

# K5合金渗铝硅工艺的对比

## 疲劳试验数据分析

四二〇厂 刘晓峰

随着航空发动机推力不断提高,使涡轮进口温度上升,受热部件必须采用低铬含量的高强度镍基、钴基合金来保证高温强度。但由于铬含量降低,合金抗氧化、抗燃气腐蚀性能也随之下降。解决上述矛盾的途径,一是发展内冷系统降低平均温度;二是采用高温抗氧化涂层,提高受热部件表面的抗高温氧化性能。涂层的种类及其工艺方法很多,考虑到我厂生产的具体条件,对料浆浸挂法渗Al-Si进行了试验研究。

试验证明,渗Al-Si的K5涡轮叶片的抗冷热疲劳性能比未采用涂层的原始叶片有大幅度的提高;材料的高温短时、高温持久性能相当;抗氧化、抗燃气腐蚀性能大大地优于未渗Al-Si的原始合金。高温机械疲劳性能由于试验数据分散,当时未能得出结论。本文利用数理统计处理方法,对K5合金渗Al-Si工艺的疲

劳试验数据与未经处理的作了对比,并给出明确的结论。

### 一、试验简介

铸造K5合金的试样形状、尺寸见图1。试验在高温旋转弯曲小疲劳试验机上进行,试验时施加38公斤/毫米<sup>2</sup>应力,在930℃高温下对K5合金渗Al-Si试样与未渗的原始试样(以下简称空白试样)进行对比试验,结果列于表1。

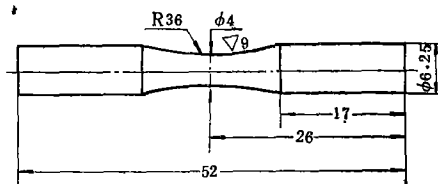


图1 试样形状、尺寸示意图

表1

炉号	序号	渗Al-Si试样			空白试样		
		试样有效直径 毫米	工作段长度 毫米	循环次数 次	试样有效直径 毫米	工作段长度 毫米	循环次数 次
107	1	4.005	25.85	$1.21 \times 10^7$	4.010	25.85	$1.42 \times 10^7$
	2	4.000	25.80	$>1.25 \times 10^7$	4.005	25.80	$3.86 \times 10^6$
	3	4.005	25.85	$1.83 \times 10^6$	4.005	25.90	$6.19 \times 10^5$
	4	4.000	25.80	$1.66 \times 10^7$	4.005	25.80	$>1.48 \times 10^7$
	5	4.005	25.85	$4.82 \times 10^5$	4.010	25.85	$6.47 \times 10^6$
	6	4.005	25.85	$8.08 \times 10^5$			
108	1	4.015	26.01	$1.19 \times 10^7$	4.010	26.13	$>1.06 \times 10^7$
	2	4.015	25.89	$>1.18 \times 10^7$	4.015	26.07	$>1.22 \times 10^7$
	3	4.010	26.13	$5.54 \times 10^5$	4.010	25.99	$>1.04 \times 10^7$
	4	4.010	26.07	$1.95 \times 10^5$	4.020	26.13	$5.3 \times 10^6$
	5	4.015	25.94	$5.47 \times 10^6$	4.015	26.05	$2.73 \times 10^6$
	6	4.010	26.00	$7.48 \times 10^6$	4.020	26.10	$5.79 \times 10^6$

## 二、数据分析

从表2可见, 每组循环次数均有超越 $10^7$ 的数据, 不能采用t检验和F检验来进行数据分析, 这里先采用秩合检验的办法进行处理。

### 1. 秩合检验

1) 编秩 将表1中渗Al-Si试样和空白试样的疲劳寿命由小到大排列, 编成如表2的秩列。

2) 计算秩和 计算各炉号中观测值个数少的那组数据的秩和。

对于107炉号:  $T = 3 + 5 + 6 + 9 + 9 = 32$

对于108炉号:  $T = 3 + 4 + 6 + 10 + 10 + 10 = 43$

3) 检验 对于107炉号而言, 较小的观测值个数为空白试样组,  $n = 5$ , 查秩合检验表, 当显著度 $\alpha = 5\%$ 时, 上限 $T_2 = 37$ , 下限 $T_1 = 18$ , 所以 $T_1 < T < T_2$ ; 当显著度 $\alpha = 10\%$ 时, 上限 $T_2 = 36$ , 下限 $T_1 = 19$ , 所以 $T_1 < T < T_2$ 。

对于108炉号, 两组的观测值相等,  $n_1 = n_2 = 6$ , 当 $\alpha = 5\%$ 时,  $T_2 = 52$ ,  $T_1 = 26$ , 所以 $T_1 < T < T_2$ ; 当 $\alpha = 10\%$ 时,  $T_2 = 50$ ,  $T_1 = 28$ , 所以 $T_1 < T < T_2$ 。以上检验表明, 渗Al-Si试样和空白试样的疲劳寿命来自同一母体, 疲劳性

能无显著差异, 可见渗Al-Si工艺对试样的疲劳性能无明显影响。

由于秩合检验较粗糙, 它只能检验两个子样是否来自同一母体。为了定量地说明渗Al-Si试样和空白试样在某一存活率下疲劳寿命的差异和该差异是否属于偶然误差, 我们进一步用威布尔分布作图法来进行处理。

### 2. 用威布尔分布进行数据分析

以疲劳寿命 $10^7$ 为界,  $>10^7$ 的均定为超越数据, 这样表1中的疲劳寿命改写成如表3中的数据。并以各组试件总数 $n$ 估计母体存活率 $P$ , 即:  $P = 1 - i / (n + 1)$ , 式中 $i$ 为序数。对应各疲劳寿命的存活率 $P$ 也列于表3。

1) 估计最小寿命 $N_0$  利用表3中各疲劳寿命的存活率 $P$ 和对应的各对数疲劳寿命 $\lg N_i$ 在威布尔概率坐标纸上作 $P-N$ 图(见图2、3), 通过反复估计确定出各炉号各试样组相应的 $N_0$ , 列于表3。

2) 作 $P - \lg(N_P - N_0)$ 直线 知道 $N_0$ 后计算 $\lg(N_P - N_0)$ 值, 并按破坏试件数 $n'$ 以公式 $P' = 1 - i / (n' + 1)$ 估计母体存活率 $P'$ , 式中 $i$ 为序数。

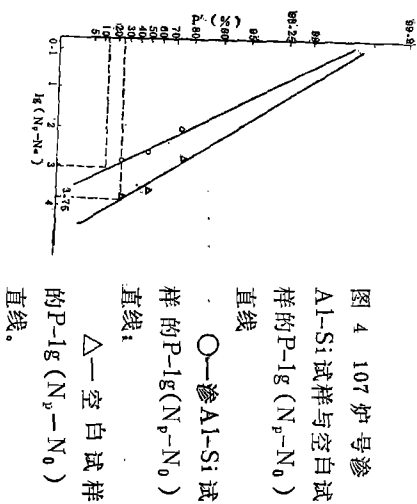
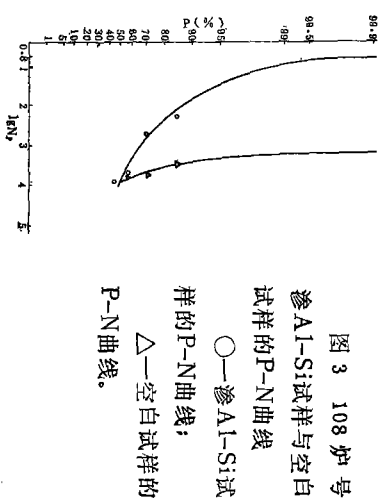
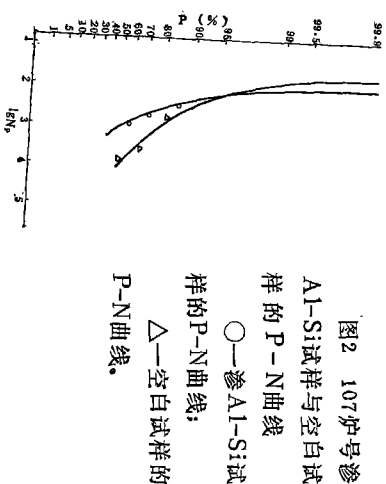
所有计算结果列于表3, 以 $\lg(N_P - N_0)$ 为横坐标,  $P'$ 为纵坐标, 作 $P' - \lg(N_P - N_0)$ 直线, 如图4、5。

表 2

炉 号	渗Al-Si试样			空 白 试 样		
	序 数	疲劳寿命, 次	秩	序 数	疲劳寿命, 次	秩
107	1	$1.83 \times 10^5$	1	3	$6.19 \times 10^6$	3
	2	$4.82 \times 10^5$	2	5	$3.86 \times 10^6$	5
	4	$8.08 \times 10^5$	4	6	$6.47 \times 10^6$	6
	7	$1.21 \times 10^7$ 越出	9	9	$1.42 \times 10^7$ 越出	9
	8	$>1.25 \times 10^7$ 越出	9	10	$>1.48 \times 10^7$ 越出	9
	11	$1.66 \times 10^7$ 越出	9			
108	1	$1.95 \times 10^5$	1	3	$2.73 \times 10^6$	3
	2	$5.54 \times 10^5$	2	4	$5.3 \times 10^6$	4
	5	$5.47 \times 10^6$	5	6	$5.79 \times 10^6$	6
	7	$7.48 \times 10^6$	7	8	$>1.04 \times 10^7$ 越出	10
	10	$1.19 \times 10^7$ 越出	10	9	$>1.06 \times 10^7$ 越出	10
	11	$>1.18 \times 10^7$ 越出	10	12	$>1.22 \times 10^7$ 越出	10

表 3

炉号	渗 Al-Si 试样								空白试样							
	序号 $i$	疲劳寿命 $N_p$ 千周	对数疲劳寿命 $X_{pi} = \lg N_{pi}$	存活率 $P$ %	最小寿命 $N_0$ 千周	$N_p - N_0$	$\lg(N_p - N_0)$	存活率 $P'$ %	序号 $i$	疲劳寿命 $N_p$ 千周	对数疲劳寿命 $X_{pi} = \lg N_{pi}$	存活率 $P$ %	最小寿命 $N_0$ 千周	$N_p - N_0$	$\lg(N_p - N_0)$	存活率 $P'$ %
107	1	183	2.2625	85.72	79	104	2.0170	75	1	619	2.7917	83.33	50	569	2.7551	75
	2	482	2.6830	71.43	79	403	2.6053	50	2	3860	3.5866	66.67	50	3810	3.5809	50
	3	808	2.9074	57.14	79	729	2.8627	25	3	6470	3.8109	50.00	50	6420	3.8075	25
	4	超出							4	超出						
	5	超出							5	超出						
	6	超出														
108	1	195	2.2900	85.72	6	189	2.2967	80	1	2730	3.4362	85.72	1259	1471	3.1676	75
	2	554	2.7435	71.43	6	548	2.7388	60	2	5300	3.7243	71.43	1259	3041	3.4830	50
	3	5470	3.7380	57.14	6	5462	3.7372	40	3	5790	3.7627	57.14	1259	4531	3.6568	25
	4	7480	3.8739	42.86	6	7474	3.8735	20	4	超出						
	5	超出							5	超出						
	6	超出							6	超出						



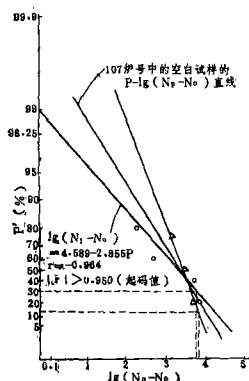


图5 108 炉号 渗 Al-Si 试样与空白试样的  $P\text{-}lg(N_p - N_0)$  直线  
 $\bigcirc$ —渗 Al-Si 试样的  $P\text{-}lg(N_p - N_0)$  直线;  
 $\triangle$ —空白试样的  $P\text{-}lg(N_p - N_0)$  直线。

3) 估计中值寿命 首先利用公式  $P' = 1 - (1 - P)(n + 1)/(n' + 1)$ , 在  $P = 50\%$  时计算  $P'$ 。式中:  $n$ —试样总数;  $n'$ —破坏试样数;  
 $P$ —试样总数相应的存活率;  $P'$ —破坏试样相应的存活率。

然后由图 4、5 查此  $P'$  对应的  $lg(N_p - N_0)$  值, 计算此  $P'$  对应的  $N_p$  值即代表存活率  $P = 50\%$  的安全寿命, 其计算结果列于表 4。

表 4

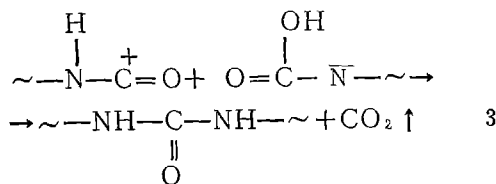
炉号	渗 Al-Si 试样					空白试样				
	$N_0$ , 千周	$P$ , %	$P'$ , %	$lg(N_p - N_0)$	$N_p$ , 千周	$N_0$ , 千周	$P$ , %	$P'$ , %	$lg(N_p - N_0)$	$N_p$ , 千周
107	79	50	12.5	3	1079	50	50	25	3.75	5673
108	6	50	30	3.78	6032	1259	50	12.5	3.8	7569

### 三、分析与结论

把图 4 中 107 炉号的空白试样移到图 5 (见图 5), 清楚可见 107 炉号试样的  $P\text{-}lg(N_p - N_0)$  直线与 108 炉号空白试样的  $P\text{-}lg(N_p - N_0)$  直线的比较情况同 108 炉号渗 Al-Si 试样与空白试样的  $P\text{-}lg(N_p - N_0)$  直线的比较情况类似, 从表 4 也可知 107 炉号空白试样 50% 存活率的疲劳寿命  $N_p$  值为 5673 千周, 而 108 炉号空白试样 50% 存活率的疲劳寿命  $N_p$  值为 7569 千周, 这说明在满足 K5 合金技术条件的前提下, 由于铸造工艺的差异 (如浇注批次, 合金配方等), 导

致合格的 K5 合金之间的疲劳寿命也存在一定差异。从表 4 的数据可知, 无论是 107 炉号还是 108 炉号, 空白试样的中值疲劳寿命均比渗 Al-Si 试样的中值疲劳寿命高, 但无数量级的差异。它们之间的误差与 107、108 炉号 K5 合金本身之间疲劳寿命的误差相比较就完全可以认为是偶然因素造成的差异了, 决非渗 Al-Si 工艺造成疲劳寿命的差异。因此, 通过以上两种处理方法的分析, 可得如下结论: 在 38 公斤/毫米<sup>2</sup> 应力作用下, 渗 Al-Si 工艺对 K5 合金试件的疲劳性能影响较小, 即 K5 合金渗 Al-Si 后的疲劳寿命与原始 K5 合金的疲劳寿命相当。

(上接第 27 页)



必须强调指出, 要想在胶粘剂与橡胶接触的表面上只接触“微量”的水, 必须严格控制工艺条件。这就要求胶粘剂表面和橡胶片在包

胶前必须是干燥的; 橡胶片与金属必须包牢; 隔离剂 (滑石粉) 要干燥好且将金属包胶件埋没; 放金属包胶件的盒子要加盖。否则超过这个“微量”, 水的作用就要发生质的变化。

另外, 蒸汽硫化与模压硫化比较, 硫化件所受外界压力要小得多。因而粘硫态的橡胶对金属表面胶粘剂的冲击作用就非常小。这样胶粘剂就不可能冲离金属表面。这也是蒸汽硫化能够提高粘接强力的原因之一。