

第 19 篇 疲劳强度设计

主 编 徐 灏

编写人 徐 灏

审稿人 蔡春源

主要符号表

a 裂纹尺寸	q 敏性系数
a_0 初始裂纹尺寸	Q 相对应力梯度
a_c 临界裂纹尺寸	r 半径, 应力比
A 截面面积, 冲击能量	R 半径, 可靠度
b 厚度, 疲劳强度指数	s 名义应力, 子样标准离差
B 厚度	Δs 名义应力幅度
c 疲劳塑性指数	t 时间
d 直径	T 温度, 转矩, 扭矩
D 直径, 疲劳损伤	W 宽度
e 名义应变	$\bar{x}$ 子样均值
E 弹性模量	α 线胀系数, 应力强度因子系数, 生产者的风险
f 频率	α_s, α_r 理论应力集中系数
F 作用的力	β 表面系数, 减缩系数(损伤容限设计)
G 切变模量	β_1 表面加工系数
I 截面惯性矩	β_2 腐蚀系数
K 应力强度因子	β_3 表面强化系数
K' 循环强度系数	γ 置信水平
K_I 张开型应力强度因子	δ 厚度, 延伸率, 误差限度
ΔK 应力强度因子幅度	ϵ 应变, 真实应变, 总应变, 尺寸系数
K_C 断裂韧性	ϵ_s 应变幅
K_{IC} 平面应变断裂韧性	$\Delta \epsilon$ 应变幅度
K_s, K_r 有效应力集中系数	ϵ_b 弹性应变
K'_s (真实)应力集中系数(局部应力除以名义应力)	ϵ_p 塑性应变
K'_s (真实)应变集中系数	ϵ'_f 疲劳塑性系数
M 弯矩	μ 母体均值
n 安全系数, 子样容量, 每分钟转数	ν 泊松比, 变异系数
n' 循环应变硬化指数	ρ 缺口根部圆角半径
$[n]$ 许用安全系数	σ 应力, 真实应力, 母体标准离差
$n_{-1}, [n]_{-1}$ 应力比为“-1”的安全系数和许用安全系数	$[\sigma]$ 许用应力
$n_A, [n]_A$ 以冲击初度为基准的安全系数和许用安全系数(多次冲击)	$[\sigma]^T$ 在温度 T 时的许用应力
$n_b, [n]_b$ 以抗拉强度为基准的安全系数和许用安全系数	σ_{-1} 应力比为“-1”的疲劳极限
$n_N, [n]_N$ 以寿命为基准的安全系数和许用安全系数	σ_0 应力比为“0”的疲劳极限
$n_s, [n]_s$ 以屈服点为基准的安全系数和许用安全系数	σ_a 应力幅
$n_s^T, [n]_s^T$ 以温度 T 的屈服点为基准的安全系数和许用安全系数	$\Delta \sigma$ 应力幅度
$n_l^T, [n]_l^T$ 以持久极限为基准的安全系数和许用安全系数	σ_b 抗拉强度
$n_l^T, [n]_l^T$ 以蠕变极限为基准的安全系数和许用安全系数	σ'_f 疲劳强度系数
N 循环次数, 反向次数, 寿命	σ_m 平均应力
N_0 循环基数	σ_{max} 最大应力
N_p 裂纹扩展寿命	σ_{min} 最小应力
N_T 过渡寿命	σ_s 屈服点
p 单位压力	σ_s^T 温度 T 时的屈服点
P 功率, 存活率	σ_l^T 持久极限
	σ_s^T 蠕变极限
	τ 切应力
	τ_{-1} 应力比为“-1”的扭转疲劳极限
	τ_0 应力比为“0”的扭转疲劳极限
	τ_a 切应力幅
	τ_m 平均切应力
	ψ 截面收缩率
	ψ_s, ψ_r 不对称循环度系数

第1章 概述

1 疲劳术语

1) 疲劳 材料在循环应力和应变作用下,在一处或几处产生局部永久性累积损伤,经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程。

2) 高周疲劳 材料在低于其屈服强度的循环应力作用下,经 10^5 以上循环次数而产生的疲劳。

3) 低周疲劳 材料在接近或超过其屈服强度的循环应力作用下,经 $10^2 \sim 10^5$ 次塑性应变循环次数而产生的疲劳。

4) 高温疲劳 材料在高温环境下产生的蠕变与应变循环叠加的疲劳。“高温”通常是指使晶体点阵中的原子具有较大热运动能力的温度环境,它因不同的材料而异。

5) 热疲劳 温度循环变化产生的循环热应力所导致的疲劳。

6) 冲击疲劳 重复冲击载荷所导致的疲劳。

7) 接触疲劳 材料在循环接触应力作用下,产生局部永久性累积损伤,经一定的循环次数后,接触表面产生麻点、浅层或深层剥落的过程。

8) 腐蚀疲劳 腐蚀环境和循环应力(应变)的复合作用所导致的疲劳。

9) 疲劳载荷 加于试样或服役构件所经受的周期性或非周期性的动载荷(也称为循环载荷)。

10) 恒幅载荷 疲劳载荷中,所有峰值载荷均相等和所有谷值载荷均相等的载荷。

11) 变幅载荷 疲劳载荷中,所有峰值载荷不等,或所有谷值载荷不等,或两者均不等的载荷(也称为不规则载荷或谱载荷)。

12) 随机载荷 疲劳载荷中,峰值载荷和谷值载荷及其序列是随机出现的一种变幅变频载荷。

13) 最大载荷 疲劳载荷循环中具有最大代数值的载荷。拉载荷为正,压载荷为负。

14) 最小载荷 疲劳载荷循环中具有最小代数值的载荷。拉载荷为正,压载荷为负。

15) 循环 恒幅疲劳载荷中,载荷随时间作周期性变化的一个完整过程。

16) 反向 疲劳载荷中,载荷作为时间的函数的一阶导数改变符号处出现反向。在恒幅循环载荷中,反向次数为循环次数的两倍。

17) 保持时间 疲劳试验中,控制的力学试验变

量,例如载荷、应变、位移,在循环中保持恒定的时间。

18) 疲劳寿命 材料疲劳失效时所经受的规定应力或应变的循环次数。

19) 疲劳极限 指定循环基数下的中值疲劳强度。循环基数一般取 10^7 或更高一些。

20) 理论应力集中系数 按弹性理论计算所得缺口或其他应力集中源的最大应力与相应的标称应力的比值。

21) 有效应力集中系数 在相同条件和在 N 次循环的相同存活率下,无应力集中试样的疲劳强度与有应力集中试样的疲劳强度之比(也称为疲劳缺口系数)。

22) 滞后回线 一次循环中的应力-应变回路。

23) 裂纹尺寸 裂纹的主平面尺寸的线性测量值。这种测量通常用于应力和位移场定量描述的计算。

24) 物理裂纹尺寸 从参考平面至观测的裂纹前缘的距离。此距离可代表沿裂纹前缘几次测量的平均值。参考平面取决于试样形状,通常取边界,或者取包含加载线或试样(或平板)中心线的平面作为参考平面。

25) 原始裂纹尺寸 试验开始时的物理裂纹尺寸。

26) 有效裂纹尺寸 考虑到裂纹尖端塑性变形影响而增大了的物理裂纹尺寸。

27) 裂纹长度 在表面裂纹拉伸试样中,在试样表面上裂纹前缘与试样表面交会的两点之间所测量的距离。裂纹长度是试样宽度的一部分。

28) 裂纹深度 在表面裂纹拉伸试样中,从含裂纹平板表面至裂纹前缘透入材料最深点的垂直距离。

29) 最大应力强度因子 $K_{\max}$ 一次循环中具有最大代数值的应力强度因子,此值对应于最大载荷,并随裂纹长度的增加而变化。

30) 最小应力强度因子 $K_{\min}$ 一次循环中具有最小代数值的应力强度因子。当载荷比大于零时,此值对应于最小载荷,当载荷比等于或小于零时,此值取为零。

31) 应力强度因子幅度 ΔK 一次循环中的最大与最小应力强度因子的代数差,即 $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ 。

疲劳裂纹扩展速度 恒幅疲劳载荷的裂纹扩展速度,以循环一次的疲劳裂纹扩展量表示。

32) 疲劳裂纹扩展门槛值 已存在疲劳裂纹不发生扩展的应力强度因子值,在平面应变条件下,以

$10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ mm/c}$ 所对应的应力强度因子幅度 ΔK 值表示; 又称界限应力强度因子幅度。

33) 累积循环次数 N 疲劳中的规定特征循环数, 即试样在其承载历程中的任一时间内所累积的具有规定特性的循环数。

2 循环应力与循环应变

2.1 循环应力

随时间周期性变化的应力。最简单的循环应力为恒幅循环应力, 其四种不同的应力变化规律如图 19.1-1 所示, 图中 σ 为正应力, t 为时间。各应力分量为 $\sigma_{\max}$ ——应力循环中具有最大代数值的应力; $\sigma_{\min}$ ——应力循环中具有最小代数值的应力; σ_m ——应力循环中最大应力和最小应力的代数平均值; σ_a ——应力循环中最大应力和最小应力代数差的一半。规定拉应力为正, 压应力为负。平均应力 σ_m 、应力幅 σ_a 、与最大应力 $\sigma_{\max}$ 、最小应力 $\sigma_{\min}$ 之间的关系有

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (19.1-1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (19.1-2)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (19.1-3)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (19.1-4)$$

应力每一周期性变化称为一个应力循环。定义应力比 r 为

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (19.1-5)$$

对于对称循环, $r = -1$; 脉动循环, $r = 0$; 对于静应力可以看作应力幅为零的循环应力, 此时 $r = +1$ 。任何一个应力循环的应力比都可以在 $-1 \leq r \leq +1$ 范围内取值。

一种循环应力状态, 一般可用 $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 、 σ_m 、 σ_a 和 r 五个参数中的任意两个来确定。

等幅循环应力 其参数不随时间改变的循环应力。

变幅循环应力 其参数随时间改变的循环应力。

如作用的应力是切应力(例如扭应力)时, 各应力分量之间的关系有

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} \quad (19.1-6)$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} \quad (19.1-7)$$

$$\tau_{\max} = \tau_m + \tau_a \quad (19.1-8)$$

$$\tau_{\min} = \tau_m - \tau_a \quad (19.1-9)$$

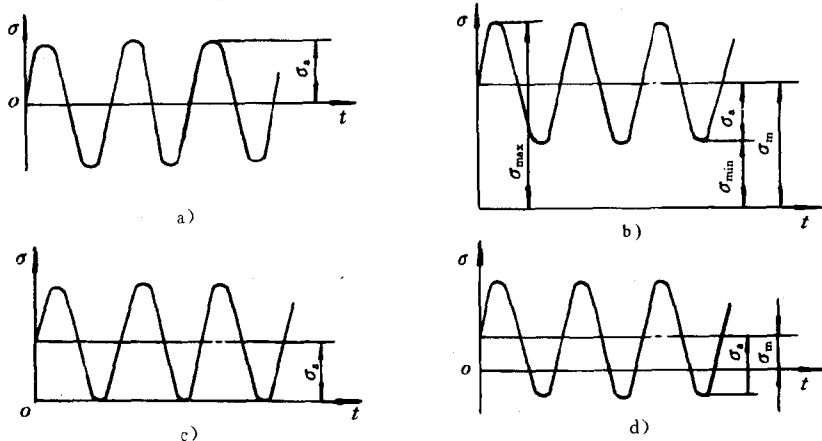


图 19.1-1 恒幅循环应力的种类

a) 对称拉压 b) 脉动拉伸 c) 波动拉伸 d) 波动拉压

2.2 循环应变

从实验所得的应力-寿命曲线中, 当循环加载的应力水平较低时, 疲劳的整个过程中弹性应变起主导作用。当应力水平逐渐提高, 塑性应变逐渐成为疲劳破坏的主导因素, 使应力-寿命曲线随应力水平的提高趋于平坦(图 19.1-2a)。即此时用应力很难描述实际寿命的变化。如将纵坐标 σ 用应变 ϵ 来代替, 则由疲劳试验可得一条光滑的 ϵ - N 曲线(图 19.1-2b)。从弹性应变为

主导过渡到塑性应变为主导, 必然存在一个过渡寿命点。

3 无限寿命设计与有限寿命设计

一般的机械零部件是在较低应力水平下工作的, 应用 σ - N 曲线。当纵轴的应力 σ 坐标和横轴 N 的坐标都取对数时, σ - N 曲线为由交点为 P 的两直线段组成的折线(图 19.1-3)。左边的一线段为斜直线, 右边的一线段为平行于横轴的直线。对于钢材, 两直线段的交

点约为 $N_0=10^7$ 附近。这样,根据左边斜线所进行的设计为“有限寿命设计”;根据右边与横轴平行的直线所进行的设计为“无限寿命设计”。 N_0 称为循环基数。

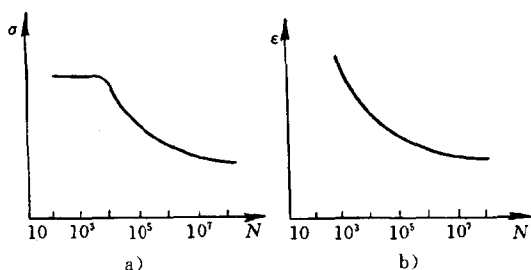


图 19.1-2 用 ϵ 代替 σ 的 $S-N$ 曲线

a) $\sigma-N$ 曲线的失效 b) $\epsilon-N$ 曲线

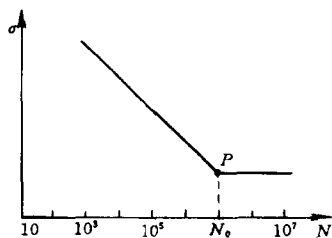


图 19.1-3 双对数坐标的 $\sigma-N$ 曲线

4 疲劳的分类

疲劳一般是指室温下空气中承受循环载荷的疲劳。但在实际工作中,常遇到不同于上述的载荷条件、环境温度和介质情况,发生不同类型的疲劳。疲劳的分类见表 19.1-1。

表 19.1-1 疲劳的分类

名 称	说 明	举 例
按疲劳过程中的应变类型来分	高周疲劳 是指低应力(低于材料屈服点)高寿命(循环周次一般大于 10^5)的疲劳。是最常见的一种疲劳破坏	如轴、弹簧、螺栓联接等的疲劳破坏
	低周疲劳 是指高应力(局部应力超过屈服点)低寿命(循环周次在 $10^2 \sim 10^5$ 以下)低频加载的疲劳。由于循环应变在疲劳中起主导作用,故也称为塑性疲劳或应变疲劳	如经常起动-停止的高压容器、工业汽轮机转子、飞机起落架等
按载荷条件来分	随机疲劳 应力幅和频率都随时间随机变化的疲劳	如汽车底盘、半轴、悬挂系统等零件
	冲击疲劳 小能量多次冲击引起的疲劳	如内燃机阀杆等
	接触疲劳 是指零件接触表面在接触压力循环作用下出现麻点、剥落或表层压碎剥落,从而造成零件失效的疲劳	如齿轮传动、滚动轴承、车轮等
	微动磨损疲劳 当两零件的表面相接触,并作小幅度的往复相对运动时,在接触表面上产生的疲劳,经过附着、氧化、疲劳三个阶段,是机械过程和化学过程相综合的结果	如铆钉联接件、螺栓联接件、销钉联接件、紧配合件、键和花键联接等
按载荷条件来分	声疲劳 由气体动力噪声、结构噪声或电磁噪声等噪声使结构件产生的疲劳。并不是所有的噪声都能使结构件产生声疲劳,只有当作为激振力的噪声使结构件产生的应力-应变响应足够大,足以对结构的材料造成疲劳损伤时才可能	如火箭和飞机的涡轮发动机作为噪声源,使飞行器和机翼表面产生高声压水平的噪声场,足以对其结构的局部危险区造成声疲劳
按环境温度来分	高温疲劳 在高温环境下零件承受循环载荷发生的疲劳。高温是指约在 $0.5T_m$ 或再结晶温度以上, T_m 为以绝对温度表示的金属熔点。高温疲劳是疲劳与蠕变共同作用的结果	如燃气轮机的叶片由机械振动发生的高温高周疲劳;燃气轮机转子由装置的起动与停车而发生的高温低周疲劳
	低温疲劳 在低于室温环境下零件承受循环应力作用下发生的疲劳	如在寒冷地区露天放置的机械或结构产生的疲劳
	热疲劳 由于温度的循环变化,而引起应变的循环变化,由此产生的疲劳	锅炉水冷壁管子因汽水分层现象使管子发生的疲劳
按有无腐蚀来分	腐蚀疲劳 在腐蚀介质(如酸、碱、海水、淡水、活性气体等)和循环载荷联合作用下产生的疲劳	如化工机械、石油机械的某些零部件,在酸、碱等液体和气体中工作;水轮机转轮叶片在江河水中工作等

第2章 疲劳试验

根据试验对象的不同,疲劳试验可分为三类:①整机或大部件的试验;②零部件的试验;③标准试样的试验。由于整机或大部件的疲劳试验耗费太大,所以只能抽取很少的样品来进行,如飞机、汽车的整机试验。零部件,特别是某些重要零部件,如汽车曲轴等,可由专业部门进行疲劳试验。一般说来,零部件的疲劳试验,不如整机试验更接近实际工作情况,但比用标准试样试验接近实际条件,所以重要零部件的疲劳试验,还占有相当重要的地位。但在零部件的疲劳试验中,要消耗大量的零部件样品,不同的零部件设计方案,要制作不同结构的样品,这就显得很不方便。所以疲劳试验中,多用结构简单、造价比较低廉的标准试样来进行试验。

对于不同工作条件下的零部件,应该正确地选择能够表征这些零部件的疲劳特性指标进行疲劳试验。因此除了最普通的在室温空气中进行的疲劳试验(又称常规疲劳试验)外,还有低周疲劳试验、腐蚀疲劳试验、高温疲劳试验、低温疲劳试验、热疲劳试验、接触疲劳试验和冲击疲劳试验等。

1 试样及其制备

1.1 试样

根据施加载荷的类型,试样形状可分为弯曲试样、轴向加载试样和扭转试样等。同时它们又都有光滑试样和缺口试样之分。

图 19.2-1~3 为旋转弯曲光滑试样以及弯矩 M 及名义应力 s 图。图 19.2-1 为圆柱形试样,图 19.2-2 为漏斗形试样,图 19.2-3 为圆锥形试样。图 19.2-4 为国标(GB/T4337—1984)推荐的光滑圆柱形标准试样,其尺寸见表 19.2-1。

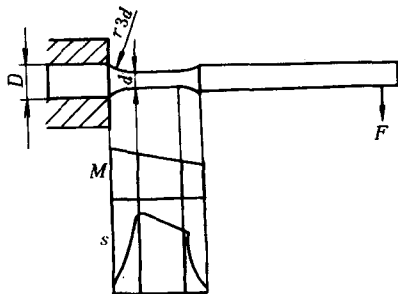


图 19.2-1 光滑圆柱形旋转弯曲试样

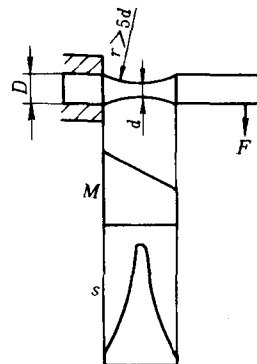


图 19.2-2 光滑漏斗形旋转弯曲试样

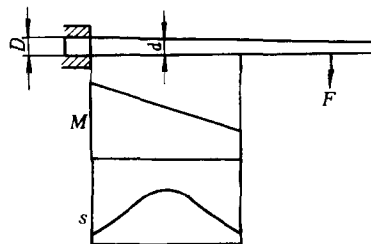


图 19.2-3 光滑圆锥形旋转弯曲试样

表 19.2-1 旋转弯曲光滑圆柱形试样尺寸

d /mm	d 的公差 /mm	r /mm	L /mm	D^2/d^2
6 7.5 9.5	± 0.01	$\geq 3d$	40	> 1.5

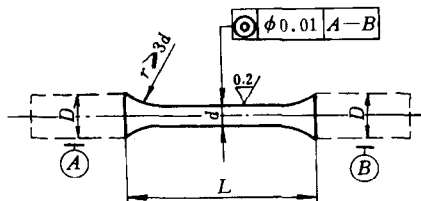


图 19.2-4 光滑圆柱形标准旋转弯曲试样

图 19.2-5 为光滑悬臂式平面弯曲试样。这种试样一般是矩形截面,试样试验部分做成等强度,即沿试样轴线方向应力是不变的。载荷加在由试验部分斜边延线所形成的三角形顶点上。

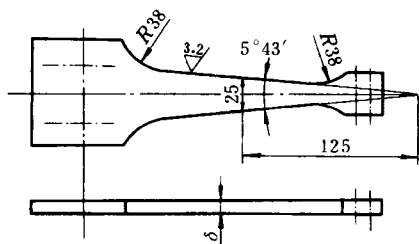


图 19.2-5 悬臂式平面弯曲试样

国标(GB/T3075—1982)推荐的轴向加载光滑试样如图 19.2-6、7 所示。图 19.2-6 为圆形截面试样,图 19.2-7 为矩形截面试样。试样的尺寸列于表 19.2-2 中,表中 a 、 b 分别为截面的厚度和宽度。

轴向加载的试样,当进行具有循环压缩应力试验时,应使 $L_1 < 4d$ 或 $L_1 < 4b$ 。在采取了特殊措施的情况下,也可进行 $ab < 30\text{mm}^2$ 的矩形横截面试样的试验。

图 19.2-8 为扭转光滑试样,试样的夹持部分有防止扭转疲劳试验时试样滑动的平台。

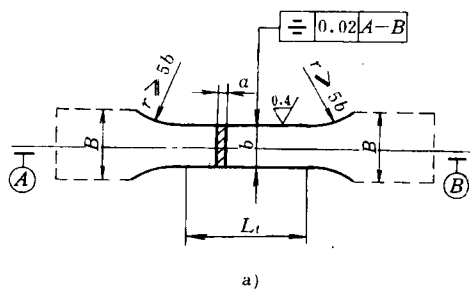


图 19.2-7 矩形截面轴向加载光滑试样

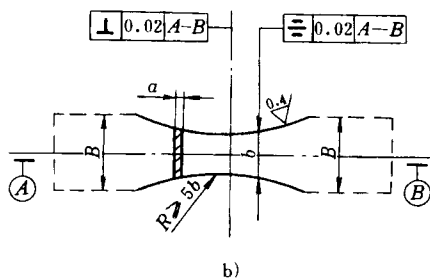


图 19.2-8 扭转光滑试样

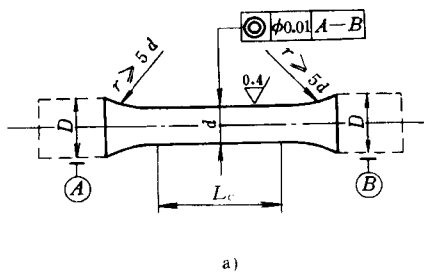


图 19.2-6 圆形截面轴向加载光滑试样

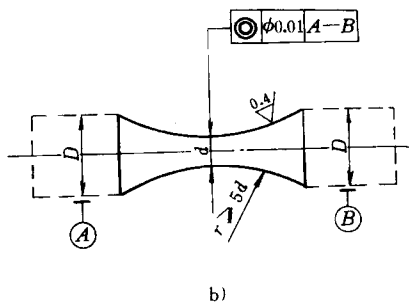


表 19.2-2 轴向加载光滑试样尺寸

d / mm		ab / mm^2	b / mm		r / mm	L_1 / mm	D^2/d^2 或 B/b
标称尺寸	公差	面积	标称尺寸	公差			
5	± 0.02	≥ 30	$(2 \sim 6)a$	± 0.02	$\geq 5d$	$> 3d$	≥ 1.5
8					或	或	
10					$\geq 5b$	$> 3b$	

由于缺口疲劳试验目的和要求的特殊性,对缺口试样的设计不予限制,图 19.2-9~12 为几种缺口试样的实例。

图 19.2-9 为旋转弯曲缺口试样,图中 ρ 为缺口半径,理论应力集中系数 $\alpha_s=1.86$ 。图 19.2-10 为轴向加载矩形横截面 U 形缺口试样, $\rho/B=0.05$, $b/B=0.7$, $\alpha_s=3$ 。图 19.2-11 为轴向加载圆形横截面 V 形缺口试样, $\alpha_s=3$ 。图 19.2-12 为扭转缺口试样, $\alpha_s=2$ 或 3。

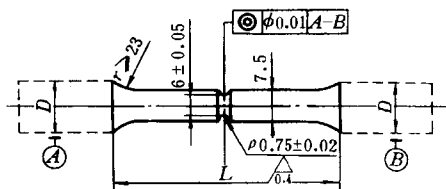


图 19.2-9 旋转弯曲缺口试样 ($\alpha_s=1.86$)

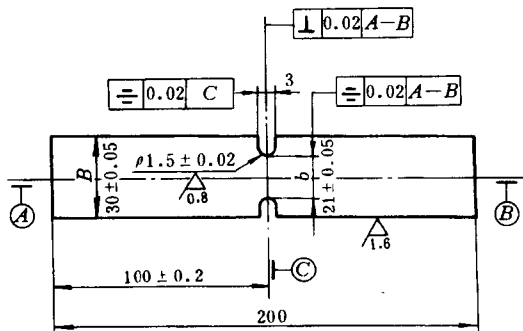


图 19.2-10 轴向加载矩形截面 U 形缺口试样 ($\alpha_s=3$)

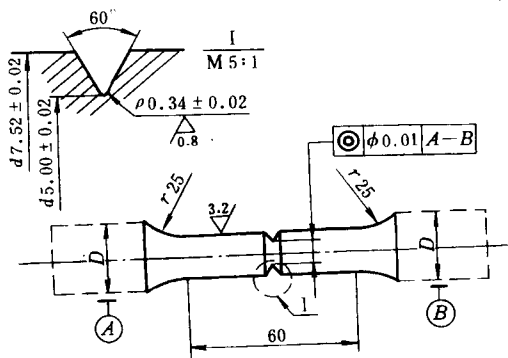
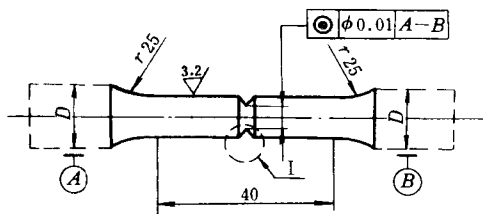


图 19.2-11 轴向加载圆形截面 V 形缺口试样 ($\alpha_s=3$)

1.2 试样制备

试样的制备对所测定材料的疲劳性能有直接的影响。从切取毛坯到进行试验,要经过取样、机械加工、热处理、尺寸测量、探伤检验及贮存等工序,每个环节都可能影响试样的疲劳性能,因此都必须十分注意。

1.2.1 取样

取样应按下面原则,即

1) 应在具有代表性的位置切取制备试样的试样料。例如对截面尺寸小于 60mm 的圆钢、方钢和六角钢,应在中心切取拉力及冲击样坯;截面尺寸大于 60mm 时,则在直径或对角线距外端 $\frac{1}{4}$ 处切取,以保证所切取的试样料具有代表性。

2) 应在最终状态的材料上(回火)切取试样料,用一组试样进行一个试验。

3) 一组试样应由同一炉材料制取,其尺寸和状态(回火)应当相同。

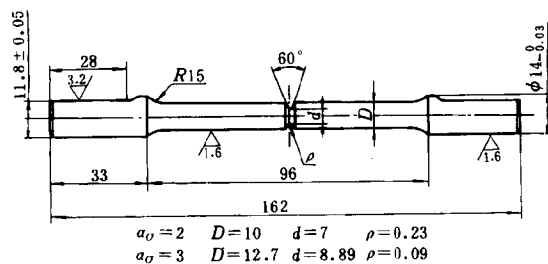


图 19.2-12 扭转缺口试样 ($\alpha_s=2, 3$)

4) 根据型钢种类,考虑轧制方向切取试样料。例如,应从圆钢和方钢端部沿轧制方向切取弯曲试样料;应从工字钢和槽钢腰高 $\frac{1}{4}$ 处沿轧制方向切取矩形拉力、弯曲和冲击试样料;应从钢板端部垂直于轧制方向切取拉力、弯曲及冲击试样料等。

1.2.2 机械加工

试样进行机械加工时,应使试样表面产生的残余

应力和加工硬化尽量减至最小。在机械加工过程中,应防止过热或其他因素的影响而改材料的性能,力求试样表面质量均匀一致。在车削和磨削过程中,应适当地逐次减小切削深度和走刀量。磨削时,应提供足够的冷却液,充分冷却试样。缺口试样的加工与光滑试样的基本相同,只是缺口底部的圆角半径及其表面更应仔细加工。

国标(GB/T4337—1984)推荐的金属旋转弯曲疲劳试样加工工艺如下。

(1)车削

1)车削粗加工 将试样毛坯直径从 $x+0.5\text{mm}$ (x 等于试样直径 d 加上适当的表面精加工余量)粗车至 $x+0.5\text{mm}$ 时,推荐采用如下逐次递减车削深度,即

1mm, 0.5mm, 0.25mm。

2)车削精加工 将试样从 $x+0.5\text{mm}$ 精车至 x 时,应进一步递减车削深度,推荐采用如下逐次递减车削深度,即

0.125mm, 0.075mm, 0.05mm。

推荐走刀量为每转0.06mm。

(2)磨削精加工

磨削用来精加工由于热处理而强度提高,以致不易车削精加工的材料。

1)横向精磨 将试样直径从 $x+0.5\text{mm}$ 横向精磨至 $x+0.05\text{mm}$ 时,推荐采用如下递减磨削深度,即

0.03mm, 0.015mm。

用成型砂轮横磨漏斗形试样时,砂轮和试样应以相同的方向旋转。

2)纵向精磨 将试样直径从 $x+0.05\text{mm}$ 纵向精磨至 $x\text{mm}$ 时,推荐磨削深度为0.005mm。

多孔砂轮适于用来进行钢的纵向磨削。

纵磨时,建议砂轮每次横向进给时的速度控制在0.02mm/s。

磨削时,应提供足够的高质量冷却液,如水基溶液,以期充分冷却试样。

(3)表面精加工

将试样直径车削或磨削至 $x\text{mm}$ 后,其表面精加工推荐采用逐次变细的砂纸或砂布,沿试样纵向进行机械抛光(尽量避免手工抛光),直至试样直径达规定值并获得要求的表面粗糙度。

用砂纸抛光时,压向试样表面的力应尽可能小,并应尽可能抛掉表面硬化和残余应力层。

(4)进行不同材料的比较试验

推荐采用电解抛光来进行试样表面精加工,电解抛掉一薄层。

(5)缺口试样的加工

缺口试样的加工工艺与光滑试样的基本相同。

1)粗车缺口,留余量0.3~0.5mm。

2)根据材料强度水平,对缺口进行车削或磨削精加工,其精加工工艺参考本节a)和b)。

1.2.3 热处理

当材料需经热处理后试验时,一般先经热处理再加工成试样。如热处理后会材料加工性能变差,可将材料先加工成试样毛坯,热处理后再进行精加工。热处理时应防止表面层变质和变形,且不允许对试样进行矫直。缺口试样的缺口应在热处理后加工。

1.2.4 测量、探伤与贮存

测量试样尺寸时,应防止损伤试样表面。因此,最好使用非接触式测量的工具,如工具显微镜等。

已经制备好的试样,应进行表面质量的检验,有时需要检验内部质量,如X光探伤等。

检验合格的试样如需贮存一段时间后做试验,则应妥善保护,可涂凡士林,放入专用袋内,确保贮存期间表面完好无损。试验前,应用适当方法重新检验试样表面,不允许有锈蚀或伤痕。

2 试验方法

在室温和空气中进行的高周疲劳试验,根据试验的目的和要求不同,通常用的有常规疲劳试验法、成组试验法和升降法三种。为加速疲劳试验,还有疲劳极限的快速试验法。

2.1 常规疲劳试验法

常规疲劳试验法又称单点试验法。这种方法是在每个应力水平下只试验一个试样。它主要用于试样个数有限,生产任务紧迫,或者为了节省经费,不宜进行大量试验时,用来测定材料或零件的S-N曲线。它除了直接为设计部门提供疲劳性能数据外,还可作为一些特殊疲劳试验的预备性试验。

常规疲劳试验中至少需要10个材料和尺寸相同的试样。其中,一个试样作为静载试验用,1~2个试样作为备品,其余7~8个试样作疲劳试验用。

如果试验是在旋转弯曲疲劳试验机上进行,则试样受到对称循环弯曲应力,试验直到试样断裂为止,从试验机的计数器上可读得试样断裂时的循环次数。

试验中需要将应力水平分级。应力水平至少分为7级。高应力水平间隔可取得大一些,随着应力水平的降低,间隔越来越小。最高应力水平可通过预试确定。对于光滑试验,预试的最大应力可参照表19.2-3,表中 σ_b 为材料的强度极限。

对每个试样施加不同的载荷,试样就受到不同

的弯曲应力 σ , 可得到相应的循环次数 N 。以应力 σ 为纵坐标, 试样到达断裂的循环数 N 为横坐标, 根据试验结果, 就可绘出 σ - N 曲线。同理, 拉-压疲劳试验时, 可绘得拉-压的 σ - N 曲线; 扭转疲劳试验时, 可绘得扭转的 τ - N 曲线。这些疲劳曲线和以应变表示的 ϵ - N 曲线, 统称为 S - N 曲线。

表 19.2-3 光滑试样的预试应力 $\sigma_{\max}$

试 样	加载方式	应力比 r	预试应力 $\sigma_{\max}$
光滑圆试样	旋转弯曲	-1	$(0.6 \sim 0.7)\sigma_b$
光滑圆试样	平面弯曲	-1	$(0.6 \sim 0.7)\sigma_b$
光滑圆试样	轴向加载	-1	$(0.6 \sim 0.7)\sigma_b$
光滑板试样	轴向加载	-1	$(0.6 \sim 0.7)\sigma_b$
光滑板试样	轴向加载	0.1	$(0.6 \sim 0.8)\sigma_b$
光滑圆试样	扭转	-1	$\tau = (0.45 \sim 0.55)\sigma_b$

在给定的应力比 r 的条件下, 应力水平可用最大应力 $\sigma_{\max}$ 来表示。对于一般钢材, 如果在某一应力水平下经受 10^7 次循环仍不破坏, 则它可以认为能承受无限次的循环而不会破坏。所以把 10^7 次循环数所对应的最大应力叫做“疲劳极限”。但对铝、镁合金等材料, 在经受 10^7 次循环后仍未发生破坏, 因为把循环数为 10^7 所对应的最大应力为“条件疲劳极限”, 疲劳极限和条件疲劳极限以符号 σ_r 表示, 下标“ r ”表示应力比为 r 。例如在对称循环下的疲劳极限的符号为 σ_{-1} , 对于切应力为 τ_{-1} 。循环数 10^7 称为“循环基数”。

测定疲劳极限或 10^7 时的条件疲劳极限时, 可按照下述方法进行。当试样超过预定循环 10^7 而未发生破坏时, 称为“越出”。在应力水平由高到低的试验过程中, 假定第 6 根试样在应力 σ_6 作用下, 未及 10^7 循环发生了破坏, 而依次的第 7 根试样在应力 σ_7 作用下经 10^7 循环越出, 并且两个应力差 $(\sigma_6 - \sigma_7)$ 不超过 σ_7 的 5%, 则 σ_6 与 σ_7 的平均值就是疲劳极限(或条件疲劳极限) σ_r , 即

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_6 + \sigma_7)$$

如果差数 $(\sigma_6 - \sigma_7)$ 大于 σ_7 的 5%, 那末还需取第 8 根试样进行试验, 即取 σ_8 等于 σ_6 和 σ_7 的平均值, 即 $\sigma_8 = \frac{1}{2}(\sigma_6 + \sigma_7)$ 。试验后可能有两种情况:

第一种情况 若第 8 根试样在 σ_8 作用下, 经 10^7 循环仍然越出(见图 19.2-13a), 并且差数 $(\sigma_6 - \sigma_8)$ 小于 σ_8 的 5%, 则可认为疲劳极限或条件疲劳极限介于 σ_6 和 σ_8 之间。

第二种情况 若第 8 根试样在 σ_8 作用下, 未达到 10^7 循环发生破坏(见图 19.2-13b), 并且差数 $(\sigma_8 - \sigma_7)$ 小于 σ_7 的 5%, 则可认为疲劳极限或条件疲劳极限介

于 σ_8 与 σ_7 之间。

测定疲劳极限时, 要求至少有两根试样达到循环基数而不破坏, 以保证试验结果的可靠性。根据在各个应力水平下测得的疲劳寿命 N 和疲劳极限, 即可绘制出 S - N 曲线。

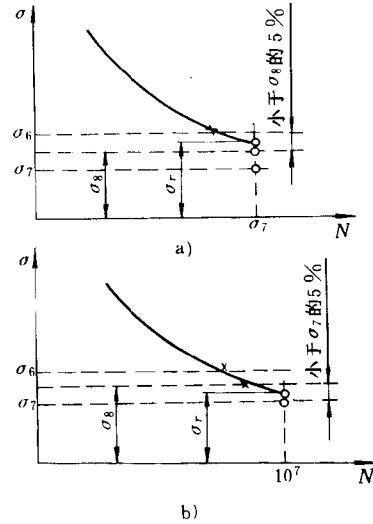


图 19.2-13 确定疲劳极限

×—破坏 ○—越出(未破坏)

2.2 成组试验法

由于疲劳寿命的离散性较大, 按常规疲劳试验方法, 在每个应力水平下只用一个试样所测定的 S - N 曲线, 精度较差, 只能用于准确度要求不高的疲劳设计上。对于疲劳强度的可靠性设计, 需要给出 P - S - N 曲线, 此时, 在寿命小于 10^7 循环的 S - N 曲线, 需要进行成组试验法。即在每个应力水平上使用一组试样来进行试验。

为了要选取适当的每组试样个数, 写出母体均值 μ 的区间估计式为

$$\bar{x} - t_{\alpha} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

式中 $\bar{x}$ ——子样均值;

s ——子样标准差;

n ——子样容量。

当给出置信水平 $\gamma = 1 - \alpha$ 及自由度 $\nu = n - 1$ 时, t_{α} 可由本书表 15.2-6 的 t 分布值查得。

将上面不等式移项, 可以得到子样均值 $\bar{x}$ 的误差估计式

$$-\frac{s}{\bar{x}} \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}} < \frac{\mu - \bar{x}}{\bar{x}} < \frac{s}{\bar{x}} \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}}$$

式中 $\frac{\mu - \bar{x}}{\bar{x}}$ ——子样均值的相对误差。

这个估计式表明:用子样均值作为母体均值估计量时,有 γ 的把握误差位于置信区间 $\left(-\frac{s}{\bar{x}} \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}}; \frac{s}{\bar{x}} \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}}\right)$ 以内。如用 δ 表示误差限度,即

$$\delta = \frac{st_{\alpha}}{\bar{x} \sqrt{n}} \quad (19.2-1)$$

设选取 $\gamma=95\%$, 将由一组几个观测值求得的 $\bar{x}$ 和 s 代入式(19.2-1),即可计算出 δ 值。即有 95% 的把握说, $\bar{x}$ 的误差不超过 δ 。将式(19.2-1)写成下式,即

$$\frac{s}{\bar{x}} = \frac{\delta \sqrt{n}}{t_{\alpha}} \quad (19.2-2)$$

式中, $s/\bar{x}$ 称为“变异系数”。

如给定置信水平 γ 和误差限度 δ , 则变异系数 $s/\bar{x}$ 可看成试样个数 n 的函数。根据一般工程误差允许范围,选取 $\delta=5\%$, 由式(19.2-2)可画出 $s/\bar{x}$ 与 n 的关系曲线,如图 19.2-14 所示。

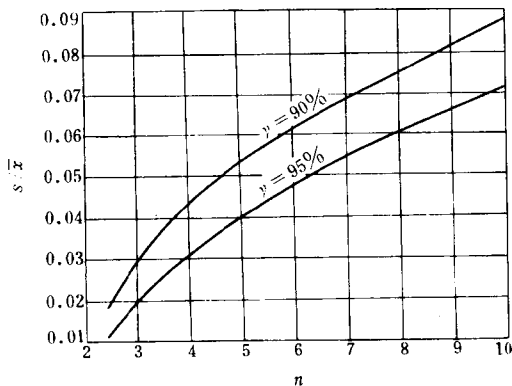


图 19.2-14 子样容量的选择曲线

利用图 19.2-14 的曲线,即可根据试验结果判定所选取的子样容量是否适当。例如,在某一应力水平下,选用 5 个试样进行试验,依据这 5 个试验数据,可以计算出变异系数 $s/\bar{x}$ 。再利用图中曲线,如与 $s/\bar{x}$ 对应的 n 值介于 4 和 5 之间,则表示所选取的试样个数适当。如对应的 n 值大于 5,则表示选取的试样个数不足。为使误差不超过 5%,还必须增加试样个数。对于各级应力水平,都需要这样来确定适当的试样个数,以达到具有相同精度的要求。

参考文献[2]指出,在做 $P-S-N$ 曲线时,为保证一定的精度每级试样数不应小于 6 个。为了提高精度,应采用较多的试样,但当每级试样数超过 14 时,精度提高已不显著。故每级试样数一般建议 6~10 个,较多的试样数,用于应力水平较低的组。对于仅测定 $S-N$ 曲线,每组试样数工程上一般为 3~5 个。

用上述方法可得到各级应力水平下的对数疲劳寿命,并绘制出 $S-N$ 曲线。

绘制 $S-N$ 曲线一般采用下述两种方法:

1) 逐点描述法 是以应力 σ 为纵坐标,以对数疲劳寿命 X 为横坐标,将各数据点画在单对数坐标纸上,然后用曲线板将它们连成光滑曲线,见图 19.2-15。在连线过程中,应力求做到使曲线均匀地通过各数据点,曲线两边的数据点与曲线的偏离应大致相等。

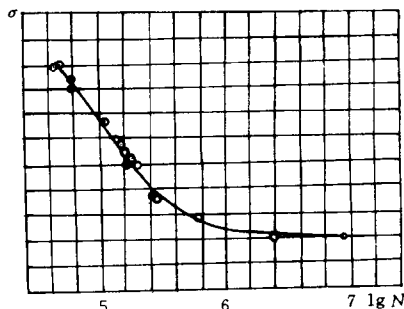


图 19.2-15 用逐点描述法绘制 $S-N$ 曲线

2) 直线拟合法 根据 $S-N$ 曲线在双对数坐标上为直线段的假设,在用直线拟合数据点时,可以采用最小二乘法确定出最佳的拟合直线。用最小二乘法得出的拟合方程为

$$\lg N = a + b \lg \sigma$$

式中 a, b 是待定常数,由下式确定

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \lg \sigma_i \lg N_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \lg \sigma_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \lg N_i \right)}{\sum_{i=1}^n (\lg \sigma_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \lg \sigma_i \right)^2} \quad (19.2-3)$$

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n \lg \sigma_i \quad (19.2-4)$$

式中 n ——数据点个数或应力水平数;

σ_i ——第 i 个数据点的最大应力;

N_i ——第 i 个数据点的疲劳寿命。

$S-N$ 曲线是否可以用直线拟合,可以用相关系数 r 来检验(r 由数据点的线性拟合时给出)。 r 的绝对值愈接近于 1,说明 $\lg \sigma$ 与 $\lg N$ 的线性相关性愈好。根据子样容量,可从 19.2-4 相关系数表中查得其起码值 $r_{\min}$ 。当数据点线性拟合得出的 $|r|$ 大于 $r_{\min}$ 时,用直线拟合各数据点才有意义。

2.3 升降法试验

升降法试验是在指定疲劳寿命下测定应力,主要用于长寿命区,它可以比较精确地测定出疲劳极限。在指定寿命下,如 $N=10^7$ 次,试验从高于疲劳极限的应力水平开始(见图 19.2-15),在应力 σ_0 作用下试验第 1 根试样,该试样在未达到指定寿命 10^7 之前发生了破坏,于是,第 2 根试样就在低一级的应力 σ_1 下进行试

验。一直试验到第 4 根试样时,因该试样在 σ_3 作用下经 10^7 循环没有破坏(越出),故依次进行第 5 根试样就在高一级的应力 σ_2 下进行试验。按照这规定:凡前一根试样不到 10^7 循环破坏,则随后的一次试验就要在低一级的应力下进行;凡前一根试样越出,则随后的一次试验就要在高一级的应力下进行,直到完成全部试验为止。各相邻级应力之差 $\Delta\sigma$ 称为“应力增量”。在整个过程中,应力增量保持不变。

表 19.2-4 相关系数检验表

$n-2$	$r_{\min}$	$n-2$	$r_{\min}$	$n-2$	$r_{\min}$
1	0.997	14	0.497	27	0.367
2	0.950	15	0.482	28	0.361
3	0.878	16	0.468	29	0.355
4	0.811	17	0.456	30	0.349
5	0.754	18	0.444	35	0.325
6	0.707	19	0.433	40	0.304
7	0.666	20	0.423	45	0.288
8	0.632	21	0.413	50	0.273
9	0.602	22	0.404	60	0.250
10	0.576	23	0.396	70	0.232
11	0.553	24	0.388	80	0.217
12	0.532	25	0.381	90	0.205
13	0.514	26	0.374	100	0.195

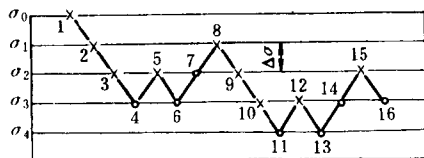


图 19.2-16 升降法试验

指定寿命 $N=10^7$ ×—破坏 ○—越出

图 19.2-16 表示有 16 个试样的升降法试验结果。处理试验结果时,在第一对出现相反结果以前的数据均舍弃。如图 19.2-16 中的点 3 和点 4 是第一对出现的相反结果,因此,数据点 1 和点 2 均舍弃。而第一次出现的相反结果点 3 和点 4 的应力平均值 $(\sigma_2 + \sigma_3)/2$,就是常规疲劳试验法给出的疲劳极限值。同理,第二次出现的相反结果点 5 和点 6 的应力平均值,也相当于常规疲劳试验法给出的疲劳极限。如此,把所有邻近出现相反结果的数据点都配成对子:7 和 8、10 和 11、12 和 13、15 和 16。最后,对于不能直接配对的数据点 9 和点 14,也可以凑成一对。总计共有七个对子。由这七对应力求得的七个疲劳极限的平均值,即可作为疲劳极限的精确值 σ_r ,即

$$\sigma_r = \frac{1}{7} \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_5 + \sigma_6}{2} + \frac{\sigma_7 + \sigma_8}{2} + \frac{\sigma_{10} + \sigma_{11}}{2} + \frac{\sigma_{12} + \sigma_{13}}{2} + \frac{\sigma_{15} + \sigma_{16}}{2} + \frac{\sigma_9 + \sigma_{14}}{2} \right)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{14} (\sigma_1 + 5\sigma_2 + 6\sigma_3 + 2\sigma_4)$$

由上式可以看出,括号内各级应力前的系数,恰好代表在各级应力下试验的次数(舍弃点 1 和 2 除外)。将这些用“配对法”得出的结果作为疲劳极限的数据点进行统计处理,即可得到疲劳极限的平均值和标准差。

$$\sigma_r = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^R \sigma_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m v_i \sigma_i \quad (19.2-5)$$

$$S_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^R \sigma_j^2 - \frac{1}{K} \left(\sum_{j=1}^R \sigma_j \right)^2}{K-1}} \quad (19.2-6)$$

式中 K ——配成的对子数;

n ——配成对子的有效试样数, $n=2K$;

m ——应力水平数;

σ_j ——用配对法得出的第 j 个疲劳极限值 (MPa);

σ_i ——第 i 个应力水平的应力值 (MPa);

v_i ——第 i 个应力水平试样数。

当最后一个数据点的下一根试样恰好回到第一个有效数据点时,则有效数据点恰能互相配成对子。因此,用小试样升降法进行试验时,最好进行到最后一个数据点和第一个有效数据点恰好衔接。

用升降法测出的疲劳极限可以和成组试验法测出的 $S-N$ 曲线合并在一起,绘制出中等寿命区到长寿命区的 $S-N$ 曲线。

升降法试验最好在 4 级应力水平下进行。当完成了第 6 或第 7 根试样的试验后,就可以按式 (19.2-5) 开始计算 σ_r 值,并陆续计算出第 8、9、10、……各试样试验后的 σ_r 值。当这些值的变化越来越小,趋于稳定时,试验即可停止。将完成最后一根试样试验所计算出的 σ_r 值,作为欲求的疲劳极限。在一般情况下,大约需要 10 多根试样。

应用升降法试验测定疲劳极限的关键,在于应力增量 $\Delta\sigma$ 的选取。一般说来,应力增量最好选择得使试验在 4 级应力水平下进行。为此,建议下面两种选择应力增量的方法,即

1) 已知由常规疲劳试验法测定的 σ_r 当已知由常规疲劳试验测定的 σ_r 时,可取 4%~6% 的 σ_r 作为应力增量 $\Delta\sigma$ 。

2) 已知同类材料的升降图 图 19.2-17a 是 LY12 铝合金光滑板试样的升降图。该试验是在 3 级应力水

平下进行的。图中纵坐标 $K = \sigma_{\max} / \sigma_b$, $\sigma_{\max}$ 为最大应力, σ_b 为强度极限, 应力增量 $\Delta\sigma = 0.02\sigma_b$, $\Delta\sigma$ 选得偏大些。在应用升降法测定单面喷丸 LY12 铝合金光滑板试样的条件疲劳极限时, 参考了这一数据, 把 $\Delta\sigma$ 减小到 $\Delta\sigma = 0.015\sigma_b$, 从而取得了 4 级应力水平 (图 19.2-17b)。

按升降法试验测定的疲劳极限或条件疲劳极限, 可以和成组试验法测定的疲劳寿命数据合并在一起, 绘制从中等寿命区到长寿命区的 $S-N$ 曲线和 $P-S-N$ 曲线。

有关试验数据的统计方法、分布及其检验等, 参阅本书“可靠性设计篇”。

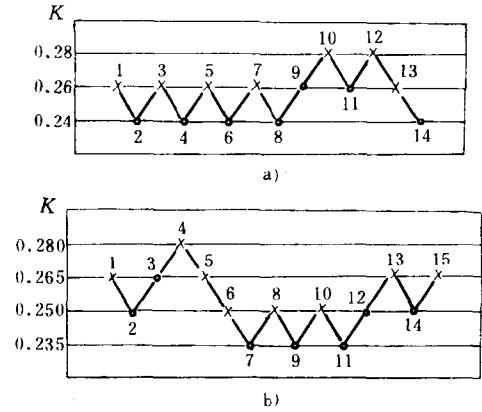


图 19.2-17 铝合金 LY12 光滑板试样的升降图

第3章 疲劳图和疲劳数据表

本章汇集了常规疲劳强度设计和疲劳强度可靠性设计中所用的结构钢材和铝合金材料的部分图表和曲线。

1 S-N 曲线(见图 19.3-1~60)

1)图注中括号内的“ δ ”是板材厚度,“ ϕ ”是棒材直径,是材料规格。

2)铝合金号尾部的字母:“B”为预拉伸加工硬化;“CZ”为淬火自然时效;“CS”为淬火人工时效。

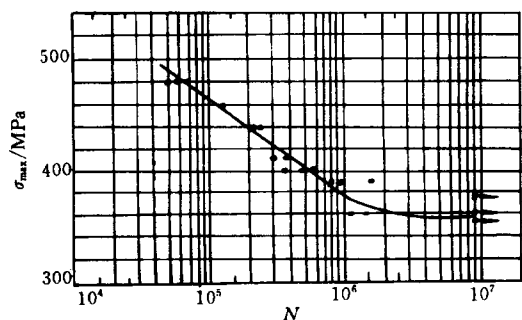


图 19.3-1 18Cr2Ni4WA 钢棒材缺口试样 ($\alpha_s=2$)的 S-N 曲线(棒材 $\phi 18\text{mm}$)

热处理:950 C 正火,850 C 淬火,540 C 回火

材料: $\sigma_b=1145\text{MPa}$

旋转弯曲试样, $r=-1$

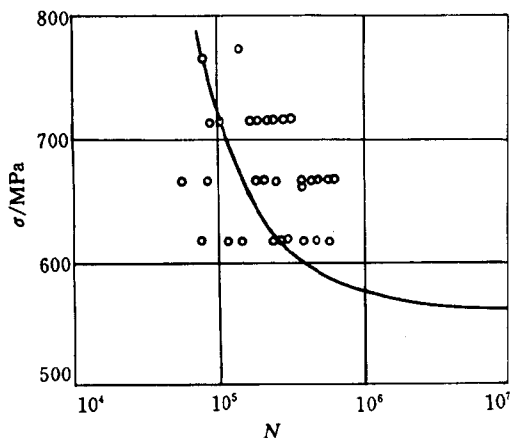


图 19.3-2 20CrMnTi 钢棒材光滑试样的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 25\text{mm}$)

热处理:880 C 油淬二次,200 C 回火

材料: $\sigma_b=1416\text{MPa}$

旋转弯曲, $r=-1$

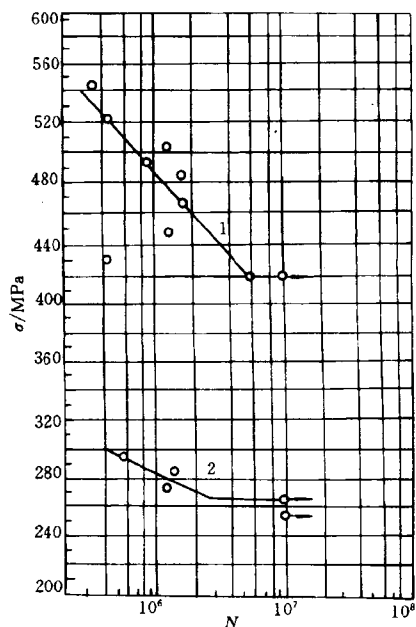


图 19.3-3 20CrNi3A 钢棒材的 S-N 曲线

1—光滑试样,2—缺口试样($\alpha_s=2$)

热处理:820~840 C 油淬,400~500 C 回火,油冷

材料: $\sigma_b=980\text{MPa}$ 旋转弯曲, $r=-1$

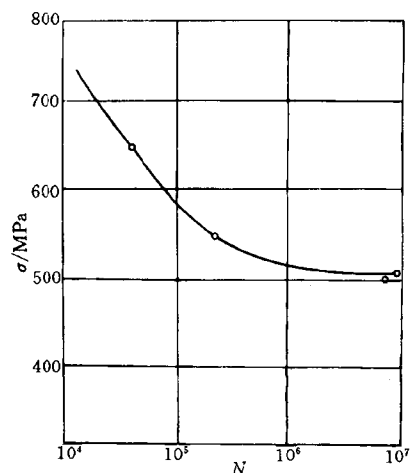


图 19.3-4 25MnCr5 钢光滑试样 S-N 曲线 ($\phi 50\text{mm}$ 真空精炼棒材)

热处理:890 C 正火,保温 2h,空冷,830 C 油淬,190 C 回火,保温 2h,空冷

材料: $\sigma_b=1587\text{MPa}$

旋转弯曲, $r=-1$

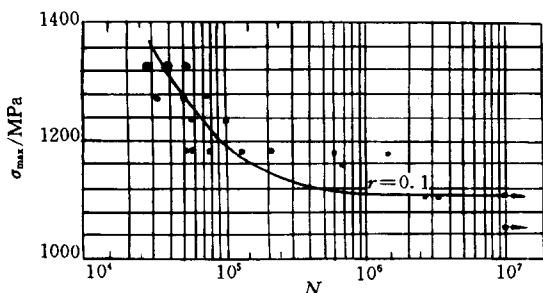


图 19.3-5 30CrMnSiNi2A 钢棒材光滑试样的 S-N

曲线(棒材 $\phi 25\text{mm}$)

热处理: 900 C 淬火, 250 C 回火

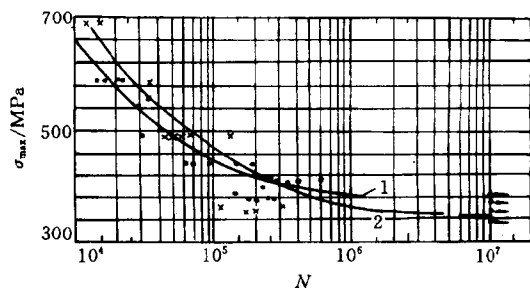
材料: $\sigma_b = 1584\text{MPa}$ 轴向加载, $r = 0.1$ 

图 19.3-8 30CrMnSiNi2A 钢棒材缺口试样

(α_s=3) 的 S-N 曲线(棒材 $\phi 30\text{mm}$)

1—热处理: 900 C 淬火, 370 C 回火

材料: $\sigma_b = 1417\text{MPa}$

2—热处理: 900 C 淬火, 320 C 回火

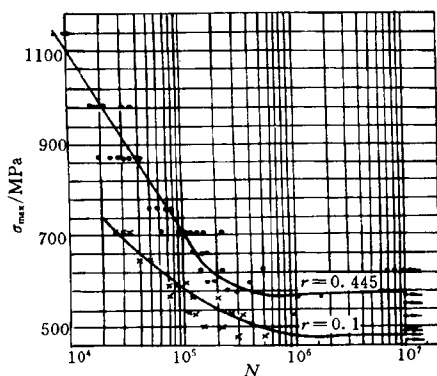
材料: $\sigma_b = 1550\text{MPa}$ 轴向加载, $r = 0.1$ 

图 19.3-6 30CrMnSiNi2A 钢棒材缺口试样

(α_s=3) 的 S-N 曲线(棒材 $\phi 25\text{mm}$)

热处理: 900 C 淬火, 260 C 回火

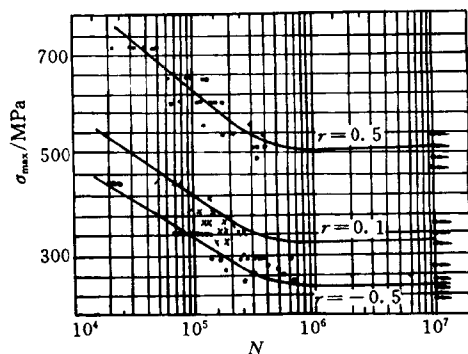
材料: $\sigma_b = 1569\text{MPa}$ ($r = 0.445$) $\sigma_b = 1665\text{MPa}$ ($r = 0.1$)轴向加载, $r = 0.1, 0.445$ 

图 19.3-7 30CrMnSiNi2A 钢棒材缺口试样

(α_s=5) 的 S-N 曲线(棒材 $\phi 25\text{mm}$)

热处理: 900 C 淬火, 260 C 回火

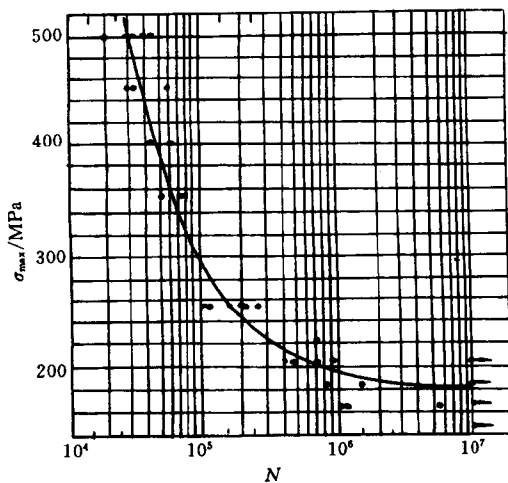
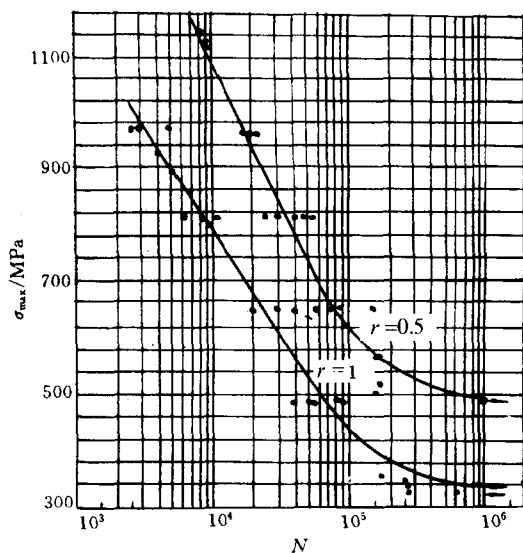
材料: $\sigma_b = 1569\text{MPa}$ ($r = 0.5, -0.5$) $\sigma_b = 1665\text{MPa}$ ($r = 0.1$)轴向加载, $r = 0.5, 0.1, -0.5$ 

图 19.3-9 30CrMnSiNi2A 钢棒材缺口试样

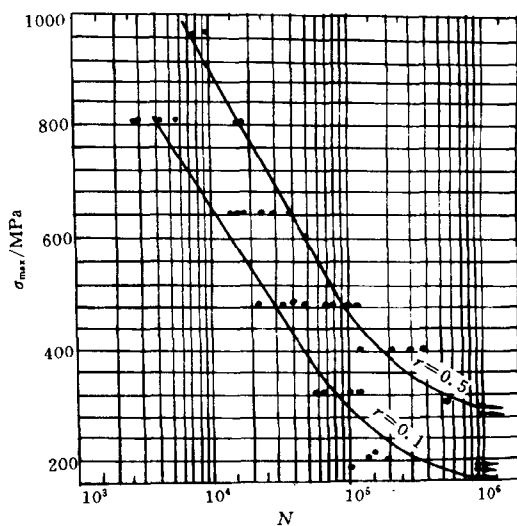
(α_s=3) 的 S-N 曲线(棒材 $\phi 55\text{mm}$)

热处理: 900 C 淬火, 250 C 回火

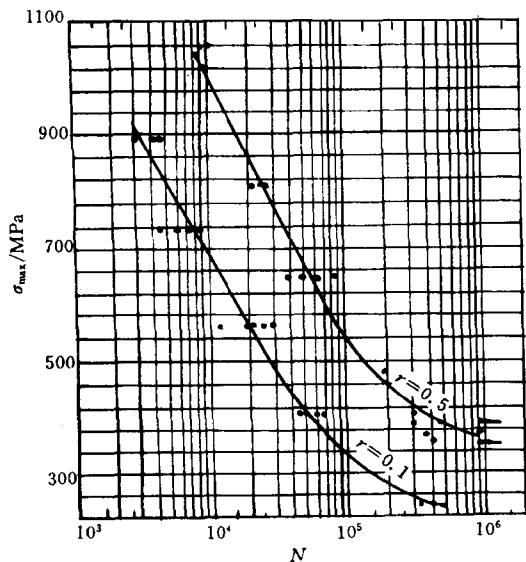
材料: $\sigma_b = 1755\text{MPa}$ 轴向加载, $r = 0.1$

图 19.3-10 30CrMnSiNi2A 钢锻压板缺口试样 ($\alpha_s=2.9$) 的 S-N 曲线口试样 ($\alpha_s=2.9$) 的 S-N 曲线

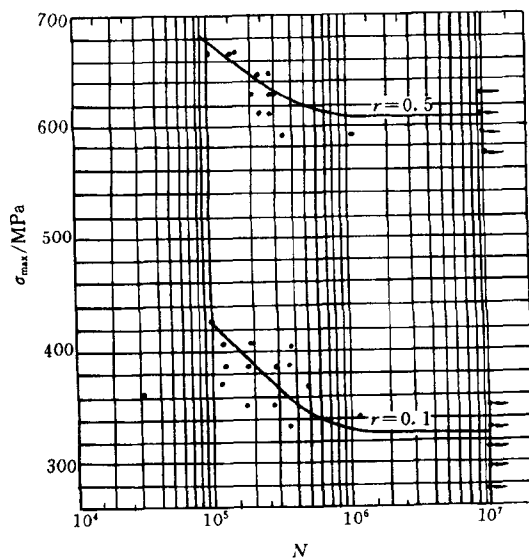
热处理: 900 C 淬火, 250 C 回火

材料: $\sigma_b=1618\text{MPa}$ 轴向加载, $r=0.1, 0.5$ 图 19.3-12 30CrMnSiNi2A 钢锻压板缺口试样 ($\alpha_s=4.1$) 的 S-N 曲线口试样 ($\alpha_s=4.1$) 的 S-N 曲线

热处理: 900 C 淬火, 250 C 回火

材料: $\sigma_b=1618\text{MPa}$ 轴向加载, $r=0.1, 0.5$ 图 19.3-11 30CrMnSiNi2A 钢锻压板缺口试样 ($\alpha_s=3.7$) 的 S-N 曲线口试样 ($\alpha_s=3.7$) 的 S-N 曲线

热处理: 900 C 淬火, 250 C 回火

材料: $\sigma_b=1618\text{MPa}$ 轴向加载, $r=0.1, 0.5$ 图 19.3-13 30CrMnSiA 钢棒材缺口试样 ($\alpha_s=3$) 的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 26\text{mm}$)口试样 ($\alpha_s=3$) 的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 26\text{mm}$)

热处理: 890 C 油淬火, 520 C 回火

材料: $\sigma_b=1184\text{MPa}$ 轴向加载, $r=0.1, 0.5$

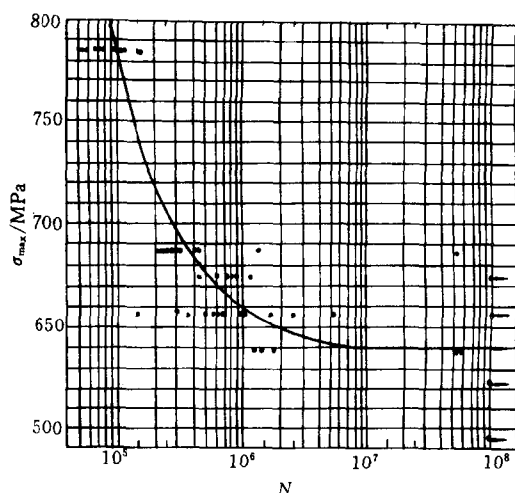


图 19.3-14 30CrMnSiA 钢锻件光滑试样
的 S-N 曲线

热处理: 900℃油淬火, 510℃回火

材料: $\sigma_b = 1110\text{MPa}$

悬臂旋转弯曲试验, $r = -1$

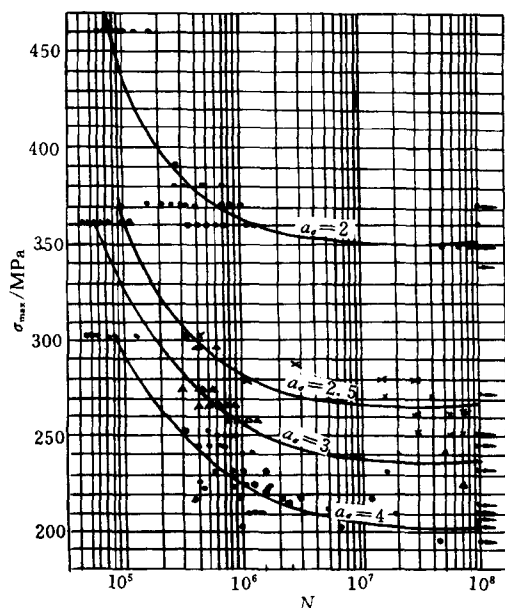


图 19.3-15 30CrMnSiA 钢锻件缺口

试样 ($\alpha_s = 2, 2.5, 3, 4$) 的 S-N 曲线

热处理: 900℃油淬火, 510℃回火

材料: $\sigma_b = 1110\text{MPa}$

悬臂旋转弯曲试验, $r = -1$

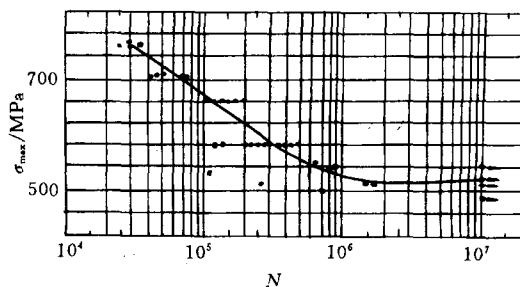


图 19.3-16 40CrNiMoA 钢棒材光滑试样
的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 30\text{mm}$)

热处理: 850℃油淬火, 580℃回火

材料: $\sigma_b = 1039\text{MPa}$

悬臂旋转弯曲, $r = -1$

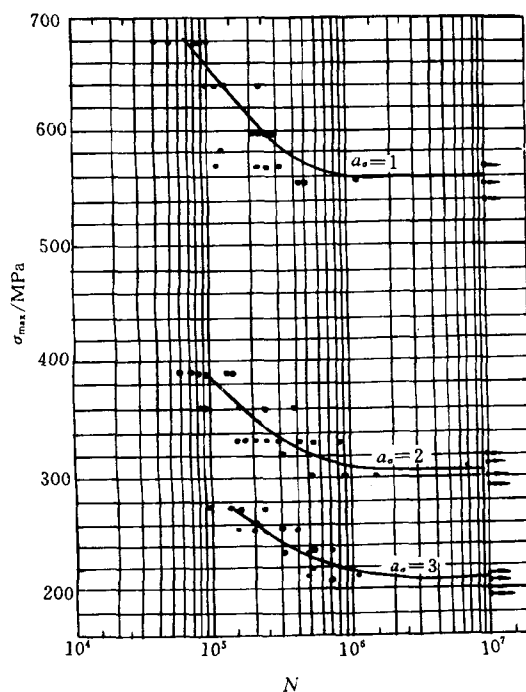


图 19.3-17 40CrNiMoA 钢棒材的 S-N 曲线
(棒材 $\phi 22\text{mm}$)

热处理: 850℃油淬火, 580℃回火

材料: $\sigma_b = 1049\text{MPa}$

试样: 光滑 ($\alpha_s = 1$) 和缺口 ($\alpha_s = 2, 3$) 试样

旋转弯曲试验, $r = -1$