

# 金属缺口拉伸持久试样应力集中系数的选择

张行安 胡元凯 朱广福

## 一、前言

在航空工程中受力件往往存在着键槽、销孔、榫槽、螺纹、尖角等,材料本身也不可避免地存在各种裂纹、疏松、非金属夹杂等内部微观缺陷,以及压痕、划伤、磨坑等表面宏观缺陷。而这种缺口、缺陷的存在,引起了应力分布的不均匀,产生了应力集中。衡量应力集中的程度用“应力集中系数” $K_t$ 表示。

不同的材料对同样的缺口或同样材料对不同缺口,其应力集中敏感程度是不同的。材料对缺口应力集中敏感度的差异,将影响材料的使用和发挥其最大的效能。所以在零件设计中,只有材料光滑试样的强度、塑性指标是不够的,还需有带缺口的试样在应力集中状态下的强度和塑性的指标。

本文用不同的方法计算了英、美、苏、西德等国家缺口持久试样的应力集中系数 $K_t$ 值,并用不同缺口持久试样,对缺口持久性能的影响进行了研究,从而选取了缺口持久试样的 $K_t$ 值。

### 1. 应力集中系数的概念

衡量应力集中程度用“应力集中系数” $K_t$ 表示,按Neuber的定义:

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nom}}$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——不超过弹性极限的最大应力;

$\sigma_{\text{nom}}$ ——名义应力;

$$\sigma_{\text{nom}} = p/F = 4p/\pi d^2$$

式中 $p$ ——试样两端所加载荷;

$F$ ——试样横截面积;

$d$ ——缺口处最小截面试样的直径。

$K_t$ 一般指弹性应力集中系数。它是只和零件的尺寸形状、加载方式有关,而与材料本身无关的几何参数,亦即和加载方式、缺口处最小截面直径 $d$ 、缺口深度 $t$ 、缺口张开角度 $\alpha$ 、缺口底部半径 $r$ (纵轴剖面上缺口底部半径)有关,见图1。

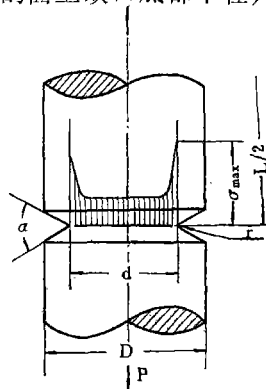


图1 缺口参数

### 2. 缺口敏感度的概念

材料对缺口的敏感度用缺口敏感系数 $K$ 来表示:

$$K = f(F, \sigma, \tau, T, K_t, M_s)$$

即缺口敏感度是载荷的性质、应力、时间、温度、弹性应力集中系数、材料的函数。关于缺口敏感度对拉伸持久强度的影响,我们用缺口敏感系数 $K_t$ 、 $K_\sigma$ 来表示:

$$K_t = \tau_\sigma' / \tau_\sigma, \quad K_\sigma = \sigma_\tau' / \sigma_\tau$$

式中 $\tau_\sigma'$ ——在规定的温度和 $\sigma$ 拉伸应力下,某一 $K_t$ 值缺口试样的断裂时间;

$\tau_\sigma$ ——在规定的温度和 $\sigma$ 拉伸应力下,光滑试样断裂的时间;

$\sigma_\tau'$ ——某一 $K_t$ 值的缺口试样,在规定的温度下达到 $\tau$ 时间的持久强度极限;

本文承蒙颜鸣皋、何晋瑞、周洪范同志修改,试验工作曾得到梁金奎、刘志静同志帮助,特致谢意。——作者

$\sigma_r$ ——在规定的温度下,光滑试样达到 $\tau$ 时间的持久强度极限。

当 $K_r$ 、 $K_\sigma > 1$ ,为没有缺口敏感性。

当 $K_r$ 、 $K_\sigma \leq 1$ ,为有缺口敏感性。二者都是指在某一 $K_t$ 值而言。

## 二、缺口持久试样 $K_t$ 值的计算

对英、美、苏、西德,以及我国的缺口

持久试样用诺谟图、 $K_t \approx \sqrt{d/r}$ 公式,以及Timoshenko公式(即Timoshenko根据光弹实验总结出一个计算应力集中系数的公式)

$K_t = \sqrt{0.5d/r + 0.85 + 0.08}$  分别进行计算。

以直径7毫米为标准,按相似原理进行放大或缩小,计算出 $K_t$ 值不变的各国试样尺寸,列入表1。各国标准缺口持久试样尺寸及理论弹性应力集中系数的计算结果见表2、3、4。

表1 各国缺口持久试样及 $K_t$ 值对比表

国 名	倍 数	缺口底部 试样直径 $d_n$ , 毫米	非缺口底 部直径 $D_n$ 毫 米	缺口底部 半径 $r_n$ 毫 米	缺口 角度 $\alpha$	诺谟图 计 算 $K_t$	$\sqrt{d/r}$ 计算		Timoshenko 公式计算	
							$K_t$	与诺谟 图相差 百分比	$K_t$	与诺谟 图相差 百分比
中 国 HCS	1 0.92857	5 4.64285	7 6.5	0.5 0.4629	60°	2.3	3.16	37%	2.5	8%
英 国 BS	1 0.8771	5.64 4.9468	7.98 6.9993	0.16 0.14034	60°	3.83	5.90	54%	4.35	13%
美 国 ASTM	1 1.076	4.52 4.8635	6.5 6.994	0.13 0.13988	60°	3.83	5.90	54%	4.35	13%
苏 联 ГОСТ	1	5	7	0.1	60°	4.6	7.07	53%	5.16	12%
西 德 DIN	1	8	10	0.16	60°	4.2	7.01	—	5.164	—

表2 英国BS标准缺口持久试样尺寸及 $K_t$ 值的计算

园截面积 $S_0$ 毫米 <sup>2</sup>	缺口底部 试样直径 $d_n$ , 毫米	试样直径 $D_n$ 毫 米	缺口底部 半径 $r_n$ 毫 米	最小平行 长度 $L_n$ 毫 米	缺 口 角 度 $\alpha$	诺谟图 计 算 $K_t$	$\sqrt{d/r}$ 计算 $K_t$	Timoshenko 公式计算 $K_t$
100	11.78	16.0	0.32	40	60°	3.83	6.07	4.47
50	7.98	11.28	0.23	28	60°	3.83	5.9	4.35
25	5.64	7.98	0.16	20	60°	3.83	5.94	4.38
12.5	3.99	5.64	0.11	14	60°	3.9	6.02	4.44

表3 美国ASTM标准缺口持久试样尺寸及 $K_t$ 值的计算

园截面积 $S_0$ 毫米 <sup>2</sup>	缺口底部 试样直径 $d_n$ , 毫米	试样直径 $D_n$ 毫 米	缺口底部 半径 $r_n$ 毫 米	最小平行 长度 $L_n$ 毫 米	缺 口 角 度 $\alpha$	诺谟图 计 算 $K_t$	$\sqrt{d/r}$ 计算 $K_t$	Timoshenko 公式计算 $K_t$
7.89	3.17	4.5	0.13	12	60°	3.4	4.94	3.7
12.96	4.06	5.5	0.13	17	60°	3.7	5.59	4.14
16	4.52	6.5	0.13	20	60°	3.83	5.90	4.35
32.17	6.40	9.5	0.18	25	60°	3.9	5.96	4.40
64.6	9.07	13.0	0.25	40	60°	3.9	6.02	4.44
128.68	12.8	19.0	0.38	50	60°	3.8	5.80	4.29

表4 西德 DIN 标准缺口持久试样尺寸及  $K_t$  值的计算

缺口底部 试样直径 $d_n$ , 毫米	试样直径 $D_n$ 毫米	缺口底部 半径 $r_n$ , 毫米	缺口角度 $\alpha$	诺谟图 计算 $K_t$	$\sqrt{d/r}$ 计算 $K_t$	Timoshenko 公式计算 $K_t$
8	10	0.16	60°	4.2	7.01	5.164
12	15	0.25	60°	4.17	6.93	5.065

### 三、试验

#### 1. 试样的准备和试验

GH37 为非真空感应炉加电渣重熔而得。  
其化学成分及热处理工艺见表 5。

横向低倍金相观察没有缩孔、裂纹、夹渣、

空隙、气泡。纵向低倍观察, 带状、分层为 1 级,  
疏松为 2 级, 晶粒度为 1、2 级, 少量为 4 级。

GH49 为大冶钢厂生产, 其理化性能也均  
符合 YB636-67 的要求, 并经标准规范热处理。

底部半径  $r_{0.5}$  缺口试样的底径留磨量为  
0.3 毫米, 磨削砂轮直径为  $\phi 350$  毫米, 转速 1700  
转/分, 工件转速 13 转/分。

表5 GH37 化学成分及热处理工艺

C	Cr	W	V	Mo	Al	Ti	Cu	Fe	Mn	Si	S	P
0.059~ 0.078	15.48	6.12	0.22	3.31	1.77~ 2.01	1.90~ 2.10	0.05	0.33	0.17	0.25	0.004	0.004
热处理工艺 1180°C×2 小时, 空冷+1050°C×4 小时, 空冷+800°C×16 小时, 空冷												

缺口试样形状、尺寸见图 2。从表 4 用诺  
谟图所作出 Peterson 曲线图计算结果得知,  
当缺口试样的缺口底部半径为  $r=0.5$  时,  $K_t$  值  
为 2.3; 若缺口底部半径  $r=0.15$ , 则  $K_t$  值为  
3.83。

试验在 MП-3Г 持久、蠕变试验机上进行,  
控温精度为  $\pm 3^\circ\text{C}$

#### 2. 试验结果 (见表 6 和图 3、4)。

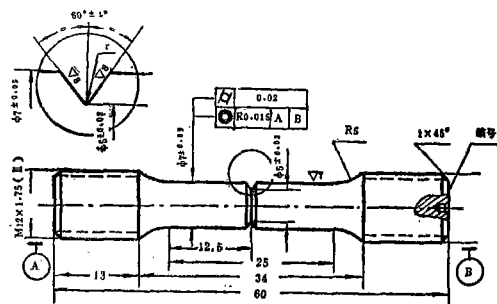
图2 缺口持久试样( $r$ 为  $0.5 \pm 0.01$  和  $0.15 \pm 0.01$  毫米)

表6 GH37 及 GH49 试验结果

材 料	试验因素 公斤/毫米 <sup>2</sup>	缺口试样底部 半径, 毫米	平均断裂时间 小时*	标准误差 S	缺口敏感系数 $K_t$
GH37	$\sigma_T^{700}=42$	光 滑	>300		
		$r_{0.5}$ 螺丝磨	112.5	61.05	$\leq 0.375$
		$r_{0.15}$ 螺丝磨	16.7	7.91	$\leq 0.056$
GH37	$\sigma_T^{800}=32$	光 滑	50.1	4.2	
		$r_{0.5}$ 螺丝磨	162.9	31.97	3.25
		$r_{0.15}$ 螺丝磨	194.2	35.2	3.88
GH49	$\sigma_T^{700}=84$	光 滑	21.83	9.31	
		$r_{0.5}$ 外园磨	152.9	25.9	7.1
		$r_{0.15}$ 外园磨	63.8	54.4	2.92
GH49	$\sigma_T^{700}=67$	光 滑	41.8	1.53	
		$r_{0.5}$ 外园磨	240.1	61.6	5.74
		$r_{0.15}$ 外园磨	74.6	42.8	1.78

\* 平均断裂时间为 3~6 根试样数据的平均值。

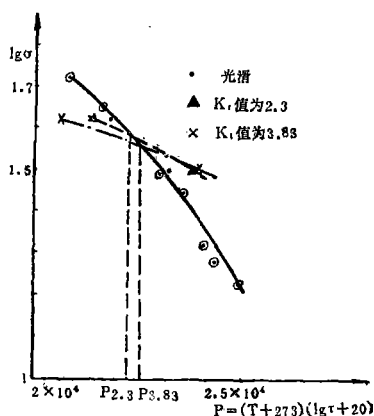


图3 GH37的Larson-Miller曲线 (○为手册上查得数据)

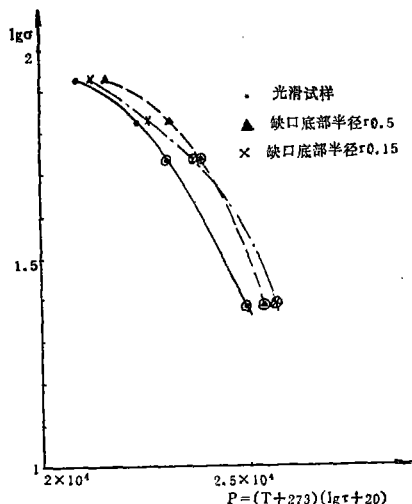


图4 GH49的Larson-Miller曲线 (○为同批炉号, 同批热处理, 同批加工的试样在170厂的试验数据)

#### 四、结果分析和讨论

由表2和3可见, 英、美采用的缺口持久试样尺寸虽多, 但根据诺谟图查得及其他理论公式计算, 不同尺寸的试样其弹性应力集中系数

表7 不同缺口底部  $K_t$  值比较

方 法	缺口底部半径毫米				
	0.125	0.175	0.250	0.500	0.750
光 弹 实 测	4.0	3.5	3.0	—	—
有 限 元 法	4.1	3.4	2.9	2.2	1.9
诺 谟 图 法	3.9	3.3	3.0	2.2	1.9

$K_t$  是相同的, 也即在一个理论应力集中系数下对材料进行拉伸持久缺口敏感性的评定。这样, 无疑大大地减少了试验量。

从崇华同志对氢脆拉伸缺口试样进行有限元和光弹实验以及诺谟图比较的结果 (见表7) 中可清楚看到, 用诺谟图查得的弹性应力集中系数  $K_t$  和用有限元计算, 以及光弹实测的结果很接近, 故用诺谟图计算值可认为近似真实, 由表1看我国HCS试样  $K_t$  值为2.3, 英、美试样  $K_t$  值为3.83, 苏联试样  $K_t$  值为4.6。

由表6和图3可见, GH37在700℃下当  $K_t$  值为2.3时  $K_r < 0.375$ ,  $K_t$  值为3.83时  $K_r < 0.056$ , 均  $< 1$ , 说明GH37在700℃有缺口敏感性, 缺口使持久寿命降低。在  $K_t$  值为2.3和3.83的试样中均反映出来, 而  $K_t$  值为3.83时缺口试样反映得更加明显。

GH37在800℃下, 当  $K_t$  值为2.3时  $K_r$  为3.25,  $K_t$  值为3.83时  $K_r$  为3.88, 均  $> 1$ , 说明GH37在800℃没有缺口敏感性, 缺口使持久寿命增加。  $K_t$  值为2.3和3.83均方差S相当, 而  $K_t$  值为3.83时的  $K_r$  值更大, 同样说明其对材料有无缺口敏感的反映比  $K_t$  值为2.3时的缺口试样更为灵敏。

由表6和图4可见, GH49在700℃下, 当  $K_t$  值为2.3时  $K_r$  为7.1,  $K_t$  值为3.83时  $K_r$  为2.92; 在760℃下, 当  $K_t$  为2.3时  $K_r$  为5.74,  $K_t$  值为3.83时  $K_r$  为1.78, 均  $> 1$ , 说明GH49在700℃和760℃均无缺口敏感, 缺口使持久寿命增加。但在  $K_t$  值为3.83时,  $K_r$  值很小, 略大于1, 从实际试验结果看, 无论是700℃或760℃有几个数据的确和光滑试样的数据相同, 在  $K_t$  值为2.3时缺口试样数据中没有此情况,

可见和GH37的结果相同, 即  $K_t$  值为3.83的缺口试样对材料有无缺口敏感性的反映比  $K_t$  值为2.3的缺口试样更灵敏。

从美国波音707客机JT-3D3B发动机图纸中查得: 三级涡轮盘榫槽半 (下转第10页)

添加0.2% Cd促进了ZL-205合金中 $\theta''$ 相的沉淀。文献指出,在150~160℃时效,Al-Cu合金中添加镉,加速 $\theta''$ 相的沉淀。由于 $\theta''$ 相的结构、比容均与基体 $\alpha$ 相不同,尺寸比G、P区大,共格畸变和弹性应力场也较形成G、P区引起的大,所以ZL-205合金强化效果显著。

由175℃时效的结果可知,添加镉的ZL-205合金的沉淀物为 $\theta''$ +部分 $\theta'$ 相,强化效果最好;不含镉的ZL-205-1合金的沉淀物仍为 $\theta''$ 相,无 $\theta'$ 相沉淀,这表明镉加速了 $\theta'$ 相的沉淀。许多作者研究了镉对Al-Cu二元合金时效过程的影响,一致认为镉可作为 $\theta'$ 相的核心,促进 $\theta'$ 相析出。Al-Cu二元合金时效硬化过程表明,当时效沉淀物为 $\theta''$ +部分 $\theta'$ 相时,硬度出现峰值,我们的试验结果与此相符。

190℃以上时效,虽然两个合金沉淀物的性质相同,但 $\theta'$ 相的大小不同,ZL 205合金中 $\theta'$ 相小些,这可能是镉作为 $\theta'$ 相的核心,生核率较高,弥散度大, $\theta'$ 相生长较慢,尺寸必然较小。有的研究者认为,Al-4%Cu合金中加入0.1% Cd,使 $\theta'$ 相的生长速度约为原来的1/5。

(上接第33页)

径为 $r_{0.5}$ ,键槽倒角 $r_{0.5}$ ,四级涡轮盘榫槽倒角半径 $r_{0.6}$ 及 $r_{0.1}$ ,一级、二级压气机盘键槽倒角为 $r_{0.3}$ ,三级压气机盘(高温)倒角为 $r_{0.3}$ ,可见发动机高温零件倒角为 $r_{0.1}$ ~ $r_{0.5}$ 。从飞机、发动机设计中经常碰到的应力集中系数为2~4,当 $K_t$ 值超过4则可修改设计来改善,如圆形孔改为椭圆形孔,增加或加大倒角R等措施来降低应力集中系数。

## 五、结 论

1. 以诺谟图解计算值为真值,则用 $K=\sqrt{d/r}$ 公式计算,结果偏高37~55%,用Timoshenko公式计算,结果偏高8~14%。

由图1可知,虽然190℃时效ZL-205合金的抗拉强度已下降,但仍比ZL-205-1合金的峰值强度高。造成这种现象的原因,除了两个合金中 $\theta''$ 和 $\theta'$ 相数量和大小不同而外,由于镉在铜中溶解度比铝中高,使含镉的ZL-205合金中 $\theta''$ 和 $\theta'$ 相的化学成分复杂。也可能是抗拉强度普遍高的因素之一。

## 结 论

1. 低于150℃4小时时效,镉对G、P区的形成和长大起抑制作用,使添加镉的ZL-205合金比不含镉的ZL-205-1合金的抗拉强度略低。

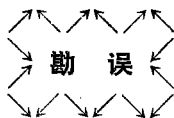
2. 高于150℃4小时时效,镉加速 $\theta''$ 和 $\theta'$ 相沉淀,并降低 $\theta'$ 相长大速度,导致ZL-205合金的抗拉强度比ZL-205-1合金高5~10公斤/毫米<sup>2</sup>。

3. 175℃4小时时效,ZL-205合金的抗拉强度达到峰值,对应的时效沉淀物为 $\theta''$ +部分 $\theta'$ 相。

4. 190℃4小时时效,ZL-205-1合金的抗拉强度出现峰值,对应的时效沉淀物也是 $\theta''$ +部分 $\theta'$ 相。(参考文献略)

2. 从GH37 700℃、800℃试验结果和GH49 700℃与760℃对比试验结果均可看出, $K_t$ 值为3.83缺口试样对缺口敏感性的反映比 $K_t$ 值为2.3的明显。

3. 根据试验结果,我们认为在金属高温缺口持久试验中 $K_t$ 值选为3.83为宜。其缺口试样具体尺寸为:缺口试样直径为 $\phi 7$ ,缺口底部试样直径为 $\phi 5$ ,缺口角度为60°,缺口底部半径(即通过试样轴线剖面上缺口底部的半径)为 $r_{0.14}$ 。



1981年第3期第34页倒数21行应更正为:

“可改用无水乙醇 石油醚(或橡胶溶剂油)混合液(按1:1体积比)”。