

疲劳累积损伤理论的应用研究

卓 钺

提 要 本文通过实验得出：在测定渗碳钢接触疲劳极限时，只要正确判断试样是由于次表层萌生裂纹而失效的，那么 Miner 线性累积损伤理论是可以应用的。本文提出不同渗碳工艺处理相同材料之 $\sigma-N$ 曲线之间存在着一种平移关系这一假设，并给出了应用这种关系求疲劳极限的方程。

前 言

以往疲劳累积损伤理论的研究大多注重于用一些修正累积公式来解决理论与实际试验之间的不符现象，而对于具体的疲劳裂纹萌生和扩展方式与累积规律之间的关系则研究甚少。本文在接触疲劳试验中对浅层剥落失效的试样应用了 Miner 线性累积公式，得出了满意的结果。

一、测试原理^[1]

金属的接触疲劳损伤主要是由剪应力造成的，金属在循环剪应力作用下，由损伤到失效必须要经过一定的时间或循环周次。在这期间，金属内部缺陷将逐渐增加，直至疲劳破坏。这个过程称之为“疲劳累积损伤过程”。根据 Miner 线性累积理论^[2]，我们可以用下面的公式作为损伤因子来描述疲劳累积损伤过程进行的程度。

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (a)$$

其中 N_i ——试样在应力 σ_i 下的疲劳寿命，单位为周次； n_i ——试样在 σ_i 应力下经受的疲劳周次。

因有
所以

$$\begin{aligned} \lg N &= b \lg \sigma + a \\ N &= 10^{(b \lg \sigma + a)} \end{aligned} \quad (b)$$

若在试验时使每一应力下的 $n_i = n_0$, 则(a)式可化为

$$D = n_0 \sum_i \frac{1}{N_i} \quad (c)$$

将(b)式代入(c)式则有

$$\begin{aligned} D &= n_0 \sum_i 10^{(-b \lg \sigma_i - a)} = n_0 \sum_i [10^{-b \lg \sigma_i} \cdot 10^{-a}] \\ &= \frac{n_0}{10^a} \sum_i (\sigma_i^{-b}) \end{aligned}$$

根据以往渗碳钢 $\sigma-N$ 接触疲劳曲线的特点, 现假设: 相同材料, 采用不同渗碳、淬火工艺处理后, 它们的 $\sigma-N$ 曲线之间存在平移关系, 即将(b)式中代入不同常数 σ_0 如下:

$$N = 10^{[b \lg(\sigma_i + \sigma_0) + a]} \quad (d)$$

取不同的 σ_0 值即可得出同类材料不同工艺处理的 $\sigma-N$ 曲线。再将(d)式代入(c)中即可得

$$D = \frac{n_0}{10^a} \sum_i [(\sigma_i + \sigma_0)^{-b}] \quad (e)$$

由(e)式可知, 我们只需按常规试验方法求出某材料一种工艺处理后的 $\sigma-N$ 曲线, 得出(e)式中常数 a 、 b ; 在求另一种工艺处理后试样的疲劳极限时, 就可从(e)式算得。例如令损伤因子 $D=1$, 依靠计算机逼近求出 σ_0 , 此时所求试样的疲劳极限就等于已知 $\sigma-N$ 曲线疲劳极限与 σ_0 之和。

二、试验内容

作者采用了两种材料进行试验, 对理论和假设进行了验证。

第一种为 55SiMnMoV 材料。对试样进行了油淬和固体渗碳处理。试样外形见图 1。由于油淬处理的试样疲劳极限较低, 所以将其接触宽度设计为 5mm。而经固体渗碳后试样疲劳极限较高, 所以将接触宽度设计为 3mm。为了消除倒角给接触宽度造成的误差, 对每个试样用工具显微镜来最后精确测定接触宽度。

另一种为 20CrMo 材料。试样尺寸见图 2。这是一种常见渗碳用钢, 试样经气体渗碳处理。试验时, 将 20CrMo 试样和 55SiMnMoV 试样进行对滚。

试验机为宜昌试验机厂 1979 年生产的 JPM-1 型接触疲劳试验机。试样转速为 2000 转/分, 相对滑差为 7.76%。试样失效以表面出现明显剥落坑, 同时伴随噪声增大为判断标准。试验接触应力以最大剪应力 σ_c 为准进行计算。 σ_c 的表达式如下:

$$\sigma_c = 0.591 \sqrt{PE \frac{(D_1 + D_2)}{D_1 D_2}}$$

其中 P —— 单位线长度上的受力, E —— 试样弹性模量, D_1 、 D_2 —— 分别为上、下试样

的外圆直径。

试验首先采用常规方法测出两种材料的 σ_c-N 接触疲劳曲线, 然后采用阶梯加载快速试验方法进行验证试验。阶梯加载的初应力选为稍大于已知的疲劳极限, 循环比率

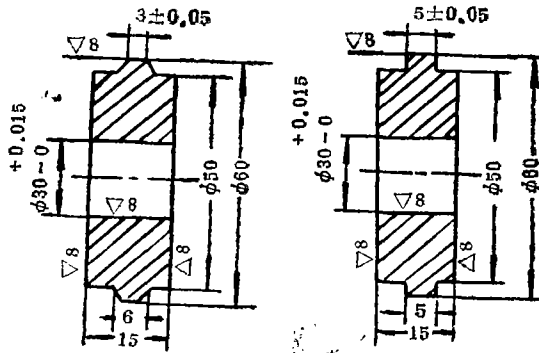


图 1 55SiMnMoV 试样外形尺寸

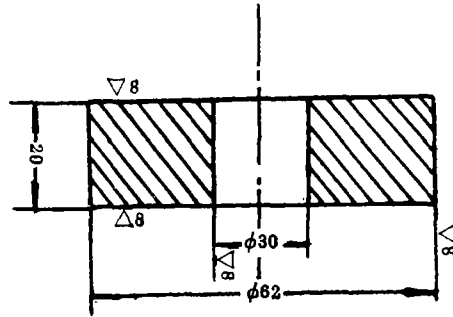


图 2 20CrMo 试样外形尺寸

定为 $\Delta\sigma_c/\Delta n=7.06\text{MPa}/\text{转}$ 。

三、试验结果

在用常规方法求 σ_c-N 疲劳曲线时, 首先假设 σ_c-N 曲线满足

$$\lg N = b \lg \sigma_c + a$$

令 $X = \lg \sigma_c$, $Y = \lg N$ 则有

$$Y = bX + a$$

利用最小二乘法求 a 、 b 表达式为:

$$a = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$b = \frac{1}{n} (\sum Y_i - a \sum X_i)$$

相关系数为

$$R_{xy} = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xy}l_{xx}}}$$

其中

$$l_{i,q} = \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(q_i - \bar{q})$$

计算结果见表 1, 阶梯加载的试验结果见表 2.

表 1 常规接触疲劳试验结果

钢 号	工 艺	a	b	r	σ_c (GPa)
55SiMnMoV	油 淬	28.6496	-9.9730	-0.708	14.51
20CrMo	汽 渗 碳	38.8599	-12.9630	-0.901	28.15
55SiMnMoV	固 渗 碳	31.8598	-10.2322	-0.855	26.38

表 2 阶梯加载试验结果

钢 号	工 艺	疲劳极限 σ_c (GPa)		相对误差	失效形式
		常规方法	阶梯加载		
20CrMo	汽 渗 碳	28.15	28.34	0.70%	浅层剥落
20CrMo	汽 渗 碳		25.30	10.10%	表面麻点
55SiMnMoV	油 淬	14.51	15.20	4.5%	浅层剥落
55SiMnMoV	固 渗 碳	26.38	26.18	0.75%	浅层剥落

四、分 析 讨 论

(1) 关于 σ_c-N 曲线的平移性假设。

本文假设同种材料经不同工艺处理后, 其接触疲劳 σ_c-N 曲线之间存在着平移关系。这是基于查阅大量实验资料而提出的。要证明这一假设需要极大的试验量。所以, 我们仅通过归纳前人的试验来验证这一假设。图 3 和图 4 分别为 25MnTiBR 和 En36 钢不同工艺处理后的 σ_c-N 曲线。从这两图中可以看出当曲线沿 σ_c 轴垂直移动时, 是具有重合性的。还有很多类似例证, 这儿不一一例举。

(2) 失效形式和损伤累积规律的关系。

试样失效形式, 在本试验中表现有表面麻点和浅层剥落两种形式。表面麻点剥落坑的深度一般在 0.2mm 左右。浅层剥坑深在 0.70mm 左右。

两试样接触时, 接触区中心至试样心部接触应力的分布, 按弹性力学计算可得如图

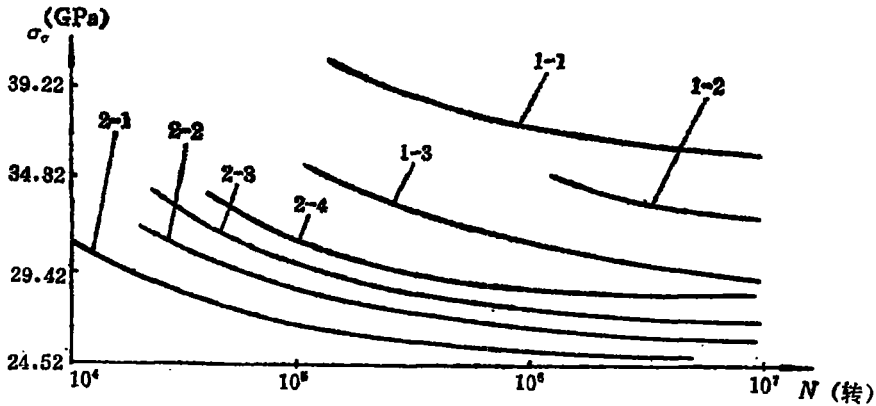


图 3 25MnTiBR 钢经两类不同参数渗碳工艺处理后试样的接触疲劳 $\sigma_c - N$ 曲线^[3]

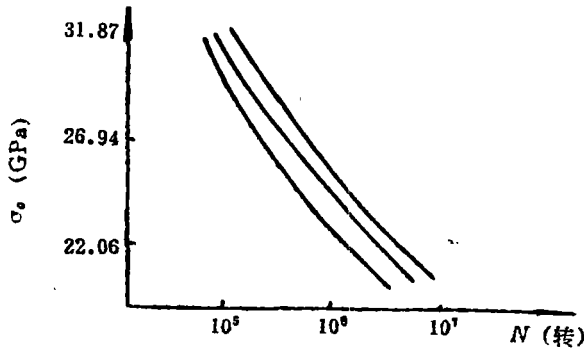


图 4 En36 钢不同渗层深度试样的 $\sigma_c - N$ 曲线^[4]

5所示的分布曲线。必须注意，随着试样的滚动， τ_0 的变化为一脉动变化，而 τ_{45° 将作

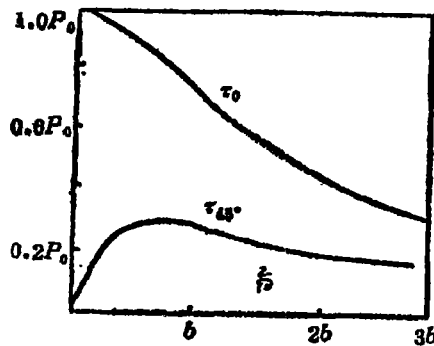


图 5 τ_{45° 、 τ_0 的相对值与表面下深态的变化关系

$\tau_{45^\circ} \rightarrow -\tau_{45^\circ} \rightarrow \tau_{45^\circ}$ 的周期变化。进行本文中的阶梯加载试验时， b 值是从 0.76mm 逐渐增大到 1.10mm 左右。所以，距试样表面 0.2mm 处 τ_{45° 是很小的，对损伤过程将不起作用；而距试样表面 0.70mm 处， τ_{45° 几乎正处在峰值处将其增加一倍后和 τ_0 差不多相等，因此时的 τ_{45° 应力将对损伤过程起作用。对失效前的试样取纵断面观察，发现

试样上存在一黑色浸蚀区。在距试样表面 0.5~1.2mm 范围内,如图 6 所示。黑色浸蚀区即反映了材料损伤集中的区域。这正好对应了浅层剥落坑深度的区间。由材料逐渐损伤到失效的过程来看,浅层剥落应为正常失效,而表面麻点是一种偶然的失效形式。

由以上分析可知,两种失效形式是由不完全相同的损伤应力造成的。所以,它们的

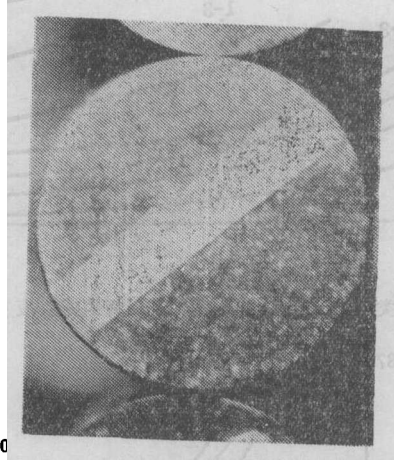


图 6 20 \times 2

损伤累积过程也是不同的。进一步观察还可以发现,表面剥落坑中很难找到如图 7 所示的疲劳波纹状断口,而浅层剥落坑中则很容易找到。可以判断,表面麻点失效可能是试样表面偶然碰伤,使磨擦系数增大而造成的粘着磨损失效。本文仅对浅层剥落失效情况应用 Miner 累积损伤理论,而不考虑表面麻点失效数据带来的矛盾是完全合理的。

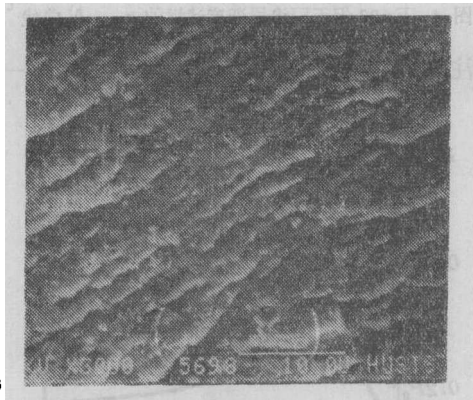
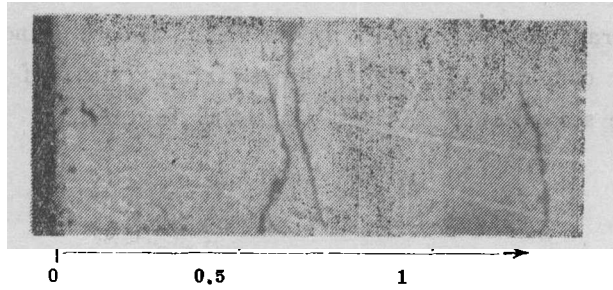


图 7 运转 4.8×10^5

波纹状断口 $\times 3000$

(3) 阶梯加载试验中裂纹的萌生特点。

当试样在 τ_{45° 和 τ_0 二应力的联合作用下,其内部缺陷逐渐增多,最后在缺陷最严重的部位开始萌生裂纹。与常规试验不同的是:在阶梯加载中,由于 P_0 的变化改变了 b 值,使试样的危险截面在一定范围内变化,从而可能出现在同一表面萌生双根裂纹的情况。如图 8 所示。但这并不会影响损伤累积规律。因为只有发展较快的一根裂纹起决定作用。再则,在整个损伤过程中,有裂纹寿命仅占 3% 以下。



距试样表面距离, 单位为毫米。
图 8 20CrMo 试样中观察到的裂纹 ×58

五、结 论

1. 对于接触疲劳试验中, 裂纹萌生于次表面的情况, 其疲劳累积损伤过程是满足 Miner 线性累积规律的。并可按下式进行计算。所求

$$D = \frac{n_0}{10^a} \sum_i [(\sigma_i + \sigma_0)^{-b}]$$

疲劳极限, 其误差小于 5%。

2. 不同失效形式, 其损伤累积规律是不同的, 不能按同一方式处理。表面麻点失效与浅层剥落失效即属于此。

本文得到了华中工学院朱孝谦、黄孝友两位老师的指导, 以及国防科技大学黄大墩老师的帮助, 在此表示致谢。

参 考 文 献

- [1] 曾春华, 机械强度, 1979, No 11, 19—24.
- [2] Miner, M.A.J. App. Mech., 12.A. 159(1945)
- [3] 邵尔玉, 金属热处理, 1979, No 1, 31—33.
- [4] S. Ramanath, Wear, 45(1977) 323—333.

The Study of Application of Fatigue Summation Damage Theory

Zhuo Yue

Abstract

This paper makes the first step to study the application of fatigue summation damage theory by subaividing the manner of crack generation,

The study on this field had been limited in using different formulaes to modify the contradiction in test. It proves that Miner's linear summation damage theory can be used for contact fatigue test, if the spacemen failure is in the second surface crack generating failure.