

# 瓦楞纸板结构疲劳特性探究

刘同文, 钱怡

(江南大学, 无锡 214122)

**摘要:**通过对瓦楞纸板的疲劳振动损伤试验、疲劳剩余强度试验和多级载荷下的疲劳损伤试验,对瓦楞纸板结构的疲劳性能进行了初步探讨,获得了在一定频率条件下,不同载荷时瓦楞纸板结构的疲劳寿命,给出了相应的  $F-N$  曲线,提出了瓦楞纸板结构疲劳损伤数学模型;得出了经历一定次数的疲劳振动后,瓦楞纸板结构的疲劳剩余强度的变化趋势及范围,分析了发生变化的原因,给出了疲劳剩余强度的修正模型;讨论了 Miner 准则对于瓦楞纸板结构多级应力疲劳损伤试验的适用性,并探讨了加载顺序对疲劳寿命的影响。

**关键词:**瓦楞纸板结构;疲劳损伤;剩余强度;Miner 准则

**中图分类号:** TB484.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)05-0038-05

## Investigation on Fatigue Properties of Corrugated Board Structure

LIU Tong-wen, QIAN Yi

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The fatigue properties of corrugated board structure were discussed through vibration fatigue damage tests, fatigue residual strength tests, and multi-level loads fatigue damage tests. Under a certain frequency and different loads case, the fatigue lives of the corrugated board structure were obtained. Finally, the  $F-N$  curve and model of fatigue damage were presented. The trend and the range of fatigue residual strength of the corrugated board structure were founded and analyzed after a certain number of fatigue vibrations. The applicability of Miner's ruler on multi-level stress fatigue damage tests of corrugated board structure was discussed, and the effect of loading sequence on the fatigue life was discussed.

**Key words:** corrugated board structure; fatigue damage; residual strength; Miner's ruler

包装件在流通过程中,不可避免会受到动载荷的持续作用,包装品的承载能力会发生改变,甚至包装结构会出现疲劳损伤。在金属材料领域,对疲劳损伤的研究已有 170 多年的历史,获得了大量的成果,例如 Spangenberg 在 Wohler 的研究基础上绘制出的疲劳破坏循环次数与应力关系曲线<sup>[1-2]</sup>;Miner 提出的线性累计损伤理论——Miner 准则<sup>[3]</sup>;多级载荷、变幅载荷下的疲劳问题等<sup>[4-7]</sup>。在纸质材料领域,对疲劳损伤的研究还十分有限。Godshall 初步研究了疲劳振动对瓦楞纸箱抗压性能的影响<sup>[8]</sup>;孙聚杰、卢立新研究了疲劳压缩、疲劳振动对瓦楞纸板性能及其剩余强度的影响<sup>[9-10]</sup>。有关纸质包装结构的疲劳损伤特性、疲劳剩余强度特性以及多级应力条件下疲劳损

伤特性方面的研究,则鲜有文献报道。笔者以瓦楞纸板结构为研究对象,分析其振动疲劳特性。

## 1 瓦楞纸板结构疲劳试验

为了解瓦楞纸板结构在经历运输过程之后的疲劳特性,以某公司生产的 02 型瓦楞纸箱去摇盖结构为研究对象,考虑到国道和县道公路的路况<sup>[11]</sup>,在频率为 8 Hz 的等幅载荷和块载下,进行疲劳试验。

### 1.1 结构材料与预处理

材料为 3 层瓦楞纸板。瓦楞形状:U 型;楞型:A 型;厚度:4.50 mm,楞数为每 300 mm 33 个;试件规格:240 mm × 160 mm × 270 mm,接头尺寸为 35

收稿日期:2010-11-25

作者简介:刘同文(1986—),男,安徽安庆人,江南大学硕士生,主攻运输包装。

通讯作者:钱怡(1962—),女,江苏无锡人,江南大学副教授、硕士生导师,主要从事机械及包装结构的动、静态性能等的研究。

mm; 接合方式: 胶料黏合; 试件材质定量:  $170(\text{g}/\text{m}^2)/120(\text{g}/\text{m}^2)/170(\text{g}/\text{m}^2)$ 。

按照 GB/T 4857.2-92 将试件置于恒温恒湿箱内, 温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $65\%$ , 预处理时间为  $24\text{ h}$  以上。

## 1.2 仪器

试验材料使用台湾庆声科技有限公司的 THS-AOC-100AS 恒温恒湿试验机进行预处理。振动试验采用美国 MTS 公司生产的 MTS322 振动试验机。试验装置见图 1。抗压试验采用高铁科技股份有限

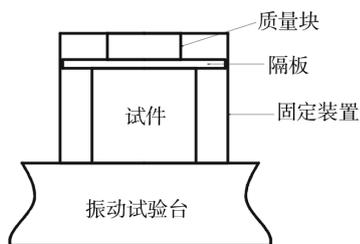


图 1 疲劳振动试验装置

Fig. 1 Vibration fatigue testing system

公司制造的 GT-7001-DS 纸箱抗压试验机。

## 1.3 方法

### 1.3.1 疲劳损伤试验

在试件上施加一定质量的质量块, 以正弦定频位移模拟路面激励。设置振动频率为  $8\text{ Hz}$ , 振动台初始振幅为  $3.48\text{ mm}$ , 直至试件屈曲失效时停止试验。通过各数据点的多次重复试验, 记录振动循环次数以及相应的失效载荷, 按“估计母体中值所需的最少试件个数”<sup>[12]</sup> 选取其中 4 组合理的试验结果, 取平均值后, 得到试件的疲劳寿命。

### 1.3.2 疲劳剩余强度试验

在与疲劳损伤试验相同试验条件下, 试件达到设定的振动次数时停止加载, 随后测量未失效试件的抗压强度, 即为该试件的疲劳剩余强度。多次重复试验, 剔除个别离散性过大的数据结果, 取平均值各数据点。

### 1.3.3 多级应力疲劳损伤试验

在与疲劳损伤试验相同试验条件下, 试件经历二级加载和三级加载, 直至试件失效时停止试验。记录各级加载时的振动循环次数, 同样, 各试验结果由多次重复试验获得。结合疲劳损伤试验得到的各载荷条件下的疲劳寿命和 Miner 准则, 得到各级加载的损

伤度。

## 2 瓦楞纸板结构的疲劳特性分析

### 2.1 瓦楞纸板结构的载荷 $F$ 和寿命 $N$ 的关系

采用图 1 的试验装置, 加载的载荷见图 2, 分别对

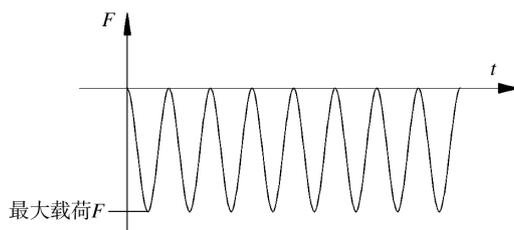


图 2 试验载荷示意图

Fig. 2 Sketch map of test load

同一型号、批次的瓦楞纸板结构, 在最大载荷  $F$  分别为  $370, 407, 444, 482$  和  $509\text{ N}$  下进行疲劳试验, 记录破坏时对应于各载荷水平的寿命值, 见图 3。试件经疲劳振动后, 发生屈曲破坏, 见图 4。

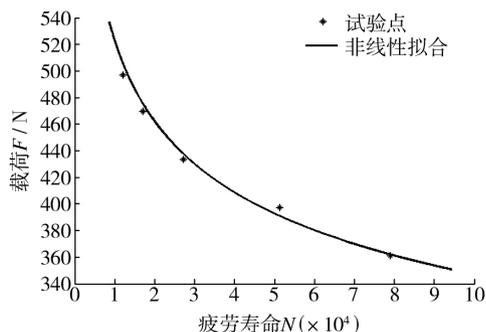


图 3 载荷与疲劳寿命关系曲线

Fig. 3 Relationship between load and fatigue life ( $F-N$ )



图 4 瓦楞纸板的屈曲破坏

Fig. 4 Buckling damage

使用 Matlab 软件对试验数据——疲劳寿命  $N$  与动载荷最大值  $F$  进行非线性拟合, 其拟合结果为:

$$N = 1.879 \times 10^{19} F^{-5.618} \quad (1)$$

模型的确定系数达到 0.991 2, 说明拟合函数能够很好地描述试验结果。此结果与金属材料的  $S-N$  曲线常用数学模型中的幂函数模型相似, 参照金属材料  $S-N$  曲线的幂函数形式<sup>[13]</sup>:

$$\sigma^a N = c \quad (2)$$

式(1)可表示为:

$$F^b N = C \quad (3)$$

式中:  $F$  为动载荷最大值;  $b$  和  $C$  为待定结构常数。

将式(1)转化为式(3)的表达形式, 得到该瓦楞纸板结构疲劳损伤数学模型为:

$$F^{5.618} N = 1.879 \times 10^{19} \quad (4)$$

## 2.2 瓦楞纸板结构的疲劳剩余强度

分别在 444 N 和 482 N 2 种载荷水平下进行剩余强度试验, 瓦楞纸板结构经不同振动次数后的剩余强度见图 5。

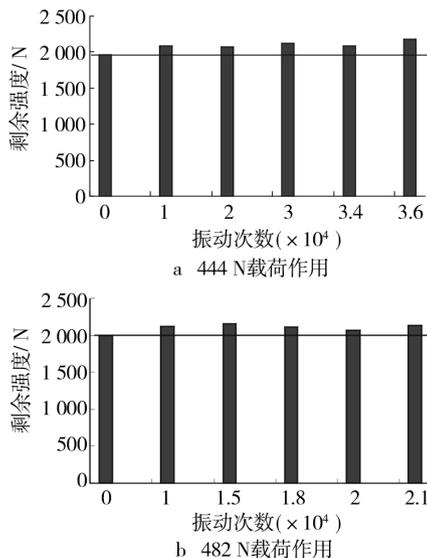


图 5 载荷作用下的疲劳剩余强度

Fig. 5 Fatigue residual strength under load

对比经受疲劳振动后与未经疲劳振动的试件的抗压强度, 发现试件经过疲劳振动后, 抗压强度均有所提高, 且上升幅度在 3%~10% 之间。

观察分析, 抗压强度提高的原因为: 边沿接触长度增加和边沿发生局部屈曲。

### 2.2.1 边沿接触长度增加

由于制造工艺等因素的影响, 试件的上下边沿不可能处于 2 个绝对平行的平面内。此时, 上边沿与压板以及下边沿与振动台的接触并不十分充分, 而有部

分间隙。经过一定次数的疲劳振动后, 上下边沿更趋于平行, 试件与压板和振动台的接触长度增大。接触长度的增加导致参与承载载荷的边长增加, 从而引起试件抗压强度的增加, 这与杨冰<sup>[14]</sup>的观点一致。

### 2.2.2 边沿发生局部屈曲

疲劳振动前, 试件上下边沿平整。试件与压板和振动台的接触面约等于试件的纵切面。当试件经历疲劳振动后, 上下边沿发生局部屈曲, 见图 6。局部

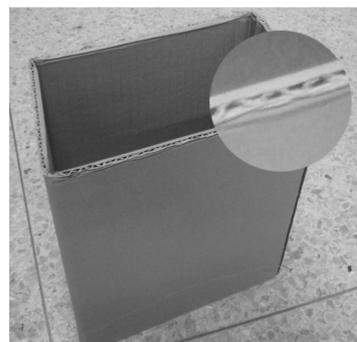


图 6 经历疲劳振动后的试件

Fig. 6 The specimen after vibration fatigue test

屈曲后, 试件与压板和振动台的接触面大大增加, 接触面的约束也随之增强, 结构稳定性相应增强, 因而, 以屈曲破坏为主的瓦楞纸板结构的抗压强度有所提高。不过接触面的增量有限, 故抗压强度升高有限。

经过疲劳振动后, 试件剩余疲劳强度上升幅度在 3%~10% 之间, 且随机变化, 没有特定规律, 故将上升幅度用最小二乘法处理, 以确定剩余疲劳强度的修正系数, 得到本试件的剩余疲劳强度修正系数为 1.066。试件的剩余疲劳强度为:

$$P_r = AP_c \quad (5)$$

式中:  $P_r$  为试件的剩余疲劳强度;  $A$  为剩余疲劳强度修正系数;  $P_c$  为试件的抗压强度。

不同材质的瓦楞纸板制成的不同结构, 其剩余疲劳强度修正系数存在着差异, 但基于对剩余疲劳强度上升原因的分析, 可以预测剩余疲劳强度修正系数为一个略大于 1 的数。

## 2.3 多级应力下的疲劳损伤特点

Miner 准则是目前使用最为广泛的疲劳损伤累积理论。采用 Miner 准则对多级应力疲劳振动分析时, 试件经历  $m$  个常幅交变应力的作用, 即在不同载荷条件下振动, 假设在载荷为  $A_i$  时, 振动了  $n_i$  次 ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 该载荷条件下的疲劳寿命为  $N_i$ , 则累积损伤  $D$  可表示为<sup>[15]</sup>:

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_m = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

多级应力疲劳损伤试验载荷加载形式见图 7, 试

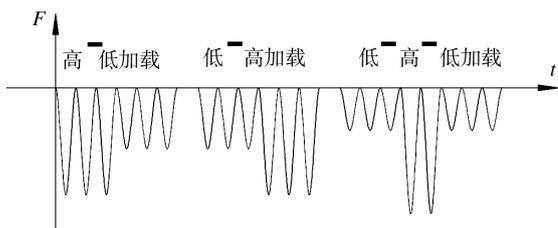


图 7 多级应力疲劳损伤试验载荷形式

Fig. 7 Loading form of multi-level stress fatigue damage test

表 1 多级应力疲劳损伤试验数据

Tab.1 Data of multi-level stress fatigue damage test

载荷 /N	第 1 载荷 疲劳寿命 $N_1$	第 2 载荷 疲劳寿命 $N_2$	第 3 载荷 疲劳寿命 $N_3$	第 1 载荷 循环次数 $n_1$	第 2 载荷 循环次数 $n_2$	第 3 载荷 循环次数 $n_3$	Miner 损伤度 $D$
$A_1 = 482$	16 976	51 404		8 906	28 762		1.084 151
$A_2 = 407$				8 802	28 004		1.063 279
$A_1 = 407$	51 404	16 976		25 604	13 802		1.311 124
$A_2 = 482$				25 608	12 488		1.233 798
$A_1 = 370$				25 609	12 937		1.260 267
$A_2 = 509$	78 969	12 073	78 969	28 858	5 202	29 134	1.165 220
$A_3 = 370$				28 803	5 198	31 577	1.195 142
				28 800	5 212	35 350	1.244 042

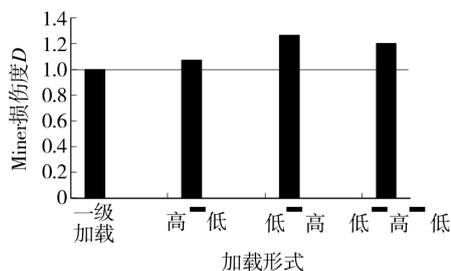


图 8 不同加载形式下的 Miner 损伤度  $D$

Fig. 8 Miner damage degree  $D$  under different loading forms

由试验可知: 各组试验 Miner 损伤度均大于 1, 可见对于瓦楞纸板结构, Miner 准则偏于保守; 加载顺序对试件的疲劳寿命有很大的影响, 低-高载荷比高-低载荷的 Miner 损伤度高, 平均高出 0.2; 二级低-高加载与三级低-高-低加载时, Miner 损伤度皆远大于 1, 可见先低后高顺序加载可以提高瓦楞纸板结构的疲劳寿命。

验数据见表 1。

由试验数据可以发现: 多级应力条件下, 试件损伤时的 Miner 损伤度  $D$  均大于 1; 二级高-低加载时, 损伤度  $D$  最接近于 1, 均值约为 1.07; 二级低-高加载时, 损伤度  $D$  最大, 均值约为 1.27; 三级低-高-低加载时, 损伤度  $D$  的均值约为 1.20。将多级加载与一级加载条件下的 Miner 损伤度  $D$  进行对比, 见图 8。

### 3 结论

通过瓦楞纸板结构的疲劳振动试验, 得到了瓦楞纸板结构的  $F-N$  曲线及相应的数学模型; 发现瓦楞纸板结构的疲劳寿命曲线与金属材料类似, 可用幂函数描述; 与金属材料疲劳破坏的形式不同, 瓦楞纸板结构不是以裂纹扩展到一定尺度而破坏, 而是以屈曲形式失效。

瓦楞纸板结构在经历一定次数的疲劳振动后, 其剩余疲劳强度大于未经振动的瓦楞纸板结构的抗压强度, 其上升的幅度在 3%~10%。Adams 对 0201 型长方形开槽瓦楞纸箱抗压强度受运输振动的影响进行了试验研究, 得出: 在振动试验中未失效的瓦楞纸箱的平均抗压强度, 要比未经振动的瓦楞纸箱的抗压强度高, 最多可高出 10% 左右, 本文的研究结果与该观点<sup>[16]</sup>一致。同时, 瓦楞纸板结构剩余疲劳强度上升的主要原因是疲劳振动引起接触范围增大, 结构

稳定性增强。

通过瓦楞纸板结构的多级疲劳损伤试验,发现对于该类结构,Miner 准则偏于保守,瓦楞纸板结构发生损伤时,其 Miner 损伤度皆大于 1,且加载顺序对疲劳寿命有明显的影响。

#### 参考文献:

- [1] SCHUTZ W. A History of Fatigue[J]. Engineering Fracture Mechanics,1996,54(2):263—300.
- [2] SPANGENBERG L. Uber Das Verhalten der Metalle bei Wiederholten Anstrengungen[J]. Z Bauw, 1874(24): 473—495.
- [3] MINER M A. Cumulative Damage in Fatigue[J]. Trans ASME J appl Mech,1945(12): A159—A164.
- [4] RODOPOULOS C A, KERMANIDIS A T H. Understanding the Effect of Block Overloading on the Fatigue Behaviour of 2024-T351 Aluminium Alloy Using the Fatigue Damage Map[J]. International Journal of Fatigue,2007(29):276—288.
- [5] SANDER M, RICHARD H A. Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading. Part 1: Experimental Investigations[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 2006(29): 291—301.
- [6] SKORUPA M. Load Interaction Effects During Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading — A Literature Review. Part 1: Empirical Trends[J]. Fatigue

& Fracture of Engineering Materials & Structures,1998(21):987—1006.

- [7] KALNAUS S, FAN F, VASUDEVAN A K, et al. An Experimental Investigation on Fatigue Crack Growth of AL6XN Stainless Steel[J]. Engineering Fracture Mechanics,2008(75):2002—2019.
- [8] GODSHALL W D. Effects of Vertical Dynamic Loading on Corrugated Fiberboard Containers[D]. Forest Serv Res Pap,1968.
- [9] 孙聚杰. 瓦楞纸板承载能力疲劳损伤曲线研究[J]. 包装工程,2008,29(12):4—10.
- [10] 孙聚杰, 卢立新. 剩余强度模型对瓦楞纸板疲劳振动的分析研究[J]. 包装工程,2007,28(8):19—21.
- [11] 苏远, 吕勇, 赵德坚. 公路运输环境因素的测试[J]. 包装工程,2007,28(9):1—4.
- [12] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社,1986.
- [13] 程育仁, 缪龙秀, 侯炳麟. 疲劳强度[M]. 北京:中国铁道出版社,1990.
- [14] 杨冰. 模拟运输振动工况下瓦楞纸箱动态性能的研究[D]. 无锡:江南大学,2008.
- [15] 徐灏. 疲劳强度[M]. 北京:高等教育出版社,1998.
- [16] ADAMS A R. The Effect of Transient Vibration on the Top-to-bottom Compressive Strength of Unitized Corrugated Shipping Containers[D]. Michigan: Michigan State University, 1987.

(上接第 28 页)

## 4 结论

系统经调试使用,能够对 76~155 mm 各种口径的定装式、分装式后装炮弹标志进行自动印刷,印刷速度可达每小时 100~300 次。实践证明,综合应用机械、气动、PLC 控制等技术可实现弹药标志印刷的自动化,简化生产工艺、降低劳动强度、提高生产效率和确保标志印刷的质量。

#### 参考文献:

- [1] 姜继海. 液压与气压传动[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [2] 徐宏伟, 刘海锋, 刘占奎. 单张纸胶印机输纸机构气动化

设计[J]. 包装工程,2005,26(4):56—58.

- [3] 刘乘, 王宝霞, 杨良渠. 缓冲包装冲击试验机的研究与开发[J]. 包装工程,2005,26(3):78—80.
- [4] 王世刚, 朱逢春. 卷标包装自动机的研究与开发[J]. 包装工程,2007,28(2):1—3.
- [5] 郑智贞, 侯真慰. 浅谈 PLC 控制系统的设计[J]. 机械工程与自动化,2005(6):88—89.
- [6] 段国发, 赵强, 宋建华. 某特种弹头涂双色工艺研究及应用[J]. 表面技术,2004,33(4):63—65.
- [7] 赵美宁, 袁艳. 弹药引信包装机械的设计研究[J]. 包装工程,2008,29(12):94—95.
- [8] 侯和平, 张海燕, 赵庆海. 印刷压力与油墨转移特性的实验研究[J]. 包装工程,2008,29(12):115—116.
- [9] 刘澎, 张海燕. 印刷机创新设计方法——互鉴融合[J]. 包装工程,2008,29(11):36—38.