

高低周复合载荷下的 P-S-N 曲线研究

王时越¹, 李建云¹, 刘其勇²

(1 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224; 2 昆明理工大学 基建处, 云南 昆明 650093)

摘要: 在高低周复合载荷作用下, 对 45 钢进行了 5 级应力水平下的疲劳寿命试验, 并对试验结果进行了统计分析, 得出了 P-N 图和 P-S-N 曲线. 结果表明: 高低周复合疲劳寿命满足对数正态分布, 每级应力水平下疲劳寿命的分散程度相同.

关键词: P-S-N 曲线; 金属疲劳; 疲劳断裂

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2006)02-0090-03

Investigation of P-S-N Curve under High-Low Cycle Complex Loading

WANG Shi-yue¹, LI Jian-yun¹, LIU Qi-yong²

(1 Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China;

2 Division of Campus Construction, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650293, China)

Abstract Experiment investigation of high-low cycle complex fatigue life was conducted under five different stress levels for 45 steel. The experimental results were statistically analyzed. The P-N plot and P-S-N curve were obtained. The result shows that high-low cycle complex fatigue life fits normal distribution and the spread of fatigue life is the same under different stress level.

Key words complex fatigue life; P-S-N curve; metal fatigue; fatigue fracture

0 引言

S-N 曲线和 P-S-N 曲线一般用于表征材料或构件的疲劳性能, 统称疲劳性能曲线. 其中 S-N 曲线是由中值疲劳寿命和相应的应力得出, 而 P-S-N 曲线是用成组试验法, 由给定存活率的寿命和相应的应力得出, 应用了数理统计的方法, 是一种更合理的表达形式. 文献 [1] 研究了 45 钢在高低周复合载荷下的 S-N 曲线, 该曲线表现出了与常规疲劳研究所不同的特性. 高低周复合加载是在低周载荷幅值上叠加高周循环分量, 它是一种真实载荷历程的疲劳简化, 比单一的低周或高周循环更接近构件的工作条件, 由于构成高低周复合疲劳的因素较多, 有低周应力幅、高低周应力比、高周循环次数和高周循环频率等, 其疲劳寿命的分散性更大, 如果仅用 S-N 曲线来作为产品寿命估算的依据, 则往往偏于危险, 因为这意味着有一半的产品在达到预期寿命之前就过早发生破坏. 因此, 本文拟采用图 1 所示的复合疲劳载荷谱, 来研究具有存活率 P 的 P-S-N 曲线, 为工程实际中零部件的设计提供试验依据.

表 1 45 钢的常规力学性能

Tab 1 Mechanical properties of 45 steel

屈服强度 σ_s / MPa	抗拉强度 σ_b / MPa	弹性模量 E / GPa	伸长率 δ / %	截面收缩率 ψ / %
412	712	207	17.6	50.26

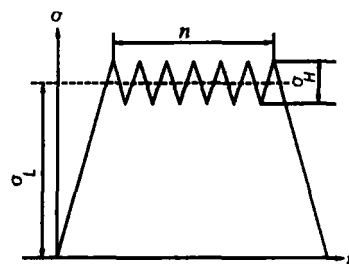


图 1 复合疲劳载荷谱

Fig.1 Load spectrum of complex fatigue

收稿日期: 2005-05-09. 基金项目: 云南省教育厅科研基金项目 (项目编号: No. 9841008).

第一作者简介: 王时越 (1965~), 男, 教授, 主要研究方向: 材料的疲劳断裂性能.

1 试验方法

试验用 45 钢光滑圆柱形试样, 其标距部分的尺寸为 $\phi 10\text{mm} \times 30\text{mm}$, 常规力学性能见表 1, 化学成分为: 0.45% C, 0.31% S, 0.67% Mn, 0.018% Si, 0.023% P. 试验在 MTS 810 材料试验系统上进行, 用 Testware 试验软件设定图 1 所示的复合疲劳载荷谱, 其中低周部分为梯形波, 在梯形波的峰值平台上叠加循环次数为 2Q 频率为 10Hz 高低周循环应力比 $\sigma_H / \sigma_L = 0.2$ 的高周三角波, 复合疲劳寿命以载荷谱块的次数来记数.

2 试验结果及分析

2.1 P-S 图分析

表 2 为图 1 所示的高低周复合载荷下用成组试验法所测得的 45 钢对数疲劳寿命试验数据, 每级应力水平下用了 10 个试样. 表中 p 为每级应力水平的母体存活率估计量:

$$p = 1 - \frac{i}{1+n} \quad (1)$$

式中: p 为存活率;

i 为按寿命大小排列的试样序号;

n 为每级应力水平下的试样数量.

从表 2 还可以看出, 5 种应力水平下对数疲劳寿命的标准差基本相同, 表明数据的分散程度并未因应力水平的降低而增大, 这与本研究采用的是在低周载荷上叠加高周循环分量的加载方式有关, 在该加载方式下, 应力水平与材料的屈服极限基本接近, 均较高, 疲劳寿命的分散性较小.

表 2 高低周复合载荷下 45 钢的对数疲劳寿命

Tab 2 Fatigue life of 45 steel under high-low cycle complex loading

系数 i	各级应力水平下的对数疲劳寿命 $\lg V_p / \text{cycle}$					存活率 p
1	3.99	4.16	4.30	4.48	4.65	0.9091
2	4.10	4.20	4.41	4.57	4.71	0.8182
3	4.13	4.23	4.47	4.64	4.77	0.7273
4	4.13	4.29	4.50	4.68	4.82	0.6364
5	4.17	4.33	4.53	4.71	4.85	0.5455
6	4.19	4.35	4.55	4.73	4.88	0.4545
7	4.21	4.37	4.58	4.75	4.90	0.3636
8	4.23	4.41	4.60	4.76	4.92	0.2727
9	4.30	4.47	4.63	4.78	4.94	0.1818
10	4.32	4.51	4.65	4.81	4.95	0.0909
标准差	0.097	0.114	0.107	0.102	0.101	
50% 存活率的对数疲劳寿命 $\lg V_{50}$	4.18	4.33	4.52	4.69	4.84	
99.9% 存活率的安全对数疲劳寿命 $\lg V_{99.9}$	3.87	3.98	4.19	4.38	4.53	

图 2 为用正态概率坐标纸绘出的 P-N 图, 从中可以看到, 5 级应力水平下的 P 与 $\lg V$ 之间的线性相关系数均不小于 0.9115, 由于 $n = 10$, 由文献 [2] 可知线性相关系数的起码值为 0.632, 可见试验结果均有很好的线性, 可用直线进行拟合, 这也表明在高低周复合载荷下 45 钢的疲劳寿命满足正态分布. 但当应力水平较低时, 非线性程度略高, 存活率在 30% ~ 70% 期间时, 数据点在回归直线之上, 存活率在 30% ~ 70% 范围之外时, 数据点在回归直线之下.

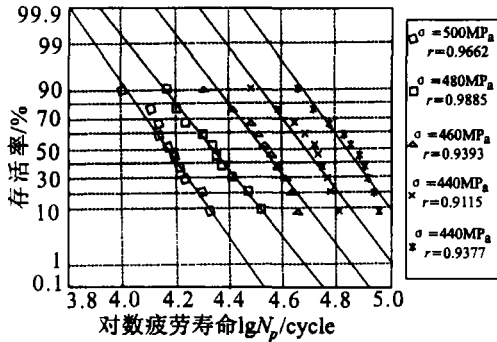


图2 P-N 图
Fig. 2 P-N plot

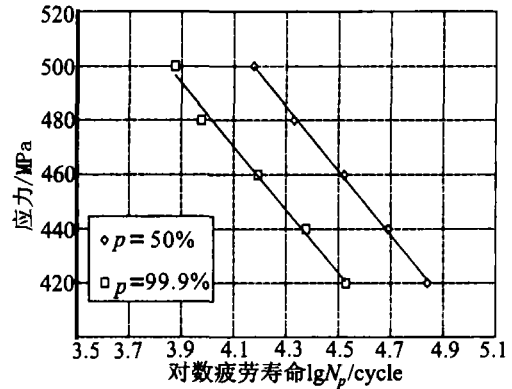


图3 P-S-N 曲线
Fig. 3 P-S-N curves

2.2 P-S-N 曲线分析

根据上述分析, 试验所得的对数疲劳寿命满足正态分布, 因此可用解析法由试验结果求出任一存活率下的高低周复合疲劳寿命 N_p , 其解析式为:

$$x_p = x + u_p \cdot s \quad (2)$$

$$N_p = \lg^{-1} x_p \quad (3)$$

式中: x_p 为存活率为 p 的对数疲劳寿命;

x 为对数疲劳寿命平均值;

u_p 为标准正态偏量;

s 为对数疲劳寿命标准差;

N_p 为存活率为 p 的疲劳寿命。

由 $p = 50\%$ 和 $p = 99.9\%$ 查表^[2]分别得出 $u_{50} = 0$, $u_{99.9} = -3.09$ 代入 (3) 和 (4) 式, 分别得到 5 级应力水平下的中值疲劳寿命 N_{50} 和安全寿命 $N_{99.9}$ (见表 2), 即可得出图 3 所示的 P-S-N 曲线, 在单对数坐标中为两条直线, 线性相关系数分别为 0.991 和 0.989, 其拟合方程为:

$$p = 50\% \text{ 时: } \sigma_L = -118.49 \lg N_p + 994.74 \quad (4)$$

$$p = 99.9\% \text{ 时: } \sigma_L = -116.12 \lg N_p + 946.56 \quad (5)$$

可见, 两条直线的斜率基本相同, 表明在单对数坐标中, 存活率为 99.0% 的 S-N 曲线和中值 S-N 曲线偏差相同的距离, 横向距离反映了安全寿命和中值寿命的偏差量。

3 结论

- 1) 高低周复合载荷作用下 45 钢的对数疲劳寿命满足正态分布;
- 2) 在高低周复合载荷作用下, 不同应力水平下的疲劳寿命分散程度基本相同;
- 3) 在高低周复合载荷作用下, 45 钢的 P-S-N 曲线在单对数坐标中表现出良好的线性, 中值 S-N 曲线和安全寿命的 S-N 曲线基本平行。

参考文献:

- [1] 王时越, 李华, 黄纬成, 等. 45 钢高低周复合疲劳性能及其累积损伤研究 [C] / 第七届全国疲劳与断裂学术会议论文集. 北京: 航空工业出版社, 1998: 336-339
- [2] 高镇同. 疲劳应用统计学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 129-162
- [3] 王栓柱. 金属疲劳 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1985: 155-190
- [4] 侯静泳, 蔡肇云. TC-1 钛合金高低周复合疲劳及累积损伤研究 [J]. 航空动力学报, 1992, 7(2): 135-138