

试样形状尺寸及磨削方法对材料 疲劳性能影响的试验研究

陈美英 郑森 段作祥 徐应玲

目前疲劳试验所使用的试验机类型颇多,试样的形状尺寸和磨削方法也多不一致。为了探讨这些因素对材料疲劳性能的影响,我们进行了试样形状尺寸及磨削方法对材料疲劳性能(主要指旋转弯曲)影响的试验研究。在这方面,国外也有不少报道。由苏联机器制造百科全书中可知,他们的试验结果表明,当应力低于疲劳极限时,试样承受最大应力部分的长度对材料疲劳极限没有影响;当应力高于疲劳极限时,试样形状对疲劳强度有明显的影

响。此外,疲劳极限还随所使用的试验机类型的不同而有差异。现将我们所进行的试验研究介绍如下。

一、试验方法

1. 材料

试验所选用的几种主要航空金属材料有:高强度铝合金LC-4、高强度钢30CrMnSiNi2A、调质钢40CrNiMoA、热稳定不锈钢GX-8等。其化学成分、热处理规范及机械性能见表1、2和3。

表 1 化 学 成 分

材 料	规格	化 学 成 分 %										
LC-4	φ 20	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Si	Cr				
		1.44	1.84	0.47	5.86	0.24	<0.2	0.16				
40CrNiMoA	φ 18	C	Mn	Si	Ni	Cu	Mo	P	S			
		0.39	0.61	0.36	1.44	0.05	0.19	0.013	0.005			
GX-8	φ 18	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	W	Mo	V	Nb
		0.14	0.34	0.25	0.003	0.013	11.36	2.15	0.82	1.01	0.29	0.24
30CrMnSiNi2A	φ 18	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni				
		0.30	1.09	1.04	0.26	0.006	1.06	1.56				

表 2 热 处 理 规 范

LC-4	淬火470±3°C 90分钟, 水冷<30°C, 转移10秒钟, 人工时效140±2°C 16小时
40CrNiMoA	850°C油淬, 570°C油冷, Rc=33~35
GX-8	1160°C保温1小时空冷, 680°C回火2小时空冷, 1160°C保温40分钟油冷
30CrMnSiNi2A	淬火890°C, 回火260°C

表 3 机 械 性 能

材 料	σ_b 公斤/毫米 ²	$\sigma_{0.2}$ 公斤/毫米 ²	δ_5 %	ψ %	a_k 公斤·米/厘米 ²	HB d 毫米
LC-4	59.2	57.1	10.6			
40CrNiMoA	115	104.5	16	60.5	12.75	3.3
GX-8	110					
30CrMnSiNi2A	117		11.5	47.5	7.12	2.74

2. 试样加工

所有试样都采用车削后磨削, 有的用纵

磨, 有的用横磨。合金钢车削后热处理, 铝、镁合金车削前热处理。机械加工参数如下:

1) 车削 40CrNiMoA及30CrMnSiNi2A钢粗车时主轴转数 $n=400\sim600$ 转/分, 每次走刀量 $S=0.3$ 毫米, 进刀量 $t=2\sim3$ 毫米, 留2毫米余量待精车, 精车时主轴转数 $n=200\sim300$ 转/分, 走刀量 $S=0.1\sim0.2$ 毫米, 进刀量 $t=0.3\sim0.5$ 毫米, 对总长210毫米的试样, 留余量 $0.6\sim0.8$ 毫米, 对总长为100毫米的试样, 留余量 $0.35\sim0.45$ 毫米。然后进行热处理。GX-8钢粗车与精车同上, 但长试样留余量 $0.35\sim0.45$ 毫米, 短试样留余量 $0.25\sim0.35$ 毫米。LC-4铝合金粗车与精车同前, 长短试样都留 $0.35\sim0.45$ 毫米的余量。

2) 纵磨 在万能工具磨床上进行磨削, 合金钢试样用白色氧化铝砂轮, 粒度46#, 硬度ZR(中软)。砂轮线速度 $V=25\sim30$ 米/秒, 试样转数 $n=290$ 转/分。磨削时用含1%亚硝酸钠、0.5%甘油、0.5%苯甲酸钠及0.4%三乙醇胺冷却水冷却。粗磨试样弧形线部位每次磨削量0.01毫米, 经多次磨削后留0.05毫米的精磨余量。精磨时每次磨削0.005毫米, 一直磨至试样的规定尺寸。磨铝合金试样用碳化砂砂轮, 粒度60~80#, 冷却液为20%机油加80%煤油, 其它同上。

3) 横磨 在靠模外圆磨床上进行, 合金钢用白色氧化铝砂轮, 粒度60#, 砂轮线速度 $V=35$ 米/秒, 试样转数 $n=250$ 转/分, 冷却液同纵磨。粗磨和精磨与纵磨时的参数完全相同。铝合金试样横磨时所用砂轮和参数也与纵磨相同。

3. 试验方法

1) 在双支点梁式试验机上进行下列试验。

(1) 在HY型旋转弯曲疲劳试验机上进行长短试样的对比试验。试样形状尺寸见图1及2。

(2) 在HY型试验机上用工作部位直径为9.5毫米($L=100$ 毫米的缩短试样)与6毫米的试样进行对比试验。

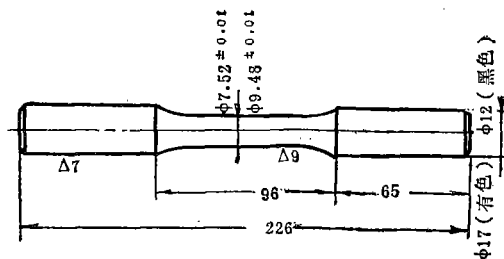


图1 试样1

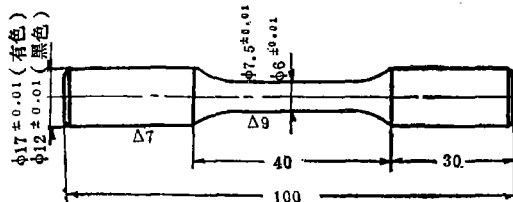


图2 试样2

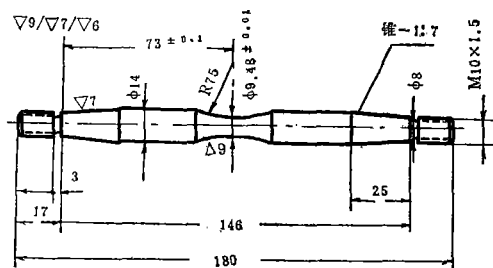


图3 试样3

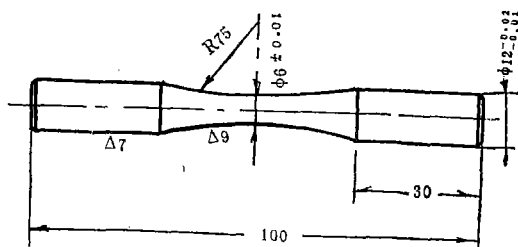


图4 试样4

(3) 在PWC510WG型旋转弯曲疲劳试验机上, 对工作部位直径为9.48毫米及7.52毫米的试样进行高温对比试验, 试样形状尺寸见图3。

(4) 在HY型试验机上进行单截面纵磨、横磨(见试样4)及等截面横磨(试样2)的对比试验。

2) 在6302型、BE-133型及小尺寸试样(E型)的悬臂梁式旋转弯曲疲劳试验机上,

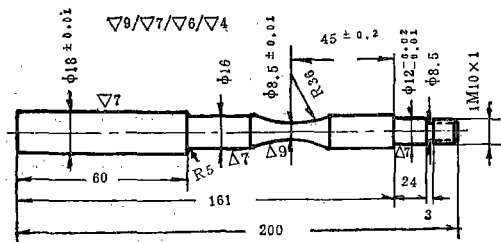


图 5 试样5

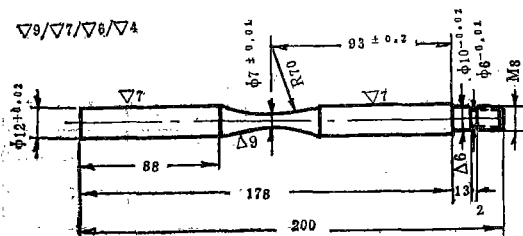


图 6 试样6

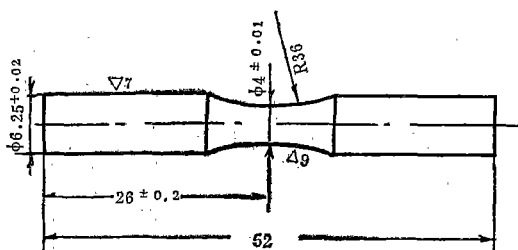


图 7 试样7

用各自适用的试样(形状尺寸都不相同)进行对比试验,见图5、6、7。

在BE-133型试验机上进行单截面纵磨与横磨试样的高温对比试验。

二、试验结果讨论

1. 在双支点梁式试验机上测得的试验结果

1) 40CrNiMoA、GX 8、30CrMnSiNi2A和LC-4四种合金长、短试样的疲劳试验结果见图8~11。所得疲劳极限值列入表4。

表 4 四种合金疲劳极限值

材料牌号	40CrNiMoA		GX—8		30CrMnSiNi2A		LC—4	
试样	1	2	1	2	1	2	1	2
疲劳极限* σ -1公斤/毫米 ²	58	58	55	56	61	61	16.5	17
疲劳极限相对差%				1.8				3.03

* 钢以 $N=10^7$ 、铝合金以 $N=10^7 \times 2$ 为基数。

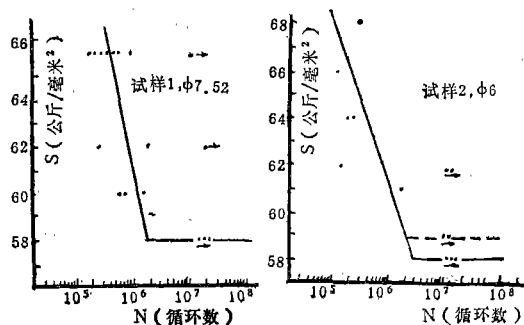


图 8 40CrNiMoA钢光滑试样(1, 2)疲劳特性曲线

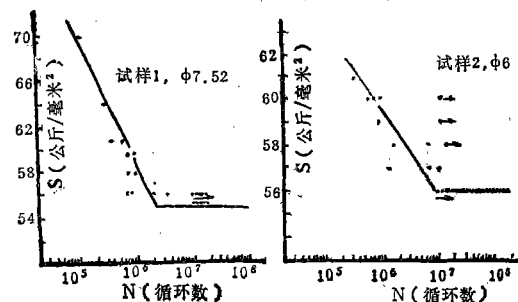


图 9 GX-8钢光滑试样(1, 2)疲劳特性曲线

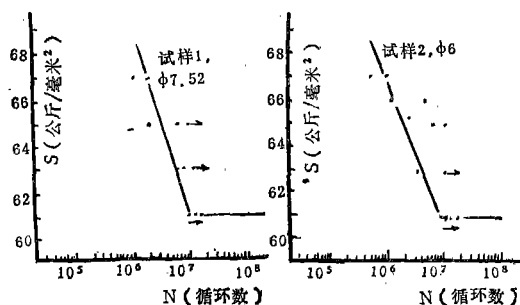


图 10 30CrMnSiNi2A钢光滑试样(1, 2)疲劳特性曲线

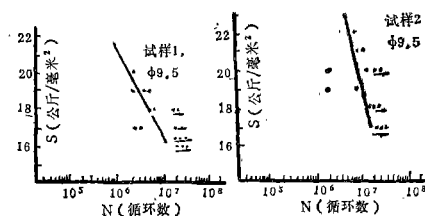


图 11 LC-4铝合金光滑试样(1, 2)疲劳特性曲线

从上述四种材料的试验结果可看出, 40CrNiMoA和30CrMnSiNi2A用两种试样测得的疲劳极限 σ_{-1} 值相同; GX-8用试样2测得的疲劳极限 σ_{-1} 值比试样1的约高1.8%; LC-4试样2的疲劳极限 σ_{-1} 值比试样1的约高3%。以上均未超过工程允许范围。

从S-N曲线上也可以看出, 在高应力区, 试样2的循环周数比试样1有稍高的趋势, 其中LC-4稍明显些, 但这种循环周数的差异仍在疲劳数据分散度之内(一般为1~2个数量级)。

由于试样2工作部位的直径及长度均比试样1的小, 因而出现材质缺陷或机械加工缺陷的几率也要小些。结果疲劳极限有可能显得高些。

2) LC-4 铝合金直径6毫米试样、

40CrNiMoA 钢直径9.5毫米试样的室温疲劳以及ЭИ929耐热钢直径9.5及7.5毫米试样的高温疲劳试验结果见图12~14。

从上述曲线可明显看出 LC-4 合金 $\phi 6$ 毫米试样的疲劳极限比 $\phi 9.5$ 毫米的约高15% (见图11)。而对另外两种钢材来讲, 这种试样直径尺寸的差异对其疲劳极限的影响很小(约2%)。看来尺寸因素的影响程度, 随材料特性而异, LC-4高强铝合金对尺寸因素反应较钢材敏感。

3) LC-4、40CrNiMoA及GX-8单截面纵磨与单截面横磨试样的室温疲劳试验结果见图15~17, 可与图8、9、11等截面横磨试样的试验结果相比较。图18列出GX-8单截面纵磨与横磨试样的高温疲劳试验数据, 该数据是在BE-133型悬臂梁式试验机上测得的。

将上述几种材料的纵磨与横磨试样的疲劳

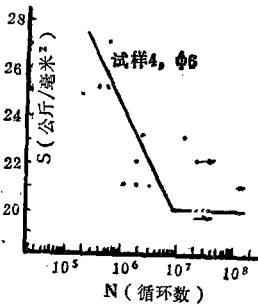


图 12 LC-4光滑试样 ($\phi 6$ 毫米) S-N曲线

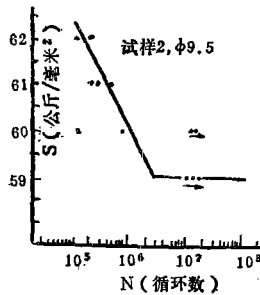


图 13 40CrNiMoA钢光滑试样 ($\phi 9.5$ 毫米) S-N曲线

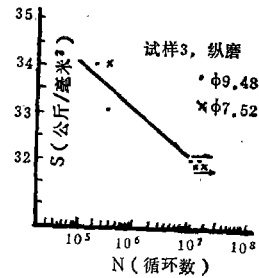


图 14 ЭИ929耐热钢700°C下的 S-N曲线

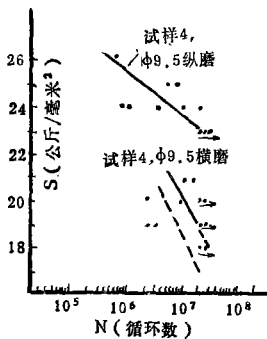


图 15 LC-4铝合金单截面纵、横磨与等截面横磨试样的 S-N曲线

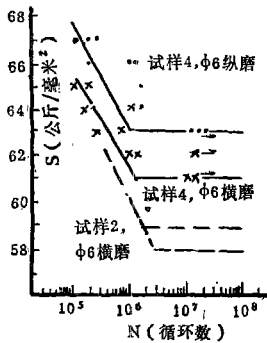


图 16 40CrNiMoA钢单截面纵、横磨与等截面横磨试样的 S-N曲线

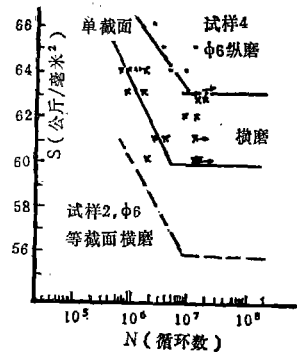


图 17 GX-8钢单截面纵、横磨与等截面横磨试样室温S-N曲线

极限列入表 5 加以比较, 可看出单截面纵磨试样的疲劳极限比等截面横磨试样的疲劳极限有显著提高, 尤其 LC-4 高强铝合金提高竟达 35.2%。即使都是单截面试样, 纵磨也比横磨提高 21%。而都是横磨时, 该合金单截面试样比等截面试样的疲劳极限还提高 11.7%。看来

横磨纹路与主应力方向垂直。对应力集中较敏感的材料疲劳性能特别有害。对于 40CrNiMoA 和 GX-8 钢来说, 试样纵、横磨的影响程度(都是单截面)和试样单、等截面的影响程度(都是横磨)基本一致。不像 LC-4 高强铝合金差得那样悬殊。

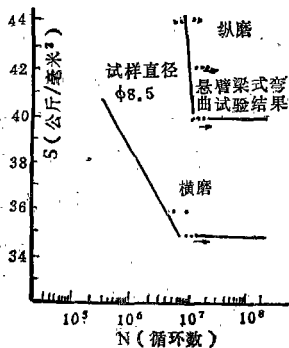


图 18 GX-8 钢单截面纵、横磨光滑试样 550°C 下的 S-N 曲线

表 5 试样形状及磨削方法对疲劳性能的影响

材料名称	疲劳极限公斤/毫米 ²			疲劳极限相对差 %		
	单截面	单截面	等截面	单纵-等横	单纵-单横	单纵-等横
	纵磨	横磨	横磨	等横	单横	等横
LC-4	23	19	17	35.2	21.0	11.7
40CrNiMoA	63	61	58.59	6.7	3.2	3.3
GX-8	室温	63	60	12.5	5.0	7.1
	550°C	40	35		14.2	

2. 在单支点梁试验机上的试验结果

图 19~25 为 LC-4、40CrNiMoA、GX-8、GH132 及 ЭИ929 等在单支点梁试验机上测得的不同直径试样对室温及高温疲劳性能影响的试验结果。

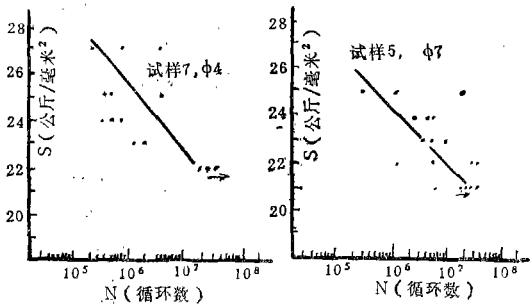


图 19 LC-4 铝合金悬臂弯曲试样 (φ4 及 φ7) 的疲劳特性曲线

上述材料的 φ4 毫米试样试验结果表明, 无论是室温还是高温下的光滑和缺口试样的疲劳强度均比 φ6 毫米以上的试样疲劳强度有明显的提高。这除了由于尺寸因素的影响外, 不同型号机器由于结构上的差异也会有一定的影响。

试样尺寸对材料弯曲疲劳强度的影响, 除

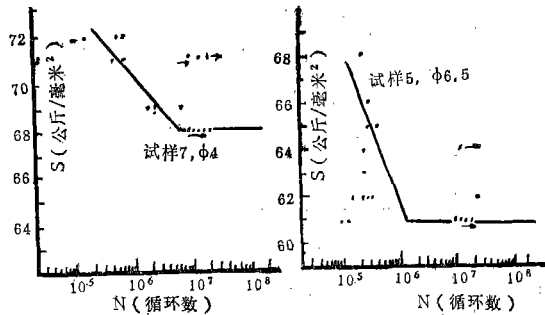


图 20 40CrNiMoA 钢悬臂弯曲试样 (φ4 及 φ6.5) 的疲劳特性曲线

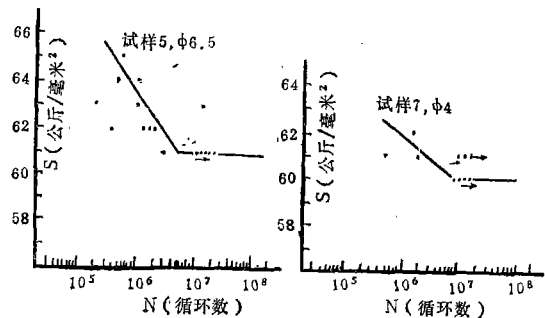


图 21 GX-8 钢悬臂弯曲试样 (φ4 及 φ6.5) 疲劳特性曲线

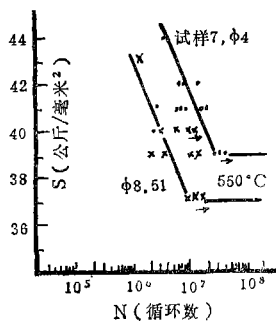


图 22 GX-8钢悬臂弯曲光滑试样 (φ4及φ8.51) 550°C疲劳特性曲线

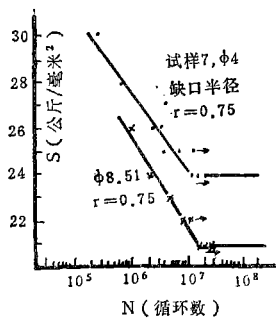


图 23 GX-8钢悬臂弯曲缺口 (r=0.75) 试样 (φ4及φ8.51) 550°C疲劳特性曲线

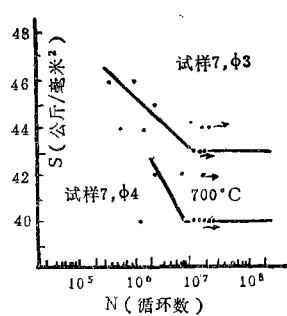


图 24 30Cr2Ni2Al钢悬臂弯曲光滑试样 (φ3及φ4) 700°C疲劳特性曲线

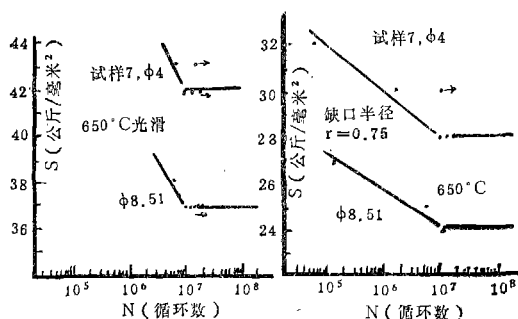


图 25 GH132 钢250°C光滑和缺口悬臂弯曲试样 (φ4及φ8.51) 的疲劳特性曲线

尺寸不同而出现的材质缺陷和机械加工损伤缺陷的几率不同外,更主要的还是由于应力梯度不同引起的。如图26所示,直径大小不等的两个圆截面试样,承受同一弯矩M的作用时(在危险截面上最大弯曲应力 σ_{max} 相等),则大直径试样的应力梯度 $tg\theta$ 比小直径试样的 $tg\theta$ 小,因而对承受相等高应力 σ 值范围的截面,大试样的厚,小试样的薄,这样在大试样上就有较多的金属晶粒受到高应力的作用,而易达到微观塑性变形,产生疲劳裂缝。已有大量数据表明,旋转弯曲疲劳试验,钢材试样直径从10毫米增加到150~200毫米时,其疲劳极限约降低30~45%。

三、结 束 语

1. 综前所述,试样形状尺寸和磨削方法

对材料的疲劳性能是有影响的。因此,当发表材料疲劳性能数据时,应说明所使用的试验机类型、试样形状尺寸以及加工方法。

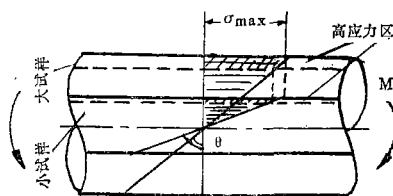


图 26 大小试样的应力梯度示意

2. 对总长 $L=226$ 毫米的高强度钢试样1,加工难以达到要求尺寸时,可以考虑采用缩短的试样2。

3. 对过渡圆弧加工困难、易在圆弧转接处断裂的等截面试样,建议采用单截面纵磨试样。

4. 疲劳试验应尽可能采用 $\phi 6 \sim 10$ 毫米的试样。 $\phi 3$ 、 $\phi 4$ 毫米的试样一般只用于试验贵金属或故障分析中零件上取不下大直径试样的情况下,而且用这种试样时,需根据具体材料调整夹持部位直径D与危险截面直径d的比例,因为有的材料在 d/D 不合适时易断在夹持部位。