

文章编号:1006-2467(2022)06-0801-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.051

一种新型的疲劳强度预测模型

段红燕^a, 唐国鑫^a, 盛捷^b, 曹孟杰^a, 裴磊^a, 田宏伟^a

(兰州理工大学 a. 机电工程学院; b. 材料科学与工程学院, 兰州 730050)

摘要: 疲劳破坏是工程应用构件失效的最主要原因之一,但由于疲劳实验成本过高,有必要用力学性能对疲劳强度进行预测.基于真实应力应变曲线,建立了一种新型的疲劳强度预测模型,并运用这种模型计算疲劳强度,与“升降法”和 Basquin 公式计算的疲劳强度作对比.结果表明:该模型仅需通过抗拉强度和加工硬化强度就可得到材料的疲劳强度,并且适用于其他钢种,极大地节约了成本,精确度也较高.

关键词: 疲劳强度预测模型;真实应力应变曲线;Basquin 公式;疲劳强度参数

中图分类号: TG 142.25; TG 405

文献标志码: A

A Novel Prediction Model for Fatigue Strength

DUAN Hongyan^a, TANG Guoxin^a, SHENG Jie^b

CAO Mengjie^a, PEI Lei^a, TIAN Hongwei^a

(a. School of Mechanical and Electrical Engineering; b. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Fatigue failure is one of the most important reasons for the failure of engineering application components. However, due to the high cost of fatigue experiments, it is necessary to use mechanical properties to predict fatigue strength. Based on the true stress-strain curves, a novel model for fatigue strength prediction is established and is used to calculate the fatigue strength. The strength predicted is compared with that calculated by the staircase method and the Basquin equation. The results show that the model could obtain the fatigue strength of the materials only by using tensile strength and work-hardening strength, and it is suitable for other steels, which greatly saves costs and increases accuracy.

Key words: fatigue strength prediction model; true stress-strain curve; Basquin equation; fatigue strength parameters

据统计,工程实际中的金属结构件失效的 90% 是由疲劳引起的.但是疲劳实验既费时又昂贵.为了降低实验成本并提高实验效率,有必要提出一种新的疲劳强度预测模型,通过材料的力学性能来预测疲劳强度.

近年来,疲劳强度预测一直是热点问题.许多学

者建立了疲劳强度与力学性能之间的关系,通过测试较为简单的力学性能来计算疲劳强度^[1-5]. Murakami^[1]指出可以用维氏硬度和夹杂物尺寸来计算钢的疲劳强度,并建立了基于夹杂物尺寸预测疲劳强度的模型.之后,Osmond 等^[2]根据铸造铝合金样品中的孔隙率改进了 Murakami 的疲劳预测模型.

收稿日期:2021-02-10

基金项目:国家自然科学基金(51665028)资助项目

作者简介:段红燕(1978-),女,河北省邯郸市人,副教授,从事疲劳与断裂研究.

通信作者:唐国鑫,男,硕士生,电话(Tel.):13006531228;E-mail:tanggx9458@163.com.

张健^[3]在非均匀片层结构低碳钢的屈服强度与疲劳强度之间找到了比例系数为 0.38 的正比例关系.但是,另一些研究表明,抗拉强度和疲劳强度之间并不是完全的正比例关系.丁明超等^[4]建立了通过微观划痕疲劳损伤参数预测疲劳强度的模型. Hagiwara 等^[5]研究了 B 型钛合金 Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al 的抗拉强度与疲劳强度之间的关系,发现在抗拉强度达到 1 250 MPa 之前,疲劳强度随抗拉强度的增加而增加,但当抗拉强度超过 1 250 MPa 时会导致疲劳恶化.

为了获取材料的疲劳强度,目前最常用的方法是根据“升降法”通过疲劳实验来测得疲劳强度.近几年,“升降法”被用于大量的实验,包括试验标准件及复杂的构件^[6-11].但是用“升降法”测算疲劳强度需要进行大量实验测试,而疲劳实验又是高消费高耗时的一项工程.

为了简化实验步骤,许多学者用 Basquin 公式来拟合 $S-N$ (S 为应力, N 为循环周次) 曲线并计算疲劳强度. $S-N$ 曲线可以反映材料的疲劳性能,并且是预测疲劳寿命的主要依据^[12-15].

综上所述,几种计算疲劳强度的方法虽已比较完备,但它们之间的比较分析还不够完善.本文通过控制不同的轧制变形量获得 3 种力学性能不同的 304 不锈钢,在保证内部夹杂物尺寸差异不大、表面处理工艺相同、加载方式和实验条件相同的前提下,研究了力学性能与疲劳强度之间的关系,提出了一种新型的疲劳强度预测模型.运用该模型计算材料的疲劳强度,并且与“升降法”和 Basquin 公式计算的疲劳强度进行对比,比较 3 种计算疲劳强度方法的优缺点.

1 实验材料及方法

本研究使用 304 不锈钢作为研究对象,其化学成分如表 1 所示,各项指标均符合 304 不锈钢的成分要求.

表 1 304 不锈钢的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of 304 stainless steel

元素	质量分数/%
C	0.054
Mn	0.79
S	0.002
P	0.034
Si	0.42
Cr	17.27
Ni	8.14

为获得具有不同强度的试样,使用以下处理方法,制备具有不同晶粒尺寸的 304 不锈钢试样:将原始坯样在加热炉中加热至 600 ℃ 并保持 30 min. 随后取出样品,分别控制其轧制变形量为 30% 和 70% (指体积变形量,下同),在轧机下轧制成 5 mm 厚的不锈钢板. 处理之后的试样与原始态试样即为 3 个具有不同晶粒尺寸的板状试样,分别记为 A、B、C. 用于拉伸和疲劳测试的标本被切成哑铃状,平行段长度为 15 mm,如图 1 所示,图中 R 为试件过度处的曲率半径. 对试样分别使用 400 #、800 # 和 2 000 # 砂纸进行抛光处理,以保持 3 种试件的表面状态一致.

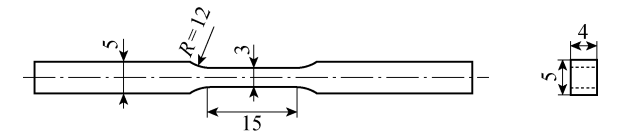


图 1 拉伸试样和疲劳试样的尺寸 (mm)
Fig. 1 Dimensions of tensile and fatigue specimens (mm)

拉伸实验在 INSTRON 5982 电子万能拉伸试验机上进行. 为了减小实验结果的偶然性,对每种晶粒尺寸的试样测试了 3 个样本. 试验机的满负荷为 ± 100 kN. 在拉伸过程中采用位移控制,拉伸速度为 10^{-3} mm/s. 在伺服液压疲劳测试系统 INSTRON 8850 上以单轴正弦负载加载应力比为 -1 的加载方式、频率为 30 Hz 进行疲劳测试,循环停止周次为 10^7 周,每组实验的试件数量为 10~15 个.

2 实验结果

2.1 “升降法”计算 304 不锈钢的疲劳强度

“升降法”是目前最常用的确定疲劳强度的方法. 根据“升降法”测试材料的疲劳强度,选择一个开始疲劳测试的应力幅值,一般为 $(0.3\sim0.45)\sigma_b$ (σ_b 为材料的抗拉强度),接下来第 2 个试件的应力幅值根据之前试件实验结果而定. 若第 1 个试件在设定的循环次数之内失效,则第 2 个试件的应力幅值应该降低 3%~5%. 反之,第 2 个试件的应力幅值应该升高 3%~5%. 实验之后,取其中未失效与已失效之间的 3~4 个应力水平的 5~6 个数据点,用加权平均法分别计算 3 种试件的疲劳强度:

$$\sigma_w = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n V_i S_i$$

(1)

式中: m 为实验数据的数目,本实验取 $m=6$; n 为实验应力水平等级数; V_i 为第 i 级应力等级中试件的数量; S_i 为第 i 级应力等级下试件的应力值,3 种试

件*i*分别为 4、3、3. 具体数据列于表 2~4,文中对号表示疲劳实验后试件的状态,即失效或未失效. 表中试件序号为“升降法”疲劳实验试件的编号.

根据表 2~4 中的数据计算 3 种试件的疲劳强度,分别为 215、443 及 480 MPa.

表 2 试件 A 升降法实验数据(共 6 只)
Tab. 2 Experiment data of specimen A by using staircase method (6 in total)

实验件序号	<i>S_i</i> /MPa	失效	未失效
2	200		✓
7	210		✓
10	210	✓	
4	220		✓
6	220	✓	
8	230	✓	

表 3 试件 B 升降法实验数据(共 6 只)
Tab. 3 Experiment data of specimen B by using staircase method (6 in total)

实验件序号	<i>S_i</i> /MPa	失效	未失效
6	420		✓
1	440		✓
7	440		✓
5	440	✓	
3	460	✓	
4	460	✓	

表 4 试件 C 升降法实验数据(共 6 只)
Tab. 4 Test data of specimen C by using staircase method (6 in total)

实验件序号	<i>S_i</i> /MPa	失效	未失效
3	450		✓
10	470	✓	
11	470		✓
4	490		✓
7	490	✓	
6	490	✓	

2.2 一种新型的疲劳强度预测模型

已有研究中,众多学者提出了用抗拉强度预测疲劳强度的方法. Pang 等^[16]认为疲劳强度受力学性能和内部缺陷的影响,建立了疲劳强度与拉伸强度的一般关系式:

$$\sigma_w = (C' - P\sigma_b)\sigma_b \tag{2}$$

式中:*C'*和*P*是 2 个常数.

Zhang 等^[17]的研究进一步表明,疲劳强度还受加工硬化能力的影响,因此总结公式为

$$\sigma_w = \alpha\sigma_b + \beta\sigma_b\Delta\sigma_T + \gamma\Delta\sigma_T \tag{3}$$

式中: α 、 β 及 γ 为 3 个常数; $\Delta\sigma_T$ 为加工硬化强度.

图 2 所示为拉伸实验后所得的工程应力-应变曲线(σ-ε 曲线),图中,1~9 分别为拉伸实验试件编号,试件 A~C 的抗拉强度分别为(730±19)、(886±1)及(962±7)MPa. 随着抗拉强度的提高,材料的疲劳强度逐渐提高.

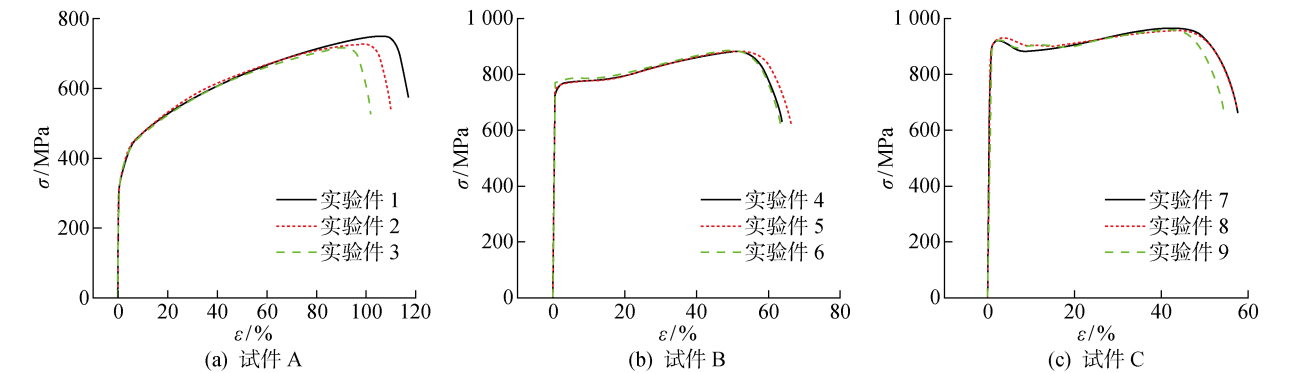


图 2 304 不锈钢的工程应力-应变曲线

Fig. 2 Engineering stress-strain curves of 304 stainless steel

在拉伸实验过程中,材料会出现加工硬化,并且在断裂之前试件会出现“颈缩”的现象. 因此,通常测得的工程应力应变曲线并不能准确地表示材料的断裂应力. 金属材料的疲劳强度与表面层晶粒微量塑性变形抗力有极大的关系,与抗拉强度并没有本质

上的关联. 若用抗拉强度来预测疲劳强度,必须要得到材料的真实应力-应变曲线. 如图 3 所示,每种试样取其中一个试件,得到真实应力-应变曲线,图中:*e*为真实应变. 最大断裂强度与弹性极限之间的差定义为加工硬化强度,可以用以下公式来表示:

$$\Delta\sigma_T = S_b - \sigma_e \tag{4}$$

式中: S_b 为最大断裂强度; σ_e 为弹性极限. 图 4 所示为加工硬化强度与抗拉强度之间的关系,可见,随着

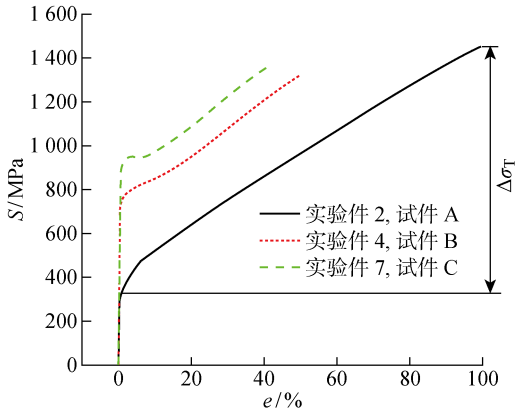


图 3 304 不锈钢的真实应力应变曲线
Fig. 3 True stress-strain curves of 304 stainless steel

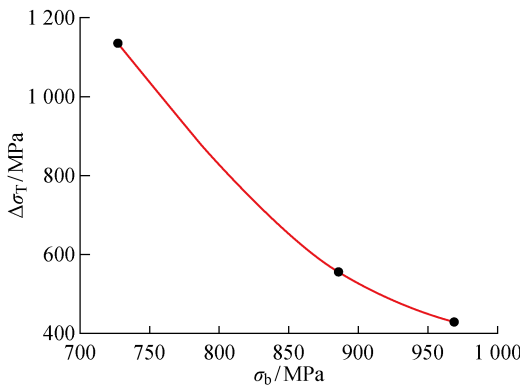
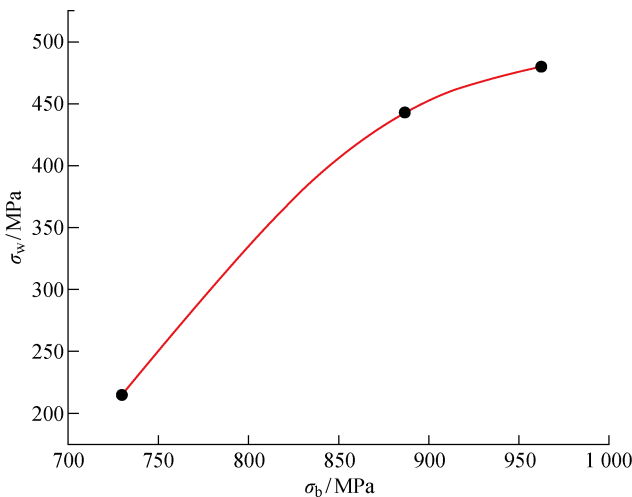


图 4 抗拉强度与加工硬化强度之间的关系
Fig. 4 σ_b versus $\Delta\sigma_T$



(a) 抗拉强度与疲劳强度之间的关系

抗拉强度的提高,加工硬化强度呈下降的趋势.

材料的疲劳强度与抗拉强度之间为正相关的关系,与加工硬化强度之间即为负相关. 因此,当抗拉强度和加工硬化强度共同影响疲劳强度时,可以用以下公式来表述:

$$\sigma_w = f(\Delta\sigma_T)g(\sigma_b) \tag{5}$$

式中: f 为加工硬化强度影响疲劳强度的函数; g 为抗拉强度影响疲劳强度的函数. 图 5 所示为力学性能与疲劳强度之间的关系,从图 5(a)可以看出,抗拉强度与疲劳强度之间几乎是线性的关系. 但是当抗拉强度变化很小时(图 5(b)方框中的抗拉强度均为 886 MPa 左右),加工硬化强度与疲劳强度之间的关系很明显不是线性的. 因此,用以下公式来表述 $f(\Delta\sigma_T)$ 和 $g(\sigma_b)$:

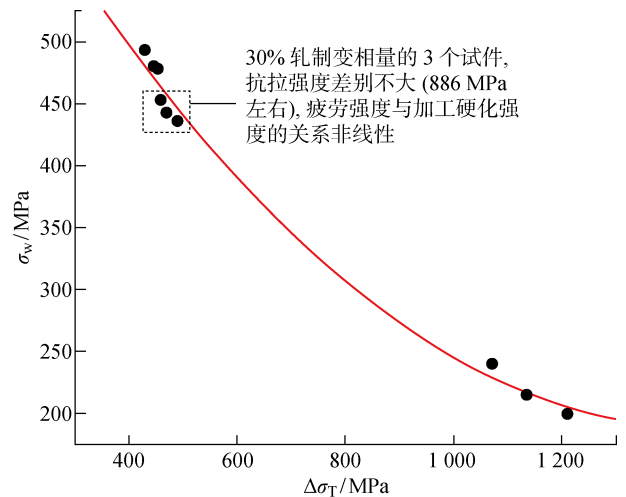
$$f(\Delta\sigma_T) = x(\Delta\sigma_T)^2 + y\Delta\sigma_T + z \tag{6}$$

$$g(\sigma_b) = u\sigma_b + v \tag{7}$$

式中: x 、 y 、 z 、 u 及 v 为材料常量. 忽略常量项,将以上两式合并为

$$\sigma_w = A_1(\Delta\sigma_T)^2\sigma_b + A_2(\Delta\sigma_T)^2 + A_3\Delta\sigma_T\sigma_b + A_4\Delta\sigma_T + A_5\sigma_b \tag{8}$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 及 A_5 为材料参数. 运用此公式计算材料的疲劳强度,并与“升降法”计算值作对比. 图 6 所示为疲劳强度预测模型计算的疲劳强度值 ($\sigma_{w,cal}$) 与实测值 ($\sigma_{w,exp}$) 之间的比较,所有数据点均落在 5% 的误差带内,准确度较高. 将此模型应用于 SAE 4340 钢^[16] 和 316L 不锈钢^[17],计算出的疲劳强度与实测值的误差最大为 7%,证明此模型同样适合于其他钢种.



(b) 加工硬化强度与疲劳强度之间的关系

图 5 力学性能与疲劳强度之间的关系

Fig. 5 Mechanical properties versus fatigue strength

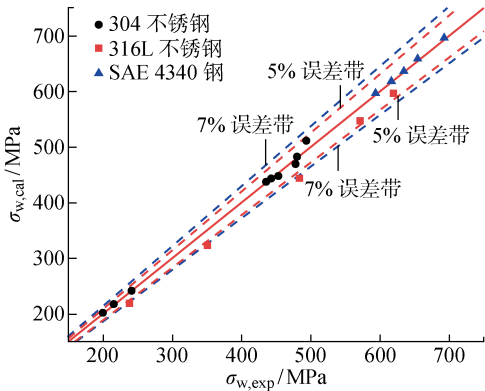


图 6 疲劳强度预测模型计算的疲劳强度与实测值之间的比较

Fig. 6 Comparison between the fatigue strength calculated by the fatigue strength prediction model and the measured value

2.3 Basquin 公式计算 304 不锈钢的疲劳强度

Basquin 公式一直是拟合 $S-N$ 曲线最主要的方法. 如下所示为 Basquin 公式的主要表示形式: 指数型 Basquin 公式

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \tag{9}$$

对数型 Basquin 公式

$$\log \sigma_a = \log \sigma'_f + b \log (2N_f) \tag{10}$$

式中: σ_a 为应力振幅; σ'_f 为疲劳强度系数; N_f 为失效循环次数; b 为疲劳强度指数.

根据 Basquin 公式可以准确地计算材料的疲劳强度, 因此确定公式中的参数就显得尤为重要. 之前众多的研究中表明, Basquin 公式中的疲劳强度参数与材料的力学性能之间存在某种关系^[18-20], 并

表 6 304 不锈钢的拉伸实验数据及高周疲劳 $S-N$ 曲线的疲劳强度参数

Tab. 6 Tensile data of 304 stain steel and fatigue strength parameters of high-cycle fatigue $S-N$ curves

试件	σ_b /MPa	σ_s /MPa	σ'_f /MPa	b	$\sigma_w(\text{Exp})$ /MPa	$\sigma_w(\text{Cal})$ /MPa	误差 /%
A	730	303	322.99	-0.0271	215	208.68	-2.94
B	886	770	689.41	-0.0295	443	428.53	-3.27
C	962	925	835.66	-0.0373	480	458.07	-4.57

如图 7 所示, 原始态 (未经过轧制处理) 的试件疲劳数据点都落在 12% 的误差带内, 而其他两种轧制态的疲劳数据点都在 5% 的误差带内. 这表明, 用 Basquin 公式来拟合 304 不锈钢的 $S-N$ 曲线精度较高, 并且这些 $S-N$ 曲线都呈现疲劳极限型的趋势.

将图 7 的 3 条 $S-N$ 曲线绘制在一张图中, 其中 Basquin 公式的参数列于表 6. 图 8 所示为 304 不锈钢的 3 条 $S-N$ 曲线. 试件 A~C 的 b 是逐渐减小的, 反映在图中即曲线的斜率是逐渐减小的; σ'_f 是逐渐

且可以用公式来进行表述, 见表 5, 表中: H_V 为材料的维氏硬度; S_{in} 为材料内部缺陷的面积; φ 和 ϕ 是与材料相关的系数; σ_b^c 为特定条件的抗拉强度.

表 5 疲劳强度参数与力学性能之间关系的总结

Tab. 5 Summary of the relationship between fatigue strength parameters and mechanical properties

σ'_f /MPa	b	公式	文献
$\sigma'_f = 2.5 \frac{H_V + 120}{(\sqrt{S_{in}})^{\frac{1}{6}}}$	$b = -\frac{1}{48}$	(11)	[18]
$\sigma'_f = 1.12 \frac{(H_V + 120)^{\frac{9}{8}}}{(\sqrt{S_{in}})^{\frac{1}{8}}}$	$b = \frac{1}{3} \lg \left(\frac{1.35(H_V + 120)^{\frac{1}{16}}}{(\sqrt{S_{in}})^{\frac{1}{48}}} \right)$	(12)	[19]
$\sigma'_f = \alpha + \beta \sigma_b$	$b = \begin{cases} C, & \sigma_b < \sigma_b^c \\ \varphi + \phi \sigma_b, & \sigma_b \geq \sigma_b^c \end{cases}$	(13)	[20]

Marsavina 等^[21] 运用 Basquin 公式计算出了 AM50 镁合金在不同条件下的疲劳强度, 发现其疲劳强度与抗拉强度和硬度有一定关系. 建立疲劳强度参数与力学性能之间的关系, 可以通过材料的力学性能来计算各个循环周次下的疲劳强度.

图 7 所示为经过轧制处理过的 304 不锈钢的 $S-N$ 曲线, 图中 σ_{-1} 为条件疲劳极限, 并且通过 Basquin 公式拟合得到:

$$\sigma_a = 322.99(2N_f)^{-0.0271}, \text{ 试件 A} \tag{11}$$

$$\sigma_a = 689.41(2N_f)^{-0.0295}, \text{ 试件 B} \tag{12}$$

$$\sigma_a = 835.66(2N_f)^{-0.0373}, \text{ 试件 C} \tag{13}$$

具体数据列于表 6, 表中: σ_s 为屈服强度; $\sigma_w(\text{Exp})$ 为“升降法”测得的疲劳强度; $\sigma_w(\text{Cal})$ 为 Basquin 公式计算所得的疲劳强度.

增大的, 反映在图中即曲线与应力振幅轴的截距是逐渐增大的, 并且变化范围较大. 随着疲劳强度的提高, 疲劳强度指数逐渐减小但变化范围不太大, 疲劳强度系数逐渐增大并且变化范围较大.

图 9 所示为 Basquin 公式参数与抗拉强度之间的关系. 根据图 9(a) 可以看出 σ'_f 与抗拉强度之间是线性关系:

$$\sigma'_f = 2.23\sigma_b - 1\,300.69$$

图 9(a) 中数据点均落在 2% 的误差带内, 这说

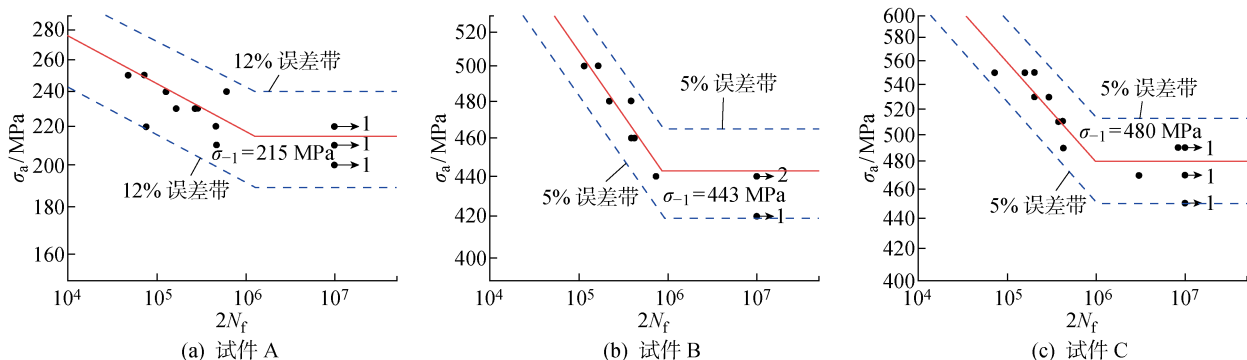


图 7 通过 Basquin 公式拟合的 3 种试件的 S-N 曲线

Fig. 7 S-N curves of three specimens fitted by Basquin equation

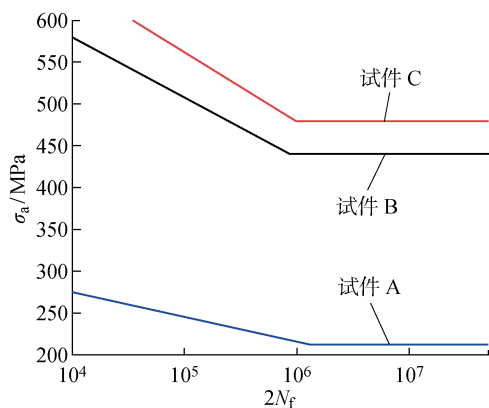
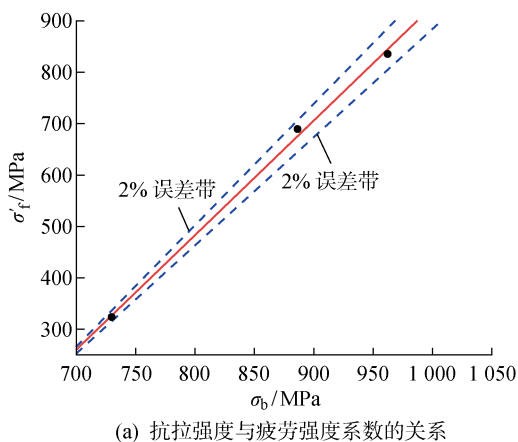
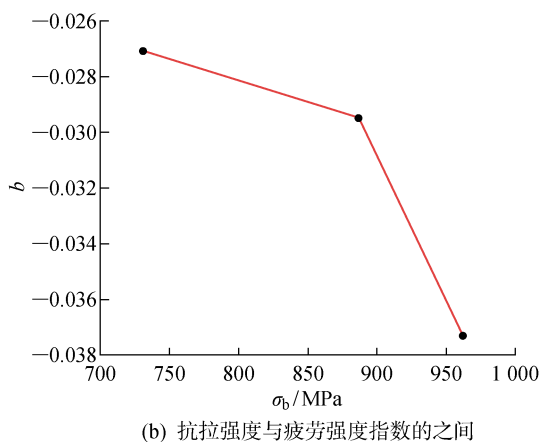


图 8 304 不锈钢的 3 条 S-N 曲线

Fig. 8 Three S-N curves of 304 stainless steel



(a) 抗拉强度与疲劳强度系数的关系



(b) 抗拉强度与疲劳强度指数的之间

图 9 Basquin 公式参数分析的关系

Fig. 9 Parameter analysis of basquin formula

由于本文中实验数据点较少,而疲劳强度指数变化不大,可以总结为疲劳强度指数大致为 -0.03 ,且与抗拉强度之间呈现负相关的关系。

综合上述研究可得出 Basquin 公式的参数与抗拉强度之间的关系,并且可以根据 Basquin 公式来计算 $2N_f = 10^7$ 时的疲劳强度,计算结果见表 6。将 Basquin 公式计算出的疲劳强度与通过“升降法”获

得此线性关系可以很好地描述疲劳强度系数与抗拉强度之间的关系。由于 S-N 曲线的形状还受试件内夹杂物的尺寸等因素的影响,对于本文使用的板状试件,3 种试件的裂纹几乎都是从拐角处萌生,因此夹杂物对于材料的疲劳强度影响不大,文中对此不做研究。则疲劳强度系数(σ'_f ,即 S-N 曲线的截距)与材料的抗拉强度呈正比例的线性关系。

从图 9(b)中可以看出,随着抗拉强度的提高, b 变化不大,整体呈现下降的趋势,但并不是完全的线性关系,而是呈现两段式,分别总结其关系为

$$b = \begin{cases} -1.53 \times 10^{-5} \sigma_b - 0.016, & \sigma_b \leq 866 \text{ MPa} \\ -1.03 \times 10^{-4} \sigma_b - 0.062, & \sigma_b > 866 \text{ MPa} \end{cases}$$

得的疲劳强度进行对比,计算值与实测值之间的误差最大为 4.57%,因此用这种方法计算疲劳强度精确度很高。

3 3 种计算疲劳强度方法的对比分析

根据“升降法”测定疲劳强度是应用最广泛的方法,该方法的结果被公认为实验测试值。但是“升降

法”必须依托于大量疲劳实验,适用于实验测试材料疲劳强度的场合。

Basquin 公式计算疲劳强度是根据 Basquin 公式来拟合实验所得的 $S-N$ 曲线,得到 Basquin 公式中的参数,从而计算给定循环次数时的疲劳强度。这种方法可以计算各个循环次数下的疲劳强度,并且有较高的精确度。由于 Basquin 公式是由 $S-N$ 曲线拟合出的,所以疲劳实验的进行是不可避免的。本文将 Basquin 公式的参数与抗拉强度建立定量的关系,减少了疲劳实验的工作量。在使用这种方法时,可以通过几个疲劳实验数据点来得到 Basquin 公式,适用于“升降法”找点不准确或者疲劳实验数据点少的情况。与“升降法”相比,误差在 4.57%左右。但是,此方法中建立的公式仅适用于同一批材料的疲劳强度计算,若材料或工作条件改变,需再次拟合公式。

对比以上两种计算疲劳强度的方法,基于真实应力应变曲线建立的疲劳强度预测模型,考虑了材料的抗拉强度和加工硬化能力,不需进行疲劳实验就可计算材料的疲劳强度,极大地节省了实验成本,并且适用于其他类型的钢,与“升降法”相比,误差在 5%以内。但是公式中的项数较多,至少需要 5 组拉伸实验的数据。

4 结论

(1) 疲劳强度不仅受抗拉强度的影响,还受加工硬化强度的影响。综合这两种影响因素,将已有的方法加以改进,得到新的疲劳强度预测模型。

(2) Basquin 公式中的疲劳强度参数与材料的抗拉强度之间存在着一定的关系。疲劳强度系数与抗拉强度呈正比例的关系,疲劳强度指数随抗拉强度的变化在小范围内呈下降的趋势。

(3) 对比 3 种计算疲劳强度的方法,本文建立的疲劳强度预测模型在几乎不降低精确度的前提下,极大地降低了实验成本,减少了实验步骤。

参考文献:

[1] MURAKAMI Y. Metal fatigue: Effects of small defects and nonmetallic inclusions [M]. Kidlington, UK: Elsevier, 2002.

[2] OSMOND P, LE V D, MOREL F, *et al.* Effect of porosity on the fatigue strength of cast aluminium alloys: From the specimen to the structure[J]. **Procedia Engineering**, 2018, 213: 630-643.

[3] 张健. 非均匀层片结构低碳钢的力学行为研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.

ZHANG Jian. Research on the mechanical behavior of low carbon steel with non-uniform layer structure [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.

[4] 丁明超, 张元良, 戚宏伟, 等. 基于微观划痕的疲劳强度预测[J]. **东北大学学报(自然科学版)**, 2020, 41(5): 693-699.

DING Mingchao, ZHANG Yuanliang, XIAN Hongwei, *et al.* Fatigue strength prediction based on micro scratches [J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2020, 41(5): 693-699.

[5] HAGIWARA M, KITAURA T, ONO Y, *et al.* Relationship among tensile strength, high cycle fatigue strength, and origin of fatigue crack initiation in a minor boron (B)-modified β -type Ti-6.8Mo-4.5Fe-1.5Al alloy[J]. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 2021, 52(2): 806-816.

[6] 刘平. 7B50 铝合金板材疲劳极限强度及 $S-N$ 曲线的测定[J]. **铝加工**, 2017(3): 26-30.

LIU Ping. Determination of fatigue ultimate strength and $S-N$ curve for 7B50 aluminum alloy plate[J]. **Aluminium Fabrication**, 2017(3): 26-30.

[7] MÜLLER C, WÄCHTER M, MASENDORF R, *et al.* Accuracy of fatigue limits estimated by the staircase method using different evaluation techniques[J]. **International Journal of Fatigue**, 2017, 100: 296-307.

[8] GAZIZOV M, KAIBYSHEV R. High cyclic fatigue performance of Al-Cu-Mg-Ag alloy under T6 and T840 conditions[J]. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 2017, 27(6): 1215-1223.

[9] 崔友久, 惠卫军, 张永健, 等. 连铸与模铸高铁车轴钢的高周疲劳破坏行为[J]. **中国冶金**, 2019, 29(12): 31-39.

CUI Youjiu, HUI Weijun, ZHANG Yongjian, *et al.* Comparison of high-cycle fatigue properties of continuous casting and mould casting axle steels[J]. **China Metallurgy**, 2019, 29(12): 31-39.

[10] 耿思远, 杨卯生, 赵昆渝. 温度对高钴钼不锈钢轴承钢高周疲劳性能的影响[J]. **钢铁**, 2018, 53(12): 77-85.

GENG Siyuan, YANG Maosheng, ZHAO Kunyu. Influence of temperature on high cycle fatigue properties of high cobalt molybdenum stainless bearing steel [J]. **Iron and Steel**, 2018, 53(12): 77-85.

[11] 高彩茹, 朱长友, 张大伟, 等. 车轮轮辐钢 S500LF 的疲劳性能[J]. **东北大学学报(自然科学版)**, 2020, 41(8): 1148-1152.

GAO Cairu, ZHU Changyou, ZHANG Dawei, *et al.* Fatigue property of spoke steel S500LF[J]. **Journal**

- of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(8): 1148-1152.
- [12] QU C, ZHOU H W, ZOU X F. Experimental study on random vibration fatigue S-N curve of GH188 alloy under high temperature environment[C]// **Proceedings of the 2018 International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering**. Paris, France: Atlantis Press, 2018: 201-205.
- [13] MLIKOTA M, SCHMAUDER S, BOŽIĆ Ž. Calculation of the Wöhler (S-N) curve using a two-scale model[J]. **International Journal of Fatigue**, 2018, 114: 289-297.
- [14] 王举金, 阳光武, 杨冰, 等. 基于结构应力法的环焊结构 S-N 曲线分析[J]. **焊接学报**, 2019, 40(8): 63-68.
WANG Jujin, YANG Guangwu, YANG Bing, *et al.* S-N curve analysis of ring welding based on structural stress method[J]. **Transactions of the China Welding Institution**, 2019, 40(8): 63-68.
- [15] 谢学涛, 何柏林, 邓海鹏. MB8 镁合金焊接接头超高周疲劳性能[J]. **兵器材料科学与工程**, 2018, 41(1): 20-23.
XIE Xuetao, HE Bolin, DENG Haipeng. Ultra high cycle fatigue properties of MB8 magnesium alloy welded joint[J]. **Ordnance Material Science and Engineering**, 2018, 41(1): 20-23.
- [16] PANG J C, LI S X, WANG Z G, *et al.* General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials[J]. **Materials Science and Engineering: A**, 2013, 564: 331-341.
- [17] ZHANG M X, PANG J C, LI S X, *et al.* The effect of tailored deformation on fatigue strength of austenitic 316L stainless steel[J]. **Advanced Engineering Materials**, 2018, 20(11): 1800554.
- [18] LIU Y B, LI Y D, LI S X, *et al.* Prediction of the S-N curves of high-strength steels in the very high cycle fatigue regime[J]. **International Journal of Fatigue**, 2010, 32(8): 1351-1357.
- [19] NAITO T, UEDA H, KIKUCHI M. Fatigue behavior of carburized steel with internal oxides and non-martensitic microstructure near the surface[J]. **Metallurgical Transactions A**, 1984, 15(7): 1431-1436.
- [20] DUAN Q Q, PANG J C, ZHANG P, *et al.* Quantitative relations between S-N curve parameters and tensile strength for two steels: AISI 4340 and SCM 435[J]. **Research & Reviews: Journal of Material Science**, 2018, 6(1): 1-16.
- [21] MARSAVINA L, IACOVIELLO F, DAN PIRVULESCU L, *et al.* Engineering prediction of fatigue strength for AM50 magnesium alloys[J]. **International Journal of Fatigue**, 2019, 127: 10-15.

(本文编辑:陈晓燕)