

文章编号: 1000-4939(2001)02-0128-06

A633D 斗杆的疲劳裂纹形成寿命^{*}

孟宪红¹ 柳春图²

(北京航空航天大学 北京 100083)¹ (中国科学院力学研究所 北京 100080)²

摘 要

分析了 A633D 钢焊接接头在循环载荷下的疲劳特性,进行了疲劳特性和静态拉伸实验,得到了该材料的静力参数,常规机械性能,焊接接头的循环 - 曲线以及焊接接头的应变寿命曲线。将局部应力-应变法用于该材料的 10m³ 斗杆的裂纹形成寿命的估算。采用 Miner 法则结合概率的方法计算了不同可靠度下的疲劳寿命,其间考虑了焊接残余应力的影响,得出焊接残余应力的存在使斗杆的裂纹形成寿命降低约 10%。

关键词: 裂纹形成寿命;局部应力-应变法;可靠度;焊接残余应力

中图分类号: 0346 文献标识码: A

1 引 言

机械式挖掘机斗杆承受着很大的交变载荷,在应力集中区还存在着较大的塑性变形,其断口具有低周疲劳的特征。说明斗杆的早期断裂失效是低周疲劳失效。因此将低周疲劳强度理论用于挖掘机斗杆这一工程机械关键零件的研究,具有重要的实际意义和理论意义。

2 局部应力-应变法

六十年代初期 Topper、Martin、Wetzel、Morrow、Smith 和 Crens 等学者基于应变疲劳分析,提出了局部应力-应变法。该方法由于具有坚实的理论基础并且在工程应用中能够真实地反映材料的疲劳破坏特征而受到普遍重视。近年来得到了迅速发展和广泛应用,已成为估算结构疲劳裂纹形成寿命的先进方法。其基本思想是认为零件和构件的整体疲劳性能取决于危险点的局部应力-应变状态,即如果一个结构在危险部位处的应力-应变能够与实验室光滑试件

* 来稿日期:1999-09-05 修回日期:2000-03-03.

第一作者简介:孟宪红,女,1971 年生,博士,北京航空航天大学飞机设计与应用力学系讲师;研究方向:固体力学.

的循环应力-应变联系起来,则结构的裂纹形成寿命和试件的裂纹形成寿命相同。局部应力-应变法的突出优点是:在理论上直接考虑了材料塑性变形的影响,不仅使低周疲劳寿命的估算成为可能,而且能够细致地研究载荷历史、几何形状和材料性能之间的相互影响,所以大大地提高了疲劳分析的精确性。在实际应用上,用少量光滑小试件实验代替复杂的结构实验,用更多的计算代替实验,大大减少了费用,且给出的疲劳寿命比较准确。挖掘机斗杆是一个结构形状不规则并且受着复杂空间随机载荷的构件,应用局部应力-应变法来估算这构件的疲劳寿命能克服名义应力法的不足。局部应力-应变法估算疲劳寿命包括以下三方面的内容:

- 1) 材料的应变疲劳特性分析
- 2) 局部应力-应变分析
- 3) 损伤和累积损伤计算

3 材料的应变疲劳特性

3.1 材料的循环 - 曲线及迟滞回线

工程中常用的 - 曲线是由静力拉伸实验确定的,称单调 - 曲线。材料在循环载荷下得到的 - 迹线称为迟滞回线。由于材料的循环软化和硬化现象,在循环初期迟滞回线是变化的,通常随着循环次数的增加,这种现象逐渐消除,形成稳定的迟滞回线。改变应力水平,可得到不同应力水平下稳定的迟滞回线。将各迟滞回线的端点连接起来,就是循环 - 曲线。大量实验表明:大多数材料具有 Massing 特性,即稳定的迟滞回线与放大一倍的循环 - 曲线相似,且 - 曲线可以用幂函数表示:

$$a = e a + p a = a' / E + (a' / K)^{1/n} \quad (1)$$

式中 a —总应变幅, $e a$ —应变幅的弹性分量, $p a$ —应变幅的塑性分量, a' —循环应力幅, K —循环强度系数, n —循环硬化指数

3.2 材料的应力 - 寿命曲线(- $2 N_f$)

应用传统的名义应力法估算疲劳设计时,需要用到构件的 S-N 曲线,而应用局部应力-应变法估算疲劳寿命时,较常用的是材料的 - $2 N_f$ 曲线。材料的循环 - 曲线及 - $2 N_f$ 曲线是在电液伺服系统内对光滑小试件进行应变疲劳实验得到的。

进行低周疲劳寿命估算时,应用最广的材料应变 - 寿命曲线是 Morrow 曲线,它表征了金属抵抗应变疲劳的性能,且可以用光滑小试件控制应变的疲劳实验获得。其表达式为:

$$a = e a + p a = f (2 N_f)^b / E + f (2 N_f)^c \quad (2)$$

$$\text{或: } a / 2 = e' a' / 2 + p' a' / 2 = f' (2 N_f)^b / E + f' (2 N_f)^c \quad (3)$$

式中:

$a = 2 a'$ —应变变程; $e a = 2 e a'$ —应变变程的弹性分量;

$p a = 2 p a'$ —应变变程的塑性分量;

$2 N_f$ —以反向数计的疲劳寿命(为以循环数计疲劳寿命 N_f 的 2 倍);

f —疲劳强度系数; f' —疲劳延性系数; c —疲劳延性指数; E —材料的弹性模量

在双对数坐标中,总寿命曲线可分为弹性应变寿命曲线和塑性寿命曲线,这两条曲线在双对数坐标中均为直线,只要得到弹性线和塑性线,即可得到寿命曲线的表达式:

弹性线: $\lg \epsilon_a = \lg (f/E) + b \lg (2N_f)$ (4)

塑性线: $\lg \epsilon_p = \lg (f/E) + c \lg (2N_f)$ (5)

3.3 A633D 材料的应变疲劳特性实验

多级试样法是在多级应变水平下进行恒应变控制,每一级用一根或一组试样组成,以获得循环稳定的迟滞回线,最后连接各个应变水平下循环稳定的迟滞回线的顶点,使得循环 - 曲线。该方法精确度较高,所以本文采用它进行疲劳特性实验。

本次实验是在天津大学材料实验室 Intron-1343 型电液伺服试验机上进行的,采用的是应变控制,用三角波输入,加载频率在 0.03Hz ~ 1Hz。

实验所用试件母体是太原重型机器厂提供的 A633D 的 30mm 厚钢板,用 PK-YJ507Ni, 18%CO₂ + 82%Ar 气保持焊接的对焊试板(见图 1),试件采用 GB6399-86 中推荐的 B 中形式,中间有均匀段(见图 2),试件沿试板的 x 方向裁下,即焊接接头保证在试件的均匀段中,再车削加工成图 2 示试件。

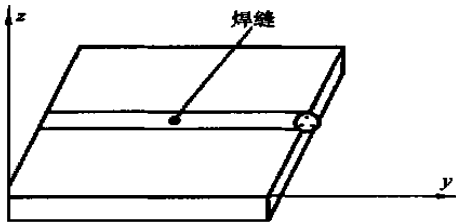


图 1 试板

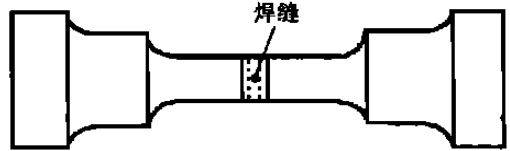


图 2 试件

1) 拉伸实验

对 A633D 钢焊接接头进行静态拉伸实验,得到其常规机械性能,见表 1

表 1

E (MPa)	b (MPa)	s (MPa)	(%)	(%)
2×10^5	619.9	426	6.5	66.1

2) 循环应变实验

按 GB6399-86“金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法”进行,取应变水平为 1%、0.7%、0.5%、0.4%、0.3%、0.25% 及 0.2% 等七级,每级取 3 ~ 5 个试样,测定其失效时的循环数 N_f ,然后进行统计处理得到应变 - 寿命曲线,见图 3。试样失效判定方法是试样断裂或载荷降到原来的 80% 左右。可以看出该材料为循环软化材料。实验结果见图 4。

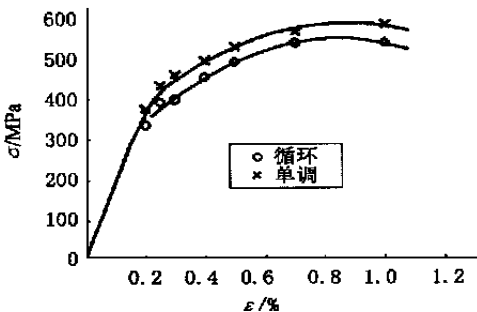


图 3 焊接接头的循环应力 - 应变曲线

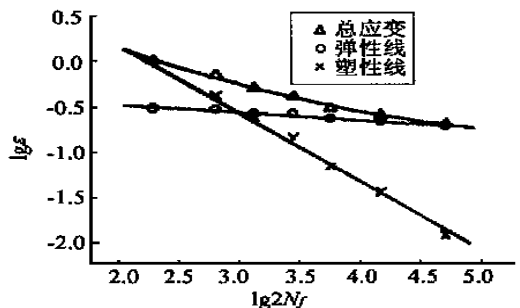


图 4 A633D 焊接接头的应变 - 寿命曲线

拟合出弹性线方程: $\lg \sigma_{ea} = -2.3086 - 0.0867 \lg 2N_f$, 得:

$$\sigma_{ea} = 0.004914 \times (2N_f)^{-0.0867}$$

相关系数: $R = 0.984$, 标准差: $S = 0.014$

拟合出塑性线方程: $\lg \sigma_{pa} = -0.3420 - 0.7482 \lg 2N_f$, 得:

$$\sigma_{pa} = 0.4550 \times (2N_f)^{-0.7482}$$

相关系数: $R = 0.994$, 标准差: $S = 0.0709$

应变寿命曲线: $a = \sigma_{ea} + \sigma_{pa} = 0.004914 \times (2N_f)^{-0.0867} + 0.4550 \times (2N_f)^{-0.7482}$

对比 Morrow 公式, 可得:

$$\sigma_f = 982.8 \text{ MPa}, \quad \sigma_f = 0.455, \quad b = -0.0867, \quad c = 0.7462$$

对其进行回归确定 K 和 n

$$\lg \sigma_a = 2.980 + 0.110 \lg \sigma_{pa}$$

$$K = 954.7 \text{ MPa}, \quad n = 0.110$$

3.4 局部应力应变分析

局部应力 - 应变法估算疲劳寿命的实质是将构件上的名义载荷谱或名义应力谱, 通过弹性分析, 结合材料的循环 - 曲线转换成危险部位的局部应力 - 应变, 然后根据等应变等损失的假设, 用光滑的 $\sigma_a - 2N_f$ 寿命曲线来估算危险部位的损伤和构件的寿命。应用局部应力 - 应变法分析疲劳寿命的关键是危险点局部应力 - 应变的确定。本文采用修正 Neuber 公式计算局部应力 - 应变。

$$\sigma \times \epsilon = (K_f \times S)^2 / E \quad (\text{修正 Neuber 公式}) \quad (6)$$

K_f — 疲劳缺口系数, S — 名义应力范围

联立(3)、(6)得:

$$\sigma^2 / E + 2 \left(\sigma / 2K \right)^{1/n} = (K_f \times S)^2 / E \quad (7)$$

对于已知 S [7][8] 可解出 σ 。从而得 ϵ 、 σ_e 、 σ_p 。运用求解极小值问题的方法, 用进退法确定极小点 x^* 。计算结果计入表 2 中。

4 累积损伤法计算疲劳寿命

对在循环载荷作用下的构件进行疲劳强度进行寿命估算时, 必须使用一定的累积损伤理论。应用最广泛的是 Miner 线性累积损伤法则。其主要内容如下: 试样所能吸收能量到达极限值导致疲劳破坏。假设极限值为 W , 试样破坏前总的循环数为 N , 至某一循环数 n 时试样吸收能量为 W_1 , 由于试样吸收能量与其循环数之间存在着正比关系, 因此有:

$$W_1 / W = n_1 / N \quad (8)$$

这样, 若试样的加载历史由 1 个不同的应力水平构成, 各应力水平下的循环数分别为 n_1, n_2, \dots, n_i , 则

$$\sum_{i=1}^l (n_i / N_i) = 1 \quad (9)$$

时, 试样发生疲劳破坏。

理论和实践都表明应用局部应力 - 应变法预测疲劳寿命时, 采用 Miner 累积损伤理论, 能

够保持较高的预测精度。因此本文采用这一法则进行计算。

本文按 Landgraf 公式计算损伤：

$$1/N_f = 2 [\sigma_f / \sigma_{fE} (\sigma_p / \sigma_e) \times \sigma_f / (\sigma_f - \sigma_m)]^{1/(b-c)} \tag{10}$$

分两种情况考虑：

- 1) 退火后焊齿条:残余应力为 48.31MPa^[4]
- 2) 焊齿条后退火:残余应力为 0^{[7][8]}

以 10⁶ 斗为一个循环块,将个级应力水平下的 n_i 、 N_i 代入 Miner 公式：

$$(n_i / N_i) = 1 \tag{11}$$

计算出循环块个数 即形成寿命,结果计入表 2

此时的平均应力为原来的平均应力加上残余应力

表 2 1 种情况: $m = 73.59\text{MPa}$, 2 种情况: $m = 25.28\text{MPa}$

频次	名义应力变程 S (MPa)	局部应力变程 (MPa)	局部弹性应变 e	局部弹性应变 p	焊齿条后退火 $1/N_f$	退火后焊齿条 $1/N_f$
1	586.12	975.06	4.875×10^{-3}	4.443×10^{-3}	1.934×10^{-3}	2.092×10^{-3}
9	556.82	957.69	4.789×10^{-3}	3.773×10^{-3}	1.552×10^{-3}	1.679×10^{-3}
94	498.20	917.84	4.589×10^{-3}	2.564×10^{-3}	9.237×10^{-4}	9.990×10^{-4}
1364	424.94	853.66	4.268×10^{-3}	1.327×10^{-3}	3.811×10^{-4}	4.121×10^{-4}
13210	337.02	739.85	3.699×10^{-3}	3.613×10^{-4}	6.629×10^{-5}	7.168×10^{-5}
71092	249.10	569.59	2.848×10^{-3}	3.352×10^{-5}	2.711×10^{-6}	2.932×10^{-6}
255685	161.18	370.63	1.853×10^{-3}	6.741×10^{-7}	1.420×10^{-8}	1.536×10^{-8}
658545	73.26	168.43	8.422×10^{-4}	5.186×10^{-10}	9.245×10^{-13}	9.997×10^{-13}

退火后焊齿条: $(n_i / N_i) = 1.8325, = 0.5457$, 即 $N_f = 5.457 \times 10^5$ 斗
焊齿条后退火: $(n_i / N_i) = 1.6946, = 0.5901$, 即 $N_f = 5.901 \times 10^5$ 斗

5 不同可靠度下的裂纹形成寿命

前面所作的寿命估算是根据疲劳寿命的平均值进行的,而实际上,其疲劳寿命具有一定的分散性,仅仅按平均值估算是不全面的。我们需要计算不同可靠度下的疲劳寿命。由实验知 A633D 焊接接头疲劳曲线的弹性线和塑性线的表达式为：

弹性线: $\lg e_a = - 2.3086 - 0.0867 \lg 2 N_f$,

纵坐标标准差: $S_e = 0.014$

塑性线: $\lg p_a = - 0.3420 - 0.7482 \lg 2 N_f$,

纵坐标标准差: $S_p = 0.0709$

可得任意可靠度下的弹性线和塑性线表达式：

$$\lg e_a - \mu_p S_e = - 2.3086 - 0.0867 \lg 2 N_f$$

$$\lg p_a - \mu_p S_p = - 0.3420 - 0.7482 \lg 2 N_f$$

μ_p — 标准正态参量

则: $e_a = (2 N_f)^{-0.0867} / 10^{(2.3086 - \mu_p S_e)}$, $p_a = (2 N_f)^{-0.7482} / 10^{(0.3420 - \mu_p S_p)}$

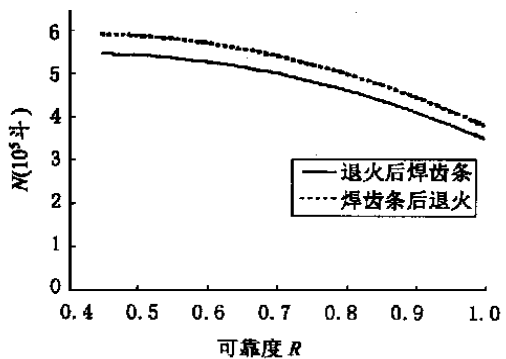


图 5 N-R 曲线

$$a = (2N_f)^{-0.0867}/10^{(2.3086-\mu_p S_e)} + (2N_f)^{-0.7482}/10^{(0.3420-\mu_p S_p)}$$

可得:

$$\text{疲劳强度指数: } f = E/10^{(2.3086-\mu_p S_e)}$$

$$\text{疲劳延性指数: } f = 1/10^{(0.3420-\mu_p S_p)}$$

根据不同可靠度 P ,由正态分布查出 μ_p ,从而求得不同可靠度下的寿命。结果见图 5。

参 考 文 献

- 1 蔡麟升,大型单斗正铲挖掘机斗柄断裂的失效分析,机械强度,Vol.3,1988
- 2 伍义生,三点弯曲试样在程序块谱、Rayleigh 窄带谱和 Wirching 宽带谱下的疲劳裂纹扩展计算,机械强度,Vol.4,1991
- 3 伍义生,局部应变法和计算程度,航空学报,Vol.3,1982
- 4 《挖掘机低温用钢材选材的试验研究》,《挖掘机低温用钢材选材的试验研究》课题组,太原重型机器厂
- 5 《疲劳设计》,赵少沅,王忠宝主编,机械工业出版社
- 6 《焊接结构强度和断裂》,天津大学,孟广吉,贾安东著,机械工业出版社
- 7 《A633D 钢斗杆的疲劳和断裂》,孟宪红,太原重机学院硕士论文,1995
- 8 《 》

Popularize Calculation Formula on Stability of Trash Rack Paling under Combined Load

Wang Zhengzhong¹ Yuan Si² Li Zongli¹

(Northwestern Agriculture University, 712100)¹ (Tsinghua University, 100084)²

Abstract

Based on control work condition of trash rack paling, this paper proposes that the overturning stability mechanical model is a beam with overhanging ends acted on point and distributed load at same time. By solving its stability differential equation using Kayleighs quotient, the critical load calculation method for this type of paling acted on combined load was proposed. The reasonableness of this method was confirmed by contrasting and analysising. Finally, this paper introduces practise application in order to provides theory basis for specification srevison and project design.

Keywords: *trash rack paling, paling, beam with overhanging ends, combined load, critical load.*

Experiments Study for Dynamic Features of Rotational Silicon Oil Damper

Duang Quan Xu Hui

(Xian Jiaotong University, 710049)

Abstract

Via a spring-mass-rigid rod-damper system, the designed and experimental questions of the rotational silicon oil damper was studied in the paper. Using the above single free degree system, the torsion damper system is simulated, and parameter identification method with power spectrum density function was given. The damper characteristic and temperature effects are given out. Finally, the nonlinear feature of the damper was discussed.

Keywords: *silicon oil damper, parameters identify, vibration controlling.*

The Initiatio life of thr Fatigue Crack of the Dipper-Handle Made of A633D Steel

Meng Xianhong Bai Zhaoyu

(Department of flight vehicle design and applied mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 100083)

Abstract

By experiment of fatigue and static tension, the fatigue character of the welding tie-in of

A633D steel is analyzed, its curve of cycling - and strain-life is determined, and its fatigue character of welding tie-in is analyzed. Using the local stress-strain method, the initiation life of the crack of the dipper-handle of 10 m³ excavator is obtained. The fatigue lives with different reliability are predicted with Miner principle and probability method, in which the effect of the residual welding stress is considered. It is decided that the initiation life of the crack of dipper-handle of the 10 m³ excavator decreased about 10% due to the residual welding stress.

Keywords: *initiation life of the crack, local stress-strain method, reliability, the residual welding stress.*

Structural Analysis for Mid-air Glass Curtain-walls in High-rised

*Tong Liping*¹ *Wang Guangguo*²

(Zhengzhou University, 450052)¹ (Zhengzhou Grain College, 450052)²

Abstract

This paper deals with the problems of mechanical calculation of mid-air glass curtain-walls in high-rises by using the theory of large deflection of orthotropic plates. According to practical deformation, the author deduced related control equations, discussed the calculations of main reduced stiffnesses and studied the inner forces and deformation under the conditions of dead weight, wind load, seismic force and temperature changes.

Keywords: *glass curtain-walls, mid-air glass, geometrically nonlinear.*

Solution of Large Deflection Bending Problem for the Slender Cantilever Beam with Friction

Ge Ruhai *Su Hong*

(Jiangsu University of Science and Technology, 212013)

Abstract

In the design of street sprinkler-sweeper, it is necessary to consider the deformation of large deflection for the slender cantilever beam when it is applied by concentrated load. In this paper, numerical integration method is used to solve this bending problem. For the computation of the maximum bending moment, an advanced method is proposed to determine the allowable condition for the beam to accept the application of friction. Analytical reveals that friction induces an effect on the flexibility of slender cantilever beam that offers the base of checking for the strength of beam.

Keywords: *cantilever beam, concentrated load, friction, large deflection.*