

## 蜂窝纸板疲劳累积损伤模型实验研究

范志庚<sup>1,2</sup>, 卢立新<sup>1,3</sup>, 王军<sup>1,3</sup>, 胡志军<sup>2</sup>

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 浙江科技学院, 杭州 310023;

3. 中国包装总公司食品包装技术与安全重点实验室, 无锡 214122)

**摘要:目的** 通过疲劳压缩实验,建立蜂窝纸板疲劳累积损伤模型。**方法** 首先对蜂窝纸板进行一定的预压缩,然后进行不同次数疲劳压缩试验,最后将疲劳试样进行准静态压缩。**结果** 随着压缩次数的增加,纸板的承载能力、平台应力均有所降低;蜂窝纸板的屈服应力尖峰消失;应力-应变曲线变为3个阶段,即线弹性阶段、平台阶段和密实化阶段;当压缩次数在30 000次左右时平台应力下降比较大,在30 000~50 000次时,下降比较小,之后微弱变化。**结论** 蜂窝纸板疲劳压缩后平台应力会发生变化,呈现出先剧烈后微弱降低;选取剩余平台应力为损伤参量,结合损伤累积方法建立了蜂窝纸板疲劳累积损伤模型。

**关键词:** 蜂窝纸板; 疲劳压缩; 平台应力; 损伤模型

**中图分类号:** TB484.1; TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)05-0059-05

## Experimental Research on Honeycomb Paperboard Fatigue Cumulative Damage Model

FAN Zhi-geng<sup>1,2</sup>, LU Li-xin<sup>1,3</sup>, WANG Jun<sup>1,3</sup>, HU Zhi-jun<sup>2</sup>

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 3. Key Laboratory of Food Packaging Techniques and Safety of China National Packaging Corporation, Wuxi 214122, China)

**ABSTRACT:** To establish a fatigue cumulative damage model for honeycomb paperboard through fatigue compression tests. First, the honeycomb paperboard was subjected to a certain degree of pre-compression, and then different number of fatigue compression tests were conducted, and finally the fatigue specimens were subjected to quasi-static compression. With the increasing number of compression, the loading capacity of the paperboard and the plateau stress were both decreased. The initial yield peak stress of the honeycomb paperboard disappeared. The stress-strain curve had three stages, including the elastic, plateau and densification stages. The plateau stress was sensitive to FD at about 30 000 cycles, but FD had relatively weaker effect on plateau stress from 30 000 to 50 000 cycles, and after that there was only slight change. The plateau stress was changed after fatigue compression of the honeycomb paperboard, and it displayed a trend of first dramatic and then slight decrease. Selecting residue plateau stress was as parametric stress injury, and combining with the fatigue damage accumulation method, the fatigue cumulative damage model for honeycomb paperboard was built.

**KEY WORDS:** honeycomb paperboard; fatigue compression; plateau stress; damage model

蜂窝纸板是一种高级仿生环保缓冲材料,具有承载能力好、生产成本低、强度及弹性好等优点,成为包装行业发展中代替木箱和泡沫塑料的一种新型绿色环保包装材料。

近年来,很多研究人员对蜂窝纸板承载和能量吸收性能进行了深入实验和理论研究。王志伟和鄂玉

收稿日期: 2014-10-23

作者简介: 范志庚(1979—),男,江苏宜兴人,江南大学博士生,浙江科技学院讲师,主要研究方向为运输包装。

通讯作者: 卢立新(1966—),男,江苏宜兴人,博士,江南大学教授、博士生导师,主要研究方向为包装动力学与包装材料。

萍<sup>[1,2]</sup>研究了蜂窝纸板能量吸收理论模型;王军<sup>[3]</sup>等研究了不同湿度下蜂窝纸板的能量吸收特性;郭彦峰<sup>[4]</sup>等测试了蜂窝纸板冲击吸收特性和振动传递特性。然而,蜂窝纸板的疲劳特性的研究报道很少。肖伟等<sup>[5]</sup>研究了疲劳振动条件下,蜂窝纸板承载力和缓冲性能的变化规律;范志庚等<sup>[6]</sup>研究了蜂窝纸板疲劳试样的内共振条件变化。目前,疲劳累积损伤模型的研究还未见报道。为此,在疲劳实验的基础上,选取蜂窝纸板平台应力为参量,建立了蜂窝纸板的疲劳累积损伤模型。

## 1 疲劳累积损伤模型选取

自20世纪70年代以来,很多学者从实验与理论的角度研究了纤维增强基材料的疲劳损伤与寿命预测,并取得了相对成熟的成果<sup>[7-10]</sup>,也有很多学者研究了金属蜂窝板的四点弯曲疲劳实验问题<sup>[11-12]</sup>,这些研究成果对蜂窝纸板的疲劳研究提供了一定的基础。

与金属材料相比,复合材料的内部微观结构及疲劳损伤机理要复杂得多,其损伤的模式主要有基体开裂、纤维/基体界面脱胶、分层和纤维断裂,这些现象在疲劳循环加载中同时发生,这使得从微观角度研究疲劳损伤非常复杂,因此目前的研究还是宏观唯象的。

从宏观上研究,用剩余强度来表征材料的疲劳损伤有着自身固定的物理准则,但是实验量非常大,1个试件只能获得1个数据。剩余刚度在实验中能够连续测量,它随材料的内部连续累积损伤而单调下降。因此,剩余刚度用于疲劳累积损伤模型较多,主要有理论模型、半经验模型和经验模型。通过大量的调研,认为Yang<sup>[13-14]</sup>的模型最具有代表性和实际用途,Wu<sup>[15]</sup>进行了实验验证,并提出了改进式,其主要形式为:

$$dE(n)/dn = -E(0)Qv n^{v-1} \quad (1)$$

积分得:

$$E(n) = E(0)(1 - Qn^v) \quad (2)$$

很多研究者用损伤力学的概念研究疲劳损伤累积规律<sup>[16]</sup>,定义损伤 $D$ :

$$D = 1 - \frac{E(n)}{E(0)} \quad (3)$$

式中: $Q, v$ 为随机变量,受应力水平、加载频率的影响; $E(0)$ 为初始弹性模量; $E(n)$ 为第 $n$ 次加载时的弹性模量。依据刚度的疲劳试验结果,总结出疲劳损伤的累积规律。由式(2)(3)得:

$$D = Qn^v \quad (4)$$

在此,以蜂窝纸板为研究对象,对其进行疲劳压缩实验,结合静态压缩试验,以式(4)的疲劳累积损伤模型建立蜂窝纸板的疲劳累积损伤模型,并进行一定的讨论。

## 2 实验

### 2.1 材料

实验所采用蜂窝纸板尺寸均为100 mm × 100 mm,厚度均为40 mm,芯纸定量均为105 g/m<sup>2</sup>,面纸定量均为200 g/m<sup>2</sup>,蜂窝芯纸厚度均为0.19 mm。其余规格参数见表1。

表1 蜂窝纸板样品规格参数

Tab.1 Specifications and characteristics of honeycomb paper-board specimens

试样	蜂窝孔边长/mm	厚跨比
PA-105AB/200A	7.22	0.0263
PA-105B/200A	7.98	0.0238
PA-105C/200A	8.66	0.0219

### 2.2 主要仪器及设备

主要仪器与设备:恒温恒湿试验机 THS-A7C-100AS,对实验材料进行预处理;万能电子材料试验机 LRX Plus,对材料进行准静态压缩;电液伺服材料试验系统,型号 MTS322,对材料进行疲劳压缩实验。

### 2.3 方法

1) 预处理。将蜂窝纸板试样放入恒温恒湿箱内(相对湿度50%,温度23℃),预处理24 h以上。

2) 预压缩。将蜂窝纸板试样放在万能电子材料试验机上进行应变率为15%的预压缩。

3) 疲劳压缩实验。将预压缩后的蜂窝纸板放在电液伺服材料试验系统上进行疲劳压缩实验,疲劳压缩率为10%,频率为10 Hz,压缩次数分别为10 000, 20 000, 30 000和50 000次,每组实验为8个试样,实验数据取每组平均值。

4) 疲劳试样准静态压缩试验。将疲劳试样放入万能电子材料试验机,参照GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》进行准静态压缩试验,取平均值,得到蜂窝纸板试样的疲劳本构曲线。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 疲劳压缩对蜂窝纸板本构关系影响

未经预压缩的蜂窝纸板本构关系见图1,应力-应变曲线有4个阶段,即弹性阶段、屈服阶段、平台阶段和密实化阶段。每条曲线在应变达到0.1左右时会出现屈服尖峰,进行预压缩实验后,其屈服尖峰消失,有利于保护产品。

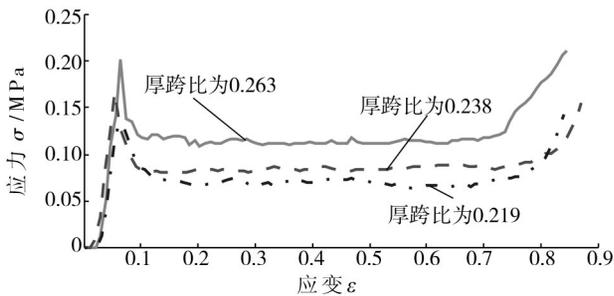


图1 未预压的蜂窝纸板应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain relationship of honeycomb paperboard without pre-compression

蜂窝纸板在经过不同次数的疲劳压缩后,3种规格疲劳试样的本构关系见图2。

由图2可知,蜂窝纸板试样经过疲劳压缩后,其应力-应变本构曲线发生了巨大变化,原来的屈服应力尖峰消失,曲线由4个阶段变为3个阶段,即弹性阶段、平台阶段和密实化阶段,屈服阶段消失了。经过预压,3种规格的蜂窝纸板平台应力变化不大,密实化应变也变化不大。

从图2可以看出,疲劳效应对应力的变化分为2个阶段:第1阶段是0~30 000次左右,这个阶段平台应力下降很快,如厚跨比为0.0263的试样,平台应力从开始的0.1164 MPa,到10 000次左右时变为0.1063 MPa,下降了8.67%;到20 000次左右时平台应力变为0.0945 MPa,下降了11.10%;从30 000次左右的0.0835 MPa到50 000次左右的0.0786 MPa,仅下降了5.87%。之后,蜂窝纸板的平台应力随着循环次数的增加,其变化不明显。

#### 3.2 蜂窝纸板疲劳累积损伤模型

鉴于以上实验数据,可以知道蜂窝纸板与纤维基增强材料性能结构具有一定的相似性,这里借鉴纤维基增强材料的疲劳累积损伤模型,以蜂窝纸板疲劳平

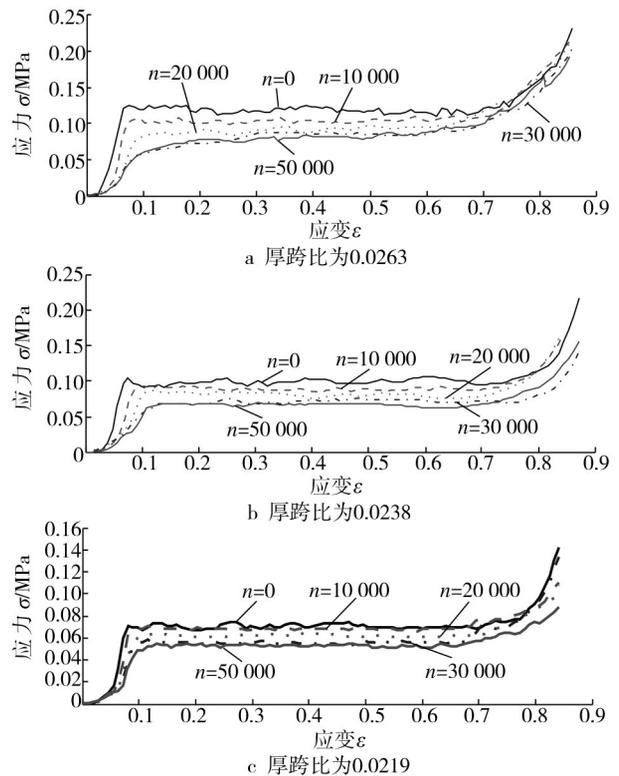


图2 疲劳压缩后蜂窝纸板应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain relationship of honeycomb paperboard after fatigue compression

台应力为参量,建立模型:

$$\sigma_{pl}(n) = \sigma_{pl}(0)(1 - An^b) \quad (5)$$

$$D = 1 - \frac{\sigma_{pl}(n)}{\sigma_{pl}(0)} \quad (6)$$

$$D = An^b \quad (7)$$

式中:  $\sigma_{pl}(0)$ 为未受疲劳损伤材料的平台应力;  $\sigma_{pl}(n)$ 为第n次加载后的平台应力;A和b受应变水平和厚跨比的影响。根据实验数据,进行最小二乘法数据拟合,见图3。

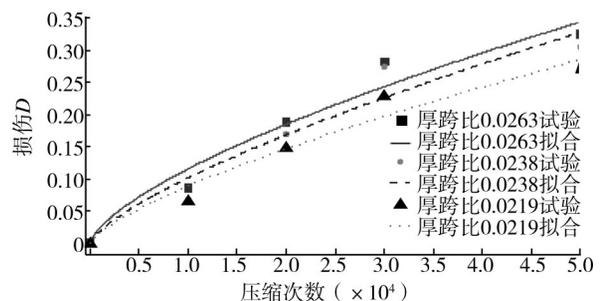


图3 蜂窝纸板疲劳累积损伤试验与模型曲线

Fig.3 Experimental and model curves of honeycomb paperboard fatigue cumulative damage

从图3可以看出,纤维基增强材料的疲劳累积损伤模型经过参量的改变,比较适用于蜂窝纸板疲劳累

积损伤的计算预估。随着厚跨比的增大,疲劳效应对蜂窝纸板平台应力的影响也增大,这主要由于厚跨比增大,蜂窝压缩时相互干涉的影响也增大。疲劳效应对蜂窝纸板平台应力的变化呈逐渐减小的趋势,当达到一定的次数时,将呈现微弱改变。

疲劳累积损伤模型参数见表2,可见参数A随着厚跨比的减小而减小,说明厚跨比越小,疲劳损伤趋势越平缓;参数b随着厚跨比的减小而增大,说明厚跨比越大,疲劳次数对损伤的影响越大。

表2 疲劳累积损伤模型参数

Tab.2 The parameters of fatigue cumulative damage model

厚跨比	参数A	参数b	方差 $R^2$
0.0263	0.000 225 7	0.6774	0.972
0.0238	0.000 126 4	0.7266	0.967
0.0219	0.000 113 1	0.724	0.971

### 3.3 蜂窝纸板疲劳累积损伤模型实验验证

每种规格的蜂窝纸板取3组进行验证试验,每组实验为8个试样,实验数据取每组平均值,结果见图4。从图4可以看出,曲线是拟合曲线,进行3组试验后得到的数据与参量作对比,具有一定的普适性。

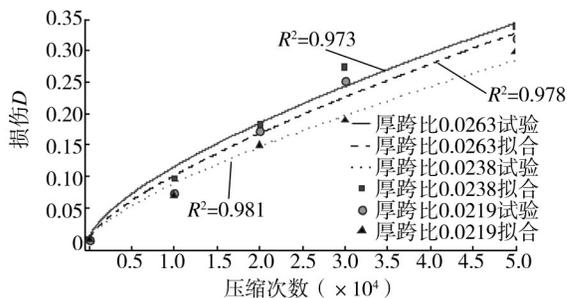


图4 蜂窝纸板疲劳累积损伤模型与实验验证

Fig.4 The honeycomb paperboard fatigue cumulative damage model and experimental validation

## 4 结语

1) 蜂窝纸板不像金属有疲劳极限,也不像纤维基增强材料有基体开裂、纤维/基体界面脱胶、分层和纤维断裂,它需要定义一个条件疲劳极限,这个疲劳极限就是蜂窝纸板准静态压缩时的平台应力。随着疲劳累积损伤增加,平台应力将发生一定的变化。

2) 疲劳效应对蜂窝纸板平台应力有一定影响,呈现出先剧烈后微弱的状态。在缓冲包装设计时,必须

考虑疲劳效应的影响。

### 参考文献:

- [1] WANG Zhi-wei, E Yu-ping. Mathematical Modeling of Energy Absorption Property for Paper Honeycomb in Various Ambient Humidities[J]. Materials and Design, 2010, 31(9): 4321—4328.
- [2] E Yu-ping. Energy Absorption Properties of Paper-Based Packaging Materials as Response to Various Ambient Humidities[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 155—159.
- [3] 王军, 卢立新. 基于湿度影响的蜂窝纸板静态压缩能量吸收图[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 5—7.  
WANG Jun, LU Li-xin. Energy-absorption Diagrams of Honeycomb Paperboards under Static Compression in Different Relative Humidity[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 5—7.
- [4] GUO Yan-feng, ZHANG Jing-hui. Shock Absorbing Characteristics and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Shock and Vibration, 2004, 11(5—6): 521—531.
- [5] 肖伟, 李大纲, 徐朝阳. 疲劳振动对蜂窝纸板承载力和缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2009, 30(1): 14—17.  
XIAO Wei, LI Da-gang, XU Zhao-yang. Influence of Fatigue Vibration on the Load Capacity and Cushion Performance of Honeycomb Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(1): 14—17.
- [6] FAN Zhi-geng, LU Li-xin. Effect of Fatigue Damage on Inner-resonance Conditions of Pre-compressed Honeycomb Paperboard System[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(2014): Article ID 817404.
- [7] YANG J N. Residual Strength Degradation Model and Theory of Periodic Proof Tests for Graphite/Epoxy Laminates[J]. Journal of Composite Material, 1977, 11(4): 177—197.
- [8] HWANG W, HAN K S. Fatigue Composites Fatigue Modulus Concept and Life Prediction[J]. J Compos Mater 1986, 20: 155—65.
- [9] WHITWORTH H A. Modeling Stiffness Reduction of Graphite/Epoxy Composite Laminates[J]. Journal of Composite Material, 1987, 21(4): 363—372.
- [10] WU Fu-qiang, YAO Wei-Xing. A Fatigue Damage Model of Composite Material[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32: 134—138.
- [11] SHENOI R A, CLARK S D, ALLEN H G. Fatigue Behavior of Polymer Composite Sandwich Beams[J]. J Compos Mater 1995, 29: 2423.
- [12] JEN Y M, CHANG L Y. Evaluating Bending Fatigue Strength of Aluminum Honeycomb Sandwich Beams using Local

- Parameters[J]. International J Fatigue 2008, 30(3):11—14.
- [13] YANG J N, JONES D L, YANG S H, et al. A Stiffness Degradation Model for Graphite/epoxy Laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1990, 24:753—764.
- [14] YANG J N, LEE L J, SHEU D Y. Modulus Reduction and Fatigue Damage of Matrix Dominated Composite Laminates [J]. Composite Structures, 1992, 21:91—100.
- [15] WU W F, LEE L J, CHOY S T. A Study of Fatigue Damage and Fatigue Life of Composite Laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1996, 30(1):123—137.
- [16] 顾怡. FRP 疲劳累积损伤理论研究进展[J]. 力学进展, 2001, 31(2):193—202.
- GU Yi. The Advances in FRP Fatigue Cumulative Damage Theory[J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(2):193—202.
- 
- (上接第 55 页)
- and Physical of High-amylose Corn Starch/chitosan Edible film[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011(4): 97—99.
- [3] 贾超, 王利强, 卢立新, 等. 增塑剂对马铃薯淀粉基复合膜物理机械性能的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(13):48—52.
- JIA Chao, WANG Li-qiang, LU Li-xin, et al. Effect of Plasticizers on Physical and Mechanical Properties of Potato Starch Based Composite Films[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(13):48—52.
- [4] 赵元汇, 郭玉花, 黄震, 等. 可食性大豆蛋白包装膜性能研究[J]. 包装工程, 2012, 33(19):48—50.
- ZHAO Yuan-hui, GUO Yu-hua, HUANG Zhen, et al. Study on Performance of Edible Soybean Protein Packaging Film[J]. Package Engineering, 2012, 33(19):48—50.
- [5] 刘幸幸, 王家俊, 刘海龙, 等. 壳聚糖/大豆分离蛋白复合包装膜的制备与表征[J]. 包装工程, 2012, 33(3):46—50.
- LIU Xing-xing, WANG Jia-jun, LIU Hai-long, et al. Preparation and Characterization of Chitosan/soy Protein Isolate Packaging Composite Film[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3):46—50.
- [6] 孟令伟, 刘伟, 胡亚光, 等. 玉米淀粉基可食包装薄膜透气性能的试验研究[J]. 包装与食品机械, 2013(4):13—15.
- MENG Ling-wei, LIU Wei, HU Ya-guang, et al. Experimental Research of Edible Packaging Film Permeability Based on Corn Starch[J]. Packaging and Food Machinery, 2013(4):13—15.
- [7] 曹龙奎, 卞雪. 马铃薯渣可食性包装膜的制备及其微观结构分析[J]. 包装工程, 2010, 31(19):32—35.
- CAO Long-kui, BIAN Xue. Preparation and Microstructure Analysis of Edible Film of Potato Pulp[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19):32—35.
- [8] 赵丽美. 变性淀粉—壳聚糖可食性包装膜的包装性能研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2010.
- ZHAO Li-mei. Packaging Performance Study of Modified Starch-chitosan Edible Film[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2010.
- [9] 方健, 罗小雪, 邹玉蕾. 2 种淀粉—壳聚糖—纤维素衍生物可食性包装膜特性的对比[J]. 食品与发酵工业, 2012(1): 67—67.
- FANG Jian, LUO Xiao-xue, ZOU Yu-lei. The Comparison Study on Two Starch-Chitosan-Cellulose Derivatives Edible Films[J]. Food and Fermentation Industries, 2012(1):67—67.
- [10] 王洪江, 孙诚, 黄利强. 乳清蛋白添加量对交联羧甲基玉米淀粉可食性包装膜阻隔性能的影响[J]. 包装工程, 2011, 32(1):46—49.
- WANG Hong-jiang, SUN Cheng, HUANG Li-qiang. Effect of Whey Protein Addition on Barrier Properties of Cross-linked Carboxymethyl Modified Starch Edible Film[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1):46—49.
- [11] 寻倩男, 雷桥, 包建强, 等. 明胶-酪蛋白酸钠可食性包装膜的包装性能研究[J]. 包装工程, 2013, 34(15):40—45.
- XUN Qian-nan, LEI Qiao, BAO Jian-qiang, et al. Packaging Performance of Gelatin-sodium Caseinate Edible Composite Film[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15):40—45.
- [12] 陆红佳, 郑龙辉, 陈厚荣, 等. 纳米甘薯渣纤维素的添加对玉米淀粉可食性包装膜性能的影响[J]. 食品科学, 2012(23):88—92.
- LIU Hong-jia, ZHENG Long-hui, CHEN Hou-rong, et al. of Nanometer Sweet Potato Residue Fiber Added Effect on the Properties of Corn Starch Edible Film[J]. Journal of Food Science, 2012(23):88—92.
- [13] 王程. 复合改性玉米淀粉成膜及应用特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- WANG Cheng. Compound Modified Maize Starch Film and Application Properties Research[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [14] 尹晨. 玉米淀粉质包装膜的研制及其特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012.
- YIN Chen. Development and Characteristics of Corn Starch Film Research[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012.
- [15] 李大军, 尹晨. 淀粉-玉米醇溶蛋白可食性包装膜的筛选与性能研究[J]. 食品研究与开发, 2012(4):23—27.
- LI Da-jun, YIN Chen. Screening and Performance Study of Starch Edible Film[J]. Journal of Food Research and Development, 2012(4):23—27.