

调质45钢有效应力集中系数研究

韩连元 丁遂栋

(数力系)

提 要: 本文提供了调质45钢在不同应力集中系数下的P—S—N曲线及疲劳缺口系数的试验值。并有效应力集中系数计算公式 $K_G = K_t / [0.88 + A (\frac{Q}{r_d})^b]$ [1] 进一步简化为 $K_G = K_t / (0.88 + A Q^b)$ [2] 提供了重要的试验数据。

关键词: 金属疲劳, 有效应力, 应力集中,

长期以来, 国外常用的有效应力集中系数计算公式为

$$K_G = 1 + q (K_t - 1) \quad (1)$$

式中 K_t ——理论应力集中系数

q ——材料的敏感系数

但是由于敏感系数不是材料常数, 而且各种资料上给出的敏感系数曲线相差很大, 因此, 按上式确定有效应力集中系数很不精确。

近年来, 我们国家通过大量的试验研究, 得出一种新的有效应力集中系数计算公式^[1]。这种公式不但能够和试验数据很好符合, 精度比国外公式高, 而且对有限寿命和无限寿命普遍适用, 打破了国外公式只能适用于无限寿命, 在有限寿命时只能用线性内插法近似估算的现状, 其有效应力集中系数的计算公式为

$$K_G = K_t / [0.88 + A (Q/r^d)^b] \quad (2)$$

式中 K_t ——理论应力集中系数

Q ——相对应力梯度 (mm^{-1})

r ——缺口根部圆角半径 (mm)

d 、 b 、 A ——材料常数, 其值如下:

在无限寿命时 (以光滑试样的疲劳极限为基准)

对于碳钢: 正火状态: $d = 0.1$, $b = 0.25$, $A = 0.43$ 。热轧状态 (未进行热处理):

$d = 0.1$, $b = 0.3$, $A = 0.35$

对于合金钢 (淬火后回火): $d = 0.2$, $b = 0.081$, $A = 0.36$

收到日期: 1988.04.14

在有限寿命时

对于碳钢（以喇叭形试样的条件疲劳极限为基准）

正火状态： $d = 0.1$, $b = 0.99 - 0.09511 \lg N$, $A = 0.879 - 0.09211 \lg N$

热轧状态（未进行热处理）：

$d = 0.1$, $b = 0.984 - 0.09411 \lg N$, $A = 0.856 - 0.09411 \lg N$

对于合金钢（淬火后回火）（以光滑试样的条件疲劳极限为基准）

$d = 0.2$, $b = 0.466 - 0.0511 \lg N$, $A = 0.456 - 0.00411 \lg N$

式中 N 为疲劳寿命，亦即失效循环次数。

为了使常用国产钢的有效应力集中系数试验研究的成果^[1]具有更普遍的适用性，我们又对调质45钢的有效应力集中系数进行了试验研究。

1 调质45钢疲劳性能测试*

1.1 材料，试样及试验方法

1.1.1 材料见表1

表1 材料

牌 号	规 格	供货状态	化 学 成 分 %								
			C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu
45	φ 25	冷轧	0.42	0.25	0.64	0.016	0.012				

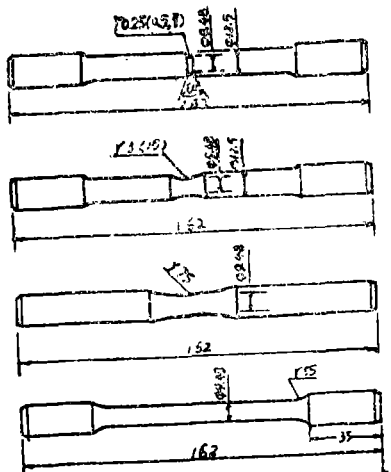


图1 45钢旋转弯曲试样

1.1.2 试样

所有试样均沿棒料纵向截取，加工成旋转弯曲试样。缺口试样5组（ $r = 0.25, 0.50, 1, 3, 15$ ）喇叭形试样（ $r = 75$ ）及光滑试样各1组。试样形状尺寸见图1。

1.1.3 热处理工艺及机械性能

45调质钢热处理工艺是850℃淬盐水，560℃回火空冷，金相组织为回火索氏体+少量铁素体。材料的机械性能见表2

1.1.4 试验条件及方法

45调质钢采用国产 PQ1—6型旋转弯曲疲劳试验机，载荷为纯弯矩，对称循环，转速为5000转/分。

每组试样均用升降法测出 10^6 , 10^7 循环的疲劳极限，并用成组法测出P—S—N曲线。

试验在室温空气中进行。

1.2 试验结果

*参加本试验研究的还有许德刚、孟庆波

表2 材料的机械性能

材 料	σ_s MPa	σ_b MPa	δ_5 %	Ψ %	HRC
45 (调质)	662.93	821.31	5.67	62.32	23

1.2.1 用升降法测疲劳极限

用升降法进行疲劳试验,对试验数据进行统计处理后分别得出 10^6 , 10^7 指定寿命下的疲劳极限见表3及表4。处理程序见文献[2],详细处理结果见文献[4]。

表3 疲劳极限 ($N = 10^7$)

试样rmm		0.25	0.5	1	3	15	喇叭	光滑
疲劳极限 $\bar{\sigma}_{-1c}$ MPa		162.79	208.66	273.93	381.23	435.42	443.95	425.31
标准差SMPa		6.7332	15.69	10.1283	17.4969	4.23	11.40	4.33
变异系数C _v		0.0414	0.0753	0.0369	0.0459	0.0097	0.0257	0.0102
疲 劳 极 限 ($\bar{\sigma}_{-1c}$), MPa	P=0.90	154.16	188.58	260.95	358.83	430.00	429.30	419.73
	P=0.95	151.71	182.70	257.27	352.45	428.46	425.15	418.16
	P=0.99	147.13	172.20	250.37	340.59	425.59	417.37	415.22
	P=0.999	142.00	160.14	242.64	327.15	422.36	408.65	411.88

表4 疲劳极限 ($N = 10^6$)

试样 r mm		0.25	0.5	1	3	15	喇叭	光滑
疲劳极限 $\bar{\sigma}_{-1c}$ MPa		185.93	227.19	281.45	384.91	438.85	456.01	428.06
标准差SMPa		7.4423	11.53	8.3337	17.36	4.17	8.33	4.65
变异系数C _v		0.0400	0.0502	0.0296	0.0451	0.0095	0.0183	0.0109
疲 劳 极 限 ($\bar{\sigma}_{-1c}$), MPa	P=0.90	176.39	214.81	270.77	362.65	433.51	445.33	422.08
	P=0.95	173.68	210.62	267.74	356.37	431.99	442.30	420.42
	P=0.99	168.62	202.77	262.07	344.51	429.16	436.63	417.27
	P=0.999	162.94	193.96	255.70	331.27	426.00	430.26	413.69

1.2.2 成组法测P—S—N曲线

试验时,在中寿命区($N=10^4 \sim 10^6$)取4级应力水平,在各应力水平下试验10根试样,试验后,分别根据每种应力水平下的试验数据求出对数疲劳寿命的均值和标准差,进行相对误差检验($<5\%$),然后再用最小二乘法得出 $\lg \sigma - \lg N_b$ 直线方程,并作出P—S—N曲线。处理程序见文献[2],详细处理结果见文献[4]。

采用的直线方程为

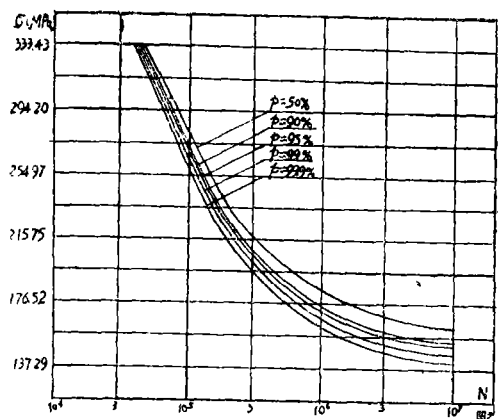
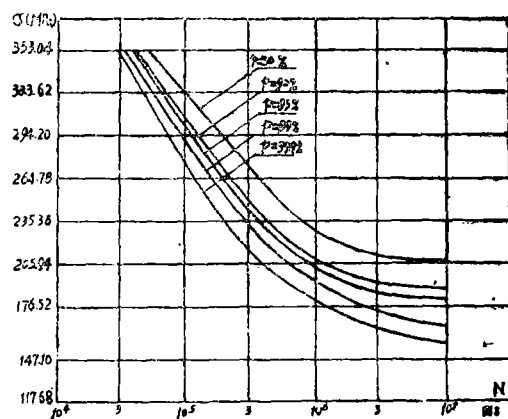
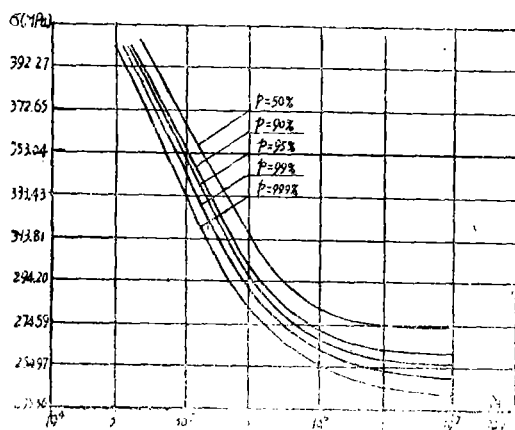
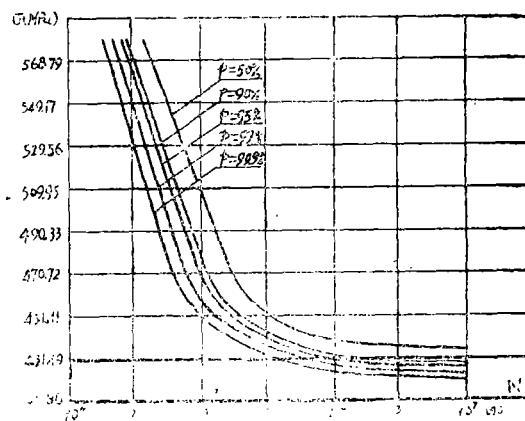
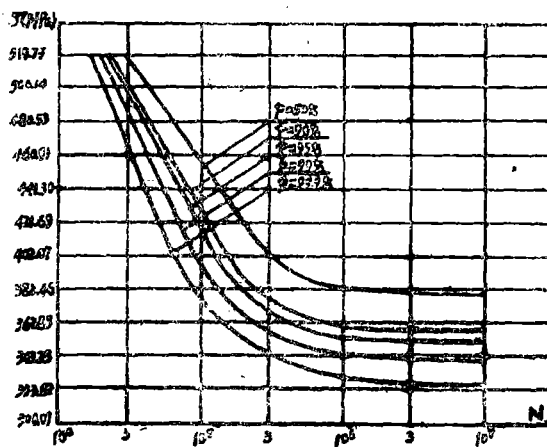
$$\lg N_p = a_p + b_p \lg \sigma \quad (3)$$

式中 σ 的单位为MPa, N的单位为转数。直线方程中的 a_p 和 b_p 值见表5。

表5 a_p 与 b_p 值

试 样 rmm	不同存活率下 p 的 a_p 与 b_p 值					
	p %	50	90	95	99	99.9
0.25	a_p	15.2404	14.6379	14.4673	14.1473	13.7882
	b_p	-4.1920	-3.9647	-3.9003	-3.7796	-3.6441
0.50	a_p	22.1054	19.9646	19.3584	18.2212	16.9454
	b_p	-6.8279	-6.0275	-5.8009	-5.3757	-4.8987
1.00	a_p	24.9599	23.4801	23.0611	22.2751	21.3932
	b_p	-7.7933	-7.2570	-7.1051	-6.8202	-6.5006
3.00	a_p	30.2166	25.4395	24.0869	21.5492	18.7023
	b_p	-9.4872	-7.7616	-7.2730	-6.3563	-5.3279
15	a_p	24.3964	22.7607	22.2976	21.4287	20.4539
	b_p	-7.1712	-6.6277	-6.4738	-6.1851	-5.8612
喇叭形	a_p	29.8414	28.7410	28.4294	27.8449	27.1391
	b_p	-9.1193	-8.6770	-8.6711	-8.4856	-8.2775
光滑	a_p	37.7109	37.4616	37.3904	37.2584	37.1088
	b_p	-12.1893	-12.1143	-12.0929	-12.0536	-12.0107

P—S—N曲线分别如图2—图8所示。

图2 $r = 0.25\text{mm}$ 图3 $r = 0.5\text{mm}$ 图4 $r = 1\text{mm}$ 图6 $r = 15\text{mm}$ 图5 $r = 3\text{mm}$

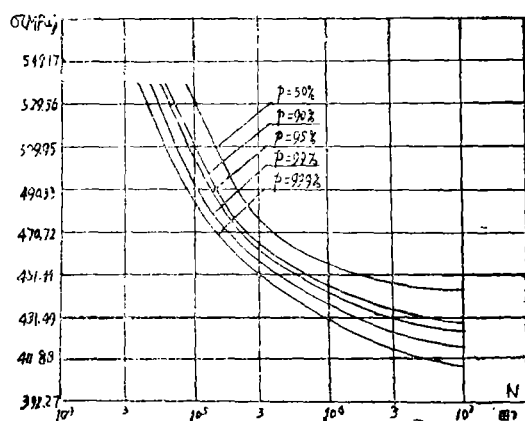
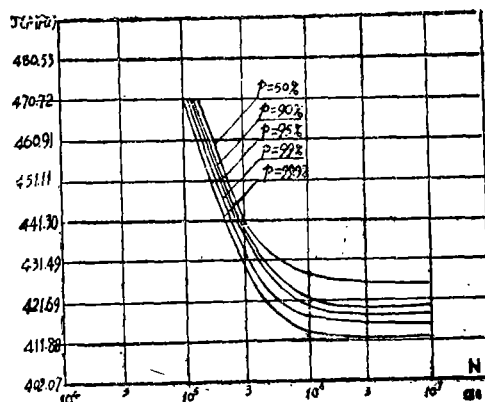
图7 $r=75\text{mm}$ 

图8 光滑试验

2 调质45钢有效应力集中系数

2.1 理论应力集中系数 K_t

2.1.1 未考虑角度修正时的 K_t 值

由文献[5][6]中的曲线图查出的 K_t 值见表6。

表6 未作角度修正的 K_t 值

r/mm	0.25	0.5	1	3	15	喇叭形	光滑
K_t	3.30	2.50	1.88	1.38	1.08	1.02	1.00

2.1.2 进行角度修正后的 K_t 值

使用文献[6]推荐的角度修正公式

$$K_t(\theta) = 1 + f(\theta)(K_t - 1) \quad (4)$$

$$\text{其中 } f(\theta) = \frac{1 - \exp[-0.9\sqrt{D/2t}(\pi - \theta)]}{1 - \exp(-0.9\pi\sqrt{D/2t})}$$

角度修正系数 $f(\theta)$ 和进行角度修正后的 $K_t(\theta)$ 值见表7

表7 角度修正系数 $f(\theta)$ 及 $K_t(\theta)$ 值

r/mm	0.25	0.50	1.00	3.00	15	喇叭形	光滑
$f(\theta)$	0.982	0.982	0.982	1	1	1	1
$K_t(\theta)$	3.26	2.47	1.88	1.38	1.08	1.02	1.00

2.2 相对应力梯度Q

2.2.1 公式及其来源

使用文献[7]中的计算公式

$$Q = \frac{2(1+\varphi)}{r} + \frac{2}{d} \quad (5)$$

其中 $\varphi = \frac{1}{4\sqrt{t/r} + 2}$

d——缺口根部直径

r——缺口根部半径

t——缺口深度

2.2.2 相对应力梯度Q的计算结果见表8

表8 相对应力梯度Q的计算值

rmm	0.25	0.5	1.00	3.00	15	喇叭形
Qmm ⁻¹	8.887	4.658	2.500	1.015	0.385	0.245

2.3 有效应力集中系数K_σ的计算值

2.3.1 公式及其来源

使用文献[1]中的计算公式

$$K_{\sigma} = K_t / [0.88 + A(Q/r^d)^b]$$

2.3.2 按碳钢正火状态计算K_{σ1}值见表9表9 有效应力集中系数K_{σ1}值

疲劳寿命 N rmm	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴
0.25	1.98	1.86	1.44	1.09
0.50	1.62	1.62	1.34	1.10
1.00	1.31	1.37	1.20	1.05
3.00	1.06	1.06	1.08	1.01
15	0.90	1.02	1.00	0.99
喇叭形	0.89	0.99	0.98	0.97

2.3.3 按合金钢淬火后回火计算K_{σ2}值见表10

表10 有效应力集中系数 K_{σ_2} 值

疲劳寿命N r_{mm}	10^7	10^6	10^5	10^4
0.25	2.47	2.13	2.01	1.88
0.50	1.94	1.70	1.64	1.58
1.00	1.47	1.34	1.32	1.29
3.00	1.12	1.06	1.06	1.06
15	0.90	0.90	0.91	0.93
喇叭形	0.87	0.87	0.89	0.91

2.4 有效应力集中系数 K_5 的试验值

由定义知：

$$K_5 = \sigma_{-1d} / \sigma_{-1e} \quad (6)$$

其中 σ_{-1d} ——与零件尺寸相同，终加工方法相同的光滑试样的对称弯曲疲劳极限。

σ_{-1e} ——零件缺口部位对称循环下在抗压、弯曲或拉、弯复合应力下破坏时的疲劳极限。

有效应力集中系数 K_5 的试验值见表11

表11 K_6 的试验值

疲劳寿命N r_{mm}	10^7	10^6	10^5	10^4
0.25	2.61	2.30	1.91	1.42
0.50	2.04	1.88	1.64	1.52
1.00	1.55	1.52	1.46	1.40
3.00	1.12	1.11	1.16	1.18
15	0.98	0.98	1.05	0.98
喇叭形	0.95	0.94	1.00	1.00

注：在 10^7 ， 10^6 时以光滑试样的疲劳极限为基准，在 10^5 ， 10^4 时以喇叭形试样的疲劳极限为基准。

2.5 K_{σ_1} 、 K_{σ_2} 与 K_5 对比的相对误差见表12

表12 K_{6_1} 、 K_{6_2} 与 K_6 对比的相对误差

疲 劳 寿 命 $N(\text{次})$	缺口半径 $r(\text{mm})$	计 算 值 K_{6_1}	计 算 值 K_{6_2}	试 码 值 K_6	相对误差 $\delta_1(\%)$	相对误差 $\delta_2(\%)$
10^7	0.25	1.98	2.47	2.61	-24	-5.4
	0.50	1.62	1.94	2.04	-20	-4.9
	1.00	1.31	1.47	1.55	-15.5	-5.2
	3.00	1.06	1.12	1.12	-5.4	0
	15	0.90	0.90	0.98	-8.2	-8.2
	喇叭形	0.89	0.87	0.95	-6.3	-8.4
10^6	0.25	1.86	2.13	2.30	-19.1	-7.4
	0.50	1.62	1.70	1.88	-13.8	-9.6
	1.00	1.37	1.34	1.52	-9.9	-11.8
	3.00	1.06	1.06	1.11	-4.5	-4.5
	15	1.02	0.90	0.98	4.1	-8.2
	喇叭形	0.99	0.87	0.94	5.3	-7.4
10^5	0.25	1.44	2.01	1.91	-24.6	-5.2
	0.30	1.34	1.64	1.64	-18.3	0
	1.00	1.20	1.32	1.46	-17.8	-10.6
	3.00	1.08	1.06	1.16	-6.9	-8.6
	15	1.00	0.91	1.05	-4.8	-13
	喇叭形	0.98	0.89	1.00	-2	-11
10^4	0.25	1.09	1.88	1.42	-23.2	32.4
	0.50	1.10	1.58	1.52	-27.6	3.9
	1.00	1.05	1.29	1.40	-25	-7.9
	3.00	1.01	1.06	1.18	-14.4	-10.2
	15	0.99	0.93	0.98	1	0.51
	喇叭形	0.97	0.91	1.00	-3	-9

3 结 语

通过疲劳设计基础问题及补充工作的试验研究,我们得到如下结论^[2]:

3.1 敏感系数曲线不是通常认为的单调增曲线,敏感系数不论用于评价材料缺口的敏感度还是用于有效应力集中系数都不是一个确切的好参数,需寻求新的参数来代替。

3.2 调质 45 钢的试验结果表明,计算有效应力集中系数应以材料的热处理状态分类来选择使用公式中的常数,而不应以材料的化学成分为依据归类。

3.3 调质45钢的有效应力集中系数都基本上符合公式

$$K_f = K_t / [0.88 + A (Q/r^d)^b]$$

的计算值。

3.4 经过分析计算, 发现公式

$$K_f = K_t / [0.88 + A (Q/r^d)^b]$$

可进一步简化为

$$K_f = K_t / [0.88 + A Q^b] \quad (7)$$

公式(7)既继承了(2)式的优点, 又形式简单, 使用方便, 其精度也与(2)式相差甚小, 三种热处理状态下与(2)式的相对误差均不超过1%。

将所试验的材料按不同的热处理方式进行分析计算, 可确定出公式(7)中的常数如下:

(1) 无限寿命 (以光滑试样的疲劳极限为基准)

正火状态: $A = 0.423$ $b = 0.279$

热轧状态: $A = 0.336$ $b = 0.345$

淬火后回火状态: $A = 0.190$ $b = 0.152$

(2) 有限寿命

公式(7)中的A、b还与疲劳寿命有关, 对于碳钢以喇叭形试样的中值S—N曲线为基准, (即以S—N曲线求出的条件疲劳极限为基准), 对于合金钢以光滑试样的S—N曲线为基准。

一般情况下, 建议 $10^4 < N_f < 10^6$

正火状态: $A = 0.7905 - 0.0725 \lg N_f$ $b = 1.1209 - 0.1044 \lg N_f$

热轧状态: $A = 0.8105 - 0.0837 \lg N_f$ $b = 1.1318 - 0.1066 \lg N_f$

淬火回火状态: $A = 0.0960 + 0.0324 \lg N_f$ $b = 1.1316 - 0.1262 \lg N_f$

参 考 文 献

- [1] 机械部郑州机械研究所, 《疲劳设计参考资料》, 1986.5.
- [2] 郑州机械研究所, 西安交通大学, 郑州工学院, 《常规疲劳设计方法研究补充工作》技术资料之三, 《有效应力集中系数研究》, 1987.10
- [3] 郑州机械研究所, 《常用国产钢有效应力集中系数研究》, 1984.7
- [4] 郑州工学院, 《常规疲劳设计方法研究补充工作》技术资料之三, 《有效应力集中系数研究》附件2, 《调质45钢在不同应力集中系数下的P—S—N曲线》, 1987.10
- [5] 日本材料学会编《金属材料强度试验便览》, 养贤堂, 1977
- [6] 西田正孝著, 《应力集中》, 森北出版株式会社, 昭和46年
- [7] Несущая Способность и Расчет Деталей Машин На прочность С.В.Сереноев等1975
- [8] 上海材料研究所, 《疲劳性能测试及数据处理》, 1984.7
- [9] 高镇同, 《疲劳性能测试》, 国防工业出版社, 1980
- [10] 徐灏, 《疲劳强度设计》, 机械工业出版社, 1981
- [11] 郑州机械研究所、东北工学院、上海材料研究所等, 《疲劳设计基础问题研究试验报告》, 1984.

(下转59页)

记 $\bar{x} = \alpha x^* + (1 - \alpha) X^{**}$. 则 $\bar{x} \in A$, 且 $P(\bar{x}, y^*) > P(x^*, y^*)$, 由于 x^*, y^* 为最优纯策略, 矛盾. 同理可证局中人 2 的最优纯策略亦是唯一的。

根据本节定理 3, 下节定理 2 自然成立. 并且定理中 $P(x, y)$ 关于 x, y 的连续性条件即可改为半连续性, 不再赘述。

作者对山东大学数学系郑汉鼎副教授在一九八八年青岛暑期运筹学研讨班上指出了此问题的背景表示感谢. 同时, 本文写作得到郑州工学院李菊祥付教授的支持和帮助, 在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] 《运筹学》试用教材编写组, 运筹学, 清华大学出版社, 1985年。
- [2] 王建华, 对策论, 清华大学出版社, 1986年。

A Sufficient Condition On Existence And Uniqueness Of The Optimal pure Policy About Convex And Concave Game

Xu Jianguo

(Room of Operation Research Teaching and Researching)

Abstract In this Paper, We give a Sufficient condition on existence and uniqueness of the optimal Pure Policy about Convex and Concave game, Which is about infinite and Zero Sum two-person game. The Past result is generalized and improved.

key words: Game Theory, The optimal pure policy, existence, uniqueness.

(上接69页)

Research of Effective Stress Concentration Coefficient of 45 (mix) Steel

Han Lianyuan Ding Suidong

(Dept. of Math. and Mech.)

Abstract: The paper provides the experiment value of fatigue notch Coefficient and Seven P—S—N curves of different effective stress concentration Coefficient for 45 (mix) steel. By means of the experimental data, The formula of effective stress Concentration coefficient $K_t = K_1 / [0.88 + A(Q/r^d)^b]$ is further simplified into $K_t = K_1 / [0.88 + A Q^b]$.

Key words: metal Fatigue, Effective Stress, stress Concentration.