

# 热塑性蜂窝板的平压性能分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.02.011

李 杨 贵小军  
袁建东 沈达泉  
徐伟伟 郭红亮

江苏正威新材料股份  
有限公司  
江苏 如皋 226500

**摘 要:** 为了解热塑性蜂窝板的平压性能, 先分析热塑性蜂窝板的平压变形机理, 得到平压强度公式, 进而分析结构参数和环境温度对蜂窝板平压强度的影响。蜂窝板平压试验结果与理论分析一致。随着蜂窝芯孔径比、边长、高度的增加, 平压强度减小; 随着壁板厚度增加, 平压强度增加。

**关键词:** 蜂窝板; 平压强度; 孔径比; 边长; 壁板厚度

**中图分类号:** TB487; TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2022)02-0093-05

**引文格式:** 李 杨, 贵小军, 袁建东, 等. 热塑性蜂窝板的平压性能分析 [J]. 包装学报, 2022, 14(2): 93-97.

## 0 引言

六角型蜂窝结构在承受各方向外力时比圆形或四边形的结构更坚固、合理。受此启发, 各种材料制成的蜂窝板材应运而生。热塑性蜂窝板是由上下面层与中间芯层复合的3层夹芯结构<sup>[1]</sup>, 面层材料为长玻璃纤维、玻璃纤维毡、连续纤维增强热塑性片材或聚丙烯 (polypropylene, PP)、聚酰胺 (polyamide, PA) 等树脂, 芯层材料为 PP、聚碳酸酯 (polycarbonate, PC)、玻璃纤维增强塑料等。热塑性蜂窝板具有密度低、比强度和比模量高、抗冲击和抗疲劳好、耐腐蚀、易成型等优点, 可以满足各种实际应用对材料性能的要求, 在交通运输、新能源、建筑、航空航天等领域得到广泛应用。

平压强度是蜂窝板承载能力的重要度量, 也是蜂窝板质量评定的重要指标。目前对于热塑性蜂窝板的平压性能尚无完整、统一的评价标准。故本文拟以 200 g/m<sup>2</sup> 的连续玻璃纤维毡 (以下简称连续毡) 增强 PP 材料为面层、PP 材料为芯层的热塑性蜂窝板为样品, 分析蜂窝板平压变形原理, 以及蜂窝芯结构参数和环境温度对平压性能的影响。

## 1 试验

### 1.1 材料与设备

热塑性蜂窝板面层为 200 g/m<sup>2</sup> 的连续毡增强 PP 材料, 厚度为 (0.30 ± 0.05) mm。六角型蜂窝芯为 PP 材料, 结构尺寸按试验选定。上下面层与蜂窝芯经特氟龙带连续压机进行热复合制备蜂窝板材, 样品尺寸为 200 mm × 200 mm。

特氟龙带连续压机, GP1700 型, 国塑机械(上海)有限公司; 电子式万能试验机, WDW-300 型, 长春科新试验仪器有限公司。

### 1.2 方法

蜂窝板平压性能试验参照 GB 1453—2005《夹层结构或芯子平压性能试验方法》。采用电子式万能试验机对热塑性蜂窝板进行正向静压试验, 初始压力为 (500 ± 10) N, 持续加压速度为 2 mm/min。

## 2 蜂窝板平压变形机理

分析蜂窝板平压变形机理是为了明确其从平衡状态过渡到不平衡状态时的临界载荷和失稳后的形

收稿日期: 2021-08-12

作者简介: 李 杨 (1971-), 男, 山东邹平人, 江苏正威新材料股份有限公司工程师, 硕士, 主要研究方向为玻纤增强复合材料及深加工装备, E-mail: thefutu@163.com

态。平压过程中，热塑性蜂窝板分为4个阶段（见图1）<sup>[2]</sup>：

1) 线弹性变形阶段，蜂窝板的应力与应变呈线性变化，直线的斜率是蜂窝芯材料的杨氏弹性模量。受到压力时，蜂窝壁板会将轴向变形传递给相邻的蜂窝芯，而蜂窝壁板的互相连接增加了蜂窝板的稳定性。因此，平压初期，蜂窝结构变得密实，变形主要为蜂窝芯壁板的弹性变形。随着压力的增加，蜂窝板由线弹性变形转变为非线性变形的弹性屈服，直至达到蜂窝板的临界屈服载荷，蜂窝芯变形进入弹塑性变形阶段。

2) 弹塑性变形阶段，蜂窝板的应力随应变的增加而减少。这主要是由于蜂窝的变形由局部坍塌转化为塑性屈服，塑性屈服最初发生在单层壁板，而后发生在双层壁板，继而引起蜂窝板的整体坍塌。

3) 塑性坍塌阶段，变形持续增加，应力变化不大，曲线近似一段直线。此区段持续时间越长，表明蜂窝板的缓冲性能越好。此区段以蜂窝板的塑性坍塌为主的持续压溃，压溃载荷随应变的增加上下波动，直至完全坍塌。

4) 密实化阶段，随着压力增加，蜂窝壁板间互相挤压，蜂窝板被压实，其压缩应力随应变的增加迅速增大。

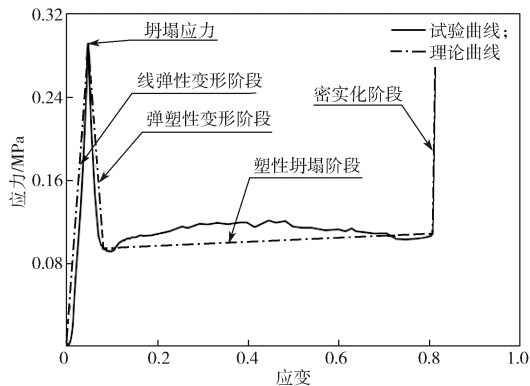


图1 蜂窝板应力-应变关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stress-strain relationship of honeycomb panel

从图1可以看出，蜂窝板的缓冲性能主要体现在弹塑性变形阶段和塑性坍塌阶段，即蜂窝板的结构压缩阶段。蜂窝板的平压强度一般略低于蜂窝芯的平压强度，因为蜂窝芯具有初始挠度。蜂窝芯发生大挠度屈曲变形时，其弹塑性变形和坍塌会加剧。

### 3 蜂窝芯结构参数和环境温度对平压性能的影响

#### 3.1 蜂窝芯结构参数与平压强度的理论分析

正六边形蜂窝芯的结构参数有孔径比、蜂窝芯边长、壁板厚度、蜂窝高度等。优化上述参数是提高蜂窝板的抗振能力、减少其结构质量的关键。如图2所示，设正六边形蜂窝芯的边长为 $l$ ，壁板厚度为 $t$ ，蜂窝芯的内切圆直径 $d_0 = \sqrt{3}l$ ，孔径比 $i = d_1/d_0$ （ $d_1$ 为沿拉伸方向的蜂窝孔间距）<sup>[3]</sup>。在不同拉伸条件下，单个蜂窝芯的面积 $S_1$ 为

$$S_1 = \sqrt{3}l^2 \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{3}{4}i^2} \right). \quad (1)$$

若蜂窝板的面积为 $S$ ，则其能容纳的蜂窝芯数量 $n^{[4]}$ 为

$$n = \frac{S}{\sqrt{3}l^2 \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{3}{4}i^2} \right)}. \quad (2)$$

蜂窝壁板的总长度 $L^{[5]}$ 为

$$L = \frac{4S}{\sqrt{3}li \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{3}{4}i^2} \right)}. \quad (3)$$

在线弹性变形阶段，蜂窝板的平压应力 $\sigma$ 为

$$\sigma = \frac{F}{Lt} \leq [\sigma], \quad (4)$$

式中： $F$ 为压力； $[\sigma]$ 为蜂窝板的许用平压应力（屈服强度）。

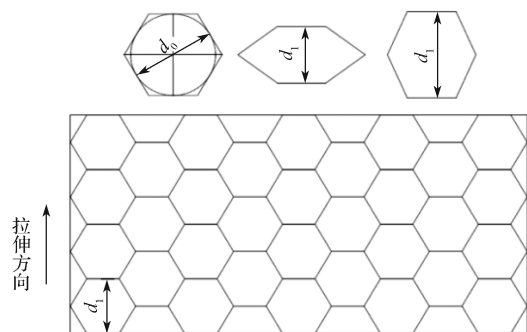


图2 正六边形蜂窝芯结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of hexagonal honeycomb core

蜂窝板的压溃总是发生在靠近面层的位置，一般约为靠近面层的1/5~2/5处。压溃点一般出现在压缩变形约1 mm左右的位置<sup>[6]</sup>。

### 3.2 孔径比对平压强度的影响

孔径比可用于表示蜂窝芯的结构形状。当蜂窝芯的边长为 5 mm, 壁板厚度为 0.3 mm, 蜂窝高度为 20 mm, 孔径比分别为 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 时, 测试蜂窝板的平压强度。蜂窝板的平压强度与孔径比关系曲线如图 3 所示。

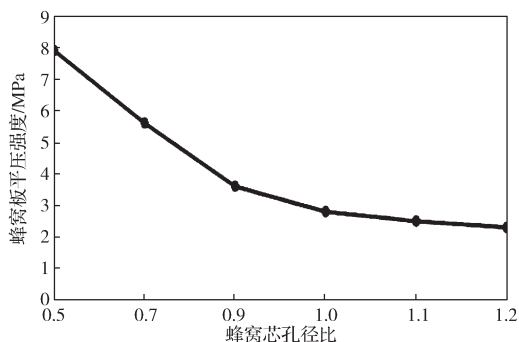


图 3 蜂窝板平压强度与蜂窝芯孔径比的关系曲线

Fig. 3 Diagram of relationship between flat compression strength and honeycomb core aperture ratio

由图 3 可知, 随着蜂窝芯孔径比的增加, 蜂窝板的平压强度降低。其原因是孔径比越大, 单位面积承载的蜂窝芯数量减少。

### 3.3 蜂窝芯边长对平压强度的影响

当孔径比为 1, 壁板厚度为 0.3 mm, 蜂窝高度为 20 mm, 蜂窝芯边长分别为 3, 5, 7, 9, 11 mm 时, 测试蜂窝板的平压强度。蜂窝板平压强度与蜂窝芯边长的关系曲线如图 4 所示。

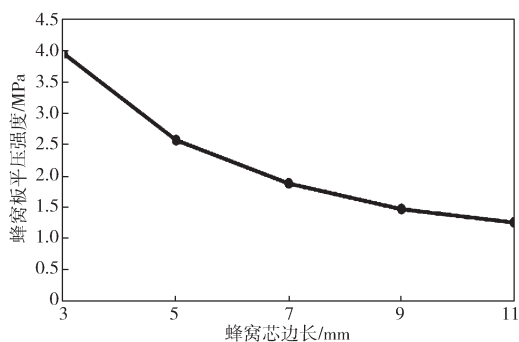


图 4 蜂窝板平压强度与蜂窝芯边长的关系曲线

Fig. 4 Diagram of relationship between flat compression strength and honeycomb core side length

由图 4 可知, 随着蜂窝芯边长的增加, 蜂窝板的平压强度先迅速下降而后逐渐趋于平缓。其原因是边长的增加使单个蜂窝结构的面积增大, 单位面积承载的蜂窝芯数量减少; 同时蜂窝壁板借助相邻蜂窝作用增强自身抵抗侧向位移的能力削弱, 导致蜂窝整体的

抗压能力降低, 蜂窝结构容易失稳<sup>[7]</sup>。

### 3.4 蜂窝壁板厚度对平压强度的影响

当孔径比为 1, 蜂窝芯边长为 5 mm, 蜂窝高度为 20 mm, 壁板厚度分别为 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 mm 时, 测试蜂窝板的平压强度。蜂窝板平压强度与壁板厚度的关系如图 5 所示。

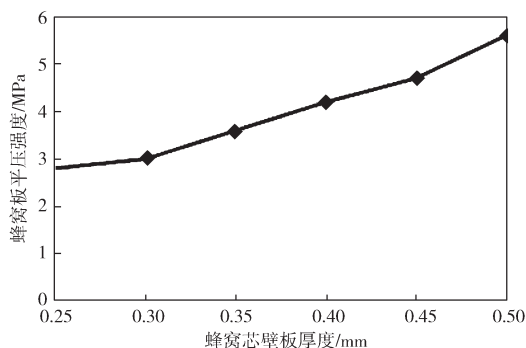


图 5 蜂窝板平压强度与壁板厚度的关系曲线

Fig. 5 Diagram of relationship between flat compressive strength and honeycomb core panel thickness

由图 5 可知, 随着蜂窝壁板厚度的增加, 蜂窝板平压强度增加。这是由于蜂窝壁板厚度的增加, 使蜂窝芯支撑面板的表面积增大, 蜂窝壁板的承压能力以及周围壁板对其支撑能力增强, 蜂窝板的稳定性更好<sup>[8-9]</sup>。

### 3.5 蜂窝板高度对平压强度的影响

当孔径比为 1, 蜂窝芯边长为 5 mm, 壁板厚度为 0.3 mm, 蜂窝板高度分别为 8, 12, 15, 20, 25, 30 mm 时, 测试蜂窝板的平压强度。蜂窝板平压强度与蜂窝芯高度的关系如图 6 所示。

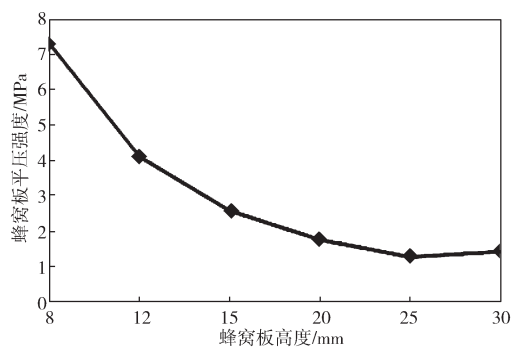


图 6 蜂窝板平压强度与蜂窝芯高度的关系曲线

Fig. 6 Diagram of relationship between flat compressive strength and honeycomb core height

由图 6 可知, 随着蜂窝板高度的增加, 蜂窝板的平压强度呈先骤减后缓增的趋势。当蜂窝板高度较小 ( $\leq 15$  mm) 时, 蜂窝芯会出现皱褶压溃; 随着

蜂窝板高度的增加, 蜂窝一侧对另一侧产生的力矩增大, 微小的扰动(侧向载荷)就可能产生很大的侧向转矩, 造成蜂窝结构失稳和剪切力增大; 同时侧向位移也会导致蜂窝与面层撕裂, 加剧蜂窝板屈曲、压溃。

### 3.6 环境温度对蜂窝板平压性能的影响

本热塑性蜂窝板的蜂窝芯为 PP 材料。PP 材料是热敏感材料, 因而本研究探讨了环境温度对热塑性蜂窝板平压性能的影响, 结果如图 7 所示。

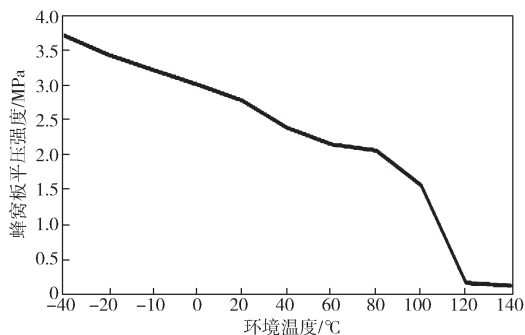


图 7 蜂窝板平压强度与环境温度的关系曲线

Fig. 7 Diagram of relationship between flat compressive strength and honeycomb core height

由图 7 可知, 随着环境温度的升高, 蜂窝板的平压强度逐渐降低。当环境温度低于玻璃化温度 (PP 材料的玻璃化温度  $T_g$  为  $-10 \sim -18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 时, PP 材料的分子链和链段不能运动, 其视为刚性固体。因而当平压载荷均匀施加在蜂窝板上时, 蜂窝芯犹如许多小的工字梁, 分散承担平压力, 随着载荷增加达到峰值后, 蜂窝芯发生塑性变形。当环境温度高于软化点温度 ( $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右) 时, PP 材料为高弹态, 蜂窝板基本失去平压承受能力。而当环境温度高于玻璃化温度、低于软化点温度时, PP 材料处于玻璃化转变区, 高于  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 蜂窝板平压强度下降明显<sup>[10]</sup>。可见, 热塑性蜂窝板使用温度不能超过  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 4 结语

热塑性蜂窝板的平压强度是蜂窝板质量评定的重要指标。由于蜂窝结构的独特性, 热塑性蜂窝板具有良好的抗压能力, 其受压过程大致分为 4 个阶段, 当平压强度超过屈曲强度后, 蜂窝板被压溃, 进入坍塌阶段, 此时的蜂窝板仍具有良好的缓冲性能。热塑性蜂窝板的平压变形机理非常复杂, 其平压性能不仅与蜂窝板的结构参数有关, 还与蜂窝板的成型质量、使用环境等有关。因此, 本研究从蜂窝芯的结构参数

导出蜂窝板的平压强度公式, 由公式可得出: 蜂窝芯的孔径比、边长、壁厚、高度等均对蜂窝板的平压强度有影响。对热塑蜂窝板进行平压试验, 试验数据与理论分析相吻合。本研究可为蜂窝板的结构设计提供了一定理论依据和技术支持。

### 参考文献:

- [1] JOHNSON W S, MASTERS J E, WILSON D W, et al. Compression Strength of Composite Sandwich Structures After Barely Visible Impact Damage[J]. Journal of Composites Technology and Research, 1996, 18(4): 274.
- [2] 王冬梅. 蜂窝纸板压缩破坏机理研究 [J]. 包装工程, 2006, 27(1): 37-39.  
WANG Dongmei. Compression Breakage Properties Research on the Honeycomb Fibreboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 37-39.
- [3] 唐 勇, 黄利强. 蜂窝结构对蜂窝纸板平压性能影响的研究 [J]. 包装工程, 2012, 33(5): 56-58, 101.  
TANG Yong, HUANG Liqiang. Influence of Honeycomb Structure on Flatwise Compressive Performance[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 56-58, 101.
- [4] 李厚民, 熊健民, 朱若燕, 等. 蜂窝纸板力学性能的试验研究 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(增 2): 147-149.  
LI Houmin, XIONG Jianmin, ZHU Ruoyan, et al. Experimental Research on Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(S2): 147-149.
- [5] 孙亚平, 卢立新, 蔡和平. 纸蜂窝结构平压性能的实验研究 [J]. 包装工程, 2003, 24(1): 14-15, 34.  
SUN Yaping, LU Lixin, CAI Heping. A Study to the Strength to the Paper Honeycomb Core Under Axial Compression[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(1): 14-15, 34.
- [6] 刘跃军, 江太君, 曾广胜, 等. 不同蜂窝结构对蜂窝纸板力学性能的影响 [J]. 包装学报, 2010, 2(1): 21-23.  
LIU Yuejun, JIANG Taijun, ZENG Guangsheng, et al. Effect of the Honeycomb Structure on the Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2010, 2(1): 21-23.
- [7] 冯仁杰, 于九明. 蜂窝夹芯复合板及其在汽车工业中的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2003(8): 30-32.  
FENG Renjie, YU Jiuming. Honeycomb Filled Board and Its Application in Automotive Industry[J]. Automobile



- Technology & Material, 2003(8): 30-32.
- [8] 王兴业, 杨孚标, 曾竟成, 等. 夹层结构复合材料设计原理及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 102-117.  
WANG Xingye, YANG Hubiao, ZENG Jingcheng. Design Principle and Application of Sandwich Structure Composite Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 102-117.
- [9] 孙银宝, 李宏福, 张博明. 连续纤维增强热塑性复合材料研发与应用进展 [J]. 航空科学技术, 2016, 27(5): 1-7.  
SUN Yinbao, LI Hongfu, ZHANG Boming. Progress in Research and Application of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(5): 1-7.
- [10] 丁先锋, 杨桂生. 热塑性 PP 蜂窝夹层结构复合材料制备和性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(4): 118-122.  
DING Xianfeng, YANG Guisheng. Preparation and Properties of Thermoplastic PP Honeycomb Sandwich Structure Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4): 118-122.
- (责任编辑: 邓 彬)

## Analysis of Flat Compression Performance of Thermoplastic Honeycomb Panel

LI Yang, BEN Xiaojun, YUAN Jiandong, SHEN Daquan, XU Weiwei, GUO Hongliang

( Jiangsu Amer New Materials Co., Ltd., Rugao Jiangsu 226500, China )

**Abstract:** In order to understand the flat compressive properties of the thermoplastic honeycomb panel, the flat compressive strength formula was obtained by analyzing the flat compressive deformation mechanism of the thermoplastic honeycomb panel, and then the influences of structural parameters and ambient temperature on the flat compressive strength of the honeycomb panel were analyzed. The experimental results are in agreement with the theoretical analysis. With the increases in cellular core aperture ratio, side length and height, the flat compression strength decreases. The flat compressive strength increases with the increase of honeycomb core panel thickness.

**Keywords:** honeycomb panel; flat compression strength; aperture ratio; side length; panel thickness

# 稿 约

《包装学报》(ISSN 1674-7100, CN 43-1499/TB)是由湖南工业大学主办、国内外公开发行人、具有国际视野的包装行业学术型期刊(双月刊)。本刊立足学术研究,及时和刊发包装科技领域的新技术、新成果,促进包装科技进步与交流,繁荣包装文化,搭建包装产学研结合的桥梁,推动我国包装产业可持续发展和包装工业科技进步。

《包装学报》将坚持质量第一的办刊原则,热忱欢迎行业专家、学者将内容新颖、有独立见解的高质量原创性论文投往本刊。本刊特色栏目有:绿色包装与包装安全,常设栏目有:新材料·新技术·新工艺、包装印刷与印后加工、包装结构与货架寿命、运输包装与物流、包装设备与自动化。

## 投稿须知

### 1 论文题名、作者姓名、作者单位名、摘要、关键词

文稿须包括中英文题名、作者姓名、单位名、单位所在城市名及邮政编码、摘要、关键词。中文题名一般不超过20个汉字。英文题名应与中文题名含义一致,开头不用定冠词。论文摘要一般为300字左右,采用第三人称写法,不要使用“本文”“作者”等作为主语,避免出现图表、公式和参考文献序号等。英文摘要应与中文摘要文意一致。中文关键词一般为3~8个,选词要规范,应尽量从汉语主题词表中选取,英文关键词应与中文关键词一一对应,不能采用英文缩写。

### 2 正文

正文篇幅一般为5 000~8 000字,包括简短引言、论述分析、结果和结论等内容。文中出现的外文缩写除公知公用的外,首次出现时一律应标有英文全称。

文中图/表应有自明性,且随文出现。图/表要有中英文的图/表序和名,图中文字、符号、坐标中的标值和标值线必须清晰,出现的数值都应标有明确的量与单位(无量纲除外)。文中有关的量与单位必须符合国家和国际标准。正文章节编号采用三级标题顶格排序,论文层次序号形如1,1.1,1.1.1排序,引言不排序。

### 3 参考文献

参考文献应为在文中确切引用的专著、期刊文章、论文集文章、学位论文、报告、报纸文章、国家(国际)标准、专利、电子文献等,按文中引用的先后顺序编号,且应在文中相应的地方标示。每篇论文的参考文献不应少于15条,并要求中文文献有相应的英译,所引用的期刊文献一般应为近5年所发表的。

文献中,作者不超过3位时,全部列出;超过3位时,只列前3位,中文后加“等”,英文后加“et al”。作者姓名不论是外文还是汉语拼音一律姓在前、名在后(外文姓不可缩写且均应大写,名可缩写并省略缩写点“.”)。

### 4 作者简介、基金项目

作者简介包括姓名、出生年份、性别、籍贯、职称、最后学位(或在读学历)及主要研究方向。如果论文涉及的是有关基金项目的研究内容,须注明基金或资助机构的名称、项目编号,交稿时需附交项目批准文件复印件或电子文档。

作者投稿时请注明联系电话和电子邮箱。本刊对来稿有修改权。论文出版后将向国内外文献检索机构报送上网,届时将不再通知作者。

来稿文责自负,要遵守职业道德,如摘引他人作品,务请在参考文献中予以著录。署名的作者应为参与创作、对内容负责的人。所有署名作者都应对该文的署名和顺序签名认可,署名不可随意变更。

联系地址:湖南省株洲市天元区泰山路湖南工业大学期刊社

邮政编码:412007 电 话:0731-22183037

电子邮箱:baozhuangxuebao@163.com

网 址: <http://journals.hut.edu.cn:6688>