复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第31卷 第2期 4月 2014年
Vol. 31 No. 2 April 2014

文章编号：1000-3851(2014)02-0512-06

工艺参数对淀粉/EVA生物质材料挤出发泡的影响及BP神经网络的预测

曾广胜*，孙 刚
（湖南工业大学 包装与材料工程学院，株洲 412007）

摘 要： 以淀粉和乙烯醋酸乙烯酯(EVA)为原料制备淀粉/EVA生物质发泡材料，研究了螺杆转速、模头温度和含水率对挤出发泡的影响，并应用人工神经网络技术建立双层BP网络模型，将其正交实验结果作为样本进行训练，对生物质发泡材料的膨胀率进行预测。结果表明，该BP神经网络模型能准确地预测出淀粉/EVA发泡材料的膨胀率，样品的膨胀率随着螺杆转速的增加而逐渐增大，在螺杆转速为320 r/min时达到最大值；样品的膨胀率亦随着模头温度的升高而逐渐增大，在140 ℃时达到最大值；含水量对淀粉/EVA发泡材料的膨胀率影响显著。

关键词： 发泡；BP神经网络；螺杆转速；模头温度；膨胀率

中图分类号： TB330.1；TB24 **文献标志码：** A

Influence of technological parameters on extrusion foaming of starch/EVA biologic materials and BP neural network forecast

ZENG Guangsheng*, SUN Gang
(Packaging and Material Engineering College, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: During the preparation of biologic foam materials using starch and ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) as raw material to prepare the starch/EVA biologic materials, the influences of screw speed, die temperature and moisture content on extrusion foaming have been studied, and the double-layer BP network model based on artificial neural network technique has been built. The orthogonal experiment result has been used as samples to train and forecast the expansibility of biologic foam materials. The results show that this BP network model is effective to forecast expansibility of the starch/EVA biologic materials accurately, and the expansibility gradually increases with the increase of screw speed. When the screw speed is 320 r/min, expansibility reaches its maximum. The expansibility also increases with the rising of die temperature and reaches its maximum at 140 ℃. Moisture content also has significant influence on the expansibility of the starch/EVA foam materials.

Keywords: foaming; BP neural network; screw speed; die temperature; expansibility

近年来，人们越来越重视生物降解材料，淀粉基泡沫塑料作为一种重要的生物降解塑料，相应也倍受关注[1]。以淀粉和乙烯醋酸乙烯酯(EVA)为原料制备的生物质发泡材料是一种新型的复合材料，该材料具有密度小、弹性大、高减震、隔热性能好等优点，尤其受到人们的重视。淀粉/EVA体系的发泡膨胀与淀粉的凝胶化程度有关，而挤出过程中的压力、剪切力、温度决定着淀粉的凝胶化程度，因而，挤出发泡条件对发泡膨胀率影响较大[2]。采用双螺杆挤出机对淀粉/EVA复合材料进行发泡加工时，其加工过程存在加工难度大、不易控制的问题。如果能建立相关的数学模型，将3个相关工艺参数作为输入量，对膨胀率进行准确的预测，则工作量将大大减少，十分有利于发泡淀粉材料的应用与推广。

人工神经网络[3]实际上是由大量简单的神经元互为连接而形成的复杂网络，具有高度非线性，能够进行复杂的逻辑操作并可模拟复杂的非线性系

收到初稿日期： 2013-03-29；**收到修改稿日期：** 2013-09-04；**网络出版时间：** 2013-11-25 12:56
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20131125.1256.010.html
基金项目： 国家自然科学基金(61174100)；湖南省科技计划项目(2010JT4039)；湖南省教育厅产业化培育项目(09CY016)；福建晋江市科技局重点项目(晋财指标{2011}200号)；湖南省自然科学杰出青年基金(13JJ1024)
通讯作者： 曾广胜，博士，副教授，研究方向为高分子材料合成与加工等。 E-mail：guangsheng_zeng@126.com

统。BP 神经网络是指基于误差反向传播算法的多层前向神经网络，该神经网络应用最为广泛。BP 网络模型把一组样本的输入和输出变成一个非线性优化问题，使用最优化最普遍的梯度下降算法，用迭代运算求解权，加入隐节点使得优化问题的可调参数增加，从而可以逼近精确解。在数值预算方面，BP 网络模型不需要预先确定样本数据的数学模型，仅通过学习样本数据即可进行相当精确的预测[4]。目前神经网络在材料性能预测方面也有一些应用，刘守纪等[5]利用人工神经网络预测了高密度聚乙烯的流变性能，Malinov 和 Sha[6]则利用神经网络建立了不同合金工艺性能之间的关系。而当今国内外，神经网络在生物质发泡材料性能预测中的应用还是鲜有听闻，如果应用成功，将会大大提高工作效率，加大生物质发泡材料在各行业中的应用。

笔者长期致力于聚合物成型加工研究，已制备出性能优良的淀粉/EVA 发泡材料，本文主要研究工艺参数(螺杆转速、模头温度和含水率)对淀粉/EVA 发泡材料膨胀率的影响，并结合 BP 神经网络对其膨胀率进行预测，预测结果具有较高的准确性。本研究将神经网络预测模型应用到高分子材料成型加工之中，可提高生产效率，从而制备出性能更为优越的发泡材料，具有国内领先水准。

1 实验部分

1.1 挤出发泡实验

实验原料：普通木薯淀粉，工业级，燕华淀粉有限公司；EVA，工业级，美国杜邦公司；增塑剂甘油，分析纯，湖南汇虹试剂有限公司。

实验步骤：首先，将各原料和水按一定比例混合搅拌，其中木薯淀粉 70 份，EVA 30 份，水 14～20 份，甘油 5 份。然后，将混合料置于高速共混机不加热条件下共混 15 min，取出并将混合料置于密闭容器中静置 24 h，使其均匀混合。最后，加入双螺杆挤出机进行熔融挤出发泡。

实验所使用的挤出机为科倍隆科亚(南京)机械有限公司生产的同向双螺杆配混挤出机，型号为 CTE-35，螺杆直径为 35.5 mm，长径比为 32∶1。本实验挤出机设置的加工参数见表 1。

1.2 样品径向膨胀率测定

淀粉/EVA 复合材料从模头挤出后，在径向和纵向均有膨胀，本研究以径向膨胀程度为泡沫材料的膨胀率：

$$E = R_1/R_2 \tag{1}$$

式中：R_1 为泡沫样品的横截面半径；R_2 为模头横截面半径。尺寸测定方法参照 GB/T 6342－1996 标准[7]。

1.3 正交实验

神经网络对样本的要求比较高，不但要真实可靠而且要合理。一般在建立神经网络时采用正交实验或均匀设计来选择样本。正交实验是一种研究多因素实验的有效方法，正交实验设计把各影响因素均匀地分散到实验各水平中，实验因素的组合具有代表性，因而采用正交实验结果能建立高效和可靠的神经网络[8]。选用 $L_9(3^4)$ 正交表安排本次实验，螺杆转速、模头温度和含水率在其可控范围内通过查阅文献各选取 3 个具有代表性的有效值，建立三水平正交实验，将膨胀率作为研究目标，实验结果见表 2。

使用变量分析(ANOVA)可以计算出各个工艺参数对膨胀率的影响次序[9]。对实验结果进行直观分析，采用式(2)将工艺参数在 3 个水平下的膨胀率进行平均：

$$y = \frac{1}{a}\sum_{i=1}^{a} b_i \tag{2}$$

式中：y 为工艺参数在某水平下的平均值；a 为该水平下发生膨胀的次数；b 为工艺参数在该水平下的膨胀率。

淀粉/EVA 复合材料挤出发泡分析结果如表 3 所示。通过极差的大小可得出各工艺参数对膨胀率的影响次序为：含水率影响较大，模头温度次之，

表 1 淀粉/EVA 复合材料挤出发泡实验加工参数

Table 1 Processing parameters of extrusion foaming experimental of starch/EVA composite

Water mass fraction/%	Barrel temperature of different zones/℃									Screw speed/(r·min^{-1})	Current of main motor	Melt pressure/MPa
	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (Die temperature)			
14－20	85	90	95	100	105	110	115	120	120－160	200－400	≤36	≤16

表 2　淀粉/EVA 复合材料挤出发泡正交实验 $L_9(3^4)$设计及实验结果

Table 2　Design of extrusion foaming $L_9(3^4)$ and experimental results of starch/EVA composite

No. of experiment	Screw speed/(r·min^{-1})	Die temperature/℃	Water content/%	Expansibility/%
1	240	120	20	5.5
2	240	140	17	9.8
3	240	160	14	9.6
4	320	140	17	13.3
5	320	160	20	10.0
6	320	120	14	9.9
7	400	160	20	9.8
8	400	140	14	13.7
9	400	120	17	8.2

表 3　淀粉/EVA 复合材料挤出发泡工艺极差分析表

Table 3　Xbar-r analysis table of starch/EVA composite in extrusion foaming process

Technological parameter	Screw speed/(r·min^{-1})	Die temperature/℃	Water content/%
Mean value 1	1.369	1.421	1.339
Mean value 2	1.395	1.455	1.404
Mean value 3	1.511	1.590	1.512
Range	0.142	0.169	0.181
Sort	3	2	1

螺杆转速较小。总地来说，它们对膨胀率都有一定的影响，且影响程度相差不大。

2　BP 神经网络模型的建立

BP 神经网络是一种多层前馈神经网络，该网络的主要特点是信号前向传递，误差反向传播。在前向传播中，输入信号从输入层经过隐藏层逐层处理，直至输出层。每一层的神经元状态只影响下一层神经元状态。如果输出层得不到期望输出，则转入反向传播，根据预测误差调整网络权值和阀值(偏置)，从而使 BP 神经网络预测输出不断逼近期望输出[10]。对于任何闭区间内的一个连续函数均可以用单隐层的 BP 神经网络逼近，完成相应的映射。因此，本文中采用 3 层的 BP 神经网络。

2.1　网络结构

本文中所建立的带偏差输入项、具有一个隐层和线性输出层的 2 层结构的 BP 神经网络如图 1 所示。螺杆转速、模头温度、含水量作为网络输入量，发泡材料的膨胀率作为输出量。

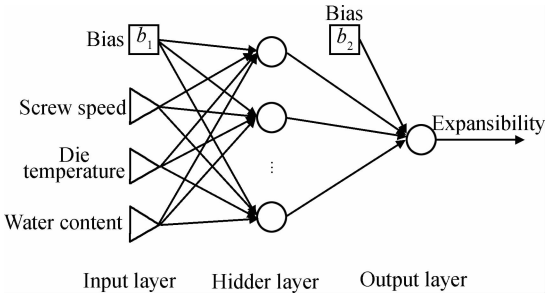

图 1　BP 神经网络结构

Fig. 1　BP neural network structure

在 MATLAB 环境下，w_1、w_2 为连接权系数矩阵，$\boldsymbol{b}_1$、$\boldsymbol{b}_2$ 为偏差矩阵，s_1、s_2 为各层的传递函数，$\boldsymbol{P}$ 为输入矩阵，$\boldsymbol{a}_1$、$\boldsymbol{a}_2$ 分别为隐层和输出层的输出矩阵。隐层传递函数取正切 S 型(tansig)函数，输出层为线性(purelin)函数。则各层输出的计算公式如下：隐层输出 $\boldsymbol{a}_1 = \mathrm{tansig}(w_1\boldsymbol{P}+\boldsymbol{b}_1)$，网络输出 $\boldsymbol{a}_2 = \mathrm{purelin}(w_2\boldsymbol{a}_1+\boldsymbol{b}_2)$[11]。计算模型如图 2 所示。

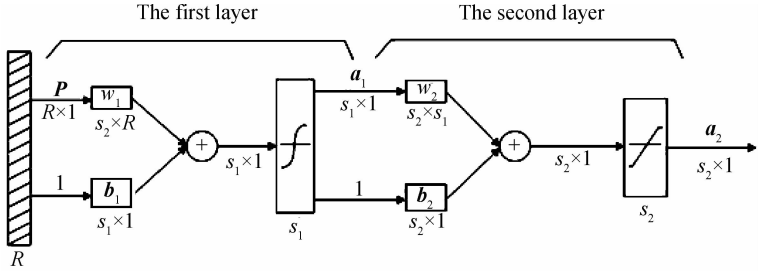

图 2　BP 神经网络计算模型

Fig. 2　BP network computation model

2.2 BP 神经网络的预测能力测试

以表 2 中 9 组正交实验数据为神经网络的训练样本数据，再另外取 9 组数据作为检验样本数据。设定网络的目标误差为 0.001，神经网络经过训练后的误差曲线如图 3 所示。

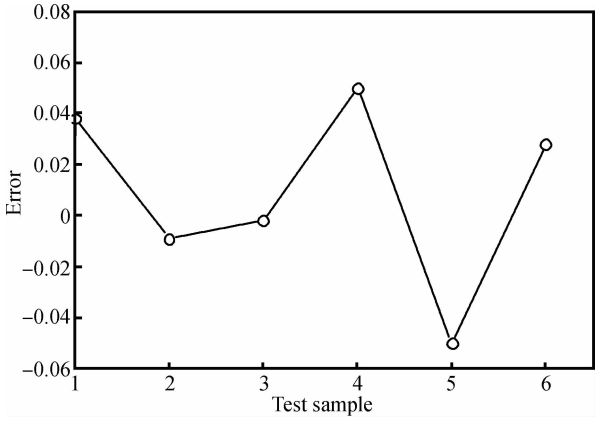

图 3 检验样本误差

Fig. 3 Error of test sample

由于输入输出数据范围分布较大，需要对数据进行归一化处理，这样不仅能避免输入参数不均匀性引起的输出失真和网络麻痹现象，还可以在一定程度上缩短网络的训练时间。归一化公式[12]为

$$\hat{x} = 0.6\,\frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} + 0.2 \tag{3}$$

式中：x_i 和 $\hat{x}$ 分别为归一化前、后的数据；$\min(x_i)$ 和 $\max(x_i)$ 分别为该工艺参数的最小值和最大值。

由图 3 可见，选取的归一化后的 6 组检验样本对网络性能的测试误差在 −0.06～0.08 之间，且大部分在 −0.05～0.05 之间，网络性能不错，能够进行较为准确的预测。

经过多次训练后得到较为准确的预测值。为了表明所建立的神经网络的预测能力，把实验值与预测值进行对比，结果见图 4。可以看出两者比较接近。表明 BP 神经网络具有很好的预测能力，该网络能很好地预测发泡材料的膨胀率。

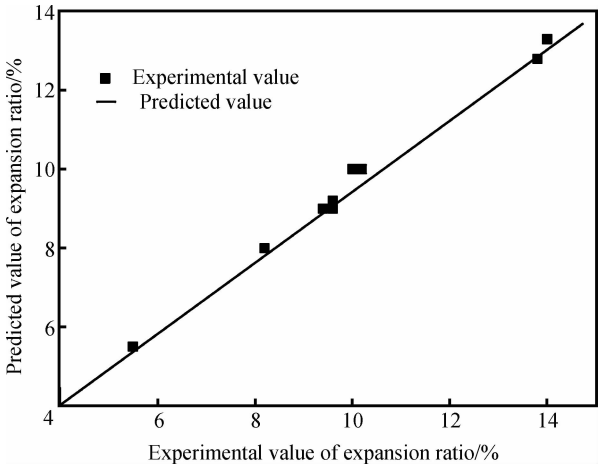

图 4 淀粉/EVA 发泡材料正交实验值与 BP 神经网络预测值对比

Fig. 4 Starch/EVA foam materials experimental values vs BP neural network predicted values

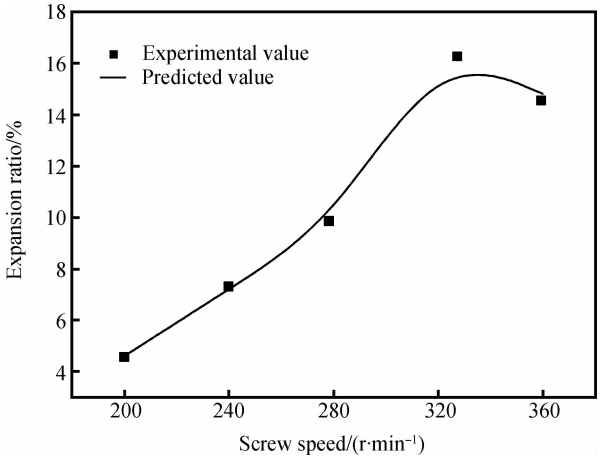

图 5 螺杆转速与淀粉/EVA 发泡材料膨胀率的关系曲线

Fig. 5 Relation curve between screw speed and starch/EVA foam material expansion ratio

3 发泡实验结果与讨论

3.1 螺杆转速对发泡材料膨胀率的影响

图 5 是螺杆转速与淀粉/EVA 发泡材料膨胀率的关系曲线图，可以看出螺杆转速低于 320 r/min 时，淀粉发泡材料的膨胀率随着螺杆转速的增加而逐渐变大，在 320 r/min 时，其膨胀率达到最大值。之后，膨胀率则随着螺杆转速的增加而逐渐降低。这是因为螺杆转速增加使淀粉/EVA 复合材料熔体所受的剪切力变大，淀粉的凝胶化程度逐渐变大，当外剪切力超过剪切屈服应力时，熔体顺畅流动。但是，螺杆转速过高时，物料在挤出机内停留的时间过短，水来不及完全汽化，使发气量不够或熔体强度还没有达到所需要黏弹性的要求，无法制得高倍率泡沫[13]。

3.2 模头温度对发泡材料膨胀率的影响

图 6 为模头温度与淀粉/EVA 发泡材料膨胀率的关系曲线。从图 6 可以看出，从 120 ℃开始，随着温度的升高发泡材料的膨胀率逐渐变大，在 140 ℃时，膨胀率达到 15%。然而温度再次升高后，其膨胀率逐渐下降。这是因为随着温度的升高，淀粉/EVA 复合材料的凝胶化程度提高，泡孔

易成型，且孔壁有一定的强度，水汽化时孔壁能包裹住气体，其膨胀率则变大。但是当温度再升高时，淀粉分子可能发生降解，淀粉的相对分子质量降低，孔壁变得稀薄，无法包裹住气体，因此其膨胀率降低[14]。

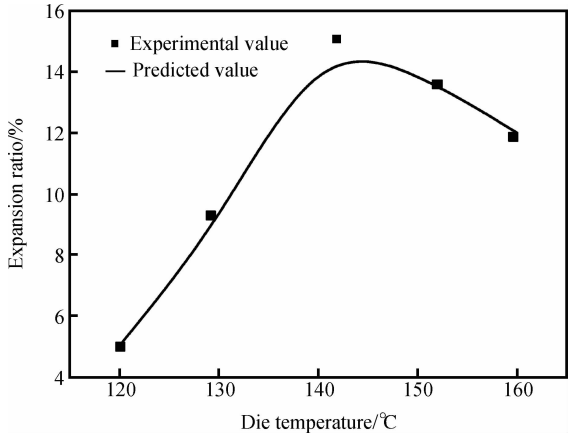

图 6　模头温度与淀粉/EVA 发泡材料膨胀率的关系曲线

Fig. 6　Relation curve between die temperature and starch/EVA foam material expansion ratio

3.3　含水量对发泡材料膨胀率的影响

图 7 为含水量与淀粉/EVA 发泡材料膨胀率的关系。可以看出，随着含水量的降低，发泡材料的膨胀率逐渐降低。当含水量在 14%(质量分数)时，其膨胀率达到最大值，这可能是因为水的质量分数适当较低时，限制了物料在挤出过程中的流动，这可能提高了复合材料的凝胶化程度，因而提高了发泡材料的膨胀率[14]。当含水量继续增加时，水汽化产生的水蒸气越来越多，气孔壁无法承受逐渐增大的压力，其凝胶化程度也随之降低，所以膨胀率降低。

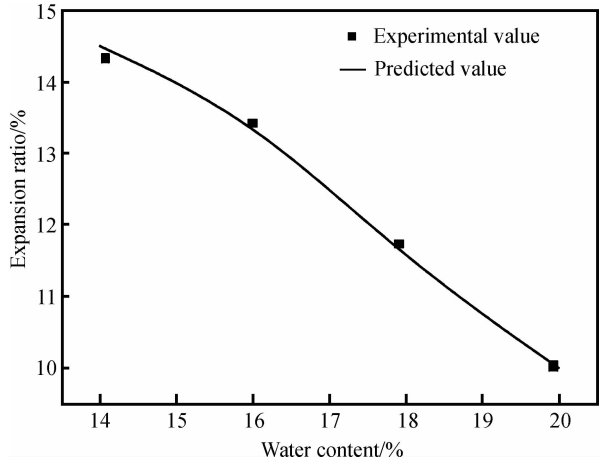

图 7　含水量与淀粉/EVA 发泡材料膨胀率的关系曲线

Fig. 7　Relation curve between water content and starch/EVA foam material expansion ratio

4　结　论

(1) 随着螺杆转速的增加，淀粉/EVA 复合材料的膨胀率逐渐增大，在螺杆转速为 320 r/min 时达到最大值；膨胀率亦随着模头温度的升高而逐渐增大，在 140 ℃时达到最大值；含水量对淀粉/EVA 发泡材料的膨胀率影响显著。

(2) BP 神经网络具有较强的预测能力，所建立的网络模型能很好地预测淀粉/EVA 发泡实验中工艺参数(螺杆转速、模头温度、含水量)对其膨胀率的影响。

参考文献：

[1] 王会才，崔永岩. 影响淀粉发泡的因素 [J]. 现代塑料加工应用，2003，16(1)：50-54.
Wang Huicai，Cui Yongyan. The factors influencing of starch foaming process [J]. Modern Plastics Processing and Applications，2003，16(1)：50-54.

[2] Miladinov V D，Hanna M A. Temperature and ethanol effects on the properties of extruded modified starch [J]. Industrial Crops and Products，2001，13(1)：21-28.

[3] 丛　爽. 面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用 [M]. 北京：科学出版社，2005：196-199.
Cong Shuang. Model predictive control theory and application under MATLAB environment [M]. Beijing：Science Press，2005：196-199.

[4] 林新波，张质良，阮雪榆. 利用 BP 神经网络预测材料温锻流动应力 [J]. 上海交通大学学报，2002，36(4)：459-462.
Lin Xinbo，Zhang Zhiliang，Ruan Xueyu. Prediction of material flow stress in warm forging with BP neural network [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University，2002，36(4)：459-462.

[5] 刘守纪，马万珍，张　晗. 基于人工神经网络的 HDPE 流变性能预测与研究 [J]. 塑料，2005，34(3)：93-99.
Liu Shouji，Ma Wanzhen，Zhang Han. Prediction and research of HDPE rheological properties based on artificial neural networks [J]. Plastics，2005，34(3)：93-99.

[6] Malinov S，Sha W. Neural network application in the alloy process performance prediction[J]. Materials Science and Engieering，2004，365(1-2)：375.

[7] 全国文献工作标准化技术委员会. GB/T 6342—1996 泡沫塑料与橡胶线性尺寸的测定 [S]. 北京：中国标准出版社，1996.
The National Standardization Technical Committee Literature Work. GB/T 6342－1996 Celluar plastics and rubbers—determination of linear dimension [S]. Beijing：Standards Press of China，1996.

[8] 何晓凤，周红标. 基于 GA-BP 的混凝土抗压强度预测研究 [J]. 淮阴工学院学报，2011，20(3)：21-25.

He Xiaofeng，Zhou Hongbiao. Prediction of concrete compressive strength based on GA-BP [J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology，2011，20(3)：21-25.

[9] 王利霞，张　娜，申长雨，等. 应用 Taguchi 实验设计法最小化注塑成型制品沉降斑 [J]. 塑料工业，2004，32(4)：26-28.
Wang Lixia，Zhang Na，Shen Changyu，et al. Minimization of sink mark of plastics injection molded part by Taguchi method [J]. China Plastics Industry，2004，32(4)：26-28.

[10] 李　烁，徐元铭，张　俊. 基于神经网络响应面的复合材料结构优化设计 [J]. 复合材料学报，2005，22(5)：134-140.
Li Shuo，Xu Yuanming，Zhang Jun. Composite structural optimization design based on neural network response surfaces [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2005，22(5)：134-140.

[11] 郑生荣，辛　勇，杨国泰，等. 人工神经网络在注塑参数预测中的应用 [J]. 塑料工业，2003，31(10)：26-29.
Zheng Shengrong，Xin Yong，Yang Guotai，et al. Application of artificial neural network in prediction of injection parameters [J]. China Plastics Industry，2003，31(10)：26-29.

[12] 陈桂明，戚红雨，潘 伟. MATLAB 数理统计(6.x) [M]. 北京：科学出版社，2002：23-28.
Chen Guiming，Qi Hongyu，Pan Wei. MATLAB mathematical statistics (6.x) [M]. Beijing：Science Press，2002：23-28.

[13] 邱威扬，喻继文，陈　云. 全淀粉热塑性塑料的研制 [J]. 塑料工业，1998，26(4)：106-108.
Qiu Weiyang，Yu Jiwen，Chen Yun. Development of All-starch thermoplastics [J]. Plastics Industry，1998，26(4)：106-108.

[14] Chinnaswamy R，Hanna M A. Optimum extrusion-cooking conditions for maximum expansion of corn srarch [J]. Journal of Food Science，1988，53(3)：834-836.