

# 大型纸浆模塑平托盘弹塑性数值分析

计宏伟, 王怀文

(天津商业大学 机械工程学院, 天津 300134)

**摘要:** 基于纸浆模塑材料的弹塑性力学特性, 利用有限元软件 ABAQUS 对大型纸浆模塑平托盘在受压情况下的应力场和应变场进行了分析。结果表明, 为了准确地预测托盘的力学响应, 必须考虑材料的塑性。同时, 对给定尺寸的某一纸浆模塑平托盘的最大承受载荷进行了设计。研究结果以期大型纸浆模塑平托盘的设计和制造提供指导。

**关键词:** 纸浆模塑平托盘; 弹塑性; 数值模拟; 应变场; 应力场

**中图分类号:** TB482.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2011)01-0007-04

## Numerical Analysis of Elastoplasticity for Large-Scaled Moulded Pulp Pallet

Ji Hongwei, Wang Huaiwen

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**Abstract:** Based on the elastic-plastic properties of moulded pulp material, the strain fields and stress fields of a large-scaled moulded pulp pallet under compressive load are analyzed by using finite element software ABAQUS. Results indicate that the elastoplasticity must be considered for accurately forecasting the mechanical response of large-scaled moulded pulp pallet. Furthermore, the maximal loading capacity of a given sized moulded pulp pallet is determined. The results of the simulations are expected to provide some design parameters for the optimal performance of large-scaled moulded pulp pallet.

**Key words:** moulded pulp pallet; elastoplasticity; numerical simulation; strain field; stress field

## 0 引言

纸浆模塑材料是一种新型的绿色包装材料, 其制品是以废纸为原料, 经过碎浆并调配成一定浓度的浆料, 在特制的模具上经过真空吸附成型, 再经过干燥而形成不同种类和用途的内衬体包装制品<sup>[1]</sup>, 已广泛应用于电子、机械零部件、工业仪表、电工工具、小家电、玻璃、陶瓷和农产品等行业的内衬包装。在纸浆模塑材料制品迅速发展的推动下, 对其基本力学性能和缓冲特性的研究也日益深入。曹世普等提出了纸浆模塑工业制品的缓冲机理, 并用有限元模拟此类制

品在载荷作用下的响应<sup>[2]</sup>。计宏伟等用数字相关测量方法研究了纸浆模塑材料拉伸时的力学性能<sup>[3]</sup>。王怀文等对其压缩力学行为及本构关系进行了研究<sup>[4]</sup>。

随着对纸浆模塑制品的研究开发, 其应用范围也在不断扩大, 如已开始用于联运通用平托盘的制造。如果纸浆模塑平托盘得到推广, 将顺应国际出口贸易的趋势, 对打破发达国家的“绿色环保贸易壁垒”具有重要意义。近年来, 对纸浆模塑平托盘的研究已有报道。如彭新才对纸浆模塑平托盘模具的设计和制造进行了研究<sup>[5]</sup>。尹恩强等基于 ANSYS 有限元分析软件

收稿日期: 2010-11-10

基金资助: 天津市自然科学基金资助重点项目(08JCZDJC16100)

作者简介: 计宏伟(1964-), 男, 辽宁锦州人, 天津商业大学教授, 博士, 主要研究方向为运输包装设计, 自修复颗粒增强复合材料的力学行为研究, E-mail: jhw@126.com

对一种纸浆模塑通用平托盘的结构及其性能进行了研究,确定了该托盘的结构要素,并设计了托盘结构<sup>[6]</sup>。但对这种新型托盘的研究还有以下不足:1)结构设计还局限于经验;2)结构的力学性能研究还不多。

本文基于 ABAQUS 通用有限元分析软件,对大型纸浆模塑托盘在均布载荷下的弹塑性应力和应变响应进行了模拟,研究结果以期对该产品的设计和制造提供指导。

## 1 纸浆模塑材料力学性能测试

### 1.1 基本力学参数的测定

为了精确地模拟纸浆模塑托盘的力学响应,准确的材料性能参数至关重要。本研究选取了 8 个纸浆模塑材料试件,在 DWD-100D 型电子万能试验机上进行实验,从而得到各试件的应力-应变曲线如图 1 所示。

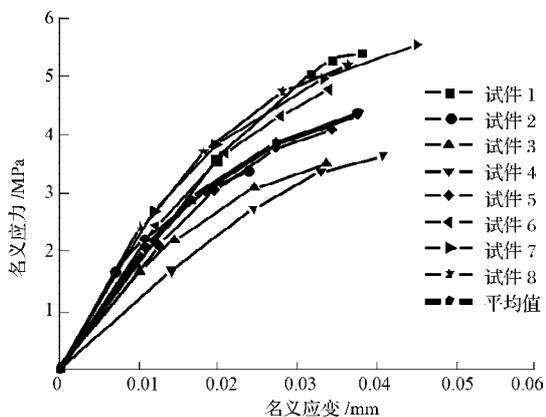


图 1 不同试件的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of different specimens

从图 1 中可看出,材料在受力的初始阶段,表现出线弹性,即应力和应变为线性关系,随着载荷的增加,弹性模量出现下降,即材料表现出塑性。图 1 还显示,不同试件的应力-应变关系曲线具有一定的分散性,这主要是由于材料中存在杂质、空洞和纤维排列的随机性造成的。笔者对其进行平均处理,在后续模拟中所采用的材料应力-应变关系即为平均处理后的曲线。图 1 中由实验测定的应力-应变曲线实际为名义应力-应变关系,其平均值如表 1 所示。

表 1 名义应力-应变数据

Table 1 Nominal stress-strain data

名义应变 $\varepsilon_{\text{nom}}/\text{mm}$	0	0.010 80	0.016 56	0.027 37	0.037 69
名义应力 $\sigma_{\text{nom}}/\text{MPa}$	0	2.07	2.89	3.86	4.37

### 1.2 真实应力、真实应变和塑性应变的计算

承受拉力的材料在塑性变形时,可能会在材料失效时经历局部的高度伸长和变细,称为颈缩。而材料在承受压力时不会出现颈缩现象。描述塑性的数学模

型应该考虑拉伸和压缩的不同特性,而与结构几何形状和外载特性无关。为了实现这一目的,考虑塑性的有限元模拟,采用真实应力-应变关系来代替名义应力-应变关系。

大多数实验数据常常是以名义应力-应变的值给出的,这时,必须应用下列公式将塑性材料的数据从名义应力-应变的值转换为真实应力-应变的值。

如忽略材料的体积改变,则有

$$l_0 A_0 = l A, \quad (1)$$

式中:  $l$  为当前长度;  $l_0$  为原始长度;  $A$  为当前横截面积;  $A_0$  为原始横截面积。

则当前面积与原始面积的关系为:

$$A = l_0 A_0 / l. \quad (2)$$

将  $A$  的定义代入到真实应力的定义中有:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l}{l_0} = \sigma_{\text{nom}} \left( \frac{l}{l_0} \right) = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}), \quad (3)$$

这就是真实应力与名义应力-应变之间的关系。

在考虑  $\Delta l \rightarrow dl \rightarrow 0$  的情况下,拉伸和压缩应变是相同的,这时有

$$d\varepsilon = dl/l, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l dl/l = \ln(l/l_0), \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon$  为真实应变或对数应变。

因为

$$\varepsilon_{\text{nom}} = (l - l_0)/l_0 = l/l_0 - 1, \quad (6)$$

两边同时加 1,然后取自然对数,就得到了真实应变和名义应变之间的关系:

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_{\text{nom}} + 1). \quad (7)$$

利用式(3)和式(7)将表 1 中名义应力-应变转化为真实应力-应变的值,如表 2 所示。

表 2 真实应力-应变数据

Table 2 Real stress-strain data

真实应变 $\varepsilon/\text{mm}$	0	0.010 74	0.016 42	0.027 00	0.037 00
真实应力 $\sigma/\text{MPa}$	0	2.719	3.873	5.085	5.749

上述真实应变中不仅包含材料的塑性应变,还包含材料的弹性应变。弹性应变等于真实应力与杨氏模量的比值,从总体应变中减去弹性应变,就得到了塑性应变,其关系式为:

$$\varepsilon^{\text{pl}} = \varepsilon^{\text{t}} - \varepsilon^{\text{el}} = \varepsilon^{\text{t}} - \sigma/E, \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon^{\text{pl}}$  为塑性应变;  $\varepsilon^{\text{t}}$  为总体应变;  $\varepsilon^{\text{el}}$  为弹性应变;  $E$  为材料的弹性模量。

根据表 2 和式(8)得到的真实应力和塑性应变之间的关系如表 3 所示。

**表 3 真实应力 - 塑性应变数据**  
Table 3 Real stress-plastic strain data

塑性应变 $\epsilon^p/mm$	0	0.000 87	0.006 58	0.013 92
真实应力 $\sigma/MPa$	2.719	3.873	5.085	5.749

## 2 纸浆模塑平托盘的应力和应变分析

### 2.1 有限元建模

应用 Pro/E, Solidworks 等 CAD 软件对产品结构进行设计或对有限元分析进行前处理是计算机辅助设计和仿真领域的常用手段<sup>[7]</sup>。纸浆模塑托盘建模可在 Pro/E 中方便地实现, 在 Pro/E 环境中根据托盘的实际尺寸建模后导出为 .iges 或为 .stp 等后缀格式的文件, 均能被主流有限元软件 (如 ABAQUS, ANSYS 及 MSC.MARC 等) 顺利读入。本研究中建立的模型如图 2 所示, 其中托盘的长和宽分别为 1 200 mm 和 800 mm, 纸浆模塑材料的厚度一般在 2 ~ 10 mm 之间, 该模型取厚度为 4 mm。

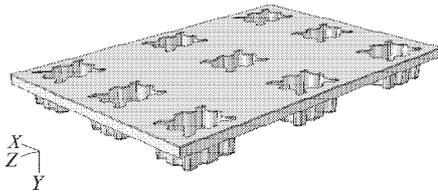


图 2 纸浆模塑托盘模型

Fig. 2 Moulded pulp pallet model

将 Pro/E 产生的纸浆模塑结构模型导入到 ABAQUS 有限元环境中, 进行前处理。有关参数设置如下: 1) 将支座固定, 作为边界条件; 2) 采用三维四面体单元 C3D4 对结构进行网格划分, 划分的单元数为 125 562 个, 有限元网格模型如图 3 所示。

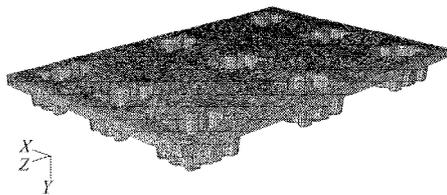


图 3 纸浆模塑托盘有限元网格模型

Fig. 3 FEM model of moulded pulp pallet

### 2.2 线弹性分析

根据表 1 中的数据, 材料设置为线弹性, 弹性模量为 191 MPa, 泊松比为 0.1。因为托盘上的货物一般为固体, 而不是流体, 所以不能直接在托盘上施加载荷。本研究中施加 0.01 MPa 的均布载荷于一个与纸浆模塑托盘大小相等的刚性薄板上 (约相当于 1 t 载荷), 然后将此刚性薄板置于托盘之上。在分析过程中, 创建 2 个静态的分析步骤。步骤 1 施加 10% 的载荷, 目的是使刚性板与托盘进行充分地接触; 步骤 2 中将载荷全部施加在刚性板上。

将该模型提交至 ABAQUS 求解器进行计算, 得到的 Von Mises 应力分布如图 4 所示。

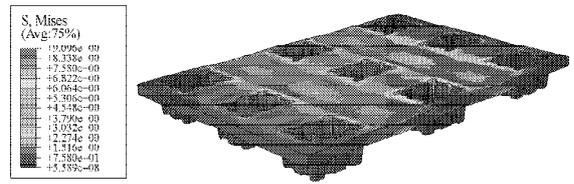


图 4 线弹性模型的 Von Mises 应力分布

Fig. 4 Distribution of Von Mises stress for linear elastic model

从图 4 中可看出, 托盘中的最大应力达 9.096 MPa, 已经远远超过了材料的屈服极限和强度极限 (从表 1 中得知, 材料屈服时的名义应力为 2.07 MPa, 破坏时的名义应力为 4.37 MPa)。为了准确预测托盘的力学响应, 必须考虑材料的塑性。

### 2.3 弹塑性分析

该模拟中在线弹性模型的基础上, 根据表 3 中材料的真实应力和塑性应变数据, 将材料的塑性考虑进去, 有限元模型的其他设置不变, 得到的 Von Mises 应力分布如图 5 所示, 最大主应变分布如图 6 所示。

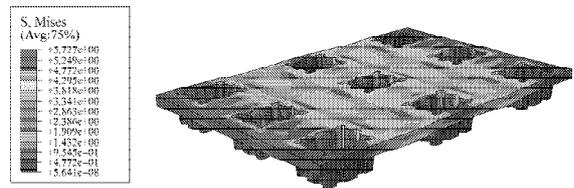


图 5 弹塑性模型的 Von Mises 应力分布

Fig. 5 Distribution of Von Mises stress for linear elastic model

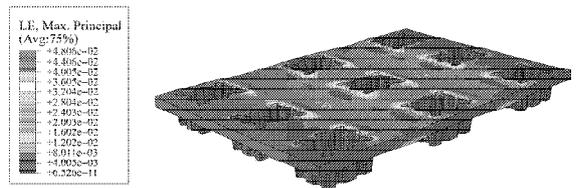


图 6 弹塑性模型的最大主应变分布

Fig. 6 Distribution of maximal principal strain for linear elastic model

从图 5 中可看出: 1) 模型中的最大应力为 5.727 MPa, 没有超过材料的最大真实应力; 2) 最大应力出现在支座附近, 这都是合理的。

在 ABAQUS 中, 材料的塑性都是假设为理想塑性, 即应力达到材料的最大塑性应力之后就不再增加, 应变可以在此应力值下继续增加。因此, 判断结构是否失效, 还应该考察材料的应变。从图 6 中可看出, 最大对数应变约为 4.8%, 已经超过了材料的最大破坏真

实应变(从表2中得知,最大破坏真实应变约为3.7%)。也就是说,结构承受不了这么大的载荷。

### 3 托盘承载能力分析

将模型的分布载荷降为0.007 MPa,折合成集中载荷为672 kg,此时模型的Von Mises应力分布如图7所示,得到的最大主应变分布如图8所示,模型的变形图如图9所示。

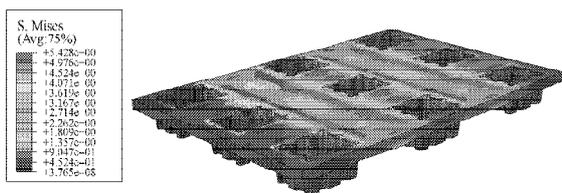


图7 模型的Von Mises应力分布

Fig. 7 Distribution of Von Mises stress for improved model

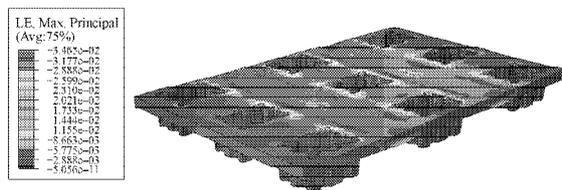


图8 模型的最大主应变分布

Fig. 8 Distribution of maximal principal strain for improved model

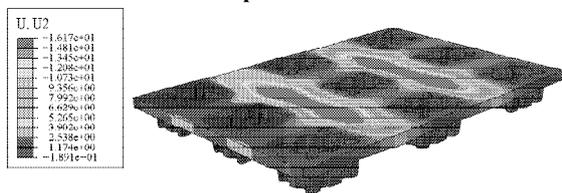


图9 模型的变形图

Fig. 9 Distribution of maximal principal strain for linear elastic model

从图7和图8中可看出,模型中出现的最大应力和最大应变均没有超过材料所允许的范围,但都接近于材料所能承受的最大应力和应变,所以,此载荷可近似认为是该托盘所能承受的最大载荷。从图9中可看出,此时托盘的最大变形量约为16 mm。

### 4 结语

本文对纸浆模塑材料的力学性能参数进行了实验测定,并推导了名义应力、名义应变与真实应力、真实应变、塑性应变之间的关系。在此基础上,利用有限元软件ABAQUS对大型纸浆模塑平托盘在受压情况下的应力场和应变场进行了分析。结果表明:线弹性

分析不能准确地反应构件的真实应力水平,为了准确地预测托盘的力学响应,必须考虑材料的塑性。同时,对给定尺寸的某一纸浆模塑平托盘的最大承载能力进行了分析,结果显示:在给定的尺寸下,此托盘的承载能力不能超过670 kg。有关大型纸浆模塑平托盘结构优化设计方面的工作还在继续进行中。

#### 参考文献:

- [1] 戴宏民. 新型绿色包装材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
Dai Hongmin. New Green Packaging Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [2] 曹世普, 郭奕崇, 马玉林. 纸浆模塑工业包装制品缓冲机理研究及有限元模拟[J]. 中国包装工业, 2003(97): 34-37.  
Cao Shipu, Guo Yichong, Ma Yulin. Investigation on the Cushioning Mechanism of Modeled Pulp and Simulation through Finite Element Method[J]. China Packaging Industry, 2003(97): 34-37.
- [3] 计宏伟, 余本农, 平幼妹, 等. 用数字相关测量方法研究纸浆模塑材料拉伸时的力学性能[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 168-170.  
Ji Hongwei, Yu Bennong, Ping Youmei, et al. Investigation of the Mechanical Properties of Molded Pulp with DICM[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4): 168-170.
- [4] 王怀文, 计宏伟, 苗惠, 等. 纸浆模塑材料压缩力学行为及其本构关系的研究[J]. 机械强度, 2009, 31(3): 382-386.  
Wang Huaiwen, Ji Hongwei, Miao Hui, et al. Research on Compression Mechanical Behaviors and Constitutive Relation of Moulded Pulp Material[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(3): 382-386.
- [5] 彭新才. 纸浆模塑托盘模具设计与制造[J]. 模具工业, 1996(3): 43-45.  
Peng Xincan. Design and Manufacture of Moulded Pulp Pallet[J]. Die & Mould Industry, 1996(3): 43-45.
- [6] 尹恩强, 李士才, 张新昌. 新型纸浆模塑通用平托盘的结构与性能研究[J]. 包装工程, 2009, 30(8): 10-11.  
Yin Enqiang, Li Shicai, Zhang Xinchang. Research on Structure and Capability of New Molded Pulp Tray[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(8): 10-11.
- [7] 邓瑶瑶, 徐弘, 帅大平, 等. 应用Solidworks对棋盘式纸浆模塑结构及其模具的设计[J]. 包装学报, 2010, 2(2): 43-47.  
Deng Yaoyao, Xu Hong, Shuai Daping, et al. The Pulp Mode of Chessboard Structure and Mold Design Based on Solidworks[J]. Packaging Journal, 2010, 2(2): 43-47.

(责任编辑: 李玉珍)