

在二级增载或减载应变控制条件下的304不锈钢低周疲劳寿命的估算

张 安 哥*

(工程力学研究室)

摘 要

本文用作者在文献〔1〕中提出的非线性连续损伤模型对304不锈钢在应变控制条件下载荷幅值变动较大的二级增载、二级减载低周疲劳实验数据进行了计算,并将结果与Bui-Quoc, T教授的原模型计算值作了比较。结果表明,新模型的计算精度仍然高于原计算模型。

一、引 言

早在七十年代初,从事高温低周疲劳现象研究的加拿大学者Bui-Quoc, T. 教授便提出了一个建立在唯象学方法基础上的连续损伤模型〔2〕。该模型最初是用于应力控制条件下材料的损伤和寿命估算,后来又成功地推广到应变控制,高温蠕变以及疲劳和蠕变交互作用影响下的材料损伤及寿命估算〔3,4〕,解决了不少工程实用问题。最近,作者将温度和应变率(或频率)两个对疲劳寿命有重要影响的参数引入了Bui-Quoc教授的使用寿命估算方程〔5〕,从而将单变量(载荷)的寿命估算公式发展成三变量(载荷、温度、应变率或频率)的计算公式,大大扩充了该模型的应用范围。

但是,在估算多级载荷谱下材料的剩余寿命时,该模型遇到了困难,估算值与实验值相去甚远,为此,Bui-Quoc教授引入了一个所谓“交互作用影响参数”以弥补二者之间的差距。尽管引入该参数后,估算值尚能较好地吻合实验数据,然而,从近年来发展起来的连续损伤力学的观点来看,该参数的引入似嫌理由不足,缺乏明确的物理背景。为解决此矛盾,作者基于材料损伤增量与材料性能劣化之间存在着非线性关系的假设,重新推导和修正了

*本文于1988年5月7日收到,系作者在加拿大Montreal大学访问学者期间所写。

Bui-Quoc教授提出的损伤演变方程〔1〕，使原方程成为修改后的方程的特殊情况，即速伤增量与材料性能劣化线性相关的情况，从而解决了在多级载荷谱下材料损伤和寿命的估算问题而不必引入所谓的“交互作用影响参数”。修改后的模型不仅思路明确，而且应用也更为方便。在文献〔1〕中，用该模型计算了304不锈钢在三级、五级增载以及三级、五级减载，应变控制条件下的剩余寿命，结果比较符合实测值，精度也明显优于原方法。

按照Bui-Quoc教授的经验，对于二级载荷谱，当载荷变动较大时，初级载荷对次级载荷作用下的材料剩余寿命影响较大，寿命估算亦有一定的难度。为了再次考察新模型的有效性，本文对304不锈钢试样在载荷变动较大的二级增载（ $\Delta\epsilon_1 = 0.5\%$ ， $\Delta\epsilon_2 = 1.5\%$ ， $\Delta\epsilon_1$ 为初级载荷， $\Delta\epsilon_2$ 为次级载荷）和二级减载（ $\Delta\epsilon_1 = 1.5\%$ ， $\Delta\epsilon_2 = 0.5\%$ ）应变控制下的对称循环疲劳实验数据进行了计算，所有实验数据均取自文献〔6〕。

二、计算模型简介

设损伤变量D与无量纲材料瞬时强度 γ_c 之间存在着如下非线性增量关系〔1〕，

$$\Delta D = \mu \Delta(\gamma_{c0} - \gamma_c)^{\alpha'} \quad (1)$$

其中 γ_c 由下式定义：

$$\gamma_c = 1 + \ln(\Delta\epsilon_c / \Delta\epsilon_0)$$

式中 $\Delta\epsilon_c$ 、 $\Delta\epsilon_0$ 分别是应变控制条件下，对称循环疲劳的材料瞬时疲劳强度和无损材料的疲劳强度， $\gamma_{c0} = 1$ ，即 γ_c 的初值， μ 是非负的比例常数， α' 是依赖于载荷水平的材料参数。

而 γ_c 与无量纲载荷水平 γ 之间存在着如下关系〔2〕：

$$\frac{d\gamma_c}{dn} = -\frac{\gamma^b}{k}(\gamma - \gamma_c)^2 \quad \gamma > 1 \quad (2)$$

其中 n 是循环周次， k ， b 是应变率与温度依换的材料参数〔5〕，而无量纲载荷水平

$$\gamma = 1 + \ln(\Delta\epsilon / \Delta\epsilon_0)$$

其中 $\Delta\epsilon$ 是全应变变程。

由边界条件： $n = 0$ （或 $D = 0$ ）时， $\gamma_c = \gamma_{c0} = 1$

$$n = N \text{（或 } D = 1 \text{）时， } \gamma_c = \gamma_{ce} \quad (3)$$

其中 N 是材料破坏时的循环数， γ_{ce} 是材料破坏时的 γ_c 值。

可导出寿命分数函数

$$B = \frac{n}{N} = \frac{\gamma - \gamma_{ce}}{D^{-\alpha}(\gamma - 1) + (1 - \gamma_{ce})} \quad (4)$$

以及损伤演变方程

$$D = \left[1 + \left(\frac{1}{B} - 1 \right) \left(\frac{\gamma - \gamma_{ce}}{\gamma - 1} \right) \right]^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (5)$$

式(4), (5)中 $\alpha = \frac{1}{\alpha'}$ 、特别, 当 $\alpha = 1$ 时, 即得到Bui-Quoc教授的损伤演变方程。详细推导过程请参看文献[1]。

对于不同的载荷水平, α 并非常数, 可由下式求出 α :

$$\alpha = C_1(\gamma_u - \gamma) + C_2 \quad (6)$$

式中 $\gamma_u = 1 + \ln(2\varepsilon_u/\Delta\varepsilon_s)$, ε_u 是拉伸断裂真应变。 C_1 、 C_2 是材料常数, 对304不锈钢, 由实验求得 $C_1 = -0.4$, $C_2 = 3.0$ [1]。

三、剩余寿命估算

为方便计, 分别用 γ_1 、 γ_2 以及 N_1 、 N_2 表示初级、次级载荷和相应载荷作用下的疲劳寿命, 用 n_1 表示在 γ_1 作用下所施加的循环周次, n_2 表示在 γ_2 作用下的剩余寿命, 则在初级载荷结束时的寿命分数为

$$B_1 = \frac{n_1}{N_1} \quad (7)$$

相应的损伤度用 D_1 表示, 则

$$D_1 = \left[1 + \left(\frac{1}{B_1} - 1 \right) \left(\frac{\gamma_1 - \gamma_{co}}{\gamma_1 - 1} \right) \right]^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (8)$$

D_1 也即次级载荷 γ_2 作用开始时的损伤度, 将 D_1 代入(4)式, 即得到在次级载荷 γ_2 作用下有相同损伤度 D_1 时的相应寿命分数 B_c :

$$B_c = \frac{\gamma_2 - \gamma_{co}}{D_1^{-\alpha}(\gamma_2 - 1) + (1 + \gamma_{co})} \quad (9)$$

可得到在 γ_2 作用下的寿命分数 B_2 为:

$$B_2 = 1 - B_c \quad (10)$$

则在 γ_2 作用下剩余寿命的估算值 n_2 为:

$$n_2 = B_2 \cdot N_2 \quad (11)$$

在二级载荷谱情况下, 损伤度 D 随寿命分数 B 而变化的直观过程可参见图1、图2。其中图1为二级减载情况, 图2为二级增载情况。图中虚线按方程(5)绘出, 而实践分别表示310试样和333试样的损伤度 D 随寿命分数 B 的演变途径(如图中箭头所指)。当 γ_1 作用结束时, D - B 曲线走到图中的 A_1 点。当载荷由 γ_1 变到 γ_2 时, 则 γ_2 作用开始时的损伤应与 γ_1 结束时的损伤相同, 在图中则表现为 A_2 点与 A_1 点的纵坐标值相同。然后在次级载荷的作用下, 材料的损伤度 D 又继续沿着曲线 A_2A_3 变化, 其剩余寿命分数如图中 B_2 所示。

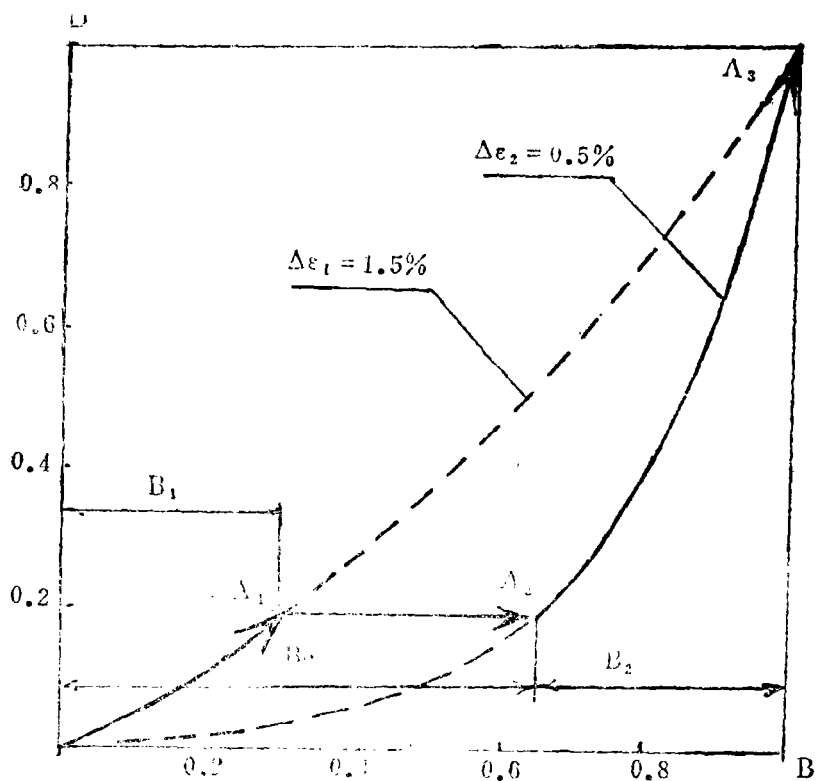


图1 实线为二级
减载情况下
310试样的
D-B演变
曲线(按方
程(5)绘出)

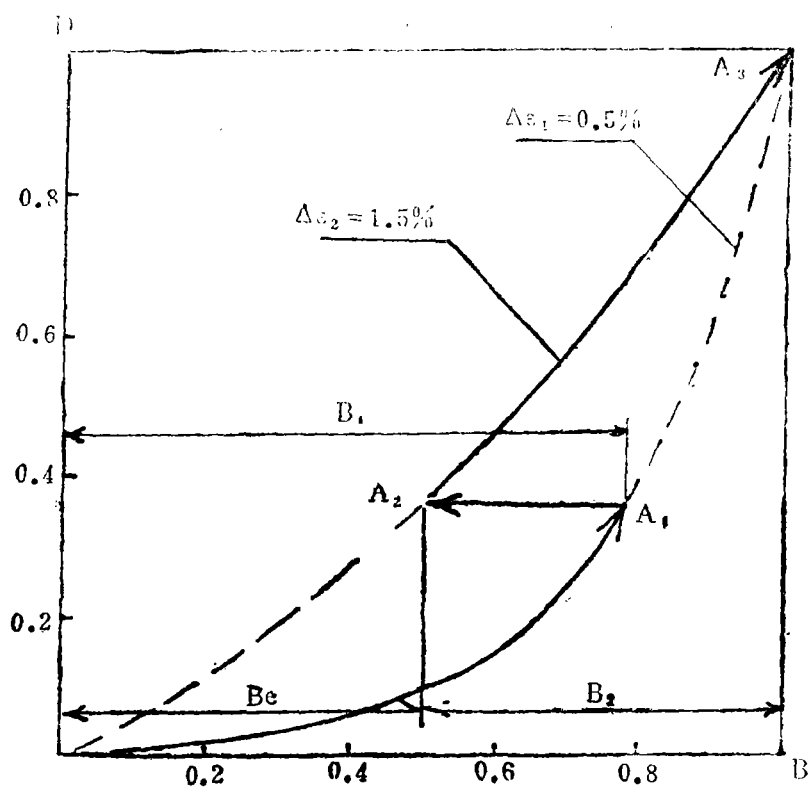


图2 实线为二级
增载情况下
333试样的
D-B演变
曲线(按方
程(5)绘出)

四、计算结果与讨论

所有实验数据均取自文献〔6〕。实验在空气与室温中进行。304不锈钢的力学性能见表1。

表1 304不锈钢的材料力学性能

弹性模量 E GPa	屈服极限 σ_y MPa	强度极限 σ_u MPa	断裂真应变 ϵ_u %	耐久极限 $\Delta\epsilon_u$ %
173	227	607	135	0.253

表1中对称循环疲劳耐久极限 $\Delta\epsilon_u$ 的值按文献〔7〕中提供的简便算法求出。

实验载荷谱为图3所示。二级增载系列为：初级 $\Delta\epsilon_1 = 0.5\%$ ，次级 $\Delta\epsilon_2 = 1.5\%$ 。二级减载系列为：初级 $\Delta\epsilon_1 = 1.5\%$ ，次级 $\Delta\epsilon_2 = 0.5\%$ 。二级载荷之间的变化值均为1.0%。在恒幅载荷作用下相应的疲劳寿命分别为： $\Delta\epsilon = 0.5\%$ 时， $N = 42000$ 周； $\Delta\epsilon = 1.5\%$ 时， $N = 700$ 周。方程（5）中的 γ_{ec} 值可按式计算〔2〕：

$$\gamma_{ec} = \left(\frac{\gamma}{\gamma_u} \right)^8 \quad (12)$$

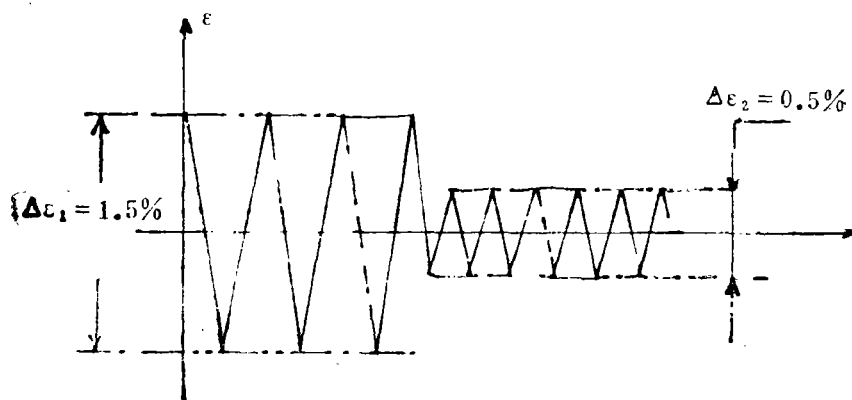
按以上值求得的304不锈钢试样的剩余寿命 n_2 ，寿命分数和 $\sum_{i=1}^2 B_i = \sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i}$ 和相对误差 e_r 见表2和表3。为比较起见，表中还给出了按Bui-Quoc引入“交互作用影响参数”之后的方法所计算的相应值以及实验数据。 e_r 表示剩余寿命 n_2 的估算值与实测值的相对误差

$$e_r = \frac{|n_2' - n_2|}{n_2'} \quad (13)$$

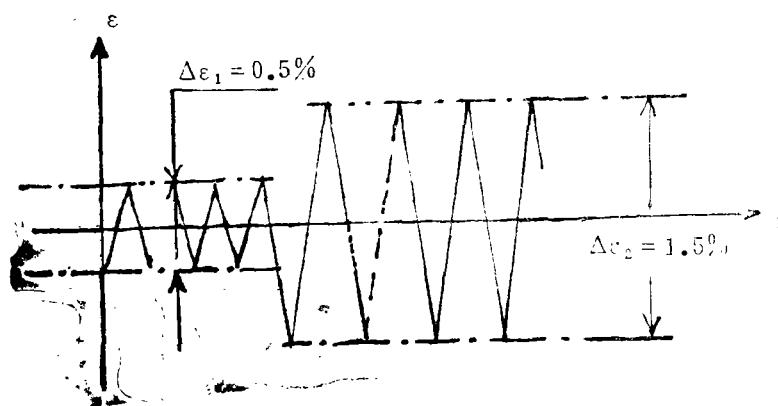
式中 n_2' 是实测值， n_2 是估算值。

由表2，表3中可以看出，新模型中的寿命分数和 $\sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i}$ 对于减载，变化范围在0.48~0.87之间（实验数据在0.43~0.87之间），均小于一，对于增载，变化范围在1.10~1.37之间（实验数据在1.20~1.39之间），均大于一，这与304不锈钢在三级、五级减载或增载情况下的结果相类似，是符合近年来发现的多级疲劳载荷谱作用下低周疲劳现象的一般规律的。与工程中常用的寿命分数总和法相比〔8〕，新模型非线性所带来的寿命分数和的差异表现在图1，图2中的 A_1A_2 线段部份。显然，新模型比寿命分数总和法要精确得多。

此外，由表中相对误差 e_r 一栏中可以看出，与原模型——即按引入“交互作用影响参数”的方法相比，对二级减载情况，新模型的计算误差均小于原模型的误差，而对于二级增载情况，除了312号试样之外，新模型的计算误差也均小于原模型的误差。由此可见，即使在载荷变化较大的情况下，新的模型计算精度也明显优于原计算模型。



(a)



(b)

图3 二级载荷谱

a: 二级减载

b: 二级增载

表 2

二级减载疲劳载荷 ($\Delta\varepsilon_1 = 1.5\%$, $\Delta\varepsilon_2 = 0.5\%$)

试样号	实 验 数 据		新 模 型			原 模 型		
	$\sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i}$	n_2	$\sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i}$	n_2	e_r	$\sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i}$	n_2	e_r
278	0.73	3780	0.78	5760	0.52	0.81	7080	0.87
310	0.50	8400	0.63	13860	0.65	0.72	17640	1.10
311	0.43	11760	0.63	20160	0.71	0.75	25200	1.14
322	0.61	4620	0.71	8400	0.82	0.76	10740	1.32
327	0.53	5460	0.66	10920	1.0	0.73	13860	1.54
335	0.64	23940	0.79	30240	0.26	0.81	31080	0.30
336	0.87	2940	0.87	3000	0.02	0.89	3600	0.22
339	0.55	16800	0.48	13860	0.18	0.75	25200	0.5

表 3

二级增载疲劳载荷 ($\Delta\varepsilon_1 = 0.5\%$, $\Delta\varepsilon_2 = 1.5\%$)

试样号	实 验 数 据		新 模 型			原 模 型		
	$\sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i}$	n_2	$\sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i}$	n_2	e_r	$\sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{N_i}$	n_2	e_r
277	1.25	805	1.10	697	0.13	1.09	692	0.14
279	1.37	840	1.16	692	0.18	1.14	680	0.19
312	1.24	399	1.37	482	0.22	1.29	431	0.08
323	1.39	728	1.29	659	0.09	1.25	628	0.14
325	1.20	679	1.22	683	0.006	1.19	664	0.02
326	1.37	609	1.36	603	0.01	1.29	554	0.09
333	1.31	364	1.30	356	0.02	1.23	309	0.15

致谢：作者在整个研究工作中曾得到Bui-Quoc, T. 教授的帮助和孙训方教授的指点，在此深表谢意。

参 考 文 献

- 〔1〕 张安哥,多级荷载谱下低周疲劳损伤演变方程及寿命估算,西南交大学报(已录用), 1988.
- 〔2〕 Bui-Quoc, T., et al, Cumulative Fatigue Damage under Stress Controlled Conditions, Journal of Basic Engineering, Transactions of ASME, Vol. 93, 1971
- 〔3〕 Bui-Quoc, T., High Temperature Creep-fatigue Damage Evaluations, 5th International Conference on Experimental Mechanics, SESA Montreal, Canada, 1984
- 〔4〕 Bui-Quoc, T, et al, Elevated Temperature Fatigue-creep Behavior of Nickel-base Superalloy IN625, ASTM STP 942, 1988
- 〔5〕 Zhang Ange, Bui-Quoc, T, et al, A Procedure for Low Cycle Fatigue Life Prediction for Various Temperatures and Strain Rates, Applied Mechanics and Engineering Sciences Conference, ASME and SES, University of California, Berkeley, USA, 1988
- 〔6〕 Charatoire, J. L., Bui-Quoc, T., et al, Etude du Comportement en Dommage Cumulatif a Plusieurs Niveaux de L'acier Inoxydable Type 304, Report Tech. Ep 79-R-2, 1978
- 〔7〕 Bui-Quoc, T., et al, Cumulative Fatigue Damage under Strain Controlled Conditions, Journal of Material, Vol. 6, No. 3, ASTM, 1971
- 〔8〕 孙训方,蠕变与疲劳共同作用下结构元件的寿命估算,西南交大, 1986

Life Prediction of 304 Stainless Steel under
Two Step Increased or Decreased Strain
Controlled Low Cycle Fatigue

Zhang Ange

Engineering Mechanics Section Civil Engineering Department

Abstract

The remainder lives of 304 stainless steel specimens under two step increased or decreased strain controlled low cycle fatigue are calculated in this paper. The predicted technique is based on the modified non—linear continuous damage model previously developed for fatigue damage evaluation[1]. The analytical results are compared with the original model proposed by Prof. Bui-Quoc, T., It shows that, the modified model predicts fatigue lives with a higher accuracy than the original one.