基于有限元法的结构发泡材料参数识别方法研究

葛正浩,王凯,金龙

(陕西科技大学,西安 710021)

摘要:目的 求解结构发泡材料的材料属性(包含皮层和芯核)。方法 首先通过三点弯曲试验实验的 手段,求出了以外形尺寸为18 mm × 5.9 mm × 106 mm 结构发泡材料试样在载荷 F=15 N 时的挠度 (1.42 mm),再利用 Pro/E 建立了其参数化等效夹层模型,并导入 Ansys Workbench 进行了模拟分析试 验,先设置皮层、芯核的弹性模量和皮层参数变化范围,以参数识别方法分析模型参数。结果 通过数 据处理得出了模型皮层厚度 t=1.15 mm、皮层弹性模型 E₁=571 MPa、芯核弹性模量 E₂=304 MPa。结论 为结构发泡材料性能分析和研究提供了一定参考。

关键词:结构发泡;参数识别;夹层;等效模型

中图分类号: TB484.3; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2015)23-0078-05

Parameter Identification Method of Structure Foam Material Based on Finite Element Method

GE Zheng-hao, *WANG Kai*, *JIN Long* (Shaanxi University of Science and Technology, Xi' an 710021, China)

ABSTRACT: The purpose of this paper was to solve the material properties (including cortex and core) of the structural foam material. First by means of three–point bending experiment, the deflection of structural foam material specimen with an overall dimension of 18 mm×5.9 mm×106 mm in the load of F=15 N was calculated to be 1.42 mm, and then the parametric equivalent sandwich model was established using Pro/E, and imported into Ansys Workbench for simulation analysis. The cortex and core elastic modulus as well as cortex parameter variation range was first set, and then the model parameters were analyzed using parameter identification method. It was found by data processing that cortex thickness $t_s=$ 1.15 mm, elastic cortex model $E_1=571$ MPa, and core elastic modulus $E_2=304$ MPa. This paper provides reference for performance analysis and research of structural foam materials.

KEY WORDS: structural foam material; parameter identification; sandwich; equivalent model

结构发泡材料作为一种力学性能优良、密度小的新型环保材料,越来越受到包装物流生产企业的关注¹¹。 为了推广和不断开发研究,文中以有限元分析软件 Workbench为平台,以弯曲试验为基础,通过研究结构 发泡材料等效模型,分析结构发泡材料的力学性能。

1 结构发泡成型概述

20世纪80年代,随着微孔结构发泡注塑成型技术

的成熟,美国学者通过大量试验及研究,证实了结构 发泡材料具有低密度、比强度高的特点,并在工业中 得到了应用。结构发泡注塑成型作为一种新的注塑 成型工艺,可以使成型零件具有密度小、强度高、刚度 高、尺寸稳定度好等优点,而且具有消声、隔热等多种 特性,常用于尺寸较大的产品注塑成型²⁻⁵¹。结构发泡 材料的制备方法思路较多,其中最常用的是将发泡剂 与塑料原料混合,经过造粒,将其注射于模具型腔中, 高温作用下,发泡剂分解形成气体,气体在塑料熔体

收稿日期:2015-06-03 作者简介: 葛正浩(1964—),男,上海人,博士,陕西科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为机构学、模具CAD/CAE/CAM。 内扩散形成泡孔;还有是将无毒无害的气体,如氮气 和塑料一同注射于模具型腔中,形成泡孔,从而得到 结构发泡材料^[6~7]。结构发泡材料的特点是外表皮是 致密塑料,内层是连续发泡塑料,从皮层到芯核,此部 分的泡孔由无到有,密度由大到小,呈现出外坚内韧 的特点。由于熔融塑料在模具模腔内,经过气体膨胀 使之塑料在模腔内成型,在其过程中,塑料与模腔壁 接触的部位温度相对较低,此时模腔中的塑料的冷却 速率、剪切速率较大,两种因素共同作用,在泡孔中气 体排出后,形成了皮层结构。产品的外壁处,熔料受 到的作用相对较小,发泡材料成型时间加长,易出现 泡孔塌陷现象,形成密度由大变小的趋势,得到夹层 式结构发泡制品。

2 结构发泡材料等效模型

结构发泡材料由皮层(实体)与发泡芯核组成,见 图1,可以看作是一种宏观状态下的复合体,在加载状 态下,应力在不同区域是不同的。



图 1 结构发泡材料试样断截面示意 Fig.1 Section sketch map of structural foam material

为了更加方便、准确地研究材料特性,通过对材料进行等效处理,以等效材料参数模型来模拟分析材料力学性能。

1) 简支梁弯曲试验过程中材料的最大变形量:

$$w = \frac{5qL^4}{384EI} \tag{1}$$

式中:E为材料的弯曲弹性模量(MPa);I为材料 截面惯性距, $I = \frac{bd^3}{12}$,b为宽度(mm),d为厚度(mm); q为材料施加的均布载荷(N/mm);L为简支梁跨距(mm)。

2)等效关系建立。弯曲试验中,已知跨度L、载荷q,按公式可以得到发泡材料的Ell:

$$E_1 I_1 = E_1 \frac{bd^3}{12}$$
(2)

"夹层"模型的抗弯刚度有2部分,两皮层EI、芯核 E_I。两者共同作用,结果过程如下:

$$EI = E \frac{b[d^3 - (d - 2t_s)^3]}{12}$$
(3)

$$E_2 I_2 = E_2 \frac{b(d - 2t_s)^3}{12}$$
(4)

那么E₁I₁=EI+E₂I₂为等效关系。

按照材料的抗弯刚度等效,常常把结构发泡材料 等效成"工"形模型、回形模型、夹层模型、微孔模型、实 体模型等进行等效分析。其中夹层模型是将结构发泡 材料分成两个部分实体,见图2,两部分的弯曲模量不 同,分别代表结构发泡材料芯核和皮层实体部分。相 对于其他模型等效方法,夹层模型具有建模简单、较符 合实际情况、分析时运算量大大减少的优点,是可行性 最高的一种方案^[8]。文中以夹层模型进行有限元模拟 弯曲试验,得出材料各部分等效属性。以此模型为基 础,按照参数识别方法,以输入数据与输出数据的关 系,来确定试样在弯曲试验中各部分的属性。



图2 夹层等效模型 Fig.2 Sandwich equivalent model

3 参数识别

参数识别是根据实验数据和建立的模型来确定 一组参数值,使得由模型计算得到的数值结果能最好 地拟合测试数据。以结构发泡材料等效模型参数为 识别对象,以弯曲试验为基础,建立与试验相符的弯 曲试验等效模型系统,计算该工况下试样的力学行 为,并与实际的力学试验结果进行对比分析,以求得 的两结果误差为参考,误差越小就说明越接近原始参 量^[9—10]。以这种方法经过大量的数值计算,就可以得 到与之相对应的材料参数。

建立目标函数,如下:

$$U = \sum_{i}^{n} \Delta U^{2} = \sum_{i}^{n} (u_{i}(E_{1}, E_{2}, t_{s}) - w_{i})^{2}$$
 (5)

式中:U为目标函数;u_i为有限元分析弯曲方向上 位移;w_i 为三点弯曲实际测量位移。

建立优化模型 v=u_i(E₁, E₂, t_s),通过有限数量点, 得出与实际测量位移w_i最为接近的状态,并得到E₁, E2。在分析过程中,不能直接表示出优化结果,采用优 化模型为 $\Delta U=u_i(E_1, E_2, t_s)-w_i$,利用软件中"User Defined Result"功能进行优化模型建立,以现有数据为 基础,得出与之最接近的位移,即求U的最小值。

建立优化模型,在试验及分析中获得结构发泡 材料的变形在此可以认为小变形,其挠度与载荷成 正比,那么:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} k = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix}$$
(6)

以实体模型试验为基础,依据实际测试数据进行 推导:

$$u_i = \frac{F}{k} = k' F_i \tag{7}$$

$$U_{\min} = (u_1 - w_1)^2 + (u_2 - w_2)^2 + \dots + (u_n - w_n)^2$$
 代入公式得:

$$U_{\min} = w_1^2 + \dots + w_n^2 + (k'F_1)^2 + \dots + (k'F_n)^2 - 2k'(F_1w_1 + F_2w_2 + \dots + F_nw_n)$$
(8)

按照公式(6)和(7)进行计算,得出优化参数k', 然后以有限元分析软件 Ansys Workbench 为计算平 台,结合软件提供的优化设计模块19-101,将得出的线性 变量k[']作为有限元分析依据,得出最佳材料参数。

实验过程 4

4.1 工况分析

以结构发泡材料试样为研究对象,进行弯曲试 验[11-12],记录载荷-位移见图3。





通过实验很容易测定试样基本尺寸为18 mm × 5.9 mm × 106 mm, 在线性关系下, 三点弯曲实验载荷 F=15 N, 挠度w =1.42 mm, 见图 4。在 Pro/E 中建立试 验装置模型,用有限元分析软件Workbench进行模拟

分析时也使用相同的数据条件。



图4 实验测试条件 Fig.4 Experimental test condition

4.2 参数化模型建立

等效模型中包括皮层、芯核等2个部分,利用三维 软件 Pro/E 建立以皮层厚度 ts 为驱动参数的分析模 型。建立等效分析参数模型是优化分析的重要步骤, 首先在Pro/E中建立参数模型如图5所示,并以ds_X 命名参数:

$$\begin{cases} ds_h = 5.9 \\ ds_ts = 1 \\ hf = ds_h - 2 \times ds_ts \end{cases}$$
(9)







图6 Pro/E参数化模型 Fig.6 Parametric model based on Pro/E

4.3 Workbench计算分析过程

以Ansys Workbench 为有限元分析平台,利用 Design Exploration 这一优化设计模块,采用目标驱动 优化(Direct Optimization)方法,模拟分析试样的弯曲 试验状态,通过对比分析实际试验数据与模拟试验数 据,利用参数识别思想去寻求材料所需参量^[13-14]。 4.3.1 有限元分析模型的建立

将 Pro/E 中建立的参数化模型导入到 Ansys Workbench 15.0。建立静力学(Static Structural)、优化 设计(Direct Optimization)系统。

4.3.2 定义模型的材料属性

皮层材料属性:密度为0.951 g/cm³,弹性模量为550 MPa,泊松比为0.41,尺寸为1 mm;芯核材料属性: 密度为0.564 g/cm³,弹性模量为300 MPa,泊松比为0.41,尺寸为3.9 mm。柱体2,4,6使用结构刚(Structural Steel)材料,并将皮层和芯核的弹性模量参数化。

4.3.3 划分网格

夹层和芯核采用为四面体网格(Tetrahedrons),柱体采用正六边形网格(Hex Dominant),最大边长为0.5 mm,网格相关度(Relevance)为10,见图7。



图7 划分网格 Fig.7 Dividing grid

4.3.4 施加载荷与约束

在柱体2上添加载荷(15N),在柱体2上添加固 定约束(Fixed Support)约束,在柱体4和6上添加无摩 擦约束(Frictionless Support),见图8。



图 8 添加约束与载荷 Fig.8 Adding constraints and loads

4.3.5 添加搜索范围

在 Direct Optimization 中设置参数的搜索范围,其 中 t。变化范围为 0.7~1.3 mm, E1 变化范围为 495~605 MPa, E2 变化范围为 200~350 MPa, 设置 100 组实验。

4.4 数据处理

按照分析结果,记录误差在2%范围以内12组数

据,见表1,并将其结果作均值处理。为方便起见,将 芯核的尺寸作为参数进行分析,然后以计算出的芯核 尺寸来反求皮层t₄的尺寸。

表1 试验结果 Tab.1 Test Result

序号	<i>t</i> _s /mm	<i>E</i> ₁ /MPa	<i>E</i> ₂ /MPa	w/mm	误差/%
1	1.18	577.9	269.3	1.42	0.03
2	1.06	571.0	343.3	1.42	-0.19
3	1.10	569.2	321.1	1.43	0.54
4	1.25	570.4	284.1	1.41	-0.79
5	1.26	550.4	317.4	1.43	0.98
6	1.24	565.4	306.3	1.41	-0.69
7	1.23	575.4	239.6	1.43	0.76
8	1.18	577.9	269.3	1.42	0.03
9	1.13	576.7	313.7	1.41	-0.88
10	1.10	569.2	321.1	1.43	0.54
11	1.06	571.0	343.3	1.42	-0.19
12	0.99	578.5	323.6	1.44	1.19
平均值	1.15	571.1	304.4	1.42	0.11

4.5 验证

按照设定的参数及过程进行优化分析,表1为第1 组试样的优化结果,按照上面平均值结果,得出各参 数的平均值: t_s =1.15 mm, E_1 =571 MPa, E_2 =304 MPa,以 此参数进行模型建立,在Workbench中进行分析得出 试样的最大应力为4.58 MPa,最大变形量为 w_{max} =1.42 mm,较标准值误差为0,试验结果见图9。



图 9 试验位移与应力云图 Fig.9 Test displacement and stress cloud

5 结语

以夹层模型为等效模型研究了结构发泡材料的 力学性能。依据结构发泡材料的弯曲试验,借助有限 元分析软件Workbench进行了模拟三点弯曲模拟试 验,利用参数识别思想,在Workbench中用Design Exploration模块进行了参数优化设计,通过建立目标 求解值,大量分析试验组,求出了与实际试样分析较 接近的材料参数,用此参数作为后续塑料托盘夹层模 型材料参数,按照塑料托盘相关标准进行了塑料托盘 实际试验,并以相同的工况进行了有限元模拟试验, 并对结果进行了对比分析。通过上面的计算分析,能 够对托盘性能进行相对评价,给出了塑料托盘的试验 结果可靠预估,相比原有结果精确度有很大的提高, 有助于托盘设计。

参考文献:

[1] 陈满儒,彭彪.结构发泡塑料托盘性能的实验研究[J].包装 工程,2012,33(21):70-73.

CHEN Man-ru, PENG Biao. Experimental Study of Plastic Pallet by Structure Foaming Process[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21):70-73.

[2] 张倩,何继敏.聚丙烯结构发泡注塑成型研究进展[J].塑料 科技,2008(5):78—81.

ZHANG Qian, HE Ji-min. Research Progress on Structural Foam Injection Moulding of Polypropylene[J]. Plastics Science and Technology, 2008(5):78-81.

- [3] 彭响方,刘婷,兰庆贵,等. 微孔发泡塑料注射成型技术及 其新进展[J]. 材料导报,2005,19(1):77—78.
 PENG Xiang-fang, LIU Ting, LAN Qing-gui. Microcellular Foam Injection Molding Technology and Its Development[J].
 Material Review, 2005,19(1):77—78.
- [4] 邓富泉,马建中,薛朝华,等. EVA/OSEP复合发泡材料的形 貌及性能研究[J]. 功能材料,2013,44(7):970—973.
 DENG Fu-quan, MA Jian-zhong, XU Chao-hua, et al. Morphology and Mechanical Properties of EVA/OSEP Foamed Materials[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(7): 970—973.
- [5] 陈国华,彭玉成. 微孔塑料物理发泡新技术[J]. 高分子材料 科学与工程,2000,16(1):167—172.
 CHEN Guo-hua, PENG Yu-cheng. New Technology of Microcellular Foaming Plastics[J]. Polymer Materials Science and Engineering,2000,16(1):167—172.

- [6] 王小峰,蒋晶,侯建华,等. 化学物理联合微孔发泡成型制 备聚己内酯多孔材料[J]. 化工学报,2014(6):2386—2392.
 WANG Xiao-feng, JIANG Jing, HOU Jian-hua. Fabrication of Porous Structure of Poly(ε-caprolactone) Via Microcellular Injection Molding Combined with Chemical Foaming[J]. Ciesc Jorunal, 2014(6):2386—2392.

Polylaetic Acid/Sodium Chloride Compounds[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

[8] 金晖. 矩形填充多孔材料夹层结构的力学性能等效模型研 究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.

JIN Hui. Research on Equivalent Models of the Mechanical Function for Sandwich Structure with Rectangular Filled Porous Materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.

 [9] 李双蓓,周小军,黄立新,等.基于有限元法的正交各向异 性复合材料结构材料参数识别[J].复合材料学报,2009,26
 (4):197—202.

LI Shuang-bei, ZHOU Xiao-jun, HUANG Li-xin, et al. Material Parameter Identification for Orthotropic Composite Structure by the Finite Element Method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(4):197-202.

- [10] 黄立新,孙秀山,刘应华,等. 正交各向异性孔板的材料参数识别[J]. 工程力学,2004,21(4):28—33.
 HUANG Li-xin, SUN Xiu-shan, LIU Ying-hua. The Material Parameter Identification for Orthotropic Plate with a Circular Hole[J]. Engineering Mechanics,2004,21(4):28—33.
- [11] CHEN B, LIU J. Experimental Study on AE Characteristics of Three–Point Bending Concrete Beams[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34:391—397.
- [12] 王启智. 脆性材料三点弯曲试样的最大荷载及其挠度和刚度[J].四川大学学报(工程科学版),2005,37(6):1—5.
 WANG Qi-zhi. Maximum Load and Its Deflection and Stiffness for Three-Point Bending Specimens of Brittle Materials
 [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2005,37(6):1—5.
- [13] 徐锋,高德,景全荣,等. 基于有限元法的可降解餐具力学性能分析[J]. 包装工程,2008,29(10):63—65.
 XU Feng, GAO De, JING Quan-rong, et al. Mechanical Properties Analysis of Degradable Tableware Based on Finite-element Method[J].Packaging Engineering, 2008, 29(10):63—65.
- [14] 刘学.发泡聚乙烯包装系统动力学有限元分析[J].包装工程,2011,22(13):11-13.

LIU Xue. Finite Element Analysis of Dynamic Properties of Expanded Polyethylene Cushion Packaging System[J]. Pack-aging Engineering, 2011, 22(13):11—13.