航空航天装备

# 2024-T3 铝合金单搭接化铣板疲劳 特性及失效机理

# 杨廷勇<sup>1</sup>,邓文<sup>1</sup>,李建伟<sup>2</sup>,朱志鹏<sup>1</sup>

(1.中国直升机设计研究所,江西 景德镇 333001; 2.陆军装备部航空军事代表局驻景德镇 地区航空军事代表室,江西 景德镇 333002)

摘要:目的 研究 2024-T3 铝合金单搭接化铣板的疲劳性能及失效形式。方法 采用步进法对化铣板搭接件进 行疲劳试验,运用奈尔检验法对疲劳强度进行数据处理,运用扫描电子显微镜和能谱分析对典型疲劳断口 进行观察和成分分析,对比基板厚度和铆钉孔径对化铣板搭接件疲劳强度的影响,分析并探讨 2024-T3 铝合 金化铣板搭接件的疲劳失效形式及机理。结果 基板厚度对 2024-T3 铝合金化铣板搭接件的疲劳强度影响较 大,而铆钉孔径影响较小。随着基板厚度的增加,化铣板搭接件的疲劳强度呈现出降低的趋势,对 2 种铆 钉孔径 (3、4 mm),厚度为 1.8 mm 化铣板搭接件的疲劳强度较厚度为 0.6 mm 的试样分别降低了 13.2%和 13.0%。基板厚度增加使铝合金化铣板搭接件的疲劳失效形式从上基板铆钉头部失效变为下基板纽扣处失 效,并最终表现为铆钉断裂失效。结论 随着基板厚度增加,搭接件微动磨损加剧,加速了疲劳裂纹萌生, 这是造成 2024-T3 铝合金化铣板搭接件疲劳强度显著降低的主要原因。

关键词: 2024-T3 铝合金; 化铣板; 单搭接; 疲劳试验; 微动磨损; 步进法

中图分类号: TG146.2+1 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)10-0065-08 **DOI**: 10.7643/issn.1672-9242.2022.10.009

# Fatigue Properties and Failure Mechanisms of Single-lap Chemical Milling on 2024-T3 Aluminum Alloy Sheet

YANG Ting-yong<sup>1</sup>, DENG Wen<sup>1</sup>, LI Jian-wei<sup>2</sup>, ZHU Zhi-peng<sup>1</sup>

(1. China Helicopter Research and Development Institute, Jiangxi Jingdezhen 333001, China; 2. Aviation Military Representative Office of the Aviation Military Representative Bureau of the Army Equipment Department in Jingdezhen, Jiangxi Jingdezhen 333002, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to study the fatigue properties and failure mode of 2024-T3 aluminum alloy single-lap chemical milling sheet. We carried out the fatigue test on chemical milling sheet joint with different sizes by using the step-by-step method, processed the fatigue strength data by using the Nair test method, observed the typical fatigue fracture, and analyzed by

minum Alloy Sheet[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 065-072.

收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2022-09-09

Received: 2022-07-22; Revised: 2022-09-09

作者简介:杨廷勇(1994—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为直升机疲劳试验设计及寿命预测技术。

**Biography:** YANG Ting-yong (1994-), Male, Master, Assistant engineer, Research focus: fatigue test design and life prediction technology of helicopter parts.

通讯作者:邓文(1985—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为直升机疲劳试验技术。

Corresponding author: DENG Wen (1985-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: helicopter fatigue test technology.

**引文格式:**杨廷勇,邓文,李建伟,等.2024-T3 铝合金单搭接化铣板疲劳特性及失效机理[J]. 装备环境工程,2022,19(10):065-072. YANG Ting-yong, DENG Wen, LI Jian-wei, et al. Fatigue Properties and Failure Mechanisms of Single-lap Chemical Milling on 2024-T3 Alu-

using the scanning electron microscope and Energy spectrum analysis. We compared the effects of substrate thickness and rivet aperture on the fatigue strength of aluminum alloy chemical milling sheet joint as well as analyzed and discussed the fatigue failure mode and mechanism of 2024-T3 aluminum alloy single-lap chemical milling sheet joint. The result shows that the substrate thickness has a great influence on the fatigue strength of 2024-T3 aluminum alloy chemical milling sheet joint aluminum alloy chemical milling sheet joint while the rivet aperture has little influence. With the increase of substrate thickness, the fatigue strength of aluminum alloy chemical milling sheet joint shows a gradual decreasing trend. For two kinds of rivet holes (3 mm and 4 mm), the fatigue strength of chemical milling sheet joint with thickness of 1.8 mm is 13.2% and 13.0% lower than that of 0.6 mm respectively. With the increase of substrate thickness, the fatigue failure of upper substrate to button failure of lower substrate and rivet fracture failure in the end. In addition, the fretting wear of the lap joint is intensified and fatigue crack initiation is accelerated, which is the main reason for the significant reduction of fatigue strength of 2024-T3 aluminum alloy milling sheet joint.

KEY WORDS: 2024-T3 aluminum alloy; chemical milling sheet; single-lap; fatigue test; fretting wear; steps method

2024 铝合金以其高比强度、高断裂韧性以及良好的抗疲劳性能,在航空航天领域得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。 在直升机零部件中,2024 铝合金常以连接件的形式存在,这使得近几年兴起的铆钉搭接技术得到了快速发展。铆钉搭接技术主要依靠铆接过程中上下板材及铆钉的塑性大变形和回弹形成的机械自锁来实现,具有操作简单、生产周期短、自动化程度高等优点<sup>[4-5]</sup>。然而采用铆钉搭接的紧密配合件却普遍存在微动磨损现象,微动磨损是造成零部件失效的主要原因之一<sup>[6-8]</sup>。

由于铆钉搭接件存在孔边应力集中和微动磨损 作用,对金属材料疲劳性能的影响较大<sup>[9-10]</sup>,国内外 学者对搭接件的疲劳性能进行了大量的研究。郁大照 等<sup>[11]</sup>对 LY12CZ 铝合金三螺栓单搭接件的疲劳性能 进行了研究,发现搭接件紧固孔处有微动磨损发生, 同时搭接件的疲劳破坏有一定的隐蔽性。杨茂胜等[12] 通过试验方法和有限元模拟分析了微动磨损对搭接 件疲劳性能的影响,发现微动磨损能大幅度降低搭接 件的疲劳性能。赵伦等[13]通过研究基板厚度对 5052 铝合金自冲铆搭接件接头疲劳性能的影响,发现基板 厚度的增加能有效提高接头的疲劳性能。虽然有关金 属材料铆钉搭接件的疲劳性能研究较为深入,但有关 采用化学铣切特种加工工艺处理的金属材料搭接件 疲劳性能的研究却鲜有报道。化学铣切作为一种无刀 具、无切屑、无工具的可靠特种加工方法,在航空航 天零部件成形过程中得到广泛的应用[14-16]。王煜等[17] 研究发现,与传统机械加工方法相比,化学铣切方法 更可靠有效,且不会产生任何加工应力。杨慎亮等[18] 通过单因素试验法发现,合适的化学铣切参数能改善 TC4 钛合金表面的完整性,从而提高材料的疲劳性 能。到目前为止,化学铣切搭接件疲劳性能如何,基 板厚度及铆钉孔径对搭接件疲劳性能的影响规律及 机理尚不清楚。

基于此,本文以单搭接的 2024-T3 铝合金化铣 板为研究对象,采用步进法对铝合金化铣板搭接件 进行疲劳试验,对比分析基板厚度和铆钉孔径对化 铣板搭接件疲劳性能的影响,通过疲劳失效形式分 析进一步探讨 2024-T3 铝合金单搭接化铣板的疲劳 失效机理。

## 1 试验

#### 1.1 材料

本文被连接材料为 2024 铝合金, 化学成分及力 学性能见表 1 及表 2。铝合金板材经过化学铣切工艺 处理:碱清洗—水洗—脱氧—水洗—干燥—涂保护胶 —剥离保护胶化学铣切—干燥—去保护胶, 化铣板搭 接件表面最后进行硫酸阳极化处理。疲劳试验所用试 样形状如图 1 所示, 基板厚度 t 包括 0.6、1.2、1.8 mm 等 3 种尺寸, 铆钉直径 d 包括 3 mm 和 4 mm。化铣 板连接形式为单搭接类型, 铆钉为 HB6231 半圆头铆 钉, 材料为 LY10。

#### 1.2 方法

在 PLD-100 疲劳试验机上分别对 6 种不同尺寸

表 1	2024 铝合金、LY10 化学成分
Tab.1 Chemical of	omposition of 2024 aluminum alloy and LY10

				•		2			%
材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
2024	0.05	0.5	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.1	0.25	0.15	余量
LY10	0.25	0.2	3.9~4.5	0.3~0.5	0.15~0.3	—	0.1	0.1	余量

140.2 111	eenamear prop		aranniani ano	y und ETTO
材料	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	伸长率/ %
2024	335	510	73	_
LY10	—	392	71	20
$F \leftarrow -$				2.5d $F$
<i>F</i> <[		2d 2d	8d 6d	$\frac{1}{1-\frac{1}{2}} \frac{t}{t} >_F$ mm

表 2 2024 铝合金、LY10 力学性能 Tab.2 Mechanical properties of 2024 aluminum alloy and LY10



的 2024-T3 铝合金单搭接化铣板进行疲劳试验,采用 拉-拉加载方式,应力比 R=0.1,加载波形为正弦波, 试验频率为 10 Hz,在室温下进行。疲劳试验按照步 进法突出的优点体现在能快速试验,并且可以获得 材料损伤后的疲劳极限<sup>[20]</sup>。该方法中,每个条件的第 一件试样先按照一定的初始载荷进行试验,当循环次 数超过一定基数后,若试样未破坏,则载荷应力增加 步长 Δσ 继续试验,直到试样发生破坏。后面同一尺 寸条件的试样均按上述方法进行,但第一级应力载荷 要比第一件试样的破坏应力低 1 级。试验结束后,按 照式(1)计算每个试样的疲劳强度。初始载荷为 45 MPa,步长 Δσ=5 MPa,每种尺寸条件各取 4 件有 效试样。疲劳试验结束后,利用扫描电子显微镜对疲 劳断口形貌进行观察。

$$\sigma_{\rm FS} = \sigma_{\rm pr} + \frac{N_{\rm f}}{N} (\sigma_{\rm f} - \sigma_{\rm pr}) \tag{1}$$

式中: $\sigma_{\rm pr}$ 为不会导致试样破坏的最高一级载荷 应力; $\sigma_{\rm f}$ 为导致破坏时的载荷应力; $N_{\rm f}$ 为载荷应力 $\sigma_{\rm f}$ 下的循环次数;循环基数 N 为 2×10<sup>5</sup>次。

# 2 结果与分析

#### 2.1 疲劳试验数据处理及分析

6种不同尺寸的 2024-T3 铝合金单搭接化铣板疲 劳试验统计结果见表 3。基于 Minitab 软件的多变异 图如图 2 所示。从图 2 可知,当 *d*=3 mm、*t*=1.8 mm 时,聚类性最差,可能存在离群值,而在其他尺寸下, 数据点具有明显的聚类性。

假设单一尺寸化铣板搭接件的疲劳强度服从正态分布,参照 GB/T 4883—2008《数据的统计处理和 解释——正态样本离散群值的判断和处理》<sup>[21]</sup>,使用 奈尔检验法剔除离群值。奈尔检验法按式(2)—(4)

表 3	不同尺寸疲劳试样在不同应力水平下的
	循环次数及疲劳强度

Tab.3 Cycle times and fatigue strength of specimens with different thickness under different stress levels

试样尺寸/ mm	试样 编号	初始载荷/ MPa	σ₁∕ MPa	步数	$N_{ m f}$	σ <sub>FSi</sub> / MPa
<i>d</i> =3, <i>t</i> =0.6	1	45	80	8	184 660	79.62
	2	75	90	4	33 987	85.85
	3	75	85	3	148 762	83.72
	4	75	85	3	172 462	84.31
	1	45	80	8	188 953	79.72
<i>d</i> −2 ←1 2	2	75	85	3	33 231	80.83
u - 3, u - 1.2	3	75	85	3	119 467	82.99
	4	75	80	2	178 345	79.46
	1	45	65	5	156 487	63.91
d−3 ←1 8	2	60	75	4	108 365	72.71
<i>u</i> - <i>3</i> , <i>i</i> -1.8	3	60	75	4	127 680	73.19
	4	60	75	4	79 143	71.98
	1	45	85	9	38 657	80.97
d=1 ≠0.6	2	80	85	2	187 465	84.69
<i>u</i> -4, <i>i</i> -0.0	3	80	90	3	50 789	86.27
	4	80	85	2	183 675	84.59
	1	45	80	8	191 876	79.80
$d=4 \neq 12$	2	75	85	3	183 198	84.58
<i>u</i> -4, <i>i</i> -1.2	3	75	85	3	48 356	81.21
	4	75	85	3	42 789	81.07
	1	45	75	7	73 359	71.83
<i>d</i> −1 ←1 9	2	70	75	2	116 439	72.91
u=4, t=1.8	3	70	75	2	133 428	73.34
	4	70	75	2	183 284	74.58

注: σ<sub>FSi</sub>为单个试件的疲劳强度。



图 2 不同尺寸 2024-T3 铝合金单搭接化铣板疲劳试验 结果多变异图



进行,当统计量  $R_n > R_{1-a}(n)$ 时,判定数据点为离群值, 剔除离群值后继续检验。经检验当 d=3 mm t=1.8 mm时,存在一个无效强度值 63.91 MPa,其余数值均为 有效值。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\sigma_{\rm FSi} - \overline{\sigma_{\rm FS}}\right)}{n-1}} \tag{2}$$

$$\overline{\sigma_{\rm FS}} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{\rm FSi} / n \tag{3}$$

$$R_n = \left| \sigma_{\rm FSi} - \overline{\sigma_{\rm FS}} \right| / S \tag{4}$$

式中: *S* 为每种尺寸条件下 4 件平行试样的疲劳 强度标准差;  $\overline{\sigma_{\text{FS}}}$  为疲劳强度平均值;  $R_{1-\alpha}(n)$ 为临界 值, 当检验水平  $\alpha=0.9$ , n=4 时,  $R_{0.1}(4)=1.696$ ,  $R_{0.1}(3)=1.497$ 。

为了直观分析尺寸对化学板搭接件疲劳强度均 值的影响,绘制了在步进法疲劳试验方法下6种不同 尺寸化铣板搭接件的平均疲劳强度,如图3所示。由 图 3 可知, t=0.6 mm、d=4 mm 搭接件平均疲劳强度 最高(84.13 MPa), t=1.8 mm、d=3 mm 搭接件平均 疲劳强度最低(72.63 MPa)。当铆钉孔径相同时,随 着基板厚度的增加,搭接件的平均疲劳强度呈现出逐 渐降低的趋势,其中厚度为 1.8 mm 搭接件的疲劳强 度较前2种尺寸明显降低。对2种铆钉孔径搭接件, 厚度为 1.8 mm 搭接件的平均疲劳强度值较厚度为 0.6 mm 搭接件分别降低了 13.2%和 13.0%, 说明 2024-T3 铝合金单搭接化铣板疲劳强度受厚度的影响 较大。同时,由图 3 可以看出铆钉孔径的变化对 2024-T3 铝合金化铣板搭接件疲劳强度的影响。当基 板厚度一定,铆钉孔径由 3 mm 增加至 4 mm 时, 3 种厚度搭接件的平均疲劳强度均略有增加,但增幅不 大。由此说明,在本文选定的条件下,孔径的变化对 搭接件疲劳强度的影响不明显。



Fig.3 Fatigue strength of 2024-T3 aluminum alloy single-lap chemical milling sheet with different sizes

### 2.2 疲劳失效模式分析

2024-T3 铝合金单搭接化铣板疲劳试验后的宏观

形貌如图 4 所示。可以看出, 化铣板搭接件的失效部 位均在铆钉孔处。当 *d*=3 mm 时, 3 种厚度试样的失 效形式各不相同, *t*=0.6 mm 试样的失效形式为上基板 断裂失效, *t*=1.2 mm 试样的失效形式为下基板断裂失 效, 而 *t*=1.8 mm 试样的失效形式为铆钉断裂失效。



a d=3 mm



图 4 2024-T3 铝合金化铣板搭接件疲劳失效形式 Fig.4 Fatigue failure mode of 2024-T3 aluminum alloy milling sheet joint

当 d=4 mm 时, t=0.6 mm 化铣板搭接件的失效形 式均为上基板断裂失效; t=1.2 mm 试样,3 件的失效 形式为上基板断裂失效,1 件为下基板断裂失效;而 t=1.8 mm 化铣板搭接件,3 件的失效形式为下基板断 裂失效,1 件为铆钉断裂失效。

由此可见,板材厚度对 2024-T3 铝合金化铣板搭 接件的失效形式存在显著影响,随着基板厚度的增加,失效形式从上基板沿铆钉头处失效变为下板沿纽 扣处失效。随着基板厚度进一步增加,失效形式变成 铆钉断裂。基板厚度为 1.2、1.8 mm 时,孔径的增加 对搭接件疲劳失效形式存在明显影响。

#### 2.3 疲劳断口分析

2024-T3 铝合金单搭接化铣板疲劳试验后的典型 断口形貌如图 5 所示。由于 d=3 mm 和 d=4 mm 化铣 板搭接件随厚度变化的疲劳失效形式基本一致,本文 仅研究图 5 中 4 种尺寸条件下铝合金化铣板搭接件的 疲劳断口形貌。从图 5 中可以看出,t=0.6 mm、d= 3 mm,t=0.6 mm、d=4 mm 以及 t=1.2 mm、d=3 mm 这 3 种尺寸的化铣板搭接件疲劳裂纹呈放射状条纹, 疲劳源均萌生于基板孔边缘处;t=1.8 mm、d=3 mm 化铣板搭接件疲劳源萌生于铆钉孔处,同时铆钉孔处 存在明显的挤压现象。



a *t*=0.6 mm, *d*=3 mm

b *t*=0.6 mm, *d*=4 mm





对 4 种尺寸的化铣板搭接件在 2 基板接触面的 微动磨损区域进行扫描电镜观察和能谱分析,结果如 图 6 所示。可以看出, t=0.6 mm、d=3 mm 化铣板搭 接件上基板与铆钉头部发生了较为轻微的磨粒磨损, 表面犁沟痕迹较轻,磨损区域主要元素为 Al 和 O。 t=0.6 mm、d=4 mm 化铣板搭接件上基板表面微动磨 损不明显,与 t=0.6 mm、d=3 mm 化铣板搭接件相比, 磨损区域主元素含量变化不大,说明这2种尺寸化铣 板搭接件的失效形式相同,均以孔边应力集中导致的 疲劳断裂为主。t=1.2 mm、d=3 mm 搭接件下基板靠 近孔边区域存在明显的犁沟和剥层,同时存在大量磨 屑颗粒脱落, 使得表面 O 元素含量大幅降低。说明 该尺寸化铣板搭接件磨损区域发生严重的磨粒磨损, 失效形式存在下基板与铆钉之间的微动磨损作用。 *t*=1.8 mm、*d*=3 mm 搭接件在微动、氧化、黏着的共 同作用下,导致铆钉孔附近及下基板接触区域发生严 重的黏着磨损, 磨损区域存在大片发黑的磨屑, 并伴 有黏着物(如图 5 所示), O 含量较前 3 种搭接件明 显提高,局部区域有微裂纹存在。此时的失效形式为 铆钉与下基板之间微动磨损作用加速的疲劳破坏,实 为微动疲劳损伤。

#### 2.4 分析讨论

由 2024-T3 铝合金化铣板搭接件疲劳试验结果 可以看出,当铆钉孔径一定时,随着基板厚度的增加, 搭接件疲劳强度逐渐减小;当基板厚度一定时,铆钉 孔径从 3 mm 增加到 4 mm,搭接件疲劳强度略有增 加。同时可以看到,疲劳强度随着铆钉孔径与基板厚度比值(d/t)的减小,呈现出逐渐降低的趋势。

从 2024-T3 铝合金化铣板搭接件疲劳失效形式 及断口形貌可以看到,当孔径为 3 mm 时,随着基板 厚度的增加,搭接件失效形式表现为从上基板沿铆钉 头处失效,到下基板沿纽扣处失效,最终变为铆钉断 裂失效的变化规律。孔径为 4 mm 时,搭接件失效形 式表现出相同的变化规律。由微观形貌和能谱分析可 以看到,孔径一定时,随着基板厚度的增加,搭接件 基板与铆钉接触区域微动磨损程度加重。2024-T3 铝 合金化铣板搭接件疲劳强度与微动磨损程度,随基板 厚度的增加,表现出明显的负相关性。

结合图 4—6 所示 2024-T3 铝合金化铣板搭接件 失效形式、断口形貌以及基板侧面形貌,当铆钉孔径 相同、基板较薄时,在疲劳载荷的作用下,搭接件受 二次弯曲的影响较大,同时在贴合面上连接孔周围, 上基板的应力水平要高于下基板,失效形式表现为上 基板发生疲劳断裂<sup>[22]</sup>。随着基板厚度的增加,搭接件 受二次弯曲的影响减小<sup>[23]</sup>,上下基板之间贴合更加紧 密,相对滑移增加,导致接触区域微动磨损程度加剧。 从图 6 可以看出,微动磨损主要存在 2 个区域,分别 为 2 个基板接触面和下基板与铆钉纽扣接触处,且基 板与铆钉的微动磨损存在互相竞争的机制<sup>[24]</sup>。当基板 厚度为 1.2 mm 时,下基板的微动磨损程度大于铆钉, 裂纹扩展速率大于铆钉,表现为下基板断裂。随着厚 度增加到 1.8 mm,铆钉与 2 个基板的接触面积增大, 微动磨损程度大于基板,铆钉裂纹扩展速率增加,表



c *t*=1.2 mm, *d*=3 mm

d *t*=1.8 mm, *d*=3 mm



Fig.6 Microscopic morphology of substrate contact surface after fatigue test of 2024-T3 aluminum alloy chemical milling sheet joint

现为铆钉断裂,从而进一步降低了化铣板搭接件的疲劳强度。当厚度一定,孔径从3mm增加到4mm时, 上下基板的接触面积增加,微动磨损区域增加,产生的微动磨粒较多,基板的微动磨损程度大于铆钉处的 微动磨损,使得厚度为1.2、1.8mm搭接件2种孔径的失效形式存在明显区别。

由此可以说明,2024-T3 铝合金化铣板搭接件的 疲劳失效机制随基板厚度与铆钉孔径与的变化而变 化。当基板较薄时,疲劳裂纹起源于孔径边缘的应力 集中处,搭接件的疲劳强度较高。随着基板厚度的增 加,疲劳裂纹则萌生于孔径边缘的微动磨损区域,导 致疲劳强度随着微动磨损程度的加剧而显著下降。

# 3 结论

1)2024-T3 铝合金单搭接化铣板疲劳强度受基 板厚度的影响较大,随着基板厚度的增加,疲劳强度 逐渐减小,厚度为1.8 mm 化铣板搭接件的疲劳强度 较 0.6 mm 和 1.2 mm 明显降低。铆钉孔径对单搭接铣 板的疲劳强度影响较小,随着孔径的增大,疲劳强度 略有增加。

2)当铆钉孔径一定时,2024-T3 铝合金单搭接 化铣板的失效形式会随着基板厚度的变化而变化。随 着基板厚度的增加,失效形式表现出从上基板铆钉头 部失效到下基板纽扣处失效,并最终变为铆钉断裂失 效的趋势。厚度一定时,孔径的增大对搭接件疲劳失 效形式存在明显影响。

3) 微动磨损对 2024-T3 铝合金单搭接化铣板的

疲劳强度存在较为明显的影响,会大幅度降低其疲劳 强度。在本文选定的条件下,随着基板厚度增加,微 动磨损越严重,疲劳强度越低。

#### 参考文献:

- 武伟超. 电脉冲对 2024 铝合金力学性能及微观组织影响研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
   WU Wei-chao. Effect of Electric Pulse on Mechanical Properties and Microstructure of 2024 Aluminum Alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [2] 张新明, 刘胜胆. 航空铝合金及其材料加工[J]. 中国材料进展, 2013, 32(1): 39-55.
   ZHANG Xin-ming, LIU Sheng-dan. Aerocraft Aluminum

Alloys and Their Materials Processing[J]. Materials China, 2013, 32(1): 39-55.

- [3] 王建国,王祝堂. 航空航天变形铝合金的进展(2)[J]. 轻合金加工技术, 2013, 41(9): 1-10.
  WANG Jian-guo, WANG Zhu-tang. Advance on Wrought Aluminum Alloys Used for Aeronautic and Astronautic Industry(2)[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2013, 41(9): 1-10.
- [4] 卢毅,何晓聪,王医锋,等. 钛合金异种材料单搭自冲 铆接头力学性能[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(3): 76-80.
   LU Yi, HE Xiao-cong, WANG Yi-feng, et al. Mechanical Properties of Single-Lap Self-Pierce Riveted Joints in Dissimilar Sheets of Titanium Alloy[J]. Aerospace Mate-

rials & Technology, 2015, 45(3): 76-80.

- [5] 李益萱, 王龙. 飞机某典型螺栓连接件的振动疲劳试验研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(9): 1401-1405.
   LI Yi-xuan, WANG Long. Study on Vibration Fatigue Testing of Aircraft Typical Bolt Connector[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(9): 1401-1405.
- [6] GOLDEN P J, BARTHA B B, GRANDT A F Jr, et al. Measurement of the Fatigue Crack Propagation Threshold of Fretting Induced Cracks in Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(3): 281-288.
- [7] 刘洋, 庄蔚敏, 施宏达. 自冲铆接头疲劳性能影响因素 研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(11): 1825-1830.
   LIU Yang, ZHUANG Wei-min, SHI Hong-da. Influencing Factors on Fatigue Performance of Self-Piercing Riveted Joints: A Review[J]. Materials Reports, 2019, 33(11): 1825-1830.
- [8] 徐丽,陈跃良,张勇,等.不同预腐蚀时间下微动对搭 接件疲劳寿命影响研究[J].南京航空航天大学学报, 2014, 46(3): 403-407.
   XU Li, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. Study of

Fretting Effects on Fatigue Life of Lap Joints at Different Pre-Corrosive Time[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(3): 403-407.

- [9] 赵伦,何晓聪,张先炼,等. 轻合金自冲铆微动磨损及 疲劳性能研究[J]. 材料导报, 2017, 31(6): 72-75. ZHAO Lun, HE Xiao-cong, ZHANG Xian-lian, et al. Fretting Wear and Fatigue Behavior of Self-Piercing Riveting of Lightweight Alloys[J]. Materials Review, 2017, 31(6): 72-75.
- [10] 赵伦,何晓聪,张先炼,等. TA1 钛合金单搭自冲铆接 头微动磨损机理[J]. 材料导报, 2017, 31(2): 73-76. ZHAO Lun, HE Xiao-cong, ZHANG Xian-lian, et al. Fretting Wear Mechanisms of Single Lap Self-Piercing Riveted Joint in TA1 Titanium Alloy[J]. Materials Review, 2017, 31(2): 73-76.
- [11] 郁大照, 陈跃良, 高永. 螺栓连接单搭接件疲劳特性试验与全寿命估算方法研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(20): 2747-2752.
  YU Da-zhao, CHEN Yue-liang, GAO Yong. Study on Fatigue Property Tests and Holistic Life Assessment Method for Single Bolted Joints[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(20): 2747-2752.
- [12] 杨茂胜,张涛,陈跃良,等.考虑微动影响的搭接结构 疲劳寿命研究[J].装备环境工程,2011,8(6):48-53. YANG Mao-sheng, ZHANG Tao, CHEN Yue-liang, et al. Study on Fatigue Life of Single Lap Joint Considering Fretting[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6):48-53.
- [13] 赵伦, 何晓聪, 卢毅, 等. 基板厚度对自冲铆接头静力

学性能的影响及其失效机理[J]. 热加工工艺, 2015, 44(17): 1-5.

ZHAO Lun, HE Xiao-cong, LU Yi, et al. Influence of Basilar Sheet Thickness on Static Performance of Self-Piercing Riveted Joints and Its Failure Mechanism[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(17): 1-5.

- [14] 孟江燕,王云英,林翠,等. 钛合金化学铣切保护涂料的制备及性能研究[J]. 材料工程,2010,38(12):5-7.
  MENG Jiang-yan, WANG Yun-ying, LIN Cui, et al. Development of Protective Coating for Chemical-Milling of Titanium Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2010,38(12): 5-7.
- [15] 周训伟, 巢昺轩, 黄向群, 等. 化学铣切对 6A02 薄铝 板性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(1): 99-102.
  ZHOU Xun-wei, CHAO Bing-xuan, HUANG Xiang-qun, et al. Effect of Chemical Milling on the Properties of 6A02 Thin Aluminum Sheet[J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(1): 99-102.
- [16] 隋立军,孙有朝,来云峰,等. 基于灰色马尔可夫过程的化学铣切厚度预测[J]. 测控技术,2020,39(10): 37-40.
  SUI Li-jun, SUN You-chao, LAI Yun-feng, et al. Prediction for Thickness of Chemical Milling Based on Gray Markov Process[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(10): 37-40.
- [17] 王煜,王建光. 热处理状态对 LD10 铝合金化铣表面质 量的影响[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(2): 75-77.
  WANG Yu, WANG Jian-guang. Influence of Heat Treatment State on Chemical Milling Surface Quality for LD10 Aluminum Alloy[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(2): 75-77.
- [18] 杨慎亮,李勋,王子铭,等. TC4 侧铣表面完整性对试件疲劳性能的影响[J].表面技术,2019,48(11): 372-380.
  YANG Shen-liang, LI Xun, WANG Zi-ming, et al. Influence of Side Milling on Surface Integrity and Fatigue Behavior of TC4 Specimens[J]. Surface Technology,

2019, 48(11): 372-380.
[19] CAO Xin, HE Wei-feng, LIAO Bin, et al. Effect of TiN/Ti Coating Combined with Laser Shock Peening Pre-Treatment on the Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Titanium Alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 403: 126393.

- [20] 刘超. 叶片外物损伤模拟及其疲劳强度预测技术研究
  [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
  LIU Chao. Research on Prediction of Fatigue Strength and Simulation for Foreign Object Damage of Blade[D].
  Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [21] GB/T 4883—2008,数据的统计处理和解释-正态样本离 散群值的判断和处理[S].

GB/T 4883—2008, Statistical Processing and Interpretation of Data-Judgment and processing of Discrete Group Values of Normal Samples[S].

[22] 曾超,薛九天,田威,等. 铆接效应耦合的搭接接头受载应力与变形[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(34): 14295-14300.
ZENG Chao, XUE Jiu-tian, TIAN Wei, et al. The Interior Stress and Deformation of Loaded Lap Joints Consequent

to Riveting Process[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(34): 14295-14300.

[23] 卢智先, 拓宏亮, 刘斌. 复合材料单钉搭接单剪与双剪的挤压破坏试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(4): 85-89. LU Zhi-xian, TUO Hong-liang, LIU Bin. The Experimental Research of Compressional Damage for Single Bolted Joints of Composites under Single Shearing and Double Shearing[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(4): 85-89.

[24] 黄志超,宋天赐,赖家美. TA1 钛合金自冲铆接接头疲 劳性能及失效机理分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 41-46.

> HUANG Zhi-chao, SONG Tian-ci, LAI Jia-mei. Fatigue Property and Failure Mechanism of Self Piercing Riveted Joints of TA1 Titanium Alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(3): 41-46.

> > 责任编辑:刘世忠