

文章编号: 1000-6893(2000)02-0171-04

材料循环应力- 应变行为及循环应变寿命的研究

王斌团, 杨庆雄

(西北工业大学 飞机系, 陕西 西安 710072)

STUDY ON CYCLIC STRESS-STRAIN BEHAVIOR AND CYCLIC STRAIN-LIFE RELATION OF MATERIALS

WANG Bin-tuan, YANG Qing-xiong

(Department of Aircraft, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 材料的循环应力- 应变行为以及循环应变与寿命的关系是材料的主要疲劳特性, 用局部应力- 应变法计算构件疲劳裂纹形成寿命时要用到它们。使用这些疲劳特性的不同描述方法给寿命计算带来的误差差别很大。依据试验结果对目前的一些描述方法作出比较, 并指出较为合理的选择。

关键词: 屈服强度; 循环应力- 应变; 循环硬化/软化; 疲劳寿命

中图分类号: O346.2; V250.2 **文献标识码:** A

Abstract: Many experimental investigations were conducted on cyclic stress-strain curves for seven types of airframe materials TC4, LY12CZ, LC4CS, LC9CS, LC9CgS3, 30CrMnSiA, and 30CrMnSiNi2A. For each kind of material, four kinds of strain ratios, six strain or stress levels for each strain ratio are tested. Based on the above test data, the equivalent strain-life curves for these materials are deduced. A new method is presented for describing the cyclic stress-strain behavior at any strain ratio, strain level and number of cycles. And a comparison is made among predicted fatigue lives by using different options of fatigue property descriptions and fatigue life predicting approaches. As a result, this paper suggests a practical approach for fatigue life prediction. Some conclusions are drawn as: (1) for the materials above, there are no real "stable" hysteresis curves or "saturation" phenomena in cyclic transient stress-strain relationship existing; (2) it is not reasonable to classify a kind of material as wholly cyclic hardening or softening, because it may have contrary behavior under different strain ratios, strain amplitudes and cycles; (3) with enough experimental data, fitting a series of formulas to describe the transient hysteresis curve at any condition is practicable; (4) it is not acceptable to adopt the widely used Manson-Coffin formula to predict the fatigue life under asymmetric cyclic strain; (5) to predict the fatigue life by using the local stress-strain method, the option of the transient stress-strain curve combined with the equivalent strain-life curve may be more reasonable at present.

Key words: yield strength; cyclic stress-strain; cyclic hardening/softening; fatigue life

用局部应力- 应变法来计算构件的疲劳裂纹形成寿命时, 需要用到金属材料的疲劳特性: 循环应力- 应变行为及循环应变- 寿命关系。对这些疲劳特性的描述有些不同的方法。目前, 有些用得较多的方法是: 1 循环应力- 应变行为采用“饱和”曲线(即稳态应力- 应变曲线), 认为所有循环次数的应力- 应变滞后曲线都一样, 并以稳态应力- 应变曲线位于单调应力- 应变曲线之上或之下来简单判定该材料为循环应变硬化或软化; 2 循环应变- 寿命关系用 Manson-Coffin 公式描述

$$E = \frac{R_f}{E} (2N_f)^b + E_f (2N_f)^c \quad (1)$$

这是对称循环下的关系, 对于非对称加载, 有人提出加以平均应力 R_m 和平均应变 E_m 的修正

$$E = \frac{R - R_m}{E} (2N_f)^b + (E - E_m) (2N_f)^c \quad (2)$$

以上作法是否符合实际, 本文将依据实验结果得出结论。

1 循环应力- 应变行为

对于 4 种常用航空材料 LY12CZ, LC4CS, 30CrMnSiA 及 30CrMnSiNi2A 并不存在实际的循环“饱和”状态^[1~5]。本文的疲劳实验, 也证实了这点。因此, 合理的作法应该用瞬态应力- 应变曲线来描述材料的循环应力- 应变行为, 也就是

要考虑循环硬化或软化。由于材料进入塑性累计反复(一个循环为两个反复)次数 N_R 的不同将会造成不同的硬化或软化量(即屈服强度增量 $\Delta\sigma_{YSI}$, 致使每次塑性循环的 R - E 曲线都会有所不同。本文通过实验直接测算出屈服强度增量 $\Delta\sigma_{YSI}$ 与材料进入塑性累计反复次数 N_R 之间的关系曲线

(1) 实验方法 用 TC4, LC9 两种材料在不同的应变比和应变幅下做等幅疲劳实验。详细记录每种应变比 R_E 、应变幅 E 下, 各个设定循环数时滞后环的 (R, E) 点值。为了衡量硬化或软化量, 需设定一个基准即“骨架曲线”。针对试验及实际应用中有各不相同的应变比、应变幅值, 为统一起见采用双倍单调拉伸曲线作为所谓“骨架曲线”, 而不用第 1 次进入塑性的拉、压反复作为“骨架曲线”^[2,4]。这样处理的优点在于对任何应变水平都有确定一致的基准曲线, 且拉压统一。对循环应力-应变曲线采用 Jhansale^[6] 的假设, 即塑性段曲线形状不变, 只是由于屈服强度增量的不同而使弹性直线段的长短有变化。于是给出屈服强度增量 $\Delta\sigma_{YSI}$ (Yield Strength Increment) 的定义为:

$\Delta\sigma_{YSI} = 1/2$ (当前循环应力变程—相同应变变程下骨架曲线的应力变程)

修正的 Ramberg-Osgood 关系^[7]

$$E = \begin{cases} R/E & R \leq R_y \\ R/E + \left(\frac{R - R_y}{K'}\right)^{1/n'} & R > R_y \end{cases} \quad (3)$$

只要认为其中的屈服强度 R_y 是变化的, 该假设即与它是一致的。

对每种应变比和应变幅下的众多滞后环, 按以上方法测得对应的 $\Delta\sigma_{YSI}-N_R$ 数据, 再采用两级拟合的方法直接对之作出拟合。先对一个 R_E 和 E 下的数据作 $\lg N_R$ 的多项式拟合

$$\Delta\sigma_{YSI} = A_1 + A_2 \lg N_R + A_3 (\lg N_R)^2 + A_4 (\lg N_R)^3 \quad (4)$$

式中: $A_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为第 1 级拟合系数。再将各组 $A_i (i=1, 2, 3, 4)$ 对 R_E 和 E 作 2 级拟合

$$A_i = (1 \quad E \quad E^2) [a]_i (1 \quad R_E \quad R_E^2 \quad R_E^3)^T \quad (5)$$

$[a]_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为 4×4 阶拟合系数矩阵, 每种材料各有一套。要某一种 R_E 和 E 下的 $\Delta\sigma_{YSI}-\lg N_R$ 曲线, 可将 R_E 和 E 数值代入式(5)得 $A_i (i=1, 2, 3, 4)$, 再将它们代入式(4)即得到 $\Delta\sigma_{YSI}-\lg N_R$ 关系式。这样拟合得到的曲线, 如图 1 所示。图 1(a) 给出的是 TC4 同一 R_E 下 5 种 E 的 $\Delta\sigma_{YSI}-\lg N_R$ 关

系曲线, 图 1(b), (c) 和 (d), (e) 分别是 30CrMnSiNi2A 和 LC9 的。可以看出, 这种拟合方法具有良好的拟合精度, 是可行的。

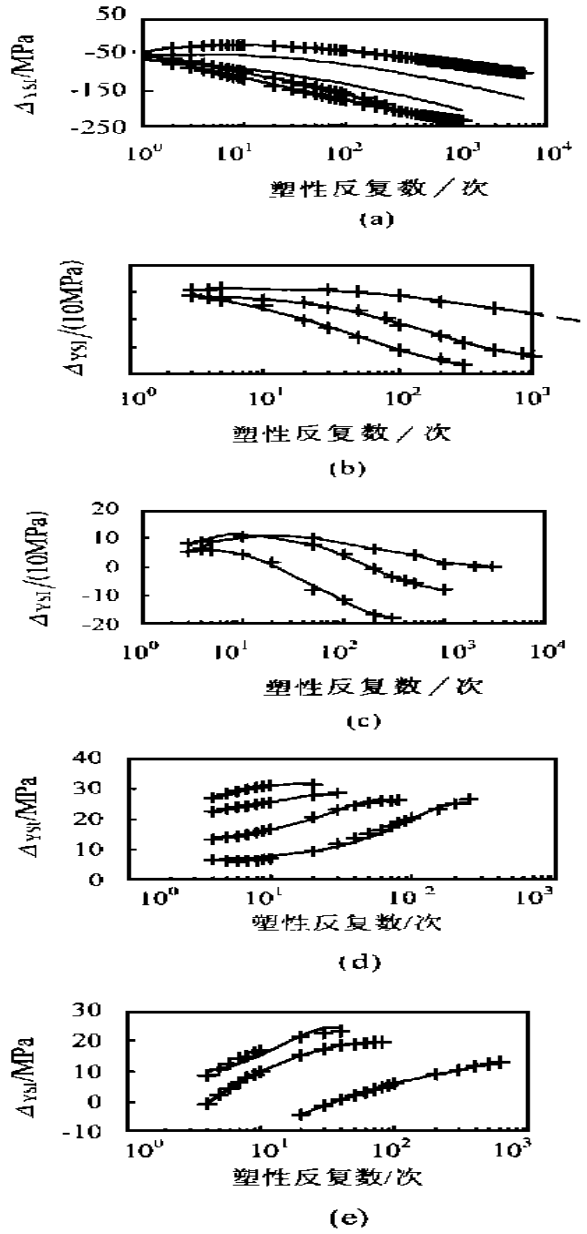


图 1 $\Delta\sigma_{YSI}-N_R$ 的拟合曲线

(a) TC4(对称循环); (b) 30CrMnSiNi2A(对称循环); (c) 30CrMnSiNi2A(非对称循环); (d) LC9CgS3(对称循环); (e) LC9CgS3(非对称循环); + 为试验结果; — 为拟合结果

另外, 本组还曾用人工神经网络技术作出过第 2 级拟合^[8], 效果更好。由于这种计算是一套计算机程序, 记在软盘中备用, 象是个“黑匣子”, 此处不再记述。

(2) 实验结果与讨论

1 循环应力-应变关系的特点 从图 1 的

$\Delta\sigma_{YSI}-\lg N_R$ 数据及拟合曲线中发现, 循环应力-

应变关系有如下特点:

(a) $R_E = -1$ 时的循环稳定状态并不是绝对的, LC9 只是在大约 50% 寿命处有一短时期的相对稳定, 之后有的继续硬化或软化。30CrMnSiNi2A 和 TC4 则几乎一直在软化, 连短期稳定也没有。

(b) $R_E \neq -1$ 时的循环应力- 应变特征与 $R_E = -1$ 不相同, 从进入塑性的第 1 个反复到疲劳寿命, 循环硬化/ 软化持续存在, 基本上没有相对稳定状态, 30CrMnSiNi2A 则先硬化后软化。

由以上试验结果可见, 材料的循环应力- 应变关系变化比较复杂。稳态循环应力- 应变曲线不仅不能代表非对称循环下的循环应力- 应变特征, 甚至也不能反映对称应变循环下的循环应力- 应变特征。因此仅仅有稳态应力- 应变曲线是不够的, 还应总结归纳出其瞬态应力- 应变关系才能真实全面地反映材料对称和非对称循环载荷下的循环应力应变特征。

° 循环应力- 应变关系的描述 由于式(4)和式(5)是拟合了多种不同应变比和应变幅下的数据而得到的, 因此, 在计算实际结构危险部位的疲劳寿命时, 无论对于何种加载谱类型, 只要计算出当前反复(两个反复构成一个循环)的局部应变大小, 再将它们代入式(5)和式(4)即得到 $\lg N_R$ 关系式。任一瞬态的单倍应力- 应变曲线(当前反复下的曲线)即为“骨架曲线”加上当前反复下 σ_{YS} 的修正。有了瞬态应力- 应变曲线, 谱载下的疲劳损伤可以一个反复接一个反复地累积, 这就真实地考虑了载荷顺序效应。

2 循环应变与寿命关系

计算累计疲劳损伤时, 需要知道在该应力水平下材料能承受的循环次数 N_f (即材料的疲劳寿命), 即要知道 $E-N_f$ 关系。文献[1, 2, 9]认为, 式(1)和式(2)在双对数坐标下, 将不是直线的数据关系简化为直线, 引入了相当误差; 另外, 也没有引入疲劳极限的概念。随着 N_f 的加长, 允许的 E 一直下降, 在长寿命区这是不符合实际的。在非对称加载情况下式(2)虽引入平均应力 R_m 和平均应变 E_m 修正, 但误差太大。

本文将描述循环应变水平的双参数 E 和 E_{max} 综合成一个参数: 当量应变 E_q

$$E_q = (2E)^m (E_{max})^{1-m} \quad (6)$$

用它来构成 $E-N_f$ 关系。文献[10]采用的拟和公式是

$$\lg N_f = a_0 + a_1 \operatorname{arctanh} \left[\lg \frac{E_q}{E_q} \setminus \lg \frac{E_q}{E} \right] \quad (7)$$

式(6)中的 m 和式(7)中的 E, E 都是材料参数, 通过对试验数据(对称循环及非对称循环)拟合得到。其中 E 是对应破坏时的 E_q , E 是对应疲劳极限的 E_q (即在 E_q-N_f 曲线上对应于 $N_f = 10^8$)。另外, 这 2 个公式是在寿命计算的局部应力- 应变法中使用, 所以, 无论对于何种受力形式, 只要计算出疲劳危险部位的局部应变水平, 就可由式(6)得到局部当量应变 E_q , 进而由式(7)得到对应的破坏寿命。这就克服了上述式(1)、式(2)的缺点, 即对试验数据直接拟合, 没作什么简化假设: 引入疲劳极限、破坏极限的概念; 直接用双参数来描述对称或非对称应变循环, 不作人为修正。

用 TC4 材料和 LC9 材料各 12 种等幅应变水平的疲劳试验数据直接拟合出式(1)、式(2)和式(6)、式(7)的材料参数, 并用拟合出的 $E-N_f$ 曲线($R_E = -1$)和 E_q-N_f 曲线来预测疲劳裂纹形成寿命(见图 2 和图 3)。结果表明, $E-N_f$ 曲线在对称应变循环时可用(但在长寿命区误差较大), 在非对称应变循环时加修正的 $E-N_f$ 曲线误差也太大; 而 E_q-N_f 曲线在各种情况下都比前一种误差小, 在长短寿命区都可用。对其它材料, 例如 LY12CZ, LC4CS, 30CrMnSiA, 30CrMnSiNi2A 也有同样结论^[2, 3, 5, 8]。

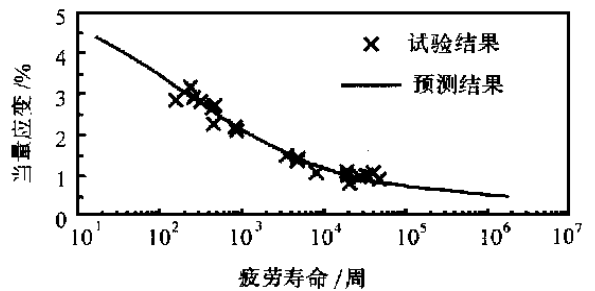


图 2 TC4 材料疲劳试验寿命与式(6)、式(7)预测值的比较

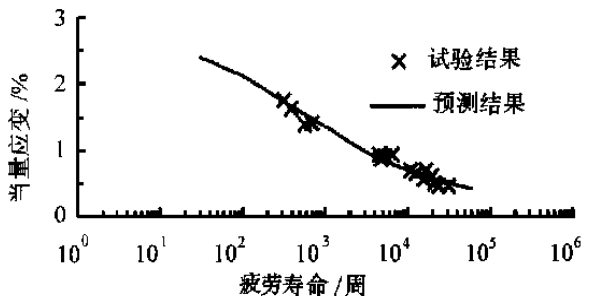


图 3 LC9CgS3 疲劳试验寿命与式(6)、式(7)预测值的比较

另外, 文献[11]对于飞机结构在同一种载荷谱

作用下的裂纹形成寿命用局部应力-应变法进行了计算,发现在局部应力-应变法的4种情况(循环R-E曲线有两种选择:稳态循环R-E曲线和瞬态R-E曲线;应变寿命关系有两种选择: $E-N_f$ 曲线和 E_q-N_f 曲线),所得寿命的对比中,采用修正过的Jhansale瞬态曲线和 E_q-N_f 曲线结果最好(即寿命相对误差及分散系数都较小)。

3 结论

(1) 材料的循环硬化/软化并无真正的“饱和”现象,也即并不存在真正是稳态的滞后应力-应变曲线。

(2) 将材料绝对地划分为循环硬化或循环软化两大类不一定合理,因为同一种材料在不同的 R_E, E, N_R 下循环应力-应变行为有时会有相反的表现。

(3) 有了较多的疲劳试验数据,拟合出可用的瞬态滞后应力-应变曲线是可行的。

(4) 用对称应变循环下得到的 $E-N_f$ 曲线加以 R_m (或 E_m)修正得到的非对称应变循环下的 $E-N_f$ 关系,计算出的寿命误差太大。

(5) 用局部应力-应变法估算结构的疲劳裂纹形成寿命时,采用瞬态R-E曲线曲线及 E_q-N_f 曲线,目前可能是较合理的选择。

参 考 文 献

[1] 杨庆雄. 局部应力-应变法寿命计算中材料疲劳特性选用的评论[A]. 见:中国航空航天研究院编. 国际科技合作课

题论文集[C]. 北京:航空工业出版社,1993. 165~171.
 [2] 陈军. LC4CS 板材循环瞬态应力特性试验报告[D]. 西安:西北工业大学,1990.
 [3] 徐晓飞. 30Cr MnSiA 材料瞬态循环特性和疲劳寿命性能的研究[D]. 西安:西北工业大学,1988.
 [4] 阎济宁. LY12CZ 板材瞬态循环应力-应变曲线及当量应变寿命曲线[R]. 西北工业大学科技资料 SHj8331, 西安:西北工业大学,1983.
 [5] 唐肖理. LY12CZ 板材瞬态循环特性研究[D]. 西安:西北工业大学,1985.
 [6] Jhansale H R. A unified approach for modeling inelastic behavior of structural metal under complex cyclic loading [R]. AD-A 040741, 1977.
 [7] 赵永翔. 低周疲劳短裂纹行为和可靠性分析[D]. 成都:西南交通大学,1998.
 [8] 唐宁. 用专家系统和人工神经网络技术对复杂接头疲劳全寿命优化的研究[D]. 西安:西北工业大学,1994.
 [9] 王斌团. 厚壁结构疲劳裂纹形成寿命计算方法研究[D]. 西安:西北工业大学,1995.
 [10] Carl E J. Analysis of fatigue, fatigue-crack propagation and fracture data[R]. NASA CR-132332, 1973.

作者简介:



王斌团 男,1965年生,现为西北工业大学飞机系博士生,主要研究方向有材料疲劳与断裂结构疲劳寿命计算结构可靠性等. Tel. (029)8493584(O)。

杨庆雄 男,1925年生,西北工业大学飞机系教授,博士生导师。长期从事飞机结构设计结构疲劳和计算微观力学的研究。Tel. (029)8493003(H)。

中国航空学会第六届理事会聘任中国航空学会名誉理事名单

(按姓名笔划排列)

于日家 王良旺 王适存 叶天麒 朱剑英 沙正平 安玉亮 孙瑞胜 庄逢甘 李 钊 杨士玮
 陈丹淮 林 虎 夏人伟 栾恩杰 唐乾三 黄得诚 葛文墉 曹传钧 傅恒志 谢 光 谢 础

中国航空学会第六次全国会员代表大会授予 “中国航空学会青年科技奖”获奖者名单

徐惠彬(北航)	周德云(西工大)	孙晓峰*(北航)	潘 泉*(西工大)
杨春信(北航)	李淼泉*(西工大)	孟 光*(西工大)	周来水(南航)
蔡小斌(西工大)	陶云刚(南航)	司 斌(014)	张桂平(女,沈航)
陈国智(608所)	杨万宏(航材院)	魏文山(606所)	林 超(哈飞)

* 同时获中国青年科技奖者,已受国家表彰

(李铁柏)