

桥式类型起重机箱形梁变幅疲劳试验研究

王 生

翟甲昌

(中国科学院力学所, 北京 100080) (太原重型机械学院, 太原 030024)

摘 要 本文对桥式类型起重机箱形梁在变幅载荷作用下疲劳裂纹扩展规律及其寿命进行了实验研究, 建立了疲劳裂纹扩展的 Paris 公式。由得到的裂纹扩展公式估算了箱形梁的疲劳寿命和疲劳强度, 并与试验结果作了比较。

关键词 箱形梁; 变幅载荷; 疲劳; 应力强度因子幅

中图分类号 TH215

0 引言

箱形梁是桥式起重机、龙门起重机的主要结构部件。起重机的使用寿命在很大程度上取决于箱形梁的寿命。箱形梁疲劳裂纹扩展规律及其寿命的研究对起重机金属结构的设计制造、使用和维修具有重大意义。以往的设计都假定结构中没有缺陷或不存在裂纹, 这不符合实际情况。由于焊接等原因箱形梁中不可避免地存在着缺陷, 这些缺陷在外力作用下, 经过多次载荷循环, 不断扩展, 最后导致箱形梁的疲劳断裂失效。用断裂力学研究裂纹扩展规律可获得箱形梁的疲劳扩展寿命, 本文通过箱形梁的变幅加载疲劳试验, 观测并分析了疲劳裂纹的扩展, 得到了箱形梁疲劳裂纹扩展的 Paris 公式。

1 断裂力学理论概述

断裂力学认为研究的物体存在着宏观的缺陷或裂纹, 它研究在外力作用下裂纹体的力学特性和裂纹扩展的条件和规律, 研究材料抗裂纹扩展的能力和测试方法。Paris 在实验的基础上建立了疲劳裂纹扩展公式, 他认为疲劳裂纹扩展速率可以用应力强度因子幅来描述, 即裂纹扩展速率 da/dN 为应力强度因子幅 ΔK ($K = \Delta K_{max} - K_{min}$) 的函数。将试验获得的 $da/dN \cdot \Delta k$ 数据在双对数坐标中表示出来, 可以得到一条反 S 形曲线, 如图 1 所示。

按曲线变化可分三个区段:

I 区(裂纹不扩展区)在曲线的下端存在着一个“疲劳门槛”,即界限应力强度因子幅 ΔK_{kh} ,当应力强度因子幅小于 ΔK_{kh} 时,疲劳裂纹不扩展

II 区(裂纹亚临界扩展区(当应力强度因子幅达到 ΔK_{kh} 时,裂纹开始扩展)工程结构中疲劳裂纹的扩展都处于此阶段)在双对数坐标系中 $da/dN \cdot \Delta K$ 呈线性关系,由实验可确定下列直线方程:

$$\lg da/dN = \lg C + n \lg K \quad (1)$$

$$\text{即 } da/dN = C (K)^n \quad (2)$$

式中 da/dN 裂纹扩展速率
 ΔK 应力强度因子幅
 C, n 材料常数

图1 da/dN 与 Δk 之间关系

III 区(裂纹失稳扩展区)当 ΔK 值继续增加到一定数值,在B点发生转折(如图1中示),线段的斜率变大,裂纹产生快速失稳扩展,直至箱型发生疲劳断裂

2 箱形梁的疲劳试验

2.1 试件材料和尺寸

试验中两种尺寸箱形梁试件均采用国产 A₃(Q 235) 钢板焊接而成,其制造工艺、质量及检验均立足于国内起重机厂现有生产工艺水平。满足起重机设计规范(GB 3811 - 83)要求,试件如图2所示:

2.2 试验装置及加载程序

主要试验设备为电液伺服程控疲劳试验机,加载频率 1 ~ 10Hz,室温下连续加载疲劳试验。试验加载模型如图3所示

根据实测的桥式起重机载荷谱,确定八级程序加载,并考虑到起重机的实际工作情况,按低—高—低次序加载。对于最大应幅 $S_{max} = 150N/mm^2$ 下试验,其子程序块如图4所示,试验重复此子程序块加载,直至箱形梁破坏

图2 试件模型

3 裂纹扩展分析及裂纹扩展曲线

3.1 裂纹扩展分析

任何一根箱形梁试验之前不能确定在什么位置出现疲劳裂纹。试验中观测到箱形梁产生

各种形式形裂纹, 其中有些是主要的, 有些是次要的。主要裂纹直接引起箱形梁的疲劳断裂失效, 次要裂纹不直接引起箱形梁的疲劳失效。主要裂纹出现在箱形梁跨中附近受拉区的两个位置: 一个位置是箱形梁横向大隔板与腹板连接焊缝的底部的焊趾处, 此处的裂纹称为大隔板处裂纹; 另一个位置是受拉翼缘焊缝缺陷处, 此处裂纹称为受拉翼缘焊缝处裂纹。这两种裂纹在初始阶段都可看作表面张开裂纹, 裂纹扩展到一定阶段穿透板厚形成中心穿透裂纹。裂纹扩展方向在盖板上与弯曲正应力方向保持垂直, 在腹板上当裂纹扩展到一定长度时, 开始斜向扩展。在下盖板上剪应力很小, 可以忽略, 而在腹板上随着距离箱形梁中性轴的接近, 剪应逐渐增大, 分析可知, 裂纹扩展方向和主应力方向垂直。

3.2 裂纹扩展曲线

对于材料的疲劳裂纹扩展试验, 国家标准规定了标准的试样及试验条件^[6], 箱形梁中大隔板处裂纹和受拉翼缘焊缝处裂纹可看作无限宽板受拉产生的中心裂纹, 所以隔板处裂纹在腹板上扩展阶段, 裂纹计算长度 a 为整个裂纹长度的一半, 在腹板和盖板上同时扩展阶段为腹板上的裂纹长度与盖板裂纹长度之和的一半作为裂纹计算长度。试验中记录的疲劳扩展如图 5 所示。

4 疲劳裂纹扩展公式的建立

4.1 疲劳裂纹扩展的应力强度因子幅

应力强度因子幅的一般式如下:

$$\Delta K = Y S_{rc} \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

式中 ΔK —— 应力强度因子幅
 S_{rc} —— 裂纹处应力幅

1. 激振器材触头
 2. 平衡梁
 3. 轨道
 4. 试件
 5. 螺母
 6. 压板
 7. 螺柱
 8. 定轴
 9. 底座
- 图 3 试验加载模型

图 4 循环加载子程序块

a —— 裂纹计算长度

Y —— 修正系数

对于大隔板处裂纹需要考虑到隔板与腹板连接焊缝焊趾处应力集中的影响 文献[1]中表明其影响随裂纹深度增加而减小,变化呈抛物线,本文为实用方便取 $Y = 1.2$,同时考虑到裂纹出现在距下盖板下表面大约 42mm 处这个事实,此处应力幅 S_{re} 与下盖板上的应力幅 S_r 有如下关系 $S_{re} = 0.877S_r$,因此大隔板处裂纹扩展的应力强度因子幅为

$$\Delta K = 1.05S_r \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

对于受拉翼缘焊缝处裂纹,应力幅 S_{re} 近似等于下盖板上的应力幅 S_r ,没有应力集中的影响,取 $Y = 1$,因此,应力强度因子幅的表达式为:

$$\Delta K = S_r \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

图 5 裂纹扩展曲线

4.2 变幅载荷的均方根等效法

大量的试验结果表明:变幅载荷能够用一等效的等幅载荷来代替,也就是说用一个等效的等幅载荷试验同样的试件将得到与变幅载荷作用下相同的寿命,裂纹扩展也相同

本文采用文献 [2] 中的均方根等效法,即

$$S_{re} = (\alpha S_{ri}^2)^{1/2} \quad (6)$$

式中 S_{re} —— 等效力幅

S_{ri} —— 各级应力幅

α —— 各级应力幅的循环次数比值, $\alpha = \frac{n_i}{N_f}$

n_i —— 试件失效时级应力幅的循环次数

N_f —— 试件寿命

由上式得到不同最大应力幅加载下的等效力幅

$S_{max} = 185.0N/mm^2$	$S_{re} = 142.9N/mm^2$
$S_{max} = 150.0N/mm^2$	$S_{re} = 115.9N/mm^2$
$S_{max} = 135.0N/mm^2$	$S_{re} = 104.3N/mm^2$

4.3 箱形梁疲劳裂纹扩展的 Paris 公式

由以上内容,可求出疲劳裂纹扩展 da/dN , 及对应点的应力强度因子幅 Δk , 将求得的数据点在双对数坐标图 6 中表示出来,用最小二乘法对实验数据进行处理,得到:

$$\lg da/dN = 2.9651 \lg (\Delta K) - 12.584 \quad (7)$$

即:

$$da/dN = 2.606 \times 10^{-13} (\Delta K)^{2.965} \quad (8)$$

为应用方便, 将系数圆整, 取 $n = 2.965 \approx 3, C = 2.606 \times 10^{-13} \approx 2.61 \times 10^{-13}$ 则:

$$da/dN = 2.61 \times 10^{-13} (\Delta K)^3 \quad (9)$$

5 箱形梁的寿命估算和疲劳强度

寿命估算除需要知道裂纹扩展 Paris 公式外, 还需知道初始裂纹长度 a_0 和裂纹失稳扩展即试件疲劳失效时的裂纹长度 a_f . 初始裂纹长度 a_0 的大小对构件的寿命有着重要影响 参照参考文献 [2] [3][4], 取初始裂纹尺寸 $a_0 = 0.3\text{mm}$. 失效裂纹长度随着应力幅的变化而不同, 应力幅越大失效裂纹长度越短, 试验中观测到 $a_f = 80\text{mm} \sim 120\text{mm}$. 由初始裂纹 a_0 到失效裂纹长度 a_f 时, 箱形梁的估算寿命可由 (9) 式对 N 积分得到

图 6 疲劳试验结果及 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线

变幅载荷作用下箱形梁的试验寿命^[5] 与估算寿命列于附表中

附表 变幅试验寿命与估算寿命比较

最大应力幅 $S_{\max} (\text{N}/\text{mm}^2)$	等效应力幅 $S_{\text{re}} (\text{N}/\text{mm}^2)$	试件数	试验寿命 均值 $N_f (\times 10^6)$	估算寿命 $N_f (\times 10^6)$	误差
185	142.9	6	0.829	0.813	1.9%
150	115.9	3	1.455	1.521	- 4.5%
135	104.3	2	2.047	2.086	- 1.9%

比较可知, 箱形梁的估算寿命与试验寿命比较接近, 变幅载荷能够用一个等效的等幅载荷来代替

5.1 箱形梁的疲劳强度

由文献 [5] 可知箱形梁在变幅载荷作用下, 疲劳寿命 $N_f = 2 \times 10^6$ 次时, $S_{\text{re}} = 96.1\text{N}/\text{mm}^2$, 由本文求得的裂纹公式可求得 $S_{\text{er}} = 106.8\text{N}/\text{mm}^2$, 两者接近取其均值 $S_{\text{er}} = 101.5\text{N}/\text{mm}^2$, 作为循环次数为 2×10^6 次时箱形梁的疲劳强度

6 结语

(1) 应力幅和初始裂纹尺寸是决定箱形梁疲劳寿命的主要参量

(2) 箱形梁的疲劳裂纹扩展公式可表达为:

$$da/dN = 2.61 \times 10^{-13} (\Delta K)^3$$

(3) 箱形梁的疲劳寿命主要是疲劳裂纹扩展寿命, 裂纹起源阶段可以忽略

(4) 箱形梁的疲劳失效主要由起源于大隔板焊缝焊趾和受拉翼焊缝处的裂纹扩展造成的改进接头设计和提高焊缝质量可提高箱形梁的疲劳寿命

(5) 箱形梁疲劳寿命 $N_f = 2 \times 10^6$ 次的疲劳强度, $S_f = 101.5$ (N/mm^2).

参 考 文 献

- 1 [英] T R. 格内尔著. 焊接结构的疲劳. 北京: 机械工业出版社, 1988, 38~ 67
- 2 Schilling C G. Fatigue of Welded Steel Bridge Members Under Variable—Amplitude Loadings, 1978, 1 ~ 30
- 3 Wang D Y. An Investigation of Initial Fatigue Quality
- 4 潘长松. 桥式起重机箱形梁的疲劳性能. 起重运输机械, 1984, (1): 3~ 9
- 5 王生. 变幅载荷作用下起重机箱形梁的疲劳寿命研究: [学位论文] 太原: 太原重型机械学院, 1990
- 6 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法. GB 6398—86 北京: 国家标准局, 1987

Variable Amplitude Fatigue Studies on Box Girders of overhead type Crane

Wang Sheng Zhai Jiachang

(Taiyuan Heavy Mach. Inst., Taiyuan 030024)

Abstract This paper has carried on an experimental investigation into fatigue Crack propagation and its life of box girders of overhead type Crane subjected to variable amplitude loading, established Paris formula of fatigue crack propagation. By Using the Crack Propagation formula obtained, fatigue life and fatigue strength of box girders were estimated, and compared with experimental results

Key Words box girder, variable amplitude loading, fatigue, stress intensive factor range