

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.02.012

PMMA 双面滚压成型的数值模拟与验证实验

傅志红,张洲,朱亚威

(中南大学机电工程学院,长沙 410083)

摘要:利用有限元软件 ABAQUS,对聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 光扩散板双面滚压成型过程进行了数值模拟。通过建立 PMMA 的黏弹性模型,以微结构的复制率作为评价标准,利用数值模拟方法,分析了滚筒旋转速度、滚筒下压距离和 PMMA 基板温度对 PMMA 光扩散板两面不同形状微结构复制率的影响。结果表明,半圆形微结构复制率比等边三角形微结构复制率高;在一定范围内,复制率随着滚筒旋转速度的减小和滚筒下压距离的增大而增大,随 PMMA 基板温度升高而先增大后减小;当滚筒旋转速度为 0.05 rad/s,滚筒下压距离为 0.45 mm, PMMA 基板温度为 140℃时,半圆形和等边三角形微结构复制率均达到最大,分别为 65.5% 和 51.2%。滚筒下压距离对复制率的影响最大,针对该参数进行实际滚压成型实验并将实验结果与仿真结果进行了对比验证,发现两者基本一致。

关键词:聚甲基丙烯酸甲酯;光扩散板;双面滚压成型;ABAQUS;数值模拟;微结构;复制率

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)02-0065-05

Numerical Simulation and Verification Experiment of Double-sided Roller Embossing of PMMA

Fu Zhihong, Zhang Zhou, Zhu Yawei

(College of Mechanical and Electrical Engineering of Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract : A model of the double-sided roller embossing process of polymethyl methacrylate (PMMA) was simulated by using the finite element software ABAQUS. The viscoelastic material model of PMMA was established in the simulation and the replication rate of microstructure was used as the basis to judge, then detailed analysis was made to investigate the influences of various factors, such as rotation speed of roller, pressing distance of roller and PMMA substrate temperature, to the replication rates of microstructures with different shapes on both sides of PMMA light diffuser plate by numerical simulation. The results show that, the replication rate of semi-circular microstructure is higher than that of equilateral triangles microstructure. Under the certain conditions, the replication rate increases with the lower rotational speed and the greater pressing distance, first increases and then decreases with PMMA substrate temperature increasing. When the rotation speed is 0.05 rad/s, pressing distance is 0.45 mm and PMMA substrate temperature is 140℃, the replication rates of the semi-circular and equilateral triangles microstructure can reach the maximum, which are 65.5% and 51.2% respectively. Pressing distance is the most effective factor among the three parameters. So the practical double-sided roller embossing experiment for the pressing distance was done and the experiment results were compared with the simulation results. It is found that the two results are basically same.

Keywords : polymethyl methacrylate ; light diffuser plate ; double-sided roller embossing ; ABAQUS ; numerical simulation ; microstructure ; replication rate

滚压成型是将滚筒表面的结构压印到基板(聚合物基板一般通过挤出制得)表面上的一种成型方法,具有压印时间短、连续化程度高、加工面积大等特点。此方法适用于液晶显示器背光模组、手机、MP4 等具有表面微结构光扩散板的产品加工中^[1]。之前,

大部分的光扩散板都是采用单面微结构,为了提高光的传播效率,通过在扩散板的双表面设置微结构,可以使光线按几何光学进行扩散^[2-3]。为此,许多学者对双面滚压成型及其设备进行了研究。S. J. Liu 等^[4]提出用红外线加热来辅助双面滚压;S. H. Lee 等^[5]

通讯作者: 傅志红,博士,教授,主要研究方向为聚合物挤出成型 E-mail : zhihongfu@mail.csu.edu.cn

收稿日期: 2018-11-13

引用格式: 傅志红,张洲,朱亚威. PMMA 双面滚压成型的数值模拟与验证实验[J]. 工程塑料应用,2019,47(2) : 65-69.

Fu Zhihong, Zhang Zhou, Zhu Yawei. Numerical simulation and verification experiment of double-sided roller embossing of PMMA[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2) : 65-69.

通过施加合适的压力,配合干粘剂的使用,利用滚对滚装置实现了蘑菇状微结构的生成;李新等^[6]从滚压装置的结构出发,对一种新型外装式电动滚筒的内部低速级太阳轮轴进行了结构设计。

近年来,越来越多的学者借助数值模拟的方法对滚压成型进行研究,其不仅可以降低研究成本,还可对实际的滚压成型提供指导。程军飞等^[7]利用非线性有限元仿真软件 ABAQUS 对不同聚合物材料进行了热滚压成型有限元模拟;N. A. Razani 等^[8]利用 ABAQUS 有限元分析软件,研究了 X70 钢在两个非对称滚筒滚压的情况下的微结构成型情况和材料的性能变化;P. Kramer 等^[9]通过 SIMUFACT FORMING V13 有限元软件,建立了三维模型,研究了摩擦性能对滚压过程以及失效形式的影响;王海雄等^[10]根据传热学基本理论建立了聚合物连注连轧成型技术中轧辊热平衡的理论模型,然后利用 ANSYS WORKBENCH 对轧辊的热平衡进行了仿真分析。

在双面滚压成型中,扩散板双面的结构对其光学性能有着重要的影响,庄琳玲等^[11]对均匀扩散板进行了结构设计,选用半圆柱形和等边三角形凹槽作为微结构,发现将该结构应用于扩散板中,可以使斜入射光的传输效率达到 91.7%。但是目前对双面不同形状微结构的滚压成型研究较少。

聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 具有独特的光学性能,是一种理想的光扩散板材料。但 PMMA 是一种聚合物材料,由于其自身的黏弹特性和对温度较高的依耐性,微结构不能完全压印到 PMMA 材料表面,所以需要采用复制率(即滚压成型后材料的微结构高度与滚筒设计的微结构高度之比的百分数)作为滚压成型效果的评判标准。复制率是一项直观且能较好反应滚压成型效果的指标,可以从仿真结果中直接获得。复制率的高低与材料本身属性和成型条件有关,相比较而言,成型条件(主要包括滚筒旋转速度、滚筒下压距离、基板温度)的影响要远大于材料本身性能的影响。笔者以两面不同微结构形状的 PMMA 光扩散板为例,利用 ABAQUS 软件对其双面滚压成型过程进行模拟仿真,重点研究滚筒旋转速度、滚筒下压距离和 PMMA 基板温度对 PMMA 光扩散板复制率的影响,并针对其中一个影响最大的参数进行实际滚压成型实验,与仿真结果进行对比验证,为 PMMA 光扩散板的双面滚压成型研究提供参考。

1 有限元模型

考虑到二维模型对于理解滚压聚合物的变形已经足够,且为节约仿真的空间与时间以及简化模型,选取滚筒模型的 1/8 进行仿真分析。在 ABAQUS 中建立的有限元模型如图 1 所示。滚筒的外表面有一系列线性排列的微结构,上滚筒为高度 0.25 mm 的等边三角形,下滚筒为半径 0.25 mm 的半圆形。在滚压成型的过程中,相对于 PMMA 基板变形滚筒的变形可忽略不计。因此,滚筒模型在仿真中被模拟为刚性体。

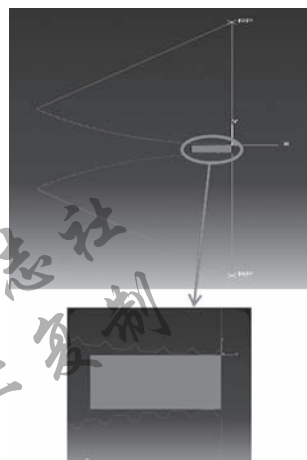


图1 滚压成型二维有限元模型

因为聚合物可以呈现弹性固体到黏性液体之间的各种性能,所以黏弹性是表达其力学性能的一个重要标准。黏弹性主要表现为静态黏弹性,具体分为蠕变和应力松弛。为了描述这一性质,采用 Wiechert 模型,松弛模量 $E(t)$ 的计算公式如式 (1) 所示。

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \quad (1)$$

式中: E_{∞} ——平衡模量;

n ——模型中 Maxwell 单元的数量;

E_i ——模型中第 i 个弹性元件的松弛模量;

t ——松弛时间;

λ_i ——模型中第 i 个 Maxwell 单元的时间常数^[12]。

傅志红等^[13]在 PMMA 变温松弛模量的获取方法实验研究中,得到了 PMMA 在 105℃ 下的松弛模量与对应的时间常数之间的关系。利用该关系得到了 PMMA 黏弹性模型的参数,并赋予到仿真的材料属性定义中。

假设滚筒与 PMMA 基板之间的相对运动为纯滚动。在两个滚筒中心参考点处分别施加一个沿 X

方向、大小相等、方向相同的稳定线速度;同时,在滚筒中心参考点处再施加一个以 Z 轴为旋转轴,大小相等,方向相反的稳定旋转速度。基板的两侧固定。

PMMA 基板被模拟为可变形体,滚筒模型被模拟为刚性体。对模型做出如下假设:

- (1) 基板厚度远小于宽度,视为平面应变问题;
- (2) 用滚筒移动、基板固定不动的工作情况来模拟滚筒不动,基板移动的工作情况;
- (3) 忽略聚合物基板的重力影响。

2 有限元仿真结果

2.1 滚筒旋转速度对双面滚压微结构复制率的影响

在 PMMA 基板温度为 140°C ,滚筒下压距离为 0.45 mm 的条件下,分别取滚筒旋转速度为 $0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25\text{ rad/s}$,经数值模拟得到滚压成型后上下表面微结构的复制率,如图 2 所示。由图 2 可知,两种形状微结构的复制率随滚筒旋转速度的提高整体上呈下降的趋势。这是因为滚筒旋转速度的大小决定了滚压成型的压印时间。旋转速度越低,滚筒上的微结构与聚合物薄膜表面接触时间就越长,材料流动填充的时间就越久,从而实现较高的复制率;另一方面,压印时间长,PMMA 基板的弹性回复少,在滚压过程中,当发生一定应变时,应力会随着时间的增加而减小,这会使一部分弹性变形转化为永久的不可逆的黏性变形,进而提高了复制率。

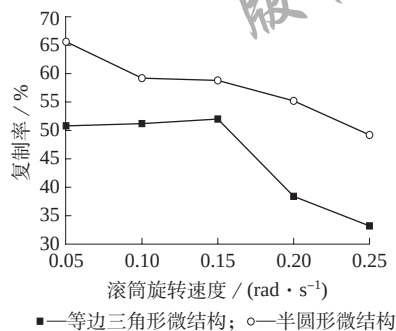


图2 滚筒旋转速度对复制率的影响

2.2 滚筒下压距离对双面滚压微结构复制率的影响

在 PMMA 基板温度为 140°C ,滚筒旋转速度为 0.05 rad/s 的条件下,分别取滚筒下压距离为 $0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45\text{ mm}$,经数值模拟得到滚压成型后上下表面微结构的复制率,如图 3 所示。由图 3 可知,随着滚筒下压距离的增加,两种形状微结构的复制率都呈现一个上升的趋势。这是因为下压距离越大,压印力就越大,压印深度就越深。但是下压距离不能过大,过大的压力会使得聚合物分子链结构拉伸扭曲过度,导致压力释放后,制品局部产生翘曲、变形等

缺陷。因此,实际生产中,必须根据材料的性质与滚压装置的条件来合理地选择滚筒下压距离。

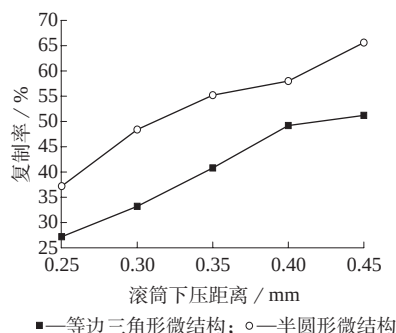


图3 滚筒下压距离对复制率的影响

2.3 PMMA 基板温度对双面滚压微结构复制率的影响

在滚筒旋转速度为 0.05 rad/s ,滚筒下压距离为 0.45 mm 的条件下,分别取 PMMA 基板温度为 $120, 130, 140, 150, 160^{\circ}\text{C}$,得到滚压成型后上下表面微结构的复制率,如图 4 所示。由图 4 可知,随着 PMMA 基板温度的升高,两种形状微结构的复制率均先上升后下降。这是因为滚压成型时 PMMA 基板的温度越低,相应的模量越高,弹性越好,压印效果越差;随着 PMMA 基板温度的升高,其模量降低,出现一定的黏性变形,压印效果变好;但温度太高,会使得微结构不能及时冷却定型,影响压印效果。

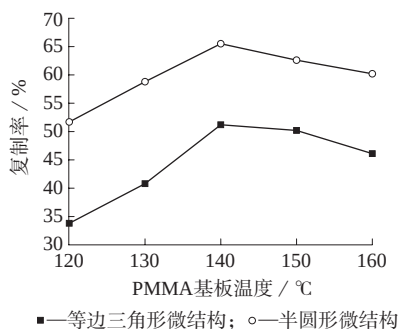


图4 PMMA 基板温度对复制率的影响

2.4 小结

由图 2~图 4 可以看出,在考察的范围内,当滚筒旋转速度为 0.05 rad/s 、滚筒下压距离为 0.45 mm 、PMMA 基板温度为 140°C 时,PMMA 光扩散板的复制率相对最大,半圆形微结构复制率为 65.5% ,等边三角形微结构复制率为 51.2% 。并且半圆形微结构的压印成型效果比等边三角形微结构的成型效果好。这是因为随着压印深度的增加,可压印的空间越来越小,所受到的阻力也越来越大。半圆形的圆形状过渡平缓,相对于等边三角形的直线过渡,所受到的阻力相对要小,压印更加充分。

另外,经计算可以发现当滚筒下压距离为 0.25~0.45 mm 时,半圆形和等边三角形微结构的复制率变化幅度分别为 76.3% 和 88.2%,远高于其它两种参数下的变化幅度。由此可知滚筒下压距离是影响复制率最明显的因素。因此在实际滚压成型实验中,主要探讨滚筒下压距离的影响,并与模拟结果进行对比验证。

3 实际滚压成型实验对比

3.1 主要原料

PMMA 颗粒:苏州坤乐塑化有限公司。

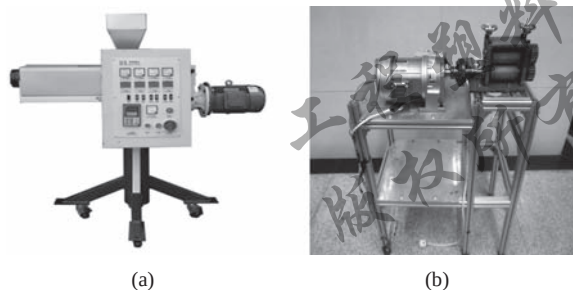
3.2 主要仪器及设备

单螺杆挤出机: HXSJ-E25 型,佛山市和新精密挤出技术有限公司;

双面滚压装置: 自制;

超景深三维显微镜: VHX-5000 型,基恩士公司。

将单螺杆挤出机与双面滚压装置搭配,其中单螺杆挤出机用于生产 PMMA 基板,双面滚压装置用于滚压成型,实验装置如图 5 所示。



(a) 单螺杆挤出机; (b) 双面滚压装置

图 5 实验装置

3.3 滚压成型工艺流程

首先通过单螺杆挤出机挤出 PMMA 基板,挤出机螺杆转速为 19.5 r/min,然后利用双面滚压装置进行滚压成型。

由于在实际滚压成型中,双面滚压装置的滚筒不断旋转,因而在滚筒中设置加热装置较为困难,故通过控制双面滚压装置与挤出机头的距离,来间接控制 PMMA 基板温度,机头温度与 PMMA 基板温度之间的关系经验公式如式 (2) 所示。

$$T_2 = T_1 - 2L \quad (2)$$

式中: T_2 ——PMMA 基板温度;

T_1 ——挤出机头的设置温度;

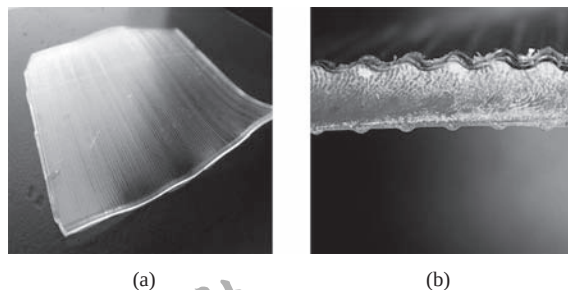
L ——双面滚压装置与挤出机头的距离。

实验中挤出机头的温度为 180℃,通过改变 L 将 PMMA 基板温度控制在 140℃,用红外测温仪测

试发现,实际的 PMMA 基板温度与设置温度基本相符。

控制双面滚压装置的电机转速,从而保证滚筒转速为 0.05 rad/s;利用塞尺来调整两个滚筒之间的间距,通过手轮的转动带动调距螺杆转动,来实现滚筒上下的移动,从而实现下压的效果,调距螺杆的螺距为细牙,采用 M10×1 的螺纹。

实验得到的制品如图 6 所示。



a—整体照片; b—厚度部分局部放大照片

图 6 实验得到的制品实物照片

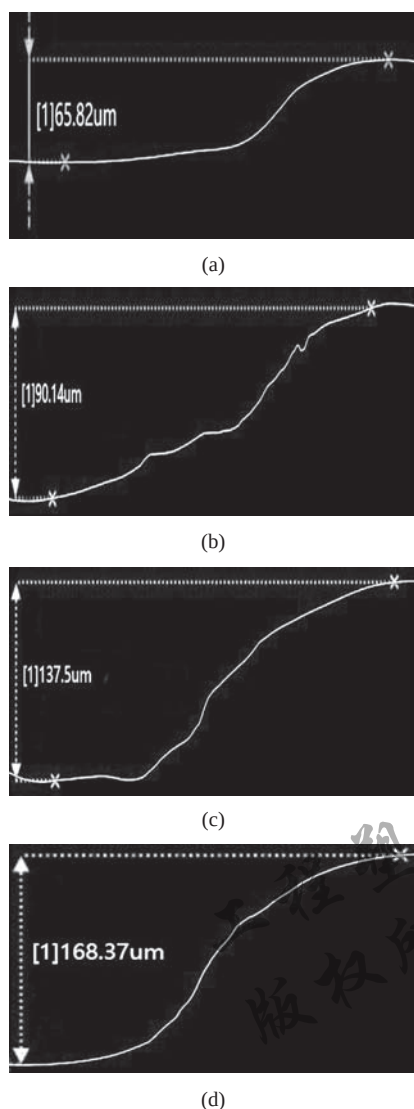
3.4 实际滚压成型复制率测试结果

利用超景深三维显微镜对所得制品进行高度测量,输出结果如图 7 所示。由图 7 可知,等边三角形微结构成型高度的斜率明显低于半圆形微结构。当滚筒下压距离为 0.25 mm 时,等边三角形微结构复制率约为 26.3%,半圆形微结构复制率约为 36.1%;当滚筒下压距离为 0.45 mm 时,等边三角形微结构复制率约为 55%,半圆形微结构复制率约为 67.3%。与之前的仿真结果相比,滚筒下压距离为 0.25 mm 时,等边三角形微结构实验结果与仿真结果之间的误差为 0.9%,而半圆形微结构两者误差为 1.1%;滚筒下压距离为 0.45 mm 时,等边三角形微结构实验结果与仿真结果之间的误差为 3.8%,而半圆形微结构两者误差为 1.7%。从以上数据对比可知,实验结果与仿真结果趋于一致。

4 结论

(1) ABAQUS 有限元软件仿真计算结果表明,半圆形微结构的复制率要比等边三角形微结构的高;在一定范围内,微结构的复制率随着滚筒旋转速度的减小和滚筒下压距离的增大而增大,随着 PMMA 基板温度的上升,呈现先增加后减少的趋势。当滚筒旋转速度为 0.05 rad/s,滚筒下压距离为 0.45 mm, PMMA 基板温度为 140℃时,微结构的复制率达到最高,半圆形微结构复制率为 65.5%,等边三角形微结构复制率为 51.2%。

(2) 滚筒下压距离对复制率的影响最为明显。



滚筒下压距离为 0.25 mm : a—等边三角形; b—半圆形
滚筒下压距离为 0.45 mm : c—等边三角形; d—半圆形

图7 不同滚筒下压距离时测量的实验制品高度

针对滚筒下压距离进行了实际滚压成型实验,发现实验结果与仿真结果基本相一致。

参考文献

- [1] 周洋,吴大明,庄俭.挤出滚压成型工艺参数对微结构复制率的影响[J].塑料,2012,41(6):105-108.
Zhou Yang, Wu Daming, Zhuang Jian. Process parameters effect on the height of microstructures in micro extrusion roller embossing process[J]. Plastics, 2012, 41(6):105-108.
- [2] 何晓祥,吴大明,郑秀婷.扩散板表面微结构对均匀度与透光率的影响[J].液晶与显示,2012,27(2):153-156.
He Xiaoxiang, Wu Daming, Zheng Xiuting. Effect of microstructure of light diffuser plate on uniformity and transmittance[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(2):153-156.
- [3] 刘言,吴大明,王海军,等.光扩散剂及微结构对光扩散板光学性能的影响[J].塑料,2014,43(1):49-51.
Liu Yan, Wu Daming, Wang Haijun, et al. Effect of light diffusion agent and microstructure on optical property of diffuser[J]. Plastics, 2014, 43(1):49-51.
- [4] Liu S J, Huang C C, Liao C T. Continuous infrared-assisted double-sided roll-to-roll embossing of flexible polymer substrates[J]. Polymer Engineering And Science, 2012, doi:10.1002/pen.23068.
- [5] Lee S H, Yi H, Park C W, et al. Continuous tip widening technique for roll-to-roll fabrication of dry adhesives[J]. Coatings, 2018, 8(10). doi:10.3390/coatings8100349.
- [6] 李新,赖玉活,李健,等.一种新型专用滚压机的设计[J].机械研究与应用,2016,29(2):148-154.
Li Xin, Lai Yuhuo, Li Jian, et al. Design of a new type of professional roller press[J]. Mechanical Research & Application, 2016, 29(2):148-154.
- [7] 程军飞,陈兴,张坤.热滚压成型工艺参数对微流道回复率的影响[J].宁波大学学报:理工版,2018,31(3):33-39.
Cheng Junfei, Chen Xing, Zhang Kun. Effect of hot rolling process parameters on recovery rate of microchannel[J]. Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition, 2018, 31(3):33-39.
- [8] Razani N A, Dariani B M, Soltanpour M. Microstructure and mechanical property improvement of X70 in asymmetrical thermomechanical rolling[J]. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97:3 981-3 997.
- [9] Kramer P, Groche P. Defect detection in thread rolling processes-experimental study and numerical investigation of driving parameters[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 129:27-36.
- [10] 王海雄,吕永虎,李积彬.聚合物连注连轧成型中轧辊热平衡仿真分析[J].中国塑料,2017,31(8):79-83.
Wang Haixiong, Lyu Yonghu, Li Jibin. Simulation analysis of heat balance of roller during continuous injection direct rolling process[J]. China Plastics, 2017, 31(8):79-83.
- [11] 庄琳玲,庄其仁,陈春玉,等.高效抑制斜入射光线 Fresnel 反射的均匀扩散板设计[J].光电子·激光,2014,25(10):1 892-1 899.
Zhuang Linling, Zhuang Qiren, Chen Chunyu, et al. Design of uniform diffuser plate for oblique incident light with high-performance Fresnel anti-reflection microstructure[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(10):1 892-1 899.
- [12] 傅志红,吴猛,杜明明,等.PMMA 滚压成型的数值模拟[J].塑料,2016,45(5):26-28.
Fu Zhihong, Wu Meng, Du Mingming, et al. Numerical simulation of roller embossing of PMMA[J]. Plastics, 2016, 45(5):26-28.
- [13] 傅志红,王志伟,尹业刚,等.PMMA 变温松弛模量获取方法的实验研究[J].塑料工业,2014,42(9):51-54.
Fu Zhihong, Wang Zhiwei, Yin Yegang, et al. The experimental study of PMMA variable temperature relaxation modulus method[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(9):51-54.