

文章编号:1007-6735(2010)05-0453-04

疲劳损伤线的初步研究

李玉鹏, 卢 曦

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了提高汽车零部件在载荷谱下的疲劳累积损伤预测精度, 基于汽车结构强度在疲劳寿命初期的上升又下降的过程, 提出了一种新的疲劳损伤线确定方法. 该方法以现有的应力-寿命曲线 ($S-N$ 曲线) 为基础, 以 $S-N$ 曲线上的转折点为原点逆时针旋转, 以 $S-N$ 曲线斜率的 $2/3$ 作为损伤线的斜率, 得到估算损伤线, 且对两级循环载荷下的累积损伤进行合理解释.

关键词: 损伤线; 疲劳极限; 应力-寿命曲线; 累积损伤
中图分类号: TH 140.1 **文献标志码:** A

Preliminary study on fatigue damage line

LI Yu-peng, LU Xi

(College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A new method for confirming the fatigue damage curve was presented. Based on the situation that the strength of structure of vehicle descends after originally arising, the method can provide more precise accumulated fatigue damage of vehicle parts under certain load spectra. In order to get the modified damage curve, the primitive stress-number of cycles curve ($S-N$ curve) was rotated around the original point and presuming that the slope of $S-N$ curve be k , $2k/3$ would be adopted as the slope of the new $S-N$ curve. Reasonable explanations for the damage-accumulations of parts under cyclic loads of level 2 were presented.

Key words: damage line; fatigue limit; stress-number of cycles curve; damage-accumulation

文献[1]最早提出了损伤线, 关于损伤线的研究也一直在深入和扩展^[2]. 目前测定疲劳损伤线的方法主要有两种^[3], 一种是 Френч 试验法, 根据试验数据描点得出, 但试验法需要大量的时间和资金; 另一种是 ИВАНОВ 估算法, 在弯曲试验中通过将应力-寿命曲线 ($S-N$ 曲线) 沿纵坐标移动一个常数来得到损伤曲线, 钢材的常数一般为 60 MPa, 但估算法在疲劳极限附近不符合常规试验数据, 两种方法均有各自的不足.

由于损伤线将简单的 Miner 理论复杂化了, 两种方法又具有局限性, 所以, 损伤线并未得到广泛应用^[4]. 因此, 工程中常用的疲劳累积损伤理论, 如 Miner 法则、修正 Miner 法则、双线性理论及 Corton-Dolan 理论等, 都未考虑损伤线, 即只考虑载荷对结构造成的损伤, 而没有考虑到载荷对结构的强化. 因而在结构强度评估和零件寿命预测时, 计算结果较为保守且不精确, 不适于结构的轻量化设计^[5].

为了提高汽车零部件在载荷谱下的疲劳累积损

收稿日期: 2009-12-25

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(09ZR142200); 上海市政府间国际科技合作项目(10520711500); 上海市教育委员会科研创新项目(11YZ114); 上海市教育委员会重点学科建设资助项目(J50503)

作者简介: 李玉鹏(1985-), 男, 硕士研究生.

卢 曦(联系人), 男, 教授. E-mail: luxi_usst@163.com.

伤预测精度,本文对比现有的疲劳损伤线的计算方法,提出了一种新的比较容易获得损伤线的方法,并举算例验证了这种方法的可行性和可靠性,对产品强度评估和寿命预测具有重要意义.

1 新损伤线的确定

1.1 疲劳损伤线

工程中使用的材料或结构其静强度和疲劳强度时刻都在发生变化,有些零件在满足规定的使用期限后,强度会增高,即在使用载荷的锻炼下强度会高于原来制造完成时的原始强度. 当在实验室条件下对强度进行评价时,合理的结构应在满足标准所规定的疲劳寿命后其强度衰减到一定数值,而不是增高了一定数值. 这样的强度设计才能保证结构的轻量化. 对于一般的钢材料加载时,强度先升高然后下降,直到完全破坏.

文献[6]的研究表明,在试验载荷下,普通钢光滑试件的强度值在结构寿命的前约 20%~30% 循环次数下会经历一个上升再下降的过程. 当循环次数达到试验载荷下结构寿命的 10%~15% 时静强度值达到最大. 如图 1 所示. S 为试验应力, P 为可靠度, r 为循环比, R 为剩余强度.

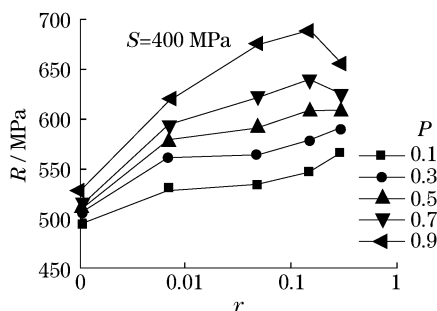


图 1 结构强度的变化轨迹^[6]

Fig. 1 Change trajectory of structure strength^[6]

国内学者将过载情况对疲劳损伤的影响分成 3 个区间^[7],如图 2 所示,在 I 区间的应力水平和循环周次之内,对以后的在疲劳极限 σ_{-1} 以下应力水平工作寿命不仅不会损害,而且还可以提高 σ_{-1} 值,起到某种强化作用. 在 II 区没什么影响,在 III 区则将产生损害作用,即降低疲劳极限,缩短疲劳寿命. 因此,在 I 区和 II 区都不符合 Miner 累积损伤假说.

国内外研究表明,结构在载荷加载的寿命初期并不是只有损伤,还包含强化在内,为了提高疲劳累积损伤预测精度应该考虑损伤线,损伤线在疲劳累

积损伤预测、产品强度评估时具有重要意义.

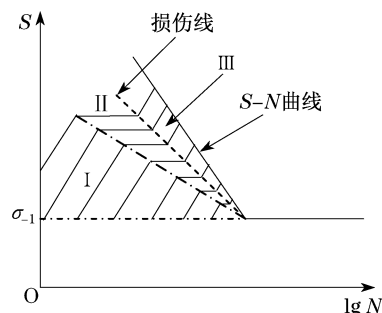


图 2 过载情况对疲劳损伤的影响

Fig. 2 Strengthening and damaging under overload

1.2 现有损伤线的计算方法

现有损伤线的计算方法主要有 Френч 试验法和 ИВАНОВ 估算法这两种.

1.2.1 Френч 试验法^[3]

试样在高于疲劳极限的应力下试验一定的循环次数,然后将应力降低到等于疲劳极限的数值,再继续进行试验. 如果试样不破坏,则可以说明预加的过载没有引起损伤,如果试样破坏,则说明过载已引起损伤. 这样,在同一应力水平下试验一系列试样,找出不产生累积损伤,且不引起裂纹萌生的最大寿命. 测出若干个应力水平的临界损伤值,就可以确定损伤线. 即利用试验描点得出,图 3^[4]为某材料的 $S-N$ 曲线和实测损伤线.

用试验法测损伤线时,要在同一应力水平下试验一系列试样,找出不产生累积损伤且不引起裂纹萌生的最大寿命,要测出若干个应力水平的临界损伤值,这样不仅需要花费很多时间,而且资金投入也比较大.

1.2.2 ИВАНОВ 估算法^[3]

根据疲劳试验方法手册,金属的损伤曲线可以根据已有的疲劳曲线确定,而不需要附加试验,细观裂纹开始形成曲线,即损伤曲线和断裂曲线平行. 因此,在弯曲试验中通过将 $S-N$ 曲线沿纵坐标移动一个常数来得到损伤曲线,钢材的常数为 60 MPa. 如图 4 所示,虚线为估算损伤线.

平移 $S-N$ 曲线法,从图 4 中可以看出,在低应力下,估算的损伤曲线会偏离实际试验结果. 例如,当应力为疲劳极限时,经过无限次循环不产生损伤,因此,损伤曲线和 $S-N$ 曲线转折点重合,如图 4 所示,而估算的损伤曲线却不重合. 因此,在处理低应力不产生损伤的最大循环数及其在整个寿命中所占的比例时应该加以注意.

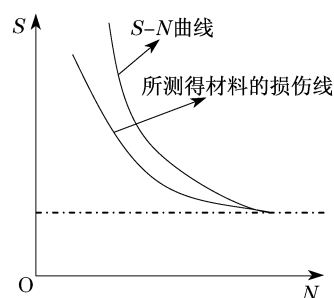


图3 Френч方法所测得的损伤线

Fig.3 Damage line Френч method measured

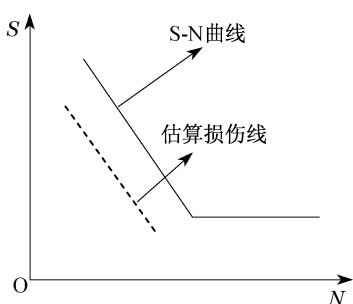


图4 Иванов估算法估算得损伤线

Fig.4 Damage line Иванов method estimated

1.3 新的损伤线的提出

鉴于现有的疲劳损伤线试验法需要投入大量的时间和资金,成本较高;估算损伤线的方法在疲劳极限附近又不接近实际实验数据,缺乏可靠性.为了更精确地计算疲劳累积损伤和,利用损伤线进行结构强度评估和寿命预测.根据哈埃巴赫在修正 Miner 理论时提出将 $(2k-1)$ 作为 $S-N$ 曲线延长部分的斜度, k 为 $S-N$ 曲线的斜率^[8].本文设 $S-N$ 曲线斜率为 k ,取其斜率的 $2k/3$ 来作为损伤线的斜率,代入 $S-N$ 曲线疲劳极限转折点得到损伤线方程;以 $S-N$ 曲线疲劳极限转折点为原点,逆时针旋转计算的角度,可得损伤线图.取单对数坐标,纵轴为应力 σ ,横轴为对数疲劳寿命,如图5所示.

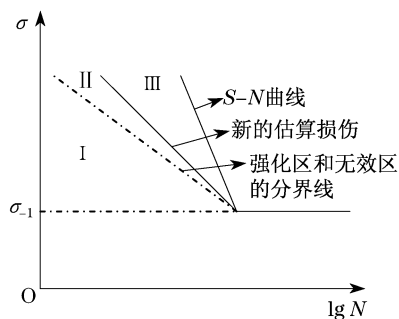


图5 新的估算损伤线

Fig.5 New estimation damage line

当载荷为单级应力加载时,根据损伤线判断该载荷是在损伤线的哪一侧,即可得出该载荷是强化还是损伤.当载荷为两级应力加载时,第一级应力如产生强化,则第二级应力加载时寿命会增加,此时,由于强化载荷的作用,材料寿命延长约30%;第一级应力如产生损伤,第二级应力会继续产生损伤,此时,第一级应力没有强化只有损伤,加剧了材料的破坏,寿命缩短约30%.所以,一般情况下先低载荷后高载荷会出现累计损伤和约为1.3,先高载荷后低载荷会出现累计损伤和约为0.7.当载荷为多级应力加载时,情况较为复杂,还需要更多试验数据进行进一步的研究.

2 算例

以大圆弧试样、热轧态的16 Mn钢棒材为材料进行旋转弯曲疲劳试验^[9].首先测得16 Mn的 $S-N$ 曲线,然后分别以高低和低高两组不同次序的载荷对其进行加载,计算不同次序载荷加载下的累计损伤和.根据实验数据^[9], $S-N$ 曲线描点所得如图6所示.本文所提出的新的损伤线以虚线表示,设原来 $S-N$ 曲线的斜率为 k ,则新损伤线的斜率为 $2k/3$.经计算后的16 Mn的损伤线为

$$\sigma = 537.32 - 38.188 \lg N$$

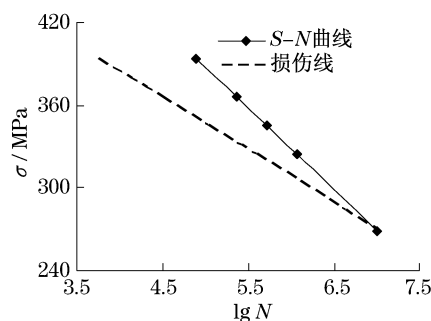


图6 估算的疲劳损伤线

Fig.6 New estimation damage line

不产生损伤的作用次数及其占相应应力下疲劳寿命的比例为 β ,如表1所示,可以看出,此损伤线趋势明显接近实际损伤线,不同应力下不产生损伤的最大循环数 f 呈递增趋势,在疲劳极限附近更加符合实际情况. σ_i 为应力, $i=1,2,3,4$. i 表示第 i 个应力.

根据试验数据^[9],载荷由低到高加载的累积损伤和约为1.3,载荷由高到低加载的累积损伤和约为0.7.载荷由高到低,寿命的前约30%没有强化只

有损伤;载荷由低到高,寿命前约 30% 是上升又下降的过程. 考虑损伤和强化后, σ_1 与 σ_3 和 σ_2 与 σ_4 不同加载次序下的累积损伤和接近 1.0,但由于试样个体不同等因素存在误差,所以,损伤和不完全等于 1.0,如表 2 所示, $\Sigma n_i/N_i$ 为两级循环载荷下的疲劳累积损伤和, n_i 表示第 i 个应力的循环次数, N_i 表示第 i 个应力循环下的寿命. D 表示考虑损伤和强化后的疲劳累积损伤和.

表 1 不同应力下不产生损伤的最大循环数
Tab.1 Max circulation numbers for various loads producing no damage

i	σ_i/MPa	$f(\text{次})$	$\beta/\%$
1	394	5 662	6.0
2	366	30 635	15.3
3	345	108 676	27.0
4	324	385 520	28.1

表 2 两级循环载荷下的损伤和
Tab.2 Sum of damage under cyclic loads of level two

n_1/N_1	n_3/N_3	$\Sigma n_i/N_i$	D	n_3/N_3	n_1/N_1	$\Sigma n_i/N_i$	D
0.1	0.670	0.770	1.070	0.18	1.02	1.200	0.989
0.2	0.587	0.787	1.087	0.36	1.02	1.380	1.167
0.4	0.521	0.921	1.221	0.45	0.88	1.330	1.125
0.5	0.396	0.896	1.196	0.49	0.82	1.310	1.158
0.6	0.184	0.784	1.084	0.58	0.78	1.360	1.189
n_2/N_2	n_4/N_4	$\Sigma n_i/N_i$	D	n_4/N_4	n_2/N_2	$\Sigma n_i/N_i$	D
0.2	0.72	0.920	1.220	0.1	1.20	1.300	1.014
0.4	0.40	0.800	1.100	0.2	1.00	1.200	0.928
0.6	0.28	0.830	1.130	0.4	1.02	1.420	1.242
0.7	0.22	0.920	1.220	0.5	0.96	1.460	1.351
0.8	0.15	0.950	1.250				

先低载荷再高载荷的疲劳试验,数据中低载荷 σ_3 先循环加载其疲劳寿命的 18% 和 36%,然后再加载高应力 σ_1 ,试验结果均为 102%, σ_1 的疲劳寿命比单独加载时的寿命长. 说明了低载荷 σ_3 作用其疲劳寿命的 36% 之前,试件的疲劳强度不但没损伤反而有提高,瞬时强度经历了一个从上升到下降的过程. 当低载荷 σ_3 作用,循环次数小于 36% 时,具有锻炼效应. 当低载荷循环超过 36% 时,循环材料强度单调下降. 不产生损伤的最大循环数在整个寿命中所占的比例约为 36%. 同理,先低载荷 σ_4 后高载荷 σ_2 也是同样的现象. 先低载荷再高载荷作用下,累积损伤和约为 1.3,由于试样个体和加载次数等因素,损伤和会有所不同.

先高载荷后低载荷的疲劳试验,疲劳累积损伤和约为 0.7. 当循环次数超过不产生损伤的最大循环数后,材料开始产生损伤,处于图 2 的Ⅲ区,因此,累积损伤和小于 1.0. 根据文献[6]的研究结论,由于结构钢处于高循环疲劳强度区,而载荷 σ_1 和 σ_2 处于低循环疲劳强度区,并不处于寿命的前 30% 区间,所以,先高载荷 σ_2 再低载荷 σ_4 ,累积损伤和会大于 0.7. 试验结果也进一步说明:当载荷变换一次且高载荷在前时,累积损伤和约为 0.7.

总体看来,试验数据为先低载荷再高载荷作用

下,累积损伤和约为 1.3;先高载荷再低载荷,累积损伤和约为 0.7. 考虑损伤和强化后, σ_1 与 σ_3 和 σ_2 与 σ_4 不同加载次序下的累积损伤和接近 1,新的损伤线的趋势接近实测损伤线,试验数据也说明了这一点.

3 结 论

本文根据现有损伤线获得方法的不足,基于试件结构强度随载荷加载在疲劳寿命的约 30% 之前结构强度上升再下降,强度在数值上没有变化,而寿命约 30% 之后结构强度开始下降,提出了新的损伤线的计算方法,得出结论:

a. 设 $S-N$ 曲线斜率为 k ,取其斜率的 $2k/3$ 来作为损伤线的斜率,代入 $S-N$ 曲线疲劳极限转折点得到损伤线方程;以 $S-N$ 曲线疲劳极限转折点为基点,逆时针旋转计算得到的角度,可得损伤线图.

b. 本文方法较之 ИВАНОВ 估算法(平移 $S-N$ 曲线法),更接近于试验法所测的损伤线,且省去了 ФРЕНЧ 试验法所需要的大量时间和资金投入,合理地解释了两级载荷加载时疲劳累积损伤和. 疲劳试验先低载荷再高载荷作用时,累积损伤和约为 1.3;先高载荷再低载荷,累积损伤和约为 0.7. 考虑损伤和强化后,损伤线上累积损伤和约为 1.0.

(下转第 465 页)