包装技术与工艺

蜂窝芯层创新结构及成型性

牟信妮[1,2]，卢立新[1,3]，马永胜[4]
（1.江南大学，无锡 214122；2.天津职业大学，天津 300410；3.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室，无锡 214122；4.广州科技职业技术学院，广州 510550）

摘要：目的 设计一款增强型蜂窝芯层创新结构。**方法** 通过平板粘合尺寸决定新增芯层在六边形蜂窝胞元中的形状，选取直线肋板结构为研究对象，对比创新结构与常规结构的面外承载性能，在现有蜂窝芯层加工工艺的基础上，对此蜂窝芯层的成型工艺及参数进行分析研究。**结果** 新结构可实现平板状粘合，当胞元内粘合尺寸为胞元边长的 0.625 倍时，在蜂窝孔内形成直线肋板结构，分布均匀，创新结构比常规结构的平台应力提高了 315.74%，同时针对该结构改进设计了半自动及全自动粘合工艺方法。**结论** 创新结构科学稳定，承载性能得到显著提高，芯层粘合工艺改动小，能为扩充夹层板材结构及成型工艺提供参考。

关键词：蜂窝芯层；结构创新；肋板结构；平台应力；粘合工艺
中图分类号：TB484.1；TS764.5 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2017)15-0072-05

Innovative Structure and Formability of Honeycomb Core

MOU Xin-ni[1,2], *LU Li-xin*[1,3], *MA Yong-sheng*[4]
(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China; 3.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China; 4.Guangzhou Vocational College of Science and Technology, Guangzhou 510550, China)

ABSTRACT: The work aims to design an innovative structure of reinforced honeycomb core. The shape of the new core layer in the hexagonal honeycomb cell was determined based on the bonding size of the plate. With the straight rib structure selected as the research object, out-plane bearing capacities of the innovative structure and common structure were compared. Based on the existing processing technology of the existing honeycomb core, the forming process and parameters of such honeycomb core were analyzed and researched. The new structure could realize bonding in plate state. When the bonding size in cell element was 0.625 times the size of side length of cell element, the straight rib ture could be formed in honeycomb core and distributed uniformly. The plateau stress of the innovative structure was 315.74% higher than that of the common structure. Besides, semi-automatic and fully automatic bonding processes were designed with respect to such structure. The innovative structure is scientific and stable, the bearing capacity is significantly improved, and the core bonding process changes little, which could provide a reference for the expansion of sandwich plate structure and forming process.

KEY WORDS: honeycomb core; structural innovative; rib structure; plateau stress; bonding technology

蜂窝芯层结构形状多种多样，规则六边形蜂窝芯层具有较好的加工性能、承载性能、缓冲性能等优点[1—5]，蜂窝芯层由蜂窝芯原材料和胶黏剂构成。蜂窝夹层面外承载性能主要取决于蜂窝芯层，在蜂窝芯层厚度一定的情况下，芯层原材料强度越高或蜂窝胞元孔径越小，夹层板强度就越高，芯层拉伸定型难度

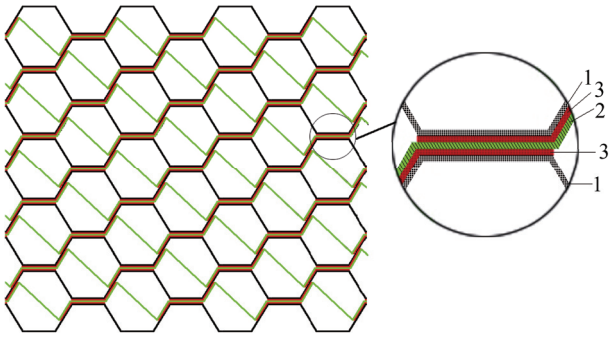
收稿日期：2016-09-19
基金项目：天津市高等学校科技发展基金（20110421）；天津职业大学科学研究基金（20151102）
作者简介：牟信妮（1982—），女，天津职业大学副教授，主要研究方向为包装结构与运输包装。
通讯作者：卢立新（1966—），男，博士，江南大学教授、博导，主要研究方向为包装动力学、运输包装、包装材料等。

越大，反之就越低。对于纸质蜂窝夹层材料，纸芯定量一般为 120~180 g/m^2，另受工艺条件限制，蜂窝胞元孔径一般大于 6 mm，但蜂窝胞元越小或芯纸定量越高时，其拉伸定型难度就越大，如果增加孔径尺寸或降低芯纸定量又会影响蜂窝纸板的承载强度。关于改变芯层结构来提高夹层板抗压强度的方法较多，不少文献有过尝试。韩炬[6—7]通过芯纸不同定量的间隔组合来提高蜂窝纸板抗压强度；陈爱民[8]在蜂窝纸板中添加镶块或镶条以提高蜂窝纸板强度；谢勇[9]提出一种菱形蜂窝纸芯的成型方法和基本尺寸参数。文中设计一种新型蜂窝芯层结构，在降低芯纸拉伸强度的同时提高纸板承载强度，同时创新粘合工艺过程，使之能够得到高效批量生产。

1　创新结构设计

1.1　原理

创新结构包括原蜂窝芯层和新增蜂窝芯层，它们的材质不同。通过新增蜂窝芯层错位粘合尺寸大小决定新增蜂窝芯层在蜂窝胞元中的形状，整体粘合状态见图 1。



1.原蜂窝芯层　2.新增蜂窝芯层　3.胶层

图 1　创新蜂窝芯层结构

Fig.1 Innovative honeycomb core structure

1.2　粘合尺寸设计

该创新结构可在平板状态下粘合，拉伸成型后新增芯层是否可按照预定的形式成型，这与粘合工艺及尺寸设计息息相关，粘合尺寸决定芯层的成型性及新增芯层在胞元中的形状，该设计设定拉伸成型后新增芯层在蜂窝胞元中以直线加强筋的形式成型。因芯层厚度远小于蜂窝胞元边长，因此蜂窝胞元增加新增蜂窝芯层后，整个蜂窝胞元仍近似为正六边形，见图 2。a，a_1 分别为原蜂窝胞元粘合拐点；b，b_1 点分别为蜂窝边长中点；c，c_1 点分别为新增芯层胞元内粘合拐点。设蜂窝边长为 l，$\overline{bc}=\overline{b_1c_1}=x$，根据平板粘合工艺可知，$\overline{ac}+\overline{cc_1}+\overline{c_1a_1}=3l$，$\overline{ob}=\overline{ob_1}=l/2$，$\overline{ab}=\overline{a_1b_1}=l/2$。因为 Δobc 和 Δob_1c_1 为直角三角形，所以 $\overline{ob}^2+\overline{bc}^2=\overline{oc}^2$，即 $\left(\frac{\sqrt{3}}{2}l\right)^2+x^2=\left(\frac{3l-l-2x}{2}\right)^2$，可得 $x=l/8$，此粘合剂 $\overline{ac}$ 和 $\overline{a_1c_1}$ 最长应为 0.625l。

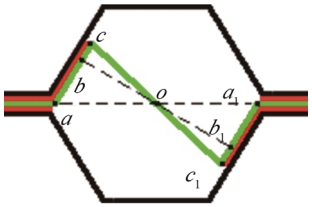


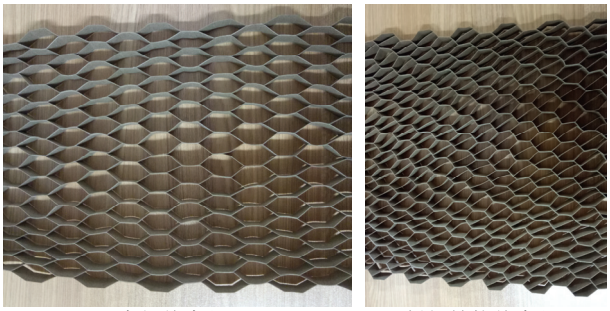
图 2　蜂窝芯层胞元

Fig.2 Unit of honeycomb core

2　蜂窝纸板性能对比试验

2.1　材料与方法

这里仅对结构的承载性能进行对比，因此未特别限定芯纸类型，文中试验选用 149 g/m^2 瓦楞原纸手工制作常规蜂窝纸芯和创新结构蜂窝纸芯，蜂窝边长均为 14 mm，蜂窝芯纸高度为 21 mm，拉伸定型后上下粘贴定量为 201 g/m^2 的瓦楞原纸面纸，则蜂窝纸板可表示为 201-149-14-21。粘贴面层前的蜂窝芯层状态见图 3。



a 常规蜂窝纸芯　　b 创新结构蜂窝纸芯

图 3　粘贴面层前的蜂窝芯层状态

Fig.3 The condition of the honeycomb core layer before bonding the surface layer

按照 GB/T 4857.2—2005，将试样均匀间隔放入恒温恒湿箱（温度为 23 ℃，相对湿度为 50%），温湿度调节处理的时间从达到规定条件 1 h 后算起，处理至少 48 h。参照 GB/T 1453—2005，分别将常规结构和创新结构裁切为 100 mm×100 mm 的蜂窝纸板试样，应用万能材料试验仪，在 10 min 内完成试验，静态压缩速率为 12 mm/min，重复 5 次试验，求取平均值，所得面外承载应力-应变曲线见图 4。

2.2　面外承载性能对比分析

蜂窝纸板常规结构与创新结构面外承载性能的对比见表 1。由图 4 和表 1 可以看出，创新结构的弹性模量是常规结构的 2.1862 倍，该性能提高了 118.62%；创新结构峰值应力是常规结构的 2.4316 倍，该性能提高了 143.16%；平台应力是常规结构的 4.1574 倍，该性能提高了 315.74%。在增加 1 倍芯层

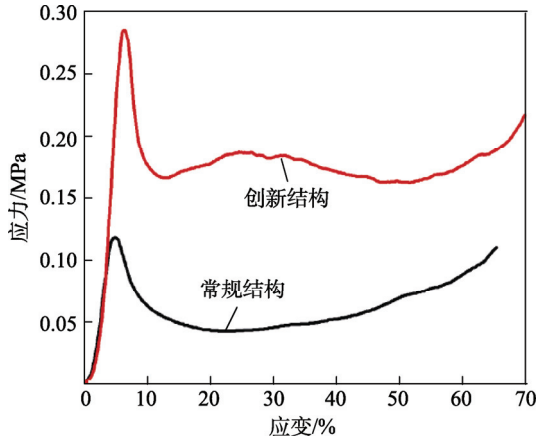


图 4　常规和创新结构面外承载应力-应变曲线

Fig.4 Out-plane bearing stress-strain curve of normal and innovative structures

用纸的情况下，创新结构承载性能增强至常规结构的 2 倍以上，由此可见创新的肋板结构比常规六边形蜂窝结构更科学、稳定，因此通过增大胞元边长，可降低芯层拉伸成型难度，同样能够达到小孔径常规蜂窝纸板的面外承载强度。

表 1　蜂窝纸板常规结构与创新结构面外承载性能的对比

Tab.1 Comparison of out-plane bearing capacity between conventional and innovative honeycomb paperboards

kPa

性能参数	弹性模量	屈服强度	平台应力
常规结构	39.2	116.3	41.3
创新结构	85.7	282.8	171.7

3　粘合工艺及粘合尺寸设计

根据现有蜂窝芯层的成型工艺[10—15]，对于纸质、薄金属材料等蜂窝芯层，该创新结构可通过全自动或缠绕式等粘合工艺实现。对于弯折、拉伸困难的芯层材料，可在模压工艺方法基础上增加一套新增芯层模压模具。与原常规蜂窝芯层粘合工艺相比，工艺改动小，因此该结构具有设计方便、结构合理、强度高、选材容易、工艺简单、成本低廉等诸多优势。

3.1　缠绕式

该工艺与现有常规蜂窝芯层粘合工艺相比，仅增加 1 个输送辊，同时创新上胶辊上胶方式，见图 5a。缠绕式芯层粘合工艺的具体制造步骤：将 2 组原蜂窝芯层的卷筒原材料和新增蜂窝芯层的卷筒原材料分别间隔固定在 4 个支架上，相邻原蜂窝芯层和新增蜂窝芯层为 1 组，共 2 组，每组中，新增蜂窝芯层在原蜂窝芯层的前段通过印胶辊对新增蜂窝芯层的卷筒原材料进行印胶，再分别与卷原蜂窝芯层的卷筒原材料通过八方滚筒粘合缠绕复合制得芯层。

具体印胶尺寸见图 5b，通过印胶辊对新增蜂窝芯层进行印胶，形成胶层，设定蜂窝胞元边长为 l，下印胶辊辊轮宽度和上印胶辊辊轮宽度均为 $13l/8$，下印胶辊相邻辊轮间隙宽度和上印胶辊相邻辊轮间隙宽度均为 $19l/8$，上印胶辊辊轮相对下印胶辊辊轮错位宽度为 $5l/8$。2 组新增蜂窝芯层和原蜂窝芯层经印胶粘合后的结构见图 6，形成 1 个单元，每个重复单元中，原蜂窝芯层和新增蜂窝芯层交错摆放，共 2 组，2 层原蜂窝芯层和 2 层新增蜂窝芯层。对每层新增蜂窝芯层正反面进行错位印胶，下层新增蜂窝芯层相对上层新增蜂窝芯层的涂胶位置等间隔错位。以 2 组原蜂窝芯层和新增蜂窝芯层为单元依次粘合，八方滚筒旋转 360°后与下一单元进行粘合，如此反复，最终形成特定厚度的蜂窝芯层。

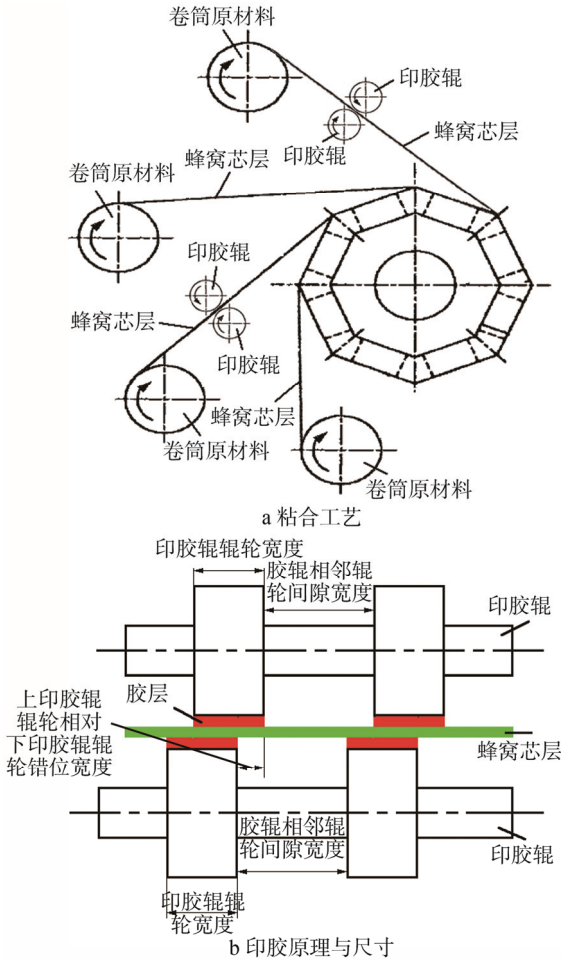


图 5　缠绕式蜂窝芯层粘合工艺

Fig.5 Winding bonding process of honeycomb core

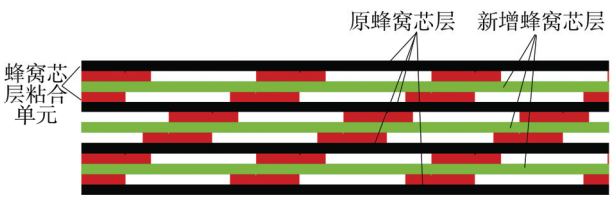


图 6　增强型芯层平板粘合结构

Fig.6 Bonding structure of reinforced core in flat state

3.2　全自动

全自动蜂窝芯层粘合工艺见图 7，将原蜂窝芯层和新增蜂窝芯层交错摆放，共 2 组，即 2 层原蜂窝芯层和 2 层新增蜂窝芯层；以 2 组原蜂窝芯层和新增蜂窝芯层为单元，第 1 层原蜂窝芯层不印胶，后 3 层蜂窝芯层分别进行错位印胶后与上段蜂窝芯层粘合；对最后 1 层错位印胶后，通过裁刀按照蜂窝芯层高度进行裁切，以 4 层为单元依次与上一单元进行粘合，最终形成连续蜂窝芯层。将 2 组原蜂窝芯层的卷筒原材料和新增蜂窝芯层的卷筒原材料分别间隔固定在 4 个支架上，原蜂窝芯层卷筒原材料不印胶，新增蜂窝芯层卷筒原材料和原蜂窝芯层卷筒原材料分别单面印胶，印胶后分别与上一段的蜂窝芯层进行粘合，蜂窝芯层粘合后在新增蜂窝芯层卷筒原材料背面通过印胶辊再印胶，形成 1 个完整的单元，通过后段生产线裁刀裁切后与前面的裁切单元进行粘合。如此反复，形成连续的蜂窝芯层，芯纸平板粘合后结构及对应的胶辊见图 7b。

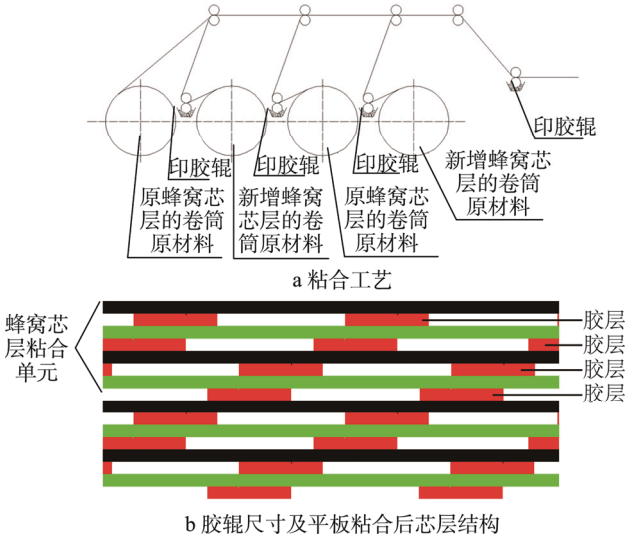


图 7　全自动蜂窝芯层粘合工艺

Fig.7 Fully automatic honeycomb core bonding process

4　结语

在保证平板粘合状态下，通过粘合尺寸决定新增芯层在六边形蜂窝胞元中的形状，当胞元内粘合尺寸为胞元边长的 0.625 倍时，新增芯层在胞元内形成平分胞元的直线肋板结构，分布均匀，可改变胞元内粘合尺寸，使其结构多样化。创新结构弹性模量、面外屈服强度及平台应力较常规结构均得到了明显提高，提高率均超过 1 倍，尤其创新结构平台应力性能提高率达到 315.74%。由此可见，创新的肋板结构与原六边形蜂窝结构同样的科学和稳定，因此通过增大胞元边长，降低拉伸难度，同样能够达到小孔径常规蜂窝纸板的面外承载强度。在现有蜂窝芯层加工工艺的基础上，结合半自动缠绕式及全自动层叠式不同粘合工艺，对该蜂窝芯层的成型工艺及参数进行了分析研究，设计确定了印胶工艺及印胶辊结构尺寸参数，对于其他弯折、拉伸困难的芯层材料也可考虑利用模压等方式进行生产。

参考文献：

[1] 叶婷，王莉. 蜂窝纸板生产设备与加工工艺[J]. 轻工机械, 2008, 26(5): 78—81.
YE Ting, WANG Li. Production Equipment and Processing Technology of Honeycomb Paperboard[J]. Light Industry Machinery, 2008, 26(5): 78—81.

[2] LU L X, SUN Y P, WANG Z W. Critical Buckling Load of Paper Honeycomb under Out-of-plane Pressure[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(3): 141.

[3] 王冬梅，王志伟. 纸蜂窝压缩密实化应变评估[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 285—289.
WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Evaluation of Compressive Densification Strain of Paper Honeycombs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 285—289.

[4] WANG Zhi-wei, E Yu-ping. Mathematical Modeling of Energy Absorption Property for Paper Honeycomb in Various Ambient Humidities[J]. Materials & Design, 2010, 31(9): 4321—4328.

[5] 王军，卢立新. 基于相对湿度影响的蜂窝纸板平台应力表征[J]. 中国造纸学报, 2011, 26(3): 35—38.
WANG Jun, LU Li-xin. Characterization of Honeycomb Cardboard Plateau Stress Based on the Influence of Relative Humidity[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2011, 26(3): 35—38.

[6] 韩炬，裴未迟，崔晓波. 双芯纸搭配型蜂窝纸板的平压性能及加工工艺研究[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 63—64.
HAN Ju, PEI Wei-chi, CUI Xiao-bo. Research on Flat Crush Resistance and Processing Technology of Dual-core Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 63—64.

[7] 韩炬，王宝中，崔晓波，等. 一种高强度蜂窝纸板及其制造方法：中国, 102085738A[P]. 2011-06-08.
HAN Ju, WANG Bao-zhong, CUI Xiao-bo, et al. A High Strength Honeycomb Paperboard and Manufacturing Method: China, 102085738A[P]. 2011-06-08.

[8] 陈爱民. 蜂窝纸填料组装家具板及其生产方法：中国, 10208505A[P]. 2011-06-08.
CHEN Ai-min. Furniture Board Assembled by Honeycomb Paper and Filler and Its Production Method: China, 10208505A[P]. 2011-06-08.

[9] 谢勇. 一种基于菱形蜂窝构型的夹层板及其基本性能[J]. 湖南工业大学学报, 2008, 22(6): 1—5.
XIE Yong. A Composite Sandwich Plate Based on

Rhombic Honeycomb Configuration and Its Basic Performance[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2008, 22(6): 1—5.

[10] 王冬梅. 纸蜂窝芯结构的比较[J]. 包装世界, 2006 (4): 38—40.
WANG Dong-mei. Comparison of Paper Honeycomb Core Structure[J]. Packaging World, 2006(4): 38—40.

[11] 郝喜海, 胡协方, 林益平. 蜂窝纸板成型机理及工艺的研究与探讨[J]. 包装工程, 2003, 24(3): 13—15.
HAO Xi-hai, HU Xie-fang, LIN Yi-ping. The Study of the Molding Mechanism and Process of Honeycomb Fiberboard[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(3): 13—15.

[12] 马苏常, 檀润华. 基于 TRIZ 的模压蜂窝纸板模具创新设计[J]. 天津工业大学学报, 2009, 29(2): 85—88.
MA Su-chang, TAN Run-hua. Innovation Design of Honeycomb Paperboard Mold Based on TRIZ[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2009, 29(2): 85—88.

[13] 马苏常, 檀润华. 基于 TRIZ 的粘贴式蜂窝纸板生产工艺创新设计[J]. 煤矿机械, 2010, 31(4): 117—120.
MA Su-chang, TAN Run-hua. Innovation Design of Pasted Honeycomb Paperboard Production Process Based on TRIZ[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(4): 117—120.

[14] 叶婷, 王莉. 蜂窝纸板生产设备与加工工艺[J]. 轻工机械, 2008, 26(5): 78—81.
YE Ting, WANG Li. Production Equipment and Processing Technology of Honeycomb Paperboard[J]. Light Industry Machinery, 2008, 26(5): 78—81.

[15] 翟震, 杨鹏, 曹慧. 蜂窝纸芯成型工艺的改进研究[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 49—52.
ZHAI Zhen, YANG Peng, CAO Hui. Research on Molding Process Improvement of Honeycomb Paper Core[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 49—52.

《纳米材料》特色栏目征稿函

纳米技术作为一种最具有市场应用潜力的新兴科学技术，其潜在的重要性毋庸置疑，纳米技术正成为各国科技界所关注的焦点。在国内，许多科研院所、高等院校也组织科研力量，开展纳米技术的研究工作，并取得了一定的研究成果，纳米技术基础理论研究和新材料开发等应用研究都得到了快速的发展，并且在各领域均得到了广泛的应用。在包装领域，纳米材料也得到了诸多应用。

鉴于此，本刊拟围绕“纳米材料”这一主线，作系列的专项报道。本刊编辑部特邀请纳米材料领域的专家为本栏目撰写稿件，以期进一步提升本刊的学术质量和影响力。稿件以研究论文为主，也可为综述性研究，请通过网站投稿，编辑部将快速处理并优先发表。

编辑部电话：023-68792294　　网址：www.packjour.com

《包装工程》编辑部