

# 调质 40CrNiMo 钢平均应力影响系数的试验研究\*

杜云海 韩连元 丁遂栋

(郑州工学院数力系)

**摘要:** 本文介绍调质 40CrNiMo 钢的拉-压疲劳试验结果, 给出了该材料在不同应力集中情况和不同循环特性下的疲劳极限及适宜的平均应力影响系数。

**关键词:** 疲劳试验, 平均应力影响系数。

**中图分类号:** O343:O346

平均应力的存在引起材料疲劳抗力降低, 这是机械部件疲劳强度设计中需要考虑的一个重要问题。国际上对此问题进行过广泛的研究, 对交变应力作用下材料的疲劳极限随平均应力变化的规律提出了不同的假设和数学模型以满足设计者的需要<sup>(1)</sup>。目前常用的 Gerber 抛物线, Goodman 直线以及 CepeHceH 折线等就是最有代表性的简化线图。然而, 尚无一种简化线图能够通用于各种材料和不同应力集中情况。一种材料究竟适于用哪种简化线图表达其平均应力影响规律, 这需要作大量的试验研究工作。

在我国, 由于缺乏材料疲劳性能方面的系统研究, 承受交变载荷的机械零部件的设计, 一直沿用静强度设计的方法。近年来, 国家有关部门组织力量逐步地对常用国产钢材进行了一系列的疲劳试验研究<sup>(2)</sup>。本文所述便是我们对国产 40CrNiMo 钢关于平均应力影响系数的试验研究结果。

## 1 疲劳试验结果

### 1.1 试样及试验条件

#### 1.1.1 试样材料

牌号: 40CrNiMo (调质) 钢。

供货状态: 轧态。

规格:  $\Phi 25$  棒材。

供货厂及炉号: 大冶钢厂, 3TT1919。

化学成份:

Ti	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
0.42%	0.25%	0.62%	0.006%	0.01%	1.04%	1.40%	0.21%

\* 收稿日期: 1991-10-08

1.1.2 试样制备及机械性能

取样方向: 纵向。 热处理: 870℃ 油淬, 650℃ 回火。

尺寸及图形: 见图 1。 金相组织: 回火索氏体。

机械性能:

$\sigma_b$ (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)	$\delta$ (%)	$\Psi$ (%)	HB
895.02	797.12	21.1	64.8	254

1.1.3 试验条件

试验设备: 疲劳试验用 PLG-100 型国产高频疲劳试验机, 静拉伸试验用国产 WJ-10 型万能试验机。

加载方式: 轴向拉—压。

试验频率: 150Hz。

试验环境: 室温、空气。

疲劳极限确定方法: 升降法<sup>[3]</sup>, 有效试验数据不少于 15 个。

指定寿命:  $N_0 = 10^7$ 。

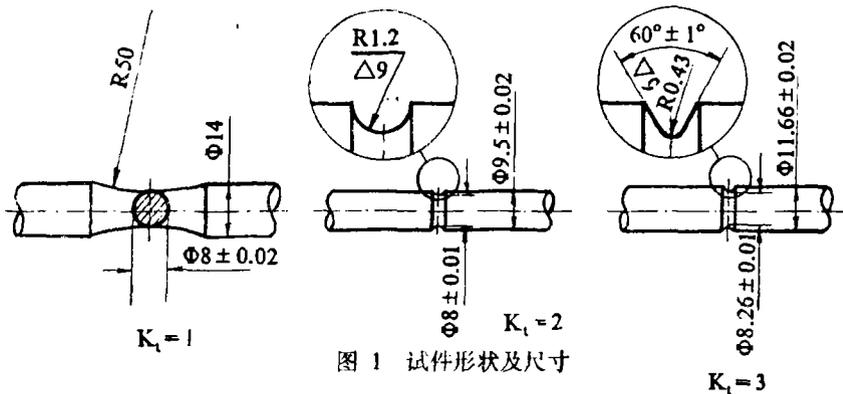


图 1 试样形状及尺寸

1.2 试验结果

1.2.1 疲劳极限数据

对理论应力集中系数  $K_t = 1, 2, 3$ , 循环特性  $r = -1, 0, 0.3, 1$  (静拉伸) 情况下试验得到的疲劳极限均值及标准差如表 1 所示。

1.2.2 疲劳极限曲线

根据表 1 所示的均值疲劳极限  $\sigma_{rm}$  和  $\sigma_{ra}$ , 用最小二乘法拟合出抛物线型的疲劳极限曲线

$$\sigma'_{ra} = A + B\sigma'_{rm} + C\sigma'^2_{rm} \tag{1}$$

对应于  $K_t = 1, 2, 3$  的拟合曲线如图 2 所示。式 (1) 中的系数根据试验数据计算:

$$A = \bar{\sigma}_a - B\bar{\sigma}_m - C\frac{\sum \sigma_{mi}^2}{n}$$

$$B = \frac{[(n\bar{\sigma}_m\bar{\sigma}_a - \sum \sigma_{mi}\sigma_{ai})(\sum \sigma_{mi}^2 \sum \sigma_{mi}^3 - n\bar{\sigma}_m \sum \sigma_{mi}^4)] - (\bar{\sigma}_m \sum \sigma_{mi}^2)}{(\sum \sigma_{mi}^2 \sum \sigma_{mi}^3 - n\bar{\sigma}_m \sum \sigma_{mi}^4)}$$

$$C = \frac{-\sum \sigma_{mi}^3 (\sum \sigma_{mi}^2 \sum r_{mi} \sigma_{ai} - n \bar{\sigma}_m \sum \sigma_{mi}^2 \sigma_{ai})}{(n \bar{\sigma}_m^2 - \sum \sigma_{mi}^2) (\sum \sigma_{mi}^2 \sum \sigma_{mi} \sigma_{ai} - n \bar{\sigma}_m \sum \sigma_{mi}^2 \sigma_{ai}) - (n \bar{\sigma}_m \bar{\sigma}_a - \sum \sigma_{mi} \sigma_{ai}) [(\sum \sigma_{mi}^2)^2 - n \bar{\sigma}_m \sum \sigma_{mi}^3]} / D$$

$$D = (n \bar{\sigma}_m^2 - \sum \sigma_{mi}^2) (\sum \sigma_{mi}^2 \sum \sigma_{mi}^3 - n \bar{\sigma}_m \sum \sigma_{mi}^4) - (\bar{\sigma}_m \sum \sigma_{mi}^2 - \sum \sigma_{mi}^3) [(\sum \sigma_{mi}^2)^2 - n \bar{\sigma}_m \sum \sigma_{mi}^3]$$

其中  $\bar{\sigma}_m = \frac{1}{n} \sum \sigma_{mi}$ ,  $\bar{\sigma}_a = \frac{1}{n} \sum \sigma_{ai}$ ,  $\sigma_{mi} = \sigma_{r,m}$ ,  
 $\sigma_{ai} = \sigma_{r,a}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ,  
 $r_i = -1, 0, 0.3, 1$ .

各系数的计算结果见表 2。

拟合曲线(1)与试验点间的相对误差由下式计算:

$$\delta_r = \frac{\sqrt{(\sigma_{rm} - \sigma'_{rm})^2 + (\sigma_{ra} - \sigma'_{ra})^2}}{\sqrt{\sigma_{rm}^2 + \sigma_{ra}^2}}$$

计算结果如表 3 所示。

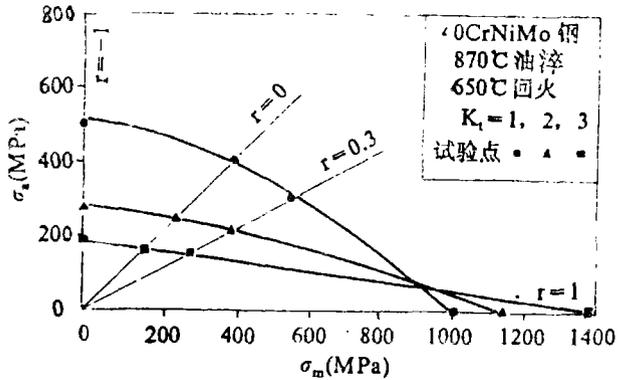


图 2  $\sigma_a, \sigma_m$  试验曲线

表 1 疲劳极限试验数据

r	疲劳极限 (MPa)									
	K <sub>t</sub> =1			K <sub>t</sub> =2			K <sub>t</sub> =3			
	$\sigma_r$	$\sigma_{ra}$	$\sigma_{rm}$	$\sigma_r$	$\sigma_{ra}$	$\sigma_{rm}$	$\sigma_r$	$\sigma_{ra}$	$\sigma_{rm}$	
-1	均值	499.12	499.12	0	275.52	275.52	0	187.50	187.50	0
	标准差	4.55	4.55	0	4.81	4.81	0	5.85	5.85	0
0	均值	805.14	402.57	402.57	490.49	245.25	245.25	322.15	161.08	161.08
	标准差	18.72	9.36	9.36	20.65	10.33	10.33	14.27	7.14	7.14
0.3	均值	856.28	299.70	556.58	598.93	209.63	389.30	439.34	153.77	285.57
	标准差	31.07	10.87	20.20	14.64	5.12	9.52	17.19	6.02	11.17
1	均值	1001.28	0	1001.28	1138.86	0	1138.86	1383.24	0	1383.24
	标准差	74.57	0	74.57	26.44	0	26.44	18.87	0	18.87

表 2 用最小二乘法得到的拟合曲线系数

拟合曲线系数	$K_t=1$	$K_t=2$	$K_t=3$
A	501.45	276.89	185.57
B	-0.13130	-0.12228	-0.11929
C	$-3.7099 \times 10^{-4}$	$-1.0627 \times 10^{-4}$	$-1.0708 \times 10^{-5}$

表 3 拟合曲线与试验点间的相对误差 (%)

循环特性 $r$	$K_t=1$	$K_t=2$	$K_t=3$
-1	0.5	0.5	1.0
0	2.5	1.7	2.7
0.3	2.2	1.2	1.7
1	0.3	0.05	0.04

## 2 平均应力影响系数 $\Psi_\sigma$

根据试验曲线及常用简化线图的方程求得的平均应力影响系数如下:

### 2.1 试验曲线

$$\Psi_\sigma = \begin{cases} -B & (r = -1) \\ -B + \frac{1}{2} \left[ B + \frac{r-1}{r+1} + \sqrt{\left( B + \frac{r-1}{r+1} \right)^2 - 4AC} \right] & (-1 < r \leq 1) \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 Gerber 抛物线

$$\Psi_\sigma = \begin{cases} 0 & (r = -1) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{r-1}{r+1} + \sqrt{\left( \frac{r-1}{r+1} \right)^2 + \frac{4\sigma_{-1}^2}{\sigma_{bN}^2}} \right) & (-1 < r \leq 1) \end{cases} \quad (3)$$

### 2.3 CepeHceH 折线

$$\Psi_\sigma = \begin{cases} \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_\sigma}{\sigma_\sigma} & (-1 \leq r \leq 0) \\ \frac{2\sigma_{-1}(\sigma_{bN} - r\sigma_{bN} + r\sigma_\sigma)}{\sigma_\sigma \sigma_{bN}(1+r)} - \frac{1-r}{1+r} & (0 < r \leq 1) \end{cases} \quad (4)$$

### 2.4 Goodman 直线

$$\Psi_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{bN}} \quad (-1 \leq r \leq 1) \quad (5)$$

这里,  $\sigma_{-1}$  为对称循环交变应力作用下材料的疲劳极限,  $\sigma_\sigma$  为脉动循环交变应力作用下材料的疲劳极限,  $\sigma_{bN}$  为疲劳试样的静拉强度极限。

分别取  $r = -1, -0.8, -0.6, \dots, 0.6, 0.8, 1$ , 对应于  $K_t = 1, 2, 3$ , 由式(2)至(5)计

算得到的平均应力影响系数  $\Psi_0$  如表 4 所示。

表 4 用不同方法计算得到的平均应力影响系数

$K_t$	$\Psi_0-r$ 曲线	$\Psi_0$										
1	试验	0.1313	0.152	0.176	0.205	0.238	0.277	0.320	0.366	0.412	0.458	0.502
	Gerber	0	0.0275	0.0612	0.102	0.151	0.206	0.266	0.328	0.389	0.446	0.499
	CepecHccH	0.240	-	-	-	-	0.240	0.326	0.388	0.434	0.470	0.499
	Goodman	0.499	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	试验	0.122	0.126	0.129	0.134	0.140	0.148	0.158	0.171	0.189	0.213	0.243
	Gerber	0	0.0065	0.0146	0.0248	0.0381	0.0555	0.0785	0.109	0.147	0.193	0.242
	CepecHccH	0.123	-	-	-	-	0.123	0.163	0.191	0.212	0.229	0.242
	Goodman	0.242	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	试验	0.119	0.120	0.120	0.120	0.121	0.121	0.122	0.123	0.125	0.128	0.134
	Gerber	0	0.00204	0.00459	0.00785	0.0122	0.0181	0.0265	0.0393	0.0594	0.0909	0.136
	CepecHccH	0.164	-	-	-	-	0.164	0.155	0.148	0.143	0.139	0.136
	Goodman	0.136	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	r	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1

为了对调质 40CrNiMo 钢推荐出适宜的平均应力影响系数计算公式, 这里分别将  $K_t=1, 2, 3$  时式(2)至(5)所示的  $\Psi_0-r$  曲线绘在一起以资比较 (见图 3)。由图 3 看出, 由 CepecHccH 折线得到的平均应力影响系数  $\Psi_0$  接近于试验结果, 且多数情况下是偏于安全的; 由 Goodman 直线得到的平均应力影响系数  $\Psi_0$  只在  $K_t$  较大时才接近试验结果, 在  $K_t$  不大时, 它是过于保守的; 而由 Gerber 抛物线得到的  $\Psi_0$  总是不够安全的。因此, 在  $K_t=1, 2$  情况下, 可使用 CepecHccH 折线法得到的  $\Psi_0$ , 而在  $K_t=3$  情况下, 建议使用 Goodman 直线法得到的  $\Psi_0$ 。

在设计精度要求较高时, 可使用由试验拟合曲线得到的  $\Psi_0$ (式(2))。试验的  $\Psi_0$  随  $K_t$  的变化具有很好的规律性, 对不同循环特性  $r$  绘出试验  $\Psi_0-K_t$  曲线如图 4 所示。利用此图可以估计  $K_t$  为任意值( $1 < K_t < 3$ ) 时的  $\Psi_0$ 。观察此图可以发现, 随着  $K_t$  变大, 平均应力影响系数  $\Psi_0$  趋于一不变值, 这说明在  $K_t$  接近或大于 3 时, 用 goodman 直线作为所研究材料的疲劳极限曲线将是非常适宜的。

### 3 结论

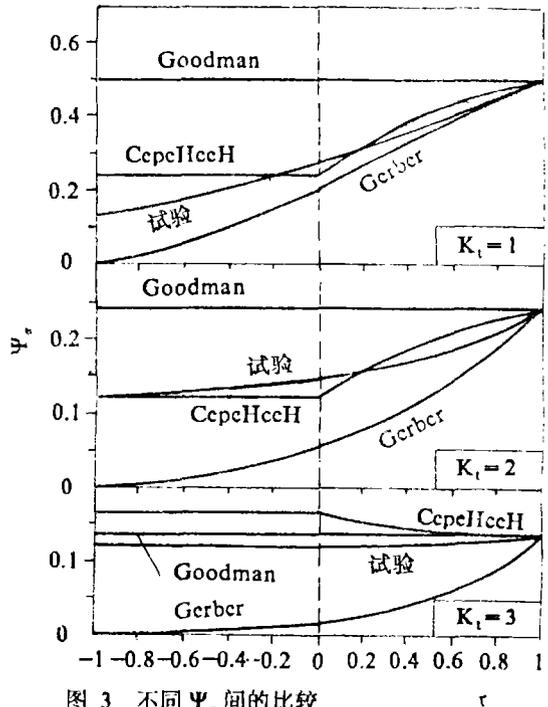


图 3 不同  $\Psi_0$  间的比较

3.1 用升降法对调质 40CrNiMo 钢在  $K_t=1, 2, 3$  情况下进行了  $r=-1, 0, 0.3$  的高频拉—压疲劳试验, 和  $r=1$  的静拉伸试验。所提供的疲劳极限及标准差数据准确可靠。

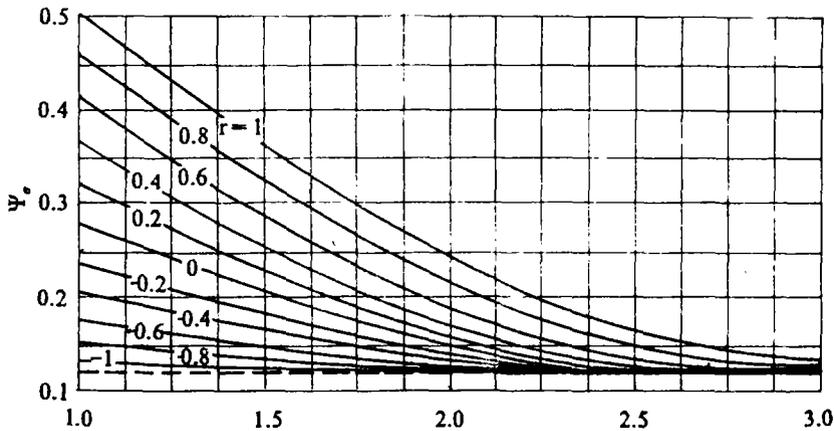


图 4 40CrNiMo 钢的  $\Psi_0-K_t$  曲线

3.2 在  $K_t=1, 2$  时, 推荐使用 CepeHceH 折线近似表达 40CrNiMo 钢的疲劳极限曲线, 而在  $K_t=3$  时, 推荐使用 Goodman 直线近似表达 40CrNiMo 钢的疲劳极限曲线。

3.3 平均应力影响系数  $\Psi_0$  受理论应力集中系数  $K_t$  的影响较大, 但在  $K_t$  接近或大于 3 时,  $\Psi_0$  趋于不变。因此, 在高度应力集中 ( $K_t > 3$ ) 情况下, 采用  $K_t=3$  时由 Goodman 直线求得的  $\Psi_0$ , 近似衡量平均应力对 40CrNiMo 钢的疲劳极限的影响是足够的。

3.4 由试验拟合曲线得到的  $\Psi_0-K_t$  曲线图, 为估计任意理论应力集中 ( $1 < K_t < 3$ ) 情况下的平均应力影响系数  $\Psi_0$  提供了方便。

[附注] 此项研究已通过部级鉴定。试验研究工作的参加者除本文作者外, 还有孟庆波、许德刚和乐金朝同志。

### 参 考 文 献

- (1) 徐灏. 疲劳强度设计. 机械工业出版社. 1981
- (2) 机械工业部郑州机械研究所. 疲劳设计参考资料. 1985
- (3) 高镇同. 疲劳性能测试. 国防工业出版社. 1980

## Mean Stress Effect Coefficient of 40CrNiMo Steel (O.Q.&T.)

Du yunhai Han lianyuan Ding Suidung  
(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** This paper introduces the tension and compression fatigue testing results of 40CrNiMo Steel (O.Q.870°C, T.650°C), gives its fatigue limits and suitable mean stress effect coefficients under the different theoretically stress concentration factor and stress ratio.

**Keywords:** Fatigue testing, mean stress effect coefficient.