

引文格式: 杨青平, 舒茂盛, 卫星驰, 等. 镜像铣与化铣对2024铝合金疲劳性能影响试验研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(22): 94-100, 107.  
YANG Qingping, SHU Maosheng, WEI Xingchi, et al. Experimental research on effect of mirror milling and chemical milling on fatigue property of 2024 Al alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(22): 94-100, 107.

## 镜像铣与化铣对2024铝合金疲劳性能影响试验研究\*

杨青平<sup>1</sup>, 舒茂盛<sup>2</sup>, 卫星驰<sup>3</sup>, 茅健<sup>3</sup>, 曹珍珍<sup>1</sup>, 钟柳春<sup>4</sup>

- (1. 成都永峰科技有限公司, 成都 610511;
2. 航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610091;
3. 上海工程技术大学, 上海 201620;
4. 上海拓璞数控科技股份有限公司, 上海 201108)

[摘要] 疲劳失效是机械失效的主要失效形式, 以 2024 铝合金材料为研究对象, 分析了镜像铣成形工艺和化铣成形工艺对材料疲劳性能的影响。采用成组试验法开展疲劳性能力学试验, 探索 2024 铝合金在 130 MPa、140 MPa 和 149 MPa 应力水平下的疲劳性能。结果表明, 镜像铣工艺的总体稳定性优于化铣, 抗拉强度方面相当, 镜像铣试验件的寿命标准差约为化铣的 3 倍; 在三级应力水平下, 镜像铣试验件的中值对数疲劳寿命均优于化铣。通过试验获取了 2024 铝合金在存活率分别为 50%、95% 和 99.9% 下的应力水平与疲劳寿命关系曲线, 为定量分析镜像铣和化铣工艺对材料疲劳性能的影响提供了参考。

关键词: 镜像铣削; 化学铣削; 2024 铝合金; 疲劳寿命; 统计分析; 机械失效

### Experimental Research on Effect of Mirror Milling and Chemical Milling on Fatigue Property of 2024 Al Alloy

YANG Qingping<sup>1</sup>, SHU Maosheng<sup>2</sup>, WEI Xingchi<sup>3</sup>, MAO Jian<sup>3</sup>, CAO Zhenzhen<sup>1</sup>, ZHONG Liuchun<sup>4</sup>

- (1. Chengdu Useful Technology Co., Ltd., Chengdu 610511, China;
2. AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610091, China;
3. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
4. Shanghai TOP Numerical Control Technology Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

[ABSTRACT] Fatigue failure is the main failure mode of mechanical failure. The effects of mirror milling and chemical milling on fatigue performance of 2024 Al alloy were analyzed in this paper. The fatigue properties of 2024 Al alloy were explored at 130 MPa, 140 MPa and 149 MPa stress levels by using group test method. The results show that the overall stability of the mirror milling is better than that of the chemical milling, the tensile strength is comparable, and the standard deviation of the life of the mirror milling test pieces is about three times that of the chemical milling; the median logarithmic fatigue life of the mirror milling test pieces is better than that of the chemical milling at all three stress levels. The relationship curves between stress level and fatigue life of 2024 Al alloy at 50%, 95% and 99.9% survival rates are obtained, which provide a reference for quantitative analysis of the effects of mirror milling and chemical milling processes on fatigue performance of the material.

**Keywords:** Mirror milling; Chemical milling; 2024 Al alloy; Fatigue life; Statistical analysis; Mechanical failure

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2022.22.094

\* 基金项目: 国家科技重大专项 (2019ZX04020001)。

蒙皮是包覆飞机骨架结构的维形构件,使飞机具有良好的空气动力学特性。在飞机飞行过程中,蒙皮直接与外界接触,承受气动载荷并传递到与之相连的机身机翼骨架上,受力复杂<sup>[1]</sup>。所以蒙皮材料不仅要求表面光滑,具有高强度、高抗蚀能力,还要求具有优异的疲劳性能。

2024 铝合金是目前飞机铝合金蒙皮所使用的主要材料,国内外学者对其疲劳特性进行了大量研究。刘爱军等<sup>[2]</sup>通过电脉冲对 2024-T4 态铝合金搅拌摩擦焊接试样进行了焊后固溶处理,结果表明,经电脉冲固溶处理后的试样强度明显降低,延伸率显著提高。Li 等<sup>[3]</sup>采用试验法研究了 2024-T351 铝合金经室温激光喷丸和低温激光喷丸处理后的拉伸疲劳性能,结果表明,与室温激光喷丸试件相比,低温激光喷丸试件的拉伸疲劳寿命提高了 6.8%。臧志刚等<sup>[4]</sup>针对现有的喷丸材料疲劳性能研究没有考虑残余应力影响的问题,采用扩展有限元法获得仿真疲劳寿命,开展三弯疲劳试验获得 2024 铝合金喷丸与未喷丸试样的实际寿命,通过比较试验与仿真结果,验证了仿真方法的有效性,明确了喷丸引入的残余应力可有效地增强试件的疲劳寿命。赵勇等<sup>[5]</sup>研究了激光冲击强化对铝合金小孔件疲劳寿命和断口形貌的影响,结果表明,激光冲击强化能明显改善铝合金小孔构件的疲劳性能,在应力水平 165.8 MPa、195.0 MPa 和 275.4 MPa 下,试件的疲劳寿命分别增大 451%、216% 和 116%,强化效果随外加载荷的增加逐渐减小。Htoo 等<sup>[6]</sup>对 2024-T4 铝合金缺口试样进行了疲劳试验,研究了缺口根部局部应力比变化对高周疲劳区和低周疲劳区中间区域疲劳强度的影响。陈晓峰等<sup>[7]</sup>通过开展疲劳试验,研究了 2024 铝合金试验件在“化铣”与“化铣+激光喷丸”两种工艺下的高低周疲劳特性,结果表明,“化铣+激光喷丸”试验件在高周疲劳时的疲劳寿命约为“化铣”的 7.08 倍,在低周疲劳时的疲劳寿命约为“化铣”的 0.54 倍。徐岩松等<sup>[8]</sup>采用有限元与试验相结合的方法,分析了喷丸强化对 2024 铝合金疲劳性能的影响,结果表明,喷丸强化在材料表面引入了残余压应力,使得材料的疲劳寿命提高了 1.53~2.55 倍。Wang 等<sup>[9]</sup>通过进行应变控制的单轴、扭转和轴向-扭转组合疲劳试验,建立了 2024-T4 铝合金的疲劳发生和裂纹扩展模型,获取了 2024-T4 铝合金基线疲劳性能,试验结果表明,拉伸平均应力会降低疲劳寿命,压缩平均应力会增加疲劳寿命。谢春英等<sup>[10]</sup>对 2024-T3 铝合金化铣试验件进行了疲劳测试,试验数据点均位于空客化铣质量标准 (ADET 0049) 中给出的参考 S-N 曲线的上方,验证了化铣工艺完全满足民用飞机的疲劳寿命要求。Rodopoulos 等<sup>[11]</sup>研究了控制喷丸、激光冲击喷丸和超声冲击处理对 2024-T351 铝合金疲劳性能的影响,

结果表明,3 种表面处理均提高了材料的疲劳抗力,其中激光冲击喷丸利于安全寿命的提升,控制喷丸利于抑制短裂纹扩展,而超声冲击处理对短裂纹扩展和长裂纹扩展均有抑制作用。

上述对 2024 铝合金疲劳特性的研究多集中于表面处理、化学铣削等工艺方面,但对在国内刚起步的镜像铣削工艺而言研究较少。本文通过两种方法的疲劳试验,对比蒙皮镜像铣削成形工艺和化学铣削成形工艺在不同应力水平下对 2024 铝合金壁板试验件的疲劳寿命影响,为铝合金蒙皮凸台加工由化铣成形改为镜像铣成形提供理论支持。

## 1 化学铣削与镜像铣削工艺对比

飞机蒙皮零件根据整机装配需要,设计时会在部分区域进行局部厚度的减薄处理,以减轻零件重量。目前,蒙皮零件厚度加工工艺主要有化学铣削与镜像铣削两种(简称化铣和镜像铣)。

### 1.1 化学铣削工艺

化铣是将金属材料需要加工的部位暴露于化学介质中进行腐蚀,从而获得零件所需形状和尺寸的一种加工方法<sup>[10]</sup>,此方法加工无须使用刀具,无切屑产生,属于特种加工范畴,其加工原理如图 1 所示<sup>[12]</sup>,由于化铣加工时腐蚀去除材料没有方向性,化铣得到的筋条根部有与铣切深度  $t$  大体相当的圆角  $R$ ,且腐蚀深度越大圆角也越大<sup>[13]</sup>。

在镜像铣技术出现之前,化铣是蒙皮壁板类零件减薄加工的主要方式,其工艺流程如图 2 所示<sup>[14]</sup>,总工序多达 22 道。但化铣工艺仅能对蒙皮的减薄部位进行加工,而蒙皮的切边、开缺口和制孔,还必须依靠其他设备来完成。此外,化铣产生的废弃化铣液会污染环境,不符合绿色加工要求,从长远来看需要改革。

### 1.2 镜像铣削工艺

镜像铣是指铣削刀具的位姿和背部支撑装置的位姿时刻呈近似镜像关系,二者同步协同运动完成蒙皮加

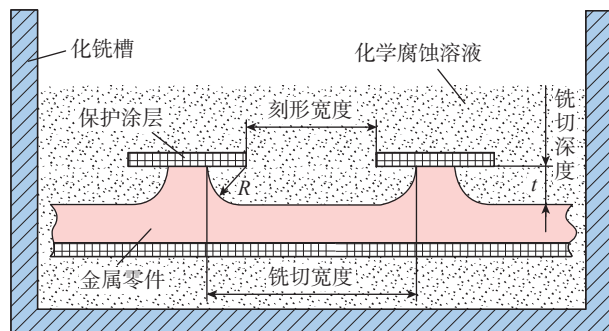


图 1 化学铣削加工原理<sup>[12]</sup>

Fig.1 Schematic principle of chemical milling<sup>[12]</sup>

工的一种加工方法,其加工原理如图3所示<sup>[15]</sup>。镜像铣削设备采用两个卧式五轴龙门结构,镜像分布于蒙皮两侧,一侧为铣削端;另一侧为无划伤支撑端,加工过程中通过刀具和局部支撑装置的同步运动控制壁厚。支撑装置中包括壁厚测量、阻尼支撑和激光扫描,其中壁厚测量用于实时壁厚控制和壁厚质量检测;阻尼支撑机构用于提高切削区域的工艺系统刚度,降低弱刚性零件的切削振动;激光扫描用于实现工件的变形检测和补偿<sup>[16]</sup>。

镜像铣加工能够解决化铣存在的问题,是一种可代替化铣的可行工艺,其工艺流程如图4所示,总工序仅有11道。相比于化铣,镜像铣既能在保证轮廓精度的

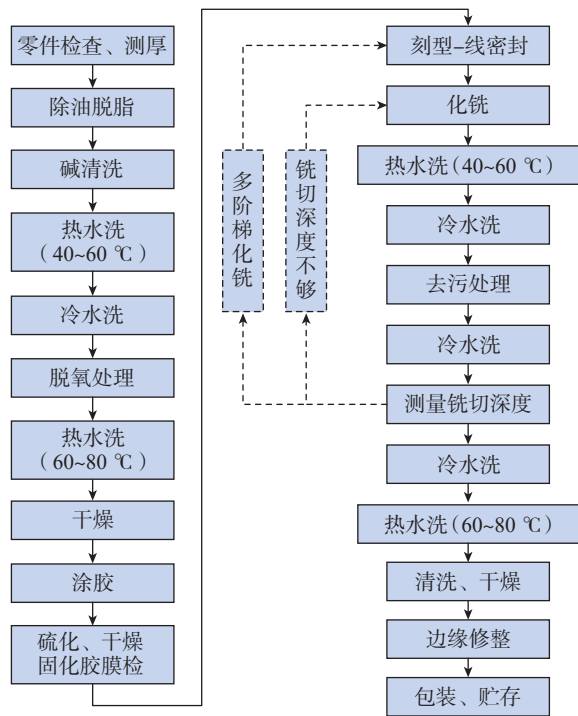


图2 化学铣削工艺流程<sup>[14]</sup>

Fig.2 Process flow of chemical milling<sup>[14]</sup>

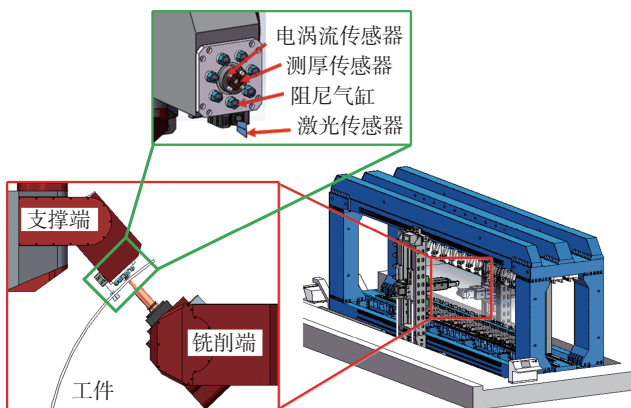


图3 蒙皮镜像铣削加工原理<sup>[15]</sup>

Fig.3 Schematic principle of mirror milling of skin<sup>[15]</sup>

条件下,完成蒙皮的精确厚度减薄,又能实现精确的切边、铣窗和制孔,同时还满足蒙皮的绿色制造要求和批产需求。

## 2 疲劳性能力学试验

2024 铝合金疲劳性能力学试验包括两种工艺在三级应力水平下的疲劳寿命测试,分析两种工艺对蒙皮材料疲劳性能的影响。

### 2.1 试验材料及试样尺寸

选用同批次 2024-O- $\delta_{5.9}$ -AMS-QQ-A-250/5A 铝合金板材,其化学成分如表1所示,分别采用镜像铣成形工艺和化铣成形工艺制备2块试验壁板,热处理至 T62,  $\sigma_b \geq 415$  MPa。

如图5所示,壁板尺寸为 990 mm × 1360 mm × 5.9 mm (厚),其上有4处铣切成形凹槽,凹槽处理理论厚度  $t=2.5$  mm,镜像铣或化铣的名义加工深度为 3.4 mm。从壁板上按要求裁剪出图6所示的拉伸试件,得到镜像铣和化铣试件各28件。

### 2.2 试验方法

结合实际情况,首先将裁剪得到的28件拉伸试件进行分组,分配结果如表2所示,其余做备用件。

静力试验依据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》<sup>[17]</sup>,采用 Zwick Z400 电子拉伸试验机,在室温 23 °C,应变速率保持在  $0.00025 \text{ s}^{-1}$  的条件下对试验件进行轴向无弯扭加载,一次性拉断。

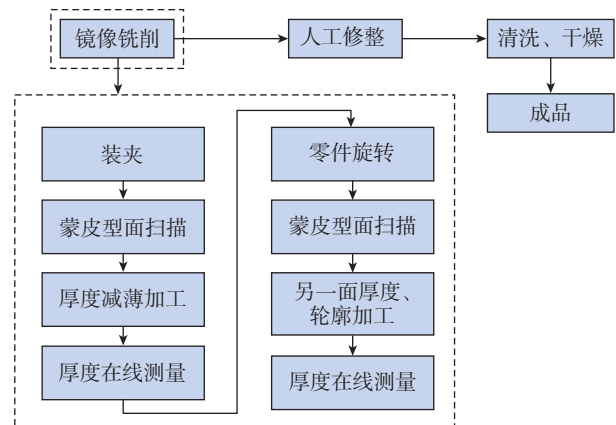


图4 镜像铣削工艺流程

Fig.4 Process flow of mirror milling

表1 2024 铝合金化学成分(质量分数)<sup>[11]</sup>

Table 1 Chemical composition of 2024 Al alloy (mass fraction)<sup>[11]</sup> %

数值	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
最小值	—	—	3.8	0.30	1.2	—	—	—	余量
最大值	0.50	0.50	4.9	0.90	1.8	0.10	0.25	0.15	余量

采用成组试验法进行 2024 铝合金镜像铣成形和化铣成形的疲劳寿命试验。疲劳试验在 130 MPa、140 MPa、149 MPa 三级应力水平下进行,依据 HB 5287—1996《金属材料轴向加载疲劳试验方法》<sup>[18]</sup>,采用 MTS landmark 系列液压伺服试验系统,在室温 23 ℃ 环境下进行试验。加载方式为轴向正弦波加载,应力比  $\sigma_R=0.1$ ,加载频率为 10 Hz。

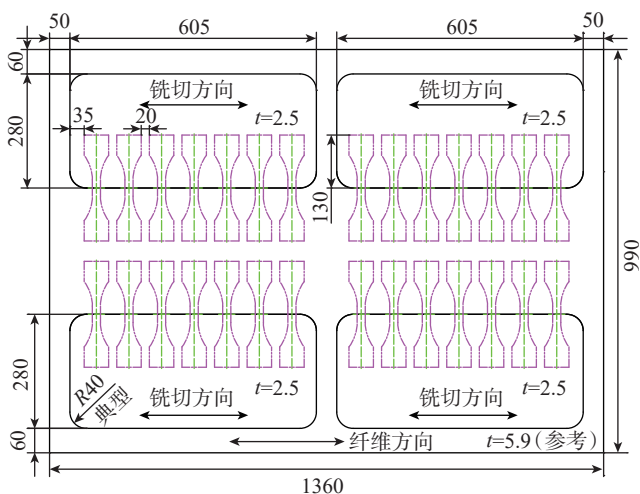


图 5 壁板尺寸及试件编排 (mm)  
Fig.5 Plate size and test piece arrangement (mm)

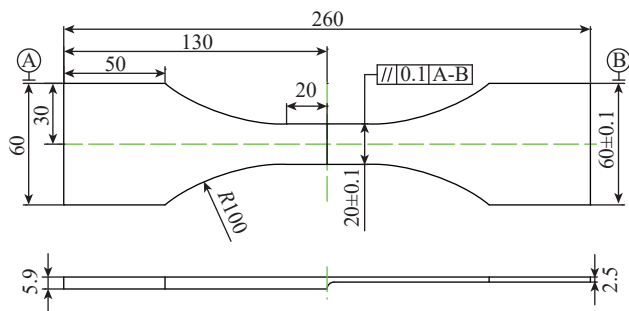


图 6 试件尺寸及加工要求 (mm)  
Fig.6 Test piece size and processing requirement (mm)

表 2 试件分配表  
Table 2 Test piece allocation

加工方式	试验内容	试件数量	应力水平/MPa
镜像铣	静力试验	1	—
	疲劳试验	8	149
		7	130
化铣	静力试验	1	—
	疲劳试验	5	149
		5	140
5		130	

### 3 试验结果与数据分析

#### 3.1 静力试验结果与分析

进行静力拉伸试验的目的是获取 2024 铝合金在镜像铣成形与化铣成形下的抗拉强度。经试验测得化铣试验件的抗拉强度为 520 MPa,镜像铣试验件的抗拉强度为 525 MPa,可见两种工艺条件下 2024 铝合金的抗拉强度相当,镜像铣略优于化铣。

#### 3.2 疲劳试验结果与分析

进行疲劳试验的目的是获取 2024 铝合金在镜像铣成形与化铣成形下的疲劳寿命及 S-N 曲线。镜像铣试件和化铣试件的疲劳试验结果分别如表 3 和 4 所示。

表 3 镜像铣试件疲劳试验数据  
Table 3 Fatigue test data of mirror milling specimens

试件编号	试件尺寸/mm	最大载荷/kN	应力水平/MPa	疲劳寿命/cycle	断裂位置/cm
JX-3	2.59 × 20.02	6.741	130	176068	—
JX-5	2.64 × 20.06	6.885	130	220315	0
JX-6	2.63 × 20.03	6.848	130	241664	0
JX-7	2.59 × 20.03	6.744	130	185462	0
JX-24	2.60 × 19.99	6.757	130	353541	0
JX-25	2.67 × 20.02	6.949	130	123328	0
*JX-4	2.51 × 20.06	6.546	130	309411	10
JX-13	2.66 × 20.05	7.467	140	98489	0
JX-15	2.58 × 20.02	7.231	140	95210	0
JX-20	2.64 × 19.98	7.38	140	100916	0
JX-22	2.62 × 20.02	7.343	140	105316	0
JX-16	2.60 × 20.04	7.295	140	155389	0
JX-28	2.57 × 20.05	7.224	140	175121	0
*JX-26	2.42 × 19.98	6.777	140	235238	6
*JX-17	2.56 × 20.01	7.172	140	134218	4
*JX-18	2.57 × 20.01	7.48	140	355571	5
JX-8	2.54 × 20.04	7.584	149	73830	0
JX-10	2.69 × 20.05	8.036	149	70183	0
JX-12	2.65 × 20.07	7.925	149	79500	0
JX-23	2.62 × 20.00	7.808	149	79610	0
JX-27	2.62 × 20.08	7.828	149	74862	0
JX-21	2.66 × 19.93	7.899	149	124843	0
*JX-9	2.45 × 20.05	7.319	149	187264	0
*JX-11	2.50 × 20.04	7.465	149	64928	6

注：“\*”代表断裂位置异常或试件尺寸厚度测量误差较大,在处理数据时予以剔除。

表4 化铣试件疲劳试验数据

Table 4 Fatigue test data of chemical milling specimens

试件编号	试件尺寸/mm	最大载荷/kN	应力水平/MPa	疲劳寿命/cycle	断裂位置/cm
HX-5	2.52 × 20.15	6.601	130	117184	—
HX-6	2.50 × 20.07	6.523	130	102134	5
HX-7	2.50 × 20.08	6.526	130	134665	6
HX-8	2.53 × 20.08	6.604	130	130991	7
HX-15	2.5 × 20.07	6.523	130	106472	4
HX-12	2.57 × 20.07	7.221	140	99888	8
HX-13	2.52 × 20.08	7.084	140	95734	8
HX-14	2.54 × 20.09	7.144	140	101338	6
HX-16	2.5 × 20.09	7.032	140	79773	5
HX-17	2.52 × 20.06	7.077	140	95961	5
HX-9	2.51 × 20.08	7.510	149	84205	6
HX-10	2.57 × 20.09	7.693	149	68509	8
HX-11	2.54 × 20.06	7.592	149	75406	7
HX-18	2.52 × 20.06	7.532	149	75245	8
HX-19	2.54 × 20.09	7.603	149	84940	8

3.2.1 数据正态性验证

分析数据前,需保证疲劳寿命数据遵循正态分布。将同一应力级的对数疲劳寿命按从小到大的顺序进行排列,则存活率估计量  $\hat{p}$  为<sup>[19]</sup>:

$$\hat{p} = 1 - \frac{i}{n+1} \quad (1)$$

式中,  $i$  为一组观测值由小到大按次序排列的序数;  $n$  为一组试样的总数。

以对数疲劳寿命  $x_i = \lg N_i$  为横坐标,存活率估计量  $\hat{p}$  为纵坐标作存活率-寿命图 ( $\hat{p}-N$  图),结果如图7所示,其皮尔逊相关系数分别为 0.97、0.94、0.73、0.82、0.92、0.93,各数据点近似为一直线关系,表明试验数据遵循正态分布。

3.2.2 断裂位置

图8为化铣试件与镜像铣试件的典型断裂位置对比。从表3和4中试件的断裂位置得知,24件镜像铣试件的断裂位置有18件处于应力集中的  $R$  角边缘零点,而化铣试件的断裂位置距  $R$  角边缘零点的均值为 6.5 mm,印证了化铣加工去除材料没有方向性,导致圆角  $R$  的大小不确定,结果表明,镜像铣工艺的稳定性较化铣好。

3.2.3 中值疲劳寿命

依据 HB/Z 112—1986《材料疲劳试验统计分析方法》<sup>[19]</sup>,对表3和4中的试验数据进行初步分析,按式

(2)计算对数疲劳寿命标准差;按式(3)计算中值对数疲劳寿命为

$$S = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (\lg N_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lg N_i\right)^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

$$X = \lg N_{50} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i \quad (3)$$

式中,  $S$  为对数疲劳寿命标准差;  $N_i$  为一组试验中第  $i$  个试样的疲劳寿命;  $X$  为中值对数疲劳寿命;  $N_{50}$  为具有

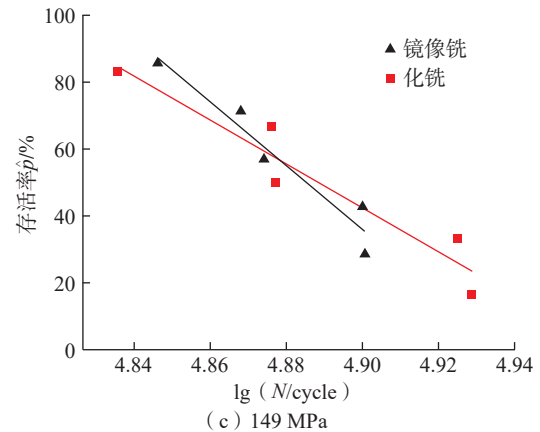
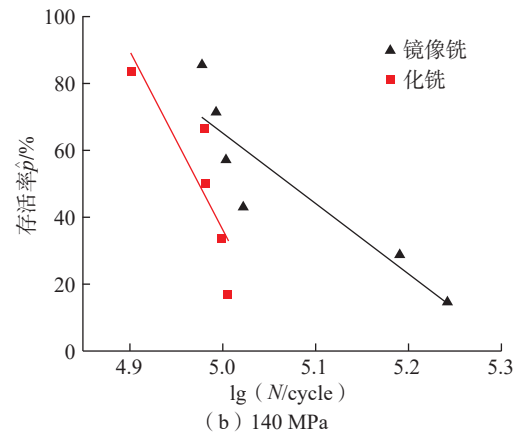
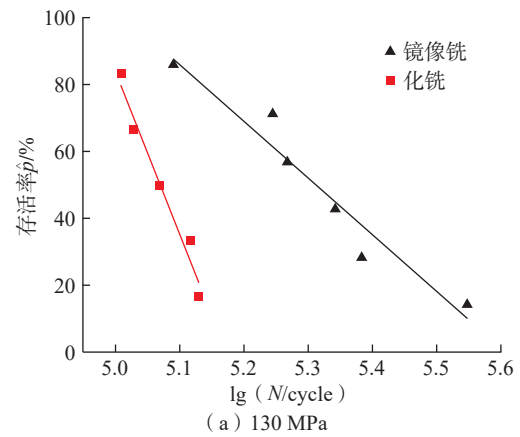
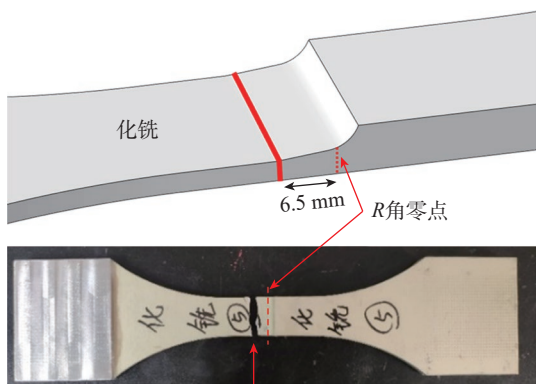
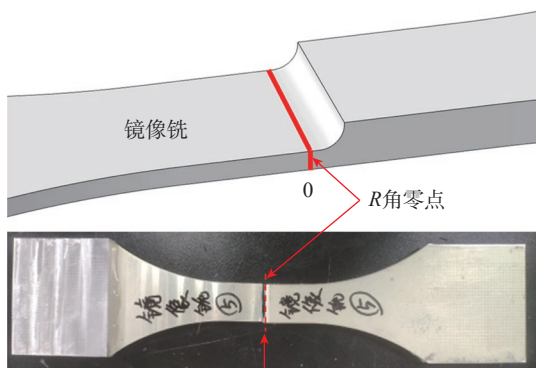


图7 三级应力水平下的  $\hat{p}-N$  图  
Fig.7  $\hat{p}-N$  diagram at three-level stress levels



断裂位置非R角零点  
(a) 化铣试件断裂位置



断裂位置为R角零点  
(b) 镜像铣试件断裂位置

图 8 化铣试件与镜像铣试件的典型断裂位置对比

Fig.8 Comparison of typical fracture locations of chemical-milled tests and mirror-milled tests

50% 存活率的疲劳寿命即中值疲劳寿命。

计算结果及对比如图 9 所示。可以看出,镜像铣试验件在三级应力水平下的中值对数疲劳寿命均优于化铣,且应力越低越明显;而镜像铣试验件寿命的分散性却明显大于化铣,其对数疲劳寿命标准差在 130 MPa、140 MPa、149 MPa 三级应力水平下分别为化铣的 2.9 倍、2.7 倍、2.4 倍。

### 3.2.4 安全寿命测定

为保证飞机蒙皮结构的安全,采用全寿命分散系数法<sup>[20]</sup>,分别以存活率  $p=95%$ 、置信度  $\gamma=95%$  和存活率  $p=99.9%$ 、置信度  $\gamma=90%$  对材料的安全寿命进行估算。

分散系数  $L_f$  定义为中值试验寿命  $N_{50}$  与安全寿命  $\hat{N}_p$  的比值,即

$$L_f = \frac{N_{50}}{\hat{N}_p} \quad (4)$$

前文已验证疲劳寿命数据遵循正态分布,若记  $p$  存活率下的对数安全寿命估计量为  $\hat{x}_p$ ,则

$$\hat{x}_p = X - \left( \frac{u_r}{\sqrt{n}} - u_p \right) S \quad (5)$$

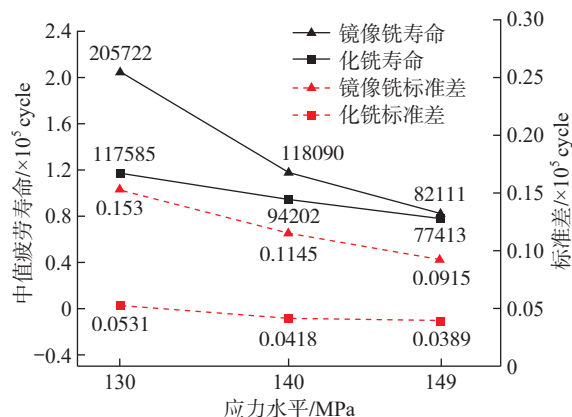


图 9 三级应力水平下的中值疲劳寿命与标准差

Fig.9 Median fatigue life and standard deviation at three-level stress

表 5 安全寿命估算参数<sup>[20]</sup>

Table 5 Parameters used for safe life estimation<sup>[20]</sup>

$\gamma/p$	$u_r$	$u_p$
90%	1.282	—
95%	1.645	-1.645
99.9%	—	-3.090

式中,  $u_r$  为与置信度  $\gamma$  相关的标准正态偏量;  $u_p$  为与存活率  $p$  相关的标准正态偏量,具体见表 5<sup>[20]</sup>。

而安全寿命  $\hat{N}_p$  又可表示为  $\hat{x}_p$  的反对数,即

$$\hat{N}_p = \lg^{-1} \hat{x}_p \quad (6)$$

联立式(3)~(6),可得到任一存活率  $p$  和置信度  $\gamma$  下的安全寿命为

$$\hat{N}_p = \frac{N_{50}}{10 \left( \frac{u_r}{\sqrt{n}} - u_p \right) S} \quad (7)$$

安全寿命估计量的计算结果及对比如图 10 所示。可以看出,在存活率 95%、置信度 95% 的条件下,镜像铣的安全寿命估计量仅在应力水平为 130 MPa 时优于化铣,而当应力水平超过 140 MPa 时,化铣的安全寿命估计量较镜像铣高;在存活率 99.9%、置信度 90% 的条件下,镜像铣的安全寿命估计量在三级应力水平下均小于化铣,处于劣势。

将以上数据处理结果绘制成 2024 铝合金在存活率和置信度分别为 50%–50%、95%–95%、99.9%–90% 条件下的  $S-N$  曲线,结果如图 11 所示,为定量分析镜像铣和化铣工艺对材料疲劳性能的影响提供理论参考。

## 4 结论

(1) 对相同的 2024 铝合金材料,镜像铣在试件的抗拉强度、工艺的总稳定性等方面均优于化铣。

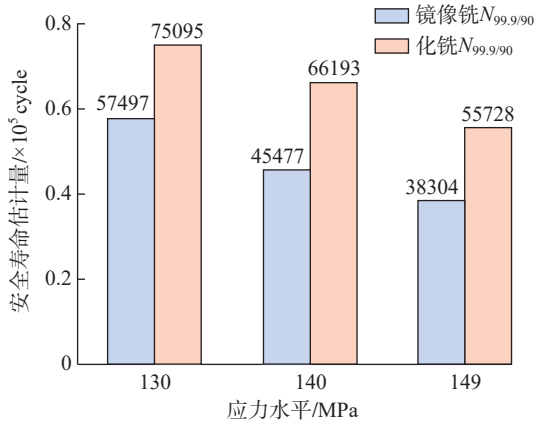
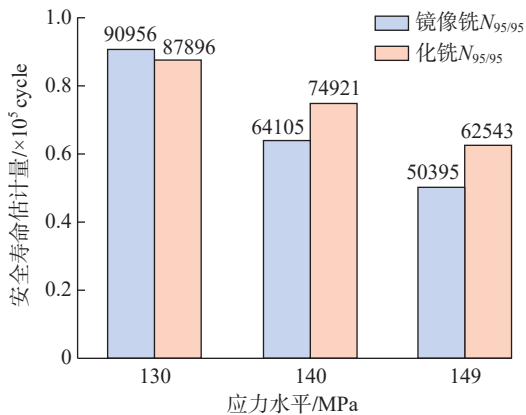


图 10 不同存活率与置信度下的安全寿命估算

Fig.10 Safe life estimation with different survival rates and confidence levels

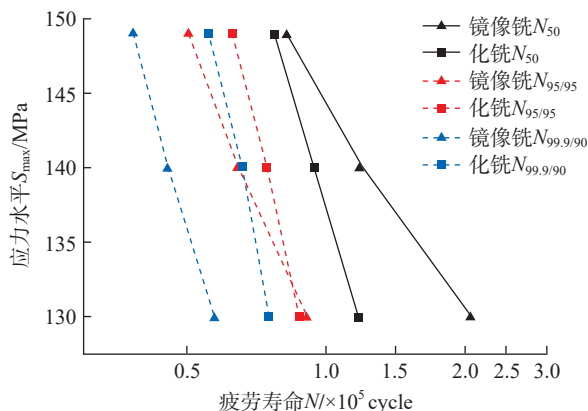


图 11 不同存活率下的 S-N 曲线

Fig.11 S-N curves at different survival rates

(2) 镜像铣试件的中值对数疲劳寿命在三级应力水平下均优于化铣,而数据分散性也明显大于化铣,其寿命标准差约为化铣的 3 倍。

(3) 当存活率 95%、置信度 95% 时,镜像铣试件的安全寿命仅在应力水平为 130 MPa 时优于化铣,在其余两组应力水平下均低于化铣;当存活率 99.9%、置信度

90% 时,镜像铣试件的安全寿命在三级应力水平下均低于化铣。

参考文献

[1] 鲍岩,董志刚,朱祥龙,等.蒙皮镜像铣削支撑技术的研究现状和发展趋势[J].航空学报,2018,39(4):021817.  
BAO Yan, DONG Zhigang, ZHU Xianglong, et al. Review on support technology for mirror milling of aircraft skin[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(4): 021817.

[2] 许爱军,汤泽军,章锦涛,等.电脉冲处理对 2024-T4 铝合金搅拌摩擦焊接头性能的影响[J].航空制造技术,2021,64(10):64-71.  
XU Aijun, TANG Zejun, ZHANG Jintao, et al. Effect of electric pulse treatment on properties of friction stir welded joint of 2024-T4 aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(10): 64-71.

[3] LI J, FENG A X, ZHOU J Z, et al. Enhancement of fatigue properties of 2024-T351 aluminum alloy processed by cryogenic laser peening[J]. Vacuum, 2019, 164: 41-45.

[4] 臧志刚,王建明,郑林彬.2024 铝合金喷丸试件疲劳寿命试验及仿真研究[J].材料保护,2018,51(5):69-73.  
ZANG Zhigang, WANG Jianming, ZHENG Linbin. Fatigue life experiment and simulation study on 2024 aluminum alloy specimen with shot peening[J]. Materials Protection, 2018, 51(5): 69-73.

[5] 赵勇,姜银方,彭涛涛,等.激光冲击强化铝合金小孔构件的疲劳寿命研究[J].航空制造技术,2017,60(13):38-43.  
ZHAO Yong, JIANG Yinfang, PENG Taotao, et al. Research on fatigue life of aluminum alloy with fastener hole by laser shock processing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(13): 38-43.

[6] HTOO A T, MIYASHITA Y, OTSUKA Y, et al. Variation of local stress ratio and its effect on notch fatigue behavior of 2024-T4 aluminum alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 88: 19-28.

[7] 陈晓峰,肖明辉,张治国,等.激光喷丸对 2024 铝合金化铣件疲劳特性影响的试验研究[J].热加工工艺,2015,44(14):74-75,79.  
CHEN Xiaofeng, XIAO Minghui, ZHANG Zhiguo, et al. Experimental research on effect of LPS on fatigue property of chemical milling aluminum alloy 2024 test species[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(14): 74-75, 79.

[8] 徐岩松,苟文选,田笑,等.喷丸强化对 2024 铝合金疲劳性能的影响分析[J].机械设计与制造,2014(1):104-106.  
XU Yansong, GOU Wenxuan, TIAN Xiao, et al. Effect of shot peening on fatigue life of aluminum alloy 2024[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(1): 104-106.

[9] WANG X G. Multi-axial fatigue of 2024-T4 aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(2): 195.

[10] 谢春英,刘敏,朱凯,等.铝合金化学铣切疲劳性能[J].腐蚀与防护,2008,29(4):185-188.  
XIE Chunying, LIU Min, ZHU Kai, et al. Fatigue property of aluminium alloy after chemical milling[J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(4): 185-188.

(下转第 107 页)

graphene hybrid films to improve electromagnetic interference (EMI) shielding performance of graphene[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(39): 34221–34229.

[13] HAN Y, LIU Y X, HAN L, et al. High-performance hierarchical graphene/metal-mesh film for optically transparent electromagnetic interference shielding[J]. *Carbon*, 2017, 115: 34–42.

[14] ZHANG Y Q, DONG H X, LI Q S, et al. Double-layer metal mesh etched by femtosecond laser for high-performance electromagnetic interference shielding window[J]. *RSC Advances*, 2019, 9: 22282–22287.

[15] 刘伟, 方一, 李修, 等. 栅格形状对金属栅格透明导电膜性能的影响[J]. *中国印刷与包装研究*, 2014, 6(6): 112–117.

LIU Wei, FANG Yi, LI Xiu, et al. Influence of grid geometry on the properties of metal grid transparent conductive films[J]. *China Printing and Packaging Study*, 2014, 6(6): 112–117.

[16] 刘小涵, 赵晶丽, 冯晓国, 等. 高透光率感性网栅膜的电磁屏蔽[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 80–87.

LIU Xiaohan, ZHAO Jingli, FENG Xiaoguo, et al. Electromagnetic shielding of highly transparent inductive mesh[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 80–87.

[17] 王建, 徐均琪, 苏俊宏, 等. 金属网栅电磁屏蔽窗口薄膜的设计与制备[J]. *激光与红外*, 2020, 50(3): 327–332.

WANG Jian, XU Junqi, SU Junhong, et al. Design and preparation of metal grid electromagnetic shielding window film[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(3): 327–332.

[18] GEETHA S, SATHEESH KUMAR K K, RAO C R K, et al. EMI shielding: Methods and materials—A review[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 112(4): 2073–2086.

[19] NEELAKANTA P. Handbook of electromagnetic materials: Monolithic and composite versions and their applications[M]. Boca Raton: CRC press, 1995.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 透明塑料透光率和雾度的测定: GB/T 2410—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Determination of the luminous transmittance and haze of transparent plastics: GB/T 2410—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[21] 中国人民解放军总装备部. 电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法: GJB 8820—2015[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2016.

The Chinese People's Liberation Army General Armaments Department. Measuring methods for shielding effectiveness of electromagnetic shielding materials: GJB 8820—2015[S]. Beijing: The Chinese People's Liberation Army General Armaments Department, 2016.

[22] JUNG J, LEE H, HA I, et al. Highly stretchable and transparent electromagnetic interference shielding film based on silver nanowire percolation network for wearable electronics applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(51): 44609–44616.

[23] JIA L C, YAN D X, LIU X F, et al. Highly efficient and reliable transparent electromagnetic interference shielding film[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(14): 11941–11949.

[24] HAN Y, LIN J, LIU Y X, et al. Crackle template based metallic mesh with highly homogeneous light transmission for high-performance transparent EMI shielding[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25601.

通讯作者: 张博, 研究员, 主要研究方向为特种功能材料与结构。

(责编 七七)

(上接第 100 页)

[11] RODOPOULOS C A, KERMANIDIS A T, STATNIKOV E, et al. The effect of surface engineering treatments on the fatigue behavior of 2024–T351 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2007, 16(1): 30–34.

[12] 甘忠, 王亮, 谭海兵, 等. 大型立体化铣样板设计与制造方法探索[J]. *航空制造技术*, 2013, 56(17): 78–80, 88.

GAN Zhong, WANG Liang, TAN Haibing, et al. Exploration of design and manufacturing method to stereoscopic chemical-milling template with jumbo size[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(17): 78–80, 88.

[13] 贾玉红, 何景武. 现代飞行器制造工艺学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

JIA Yuhong, HE Jingwu. Modern aircraft manufacturing processes[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2010.

[14] 中国航天工业总公司. 铝合金化学铣切工艺规范: QJ 2911—1997[S]. 北京: 中国航天工业总公司, 1997.

China Aerospace Corporation. Aluminum alloy chemical milling process specification: QJ 2911—1997[S]. Beijing: China Aerospace Corporation, 1997.

[15] ZHANG S K, BI Q Z, JI Y L, et al. Real-time thickness compensation in mirror milling based on modified Smith predictor and disturbance observer[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 144: 103427.

[16] 毕庆贞, 丁汉, 王宇喆. 复杂曲面零件五轴数控加工理论与技术[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2016.

BI Qingzhen, DING Han, WANG Yuhan. Theory and technique for five-axis NC machining of complex surface part[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2016.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 (第 1 部分): 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Metallic materials—Tensile testing (Part 1): Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[18] 中国航空工业总公司. 金属材料轴向加载疲劳试验方法: HB 5287—1996[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1996.

Aviation Industry Corporation of China. Fatigue test method for axial loading of metallic materials: HB 5287—1996[S]. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, 1996.

[19] 中华人民共和国航空工业部. 材料疲劳试验统计分析方法: HB/Z 112—1986[S]. 北京: 中华人民共和国航空工业部, 1987.

Ministry of Aviation Industry of China. Statistical analysis method of material fatigue test: HB/Z 112—1986[S]. Beijing: Ministry of Aviation Industry of China, 1987.

[20] 高镇同, 熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.

GAO Zhentong, XIONG Junjiang. Fatigue reliability[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2000.

通讯作者: 茅健, 教授, 博士, 主要研究方向为精密工程、检测与控制。

(责编 晓月)