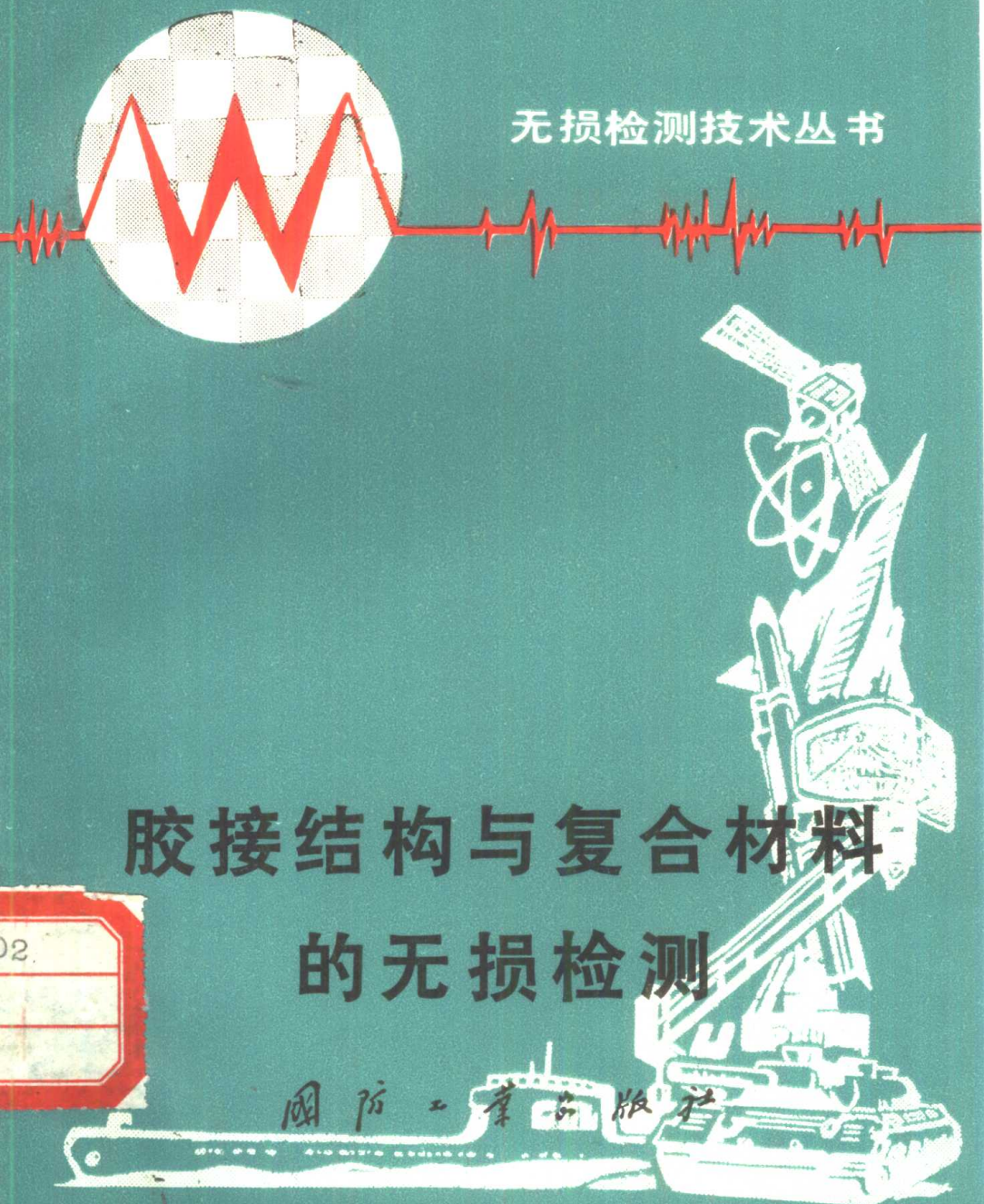


无损检测技术丛书

胶接结构与复合材料
的无损检测

国防工业出版社



无损检测技术丛书

胶接结构与复合材料的无损检测

陈积懋 余南廷 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

胶接结构与复合材料日益得到广泛应用,利用无损检测技术保证其产品质量已成为突出问题。由于它们的无损检测不同于金属材料和结构,所以已形成了一个新的技术领域。

本书简要介绍了胶接结构与复合材料无损检测的特点,讨论了超声、射线、声发射、全息照相等多种检测方法的优点和局限性,使读者能有一个概括的了解,以便根据具体情况选择合理的检测方法。

本书在介绍检测原理时注意了物理概念的说明,避免过多的公式推导,力求实用,通俗易懂,适合于从事无损检测工作的工人、技术人员和管理人员阅读,也可供有关专业人员参考。

无损检测技术丛书

胶接结构与复合材料的无损检测

陈积懋 余南廷 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 5 105千字

1984年7月第一版 1984年7月第一次印刷 印数: 0,001—5,400册

统一书号: 15034·2627 定价: 0.55元

前 言

无损检测是一门新兴的综合性科学技术。它以不损坏被检对象的使用性能为前提，应用物理和化学现象，对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验和测试，借以评价它们的完整性、连续性和其他物理性能。无损检测是实现质量控制、保证产品安全可靠、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率的重要手段，目前已成为产品制造和使用中不可缺少的组成部分。

现代科学技术的发展，为无损检测提供了新的理论和物质基础。目前能够在生产中应用的已有五十多种检测方法，在一些领域中还实现了由电子计算机控制的自动化。在实现我国四个现代化的进程中，无损检测技术的应用已日益受到重视，并且有着广阔的发展前景。

为普及、推广无损检测技术，我们编写了一套《无损检测技术丛书》。这套丛书有如下十个分册：

- 超声检测；
- 射线检验；
- 磁粉检验；
- 涡流检测；
- 渗透检验；
- 声发射检测；
- 激光全息检验；

微波与红外检测；
胶接结构与复合材料的无损检测；
无损检测自动化与信息处理。

编写这套丛书所选取的资料，一部分来自生产、科研实践；一部分参阅了国内外有关的技术书刊。在编写过程中，曾得到编写组各成员所在单位的大力支持。本分册在定稿时还得到了邓日红同志的帮助，特在此表示感谢。

本分册由张鄂同志审阅定稿。由于水平所限，书中缺点、错误在所难免，欢迎读者批评指正。

《无损检测技术丛书》编写组
一九八二年十月

目 录

概述	1
一、胶接结构和复合材料简介	1
二、胶接结构和复合材料的结构和缺陷分析	3
三、胶接结构和复合材料的无损检测	
要求和特点	10
超声检测	16
一、脉冲回波法	20
二、穿透法	31
三、超声频谱法	44
四、超声测速法	49
其他声学检测法	54
一、声阻法	54
二、声谐振检测	58
三、涡流-声检测	75
四、声发射检测	79
射线和光学检测	95
一、X射线检验	95
二、激光全息照相干涉测量	110
热学检测	123
一、红外线检测	126
二、热色、热致发光涂层	131

三、温度记录法	132
四、液晶检测	134
其他无损检测法	135
一、微波检测	135
二、敲击检验	142
三、振动阻尼测量	143
四、介电常数检测	144
五、涡流技术	145
六、液体渗透法	146
胶接结构和复合材料无损检测方法的 比较和发展现状	147

概 述

一、胶接结构和复合材料简介

随着近代工业的发展，以有机高分子化合物为基础的非金属材料，由于具有优良的性能，已在很多制造业中获得了广泛应用，在国防工业中所占的地位尤其引人注目。在非金属材料中，胶接结构和复合材料是很重要的两个类目，它们的质量检测问题是这本小册子要讨论的对象。

用胶接剂将金属-金属、金属-非金属或非金属-非金属粘接在一起，即组成胶接结构。胶接剂在应用于金属材料时，虽然基体材料是金属，但要检测的主要对象是胶层质量，按国际无损检测会议的专题划分方法，把这类构件同以非金属材料为基体的胶接构件放在一起，统称为胶接结构，作为非金属的一部分。

复合材料是由两种或两种以上化学性质不相同的材料构成的。通常，人们将较强的、脆性的、高模量的增强剂均匀地分散在较弱的、韧性的、低模量的基体中，以发挥其综合性能。增强剂有碳纤维、石墨纤维、硼纤维、玻璃纤维等许多种，基体材料主要是树脂，也可以用其他材料。在国防工业中，纤维增强树脂是最有应用价值的复合材料。

胶接结构和复合材料分别具有比强度和比模量高，抗疲劳性、减震性、耐高温性、耐蚀性、破损安全性和成形工艺

性好等特点,这是它们迅速发展的基本条件。金属胶接结构在本世纪四十年代初期的出现,使古老的胶接工艺进入了一个新时代,并迅速在飞机、火箭、人造卫星、船舰等许多重要工业部门中获得广泛应用。以飞机制造业为例,胶接结构已成为当前某些飞机的重要设计基础,有的重型超音速轰炸机上的胶接壁板面积已达 380米^2 ,占全机总面积的85%;我国设计制造的一些机种也大量采用胶接壁板,各操纵面大部分都用了金属胶接蜂窝结构。复合材料虽是六十年代才出现的新颖结构材料,但也已迅速在航空、宇航、舰艇、核能等领域获得应用。目前不但已制成轴类、地板、舱壁、操纵面、旋翼、整流罩、机翼、机身等构件,而且已用于起落架、风扇叶片、压气机叶片、压力容器、发动机壳体、大梁等重要部位,图1所示是设想采用大量复合材料的飞机示意图。国外一些飞

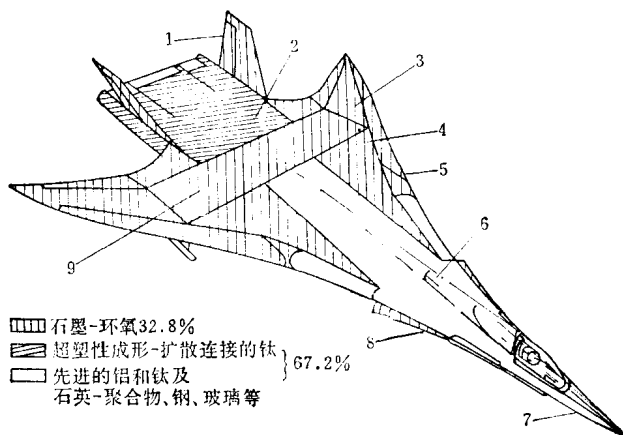


图1 使用大量复合材料的飞机

- 1—垂直安定面; 2—后机身; 3—机翼扭力盒; 4—三角机翼;
5—前缘和后缘; 6—前机身; 7—雷达天线罩; 8—前舵; 9—
机身-机翼连接段。

机公司还计划制作复合材料占全机 70% 左右的所谓“全复合材料”的先进飞机。

二、胶接结构和复合材料的结构和缺陷分析

1. 胶接结构的主要结构形式

胶接结构基体可以采用几乎包括所有结构材料在内的多种金属和非金属。胶接结构的主要结构形式可分为板材结构和夹层结构两大类。

板材结构是板材和型材胶接成的结构件。这种结构可以由蒙皮和内部、外部搭接板构成的蒙皮拼接板；也可以在搭接板外再胶接加强板；或是粘接上提高结构强度用的垫板或抗剪切的夹板等等。图 2 是飞机结构中常用的结构元件之

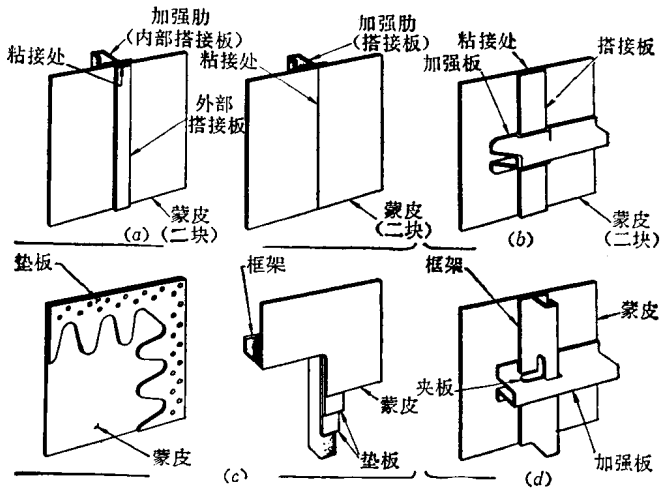


图 2 几种结构元件的典型胶接形式

(a) 蒙皮拼接板；(b) 突起的加强板；(c) 胶接垫板；(d) 剪力夹板。

间的胶接形式。

夹层结构是上下两块板材间胶接填充物组成的结构件，填充物通常有松孔塑料、波纹板、薄片芯子制成的蜂窝夹层三种类型。其中，用板材和蜂窝夹层构成的夹层结构是最重要的一种，一般称为蜂窝结构。最简单的蜂窝结构是由上下面板与蜂窝夹芯胶接成的，如图3所示。有些变截面的或有外形轮廓要求的、以及带有垫板的结构就要复杂一些，图4所示是较为复杂的典型机翼后缘舱盖图。

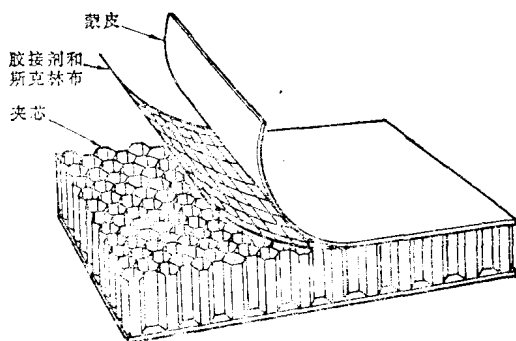


图3 典型的蜂窝胶接结构

除了常见的板材结构和夹层结构之外，还有比较特殊的结构形式，如火箭发动机壳体的钢-橡胶-推进剂胶接结构等。

2. 胶接结构的缺陷类型

胶接结构有多种缺陷形式。板-板胶接结构的主要缺陷是脱粘(包括气孔和机械贴紧的脱粘伤)、疏松以及肉眼不能分辨的气孔含量过大。蜂窝结构除上述缺陷外，还有芯短、夹芯压瘪以及夹芯进水等毛病。图5是板-板蜂窝胶接件，箭头

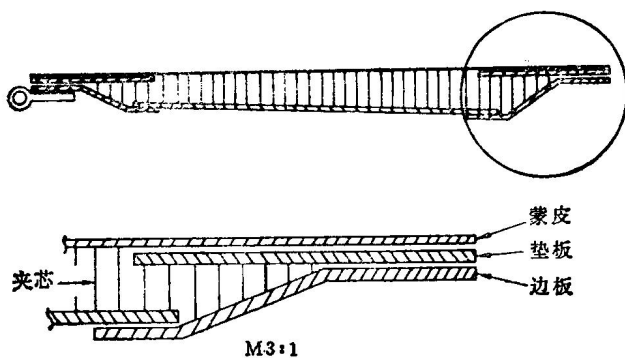


图 4 机翼后缘舱盖截面图

所示处是试件拉伸破坏后呈现的板-板间的脱粘。图 6 是典型的蜂窝结构夹芯压皱。图 7 是蜂窝夹芯壁板脱粘和气孔的示意图。

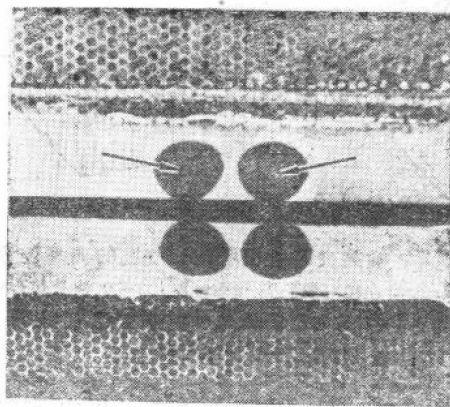


图 5 板-板脱粘的拉伸破坏试件

我们可以把各种形式的胶接结构缺陷归纳为两类：一类是被胶接体的机械损伤或进入杂质、水份等异物，这类缺陷

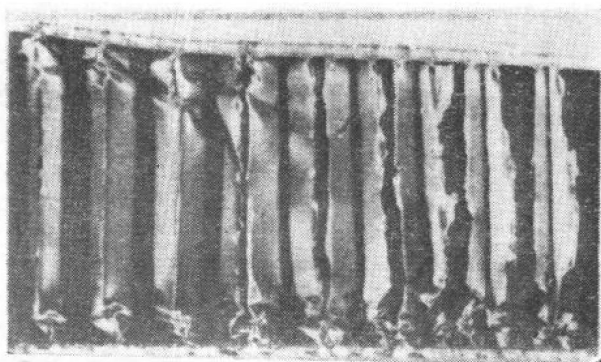


图6 胶接结构芯压皱的截面图

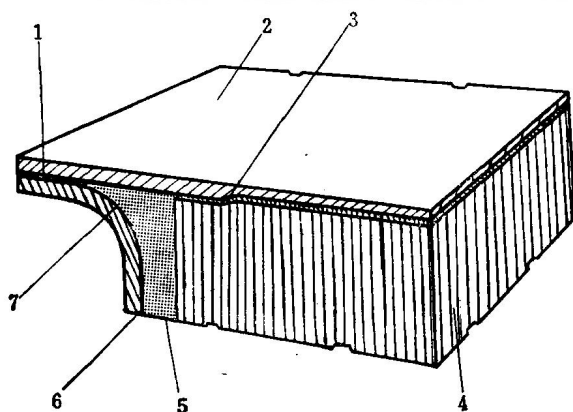


图7 蜂窝夹芯壁板脱粘和气孔的典型位置

1—金属-金属连接（脱粘）；2—蒙皮；3—化学铣切台阶或垫板（空穴）；4—蜂窝芯；5—泡沫胶接剂（空穴或脱粘）；6—封闭端；7—弯曲半径（空穴）。

通常比较容易发现；另一类是在工艺过程中形成的胶层缺陷，这类缺陷较难发现，我们要用较多的篇幅来讨论这个问题。胶层缺陷又可分为两种：一种是空穴或脱粘，它往往是小面积的、局部的、不连贯的，所以通常称为非连续性缺

陷；另一种是胶接强度低于标准的弱质胶接，它往往是大面积的、连贯成片的，所以通常称为连续性缺陷，也就是粘附强度或内聚强度不足的粘附缺陷或内聚缺陷。

还需要对粘附缺陷和内聚缺陷作进一步的分析：胶接前被胶接体表面制备不良或有各种形式的表面污染，会使胶层与被胶接体之间的粘附力减弱，也就是粘附强度低，构成粘附缺陷；试件胶接后对胶层的固化处理不当，不论是欠固化或过固化，都会使胶层的内聚力下降，也就是内聚强度低，构成内聚缺陷。有粘附缺陷或内聚缺陷的胶接件，胶层并不一定有明显的气孔或其他异常，而且胶层本身仍是连续的，所以即使面积较大，也不易发现。如果胶层与被胶接体完全脱离，或胶层内部有空穴，习惯上叫做“脱粘伤”，这是胶接强度等于零的极端情况。通常，人们往往容易误解为胶接结构缺陷的检测就是脱粘伤的检测，实际上，胶接结构的脱粘伤固然需要检测，但也不能忽视粘附强度和内聚强度的无损检测问题。

除了按不同的缺陷类型来考虑检测问题以外，还应该对产品的实际缺陷状况进行分析。了解典型的缺陷及其出现率，对生产稳定的高质量胶接结构和选择适当的无损检测方法以确保产品质量来说都是很有意义的。现在我们试以一种蜂窝壁板结构为例，列出187块试件内的不同类型缺陷的统计资料(见表1)来作分析。

统计表明，这种结构的板-板间气孔和脱粘是最多见的缺陷。当然，不同类型结构的典型缺陷是不一样的。

3. 胶接结构形成缺陷的原因

在胶接结构的制作过程中和固化期间，都有可能形成产

表 1 蜂窝壁板胶接试件的缺陷统计

缺 陷 类 型	出现缺陷次数	占缺陷总数的百分比 (%)
金属板-板间的气孔和脱粘	260	51.3
不明位置的气孔和脱粘	118	23.3
芯短	40	7.9
芯压皱或变形	32	6.3
胶接剂空缺或有气孔	22	4.3
蒙皮-芯间的气孔或脱粘	19	3.7
芯和胶层之间有间隙	9	1.8
芯的密度不一致	6	1.2
边缘、填角缺胶	1	0.2
总计	507	100

品的缺陷。制作过程中形成产品缺陷的原因很多,主要的有:

(1)夹气,即在工艺过程中有空气进入胶层,在胶层内形成气孔,这往往是由于胶膜的初始质量不好或胶膜的铺层方法不妥等原因造成的;

(2)因被胶接体的失配而脱粘,这是由于外形加工不准确或胶接件装配时没有对接准确的缘故;

(3)加工过程中的损害,包括胶接装配时的碰伤或加工不合格等原因。制作过程中出现的这些问题可能造成胶接结构的粘附缺陷或内聚缺陷。固化周期内的不正常操作通常会造成内聚缺陷,其原因是:

(1)欠固化,即固化不足,会使树脂的刚度和强度降低;

(2)过固化,即固化过分,致使树脂降解,造成胶接剂部分或全部碳化,也会导致树脂刚度和强度降低;

(3)固化压力不足,使胶层变得厚而密实,或成为疏松的、有气孔的厚胶层。密实的厚胶层对树脂的刚度和强度没有什么损失,但由于厚度较大,整个接头的刚度就下降了;

(4)固化期间树脂流动,会造成带气孔或疏松的胶层,这种胶层由于

有效截面或密度减小，其刚度和强度亦随之降低。

4. 复合材料的结构形式及其缺陷类型

复合材料由于制造工艺简单，可以用模具整体成型，因而能制成多种形式的结构元件，包括杆材、型材、板材、筒形构件、复杂型面构件和大型的复杂结构件等等，还可以用复合材料制成胶接结构。其中，有些结构的检测也是比较困难的，这在后文中还要进一步说明。

复合材料有比较独特的缺陷类型。在制造过程中形成的缺陷通常可归纳为：

- (1) 气孔含量；
- (2) 分层（叠层中薄层之间开裂）；
- (3) 疏松；
- (4) 越层裂纹（层间纵向裂纹）；
- (5) 界面分离（纤维与基体之间）；
- (6) 夹杂；
- (7) 树脂固化不良；
- (8) 纤维对基体材料的比值不当；
- (9) 纤维不平直；
- (10) 纤维取向或铺层顺序错误；
- (11) 同层无纬布端头搭接不良、重叠或空缺。

当这些缺陷单独地或综合地起作用时，会影响元件的结构性能，但任何缺陷的有害程度又是由该结构的几何形状、缺陷的位置和方向、结构所承受应力的性质和结构工作的环境等因素来决定的。

5. 复合材料形成缺陷的原因

复合材料除在制造过程中会形成缺陷外，在胶接过程中

(如用复合材料来制作胶接结构时)也会形成缺陷,例如,被胶接的复合材料表面制备不良或污染、被胶接表面形状不正确或夹层材料放置不当、胶接剂过厚过薄或有夹杂、胶接剂固化方法不正确以及胶接界面侵入潮气等都会引起复合材料胶接件的胶接缺陷。此外,在复合材料的使用过程中,静载荷、机械损伤、疲劳、蠕变、过热等原因会引起微观断裂(纤维断裂、纤维屈曲、基体断裂、界面分裂);油类接触、潮气侵入、腐蚀、碰撞、热胀冷缩等原因会引起裂纹扩展、腐蚀性剥离和纤维基体界面强度下降。

由此可见,复合材料缺陷的类型繁多,产生的原因也十分复杂。从设计上的强度要求和工艺上容易出现的角度来考虑,通常要求检测的主要缺陷是气孔含量、分层、越层断裂、疏松、纤维和树脂含量不正确等几项。

三、胶接结构和复合材料的无损检测要求和特点

由于技术水平的限制,在胶接结构和复合材料的制造过程中,还不可能对各项工艺参数进行完善、精确的控制,它们有一个共同的弱点,就是质量不稳定,离散性大,因而提出了对全部产品进行无损检测以确保质量的要求。显然,能否实现可靠的无损检测,是发展胶接技术和复合材料工艺、扩大胶接结构和复合材料应用范围所面临的重要问题。

同所有的工程结构一样,胶接结构和复合材料也都必须满足一定的技术性能要求。在选用胶接结构或复合材料来设计某一结构时,首先要掌握该结构材料的强度、模量、疲劳寿命等数据。这些数据都是以一定的机械试验为基础的,如果实际使用的结构符合设计要求,其机械性能不比试验件