

民机复合材料等同性验证方法及二类错误控制研究*

涂 圣^{1,2}, 余 音¹, 吕新颖¹, NIKITA Kalutskiy²

(1. 上海交通大学航空航天学院飞行器先进结构与材料试验中心, 上海 200240;

2. 莫斯科航空学院机身应力试验室, 莫斯科 125080)

[摘要] 在民用复合材料飞机的制造和适航审定过程中, 复合材料等同性验证在新材料替代原材料后的适航认证方面发挥重要作用。基于复合材料等同性的验证原理, 针对控制复合材料性能的关键参数, 研究了等同性的验证方法。运用假设检验的方法, 推导了复合材料等同性中第二类错误的理论分析方法, 并提出和讨论了降低犯第二类错误概率的措施。研究表明: 通常利用统计检验来比较新材料与原材料在关键性能上的差异程度以判定材料是否等同; 在目前的复合材料等同性检验中, 除了注意第一类错误的控制, 更应该重视危害性更大的第二类错误; 而增大试验样本数量能够有效降低犯第二类错误的概率; 针对复合材料在民用飞机中的应用位置和受力情况来控制犯第二类错误的概率, 选择等同性试验样本数量, 以达到在等同性验证中既控制第二类错误又降低验证成本的目的。

关键词: 适航验证; 复合材料等同性验证; 假设检验; 第二类错误; 复合材料应用位置

Research on Civil Aircraft Composite Material Equivalence Verification Method and Type 2 Error Control

TU Sheng^{1,2}, YU Yin¹, LÜ Xinying¹, NIKITA Kalutskiy²

(1. Aerospace Structure Research Center(ASRC), School of Aeronautics and Astronautics,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Airframe Stress Laboratory, Moscow Aviation Institute, Moscow 125080, Russia)

[ABSTRACT] Composite equivalence plays an important role in airworthiness certification of civil composite aircraft. Based on the verification principle of composite equivalence, a method for verifying equivalence was investigated for the key parameters that control the properties of composites. Theoretical analysis method of the type 2 error in the composite equivalence was derived by the method of hypothesis test and the measures to reduce the probability of type 2 error were discussed. The results show that the hypothesis test is used to verify the composite equivalence. More attention should be paid to type 2 error. Increasing the number of test samples can reduce the probability of type 2 error. In order to control the type 2 error and reduce the cost of verification, the location of composite application in civil aircraft should be taken into account to select the number of samples.

Keywords: Airworthiness certification; Composite equivalence verification; Hypothesis test; Type 2 error; Composite application location

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.21.070

复合材料是将两种以上材料有效复合在一起形成的具有更优越性能的材料^[1]。作为一种新型的功能和结构材料, 复合材料具有结构设计性自由度大、质量轻、比强度和比刚度高、良好的抗疲劳性能和抗腐蚀性能以及结构可设计性强等一系列优点^[2]。经过几十年的持续发展, 复合材料逐步走向成熟, 在航空领域获得了大

量的工程应用, 已经发展成为目前最重要的航空结构材料^[3]。不同于金属材料, 复合材料的制造对于原材料的选择和制造工艺的要求特别高, 在原材料或者制造工艺上进行细小的改动, 可能会对制造的复合材料结构件的一些性能造成较大的影响。

复合材料结构用于民机, 必须严格符合适航要求, 完成相关的验证工作并通过适航审查。近年来国内外工作人员为复合材料的验证做了大量工作。国外研究

* 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51805260)。

人员利用数字图像相关技术测量复合材料复杂变形和研究复合材料的破坏机理,意图开发出能够减少试验规模,并提高复合材料验证置信度的通用方法^[4-5]。我国研究人员从材料,工艺,许用值和结构等方面入手,总结了材料的认证思路和方法,提出复合材料B基准值高准确率的计算方法,设计许用值的计算方法,估算损伤结构剩余强度的方法以及大型机身复合材料制造工艺等^[6-11],基于大型飞机研制对复合材料的需求,重点研究以适航为代表的相关技术^[12],这些都促进了我国复合材料适航审定技术的发展,快速提升了我国复合材料适航审定技术水平。

我国民用飞机复合材料目前大部分依赖进口,亟需用国产复合材料代替进口复合材料,以达到降低成本及避免国外封锁等目的。为了验证国产复合材料能够替代进口复合材料应用于现有型号民用飞机,需要发展复合材料等同性验证方法,并且复合材料等同性验证也是复合材料适航审定的一部分。在民用飞机设计和制造过程中,不可避免会出现复合材料的原材料/工艺发生变化,为了验证这些变化是否会对复合材料的力学、物理和化学性能造成不可接受的影响,也必须对材料进行等同性认证。复合材料等同性的问题吸引着许多科学家的关注。美国陆军研究实验室的科学家^[13]研究了同种复合材料新数据和现有数据等同的问题,并给出了判定等同的方法。Vangel等^[14]利用样本均值和极值通过鞍点法建立一个简单准确的参考值以用于验证材料批次的等同。Tomblin等^[15]对验证材料等同性的试验要求进行了系统研究,给出了推荐的等同性试验矩阵并在原有统计方法的基础上,建立了复合材料等同性的判定准则。2018年我国颁布了GJB 9315—2018聚合物基复合材料等同性评定程序^[16]来指导我国军用飞机复合材料的等同性认证,也为我国民用飞机复合材料的等同性认证提供了参考。但军机的验证标准较民机而言,更加注重于机动性、可靠性,对经济性要求不高,所以军用飞机的复合材料验证程序不能完全适用于民用飞机。长期以来,中国基本上是依照国外相关验证技术并结合自身工程经验来对民机复合材料进行等同性验证,对民机复合材料等同性研究较少,并没有深入理解等同性的验证原理和探究验证方法的由来,亟需加强这方面的研究。

本文主要研究了复合材料等同性验证的原理和方法,总结了等同性试验样本量和试验方法的选择及复合材料等同性的判断准则,给出了复合材料等同性验证程序,并推导了复合材料等同性认证中第二类错误的理论分析方法,探讨了在民机复合材料等同性检验中第二类错误的控制方法,为今后我国完善民用飞机复合材料等

同性验证方法提供参考。

1 复合材料等同性

复合材料等同是指使用特定的方法来判断某一特定材料与有一定程度改变的材料是否具有等效的力学、物理和化学性能。如果复合材料发生大的改变,像纤维品种发生改变(如AS4换成T300)、树脂品种发生改变(如3501-6换成E7K8)或预浸料树脂含量发生显著变化等,将视作一种新型号的复合材料,不在等同性的讨论范围内。

1.1 复合材料等同性的验证方法

复合材料等同性的验证方法通常利用数学统计原理,并基于原材料鉴定时形成的各个性能的性能数据库进行。这里假定原有材料已具备了通过大量的数据和经验建立的力学性能统计基准值,并已经获得适航认证^[17]。

对于复合材料等同性的验证,首先要鉴别出控制该材料性能的关键参数。关键的材料性能参数通常均可测量,将它们与原材料认证时的数值进行比较,定量给出新材料与原来认证材料的差异。利用统计原理研究新材料与原来认证材料的差异程度,以判定新材料能否等效替换原材料应用于民机制造。

1.2 复合材料等同性试验

为了获得新材料的关键材料性能数据,必须要进行等同性试验。等同性试验的规模既要能完整地反映出待评价材料的各方面关键性能,又要远小于原材料鉴定的试验规模,以便于降低鉴定成本,并正确评价新材料对于原始鉴定材料的等同性^[18]。

在进行材料等同性试验时,为了在鉴定数据中反映复合材料加工工艺的稳定性,选取的试验板件应至少来自两个独立的固化工艺。

图1是典型的等同性试验样本选取示意图。试验样本可以选择同一批次的预浸料,采取两个独立的固化工艺制造成测试板,在每块测试板上取出4个试验样本,共计8个样本。

一般来说,验证复合材料的等同性进行的试验是低等级试验。如未固化预浸料的物理和化学特性试验,单层固化片的物理特性试验及力学性能试验。本节表中的试验件数量均为建议的最低数量要求,如果条件允许,建议可适当增加试验件数量。

在复合材料等同性验证中,可能还需要考虑到更高级别的试验,层合板、元件以及组合件的力学性能验证试验,这取决于关键材料参数或者结构参数的变化程度,并与复合材料结构件的具体应用情况有关。

1.2.1 未固化的预浸料试验矩阵

预浸料是制造民用飞机复合材料结构的中间材料,

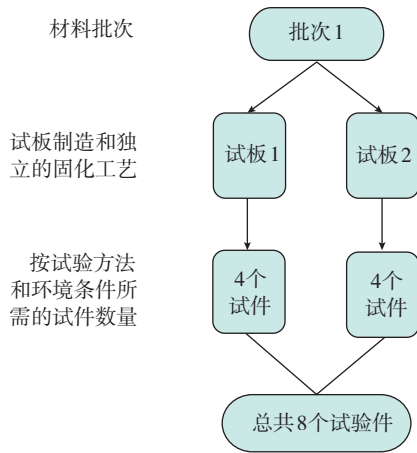


图1 材料等同性试验样本选取示意图

Fig.1 Schematic diagram of sample selection for material equivalence test

其质量的好坏可能会影响复合材料的力学性能。在复合材料等同性验证中,应当对新材料的预浸料进行相关试验,比较新材料与原材料预浸料的性能差异。考虑到等同性试验的经济、简便和有效性,对于未固化的预浸料,应进行表1所列的物理和化学特性的试验,以及相应的最小试验件数量和建议采用的试验方法^[15]。

1.2.2 单层固化片试验矩阵

飞机复合材料结构往往采用预浸料经过固化成型工艺制备而得的。在原材料认证时,通过对单层固化片进行试验以获取复合材料的关键性能数据。在进行等同性验证试验时,也应对新材料的单层固化片进行试验,获取该材料的性能数据,作为准备与原有数据(原材料认证时的数据)进行比较的数据母体。表2^[15]给出了单层固化片的物理性能试验的最小试验件数量和建议的试验方法。

表1 物理、化学和热性能的材料等效测试要求

Table 1 Material equivalence testing requirements for physical, chemical, and thermal properties

测试性能	测试方法		试验件数量
	ASTM	SACMA	
树脂含量	D 3529, C 613, D 5300	SRM 23, SRM 24	6
挥发含量	D 3530	—	6
凝胶时间	D 3532	SRM 19	6
树脂流动性	D 3531	SRM 22	6
纤维单位面积重量	D 3776	SRM 23, SRM 24	6
IR (红外光谱法)	E 1252, E 168	—	3
HPLC(高效液相色谱法)	—	SRM 20	3
DSC (差示扫描量热法)	E 1356	SRM 25	3

表2 单层固化片物理性能测试的材料等效测试要求

Table 2 Material equivalence testing requirements for physical property tests of cured lamina

物理性能	试验方法	试验件数量
固化后的单层厚度	SACMA SRM 10R	参看(1)和(2)
纤维体积	ASTM D 3171, D 2584	参看(1)
树脂含量	ASTM D 3171, D 2584	参看(1)
孔隙含量	ASTM D 2734	参看(1)
固化的纯树脂密度	ASTM D 792	参看(1)
玻璃转化温度(干燥(3))	SACMA SRM 18	2
玻璃转化温度(湿润(4))	SACMA SRM 18	2

注:(1)必须对每块试验板件进行试验;(2)测量表面的类型必须与材料认证时所用者相同,否则,应考虑由测量面所引起的误差;(3)干试样是制造状态的试样,试样一直存放在环境可控实验室大气条件下;(4)湿试样要经过湿度老化,达到吸湿平衡的状态。

力学性能等同性试验所需的试验件的数量,取决于新材料与原材料间的兼容程度。材料的兼容性用表3所给的准则来确定。表4给出了单层固化片不同力学性能等同性试验的最小试验件数量,建议采用表5中的试验方法进行试验^[13]。

1.3 复合材料等同性试验数据的检验统计

材料等同性试验数据的检验统计,是为了比较新材料与原材料间的材料性能差异,考虑在实际工程中所能接受的差异程度,根据所关注的材料性能特性,选择合适的检验统计量,以及统计量的可接受区间。如果材料性能构造的统计量的数值在规定的可接受区间内,就认为性能数据间的差异在能接受的范围内,即认为通过等同性认证。依据关注的材料性能特性,建立以下3种舍弃判据,对关注的材性能进行材料性能平均值或最小个体值降低、材料性能平均值变更和材料性能高平均值的舍弃进行判定,并对其适用范围进行研究。

1.3.1 材料性能平均值或最小个体值降低的舍弃判据

对于有些材料性能,在等同性验证时,不希望新材料试验的数据相比原材料认证时的数据,出现低的平均值和低的最低单个值,例如材料的强度、刚度等。如果要对强度、刚度等材料性能进行等同性判定,可以选择平均值或最小个体值降低的舍弃判据。

新材料试验数据的平均值必须大于等于舍弃门槛值($W_{平均}$)才可认为满足要求,该舍弃门槛值 $W_{平均}$ 由下式确定^[15]:

$$W_{平均} = \bar{x} - K_1 \times S \quad (1)$$

式中, \bar{x} 为原材料认证时的试验数据的平均值; S 为标准差;参数 K_1 为平均值检验常数,由表6^[15]查得,其中 α 为检验中犯判断错误的概率。

而新材料试验数据的最低单个值还必须大于等于最低单个性能的舍弃门槛值($W_{最低单个}$)才可认为满足要求^[15]:

$$W_{最低单个} = \bar{x} - K_2 \times S \quad (2)$$

表3 材料兼容性准则

Table 3 Material compatibility criteria

项目	兼容性最好 → 材料兼容性变差 → 兼容性最差					
材料兼容性系数	1	2	3	4	5	6
纤维牌号	相同	不同	相同	不同	相同	不同
纤维束尺寸	相同	相同/不同	相同	相同/不同	相同	不同
树脂	相同	相同	不同	相同	不同	不同
预浸料厂商	不同	相同	相同	不同	不同	不同
生产线	不同	相同	相同	不同	不同	不同

表4 单层固化片主要力学性能的试验件数量(环境条件为RTD⁽¹⁾和ETW⁽²⁾)

Table 4 Material equivalence testing requirements for cured lamina main mechanical properties (environmental condition RTD⁽¹⁾ and ETW⁽²⁾)

铺层方向	批次数	每批试验件数量	环境条件数量	试验件数量
单层性能	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5 6
0°(经向)拉伸模量和强度	2 3 3 3 3 3	4 4 4 5 5 6	2 2 2 2 2 2	16 24 24 30 30 36
90°(纬向)拉伸模量和强度	2 3 3 3 3 3	4 4 4 5 5 6	2 2 2 2 2 2	16 24 24 30 30 36
0°(经向)压缩模量和强度	2 3 3 3 3 3	4 4 4 5 5 6	2 2 2 2 2 2	16 24 24 30 30 36
90°(纬向)压缩模量和强度	2 3 3 3 3 3	4 4 4 5 5 6	2 2 2 2 2 2	16 24 24 30 30 36
平面内剪切模量和强度	2 3 3 3 3 3	4 4 4 5 5 6	2 2 2 2 2 2	16 24 24 30 30 36
短梁剪切(3)	2 3 3 3 3 3	4 4 4 5 5 6	1 1 1 1 1 1	8 12 12 12 12 18
试验件数量和				88 132 132 162 162 168

注:(1)环境条件为RTD⁽¹⁾和ETW⁽²⁾,试验温度=(70±10)°F,吸湿量=制造状态⁽⁴⁾;(2)试验温度=(18±5)°F,吸湿量=平衡吸湿量;(3)只在RTD条件下进行试验;(4)干试样是制造状态的试样,试样一直存放在环境可控实验室大气条件下。

式中,参数 K_2 是最小单个值检验常数,由表 7^[15] 查得。

当新材料的试验数据既满足 $W_{\text{平均}}$ 又满足 $W_{\text{最低单个}}$ 的要求,才可认为通过材料性能平均值或最小个体值降低的舍弃判据。实际上,检验最低单个值的目的是不明确的,但工程师们认为最低单个值是一个不好材料的重要标志。

1.3.2 材料性能平均值变更的舍弃判据

对于有些材料性能,在等同性验证时,不希望新材料试验数据与原材料认证时的数据相比,平均值出现较大的波动,如材料的模量。如果要对模量等材料性能进

行等同性判定,应该选择平均值变更的舍弃判据。

这个舍弃判据假设原材料认证时的数据和新材料的试验数据标准差是相当的,但其值未知。合并标准差 S_p 被用作公共总体标准差的估计量,由下式计算^[15]:

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (3)$$

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4)$$

式中, t_0 为检验统计量, n 为样本数量,下标 1 和 2 分别表示新材料和原材料。其他参数同式(1)和式(2)。 $t_\alpha(n)$ 是自由度为 n 时 t 分布(统计学中常用分布,是一种类似正态分布的对称分布,依赖于自由度)中右侧面积为 α 的 t 值,查表 8^[15] 可得。材料性能平均值变更的舍弃判据是一个双侧检验, $\alpha = \alpha/2$ 。 t_0 必须小于 $t_{\alpha/2}(n_1+n_2-2)$ 且大于 $-t_{\alpha/2}(n_1+n_2-2)$ 才可认为通过材料性能平均值变更的舍弃判据。

1.3.3 材料性能高平均值的舍弃判据

在等同性验证时,有些材料性能不希望新材料试验数据与原材料认证时的数据相比,出现高的平均值,如材料的预浸料挥发分含量,如果要对预浸料挥发分含量等材料性能进行等同性判定,应该选择高平均值的舍弃判据。

表5 单层固化片主要力学性能的试验方法
Table 5 Material equivalence testing methods for main mechanical properties of cured lamina

测试	方法参考
0° (经向)拉伸模量和强度	ASTM D 3039
90° (纬向)拉伸模量和强度	ASTM D 3039
0° (经向)压缩强度	SACMA SRM 1
0° (经向)压缩模量	SACMA SRM 1
90° (纬向)压缩强度	SACMA SRM 1
90° (纬向)压缩模量	SACMA SRM 1
平面内剪切模量和强度	ASTM D 5379
短梁剪切	ASTM D 2344

表6 平均值检验的常数 K_1
Table 6 Constants K_1 values for mean

n (样本容量)	α 概率				
	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01
17	0.2522	0.3878	0.4692	0.5400	0.6230
18	0.2455	0.3771	0.4561	0.5250	0.6055
19	0.2394	0.3673	0.4441	0.5111	0.5894
20	0.2337	0.3582	0.4330	0.4982	0.6745

表7 最低单个值的检验常数 K_2
Table 7 Constants K_2 values for individual

n (样本容量)	α 概率				
	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01
17	2.3471	2.7146	2.9516	3.1676	3.4306
18	2.3694	2.7342	2.9698	3.1846	3.4463
19	2.3904	2.7527	2.9868	3.2005	3.4611
20	2.4101	2.7700	3.0029	3.2156	3.4751

这个舍弃判据由式(3)可得公共总体标准差的估计量 S_p , 进而由式(4)计算得统计检验量 t_0 。这是一个单侧检验, t_0 必须不大于 $t_{\alpha}(n_1+n_2-2)$ 才可认为通过材料性能高平均值的舍弃判据, $t_{\alpha}(n)$ 查表 8 可得。

1.3.4 材料性能的舍弃判据适用范围

在复合材料的等同性认证中, 应依据待验证的材料性能选择合适的舍弃判据。表 9 总结归纳了 3 种舍弃判据分别适用于材料的不同关键性能。

1.4 复合材料等同性验证流程

在等同性认证中, 首先应当鉴别出哪些材料性能是

该材料的关键性能。针对每一个关键性能, 依照要求进行等同性试验, 分析试验数据与原材料鉴定时的数据差异, 判断该性能是否等同。根据复合材料的具体应用情况, 有时需要更高级别的力学性能验证试验, 最后综合分析, 得出等同性验证结果。建议按照图 2 的检验流程进行。

2 影响复合材料等同性验证的两类错误分析

复合材料等同性的验证方法采用的是基于统计检验原理的假设检验。在验证材料等同性的方法中, 是依

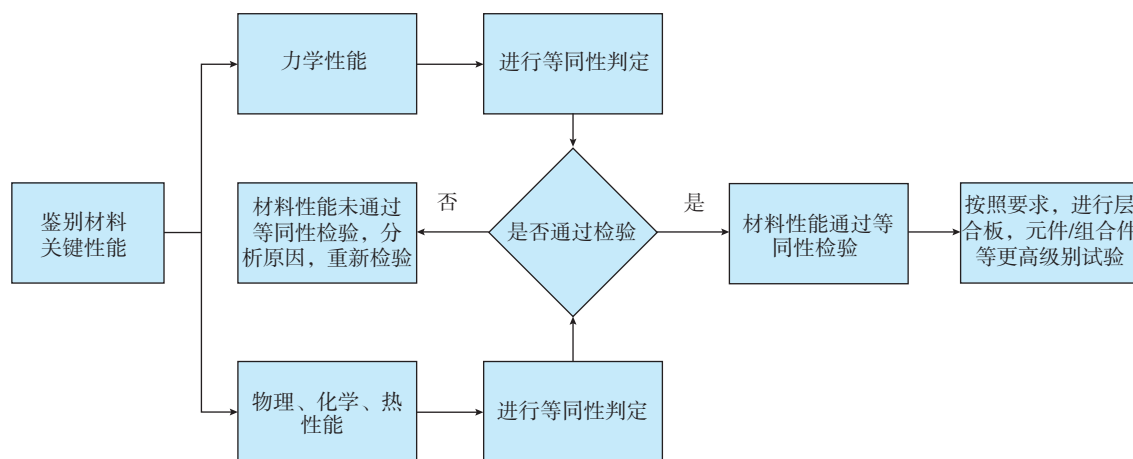


图2 民用飞机复合材料等同性认证一般流程图

Fig.2 General flow chart of certification of civil aircraft composite material equivalence

表8 常数 $t_{\alpha}(n)$
Table 8 Constants $t_{\alpha}(n)$

n (样本容量)	α 概率				
	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01
22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508
23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500
24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492
∞	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326

表9 材料关键性能适用舍弃判据
Table 9 Suitable fail criteria for each property of materials

舍弃判据	适用的材料性能
平均值或最小个体值降低的舍弃判据	0° (经向) 拉伸强度、90° (纬向) 拉伸强度、0° (经向) 压缩强度、90° (纬向) 压缩强度、平面内剪切强度、短梁剪切
平均值变更的舍弃判据	树脂含量、凝胶时间、树脂流动性、纤维单位面积重、DSC (差示扫描量热法)、固化后的单层厚度、纤维含量、树脂含量、固化后树脂密度、玻璃转化温度(干燥)、玻璃转化温度(湿润)、0° (经向) 拉伸模量、90° (纬向) 拉伸模量、0° (经向) 压缩模量、90° (纬向) 压缩模量、平面内剪切模量

据试验样本的性能数据来对总体性能进行判断,也就是由部分推断总体,因而判断有可能正确,有可能不正确,面临犯错误的可能。在复合材料等同性的评定中,有可能将不等的材料判定为等同,也有可能将等同的材料判定为不等同,必须要考虑犯错的可能性。需要关注两类典型错误。

2.1 第一类错误和第二类错误

为了简述两类错误,假设等同性试验得到的材料性能试验数据具有平均值为 μ ,标准差为 σ 的正态分布特性, μ_0 为原材料鉴定时的性能平均值,且 $\mu \geq \mu_0$ 。通过统计检验的方法,来判断材料性能平均值 μ 是否大于等于 μ_0 这个值。如果统计检验表明 $\mu < \mu_0$,但实际上 $\mu \geq \mu_0$,这就犯了第一类错误,犯错概率用 α 表示;当统计检验表明 $\mu \geq \mu_0$,但是实际上 $\mu < \mu_0$,这就犯了第二类错误,犯错概率用 β 表示。

根据两类错误的定义,可知在复合材料等同性的验证中,犯第一类错误可能会错判和舍弃掉一些合格的材料,但犯第二类错误会错判和接受一些不合格的材料。

在复合材料的等同性验证中,往往出于保守考虑通常预先给定犯第一类错误概率值来控制第一类错误^[15],往往忽略了对第二类错误进行详细的分析。而犯第二类错误会接受一些不合格材料,危害远高于第一类错误,所以考虑到民用飞机的安全性,必须对第二类错误重点进行控制。

2.2 第二类错误的影响因素分析

假设原材料性能数据的平均值和标准差分别为 μ_0 和 σ_0 ,且服从正态分布。新材料性能数据总体 ζ 服从平均值为 μ ,标准差为 σ 的正态分布,记为 $\zeta \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。等同性试验的样本数量为 n ,出现第一类错误的概率为 σ , \bar{x} 为试验样本均值。

设原假设 $H_0: \mu \geq \mu_0$,新材料性能的平均值 μ 要大于等于原材料性能的平均值 μ_0 ,则与原假设对立的备择假设 $H_1: \mu < \mu_0$,新材料的性能平均值 μ 小于原材料的平均值 μ_0 。以下例说明第二类错误的影响因素。

据统计理论, $n < 30$,如果 σ 未知,必须使用 t 统计量(常用的检验统计量,计算公式为 $t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}}$,其

中 \bar{x} 为样本均值, s 为样本标准差, μ_0 为假设检验值);在 $n \geq 30$ 时,选用 t 统计量还是 z 统计量(常用的检

验统计量,计算公式为 $z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}}$,其中 \bar{x} 为样本均值,

σ 为总体标准差, μ_0 为假设检验值)由分析者自行选择^[18]。由于希望样本数量尽可能的小,这里选用 t 统

计量。检验统计量 t 服从 $n-1$ 个自由度的 t 分布,记为 $t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}} \sim t(n-1)$,第二类错误 β 值计算如下:

$$\begin{aligned} \beta &= P(\text{接受 } H_0 | H_0 \text{ 为假}) = \\ &P(t > t_{1-\alpha}(n-1) | \mu < \mu_0) = P\left(\frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}} > t_{1-\alpha}(n-1) | \mu < \mu_0\right) = \\ &P\left(\frac{\bar{x} - \mu}{s / \sqrt{n}} > t_{1-\alpha}(n-1) - \frac{\mu - \mu_0}{s / \sqrt{n}} | \mu < \mu_0\right) = \\ &1 - f_{n-1}\left(t_{1-\alpha} - \frac{\mu - \mu_0}{s} \sqrt{n}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $f_{n-1}(\cdot)$ 为自由度 $n-1$ 的 t 分布的分布函数,为单调递增函数, $f_{n-1}(t_{1-\alpha}(n-1)) = \alpha$ 。

由式(5)可知,第二类型错误 β 与下列因素有关:

(1)与真实值 μ 有关,由于 $\mu < \mu_0$, $f_{n-1}(\cdot)$ 为单调递增函数,在其他条件不变的情况下, $\mu - \mu_0$ 间的差距越大, $f_{n-1}\left(t_{1-\alpha} - \frac{\mu - \mu_0}{s} \sqrt{n}\right)$ 越大,则 $1 - f_{n-1}\left(t_{1-\alpha} - \frac{\mu - \mu_0}{s} \sqrt{n}\right)$ 越小, β 越小。

(2)与 α 有关,在其他条件不变的情况下, α 越大, $1 - \alpha$ 越小,对应的 $t_{1-\alpha}$ 越大, $f_{n-1}\left(t_{1-\alpha} - \frac{\mu - \mu_0}{s} \sqrt{n}\right)$ 越大,则 $1 - f_{n-1}\left(t_{1-\alpha} - \frac{\mu - \mu_0}{s} \sqrt{n}\right)$ 越小, β 越小。

(3)与样本容量 n 有关,在其他条件不变的情况下, n 越大, $\mu < \mu_0$, $t_{1-\alpha} - \frac{\mu - \mu_0}{s} \sqrt{n}$ 越大, $f_{n-1}\left(t_{1-\alpha} - \frac{\mu - \mu_0}{s} \sqrt{n}\right)$ 越大, $1 - f_{n-1}\left(t_{1-\alpha} - \frac{\mu - \mu_0}{s} \sqrt{n}\right)$ 越小, β 越小。

2.3 第二类错误在材料等同性判定中的控制

在复合材料等同性检验中,犯第一类错误的概率为 α ,通常预先确定目标 α 值,以达到控制犯第一类错误概率的目的,但没有具体的措施来控制犯第二类错误的概率 β 。本文认为 β 的数值在实际情况中是不能被准确计算的。事实上,只有当且仅当真实值 μ 已知,才能精确计算 β 的值。然而在这种情况下, μ 已经是一个已知数,那么假设检验也就没有意义。在等同性检验中,通过有限的试验数据不能得到材料性能的真实平均值 μ ,故而也不能准确计算犯第二类错误概率 β 。

通常情况下,对于复合材料的等同性认证, α 一般建议取0.025^[13],新材料性能真实的平均值 μ 是客观存在的,但具体数值未知。由2.1节讨论可知:犯第二类错误概率 β 与犯第一类错误概率 α ,样本容量 n 和真实值 μ 有关。在 α 与 μ 一定的情况下,增加样本量 n 能减小犯第二类错误的概率。在复合材料等同性认证中,为了降低将不合格材料错认为合格材料的概率,可以增

加等同性试验的样本个数。但随着样本量的增大,为了使 μ 减小一个相同的绝对量,需要增加的样本量也就越来越多^[20]。这也意味着,在等同性认证中,为了将犯第二类错误概率 β 值控制在一个较小的值,需要进行大样本的等同性试验,会花费更多的金钱和时间,这与复合材料等同性认证的初衷相悖。复合材料等同性验证是希望用尽量少的试验证据证明新的材料能够等效于原材料,如果一味地为了控制第二类错误而增加等同性试验的样本量,这会为民用飞机复合材料等同性认证工作带来巨大的麻烦。

复合材料在民用飞机中的应用,可以是用在受力很小的前缘、口盖、整流罩等构件,也可以用在受力达到一定程度的部件如升降舵、方向舵、襟副翼等,也可以应用在受力较大的部件,如垂尾、平尾等,还可以应用在飞机最主要受力部件,如机翼、机身等。在对应用于这些部位的复合材料进行等同性验证时,将它们犯第二类错误概率 β 值控制在同一个较小的值,会产生较大的经济和时间成本,显然是不合适的。因此,在进行民用飞机复合材料认证时,应该考虑复合材料在飞机中的应用位置和受力情况。对同一种复合材料,应用的位置和受力情况不同,要求控制的 β 值和等同性试验的样本量也不同。对于用于制造飞机主承力结构的复合材料,在等同性认证时,控制 β 值较小,需要进行样本量较大的等同性试验;用于制造飞机的次承力结构的复合材料,对于它的等同性认证,可将 β 控制在一个适中的值,进行样本量适当的等同性试验;对于制造一些承力较小或者非承力构件的复合材料的等同性验证,可以控制在一个较大值甚至不考虑 β 值,按照相关要求进行小样本的等同性试验即可。复合材料应用于不同位置时 β 与 n 的大小关系见表10。

3 算例

3.1 复合材料等同性验证举例

假设有新的待验证复合材料A,它的原始材料认证总共使用了18个挥发分含量试件。平均值和标准差分别为0.263%和0.1061%。

对材料的挥发分含量这个材料性能进行等同性检

验。按照表1所示的等同性试验要求,对新材料进行了样本数量为6的等同性试验,试验数据平均值为0.257%和0.010%。 α 取0.025。

根据表9可知,对挥发分含量这个性能进行验证,可以选择高平均值的舍弃判据。

按照式(3),计算公共总体标准差的估计量 S_p :

$$\begin{aligned} S_p &= \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \\ &= \sqrt{\frac{(6-1) \times 0.01^2 + (18-1) \times 0.1061^2}{6+18-2}} \\ &= 0.093409\% \end{aligned} \quad (6)$$

按照式(4)计算统计量 t_0 :

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \\ &= \frac{0.00257 - 0.00263}{0.00093409 \times \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{1}{18}}} \\ &= -0.13626 \end{aligned} \quad (7)$$

据表8可得, $t_\alpha(n) = t_\alpha(n_1+n_2-2) = t_{0.025}(22) = 2.074$ 。因为 t_0 小于2.074,所以材料A通过了挥发分含量的等同性检验要求。

3.2 等同性验证中第二类错误控制举例

材料B,180°F湿条件(ETW)下的0°压缩强度,原材料认证时,使用了18个试件,强度的平均值和标准差分别为405.164MPa和31.449MPa, α 取0.025。

图3中新材料的等同性试验件数量为8,强度平均值为389.581MPa,标准差为22.891MPa。蓝色区域面积表示犯第一类错误的概率,表明将合格材料当成不合格材料舍弃的概率;红色区域面积表示犯第二类错误的概率,表明新材料的强度平均值高于原材料的强度为伪,但是检测结果是真的概率。图4中新材料的强度平均值和标准差与图3一样,但等同性的试验件数量为12。可以看出,图4中红色区域面积要小于图3中红色区域面积,表示图4中犯第二类错误的概率要小于图3。

表10 复合材料应用于不同位置时 β 和 n 的大小关系
Table 10 Relationship between β and n at different position

复合材料应用位置	主承力构件	次承力构件	承力小或者非承力构件
二类错误概率 β		$\beta_{\text{主}} < \beta_{\text{次}} < \beta_{\text{非}}$	
等同性试验样本量 n		$n_{\text{主}} < n_{\text{次}} < n_{\text{非}}$	

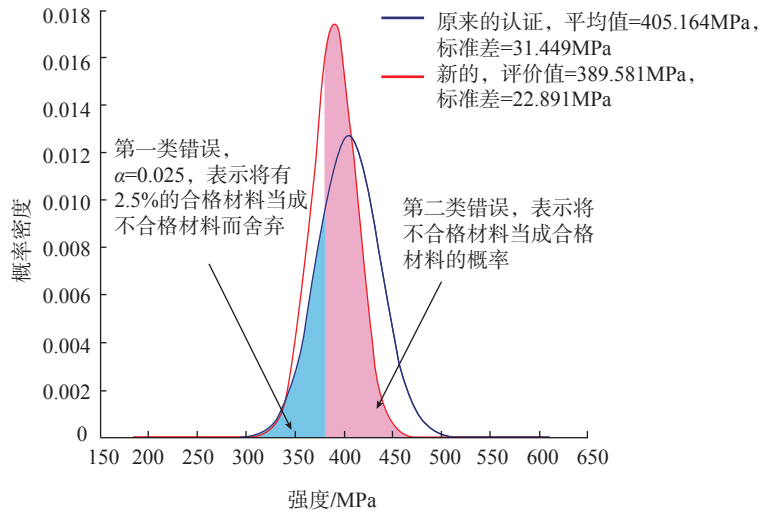


图3 8个试件, 试验数据正态分布图
Fig.3 8 samples, normal distribution of test data

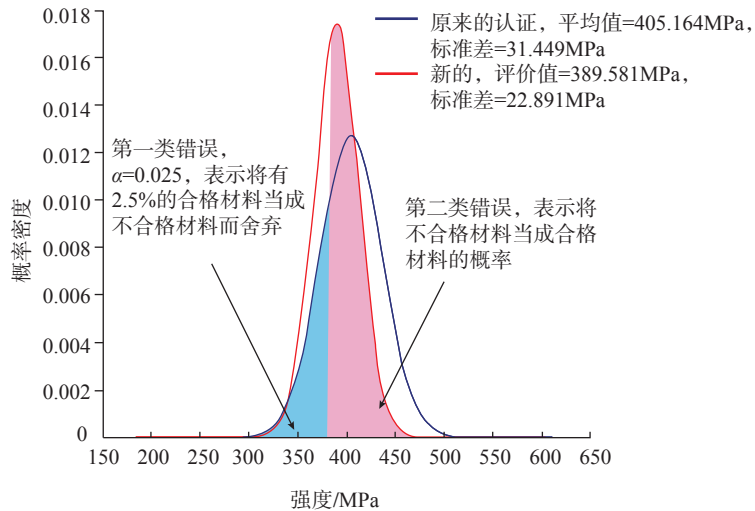


图4 12个试件, 试验数据正态分布图
Fig.4 12 test samples, normal distribution of test data

说明在材料等同性验证中增加试验件数量可以降低犯第二类的错误的概率,可以通过调节等同性试验的试验件数量来达到控制复合材料等同性验证犯第二类错误的概率。

4 结论

复合材料等同性验证的目的是评估新材料是否和原材料具有等效的力学、物理和化学性能,是民用飞机复合材料适航认证的重要部分。

(1) 本文基于复合材料等同性的验证原理,针对控制复合材料性能的关键参数,研究了等同性的验证方

法,总结了等同性试验样本量和试验方法的选择及复合材料等同性的判断准则。

(2) 运用假设检验的方法,推导了复合材料等同性中第二类错误的理论计算方法,并讨论了降低犯第二类错误概率的方法,适当增大试验样本数量可以有效降低犯第二类错误的概率。

(3) 在对复合材料进行等同性认证时,应当针对复合材料在民用飞机中的具体受力情况和应用位置来控制犯第二类错误的概率,进行样本量适当的等同性试验,以达到在等同性验证中既控制第二类错误又降低验证成本的目的。

参考文献

- [1] 吕善宝. 复合材料在飞机上的应用与修理[J]. 化工管理, 2019(3): 204.
- LU Shanbao. Application and repair of composite materials in aircraft [J]. Chemical Enterprise Management, 2019(3): 204.
- [2] 赵欣, 朱健健, 李梦, 等. 复合材料应用研究与产业发展建议 [J]. 材料导报, 2016, 30(S1): 525-530, 538.
- ZHAO Xin, ZHU Jianjian, LI Meng, et al. Application research and industrial development suggestions of composite materials[J]. Materials Reports, 2016, 30(S1): 525-530, 538.
- [3] 包建文, 蒋诗才, 张代军. 航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势 [J]. 科技导报, 2018, 36(19): 52-63.
- BAO Jianwen, JIANG Shicai, ZHANG Daijun. Development status and trend of aviation carbon fiber resin matrix composites[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(19): 52-63.
- [4] SEON G, MAKEEV A, NIKISHKOV Y, et al. DIC data-driven methods improving confidence in material[M]//International Digital Imaging Correlation Society. Berlin: Springer 2017.
- [5] MAKEEV A, SEON G, NIKISHKOV Y, et al. Analysis methods for improving confidence in material qualification for laminated composites[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2019, 64(1):1-13.
- [6] 郑晓玲. 复合材料结构的适航符合性分析研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(1):1-6.
- ZHENG Xiaoling. Airworthiness compliance analysis of composite structures[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2017(1): 1-6
- [7] 郑晓玲. 民机复合材料结构适航验证技术的方法研究 [C]//中国航空学会. 第 17 届全国复合材料学术会议(复合材料应用及产业化分论坛)论文集. 北京: 中国航空学会, 2012: 13-17.
- ZHENG Xiaoling. Research on the method of airworthiness verification technology of civil aircraft composite structure [C]//China Aviation Society. Proceedings of the 17th National composite Conference (sub Forum on composite application and industrialization). Beijing: China Aviation Society, 2012: 13-17
- [8] 冯振宇, 刘星星, 魏书有, 等. 复合材料 B 基准值统计方法的对比分析 [J]. 材料导报, 2012, 26(S2): 147-149.
- FENG Zhenyu, LIU Xingxing, WEI Shuyou, et al. Comparative analysis of statistical methods of composite B reference value[J]. Materials Reports, 2012, 26 (S2): 147-149.
- [9] 冯振宇, 邹田春, 郝鹏, 等. 复合材料飞机结构材料和设计许用值的确定方法 [J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(5):15-17, 39.
- FENG Zhenyu, ZOU Tianchun, HAO Peng, et al. Determination method of composite aircraft structural materials and design allowable value [J]. Aerospace Materials and Technology, 2011, 41 (5): 15-17, 39.
- [10] 冯振宇, 郝鹏, 邹田春. 复合材料结构损伤容限设计的两个关键参数[J]. 材料导报, 2011, 25(S2): 242-244.
- FENG Zhenyu, HAO Peng, ZOU Tianchun. Two key parameters for damage tolerance design of composite structures[J]. Materials Reports, 2011, 25(S2): 242-244.
- [11] 薛向晨, 王彝, 胡江波, 等. 大型机身复合材料加筋壁板制造技术及应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(16): 88-93.
- XUE Xiangchen, WANG Ben, HU Jiangbo, et al. Manufacturing technology and application of composite stiffened panel for large fuselage [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62 (16): 88-93.
- [12] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 2.
- DU Shanyi, GUAN Zhidong. Reflections on the strategy of advanced composite technology for China's large passenger aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 2.
- [13] Society of Automotive Engineers International. CMH-17-G Composite materials handbook-volume 1: polymer matrix composites: guidelines for characterization of structural materials[S]. Warrendale: SAE International, 2012.
- [14] VANGEL M G. Lot acceptance and composite testing using the sample mean and an extremum[J]. Technometrics, 2002(44): 242-249.
- [15] TOMBLIN J S, NG Y C, RAJU K S. Material qualification and equivalency for polymer matrix composite material systems: updated procedure: DOT/FAA/AR-03/19[R]. Washington: Federal Aviation Administration, 2003.
- [16] 中国航空工业集团公司北京航空材料研究院. GJB 9315—2018 聚合物基复合材料等同性评定程序[S]. 北京: 中国航空工业集团公司北京航空材料研究院, 2018.
- Beijing Institute of Aeronautical Materials, China Aviation Industry Corporation. GJB 9315—2018 polymer matrix composite equivalence evaluation procedure [S]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautical Materials, China Aviation Industry Corporation, 2018.
- [17] 乔永鑫. 复合材料等同性研究及可互替代材料的许用值确定 [C]//2011 年商用飞机复合材料应用国际论坛会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2011.
- QIAO Yongxin. Research on the equivalence of composite materials and determination of the allowable value of alternative materials[C]//Proceedings of 2011 International Forum on Composite Materials Applications for Commercial Aircraft. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [18] 孙盘涛. 复合材料等同性试验[J]. 科技尚品, 2016(3): 23.
- SUN Pantao. Composite material equivalence test[J]. Premiere, 2016(3): 23.
- [19] 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 统计学[M]. 第 6 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2014: 191.
- JIA Junping, HE Xiaoqun, JIN Yongjin. Statistics[M]. 6th ed. Beijing: China Renmin University Press, 2014: 191.
- [20] 甘伦知. 假设检验中控制第二类错误的探讨 [J]. 统计与决策, 2011(22): 35-37.
- GAN Lunzhi. Discussion on the second type of error control in hypothesis testing [J]. Statistics & Decision, 2011(22): 35-37.

通讯作者: 余音, 副教授, 研究方向为复合材料结构分析与试验, E-mail: yuyin@sjtu.edu.cn。

(责编 大漠)