

声发射技术在飞机研制和生产中的应用

美国物理声学公司 (PAC) 北京办事处

许凤旌

一· 声发射技术的原理及特征

· 声发射概念

声发射 (ACOUSTIC EMISSION 简称 AE) 是一种应用日趋广泛的现代无损检测和结构、材料研究的新技术。它的原理是: 受力构件的材料内部在损伤缺陷萌生、扩展过程中会释放塑性应变能, 应变能以应力波形式向外传播扩展, 这种现象即称声发射现象。声发射技术就是采用高灵敏度的声发射压电传感器安装于受力构件表面形成一定数目的传感器阵列, 实时接受和采集来自于材料缺陷的声发射信号, 进而通过对这些声发射信号的识别、判断和分析等对材料损伤缺陷进行检测研究和对构件强度、损伤、寿命等分析和研究。形象地比喻讲, 这是一种“听声”技术, 即像医生用听诊器对人体听声来诊病一样, 通过“听”材料内部故障声音 (声发射) 来对构件诊断和研究。

· 声发射技术的产生和发展

声发射技术产生于 50 年代, 起因于由德国科学家 KAISER 发现并以其名字命名的 KAISER 现象。由于声发射所表征的信号直接来自构件或材料的内部裂纹及缺陷等扩展的动态信息, 所以这种技术从诞生的一开始便引起人们的极大兴趣和关注。但早期的 50、60 年代, 由于人们对声发射信号特征的认识局限性, 以及计算机技术和信号处理技术发展水平的限制, 不能很好区分什么是来自于缺陷的声发射信号和环境噪声信号, 使声发射技术一直处于实验室研究阶段而很难应用于实际现场。70 年代由于人们发现了大部分构件和材料缺陷的声发射信号是高频信号, 大致在 100 KHz ~ 300 KHz 之间, 进而采用高频谐振传感器以及先进的信号处理技术大大排除了可听音范围内的环境噪声干扰, 使声发射技术开始走出实验室而进入现场实用阶段。

从 80 年代开始, 由于电子计算机技术和现代信号处理等手段进入声发射研究领域, 使声发射技术的应用领域和研究对象越来越广泛, 并取得广泛的成功。尤其进入 90 年代以后, 由于 80 年代中期以来声发射技术在许多领域的突破和成功, 使

得 AE 技术在无损检测和材料研究等方面愈来愈发挥举足轻重的作用。特别在航空航天领域，声发射在美国与欧洲的航空航天设计、研究与制造部门已成为一种必不可少的技术手段而广泛用于航空航天飞行器的设计、研制与结构测试。

· 声发射技术的特点和技术优势

作为一项新的无损检测技术，它最能直接反映材料内部缺陷、故障萌生及发展过程。它与其它常规无损检测手段，比如超声检测、射线探伤、涡流检测、磁粉等表面探伤方法相比，具有如下一些优点：

其一：它是一种动态实时技术，即不像其它方法是在缺陷出现后的事后检测中才能发现，而是实时发现和监测裂纹、缺陷的萌生，发展和破坏过程。

其二：是其整体性，即不像其它方法只是对具体的缺陷位置进行检测，靠缺陷的几何大小和形状来发现。对无法检查或没有检查到的部位无法知道有无缺陷。而 AE 技术通过安在构件表面一定数目的阵列传感器能够同时发现传感器阵列所覆盖的整体构件内任何位置的裂纹和缺陷。并由声发射技术的基本功能之一——时差定位技术确定缺陷的具体位置。

其三：是其高精度和灵敏度，严格来讲，材料在裂纹萌生时的塑性钝化阶段就伴随着声发射信号的产生。如果传感器和仪器设置较好，它可以发现非常小的裂纹萌生和扩展过程。

此外，由于它在工作时传感器位置是固定的，所有信号采集及处理都由系统来执行，而采用 CAT 技术（COMPUTER AID TESTING 计算机辅助测试）的现代声发射测试系统具有非常强的处理/分析能力，它可以将像其它无损检测手段由于人的主观和经验等因素所造成的结果偏差的影响减到最小。

在应力分析和动态监测方面，它能比常规的应变测量仪方法更直接、更有效，这主要表现在：

其一，应变测量及相应的应力分析方法只能反映构件某些位置的应力水平，而不能真正反映裂纹的出现和发展。尤其对于应力集中部位和塑性变形区域，这种方法更是无能为力；而声发射方法直接表征的是缺陷、裂纹的萌生及发展情况，这往往是工程问题的关键。尤其对于容易出现损伤缺陷的应力集中部位和塑性变形区域，它更直接、有效。

其二，应变测量只能测到应变片所在位置的表面应力应变水平，对于内部应力或未贴应变片的位置的应力应变水平及损伤状况是无法得知的；而 AE 技术是全局、整体技术，它能测出传感器阵列所覆盖区域内表面及内部任何位置的损伤情况；更可以进行在线监测。

其三，应变测量和应力分析技术无法直接揭示材料强度、剩余强度、损伤状况、断裂及疲劳性能和寿命等这些更值得人们关注的工程问题；而现代 AE 技术在

一些情况下已经可以直接揭示上述这些问题的规律和特征，并越来越在工程断裂力学、损伤力学等研究和应用方面大显身手。

正是由于 AE 技术上述这些独特优势和特点，使得它近年来在许多领域受到广泛应用和发展，如航空航天、石化、电力、铁路、核、机械、地质、桥梁、建筑、压力容器、材料、焊接、管道泄漏、直至农林业等都得到广泛应用，尤其在航空航天方面的应用和发展更为深入和成功。

二·声发射技术在航空领域的应用

航空航天领域由于其本身的行业特点和技术特点，它是许多新技术、新方法、新工艺等的广泛用武之地；也正是由于这个领域的大量工程需要，促进了包括声发射技术在内的许多新技术、新方法不断深入和发展。

据不完全统计，在目前的飞机种类中，从美国空军的 P-3、A4、F111、F14、F15、F16、RAH66；美国海军 CH47、SH60；英国皇家空军 VC-10；到波音的民机系列，如 707、720B、737、747、777 等；空中客车 AIR BUS340 以及 MD 公司系列都已将声发射技术作为常规的检测及研究手段。此外，在美国像 NASA、NAVY、US AIR FORCE，以及从事直升机研制生产的 BOEING VERTOL 公司，BELL HELICOPTER 公司，SIKORSKY 飞机公司等都将声发射技术大量用于直升机的研制和生产中。

AE 技术用于航空领域的应用，主要包括如下三个方面工作：

- 1.) 老化飞机的检测、维修和延寿方面；
- 2.) 飞机研制中的结构完整性和强度寿命研究及生产过程中的质量控制（QC）检测；
- 3.) 材料，尤其复合材料及结构的研究。

·老化飞机的检测、维修和延寿方面

由于 AE 技术具有全面、准确、快速等特点，70 年代开始，美国空军、BOEING 公司、MD 公司、以及 FAA 等就开始探索用 AE 技术检测在役飞机。这项工作于 80 年代在几种军用、民用飞机上取得成功而开始推广应用。

首先是美国空军与 PAC 公司合作对 F111 飞机在 -40°C 下，选择四个最恶劣的载荷条件进行试验并取得成功。经过大量的评估和研究测试，美国空军在 80 年代就已把 AE 作为 F-111 飞机执行预知维修计划的一部分，也使 F-111 飞机达到了最新的现代化维修水平。所有飞机在飞行 1000~2500 小时后进行一次 AE 检查；在 3000~5000 小时后进行第二次 AE 检查。所使用的设备是 PAC 专门研制的 SPARTAN 系统。

在 DAYTON, OH 的 WRIGHT 研究发展中心，GRUMMAN AEROSPACE

CORPORATION 等也与 PAC 合作对 F-15 战斗机进行了几年的全面试验研究。不仅使 AE 成为 F-15 飞机的定期检查手段，并以此为基础改写了损伤容限评价报告及空军结构维修计划[7]。

据悉，美国空军已将声发射做成机载设备安装在 F15、F16 等飞机上进行飞行状态下的实时监测。

90 年代初期，英国皇家空军开始将 AE 技术用于对 VC10 飞机的老化研究和检测并取得成功。由于飞机较大，用了四套 PAC 公司的 SPARTAN 系统，总数达 288 个声发射通道。载荷是通过给飞机加压的方式来实现的[8]。

在民用飞机方面，80 年代末期 PAC 公司与 FAA 合作对 BOEING 727B 飞机进行 AE 检测研究。AE 检测发现了多处裂纹和缺陷，所使用的压力来自于发动机的涡轮增压器。在强烈的发动机工作噪声和各种环境噪音情况下，声发射仪很有效地采集到裂纹和缺陷信号。在对 BOEING 727B 成功测试以后，BOEING 727S、707S、747、737、777 等都陆续开展 AE 检测[9][10]。

· 在飞机研制中的结构完整性和强度、寿命研制及生产过程中的 QC 检测方面

声发射技术早期在飞机领域的应用只是作为一种无损检测的方法。近年来由于飞机结构设计水平的不断提高，结构强度和寿命需求不断提高，尤其工程断裂力学的迅速发展以及大量用于飞机研制过程中的结构完整性研究，使得声发射技术不仅是一种无损检测方法，更是工程断裂力学和飞机损伤容限设计研究不可缺少的重要手段。

由于声发射技术表征的主要是在外力作用下材料内部裂纹的萌生及扩展情况，这本身就是断裂力学问题。早在 70 年代，人们就开始大量研究可以测到的声发射特征参数与断裂力学以及损伤特征之间的关系，比如：

- 。声发射记数率与应力集中系数的理论关系[11]；
- 。声发射记数与应力强度因子的关系[4]；
- 。声发射能量与裂纹前端 J 积分的关系[4]；
- 。断裂韧性、 K_{IC} 、 da/dN 等断裂力学参数与声发射参数间的定量关系等都在某些情况下得到证实和应用。

目前美国及欧洲大部分军用飞机、民用飞机及直升机的研制生产过程中对大部分的结构部件、材料及整机都进行声发射研究，比如：

在飞机部件的静力试验及强度研究中，通过 AE 监测能更早发现裂纹的萌生、位置及扩展情况；由于 AE 信号的出现及发展直接来自材料的屈服及裂纹发展过程，AE 参数的有关曲线也直接表征了裂纹的萌生及扩展过程，曲线的拐点或突变点直接对应 $\sigma - \epsilon$ 曲线的特征点及裂纹发展的三阶段，相应的载荷及应力值即对应极限载荷等强度参数，因而可直接了解和有效掌握部件的强度情况。

在部件的疲劳及寿命研究中，根据对疲劳裂纹的 AE 信号变化曲线可以表征出 da/dN 曲线等疲劳性能，进而根据载荷情况进行寿命预测和评估。比如 SIKORSKY AIRCRAFT 公司直升机的螺旋桨、尾端等承力部件都大量采用声发射技术进行强度和疲劳研究[12]。

在整机的静力及疲劳试验中，可以更有效地发现危害部位和危害程度，尤其对那些其他手段很难检测到的部位，声发射可以及时、准确地发现问题。比如，瑞典 SAAB 的 JAS-39 飞机近期用 PAC 公司 72 通道的声发射系统成功地完成了整机静力试验的声发射研究，取得非常满意的效果。目前正在进行整机疲劳试验的声发射研究。

对一些特殊部件，像轴承部件故障等，声发射技术都成功地解决了许多问题。比如美国海军 F14 飞机机翼的关键枢轴承经过六个月的研究试验，证明 AE 不仅可以及时发现轴承摩擦、咬合 (BINDING) 等故障，更可确认咬合故障的具体位置[13]。再如，PAC 公司近期与美国海军的一个研究项目已经成功地在直升机飞行状态下监测到螺旋桨支撑齿轮箱中齿轮的咬合脱落和齿轮裂纹，而且由于是工作状态，声发射传感器只能安在齿轮箱外部[14]。

在飞机的结构完整性研究和生产质量控制方面，除了像美国军机、民机系列大量使用声发射技术进行飞机结构完整性研究外，法宇航的海豚直升机对主要部件都建立了声发射强度准则和检测规范。哈尔滨飞机公司按照这些规范对其生产的直升机对于复合材料尾浆支撑部分、尾浆涵道、上垂尾、尾减速器支撑管及装配后的尾端部分都进行严格的声发射检测。

· 在复合材料及其构件方面的声发射应用

声发射技术在飞机的复合材料及其构件的研究和应用方面比金属材料更广泛和有效。这主要是由如下两方面原因决定的：

一方面，复合材料由于其各向异性、非线性和介质的非均匀性，其强度、寿命等力学特征和破坏机理比金属材料远为复杂，从而其它传统的检测和研究手段都更难胜任；另一方面，复合材料的损伤破坏时包括纤维断裂、分层、脱粘等缺陷形式的声发射特征比一般金属材料更明显，从而用声发射手段也更有效、准确。正因为这样，声发射技术在复合材料领域一直是最活跃、最成功的。而且近年来由于复合材料在飞机结构上的应用越来越广泛，从某种意义上讲也直接推动着声发射技术的研究和应用[5]。

复合材料的损伤形式包括纤维断裂、基体开裂、分层、脱粘、纤维/基体分离等多种形式。它的破坏机理也非常复杂。它的力学特征和强度特征更复杂。这些一直都是声发射技术的研究重点。早期的声发射技术主要以常规声发射特征参数比如能量分布、幅度分布等来研究复合材料的不同破坏形式和机理；近年来随着数字化

声发射技术的发展，更注重从基本的声发射波形特征及波模式特征等来研究。

在国外近年来，不论是军机、民机、还是直升机几乎所有的复合材料构件和结构都要进行声发射研究和检测，并由声发射来给出复合材料结构或整机的强度、寿命等破坏准则和安全准则。比如 80 年代末 90 年代初，BOEING 公司专门由 PAC 公司开发一套 64 通道的声发射系统用于 BOEING777 飞机等复合材料机翼等部件的声发射研究[9]；空中客车公司在 90 年代初期对 A340 飞机的复合材料机翼部位进行专门的声发射试验和研究，并在大量声发射数据基础上形成机翼构件的认可规程[15]。

此外，像 SIKORSKY AIRCRAFT 公司在 80 年代初就开始在 MH-53E 直升机的复合材料尾端旋转叶片以及 S-76 直升机的复合材料尾端旋转部件等进行声发射研究和应用。用 AE 进行的试验监测研究包括：

1.) 复合材料转子曲梁 (Rotor flexbeams) 静力试验；
2.) 大型复合材料飞机主体结构 (Airframe) 静力试验；
3.) S-76 尾端旋转部件疲劳试验；
4.) 典型的复合材料结构承力件疲劳试验；
5.) MH-53E 尾端旋转叶片疲劳试验。

这些声发射试验研究都取得不同程度的成功[12]。

总之，AE 技术在国外飞机研制、生产和检测中已被大量而广泛使用，在许多方面都已成为常规的检测、研究手段。但由于涉及到技术保密问题，尤其军机方面又涉及到军事秘密，而且声发射技术又是一种高新技术，这方面的大量研究、应用情况和结果都很少公开报道和发表，外界也很难了解具体情况。所以这里所列举的一些例子只是这个领域大量应用中很少的一部分。

实际上在美国，从 80 年代开始像 BOEING 公司、BOEING VERTOL 公司、MD 公司、BELL HELICOPTER 公司、SIKORSKY AIRCRAFT 公司、NASA、美国空军及空军的实验室及研究机构、GRUMMAN AEROSPACE 公司、WRIGHT 研究中心以及一些与飞机研制、生产、维修有关的公司，研究机构，实验室等每年都从 PAC 公司不断购买多台声发射设备，甚至有些单位拥有多套声发射设备。而且 PAC 公司的 R&D 中心每年都有许多来自这方面的研究课题。

三·声发射技术在中国航空领域的研究和应用

声发射技术在中国航空领域 70~80 年代就有人开始这方面的研究，但由于早期声发射仪器比较落后，加之开展的不很普遍和深入，解决实际问题的效果并不明显。这期间 621 所、132 厂、122 厂等都做了些较有成效的工作。

近年来，虽然国外发达国家在航空领域的声发射研究和应用方面取得普遍成

功，声发射仪器也有了长足发展，但由于经费不足、技术重视不够及与国外信息交流方面的闭塞等原因，我国与国外在这方面的研究及应用水平差距逐渐拉大，甚至与国内的航天领域这方面的研究与应用相比也有一定差距。

值得可喜的是，空军第一研究所的研究人员于 94~95 年歼教七飞机整机疲劳试验过程中，在条件非常艰苦的情况下，当时自己没有声发射设备，从燕山石化部门租借一套声发射设备，对该飞机进行了一年多的整机疲劳试验过程声发射监测和研究，取得重大成功。此成果深受空军上级部门的称赞。很快拨款给空一所，使该所 95 年底就购置了一套当今世界最先进的声发射设备，也使该所的声发射研究达到了国际水平。

在中国航空业界，随着许多有识之士对声发射技术的不断认识和重视，相信该技术很快会在型号研制和生产中得以更多地应用和发展，并必将由此使中国的飞机强度、寿命、结构完整性研究和设计水平跃上一个新台阶。

四·关于 PAC 公司及其技术

作为专业从事声发射技术与开发的美国物理声学公司（PAC），从 80 年代以来一直带领世界声发射的研究和应用向更深入和普及的方向发展。尤其进入 90 年代以来，随着现代计算机技术、数字信号处理等技术的飞速发展，使得 PAC 公司的声发射设备和技术也取得了长足进步。

首先在硬件上，采用由数字信号处理器构成的并行处理系统，使传统的 AE 特征提取和实时波形捕捉、波形分析同时处理，大大提高了处理速度、处理功能。

在软件和功能方面，开发了对复杂问题处理的智能化软件包——神经网络处理系统，大大提高了对于复杂结构、复杂环境下的声发射信号处理能力。比如该公司在目前正在进行的来自于美国海军的一项研究项目，用该处理系统在直升机盘旋飞行状态的复杂背景噪声环境中成功地监测到直升机螺旋桨变速齿轮箱中咬合齿轮的脱落和裂纹的萌生、发展状况。而且由于是飞行状态，声发射探头是安在齿轮箱外部来进行的[14]。

此外，在复合材料的声发射研究方面，推出更有效处理复合材料问题的多模式分析软件包 PolyMODAL；在声发射定量分析方面，推出声发射技术方面的最新研究成果——张量矩分析 MOMENT TENSOR 软件包。用该手段在裂纹监测研究中，不但可以定性区分裂纹类型和裂纹萌生、扩展到脆断的三阶段，还能定量测出裂纹长度、走向等这些以往声发射技术都很难解决的问题。

相信这些技术和手段都将对中国的飞机研制和检测工作带来重大益处。

参考文献

- 1 • 耿荣生、景鹏等, “声发射技术在航空工业中的应用” 中国第六届声发射会议文集, 1995 年
- 2 • 耿荣生、景鹏等, “某型飞机 16 框连接螺栓疲劳裂纹扩展情况的声发射评价” 中国第六届声发射会议文集, 1995 年
- 3 • 耿荣生, “军用飞机疲劳试验过程中疲劳裂纹形成和扩展的声发射监测” 课题总结报告, 空军第一研究所, 1996 年 1 月
- 4 • 陈积懋、余南廷译, 《超声检测新技术》 科学出版社 1991 年
- 5 • 许凤旌、陈积懋, “声发射技术在复合材料发展中的应用” 《机械工程材料》 1997, No.4。
- 6 • 魏文慧, “复合材料飞机垂尾静力试验中的声发射检测” 全国第五届声发射年会文集, 1993 年
- 7 • Christopher P.Fotos “Acoustic Emission technique Tests Aircraft Integrity” AVIATION WEEK&SPACE TECHNOLOGY 1989。
- 8 • Flight Lieutenant N.Murry, “An Application in the Proof Pressure Testing of Aircraft Structures Using Acoustic Emission” ASNT 1994 Spring Conference 1994。
- 9 • B.C.Dykes,W.T.Hardrath,D.S.Ulm,Boeing Commercial Airplanes “An Acoustic Emission Pre-failure Warning System For Composite Structural Test” 。
- 10 • Paul Berner, “Acoustic Emission Inspection” , 《AVIATION》 。
- 11 • M. Nabil Bassim, “Fatigue Monitoring With Acoustic Emission” 。
- 12 • W.C.Boyce,Test Engineer,SIKORSKY AIRCRAFT “Assessment of Structural Damage in Composites Utilizing Acoustic Emission Technology” American Helicopter Society’s 41st Annual, 1985。
- 13 • Donald J. Pointer, “On Aircraft Analysis of F-14 Aircraft Wing Bearing Using Acoustic Emission” 。
- 14 • Adriano F.Almeida, “Application of Acoustic Emission to Health Monitoring of Helicopter Mechanical System”
- 15 • Jean Pierre Dupuis, “Certification D’un Element de Voilure Composite De L’AIRBUS A340 Par Emission Acoustique” 6th European Conference on Nondestructive Testing,1994
- 16 • Ewo’Brien, British Aerospace Airbus “Development in Remote Crack Detection and Monitoring by Acoustic Emission for Aircraft Application” 22nd European Conference on Acoustic Emission Testing 1996。

截止到 1986 年 PAC 公司在美国航空领域的部分用户情况

CUSTOMER	TYPE OF AE	APPLICATION	RESULTS
GRUMMAN AEROSPACE Bethpage, NJ	3000/SPARTAN 12-ch 24-ch	Fatigue Proof testing	<u>EXCELLENT</u> Customer users AE to inspect composite bulkheads and other composite structures
BOEING VERTOL Phila., PA	3000/SPARTAN 24-ch 3000/3004 4-ch	Fatigue Cure monitoring	<u>VERY GOOD</u> Users AE for monitoring large structures and for cure monitoring in autoclave
MORTON THIOKOL Magna, UT	ATLAS 16-ch 3000/3004 4-ch 3000/SPARTAN 12-ch	Fatigue Proof testing	<u>EXCELLENT</u> Uses AE to monitoring hydrostatic proof testing of composite rocket motor case
BOEING COMMERCIAL AIRPLANE COMPANY Seattle, WA	ALTAS (FRP-1) 16-ch 3000/3004 4-ch	Fatigue Proof testing	<u>VERY GOOD</u> Uses AE on all composite components
MARTIN MARIETTE AEROSPACE Orlando FL	3000/SPARTAN 4-ch	Fatigue R&D	<u>VERY GOOD</u> Utilizes AE for large structure monitoring
LOCKAFD GEORGIA CO. Atlanta, CA	3000/3004 4-ch	Fatigue R&D	<u>EXCELLENT</u> Uses AE to characterize composite very successful
KAISER AEROTECH Sacramento, CA	LOCAN 4-ch	Cure monitoring	<u>EXCELLENT</u> Capable of determining optimum curing temperature rates
LTV AEROSPACE Dallas, TX	3000/3004 4-ch	R&D Fatigue damage Assessment	<u>VERY GOOD</u> Utilizes AE to characterize composites and monitor prototype during initial and subsequent tests
GENERAL DYNAMICS Fort Worth, TX	3000/SPARTAN 24-ch	R&D Fatigue proof testing	Will use system for cold proof fatigue testing of F111