程中,AE信号分布呈现“门洞”分布时说明贮箱的缠绕质量好;当“门洞”内部存在大量低幅值AE信号时,则说明贮箱的缠绕质量较差。

3.2 复合材料贮箱纤维断裂AE检测

纤维断裂主要是复合材料在缠绕、固化或服役过程中纤维受拉应力过大导致的,分为单束纤维断裂和多束纤维断裂。其中又以多束或多股纤维损伤对贮箱的结构性能影响最显著。

复合材料构件的损伤被认为是阶段性进行的,基体开裂和纤维基体脱粘是最先出现的缺陷^[57],一旦基体损伤达到饱和点,除了原有基体裂纹继续扩展外,危害显著的纤维断裂现象也会随之发生^[58-59],因此,纤维断裂和基体分层开裂一般是同时存在于贮箱的结构损伤产生过程中,而且两种损伤类型都容易形成突发型AE信号。图4为浙江大学某IV型复合材料贮箱爆破试验结果^[60],从微观扫描电镜图片可以明显看到纤维断裂、基体开裂和基体分离损伤是同时存在的。实际上,在同一构件的性能

失效过程中,不同类型损伤产生的AE信号通常满足:纤维断裂信号强度 $\geq$ 基体开裂信号强度 $\geq$ 脱粘信号强度。如文献[56]贮箱“自紧”过程中,加压至自紧压力的30%左右,大量的基体开裂和部分纤维断裂导致了丰富的高振幅AE信号,大致加压至自紧压力的55%时,除了基体开裂和纤维断裂产生AE信号外,纤维与基体界面发生了脱粘分离导致了大量的低振幅AE事件。文献[61]对缠绕型复合材料气瓶的充放气疲劳试验进行AE监测,得到了同样的研究结果。

但有关复合材料及其复合材料构件的AE检测研究表明,简单从AE信号的时域波形及信号强度区分纤维断裂与其他损伤类型效果往往不是很理想,有效的时域辨识往往需要多种的信号处理技术的融合。李伟等^[62]针对纤维增强复合材料压力容器在水压爆破过程中的损伤模式识别问题,利用K均值聚类算法将经预处理后的AE信号分为3类:第1类AE信号来源于基体开裂,约占信号总量的90%,其AE幅值主要集中在40~70 dB,能量约为几十J;第2类信号源于基体与纤维的分层损伤,约占信号总量的7%,AE幅值集中分布在60~90 dB,能量约为几百J;第3类则来源于纤维断裂,约占信号总量的3%,AE幅值集中分布在80~100 dB,AE能量可达上万J。此外,模态AE研究表明通过AE信号的频域特征(主频分布和频谱形状),纤维束断裂产生的AE信号波形可以被区分^[63]。文献[63]还指出在复合材料贮箱试验中,在纤维发生断裂后可以观察到一种极窄带波,尽管纤维断裂波在时域上与基体断裂波形相似,但两者在频域特性上差异明显。由于两者的拉伸模量差异大,纤维断裂将产生比基体裂纹事件高得多的高频应力波成分。

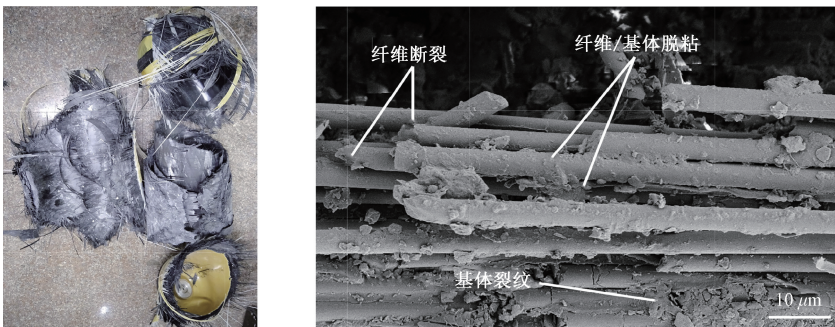


图 4 IV 型复合材料贮箱爆破试验^[60]

Fig. 4 Burst test of type IV composite tank^[60]

Liao 等^[60] 利用基于相关性和经验模态分解的 K-Means 聚类算法分析了 IV 复合材料贮箱在水压测试和爆破测试中采集的 AE 信号,有效从 2 种试验中地分离出了 3 类 AE 簇(如表 4 所示):CL-1、CL-2 和 CL-3,分别对应贮箱基体开裂、纤维/基体脱粘、纤维断裂损伤 3 种结构失效模式,而且 3 类 AE 信号簇在聚类振值、绝对能量及 AE 能量 3 个聚类特征参数上都具有明显的辨识度。如图 5 所示,不论是水压试压还是爆破试验,3 类 AE 信号簇在频域分布上具有明显的区别:基体开裂时,信号主频分布在 100~200 kHz,为低频 AE 信号(图 5(a)和(d));纤维/基体脱粘损伤产生的 AE 信号主频分布在 210~320 kHz,为中频 AE 信号(图 5(b)和(e));纤维发生断裂时,AE 信号主频分布在 390~460 kHz,为高频 AE 信号(图 5(c)和(f))。在该团队 2020 年开展的另一项研究中^[64],研究人员根

据碳纤维束和树脂试件的聚类结果监测 IV 贮箱水压爆破过程分析,贮箱在第 1 阶段同时存在基体开裂和脱粘损伤;在第 2 阶段基体开裂信号快速增加,基体脱粘信号显著增加,同时开始出现少量的纤维断裂 AE 信号,表明贮箱存在激烈的损伤积累;第 3 个阶段 3 种 AE 信号迅速增加,表明贮箱结构稳定性迅速下降,即将发生破坏性失稳。文献[16]采用光学测量和 AE 相结合的方法研究 IV 型高压贮箱的损伤行为。通过将持续时间、绝对能量和振幅进行关联分析得出 A、B 和 C 3 种类型信号,A 型表现为低振幅低能量,对应基体开裂,B 型信号振幅为 70~100 dB,对应纤维/基体界面脱粘,主要出现在特定加载速度下的第 2 个循环周期中,而 C 型振幅为 40~70 dB,持续时间大于 1 ms,在第 1 和第 2 循环周期中都存在,其可能来源是贮箱内部摩擦导致。

表 4 IV 复合材料贮箱的 AE 信号聚类结果

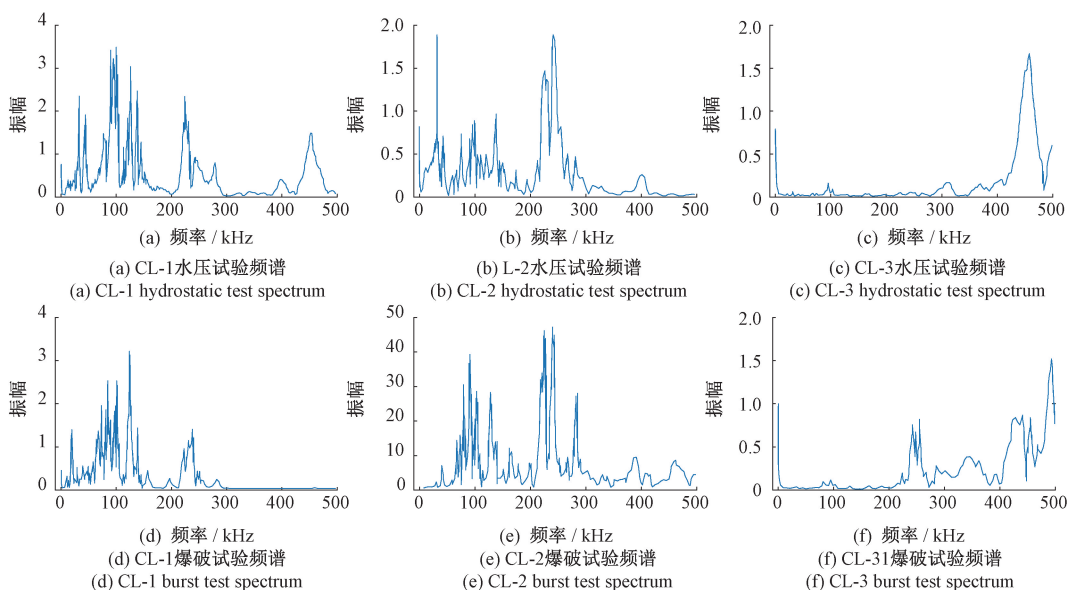
Table 4 AE signal clustering results for IV composite tanks

AE 参数	水压测试			爆破测试		
	CL-1	CL-2	CL-3	CL-1	CL-2	CL-3
AE 振幅/dB	40~55	50~72	70~90	40~63	57~76	70~100
AE 能量/ 10^3 aJ	0~2	2~40	>40	0~3	6~60	>60
AE 能量	0~10	10~100	>100	0~20	20~90	>90

Lepikhin 等^[65]采用 AE 技术对碳纤维复合材料贮箱的气动强度试验过程进行动态监测,发现在加载后期会出现两类 AE 信号:宽带型信号和窄带型信号,宽带型 AE 信号其特征在于上升时间短下降时间长,低频带信号能量高,主要是由于基体损伤发展导致的,这种损伤对于贮箱强度影响不大;窄带型 AE 信号波形特征则表现为上升和下降时间短,对应于能够导致贮箱结构强度降低的纤维断裂,该损伤类型会导致贮箱结构的低载荷失效。因此,窄带型 AE 信号存在情况可以作为贮箱结构安全状态的评估依据。

相关研究表明,累计 AE 数、累计 AE 能量等统计参

数与复合材料结构的不同损伤类型之间存在对应关系^[66]。Chou 等^[67]监测碳纤维复合材料压力容器在恒定载荷和循环载荷下的损伤演变行为,结果表明在最初的 100~200 次循环加载周期内,AE 次数显著增加,有限元分析表明这主要是由于强度较弱的纤维断裂导致的。而随着加载过程的进行,累计 AE 数增加速度逐渐变慢。在恒定载荷加载试验中,累计 AE 计数具有同样的趋势,说明记录的大多数 AE 计数是由于碳纤维的断裂产生的。2018 年 Tapeinos 等^[68]在欧盟的“The 7th Framework Program”和荷兰经济事务部的资助下,对半径为 145 mm 的 IV 型多球形复合材料包覆压力容器的结构性能展开了水压

图5 IV型聚合物内衬贮箱试验^[60]Fig. 5 Type IV polymer lined tank test^[60]

爆破 AE 监测试验,发现总应变能(所有 AE 传感器的累积应变能之和)与贮箱内部压力存在高度非线性行为(图 6(a)),基体开始发生损伤时,总应变能曲线增长速率明显加快,且随着贮箱损伤加剧,总应变能曲线发生多次突变,增长速率越来越快;而从单个 AE 传感器的能量曲线看(图 6(b)),除了 1 号传感器受复合材料衬垫影响始终为低能级状态外,所有传感器在贮箱发生结构损伤之前,AE 信号能量曲线始终为 0,在损伤演变过程中,每个 AE 传感器的能量曲线有所差异,通过 AE 能量曲线的变化趋势,可以大致判断纤维损伤的区域(5 号传感器位置附近)。

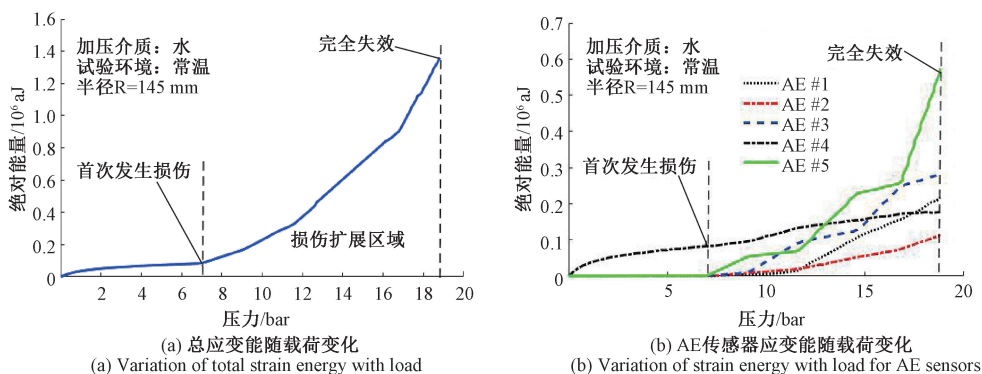
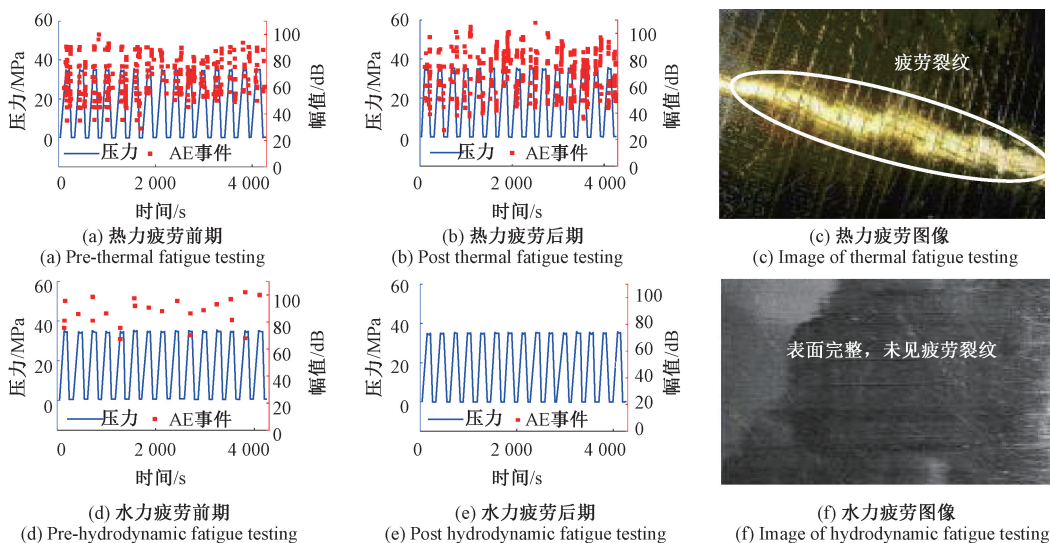
3.3 复合材料贮箱其他损伤类型 AE 检测

低温复合材料防渗漏性能的研究是其实现工程应用的关键,对于承装小分子低温介质(液氢)的航天运载器推进剂贮箱而言,其渗漏行为主要包含扩散渗漏和微裂纹渗漏。在贮箱的制造过程中,复合材料实际上已经经过了一次优化选择,而且流体分子经过无微裂纹和内部缺陷的复合材料的扩散速率很低^[69],因此流体通过复合材料发生渗透导致贮箱结构失效的可能性极小。更为常见的是由于纤维与聚合物基体的热膨胀系数差异,导致在热力载荷的耦合作用下,低温复合材料的树脂基体或界面产生了对于贮箱结构影响显著的热应力^[70],并最终引发贮箱的低应力微裂纹损伤。Lin 等^[71]利用 AE 技术对金属内衬复合材料贮箱在水力和大气热力疲劳作用下的损伤行为进行监测,如图 7(a)和(b)所示,热力循环载荷作用下,复合材料的界面强度下降导致出现脱粘损伤,并导致微观裂纹的成

核与扩展^[72],在监测前期和后期均存在大量的 AE 现象;而水力疲劳时,贮箱没有明显的热载荷作用,只在前期阶段观测到少量的 AE 现象(如图 7(d)所示),在循环加载后期没出现超过阈值的 AE 现象(如图 7(e)所示)。光学检测发现,热力疲劳载荷作用下的贮箱表面出现微裂纹损伤(如图 7(c)所示),而水力疲劳时贮箱表明没发现结构损伤(如图 7(f)所示)。随后的爆破试验发现,热力疲劳导致贮箱结构性能退化,经大气热力疲劳后,贮箱的爆破压力下降了 9.6%。

尽管微裂纹对于贮箱结构的整体强度影响较小^[73],但是微裂纹的存在会导致液体或气体在该区域发生渗漏导致贮箱结构失效。如 NASA 于 1999 年展开的 X-33 项目计划研究表明,项目失败原因之一是由于氢气通过基体微裂纹渗透到复合材料夹层结构的核心造成了高于预期的内应力^[74-75]。因此,AE 技术在低温复合材料构件抗渗漏的检测研究主要是通过对低温复合材料贮箱的微裂纹损伤进行监测,间接达到泄露检测效果。NASDA 在对无内衬 CFRP 贮箱进行常温循环加载时,发现贮箱基体发生开裂出现高振幅突发型 AE 信号,而流体经贮箱的微裂纹发生泄露时,将会产生大量低振幅的连续型 AE 信号^[52-53]。

分层损伤也是复合材料结构常见的损伤形式,主要是由于复合界面特性差异和界面多种形式应力相互耦合作用导致的^[76-77]。在关于复合材料纤维缠绕壳体外载荷试验的 AE 监测中发现,树脂开裂会产生大量低于 80 dB 的低振幅 AE,而纤维断裂与分层损伤均产生了大于 80 dB 的高振幅 AE 信号,但可以通过 AE 信号波形的持

图6 应变能随载荷变化^[68]Fig. 6 Strain energy varies with load^[68]图7 复合材料贮箱热力疲劳和水力疲劳试验^[71]Fig. 7 Thermal fatigue and hydraulic fatigue test of composite tank^[71]

续时间加以辨识;高幅值、长持续时间(大于80 dB,持续时间3 ms以上)的连续AE信号是壳体分层损伤导致的(如图8(b)和(c)所示),其频谱分布相对要复杂;而纤维断裂产生的AE信号具有极强的突发性、持续时间短(3 ms以内,如图8(a)所示),且分层损伤是影响壳体外载荷强度的主要因素^[78]。对于具有较薄内衬的压力容器,内衬与复合材料层之间存在变形相容性不匹配现象会导致内衬出现屈曲变形,进而影响容器的结构完整性^[79-80]。针对这类超薄内衬复合材料容器的屈曲变形检测问题,Hu等^[21]通过AE技术监测了2个超薄内衬压力容器在静压试验过程中的AE特性,结果表明,加载过程中内衬发生塑性变形产生的AE信号振幅低于40 dB,复合材料层发生基体损伤产生的AE信号振幅分布在40~60 dB;保压阶段压力容器整体结构压力达到相对平衡状态基本无AE现象,而卸载过程中,1号容器采集到

的AE信号仍集中分布在40~60 dB,而2号除了40~60 dB信号之外还出现大量大于80 dB的AE信号,观测结果表明2号容器除了基体裂纹之外,内衬还出现了局部的屈曲变形损伤,80 dB以上的AE信号正是内衬屈曲失效导致的。

此外,摩擦也是常见的AE现象来源,所产生的AE信号对复合材料贮箱的过程监测也有表征作用。文献^[65]研究结果表明加载前期,内衬与外部纤维发生摩擦将产生一种模态复杂的AE信号,该类型AE信号的振幅随时间的变化可分为两个阶段:AE信号振幅增加区域和振幅减小区域,振幅增加说明该阶段贮箱内衬在发生快速的变形现象,振幅减小则说明衬垫变形速率变慢。这种复杂的摩擦AE信号存在可以作为贮箱损伤的严重程度的评价,因为只有当压力远超贮箱的设计标准导致贮箱发生结构失效性破坏时,才会有其他突发型AE信

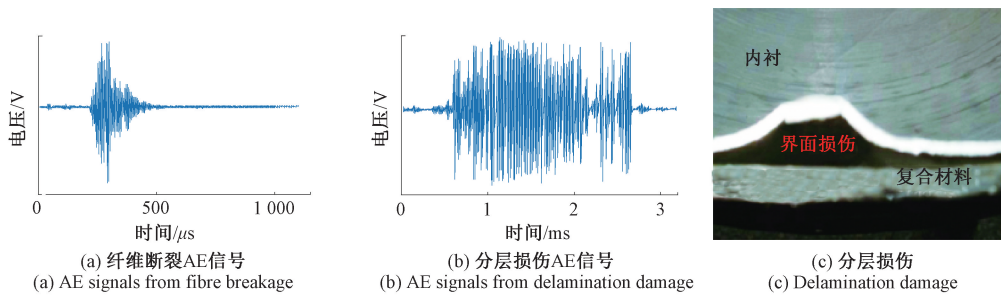


图 8 两种典型损伤 AE 信号^[78]

Fig. 8 AE signals of two typical damages^[78]

号的出现。贮箱发生分层损伤导致界面相互摩擦也是常见的局部二次 AE 源,因此界面摩擦产生的 AE 信号可以从侧面反映贮箱结构的分层损伤大致情况。

综上所述,AE 监测方法可以实现对复合材料贮箱结构损伤过程的连续、无损、原位表征,表 5 为作者从现有研究文献总结关于复合材料贮箱常见损伤类型的 AE 特征指标。由于铺层结构、基体类型、成型工艺以及服役环境等因素的影响,复合材料贮箱失效机制复杂,形式多样,到目前为止,AE 监测方法主要用于复合

材料贮箱结构损伤的定性评价,而关于损伤类型的精确辨识及损伤程度量化等方面还有待进一步的发展,特别是贮箱结构的剩余结构强度的评估与预测,需要其他更为有效技术手段的融合。此外,还应注意到国外如 NASA、波音公司等已经将 AE 技术与其他监测技术现结合并应用于工程实际,而国内许多相关研究大多仍停留在实验室或服役环境模拟试验研究阶段,对于贮箱在实际工程应用过程中的结构性能退化情况的研究仍较欠缺。

表 5 复合材料贮箱常见损伤类型的 AE 特征

Table 5 AE characteristics of common types of damage to composite tanks

参数	损伤类型		
	基体/弱界面开裂	分层损伤	纤维断裂
AE 振幅/dB	40~70	60~90	80~100
AE 频率/kHz	100~200	210~320	390~460
AE 能量	AE 事件能量值低(一般只有几十 mV·ms)	AE 事件能量值有所增加(约为几百 mV·ms)	AE 事件能量值极大(可达几万 mV·ms)
AE Waveform characteristics	低振幅连续型宽带信号,持续时间长(>3 ms)	高振幅连续型宽带信号,持续时间长(>3 ms) 上升时间短下降时间长	高振幅突发型窄带信号,持续时间短(<3 ms) 上升和下降时间短

4 AE 在复合材料贮箱监测上应用的发展趋势与挑战

4.1 复合材料贮箱 AE 监测发展趋势

复合材料贮箱严酷的服役环境使其容易发生各种导致构件承载能力和疲劳性能急剧下降的结构损伤,甚至是结构失效性破坏,有效评估复合材料贮箱的结构健康情况是保证航天运载系统正常运作的关键问题之一。AE 监测技术是实现复合材料贮箱结构性能动态监测和评价的有效技术手段之一,在贮箱性能评价上已有了许多成功的案例,综合现有研究,未来 AE 技术在复合材料贮箱上的应用趋势如下。

1) 复合材料贮箱结构损伤模式智能化识别

现有研究表明 AE 技术用于复合材料贮箱损伤模式辨识是可行的,尽管对于有些损伤类型(如气体泄露和界面摩擦),时域波形的分辨率较低,但 AE 技术在表征信号特性时具有足够多的特征参数,如上升时间、幅值、平均频率、质心频率、持续时间,振幅、能量等^[81],通过对 AE 信号的多尺度描述能够实现损伤模式的有效辨识。另外起源于机器学习的深度学习提供一种在多个抽象层次上自动学习特征的有效方法,允许直接从数据中学习复杂的输入到输出功能,而不依赖于特征提取。因此将 AE 监测技术与深度学习相结合实现对复合材料贮箱的结构损伤模式的智能化辨识是未来复合材料贮箱结构健康监测的发展方向之一。

2) 复合材料贮箱渐进损伤演变监测与剩余结构强度预测

贮箱结构性失效是一个循序渐进的过程,并不是所有损伤模式都会导致贮箱结构强度发生突发性降低导致贮箱结构的功能性失效。因而利用 AE 技术对复合材料贮箱的结构损伤进行动态监测,并利用有效的信号处理手段提取高表征性的 AE 特征参数作为贮箱结构剩余结构强度的评判依据,进而借助相应的预后方法预测贮箱结构的剩余寿命,也是未来复合贮箱结构性能 AE 监测发展的一个趋势。

3) 复合材料贮箱热应力、机械载荷等多物理场耦合 AE 监测

复合材料自身结构的复合性和贮箱低温服役环境的特殊性,导致复合材料贮箱结构的损伤和破坏失效机制的多样性。目前复合材料低温贮箱结构性能地面 AE 监测研究大多停留在单一物理参量(如机械载荷)的损伤表征上,然而低温复合材料贮箱在服役过程中,除了有循环压力导致的结构响应应力外,快速的温度变化也会导致贮箱结构产生交替的拉压热应力使其极易发生低应力破坏^[82],贮箱结构失效往往是力和温度等多物理场共同作用导致贮箱结构渐进损伤的结果,单一的物理参量的 AE 表征无法全面反映贮箱结构的损伤和破坏机制。因此,在地面试验中开展复合材料贮箱结构损伤的热、力等多物理场耦合 AE 监测,建立 AE 信号-机械载荷-温度应力-贮箱结构渐进损伤之间的关联,为进一步的实际飞行服役研究提供基础借鉴,将会是 AE 监测技术在复合材料结构损伤检测领域研究应用的一个新课题。

4) 实际飞行服役中贮箱结构性能监测研究

贮箱结构性能与在役环境关系密切,目前国内有关复合材料贮箱结构健康 AE 监测大多基于单一影响变量的地面模拟试验展开的,尽管地面测试为贮箱结构的设计优化及结构健康评价提供了大量的基础数据,但地面模拟环境与实际的太空环境仍然存在差距。如实际服役环境下,贮箱除了承受常见交变冲击载荷外,飞行姿态及内部压力变化还会导致液体晃动形成流固耦合、热力耦合现象,振动严重时甚至导致贮箱发生结构性失稳破坏^[83]。因此,人们对于贮箱在实际飞行服役过程中的结构耐久性的认识仍是不足的,进一步发展结合 AE 技术等多种无损检测技术在内的结构健康监测技术,并用于贮箱等关键部件实际飞行服役过程中的结构性能监测,也是 AE 技术在贮箱结构监测应用上的一个发展方向。

5) 贮箱飞行服役状态下结构健康的可视化分析与智能化评估

AE 技术作为结构健康监测技术体系里重要组成部分,是实现复合材料贮箱等关键部件的结构健康监测的有效技术手段之一,通过该技术实现复合材料贮箱飞行

服役过程中的结构性能退化的实时 AE 监测,直观地展示贮箱服役过程中的实时健康状态,达到贮箱结构功能完整性的即时性可视化监测及智能化评估,对于保证航天运载器的有序运作及充分降低航天运载器在寿命周期内的发射成本均有现实意义。因此,根据实时监测产生的 AE 信号等数据实现贮箱飞行服役状态的可视化监测与智能化评估,将会是 AE 监测技术在复合材料贮箱结构健康实时监测评价的一个新课题。

4.2 主要挑战

尽管经过国内外学者的共同努力,AE 技术在复合材料贮箱结构健康监测方面已经有了较大的进展,但是仍存在一些制约因素,以下几个方面是未来需要解决的重点。

1) 如何消除复杂的服役环境对 AE 监测结果的影响。

AE 监测技术在复合材料贮箱上应用的一个显著制约因素就是监测系统的服役环境。高灵敏度 AE 传感器在实现贮箱结构损伤信号的高精度采集的同时,带来的不可忽视的问题就是监测系统对环境变化的高度敏感。环境变化(噪声、电磁干扰等)必然导致监测信号产生变化,从而影响 AE 监测系统结果的可靠性,这是目前制约 AE 技术工程应用的一个关键因素。因此如何有效消除复杂的监测环境对于贮箱损伤监测结果的影响,形成通用化的处理体系,提高 AE 技术在工程实际监测应用中的适用性仍是目前亟需进一步研究的重点。

2) 如何实现监测网络内部 AE 传感器性能状态的实时有效评价。

损伤 AE 信号的采集是进行贮箱结构性能评价的基本前提,这过程依赖于 AE 传感器的性能状态,而贮箱工作温差等工作特性会对 AE 传感器的性能产生影响,甚至造成传感器发生功能性失效,进而导致监测系统对贮箱结构性能状态的误判与错误性修复指导。因此实现监测网络内部 AE 传感器性能状态的实时评价和补偿也是目前面临的挑战。

3) 如何实现不同损伤和破坏模式 AE 信号特征的有效提取,提高 AE 信号特征值的指纹特性,实现对贮箱结构损伤类型的准确辨识。

贮箱结构失效模式复杂,单一损伤模式产生的 AE 信号在评价贮箱性能时具有极高的分辨率,然而实际情况下贮箱损伤往往同时存在多种不同失效模式,而某些失效机制产生的 AE 信号在时域特征上具有较高的相似性,甚至出现 AE 特征重叠使得 AE 信号对于某一特定损伤模式的指纹特性不突出,此时直接基于原始 AE 信号的时域特征进行损伤模式就会出现辨识分辨率低的现象。结合 AE 特征参数和有效的信号处理手段挖掘 AE 信号特征,提高 AE 信号特征值的指纹特性,实现贮箱结

构损伤模式的准确甄别,对于揭示贮箱损伤破坏机制具有积极作用。

4) 如何利用 AE 技术实现复合材料贮箱结构损伤监测从损伤定性评价向损伤定量评价发展。

一个完整的结构健康评价一般应包括损伤有无判定、损伤定位、损伤类型辨识、损伤量化评价 4 个层面。目前有关复合材料贮箱结构性能 AE 监测大多只涉及损伤有无判定、损伤定位、损伤类型辨识 3 个层面的定性评价,而对于损伤量化评估的研究仍没有取得质的发展。损伤量化评价是贮箱结构损伤演变监测和剩余结构强度预测的前提之一,对于贮箱的全周期健康评价研究具有重要意义,如何实现损伤监测从损伤定性评价向结构损伤量化评价的发展也是目前 AE 技术面临的一个挑战。

5) 如何实现飞行服役过程中贮箱实时 AE 监测数据的智能化分析处理。

将 AE 技术融入到贮箱结构健康监测系统中,对贮箱实际飞行服役状态进行实时动态监测必然产生包含有贮箱健康状态的监测数据,及时快速有效地实现监测数据的智能化分析处理,以便及时根据监测结果调整控制策略,是保证航天器安全高效运行的关键问题之一。但是实际工程应用中,单一的 AE 监测方法无法实现复合材料结构内部损伤演变的可视化分析,而互补监测技术为复合材料结构健康评估提供了更为丰富信息^[84-85],因此航天器健康监测与管理体系一般还融合了其他无损检测和健康监测技术,产生数据量大且类型丰富。如何实现 AE 监测数据的快速智能化分析处理及其与其他类型数据的有机融合也是一个不得不面对的挑战。

5 结 论

本文综述了 AE 技术在复合材料贮箱结构损伤监测上的应用研究现状,包括复合材料贮箱基体损伤 AE 检测、纤维断裂 AE 检测及复合材料贮箱其他常见结构损伤类型 AE 检测研究;并讨论了复合材料贮箱结构损伤 AE 监测的发展趋势及面临的挑战,旨在为今后复合材料贮箱结构健康监测研究提供方向借鉴,促进 AE 技术在该研究领域进一步发展,早日实现从实验室研究走向工程实际应用

参考文献

[1] BUDHE S, BANEJA M D, DE B S. Bonded repair of composite structures in aerospace application: A review on environmental issues[J]. *Applied Adhesion Science*, 2018,6(1):1-27.

[2] 梁智洪,詹超,张芝芳. 基于频率识别纤维增强树脂

复合材料加筋板的分层损伤[J]. *复合材料学报*, 2019,36(11):2614-2627.

LIANG ZH H, ZHAN CH, ZHANG ZH F. Frequency-based delamination detection in stiffened fiber reinforced polymer composite plates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(11): 2614-2627.

[3] 徐伟,曹玉岩,郝亮,等. 复合材料机翼试验-数值建模方法及气弹分析[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(10):237-246.

XU W, CAO Y Y, HAO L, et al. Combined experiment and numerical modeling approach for the composite material wing and aeroelastic analysis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019,40(10):237-246.

[4] 湛利华,关成龙,黄诚,等. 航天低温复合材料贮箱国内外研究现状分析[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(16):79-87.

ZHAN L H, GUAN CH L, HUANG CH, et al. Analysis of research status of composite cryotank for space [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(16): 79-87.

[5] 顾名坤,何巍,唐科,等. 中国液体运载火箭结构系统发展规划研究[J]. *宇航总体技术*, 2021,5(2): 55-67.

GU M K, HE W, TANG K, et al. Research on the development plan of chinese liquid launch vehicle structure system [J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2021, 5(2): 55-67.

[6] KHOSRAVANI M R. Composite materials manufacturing processes[C]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 110:1361-1367.

[7] YONEMOTO K, YAMAMOTO Y, OKUYAMA K, et al. Application of CFRP with high hydrogen gas barrier characteristics to fuel tanks of space transportation system[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*, 2009,7(ists26):13-18.

[8] 卿新林,刘琦埭,张雨强,等. 飞行器复合材料全寿命结构健康监测技术[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2021,60(3):614-629.

QING X L, LIU Q J, ZHANG Y Q, et al. Life-cycle health monitoring technology for aircraft composite structures [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2021, 60(3): 614-629.

[9] LIU N, MA B, LIU F, et al. Progress in research on composite cryogenic propellant tank for large aerospace vehicles [J]. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 2021,143(14):106297-106314.

[10] HUANG C, REN M F, LI T, et al. Trans-scale

- modeling framework for failure analysis of cryogenic composite tanks [J]. *Composites Part B Engineering*, 2016, 85: 41-49.
- [11] KANG H, PARK J, KANG D, et al. Strain monitoring of a filament wound composite tank using fiber Bragg grating sensors [J]. *Smart Materials & Structures*, 2002, 11(6): 848.
- [12] 惠虎, 柏慧, 黄淞, 等. 纤维缠绕复合材料压力容器的研究现状 [J]. *压力容器*, 2021, 38(4): 53-63.
- HUI H, BAI H, HUANG S, et al. Research on fiber composites overwrapped pressure vessels [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2021, 38(4): 53-63.
- [13] CATTY J. Acoustic emission testing-defining a new standard of acoustic emission testing for pressure vessels: Part 2: Performance analysis of different configurations of real case testing and recommendations for developing a new guide for the application of acoust [J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2010, 28: 11-31.
- [14] QIU F, DAI G, ZHANG Y, et al. Research on acoustic emission signal acquisition and acoustic source identification of tank floor corrosion [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2015, 22(7): 75014-75021.
- [15] DAHMENE F, YAACOUBI S, EL MOUNTASSIR M, et al. Towards efficient acoustic emission testing of COPV, without felicity ratio criterion, during hydrogen-filling [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(2): 1359-1368.
- [16] EL A, JCD B, JCG A, et al. Instrumented tests on composite pressure vessels (type IV) under internal water pressure [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 46(1): 1-13.
- [17] 康开华, 付丽, 石宇萌, 等. 美国最新研制的无内衬全复合材料低温压力容器 [J]. *航天制造技术*, 2020, 223(5): 60-62.
- KANG K H, FU L, SHI Y M, et al. New linerless, all-composite cryogenic pressure vessels developed in the USA [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2020, 223(5): 60-62.
- [18] 黄诚, 雷勇军. 大型运载火箭低温复合材料贮箱设计研究进展 [J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(2): 1-7.
- HUANG CH, LEI Y J. Research progress on design of composite cryogenic tank in large launch vehicle [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2015, 45(2): 1-7.
- [19] YAACOUBI S, MCKEON P, KE W, et al. Towards an ultrasonic guided wave procedure for health monitoring of composite vessels: Application to hydrogen-powered aircraft [J]. *Materials*, 2017, 10(9): 1097.
- [20] DAHMENE F, YAACOUBI S, BITTENDIEBEL S, et al. Use of acoustic emission for inspection of various composite pressure vessels subjected to mechanical impact [J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2018, 35: S295-S305.
- [21] HU Z, LIU H, WANG R, et al. The study on buckling deformation of composite pressure vessel based on acoustic emission signals [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 87-88: 445-450.
- [22] 黄诚, 刘德博, 吴会强, 等. 我国航天运载器复合材料贮箱应用展望 [J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2016, 33(2): 27-35.
- HUANG CH, LIU D B, WU H Q, et al. Application prospects of composite propellant tanks in domestic launch vehicles [J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2016, 33(2): 27-35.
- [23] MCCARVILLE D A, GUZMAN J C, DILLON A, et al. Design, manufacture and test of cryotank components [J]. *Comprehensive Composite Materials II*, 2018, 3: 153-179.
- [24] 张辰威, 张博明. 复合材料贮箱在航天飞行器低温推进系统上的应用与关键技术 [J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2747-2755.
- ZHANG CH W, ZHANG B M. Application and key technology of composites tank in space cryogenic propulsion system [J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2747-2755.
- [25] SIPPEL M, KOPP A. Progress on advanced cryo-tanks structural design achieved in CHATT-project [C]. 14th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing, 2016.
- [26] 史汉桥, 高坤, 刘德博, 等. 国外低温复合材料贮箱渗漏性能研究进展 [J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(5): 8-13.
- SHI H Q, GAO K, LIU D B, et al. Progress on leakage performance of cryogenic composite tank abroad [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2020, 50(5): 8-13.
- [27] 武湛君, 陈铎, 李世超, 等. 低温复合材料贮箱关键技术研究应用进展 [J]. *航空制造技术*, 2021, 64(11): 14-23.
- WU ZH J, CHEN D, LI SH CH, et al. Research and application progress of key technologies for composites cryogenic tanks [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(11): 14-23.
- [28] HAGGUE M, MAHI A E, JENDLI Z, et al. Static and fatigue characterization of flax fiber reinforced thermoplastic composites by acoustic emission [J]. *Applied Acoustics*, 2018, 147: 100-110.

- [29] 赵伟栋, 张宗强, 耿东兵, 等. 低温聚合物基复合材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2003(5): 21-25.
ZHAO W D, ZHANG Z Q, GENG D B, et al. Progress of research on cryogenic polymer composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2003(5): 21-25.
- [30] 廖兴升, 梁智洪, 傅继阳, 等. 基于频率变化预测玻璃纤维增强树脂复合材料层合板的剩余疲劳寿命[J]. 复合材料学报, 2021, 38: 1-15.
LIAO X SH, LIANG ZH H, FU J Y, et al. Prediction of remaining fatigue life of glass fiber reinforced polymer laminates based on frequency change [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 38: 1-15.
- [31] 徐君臣, 银建中. 纤维缠绕复合材料气瓶研究进展[J]. 应用科技, 2012(4): 64-71.
XU J CH, YIN J ZH. Progress in filament-wound composite gas cylinders [J]. Applied Science and Technolog, 2012(4): 64-71.
- [32] PARODI M, FIASCHI C, MEMMOLO V, et al. Interaction of guided waves with delamination in a bilayered aluminum-composite pressure vessel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(1): 3281-3291.
- [33] GUADAGNO L, LONGO P, RAIMONDO M, et al. Cure behavior and mechanical properties of structural self-healing epoxy resins[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 2010, 48(23): 2413-2423.
- [34] GRAUE R, KRISSON M, ERDMANN M, et al. Integrated health monitoring approach for reusable cryogenic tank structures[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2000, 37(5): 580-585.
- [35] GLAESSGEN E H, REEDER J R, SLEIGHT D W, et al. Debonding failure of sandwich-composite cryogenic fuel tank with internal core pressure [J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2005, 42(4): 613-627.
- [36] ZHANG M, LV H, KANG H, et al. A literature review of failure prediction and analysis methods for composite high-pressure hydrogen storage tanks [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (47): 25777-25799.
- [37] AVILA R O, ISLAM M S, PRABHAKAR P. Thermal gradient on hybrid composite propellant tank materials at cryogenic temperatures [C]. Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Phoenix, Arizona, USA, 2016.
- [38] 卢少微, 陈铎, 王晓强. 聚合物基复合材料制造过程在线监测技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2017, 538(19): 72-77.
LU SH W, CHEN D, WANG X Q. Review of in-situ cure monitoring techniques for polymer matrix composite manufacturing process [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 538(19): 72-77.
- [39] GODIN N, HUGUET S, GAERTNER R. Clustering of acoustic emission signals collected during tensile on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers[J]. NDT & E International, 2004, 37: 253-264.
- [40] XU D, LIU P F, CHEN Z P, et al. An Experimental analysis for damage monitoring in glass fiber/epoxy composites during fatigue tests by acoustic emission[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020, 20(6): 1-10.
- [41] 赫晓东, 赵俊青, 王荣国, 等. 复合材料压力容器无损检测研究现状[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009 (12): 87-91.
HE X D, ZHAO J Q, WANG R G, et al. Review on nondestructive inspection of composite pressure vessel [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009(12): 87-91.
- [42] XU D, LIU P F, LI J G, et al. Damage mode identification of adhesive composite joints under hygrothermal environment using acoustic emission and machine learning[J]. Composite Structures, 2018, 211: 351-363.
- [43] 阳能军, 黄定军. 声发射技术在复合材料损伤检测中的应用[J]. 振动与冲击, 2010, 29(S): 249-251.
YANG N J, HUANG D J. Application of acoustic emission technology on composite materials damage detection [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(S): 249-251.
- [44] 杨瑞峰, 马铁华. 声发射技术研究及应用进展[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2006(5): 456-461.
YANG R F, MA T H. A study on the applications of acoustic emission technique [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2006(5): 456-461.
- [45] LIU P F, CHU J K, LIU Y L, et al. A study on the failure mechanisms of carbon fiber/epoxy composite laminates using acoustic emission [J]. Materials & Design, 2012, 37: 228-235.
- [46] 范志涵, 张宇, 芮小博. 航天器舱壁结构碎片撞击声发射定位技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 178-184.
FAN ZH H, ZHANG Y, RUI X B. Research on space debris impact location of spacecraft bulkhead structure based on the acoustic emission technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 178-184.

- [47] 王蒙, 阳能军, 王新刚. 声发射检测技术研究现状与发展趋势 [C]. 第十届全国振动理论及应用学术会议, 2011:200-205.
- WANG M, YANG N J, WANG X G. Present situation and developing tendency of acoustic emission technique [C]. The 10th National Vibration Technology and Application (NVTA2011), 2011:200-205.
- [48] LIU P F, CHU J K, HOU S J, et al. Micromechanical damage modeling and multiscale progressive failure analysis of composite pressure vessel [J]. Computational Materials Science, 2012,60:137-148.
- [49] WANG L, ZHENG C, LUO H, et al. Continuum damage modeling and progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite pressure vessel [J]. Composite Structures, 2015,134:475-482.
- [50] HAN W Q, LUO Y, GU A J, et al. Damage modes recognition and hilbert-huang transform analyses of CFRP laminates utilizing acoustic emission technique [J]. Applied Composite Materials, 2016,23:155-178.
- [51] WILKERSON C. Acoustic emission monitoring of the DC-XA composite liquid hydrogen tank during structural testing: NASA technical memorandum 108520 [R]. National Aeronautics and Space Administration, 1996.
- [52] MIZUTANI Y, SHIMODA T, HE J, et al. AE monitoring of cryogenic propellant tank [J]. Journal of Acoustic Emission, 2002,20:194-205.
- [53] MIZUTANI Y, MORINO Y, TAKAHASHI H. Acoustic emission monitoring of CFRP tank at ambient and cryogenic temperature [C]. Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc Structures, Structural Dynamics, & Materials Conference, 2003.
- [54] 刘哲军, 葛丽, 王俊峰, 等. 复合材料气瓶声发射检测初步研究 [J]. 宇航材料工艺, 2011(2):120-123.
- LIU ZH J, GE L, WANG J F, et al. Acoustic emission testing of composite pressure vessels [J]. Aerospace Materials & Technology, 2011(2):120-123.
- [55] 熊建平, 王晓勇. 纤维缠绕壳体声发射检测技术研究 [J]. 航天制造技术, 2011(2):70-73.
- XIONG J P, WANG X Y. Research on acoustic emission testing for filament-wound case [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011(2):70-73.
- [56] 王飞, 周建平, 涂俊, 等. 纤维缠绕复合材料气瓶声发射检测技术研究 [J]. 航天制造技术, 2014(3):59-63.
- WANG F, ZHOU J P, TU J, et al. Acoustic emission testing of filament-wound composite gas cylinders [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(3):59-63.
- [57] KAZEMI M E, SHANMUGAM L, LI Z, et al. Low-velocity impact behaviors of a fully thermoplastic composite laminate fabricated with an innovative acrylic resin [J]. Composite Structures, 2020,250:112604.
- [58] ARTHUR M, ABDERRAHIM E M, ZOUHAIER J, et al. Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission [J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2016,90:100.
- [59] MONTI A E M A J. Experimental and finite elements analysis of the vibration behaviour of a bio-based composite sandwich beam [J]. Composites Part B Engineering, 2017,110:466-475.
- [60] LIAO B B, WANG D L, HAMDI M, et al. Acoustic emission-based damage characterization of 70 MPa type IV hydrogen composite pressure vessels during hydraulic tests [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019,44(40):22494-22506.
- [61] 林松, 王俊峰, 李红, 等. 复合材料气瓶高低温条件下的疲劳及爆破性能研究 [J]. 纤维复合材料, 2015,32(1):22-25.
- LIN S, WANG J F, LI H, et al. Fatigue behavior and burst characteristics of filament wound CFRP vessel under internal pressure and thermal-cryogenic conditions [J]. Fiber Composite, 2015,32(1):22-25.
- [62] 李伟, 付玉, 蒋鹏, 等. 基于 K 均值聚类的 FRP 复合材料容器损伤声发射信号模式识别 [J]. 压力容器, 2014,31(8):14-19.
- LI W, FU Y, JIANG P, et al. Pattern recognition of acoustic emission signals of FRP composite vessel damage based on K-means clustering [J]. Pressure Vessel Technology, 2014,31(8):14-19.
- [63] GORMAN M R. Modal AE analysis of fracture and failure in composite materials, and the quality and life of high pressure composite pressure vessels [J]. Journal of Acoustic Emission, 2011,29:1-28.
- [64] WANG D, LIAO B, HAO C, et al. Acoustic emission characteristics of used 70 MPa type IV hydrogen storage tanks during hydrostatic burst tests [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021,46(23):12605-12614.
- [65] LEPIKHIN A M, MOSKVICHEV V V, CHERNYAEV A P. Acoustic-emission monitoring of the deformation and fracture of metal-composite pressure vessels [J]. Journal of Applied Mechanics & Technical Physics, 2018,59(3):511-518.
- [66] AMIR R O, HEIDARY H, AHMADI M, et al. Unsupervised acoustic emission data clustering for the analysis of damage mechanisms in glass/polyester

- composites [J]. *Materials & Design*, 2012, 37 (37): 416-422.
- [67] CHOU H Y, MOURITZ A P, BANNISTER M K, et al. Acoustic emission analysis of composite pressure vessels under constant and cyclic pressure[J]. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2015, 70:111-120.
- [68] TAPEINOS N G, RAJABZADEH A, ZAROUCAS D S, et al. Evaluation of the mechanical performance of a composite multi-cell tank for cryogenic storage: Part II-experimental assessment [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(7):3931-3943.
- [69] 刘蓓威. 复合材料低温贮箱的开发与应用[J]. *飞航导弹*, 2006(3):59-62.
- LIU L W. Development and application of composite cryogenic tank [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2006(3):59-62.
- [70] KANG Z, YANZHONG L, YUAN M, et al. Experimental study on cool down characteristics and thermal stress of cryogenic tank during LN2 filling process[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 951-961.
- [71] LIN S, JIA X, SUN H, et al. Thermo-mechanical properties of filament wound CFRP vessel under hydraulic and atmospheric fatigue cycling[J]. *Composites Part B Engineering*, 2013, 46:227-233.
- [72] JU J, MORGAN R. Characterization of microcrack development in BMI-carbon fiber composite under stress and thermal cycling[J]. *Journal of Composite Materials*, 2004, 38(22):2007-2024.
- [73] HODGE A J. Evaluation of microcracking in two carbon-fiber/epoxy-matrix composite cryogenic tanks: NASA/TM-2001-211194 [R]. National Aeronautics and Space Administration, 2001.
- [74] MITAL S K, GYEKENYESI J Z, ARNOLD S M, et al. Review of current state of the art and key design issues with potential solutions for liquid hydrogen cryogenic storage tank structures for aircraft applications: NASA/TM-2006-214346 [R]. National Aeronautics and Space Administration, 2006.
- [75] GRIMSLEY B W, CANO R J, JOHNSTON N J, et al. Hybrid composites for Lh2 fuel tank structure [C]. Presented at the 33rd International SAMPE Technical Conference? Advancing Affordable Materials Technology, Seattle, WA, 2001.
- [76] 周国发, 傅彬益, 段治锋. 金属基聚合物内衬复合压力容器界面剥离失效及预防[J]. *中国塑料*, 2020, 34(1):69-75.
- ZHOU G F, FU B Y, DUAN ZH F. Interface peeling failure and prevention of metal-based polymer lined composite pressure vessel [J]. *China Plastics*, 2020, 34(1): 69-75.
- [77] DAVIJANI A, HAJIKHANI M, AHMADI M. Acoustic emission based on sentry function to monitor the initiation of delamination in composite materials[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(5):3059-3065.
- [78] 庞虎平, 冯琰妮, 崔万继. 复合材料缠绕壳体外载荷试验声发射信号分析[J]. *宇航材料工艺*, 2014, 44(3):98-100.
- PANG H P, FENG Y N, CUI W J. Analysis of AE in external load test of composite winding shell [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2014, 44 (3): 98-100.
- [79] 王荣国, 赫晓东, 胡照会, 等. 超薄金属内衬复合材料压力容器的结构分析[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(4):131-138.
- WANG R G, HE X G, HU ZH H, et al. Structure analysis of composite pressure vessel with ultra-thin metallic liner [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(4): 131-138.
- [80] 胡照会, 杜善义, 王荣国, 等. 超薄金属内衬 CFRP 压力容器树脂体系固化动力学[J]. *复合材料学报*, 2007(6):63-67.
- HU ZH H, DU SH Y, WANG R G, et al. Cure kinetics of the resin system for CFRP pressure vessel with ultrathin metallic liner [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007(6): 63-67.
- [81] 栗丽, 晏雄. 复合材料损伤失效的声发射检测研究进展[J]. *材料导报*, 2013(17):19-22.
- LI L, YAN X. Research progress on acoustic emission testing of damage and failure of composites [J]. *Materials Review*, 2013(17): 19-22.
- [82] TAPEINOS I G, ZAROUCAS D S, BERGSMAN O K, et al. Evaluation of the mechanical performance of a composite multi-cell tank for cryogenic storage: Part I-Tank pressure window based on progressive failure analysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(7):3917-3930.
- [83] 刘展, 冯雨杨, 雷刚, 等. 低温液氧贮箱晃动过程热力耦合特性[J]. *化工学报*, 2018, 69(S2):61-67.
- LIU ZH, FENG Y Y, LEI G, et al. Coupled thermal dynamic performance in cryogenic liquid oxygen tank under slosh excitation [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(S2): 61-67.
- [84] ZHANG P F, ZHOU W, YIN H F, et al. Progressive damage analysis of three-dimensional braided composites under flexural load by micro-CT and acoustic

emission[J]. *Composite Structures*, 2019,226:111196.

- [85] ZHAO W Z, ZHOU W. Cluster analysis of acoustic emission signals and tensile properties of carbon/glass fiber-reinforced hybrid composites[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019,18(5-6):1686-1697.

作者简介



王奕首,分别在2002年和2008年于大连理工大学获得学士学位和博士学位,现为厦门大学航空航天学院教授,研究方向为结构健康监测、发动机健康管理、先进传感技术、信息融合、机器学习等。

E-mail: wangys@xmu.edu.cn

Wang Yishou received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Dalian University of Technology in 2002 and 2008, respectively. He is currently a professor in the School of Aerospace Engineering at Xiamen University. His main research interests include structural health monitoring, engine health management, advanced sensing technology, information fusion and machine learning, etc.



刘德博,2007年于北京航空航天大学获得学士学位,2012年于北京航空航天大学获得博士学位,现为北京宇航系统工程研究所高级工程师,研究方向为火箭贮箱结构设计、贮箱结构健康监测等。

E-mail: liu_debo@163.com

Liu Debo received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2007 and 2012, respectively. He is currently a senior engineer at Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering. His main research interests include rocket tank design and tank structure health monitoring.



卿新林(通信作者),1991年于天津大学获得硕士学位,1993年于清华大学获得博士学位,现为厦门大学航空航天学院教授,研究方向为飞行器健康管理技术、结构健康监测技术、先进传感技术、复合材料结构检测与修理技术等。

E-mail: xinlinqing@xmu.edu.cn

Qing Xinlin (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Tianjin University in 1991, and received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 1993. He is currently a professor in the School of Aerospace Engineering at Xiamen University. His main research interests include aircraft health management technology, structural health monitoring technology, advanced sensing technology and composite material, structure detection and repair technology, etc.