

美国空军
耐久性设计手册背景材料

(下册)



航空航天部(AFFD)系统工程办公室

1989.5.

出版说明

采用耐久性与损伤容限设计技术研制的飞机结构，不但能获得高经济效益，同时又具有高可靠性和维修性。这是当代飞机结构强度设计的最新技术。美国在八十年代初期已于新机研制、老机评估中应用。为了使这项新技术能在我国九十年代以后交付使用的新型机种研制中也能得到应用，《AFFD》系统工程已制订了“飞机结构耐久性设计技术发展计划”，已着手组织力量开展研究。为了配合这项研究工作，我们在翻译出版了“美国空军耐久性设计手册”一书基础上，现将其背景材料翻译出版，以供参考。

在本册中主要收入美空军“耐久性方法研究”第Ⅰ阶段研究计划的研究报告（第Ⅵ卷和第Ⅶ卷），及美海军“典型机械紧固连接件在腐蚀环境中疲劳和裂纹扩展设计与分析方法研究”的第Ⅰ阶段研究计划的研究报告（第Ⅳ卷）。编排顺序如下：

第Ⅳ卷——腐蚀疲劳试验和断口显微观察结果（即美海军第Ⅳ卷）。

第Ⅵ卷——第Ⅰ阶段文件（即美空军第Ⅵ卷）。

第Ⅶ卷——耐久性试验和断口显微观察数据（即美空军第Ⅶ卷）。

参加本册译校的同志有：六二三研究所郑曼仲（高级工程师），六一一研究所王正（高级工程师）、罗安民（工程师）、王世伟（高级工程师）、林梦鹤（研究员级高工）、刘悟泉（高级工程师）、申正金（工程师）、刘益（工程师）、严冬（助理工程师）、徐平（助理工程师）、侯伟（助理工程师）等。全书由王俊扬（教授、研究员级高工）承担责任校对和审定，顾伟豪（研究员级高工）负责最终审定。文中不当之处恳请读者批评指正。

航空航天部《AFFD》系统工程

1988.7.30。

序 言

本计划由通用动力公司的 Fort Worth 分部和作为转包商顾问的里海大学 (R. P. Wei 博士共同实施。本报告以文件的形式报告了通用动力公司在“典型机械紧固连接件在腐蚀环境中的疲劳和裂纹扩展设计与分析方法研究”计划 (NAD C 合同 N6226-81-C-0268) 的第 I 阶段得到的试验和断口显微观察结果。该计划得到海军航空发展中心 (沃明斯特附近) 和课题工程师 Kozel 先生的支持。通用动力公司“福特·万斯”分部的 S. D. Manning 博士是该计划的主管和主要研究者。里海大学的 R. D. Wei 博士是共同的研究者。

通用动力公司的一些人员支持了第 I 阶段的试验计划。D. E. Gordon 协调了整个试验工作项目, 完成了试件, 进行了应变控制试验及常幅试验、涡流检测和断口显微观察评估。S. B. Kirschner 协调了谱载下的犬骨试件试验, 并完成了断口显微观察的评估和数据分析。R. O. Nay 完成了谱载下的犬骨试件试验和试件尺寸的校核。F. C. Nordquist、J. W. Hagemayer 和 H. C. Hoffman 提供了腐蚀疲劳试验的支持。里海大学的 R. P. Wei 博士在确定试验计划和提供宝贵的技术支持上也给予了帮助。

第 I 阶段其他工作项目的研究报告 (NAD C-83126-60-) 包括如下:

- 第 III 卷 —— 第 I 阶段的文件。
- 第 V 卷 —— β 退火的钛合金 Ti-6Al-4V 在 3.5% 氯化钠溶液中的腐蚀疲劳开裂响应。

(译者注:

第 I 阶段的第 III 卷相当于 AFFDL-TR-79-3118 的第 VII 卷;

第 I 阶段的第 V 卷相当于 AFFDL-TR-79-3118 的第 VIII 卷;

AFFDL-TR-79-3118 系提供给美国空军的耐久性方法研究计划的背景材料。)

第 VI 卷

腐蚀疲劳试验和断口 显微观察结果

作者 D.E.Gordon

S.B.Kirschner

S.D.Manning

R.P.Wei

目 录

1. 前言	
2. 腐蚀疲劳试验计划概述	
3. 第Ⅱ阶段的试验计划	
3.1 引言	3
3.2 第Ⅱ阶段的试验目标	3
3.3 试验计划的基本观点	3
3.4 试验的安排和数据组的标示法	4
3.4.1 试验的编码系统	
3.4.2 材料	
3.4.3 试验件的设计	
3.4.4 环境	
3.4.5 加载类型	
3.4.6 载荷谱	
3.4.7 加载频率	
3.4.8 螺栓载荷传递	
3.4.9 应力水平	
4. 试验细节和数据收集过程	
4.1 引言	14
4.2 试验件的准备	14
4.2.1 应变控制试件	
4.2.2 犬骨试件	
4.2.3 预处理	
4.2.4 紧固件的类型及安装	
4.3 环境箱	15
4.3.1 应变控制试验	
4.3.2 无载荷传递的犬骨试件试验	
4.3.3 有载荷传递的犬骨试件试验	
4.4 应变控制试验	17
4.4.1 实验过程	
4.4.2 裂纹检测的无损探伤(NDI)监测法	
4.5 犬骨试件试验	22

4.6	试验谱	24
4.7	断口显微观察分析	27
4.7.1	一般过程	
4.7.2	裂纹起始源	
4.8	断口显微观察结果的外推	29
附录A	7075-T7651 铝合金的应变控制试验结果	30
附录B	Ti-6Al-4V 钛合金的应变控制试验结果	38
附录C	犬骨试件(7075-T7651 铝合金)常幅试验结果	44
附录D	任务4的(7075-T7651 铝合金)谱载疲劳试验 结果和断口显微观察数据	
附录E	任务5的(7075-T7651 铝合金)谱载疲劳试验 结果和断口显微观察数据	
附录F	任务6的(7075-T7651 铝合金)谱载疲劳试验 结果和断口显微观察数据	

参考文献

(译者注: 附录 D、E、F 略去, 未译)。

目 录

- 图 1 应变控制试件
- 图 2 β 退火的 Ti-6Al-4V 钛合金紧凑拉伸试件
- 图 3 犬骨试件
- 图 4 应变控制试验的环境箱和试验装置
- 图 5 无载荷传递的犬骨试件试验所使用的环境箱
- 图 6 用于钉传载荷试验的带加载梁的整体环境箱细节
- 图 7 应变控制试验方法研究的要素
- 图 8 用于应变控制试件的应变检测装置
- 图 9 应变控制试件的应变计安装
- 图 10 在 Moseley Model 7000A X-Y 记录仪上记录的典型应力—应变迟滞回线
- 图 11 用 Gould Brush 2200 两通道条纹绘图记录仪得到的典型载荷—时间迹线和应变—时间迹线
- 图 12 无螺栓传载的犬骨试件试验的试验装置
- 图 13 螺栓传载的犬骨试件试验所用的试验装置
- 图 14 F-16 400 小时谱的载荷历程的例子
- 图 15 F-18 300 小时(随机)谱(“B”)的载荷历程的条纹绘图迹线
- 图 16 F-18 300 小时(块)谱(“C”)的载荷历程的条纹绘图迹线
- 图 17 对于 F-16 400 小时谱(“A”)相应于大于 80% 载荷的试件裂纹扩展标记
- 图 18 对于 F-18 300 小时谱相应于大于 90% 载荷的试件裂纹扩展标记:
(a) 随机谱(“B”); (b) 块谱(“C”)
- 图 A 1 (7075-T7651 铝合金在疲劳循环中的典型应力—应变迟滞回线
- 图 A 2 应变控制试件轴向应变与轴向载荷的关系曲线(7075-T7651 铝合金)
- 图 A 3 应变控制试件轴向变形与轴向载荷的关系曲线(7075-T7651 铝合金)
- 图 A 4 应变控制试件轴向应变的关系曲线(7075-T7651 铝合金)
- 图 A 5 应变控制试件轴向变形与轴向应变的关系曲线(7075-T7651 铝合金)
- 图 A 6 作为疲劳循环函数的最大拉伸载荷(试件 42CS, 47CS 和 48CS, 7075-T7651 铝合金)

- 图 A 7 对四种不同的总应变水平, 作为疲劳循环函数的最大拉伸载荷
- 图 A 8 在应变控制试件中, 作为裂纹尺寸函数的最大拉伸应力的降低 (7075-T7651 铝合金)
- 图 A 9 7075-T7651 铝合金在干燥空气和 3.5% 氯化钠溶液中总应变幅值与裂纹形成反复数的关系曲线
- 图 A 10 7075-T7651 铝合金在 3.5% 氯化钠溶液中, 不同载荷频率下总应变幅值与裂纹形成反复数的关系曲线
- 图 B 1 β 退火的 Ti-6Al-4V 在疲劳循环中的应力—应变迟滞回线 ($\Delta\epsilon_r/2 = 1.06\%$)
- 图 B 2 应变控制试件的轴向变形与轴向应变的关系曲线 (β 退火的 Ti-6Al-4V)
- 图 B 3 β 退火的 Ti-6Al-4V 在干燥空气中和 3.5% 氯化钠溶液中总应变幅值与裂纹形成反复数 $2N_f$ 的关系曲线
- 图 B 4 β 退火的 Ti-6Al-4V 在干燥空气和 3.5% 氯化钠溶液中, 不同加载频率下总应变幅值与裂纹形成反复数 $2N_f$ 的关系曲线
- 图 B 5 β 退火的 Ti-6Al-4V 塑性应变幅值随循环数的变化曲线
- 图 B 6 β 退火的 Ti-6Al-4V 在干燥空气和 3.5% 氯化钠溶液中塑性应变幅值与裂纹形成反复数 $2N_f$ 的关系曲线
- 图 B 7 β 退火的 Ti-6Al-4V 在干燥空气和 3.5% 氯化钠溶液中单位塑性功与裂纹形成反复数 $2N_f$ 的关系曲线

表 目

- 表 1 第 I 阶段的试验件安排
- 表 2 第 I 阶段的试验变量
- 表 3 实验方法的研制和评估试验 (任务 4)
- 表 4 任务 5 的应变控制试验
- 表 5 任务 5 的 Ti-6Al-4V 钛合金裂纹扩展试验
- 表 6 任务 5 的犬骨试件试验
- 表 7 任务 6 的犬骨试件试验
- 表 8 描述试验的编码系统
- 表 9 标准孔径
- 表 10 F-16 400 小时块谱按 5% 间隔的载荷点的分解
- 表 11 F-16 400 小时与 F-18 300 小时试验谱的比较
- 表 A 1 应变控制试件的应变测量结果 (7075-T7651 铝合金)
- 表 A 2 7075-T7651 铝合金在干燥空气和实验室空气环境中的应变控制试验结果
- 表 A 3 7075-T7651 铝合金在 3.5% 氯化钠溶液中的应变控制试验结果
- 表 B 1 β 退火的 Ti-AA 1-4V 钛合金在干燥空气和 3.5% 氯化钠溶液中的应变控制试验结果
- 表 C 1 经过预处理的犬骨试件在干燥空气和 3.5% 氯化钠溶液中的应力控制常幅疲劳试验结果 (7075-T7651 铝合金, $R = 0.05$, 频率 = 6 Hz, 开孔)
- 表 C 2 载荷传递百分比为 20% 和 40% 的犬骨试件在干燥空气和 3.5% 氯化钠溶液中的应力控制常幅疲劳试验结果 (7075-T7651 铝合金)
- 表 D 1 任务 4 的犬骨试件谱载疲劳试验结果摘要 (7075-T7651 铝合金, F-16 400 小时谱)
- 表 D 2 任务 5 的犬骨试件谱载疲劳试验结果的摘要 (7075-T7651 铝合金)
- 表 F 1 任务 6 的犬骨试件谱载疲劳试验结果的摘要 (7075-T7651 铝合金)

1. 前 言

本报告以文件的形式提供了通用动力公司在腐蚀疲劳试验计划第Ⅱ阶段中得到的试验结果和断口显微观察结果，並描述了试验安排、试验装置、试验过程、试件详图、数据采集方法等。同时，还提供了原始断口显微观察结果和支持细节。而关于第Ⅱ阶段试验计划的结论和建议，包括对试验和断口显微观察结果的评估，都放在第Ⅲ卷〔1〕中提出。

本报告提供的大部分试验和断口显微观察结果是对7075-T7651铝合金而言的，同时，本报告还提供了Ti-6Al-4V钛合金应变控制试件的试验结果。而第Ⅱ阶段Ti-6Al-4V钛合金的试验结果及评估（由里海大学执行并作为第Ⅱ阶段钛合金基本研究项目的一部分）以文件的形式提供于第V卷中。

第二章给出了机械固定连接件腐蚀疲劳计划的简要概述。第三章描述了第Ⅱ阶段的腐蚀疲劳（CF）试验计划。第四章描述了试验过程和数据采集方法（包括断口显微观察数据）。在附录A和B中，分别提供了7075-T7651铝合金和 β 退火的Ti-6Al-4V钛合金应变控制试验结果。在附录C中提供了7075-T7651铝合金犬骨试件常幅疲劳试验结果。在附录D、E和F中，分别提供了任务4、5和6的犬骨试件谱载疲劳试验结果和适宜的断口显微观察数据。

2. 腐蚀疲劳试验计划概述

本章的目的是概述机械紧固连接件腐蚀疲劳试验计划的全部目标，并浏览本卷的试验结果。

该计划的主要任务是：

1. 研制和确认一种预测机械紧固连接件在腐蚀环境中的 T T C I 和裂纹扩展寿命的分析方法。

2. 为了获取统计上有效的数据以完成分析方法，研制腐蚀疲劳试验方法、数据获取方法和指南。

3. 研究各种因素对机械紧固连接件腐蚀疲劳特性的影响。

以文件的形式列于第 I 和第 II 卷中 [3, 4] 的第 I 阶段工作项目涉及下述三个任务：

- 任务 1 方法和数据的技术发展水平的评估；
- 任务 2 方法的研制；
- 任务 3 试验计划的研制。

在第 I 阶段中，概述了现有的腐蚀疲劳分析方法，对两种不同的材料（7075-T7651 铝合金和 β 退火的钛合金 Ti-6Al-4V），用实验的方法探索和评估了各种因素（即应力水平、应力比 R、加载频率、环境保持时间等）对 T T C I 和裂纹扩展的影响，并为第 I 阶段的工作研制出了一个试验计划。在第 I 阶段中，为第 II 阶段的评估推荐了预测机械紧固件 T T C I 和裂纹扩展的最适合的腐蚀疲劳分析方法。在第 I 阶段工作中，还获取了常幅腐蚀疲劳数据。

第 II 阶段的工作、数据获取和方法评估包括三个任务：

- 任务 4 实验方法的研制和评估；
- 任务 5 为预测飞机连接件在环境中的裂纹扩展而采集数据；
- 任务 6 预测方法的评估和验证。

第 II 阶段工作的任务是：（1）为机械紧固连接件获取腐蚀疲劳数据，研制并评估适宜的实验方法和试件；（2）为实现第 I 阶段中推荐的预测方法而获取必需的腐蚀疲劳数据；（3）对于用来预测机械紧固连接件在谱载下的疲劳寿命的腐蚀疲劳分析方法，评估其有效性；（4）评估各种因素（即加载频率、应力比 R、应力水平、载荷传递、载荷谱）对机械紧固连接件的 T T C I 和裂纹扩展的影响。

在第 I 阶段中，发现 Ti-6Al-4V 钛合金的腐蚀疲劳特性是非常复杂的 [3]。由于这个原因，第 II 阶段的工作主要是涉及演示和评估 7075-T7651 铝合金的腐蚀疲劳方法。在第 II 阶段，对 Ti-6Al-4V 钛合金的研究仅局限于研制一种更好理解的腐蚀疲劳裂纹扩展机理，并只侧重于加载频率的影响 [2]。

本卷提供了第 II 阶段实施的试验计划的文件资料，包括原始试验结果和断口显微观察结果。在第 III 卷 [1] 中评估了本卷提供的第 II 阶段试验结果和断口显微观察结果，同时还提供了结论和建议。

3. 第II阶段的试验计划

3.1 引言

本章的目的是描述在机械紧固连接件腐蚀疲劳计划的第I阶段要做些什么试验,并讨论整个的试验任务。详细的试验过程和获取实验结果的方法将在第四章中讨论。在第I阶段中已经研制出了第II阶段工作的初步试验计划,并已在第I卷中〔3〕进行了描述。在第I阶段工作进程中定期地调整了初步试验计划,以使后面的试验能够建立在第I阶段试验结果和需要的基础上。

3.2 第II阶段的试验目标

第I阶段试验计划的主要目标是:

1. 为获取机械紧固连接件腐蚀疲劳数据研制和评估适宜的试验方法和试件(任务4)。
2. 为完成和“调谐”谱载下的腐蚀疲劳分析方法而采集统计上有效的腐蚀疲劳数据。
3. 为评估各种因素(如载荷频率、应力比R、应力水平、载荷谱和载荷传递百分比)对紧固孔参考裂纹形成时间(TTCI)和破坏时间(TTF)的影响,提供统计上有效的实验数据(任务5)。
4. 对Ti-6Al-4V钛合金,为研制一种更好理解的基本机理和载荷频率对疲劳裂纹扩展的影响提供关键的实验结果(任务5)。
5. 为紧固孔的裂纹萌生和扩展提供腐蚀疲劳试验结果,以使用它们来评估第I卷〔3〕中描述的分析方法的精度(任务6)。

3.3 试验计划的基本观点

机械紧固连接件的腐蚀疲劳特性是很复杂的。因此,第I阶段试验计划中反映了下面的基本观点:

- 使试验变量的数目减到最少,以便孤立腐蚀疲劳的影响。
- 反复试验,以便获得统计上有效的数据。
- 考虑机械紧固连接件的最基本要素(即单孔、直缝孔、犬骨紧固件和紧固件的载荷传递)。
- 对有或没有紧固件转载的直孔,研究一种更好理解的腐蚀疲劳特性。
- 由于腐蚀疲劳的复杂性,将随着结构复杂性的增加逐步发展和验证代表一代技术水平的腐蚀疲劳分析方法。在考虑较复杂的连接件以前,先研究对简单连接件的理解和数据。
- 建立在第I阶段工作的试验数据和理解之上。




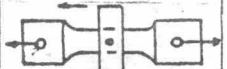
- 研究和验证 7075-T7651 铝合金的腐蚀疲劳分析方法。
- 研究一种更好理解的 Ti-6Al-4V 钛合金腐蚀疲劳机理〔2〕。

3.4 试验的安排和数据组的标示法

本节将描述在第 I 阶段要做哪些试验，同时，也讨论试验计划中反映的关键试验变量和试验基本原理。而详细的试验过程和获取数据的方法将在第四章中讨论。

第 I 阶段腐蚀疲劳计划的试验安排包括了表 1 所示的 253 个试验件。图 1-3 给出了试件的详图。表 2 给出了用于第 I 阶段试验变量的概况。

表 1 第 I 阶段的试验件安排

试 件		材 料	试 件 数			Σ
形 状	类 型		任务 4	任务 5	任务 6	
 图 1	S-C	7074-T7651	5	45	0	50
		Ti-6Al-4V	1	29	0	30
 图 2	CT	Ti-6Al-4V	0	9*	0	9*
 图 3	NLT	7075-T7651	23	90	3	116
 图 4	LT	7075-T7651	2	3	43	48
Σ			31	176	46	253

注：任务 4 —— 实验方法的研究和评估

任务 5 —— 获取预测飞机连接件在环境中的裂纹扩展的数据

任务 6 —— 预测方法的评估和验证

S-C —— 应变控制

CT —— 紧凑拉伸

NLT —— (通过紧固件) 无载荷传递

LT —— (通过紧固件) 有载荷传递

*：第 V 卷〔2〕以资料的形式报告和评估了这些结果。

表 3~表 7 给出了任务 4、5、6 的试验计划。为了跟踪的需要，用标识号和数据组编号规定了各项试验。表 3~表 7 给出了每个数据组下进行试验的试验件总数和其它试验细节。

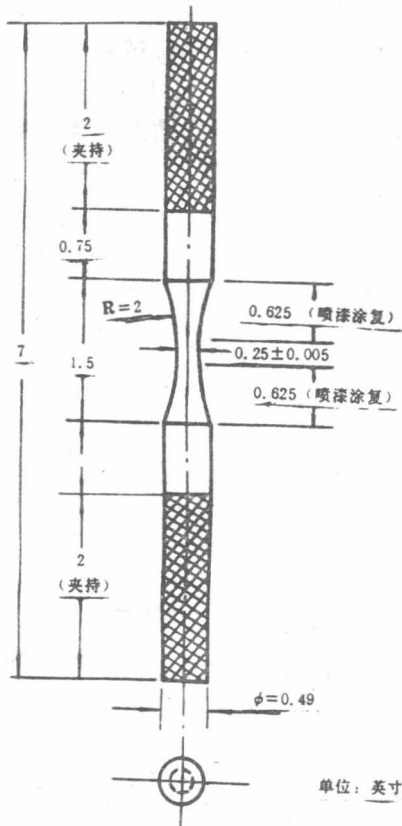


图 1 应变控制试件

单位：英寸

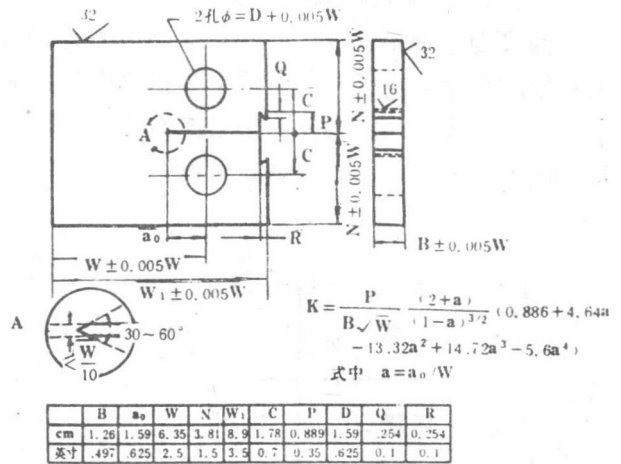


图 2 β退火的Ti-6Al-4V
钛合金紧凑拉伸试件

单位：英寸

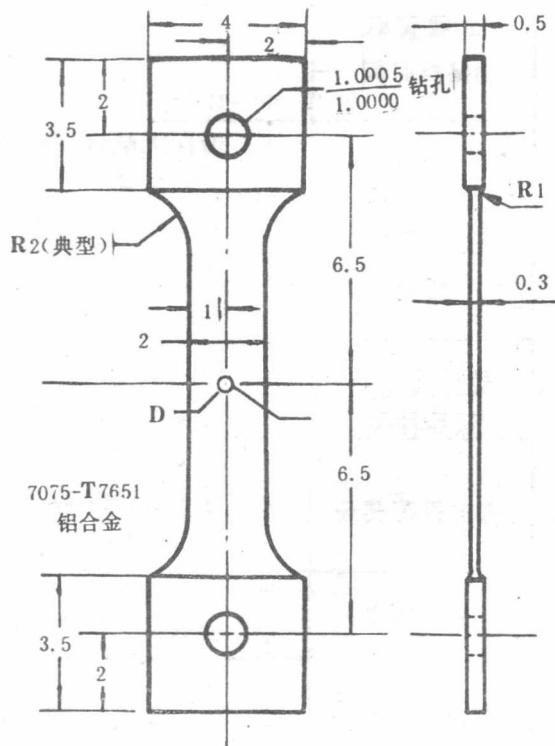


图 3 犬骨试件

3.4.1 试验的编码系统

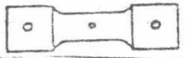

为了简明地描述表3~表7中采用的关键试验变量，便于区分试验，设计了一套编码系统。表8给出并举例说明了本报告中采用的编码系统。

表3~表7还用数据组编号区分了试验，以便将试验件分组，并用适当的数据组编号来区别它们。整个报告中都采用了这套系统。

表2 第I阶段的试验变量

材料	<ul style="list-style-type: none"> • 7075-T7651铝合金 • Ti-4Al-4V钛合金
环境	<ul style="list-style-type: none"> • 干燥空气 • 3.5%氯化钠溶液
加载类型	<ul style="list-style-type: none"> • 应变控制 • 常幅 • 谱载
载荷谱	<ul style="list-style-type: none"> • F-16 400小时(高一低块谱) • F-18 300小时(随机谱) • F-18 300小时(高一低块谱)
加载频率和保持时间	<ul style="list-style-type: none"> • 常幅(0.3~20Hz) • 谱(快、慢、特慢) • 保持时间(0~2.33秒)
试验件	<ul style="list-style-type: none"> • 轴向无缺口(应变控制) • 紧凑拉伸 • 带有中心孔的犬骨试件
紧固件	<ul style="list-style-type: none"> • 通孔(不带螺栓) • 带螺栓
螺栓孔制备	<ul style="list-style-type: none"> • 抛光
螺栓种类	<ul style="list-style-type: none"> • 钢制凸头(镀锡)(如NAS 6207)
螺栓载荷传递	<ul style="list-style-type: none"> • 0%的载荷传递 • 20%的载荷传递 • 40%的载荷传递
应力水平	<ul style="list-style-type: none"> • 基本应力 • 其它
试件的预处理	<ul style="list-style-type: none"> • 无 • 预试验并预先浸入3.5%的氯化钠溶液中

表 3 实验方法的研制和评估试验(任务4)


试件	谱	材	料	试验标识号	数据组编号	试件细节			环		境		率		试验件数	
						载荷传递百分比	有螺栓否	预处理否	干空气	3.5% NaCl 溶液	快	慢				
 (图3)	F-16 400小时	7075-T7651		A-34/S/D	41	No	No	X	-	X	1					
				A-34/F/W	42			-	-	-	X	-	1			
				A-34/S/W	43			-		-	-	X	-	3		
				A-32/S/D	44			X			-	-	X	3		
				A-32/F/W	45			-			-	X	-	1		
				A-32/S/W	46			-			-	X	-	3		
				A-30/F/D	47			X			X	-	-	2		
				A-30/S/D	48			X			X	-	-	1		
				A-30/F/W	49			-			-	X	-	3		
				A-30/20/S/W	50			20	Yes		-	X	-	1		
				A-30/20/F/W	54			20	Yes		-	X	-	1		
				A-28/F/W/B	51			0	Yes		-	X	-	1		
				A-28/F/W/B/PC	52			↓		Yes	-	X	-	2		
A-28/S/W/B/PC	53			0			-	X	-	2						
 (图1)	常幅 (R=1) (应变控制)	Ti-6Al-4V		SCIA	71						5					
				SCIT	81								1			

应变测量试验

表 4 任务 5 的应变控制试验

载 荷	材 料	试 验 标识号	数 据 组 号 编 号	环 境		频 率	试 验 件 数
				干 燥 空 气	3.5% NaCl 溶 液		
(R = - 1)	7075-T7651	SC/D/A	7 2	X	—	可 变	2 2
	7075-T7651	SC/W/A	7 3	—	X	可 变	2 3
	Ti-6Al-4V	SC/D/T	8 2	X	—	可 变	1 8
	Ti-6Al-4V	SC/D/T	8 3	—	X	可 变	1 1
							7 4

表 5 任务 5 的 Ti-6Al-4V
钛合金裂纹扩展试验

试 件	材 料	环 境	应力强度因子水平			试 验 件 数
			低	中	高	
	Ti-6Al-4V	氧 (参考)	X	—	—	2
			—	X	—	2
			—	—	X	2
	Ti-6Al-4V	3.5% NaCl 溶 液	X	—	—	1
			—	X	—	1
			—	—	X	1
						9

注： 1. 参考第 I 卷 [3] 在真空中的试验
2. 参考第 V 卷 [2] 试验细节和结果