

金属材料疲劳极限的估算

李海梅, 宋 刚, 刘永志

(郑州大学材料工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要 :金属材料疲劳极限通常是用众多的试验结论测试拟合得出的,需要高昂的费用,且有时无法用试验获得特殊工况下的数值. 给出一个估算非对称循环疲劳极限 σ_r 的简便计算方法,可利用有限的数
据,确定材料的疲劳极限,减少试验次数,降低试验条件的要求. 在确定了疲劳极限值和静抗拉强度极限
后,利用丁氏公式,用 AUTOLISP 实现了等寿命曲线图的绘制,讨论了拟和公式中各参数的确定方法,并
对拟和结果和实验数据进行了比较. 结果表明,该方法所得结果与试验结果吻合较好,且绘制疲劳曲线
方便、快捷.

关键词 :疲劳极限; $S - N$ 曲线; 估算公式

中图分类号 :TG 146.23 ;TH 142.2 文献标识码 :A

金属疲劳破坏是结构及机械零部件失效的主要形式,如各种发动机曲轴、主轴、转子、齿轮、叶片、钢轨、轴承等,85% 以上的破坏属疲劳破坏^[1]. 因此,金属疲劳性能的研究一直是研究的热点.

多年来,国外学者一直在从事金属疲劳性能数据与模型化关系研究^[2,3]. 以 $S - N$ 曲线(应力 - 循环曲线)为例,传统的数学模型主要是“幂函数模型”和“指数函数模型”^[4],用对数坐标可得到线性系列. 根据数理统计理论,文献[5]中给出的两个模型,较好地解决了数值算法中的收敛问题. 国内在“六五”、“七五”期间用实验方法测试了大量的结构钢、铝合金试样的疲劳实验数据^[6,7],但数据分析的工作较少,对工程实际应用的指导作用有限. 现阶段,丁遂栋^[8~12]用解析方法对非对称循环疲劳极限的估算进行了研究,取得了较好的研究成果.

总体说来,现阶段对材料疲劳性能及模型化关系的研究存在如下问题:疲劳性能的研究多属实验模拟,数值分析技术较少. 因此,减少实验数量,突出数值技术是疲劳研究亟待解决的问题.

就模型化关系研究而言,现有模型多是根据力学约束和统计约束拟合的,对结构、环境、表面状况等与疲劳极限关系的研究较少,并或多或少存在精度低与数据不足的问题.

本文侧重实用性的研究,以解决实验操作困难、费用昂贵、数据偏少等问题. 通过几个模型
的比较,采用收敛快、精度高且简便的丁氏计算方法^[8~12]以保证方便、快捷地获取金属材料的等寿命曲线. 在计算过程中,说明了丁氏公式各参数的确定方法,并比较了计算数据与实验数据二者的吻合程度,并以 AUTOLISP 绘制了等寿命图,以进一步预测金属材料的寿命,具有积极的工程意义.

1 对称疲劳极限 σ_{-1} 及非对称循环疲劳极限 σ_r 的估算

σ_{-1} 和 σ_r 都可以通过实验来得到,但是实验操作困难,费用昂贵. 特别是 σ_r 实验,对应不同的 r 值,需要做很多组实验. 因此如何通过估算就可以获得具有一定精度的 σ_{-1} 及 σ_r ,对工程应用来说就显得尤为重要. 而要估算 σ_r 就应该先知道 σ_{-1} 的值.

1.1 获取 σ_{-1}

通过 $S - N$ 曲线可以很方便地获得 σ_{-1} ,其值为 $S - N$ 曲线上 N 为 10^7 MPa 时所对应的 σ 值. $S - N$ 曲线是表示应力与至破坏循环数的关系曲线,应力可为最大应力、最小应力、应力范围或应力幅. 各种金属材料的 $S - N$ 曲线形状差别较大,寻求统一的表达式比较困难,目前在疲劳设

收稿日期 2002 - 09 - 10 ;修订日期 2002 - 10 - 20

基金项目 河南省自然科学基金资助项目(004060400);河南省青年骨干教师基金资助项目

作者简介 李海梅(1969 -),女,辽宁省沈阳市人,郑州大学副教授,博士,主要从事橡塑材料成型及模具设计优化方面的研究.

计和测试中常用的经验公式有两种^[4]。

指数函数表达式：

$$\lg N = A + B \lg \sigma ; \tag{1}$$

三参数幂函数表达式：

$$\sigma = A + B/N^{\alpha} . \tag{2}$$

三参数幂函数表达式能较好地描述 $S-N$ 曲线 ,但求解参数的工作量较大 .在实际工作中 ,由

于指数函数表达式中参数可以很方便地通过手册查到 ,并具有一定的精度 ,因此本文采用式 (1) 来求取 σ_{-1} .

用式 (1) 拟合得到的 σ_{-1} 与实验值比较的结果如表 1 所示 .表中 , σ_{-1} 计算值是式 (1) 中 N 取 10^7 MPa 时的 σ 值 ; σ_{-1} 实验值是文献 [7] 的数据 ; K_t 是理论应力集中系数 .

表 1 几种金属材料 σ_{-1} 的计算值与实验值^[7] 的比较
Tab.1 Contrast calculation value of some metal material σ_{-1} with experiment test

材料	K_t	A	B	σ_{-1} 计算值/ MPa	σ_{-1} 实验值/ MPa	误差 $\Delta/\%$
16Mn 热轧	1	37.80	- 12.74	261.45	298	- 12.29
	2	24.06	- 7.81	153.27	170	- 9.84
45 调质	1	35.48	- 12.08	227.70	389	- 41.47
	2	21.97	- 6.86	151.66	212	- 28.94
40Cr 调质	1	23.95	- 6.88	291.00	422	- 31.04
	2	23.84	- 7.33	198.32	239	- 17.02
40CrNiMo 调质	1	32.64	- 9.84	402.54	498	- 19.17
	2	24.49	- 7.39	233.26	336	- 30.43
60Si2Mn 淬火	1	32.63	- 9.80	414.25	660	- 37.23
后中温回火	1.9	26.62	- 8.13	259.49	389	- 33.29

从表 1 可知 ,利用指数函数表达式得到的 σ_{-1} 比实验值要小 ,这在工程应用中基于安全的考虑是合理的 ,这表明该公式具有一定的精度和实用价值 .这样通过式 (1) 就可以很方便地估算 σ_{-1} .

1.2 σ_r 的估算

国内外对 σ_r 的估算曾进行过广泛的研究 ,并提出了各种不同的假设和数学模型 ,其中最具有代表性的有格伯(Gerber)抛物线方程、索德倍尔格(Soderberg)直线方程、古德曼(Goodman)直线方程、谢联先(CepeHceH)折线方程、莫茹(Morrow)直线方程、丁遂栋提出的估算公式等^[2,4,6~12] .在疲劳设计中 ,使用较多的是 Goodman 直线方程和 CepeHceH 折线方程 .但因为其参数获取困难 ,不便于工程应用 ,从数据获取难易程度的角度 ,选取丁氏的估算公式^[8~12]：

$$\sigma_r = \{ f + (1 - f) [(1 + r) / 2]^n \} \sigma_b , \tag{3}$$

式中 : σ_r 为应力比为 r 的交变应力中最大应力的极限值 ; r 为循环特征(应力比) , $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$, σ_{\min} 、 σ_{\max} 分别为最小、最大应力 ; f 为材料的疲劳比 , $f = \sigma_{-1} / \sigma_b$, σ_{-1} 为对称循环下材料的疲劳极限 , σ_b 为材料静抗拉强度极限 ; n 为材料常数 ,与 f 有关 , $n = 1 / (f^2 - f)$ (c 为待定系数) .

丁氏公式有如下优点 :①以循环特征 r 为显函数来描述疲劳极限随 r 的变化规律 ,其物理意义明确直观 ,易于人们理解和接受 ,且计算简便 ;②估算公式中引入参数疲劳比 $f = \sigma_{-1} / \sigma_b$,其中 , σ_b 可以采用标准光试样的静抗拉强度 ,也可以采用疲劳光试样的静抗拉强度 ,对疲劳极限估算无影响 ;③用估算公式计算疲劳极限 ,只需知道材料对称循环下的疲劳极限 σ_{-1} 和静抗拉强度 σ_b ,而不要求知道测量相对困难的脉动循环疲劳极限 σ_0 ,克服了 CepeHceH 方程没有 σ_0 就无法应用的缺点 .

对于唯一的待定系数 c ,文献 [9~12] 指出 ,铝合金光试样 $c = 1.6$,缺口试样 $c = 1.4$.有没有更准确的 c 值呢 ?

对 LY12CZ ,LY12B(CZ) ,LY12CS ,LC9 ,LC4 (CS) 五种具有代表性的铝合金材料光试样在不同寿命、不同应力比 r 下 σ_{rN} 的实验值和计算值分别在 $c = 1.55$,1.60 ,1.65 ,1.70 时进行比较 .判断 c 值优劣的原则是 :误差 $\Delta \leq \pm 10\%$ 时 ,认为符合得较好 .

通过计算分析 ,得到如下结论 :对于铝合金光试样 , $c = 1.65$ 时计算结果与实验结果符合得更好 ,而铝合金缺口试样 $c = 1.45$ 时计算结果与实

验结果符合得较好.对结构钢光试样 $\mu_c = 1.66$,结构钢缺口试样 $\mu_c = 2.16$.

表 2 列出了几种结构钢材料 $r = 0.1$ 及 $r = 0.3$ 时的实验值与计算值的比较.其中 σ_r 的计算值由式(3)获得,式(3)所用 σ_{-1} 由式(1)计算得到,实验数据来自文献[7], K_t 为理论应力集中系

数.
由表 2 可以看出,计算值一般比实验值要小,即计算值比实验值偏于保守,这在实际应用中,考虑到安全的需要是应该的,说明用计算方法求得 σ_{-1} 并以此为已知量求解 σ_r 是可行的.

表 2 结构钢材料的 σ_r 计算值与实验值比较													
Tab.2 Contrast calculation value of structural steel material σ_r with experiment test													
材料	σ_b / MPa	K_t	A	B	σ_{-1}	σ_{-1}	误差 $\Delta/\%$	$r = 0.1$			$r = 0.3$		
					计算值/ MPa	实验值/ MPa		σ_r 实验值/ MPa	σ_r 计算值/ MPa	误差 $\Delta/\%$	σ_r 实验值/ MPa	σ_r 计算值/ MPa	误差 $\Delta/\%$
16Mn 热轧	586	1	37.80	-12.74	261.45	298	-12.29	377	388.75	3.11	431	442.87	2.75
		2	24.06	-7.81	153.27	170	-9.84	327	280.15	-14.33	421	355.14	-15.64
45 调质	735	1	35.48	-12.08	227.70	389	-41.47	436	359.50	-17.55	517	447.22	-13.50
		2	21.97	-6.86	151.66	212	-28.94	334	274.83	-17.72	418	373.56	-10.63
40Cr 调质	940	1	23.95	-6.88	291.00	422	-31.04	629	459.44	-26.96	671	571.66	-14.8
		2	23.84	-7.33	198.32	239	-17.02	431	360.37	-16.39	555	486.51	-12.34
40CrNiMo 调质	972	1	32.64	-9.84	402.54	498	-19.17	805	610.31	-24.18	856	706.86	-17.42
		2	24.49	-7.39	233.26	336	-30.43	490	428.17	-12.62	599	555.91	-7.19
60Si2Mn 淬	1625	1	32.63	-9.80	414.25	660	-37.23	749	649.59	-13.27	1118	851.73	-23.83
火后中温回火		1.9	26.62	-8.13	259.49	389	-33.29	529	442.06	-16.43	701	650.60	-7.12

通过对几种铝合金和结构钢材料的光试样及缺口试样的研究计算,说明丁氏公式具有一定的适用范围和实用价值,选取它来估算 σ_r 是可行的.

2 计算机实现 σ_{-1} , σ_r 估算及等寿命图的绘制

随着计算机的普及,将大量的数据处理交给计算机处理是实现估算自动化的可行途径.本文采用 AutoLISP 作为编程工具. LISP(List Processing Language)是一种计算机的表处理语言,是在人工智能领域广泛应用的一种程序设计语言,它嵌套于 AutoCAD 内部,是 LISP 语言和 AutoCAD 有机结合的产物,是当今世界上 CAD 软件中被广泛使用的语言之一.

程序实现从材料数据库查询或者输入金属材料 σ_b , A, B 以及 r 值就可以直接计算出 σ_r .

等寿命图能直观地描述指定寿命下交变应力中的 σ_b , σ_{\max} , σ_{\min} 与 σ_m 各参数间的关系,同时还能表征出各参数随应力比变化的情况,因而等寿命图得到了越来越多的应用^[7].对于材料的每簇

等寿命曲线,一般情况下都要由实验测定不同应力比 r 或不同平均应力 σ_m 下的 3 或 4 条 $S-N$ 曲线,并依据实验结果才能绘制出来,因而极其费时和耗资.本文绘制等寿命图是利用丁氏的等寿命曲线方程来完成的.

$$\sigma_{rN} = \{f_N + (1 - f_N) \frac{1}{2} (1 + r)\} \sigma_{bh} \quad (4)$$
式中: σ_{rN} 为 N 次非对称循环下材料的条件疲劳极限; r 为循环特征(应力比), $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$; f_N 为材料的条件疲劳比, $f_N = \sigma_{-1N}/\sigma_{bh}$; σ_{-1N} 为 N 次对称循环下材料的条件疲劳极限; σ_{bh} 为试样的静抗拉强度极限, σ_{bh} 也可以用 σ_b 来代换,当用 σ_b 代换 σ_{bh} 时, $f_N = \sigma_{-1N}/\sigma_b$; c 为待定系数.

在一定寿命值下,对不同应力比 r 下计算 σ_{rN} 的值,就可以得到一条等寿命曲线,进而得到材料的等寿命图.由于运用了 AutoLISP 编程,所以能自动生成给定材料的等寿命图.图 1 给出了 LY12CZ 铝合金板材光滑试件的等寿命图,其中黑实线为由计算值绘制出的,灰线是据实验值绘制的,从上到下的曲线寿命分别是 6×10^5 , 10^6 , 6×10^6 .实验值数据从文献[7]查表得到.

从图中可以看出, $r < 0$ 时,计算值一般比实

验值要小,并且计算值曲线较为平缓,上升的趋势较小.但当 $r > 0$ 以后,由于计算值曲线上升趋势加大,有些计算值超过实验值较多.计算值曲线的形状是由丁氏公式的表达式本身所决定的,当 f_N

偏低时会出现这种现象,使计算值与实验值存在一定的误差,但总的趋势是对的,偏离也不是太大,有一定的参考价值.

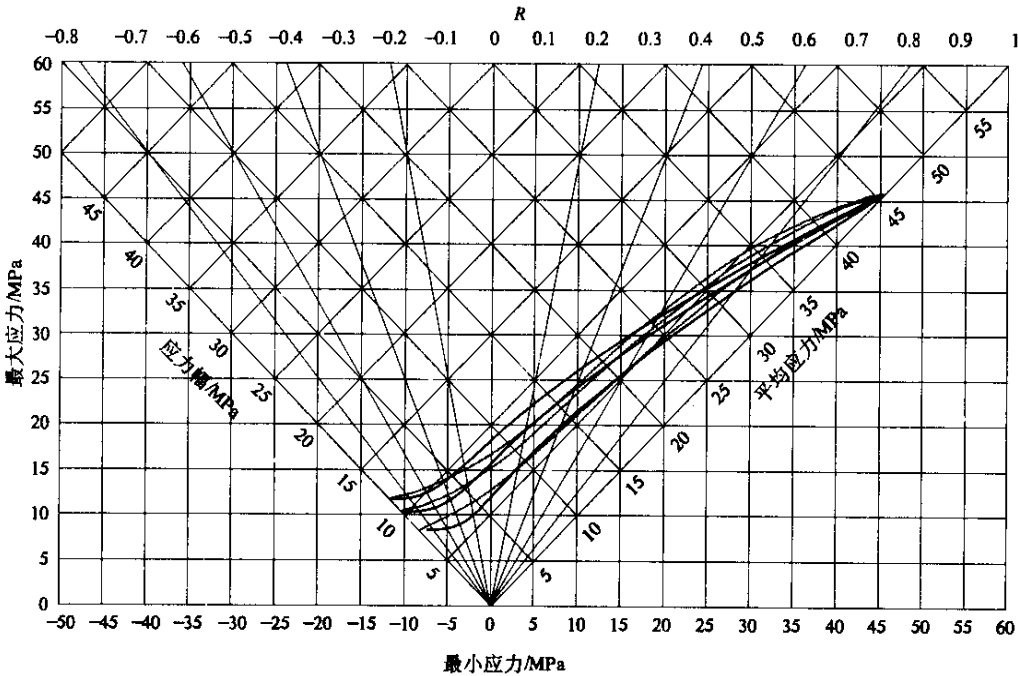


图 1 LY12CZ 铝合金板材光滑试件的等寿命图

Fig.1 Fatigue diagram of constant life of smooth specimens for LY12CZ aluminum alloy

3 结束语

本文给出了便于数值应用的计算疲劳极限的模型化方法,可以在模具使用寿命分析及实际设计工作中方便使用.对疲劳设计人员来说,不可能一切数据都由实验来获得.掌握一定的公式拟合

及数值计算方法是必要的.该方法使设计人员可以从繁琐的查阅手册及计算中走出来,只要输入很少的数据,就可以得到具有一定参考和使用价值的结果,实现了金属材料疲劳曲线的数值拟合全过程.具体步骤如图 2 所示.

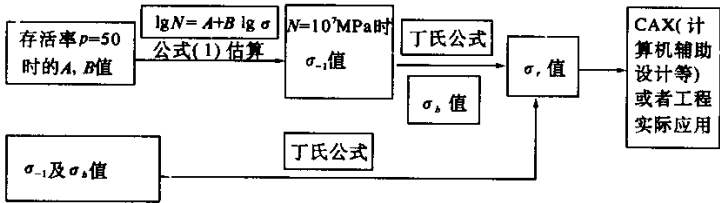


图 2 金属材料疲劳曲线的拟合过程

Fig.2 Diagram of metal material fatigue curves simulation course

首先查询手册或者材料数据库取得金属材料的 A , B 就可以利用式(1)得出 σ_{-1} 或者直接从手册查得 σ_{-1} , 然后通过丁氏公式以及 σ_b , r 值就可以计算出 σ_r .
万方数据

本文的意义在于利用科学的方法估算疲劳强度,预测寿命,有目的地准备、使用实验数据,有效减少实验数量,并能对新材料的研制给予正确指导.
(下转第 39 页)

(College of Materials Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract : This paper uses numerical simulation technique to simulate unstable temperature field in the process of bimetallic composite casting. Choosing different coefficient to calculate temperature changing in the process of solidification to outer – material and inner – material. At the same time ,various kinds of influencing factors such as heating hinder ,latent heat and conduct coefficient during calculate temperature are taken into account .Temperature at different positions are taken and a comparison is made with simulation temperature curves .The simulation curves of temperature can display the actual changes of temperature .

Key words : bimetal ; composite ; temperature field ; numerical simulation

(上接第 29 页)

参考文献 :

[1] 魏文光 . 金属的力学性能测试 [M]. 北京 : 科学出版社 ,1980 .

[2] SURESH S. 材料的疲劳 [M]. 王中光 ,译 . 北京 : 机械工业出版社 ,1993 .

[3] 美国金属学会 . 金属手册(第八卷) [M]. 第九版 . 北京 : 机械工业出版社 ,1994 .

[4] 程育仁 ,廖龙秀 ,侯炳麟 . 疲劳强度 [M]. 北京 : 中国铁道出版社 ,1990 .

[5] CASTILLO E ,CAMTELI A F , HADI A S. On fitting a fatigue model to data [J]. International Journal of Fatigue , 1999 21(2) :97-106 .

[6] 中国航空研究院 . 军用飞机疲劳、损伤容限、耐久性设计手册 [M]. 北京 : 中国航空研究院出版社 ,1994

[7] 赵少汴 ,王忠保 . 抗疲劳设计——方法与数据 [M]. 北京 : 机械工业出版社 ,1997 .

[8] 丁遂栋 . 结构钢光试样非对称循环疲劳极限的估算 [J]. 机械强度 ,1997 ,19(1) :45-47 .

[9] 丁遂栋 ,张 兰 . 铝合金缺口试样非对称循环疲劳极限的估算 [J]. 机械强度 ,1999 21(4) :292-295 .

[10] 丁遂栋 ,董汉丽 . 铝合金光试样的 $R - S - N$ 曲线和等寿命图 [J]. 机械强度 2000 22(2) :139-141 .

[11] 丁遂栋 ,丁海川 . 结构钢光试样的 $R - S - N$ 曲线和等寿命图 [J]. 机械强度 2000 22(4) :319-320 .

[12] 丁遂栋 ,丁海川 . 结构钢缺口试样 $R - S - N$ 曲线和等寿命图 [J]. 机械强度 2001 23(1) :123-124 .

Estimating Formula of Fatigue Limits for Metallic Materials

LI Hai – mei , SONG Gang , LIU Yong – zhi

(College of Material Engineering ,Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract : A convenient numeration for fatigue limit is presented based on confirming the value of the parameter about estimating formula of fatigue limits for metallic materials , which is given by DING Sui-dong in reference [8 ~ 12]. The figure for metal life contour lines has also been made by AUTOLISP. The calculations with the formula are in agreement with the experiments data very well , which are useful in engineering applications .

Key words : fatigue limit ; $S - N$ curves ; estimating formula