S06钢疲劳性能及其概率特性

胡燕慧 钟群鹏 张 峥 韩邦成

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191) (北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 采用高频疲劳试验方法对新型高强度沉淀硬化马氏体不锈钢 S06钢中长寿命疲劳性能进行了测量,结果发现:随着应力水平降低,疲劳裂纹趋向于从试样内部萌生,裂纹内部萌生的试样寿命高于表面萌生的试样寿命,二者分散性很大. 为了对 S06钢长寿命疲劳数据概率特性进行正确的评估,主要对内部萌生机制下的数据进行了研究:利用定时截尾数据的极大似然估计方法和定时截尾数据的柯尔莫哥洛夫检验方法对长寿命区一定应力水平下的疲劳寿命概率分布情况进行了研究,结果表明疲劳寿命服从对数正态分布;采用考虑越出数据的极大似然方法对 S06钢应力寿命数据进行拟合,建立了 P-S-N 曲线模型;利用 P-S-N 曲线对 S06钢长寿命区疲劳强度概率分布进行了讨论.

关 键 词: S06钢; 疲劳强度; 定时截尾试验; 极大似然估计; P-S-N 曲线

中图分类号: O 346 2

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2009) 10-1206-04

Fatigue property and its probabilistic character of S06 steel

Hu Yanhui Zhong Qunpeng Zhang Zheng

(School of Marerials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Han Bangcheng

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract The fatigue property between 10^4 ~ 10^7 cycles of S06 steel, which is a new kind of precipitation-hardened stainless steel with high yield strength, was tested with PLG-100C high-cycle fatigue testing machine. With the decrease of stress amplitude, more fatigue crack initiated from subsurface. The fatigue life of specimens where fatigue crack initiates from subsurface is longer than that of specimens where fatigue crack initiates from surface at the same stress amplitude. To estimate the probabilistic character of fatigue property in high cycle range, the fatigue data of interior initiation was researched. maximum likelihood method and Kolmogorov test method considering life truncate data was used to research the distribution of fatigue life and result shows that fatigue life follows lognormal distribution in long life region; maximum likelihood method considering life truncate data was used to fit P-S-N curve, the P-S-N curve was used to discuss the distribution of fatigue strength in long life region.

Key words S06 steel; fatigue strength; truncate life test; maximum likelihood estimation; P-S-N curve

S06钢是一种新型马氏体沉淀硬化不锈钢,合金元素含量较高,通过 W, Mo, V, Nb等合金元素的碳化物析出强化得到良好的力学性能,广泛应用于高压液氧泵、高压燃气发生器和火箭发动机上,近年来开始用于航空航天关键零部件的制造. 本次试验所用 S06钢用于制造某航天器承受低幅交变载荷的零部件,因此需要得到 S06钢的长寿命疲劳性能数据,特别是其长寿命疲劳强度概率特性,以便对该构件进行疲劳可靠性设计[1]. 美国国家标准指出“不能通过试验的方法直接获得 N 次循环疲劳强度的概率分布”,因此只能采用间接方法来研究,文献[2]利用概率应

收稿日期: 2008-09-24

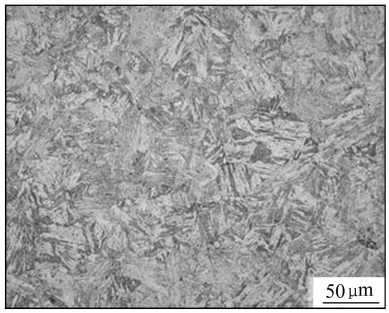
作者简介: 胡燕慧(1979-),女,河北蔚县人,博士生, orangehyh@126.com.

力寿命曲线来研究疲劳强度的概率分布取得了良好效果. 本文通过小子样疲劳试验方法来研究S06钢疲劳寿命概率分布, 提出了考虑越出数据的 P-S-N曲线拟合方法, 并且利用 P-S-N 曲线讨论了 S06钢长寿命区疲劳强度概率分布特性.

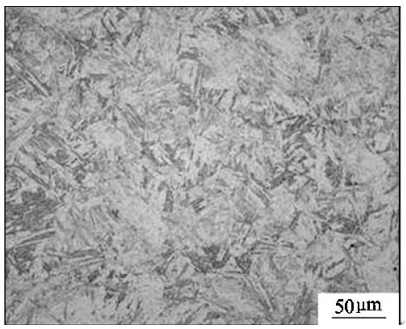
1　试验材料与试验方法

1. 1　试验材料

所研究的 S06钢取自锻造棒材, 化学成分为: 0. 066C, 0. 0043P, 0. 0065S, 5. 45N i; 0. 79W, 0. 18V, 0. 81M o, 14. 97C r, 0. 15N b. 热处理制度为 1 000℃ 1h+ 空冷 + 480℃ 1h, 热处理后的组织主要为板条状回火马氏体, 如图 1所示. 热处理后材料的基本力学性能如表 1所示.



a　棒材横向组织



b　棒材纵向组织

图 1　S06钢组织形貌

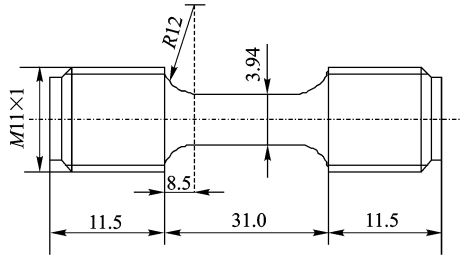
表 1　S06钢力学性能

力学性能参数	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	延伸率 δ_5 /%	面缩率 Ψ /%	冲击值 A_{KU2} / J
数值	1 220	1 024	19	70	158

1. 2　试验方法

疲劳试验是在 PLG-100C高频疲劳试验机上进行的, 采用轴向对称拉压循环, 应力比 $R = -1$, 试验频率在 130H z左右. 试样为狗骨形小试样, 尺寸如图 2所示.

由于此次试验材料有限, 因此试验设计的宗旨为在能够得到 S06钢疲劳性能试验数据的前提下尽可能采用小子样方法. 首先进行一定应力下



单位: mm

图 2　疲劳试样尺寸

的单点疲劳试验, 然后取较低应力水平进行成组试验, 为了节省人力、物力, 采用定时截尾寿命试验方法, 取截止寿命为 10^7, 当试验循环周次达到该寿命, 试样仍未破坏, 则终止该试样的试验. 加载从应力幅为 770 MPa开始, 选应力间隔为 30MPa逐渐下降, 到 590 MPa结束, 其中在 620MPa进行一组试验.

2　试验结果与讨论

试验结果见图 3, 观察试样断口发现在应力水平较高时裂纹基本从表面萌生, 随着应力水平下降逐渐出现裂纹从试样内部萌生的情况.

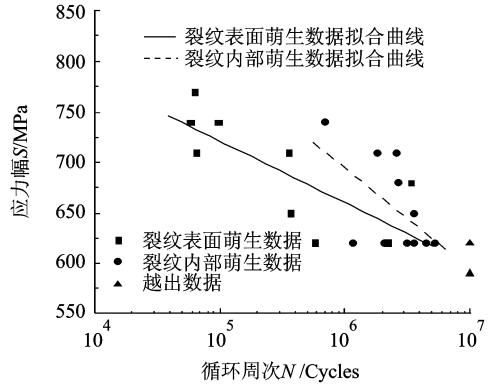


图 3　S06钢高频疲劳试验结果

从图 3可以看出裂纹内部萌生的数据和裂纹表面萌生的数据呈明显分散状态, 按照应力与对数寿命之间为线性关系来粗略拟合两种萌生状态数据, 发现在相同的应力水平下裂纹内部萌生试样的疲劳寿命较长.

最近的金属材料超高周疲劳研究表明, 高强度钢的疲劳裂纹萌生常表现为 2种机制: 表面裂纹萌生和内部裂纹萌生[3]. 由于本次疲劳试验的目的是分析 S06钢长寿命区疲劳性能及概率特征, 而大量试验结果表明应力水平较低寿命较长时, 高强度钢疲劳裂纹常常从内部萌生[4-5]. 因此本文在分析试验结果时根据裂纹萌生于表面还是内部将应力寿命数据加以区分, 主要分析裂纹内

部萌生情况下疲劳寿命的概率特征及裂纹内部萌生的 P-S-N 曲线, 然后根据 P-S-N 曲线来研究长寿命区疲劳强度的概率分布.

3 疲劳寿命概率特性

为了检验疲劳寿命的概率分布, 首先假设疲劳寿命服从对数正态分布, 利用定时截尾数据的极大似然估计方法 (MLE, Maximum Likelihood Estimation)来求均值和标准差的估计量, 有关计算已制成表格, 可直接查表得到 μ 和 σ 的极大似然估计量[6]. 然后通过定时截尾数据的柯尔莫哥洛夫检验方法来检验寿命数据是否服从对数正态分布.

在应力幅为 620MPa时共有 6个试样疲劳裂纹从内部萌生, 其寿命数据分别为: 1.145×10^6, 2.052×10^6, 3.163×10^6, 3.56×10^6, 4.486×10^6, 5.179×10^6, 另外此应力幅下有一个越出数据. 由于此应力水平下当寿命超过 1×10^6周次之后, 大部分试样疲劳裂纹从内部萌生, 因此认为越出试样在更高的循环周次下也发生裂纹内部萌生. 首先假设得到的疲劳寿命服从对数正态分布, 用定时截尾极大似然估计方法计算得到的对数疲劳寿命均值 μ 和标准差 σ 为: $\mu=15.1118$, $\sigma=0.7339$. 在此估计结果基础上, 截尾试验数据的柯尔莫哥洛夫检验结果表明: 取置信水平为 95%, 在 620MPa应力幅下得到的疲劳寿命数据服从对数正态分布.

4 P-S-N 曲线

由于在 620MPa应力水平下得到的裂纹内部萌生的试验数据服从对数正态分布, 因此可以结合其它几个应力水平的裂纹内部萌生试验数据, 采用极大似然估计法拟合 P-S-N 曲线[7]. 为了将越出数据也加以利用, 采用考虑定时截尾数据的拟合方法.

假设 P-S-N 曲线可以用幂函数表达式表示:

$$S^{m_p}N_p = C_p \tag{1}$$

其中, m_p和 C_p代表可靠度为 p 时的参数; N_p为应力幅为 S时可靠度为 p 的寿命. 上式两边取自然对数, 设 $X_p=\ln N_p$, 当 $p=50\%$, $\mu=X_{0.5}=\ln N_{0.5}$, 则有

$$\mu(S) = \ln N_{0.5} = \ln C - m\ln S \tag{2}$$

由于疲劳寿命服从对数正态分布, 则有

$$X_p = \mu(S)+u_p\sigma(S) = \frac{1}{u_p}\left(\ln\frac{C_p}{C} - m_p\ln S + m\ln S\right) \tag{3}$$

假设在应力幅 S_r下进行了一组试验, 其对数疲劳寿命的均值 μ_r和标准差 σ_r的估计量为

$$\mu_r = \ln C - m\ln S_d \tag{4}$$

$$\sigma_r = \frac{1}{u_p}\left(\ln\frac{C_p}{C} - m_p\ln S_r + m\ln S_r\right) \tag{5}$$

由式 (1) ~ 式 (5)得

$$\mu(S) = \mu_r + m\ln\frac{S_r}{S} \tag{6}$$

$$\sigma(S) = \sigma_r + \frac{m}{u_p}\ln\frac{S}{S_r} + \frac{m_p}{u_p}\ln\frac{S_r}{S} \tag{7}$$

当 $u_p=-1$时, $p=84.1\%$, 记 $m_{0.841}=m_s$,

$$\sigma(S) = \sigma_r - m\ln\frac{S}{S_r} - m_s\ln\frac{S_r}{S} \tag{8}$$

取似然函数

$$L(m,m_s) = \prod_{i=1}^{n}[f(\theta)]^{\delta_i}[1-F(\theta)]^{1-\delta_i} = \prod_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i(S_i)}e^{-\frac{[X_i-\mu_i(S_i)]^2}{2\sigma_i^2(S_i)}}\right]^{\delta_i}\cdot\left[\int_{X_i}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i(S_i)}e^{-\frac{[X-\mu_i(S_i)]^2}{2\sigma_i^2(S_i)}}dX\right]^{1-\delta_i} \tag{9}$$

其中

$$\delta_i = \begin{cases}1 & \text{如果第 } i\text{个试样断裂}\\ 0 & \text{如果第 } i\text{个试样越出}\end{cases} \tag{10}$$

式 (9)中的被积函数可以展开, 然后两边取自然对数, 舍去常数项, 得到函数

$$F = \delta_i\sum_{i=1}^{r}\ln\sigma + \delta_i\sum_{i=1}^{r}\frac{[X_i-\mu_i(S_i)]^2}{2\sigma_i^2(S_i)} - (1-\delta_i)\cdot\sum_{j=1}^{n-r}\ln\left\{-\frac{X_0-\mu(S_i)}{\sigma_i(S_i)} + \frac{1}{6}\left[\frac{X_0-\mu(S_i)}{\sigma_i(S_i)}\right]^3 - \frac{1}{10}\left[\frac{X_0-\mu(S_i)}{\sigma_i(S_i)}\right]^5 + \frac{1}{336}\left[\frac{X_0-\mu(S_i)}{\sigma_i(S_i)}\right]^7 + \frac{1}{2}\right\} \tag{11}$$

将式 (6)和式 (8)代入式 (11)后, 函数 F 含有两个未知参数 m 和 m_s. 当 F 取最小值时, 似然函数取最大值. 用 Matlab求解参数 m 和 m_s, 初值用图估计法求出. 然后用 Matlab约束优化功能得到最优解, 其中根据应力水平越低, 疲劳寿命分散性越大的基本规律, 得到一个约束条件:

$$m > m_s \tag{12}$$

根据 $\sigma(S)>0$, 可得到另一约束条件.

计算得到的不同存活率下的 P-S-N 曲线见图 4, 方程为

$$\ln N = \begin{cases}62.2222-7.327\ln S & p=50\%\\ 51.6281-5.8257\ln S & p=90\%\\ 36.6873-3.7083\ln S & p=99.9\%\end{cases} \tag{13}$$

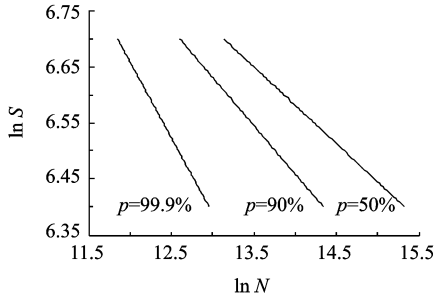


图 4　S06钢对数 *P-S-N* 曲线

如果不区分裂纹萌生机制, 用同样的拟合方法对所有数据进行拟合, 则得到的 m 与 m_s 几乎相等, 即不同应力水平下的疲劳寿命方差相等, 这显然不符合实际情况. 因此为了对 S06钢长寿命疲劳性能作出准确的评估, 应该将裂纹萌生机制加以区分.

5　疲劳强度概率分布研究

利用 P-S-N 曲线可以得到任一寿命时的一组疲劳强度数据, 这里取寿命为 10^7周次时对应标准正态偏离为 - 3, - 2 9, - 2 8, …, 3的一系列 P-S-N曲线族上的相应的应力值作为疲劳强度子样.

由于 P-S-N 曲线上任意一点疲劳强度破坏率等于疲劳寿命破坏率, 因此这些疲劳强度值的累积失效率已知, 疲劳强度数据并非随机抽取的子样[2]. 因此在研究疲劳强度概率分布时, 不能使用一般统计学方法来进行检验, 这里采用比较拟合优度的方法来讨论疲劳强度的概率分布. 从以下 4种常用的统计分布中选择良好假设分布: 正态分布、对数正态分布、威布尔分布和指数分布. 利用极大似然方法估计这几种分布的参量, 用得到的各种分布的分布函数值 $F(x_i)$与实际的累积失效率 P_i的均方误差来评估各种假设分布的拟合优度, 计算结果列于表 2中.

表 2　S06钢 10^7周次疲劳强度的几种假设分布的参数估计与均方误差

分布类型	分布函数表达式	特征参数	均方误差
正态分布	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}dt$	μ= 519 7456 σ= 124 0240	0 0128
对数正态分布	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(\ln t-\mu)^2}{2\sigma^2}}dt$	μ= 2 7019 σ= 0 1146	0 0194
威布尔分布	$1-e^{-\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^b}$	x_0= 0 a= 567 4097 b= 5 1369	0 0097
指数分布	$1-e^{-\frac{x}{t}}$	t= 519 7456	0 1128

均方误差表达式为

$$E=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[\hat{F}(x_i)-P_i]^2 \qquad (14)$$

从均方误差的比较结果来看, 威布尔分布对 10^7周次的疲劳强度数据的拟合效果最好, 指数分布拟合效果最差. 用同样的方法对寿命为 10^8和 10^9周次的疲劳强度的概率分布情况进行分析, 得到了同样的结果.

6　结　论

1) 高频疲劳试验结果表明 S06钢在高应力水平下裂纹主要从表面萌生, 在低应力水平时大多从内部萌生, 两种裂纹萌生机制数据的分散性较大.

2) 为了估算长寿命疲劳强度, 主要对裂纹内部萌生数据用带定时截尾数据的极大似然方法进行处理, 结果表明一定应力水平时的疲劳寿命服从对数正态分布.

3) 威布尔分布对一定寿命下的疲劳强度的拟合效果最好.

参考文献 (**References**)

[1] 王磊, 刘文珽. 飞机结构疲劳关键部位损伤与可靠性评定技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(1): 84-87
Wang Lei, Liu Wenting. Technology on evaluating damage and reliability of aircraft structure fatigue critical parts[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(1): 84-87(in Chinese)

[2] 高镇同, 傅惠民. 疲劳强度的概率分布和疲劳强度特征函数[J]. 机械强度, 1985, 2: 27-34
Gao Zhentong, Fu Huimin. The probabilistic distribution and characteristic function of fatigue strength[J]. Journal of Mechanical Strength, 1985, 2: 27-34(in Chinese)

[3] Nishijima S, Kanazawa K. Stepwise S-N curve and fish-eye failure in gigacycle fatigue[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1999, 22: 601-607

[4] Marines I, Bin X, Bathias C. An understanding of very high cycle fatigue of metals[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 1101-1107

[5] Bayraktar E, Garcias IM, Bathias C. Failure mechanisms of automotive metallic alloy in very high cycle fatigue range[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28: 1590-1602

[6] 中国电子技术标准化研究所. 可靠性试验用表[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987: 9
China Electronic Standardization Institute. Tables for reliability test[M]. Beijing: National Defence Industrial Publishing Company, 1987: 9(in Chinese)

[7] Jing Ling, Jwo Pan. A maximum likelihood method for estimating P-S-N curves[J]. International Journal of Fatigue, 1997, 19(5): 415-419

(编　辑: 王玉娟)