

# 变形镁合金 MB15 S-N 曲线的研究

南昌飞机制造公司 张碧沁

## Study on the S-N Curves of the Wrought Magnesium Alloy (MB15)

Zhang Biqin

(Nanchang Aircraft Manufacturing Company)

### 一、前言

随着科学技术的发展,新材料不断出现,并广泛地应用于各种产品,镁合金材料就是其中的一种。我厂生产的强五型飞机就有不少重要零部件采用镁合金材料。目前,国内还没有一个部门对镁合金材料的各种性能进行过系统的研究,一则是镁合金材料的广泛应用刚刚开始;再则,疲劳试验的全过程技术难度较大。为了使这种材料应用得更广泛,保证产品的质量,对镁合金材料的疲劳性能进行全面的研

究是非常必要的。为了确保飞机安全飞行,正确给出飞机的寿命,必须正确地估价各种因素对材料疲劳性能的影响,疲劳试验测定出的 S-N 曲线就是正确估价各种因素影响的手段。

鉴于我厂强五飞机定寿的需要,我们对变形镁合金 MB15 进行了应力比  $R$  为 0.1, 0.45 和环境老化半年及一年半的  $R=0.1$  的光滑试样的四点弯曲疲劳试验,测定出 S-N 曲线,为设计、定寿提供了可靠的依据。

### 二、四点弯曲试验原理

四点弯曲试验就是纯弯曲疲劳试验。其装置有上下两个支架,试样放在两个内支架上,一对外支架是固定的,以适应试验的负载。试样由两个夹子夹住,夹子用弹簧灵活地连接到横梁上,横梁借支帽装在机器上,并且以标准试样相同的方法被夹住。负载由夹板所作用,在它们之间弯曲装置如同同一拉伸的试样一样,在高频振荡内被扣住,从而试样以一种常数变曲力矩在整个试验部分上被压。弯曲力矩可以从所应用的负载以及内外支架间的距离  $a$  计算出, $a$  可以四级变更,因而允许在大的限度内以最大的力矩范围进行调整。

其弯曲应力为:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \quad (\text{MPa})$$

$$M_b = \frac{1}{2} P_b \cdot a - \text{弯曲力矩} \quad (\text{N} \cdot \text{mm})$$

$$W_b = \pi d^3 / 32 - \text{剖面系数} \quad (\text{mm}^3)$$

$$a - \text{上下支座之间的距离} \quad (\text{mm})$$

$$P_b - \text{试验总负荷} \quad (\text{N})$$

### 三、试验

#### 1. 材料

(1) 牌号和规格:由有色总公司 101 厂生产的 MB15

镁合金  $\phi 34\text{mm}$  棒材,炉号 8159。

(2) 化学成分:

化学成分

主要成分	Zn	Zr
含量, %	5.42	0.65

#### 2. 试样

表面经氧化处理(环境老化半年及一年半的试样除表面氧化处理外,还喷 G04-9 漆)。

(1) 取样方向:纵向取样

(2) 形状(见图 1): $K_t=1$

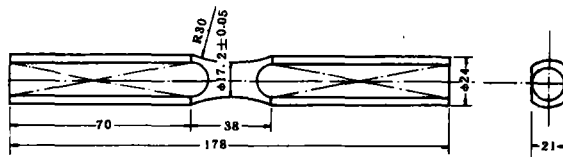


图 1 试样形状

(3) 热处理: S 状态(170℃人工时效 24h)

(4) 力学性能:

力学性能

$\sigma_b$ (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)	$\delta_5$ (%)
327.55	287.35	19.0

#### 3. 试验条件

(1) 试验设备:试验在 AMSLER 1478 型 10 吨高频疲劳机上进行。

(2) 加载方式:四点弯曲  $R=0.1$ ,  $R=0.45$ 。

(3) 试验频率:  $f=60\sim 80\text{Hz}$ 。

(4) 试验环境:温度,室温;相对湿度,60~90%。

### 四、试验数据及处理

#### 1. 试验情况

在中等寿命区用成组试验法进行试验,在三级应力水平下试验。长寿命区用升降法测定,试验按置信度为

95%，相对误差是在  $\delta=5\%$  的情况下进行的。

2. 试验数据处理

根据统计原理进行数据处理，计算出子样平均值  $\bar{x}$ 、子样标准差  $S$ 、变异系数  $S/\bar{x}$ ，来确定各级应力水平下的最少试样个数，并进行可疑数据的取舍、相关性检验等。利用升降法测定出条件疲劳极限。

3. 试验原始数据及计算

试验原始数据见表 1~4。

表 1 ( $K_t=1$   $R=0.1$ )

	$\sigma_{\max}$ (MPa)	N ( $10^3$ ) 次	$\bar{x}$	S	$N_{50}$ ( $10^3$ )
成组试验	275	64 72 81 85 116 87 131	4.9461	0.1099	88.3
	258	97 103 119 119 134 151 225 261	5.1532	0.1557	142.3
	242	51 53 60 63 63 70 74 78 83 92 98 102 103 111 121 132 239 274 312 505 1531 1713 1799 1897 2972 3658 4415 9869	5.4714	0.7043	296.1
升降法	233	1197	指定寿命： $N=10^7$ (次) $S=10.2917$ $\bar{\sigma}=207.7\text{MPa}$		
	225	>10000 2436			
	217	>10000 270 703 9970			
	208	6751 1565 >10000 9590 >10000 101 >10000			
	200	5930 >10000 781 >10000 >10000 4234 >10000			
	192	>10000 >10000 >10000			

表 2 ( $K_t=1$   $R=0.45$ )

	$\sigma_{\max}$ (MPa)	N ( $10^3$ ) 次	$\bar{x}$	S	$N_{50}$ ( $10^3$ )
成组试验	295	75 99 101 127 145	5.0280	0.1101	106.668
	278	33 45 51 56 57 67 88 88 101 142 176 185 201 209 324 1111 1203 1315	5.1748	0.4952	149.556

续表 2

	$\sigma_{\max}$ (MPa)	N ( $10^3$ ) 次	$\bar{x}$	S	$N_{50}$ ( $10^3$ )
升降法	270	106	指定寿命： $N=10^6$ (次) $S=8.39$ $\bar{\sigma}=254$ (MPa)		
	262	69 > $10^3$ 83			
	254	59 > $10^3$ > $10^3$ 69			
	246	190 > $10^3$ > $10^3$ > $10^3$			
	238	> $10^3$			
	221	81 1127 2848 244 7209	指定寿命： $N=10^7$ (次) $S=4.1952$ $\bar{\sigma}=215$ (MPa)		
	213	> $10^4$ > $10^4$ 171 100 > $10^4$ > $10^4$			
	209	> $10^4$ > $10^4$			

表 3 ( $K_t=1$   $R=0.1$ ) 环境老化半年

	$\sigma_{\max}$ (MPa)	N ( $10^3$ ) 次	$\bar{x}$	S	$N_{50}$ ( $10^3$ )
成组试验	275	38 41 41 42 32	4.5888	0.0501	38.801
	242	54 65 93 48 41 53	4.7553	0.1233	56.93
	225	60 54 95 55 49 76	4.7999	0.1084	63.087
升降法	225	245 47	指定寿命： $N=10^6$ (次) $S=7.6026$ $\bar{\sigma}=212.5$ (MPa)		
	217	80 90 > $10^3$ > $10^3$			
	208	139 792 > $10^3$ > $10^3$			
	200	> $10^3$ > $10^3$			
	225	253	指定寿命： $N=10^7$ (次) $S=9.2664$ $\bar{\sigma}=206.57$ (MPa)		
	217	7198 106 > $10^4$ 88 260 > $10^4$ > $10^4$			
	208				
	200	4220 139 > $10^4$ > $10^4$			
	192	> $10^4$ > $10^4$			

表 4 ( $K_t=1$   $R=0.1$ ) 环境老化一年半

	$\sigma_{\max}$ (MPa)	N ( $10^3$ ) 次	$\bar{x}$	S	$N_{50}$ ( $10^3$ )
成组试验	275	42 42 41 37 31 27 31 21	4.5205	0.10748	33.149
	242	21 49 32 21 53 35 79	4.5722	0.2133	37.346
	217	31 221 110 46 78 100 47 42	4.8409	0.2806	69.329

续表 4

	$\sigma_{\max}$ (MPa)	N (10 <sup>3</sup> ) (次)	$\bar{X}$	S	N <sub>50</sub> (10 <sup>3</sup> )
升降法	192	112	指定寿命: N=10 <sup>6</sup> (次) S=8.99 $\bar{\sigma}$ =173 (MPa)		
	182	191 > 10 <sup>3</sup> 79			
	175	> 10 <sup>3</sup> 84 > 10 <sup>3</sup> 194			
	167	139 > 10 <sup>3</sup> > 10 <sup>3</sup>			
	158	> 10 <sup>3</sup>			
	192	9151	指定寿命: N=10 <sup>7</sup> (次) S=11.88 $\bar{\sigma}$ =169.6 (MPa)		
	182	161 > 10 <sup>4</sup> 67 65			
	175	> 10 <sup>4</sup> > 10 <sup>4</sup> 200			
	167	> 10 <sup>4</sup>			
	158	100 > 10 <sup>4</sup> 120			
	150	> 10 <sup>4</sup> 771 387			
		> 10 <sup>4</sup>			
		> 10 <sup>4</sup> > 10 <sup>4</sup>			

## 4. 升降图

(1) Kt=1 R=0.45 升降图 (图 2、图 3)

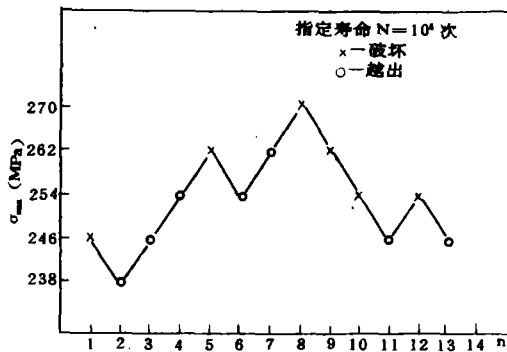


图 2

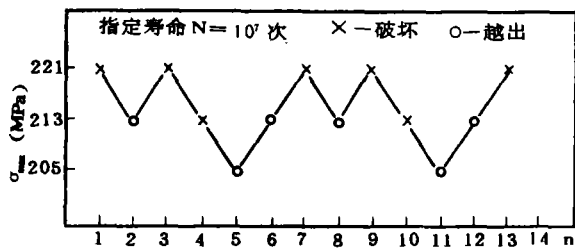


图 3

(2) Kt=1 R=0.1 升降图 (图 4)



图 4

(3) Kt=1 R=0.1 环境老化半年升降图 (图 5、图 6)

6)

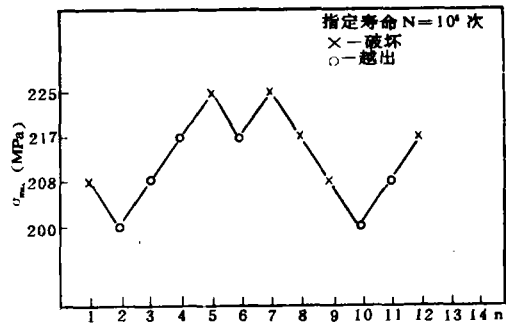


图 5

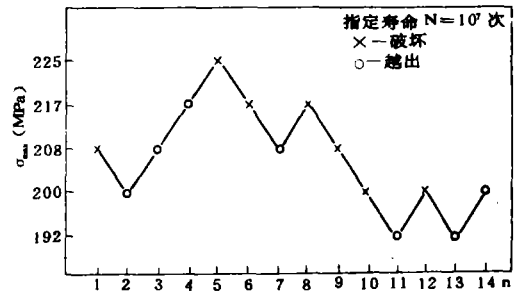


图 6

(4) Kt=1 R=0.1 环境老化一年半升降图 (图 7、图 8)

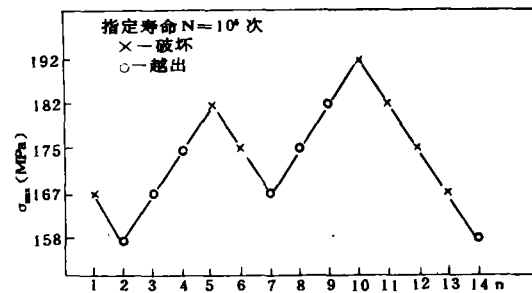


图 7

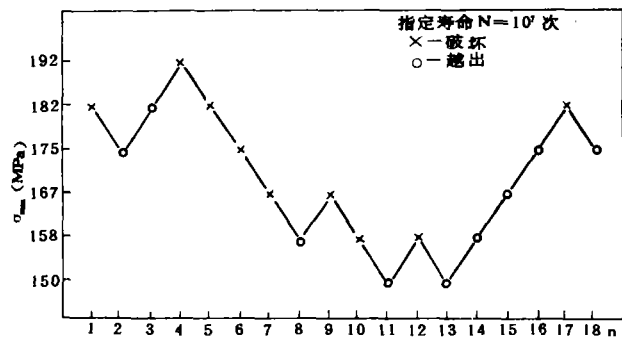


图 8

## 5. 绘制 S-N 曲线

用逐点描述法来绘制 S-N 曲线, 以应力  $\sigma_{\max}$  为纵坐标, 对数疲劳寿命  $\lg N$  为横坐标, 将各数据点画在坐标纸上, 然后用曲线光滑地把它们连接起来, 即为中值 S-N 曲线, 见图 7。

## 6. 试验结果分析

(1) 由试验结果看出, 疲劳寿命的分散性较大, 只用单点试验来测定 S-N 曲线, 精度较差, 要获得一条较精确的 S-N 曲线, 采用成组试验法。随着应力水平的降低, 疲劳寿命的分散性有所增加, 为了在各级应力水平下达到各数据点具有足够的相同准确度, 必须确定各级应力水平下的试件个数与变异系数 ( $S/\bar{X}$ ) 的关系, 达到误差限度的要求。在长寿区分散性更大, 用升降法来测定疲劳极限可以得到精确的结果。

(2) 从试验中看出, 镁合金材料疲劳试验数据分散性很大, 一般别的材料在中等寿命区成组试验法试验时一个应力水平有 10 来根试件就可以达到置信度、相对误差等要求。但在本试验中用了 18~28 根试样才达到在给定的置信度和相对误差的要求下最小子样数的要求, 这说明此种材料疲劳试验的难度大, 要做到一条精确的 S-N 曲线, 需要花费较多的试件和较长的试验周期。

(3) 四点弯曲试验比轴向拉伸、三点弯曲等试验难度大, 试验的整个程序都比较复杂, 首先是内外支架间的距离  $a$  的选择, 要使其作用在试样上的最大负载与变形

量保持一定的关系 (变形量不能超过 1.2mm, 即土 0.6mm)。应力和负载的选择也要保证变形在允许范围内。第二, 试样的装夹比较复杂, 试样要恰好装在夹具中间, 要仔细地调整高度, 保持试样的中心, 试样要夹紧, 并要防止夹具损坏和产生侧振。再则, 要对气隙、频率等选择恰当, 这样才能正常运行。试验开始正常后要调整好断裂保护器, 在试样断裂后机器立即停机, 否则就会损坏夹具。

(4) 从试验结果看, 随着应力比的降低疲劳强度降低, 是符合疲劳性能的规律。镁合金材料对腐蚀敏感, 三条曲线的应力比为  $R=0.1$ , 其中两条曲线的试样是经环境老化的, 环境老化一年半的疲劳强度 (条件疲劳极限为 169.6MPa) 低于环境老化半年的疲劳强度 (条件疲劳极限为 206.57MPa), 又低于不经环境老化的疲劳强度 (条件疲劳极限为 207.7MPa)。老化时间越长, 腐蚀影响就越明显, 而且老化的试样是表面喷漆的, 如果没有这层漆层保护, 腐蚀影响就可能更明显, 这就证明此种材料对腐蚀是非常敏感的。

(5) 从试验结果看, MB15 是疲劳性能较好的材料, 再加上比重轻、抗冲击、比刚度高等优点, 用于飞机上是种好材料。

疲劳试验由理化室唐保林及疲劳组同志进行, 环境老化由理化室一组同志进行试验, 在此表示感谢。

## 参考文献 (略)

\*\*\*\*\*

## 综合性能优于 300M 钢的飞机用超高强度钢 AerMet 100

美国 CarTech 公司 (Carpenter Technology Corp.) 研制出一种号称是 1991 年 100 项重大发明之一的飞机用超高强度钢 AerMet 100 (专利号 5087415, 合金编号为 AMS 6532)。其成分为: 13.4Co, 11.1Ni, 3.1Cr, 1.2Mo, 0.23C, 余 Fe。这种钢兼有高强度、高硬度、高断裂韧性和延性, 其综合性能优于当今广泛应用的 300M、AF1410、AISI4340 等超高强度钢, 而且是各种钢中屈服强度最高者 (1725MPa)。

麦·道公司原来希望用一种改进的 AF1410 来代替 300M 钢用于 A-12 的起落架以减轻重量, 促进了 CarTech 公司研制出 AerMet100, 后来用于代替 F/A-18 飞机的 300M 钢起落架用钢, 因为美国海军需要更韧、更有疲劳抗力且具有优良的抗应力腐蚀能力的合金供必须降落到航空母舰甲板上的飞机用。美国海军也用 AerMet100 代替 AISI4340 钢用于 LHX 轻型直升机中。

在现有的宇航用高强度钢系列 (AF1410、4340、300M、H11) 中, 多数的断裂韧性都比 AerMet100 低许多, AerMet100 的断裂韧性为  $125\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  是 300M 钢的两倍, 而 H11 则只有  $33\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。虽然这几种钢都可热处理至 1655~2000MPa 的拉伸强度, 但 H11、300M 和 4340 钢在达到最高强度时的断裂韧性值都很差, 而 AerMet100 在热处理至 1930MPa 时的断裂韧性值仍保持  $110\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。夏比 V 形缺口冲击试验测得的断裂时的冲击能分别为: AF1410, 70 焦耳; AerMet100, 45 焦耳; 300M 和 H11 最低, 只有 25 焦耳。美国政府进行的一项试验证明材料工程

明, 在 -55℃ 下 AerMet100 的夏比缺口冲击值为 40 焦耳, 这表明, 这种钢在非常冷的环境下仍保留优良的韧度, 而其它大多数钢在这种低温下都变脆。此外, AerMet100 可用热处理方法得到 51~55HRC 的硬度而断裂韧性仍保持超过  $135\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。AerMet 和 AF1410 的延伸率分别为 13% 和 15%, 断面收缩率分别为 65% 和 68%。而 4340、300M、H11 的断面收缩率则低于 34%。

麦·道公司曾对 AerMet100 和 300M 进行了严格中的应力腐蚀开裂试验, 将试样弯曲至 180°, 放入 NaCl 溶液中 6min, 然后取出干燥 52min, 反复循环 35 天, 最后证实 AerMet100 的应力腐蚀开裂抗力比 300M 钢高得多。在另一种测量抗应力腐蚀试验中, 预裂纹试样在加载条件下放入 3.5% 的盐溶液中 5000h。结果证实, AerMet100 的  $K_{ISCC}$  为  $38\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , 比 H11、300M、4340 钢都高得多。

AerMet100 的优良综合性能使它成为宇航用 300M、AF1410、AISI4340 等低合金钢的竞争者。除了用在起落架、着陆阻拦钩、弹射挂钩外, 它还可以用于紧固件、结构件、装甲、作动筒、军械、喷气发动机轴、直升机旋翼主轴和密封环等, 在非航空领域上, 还可用作高强度螺栓和汽车驱动轴等。

至今, CarTech 公司已生产出 40 批各种 AerMet100 的真空熔炼/真空电弧重熔铸锭 (每批 6800kg), 最大尺寸可达  $\phi 760\text{mm}$ , 它可以棒、丝、条、薄板、板材和空心棒等形式提供。

(东华)