

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.04.016

基于 Moldflow 的 PP 薄壁制品注塑工艺计算机模拟

磨莉¹, 谷林²

(1. 陕西工业职业技术学院, 陕西咸阳 712000; 2. 西安工程大学, 西安 710048)

摘要: 利用 Moldflow 对 Taguchi 法和 $L_{16}(4^5)$ 正交表所设计出的聚丙烯 (PP) 薄壁制品注塑方案进行仿真, 研究发现: 注射时间、保压时间、保压压力是影响 PP 薄壁制品翘曲变形的主要因素, 并且得到最优注塑参数为: 注塑机料筒温度 180℃, 模具温度 75℃, 注射时间 3.0 s, 保压时间 3.5 s, 保压压力 65 MPa。另外, 通过 CAE 模流分析软件中 PP 薄壁制品注塑加工的翘曲变形进行仿真发现, 正交试验所获得的优化工艺的总翘曲变形量为 1.417 mm, 翘曲变形百分比约为 3.30%。其中由于冷却引起的翘曲变形量约为 0.159 mm, 而由收缩和取向引起的翘曲变形分别约为 1.853 mm 和 0.904 mm。

关键词: 翘曲变形; moldflow; 正交试验法; CAE 模流分析; 计算机仿真

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)04-0069-05

Computer Simulation on Injection Molding Process of PP Thin-Walled Products Based on Moldflow Method

Mo Li¹, Gu Lin²

(1. Shaanxi Industrial Vocational College, Xianyang 712000, China; 2. Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Through simulation investigation on injection molding processes of polypropylene (PP) mirror frame designed by $L_{16}(4^5)$ orthogonal layout by the moldflow software, the injecting time, holding time and holding pressure were proved to be the dominant factors on warping deformation. The modified process parameters were obtained as 180 °C of injection molding machine barrel temperature, 75 °C of mold temperature, 3.0 s of injecting time, 3.5 s holding time and 65 MPa of holding pressure. The modified parameters were simulated on CAE mode flow analysis software, the warping deformation value and its ratio were decreased to 1.417 mm and 3.30%. The warping deformation value originated from cooling, contraction and orientation were 0.159, 1.853 and 0.904 mm.

Keywords: warping deformation; moldflow; orthogonal test method; CAE mode flow analysis; computer simulation

聚丙烯 (PP) 是一种具有良好绝缘性能、抗化学腐蚀性能、加工性能, 且无毒的高分子材料, 作为三大通用塑料之一, 可以广泛应用于食品包装、汽车仪表盘及零件、塑料纤维、日用品等领域。PP 熔体在低剪切速率情况下, 通常呈牛顿流体特性, 随剪切速率增大, 出现剪切变稀现象。在注塑加工时, 通常选用熔体流动速率为 2 ~ 10 g/(10 min) 范围内的 PP, 其流动性较好, 成型温度约为 205 ~ 315℃, 溢出值约为 0.03 mm, 注塑机料筒温度一般为 210 ~ 280℃, 注射压力约为 180 MPa^[1]。

注塑制备薄壁塑料产品时, 由于聚合物熔体冷却收缩以及产品各部分冷却不均一、PP 分子发生取向性流动等现象, 容易造成塑料制品的翘曲变形, 进而影响产品的使用性能, 甚至造成产品报废。为了避免翘曲变形现象的出现, 除了选取结构合理的模具外, 结合高聚物流变特性, 减小聚合物熔体残余内应力, 也是较为重要的手段^[2-3]。一般情况下,

注塑机的料筒温度、模具温度、注射速率、注射时间、保压时间、保压压力和冷却时间等因素都会影响到塑料制品的翘曲变形程度^[1]。利用传统优化方法往往会造成较大的工作量, 而正交试验法却可以通过较少的实验组合找到最优的水平组合^[4-5], 结合 moldflow 平台的仿真模拟, 则可较为精确地确定优化工艺^[6-9]。笔者以 PP 薄壁制品为例 (尺寸为 230 mm × 136 mm × 43 mm, 壁厚为 2 mm), 利用 Taguchi 正交试验法对各注塑参数进行优化, 将所获得的最佳工艺条件在 CAE 模流分析软件中进行模拟仿真, 并与传统注塑工艺进行对比。

1 正交实验设计及注塑参数的确定

1.1 注塑参数范围选定

在 PP 注塑加工过程中, 注塑机的料筒温度、模具温度、注射速率、注射时间、保压时间、保压压力和

联系人: 磨莉, 讲师, 主要从事计算机仿真模拟研究

收稿日期: 2016-01-26

冷却时间等工艺参数都在不同的程度上影响着塑料制品的翘曲变形量。

注塑机料筒温度:料筒温度直接影响PP熔体的流动性能,温度过低,PP流体流动性能差,从而导致不能及时释放流动过程中所产生的内应力,造成制品翘曲变形;而过高的熔体温度则会导致材料发生分解或黏着于料筒壁或喷嘴,冷却脱模时也会造成制品收缩量过大,导致翘曲变形。总体来说,温度过高或过低都会导致塑料制品发生翘曲变形,而合适的料筒温度应根据PP的流变性能来决定,使其既可以充分熔融,又能保持均一、适中的流动速率,笔者所确定的料筒温度为180~210℃。

模具温度:模具温度过低的话,PP熔体注入模具后会快速冷却,进而导致产品快速收缩,无法释放内应力,从而发生翘曲变形,升高模具温度可以降低塑料制品的冷却速率,留出充分的时间释放PP熔体的内应力。但是,温度过高也会造成PP的降解,甚至损坏模具。根据PP的流变性能和模具所能承受的最高温度,将模具温度选定在60~75℃范围内。

注射速率:由于模具温度低于料筒温度,并且低于PP的粘流温度,所以当PP熔体进入模具后便会发生冷却,若注射速率过低,PP熔体则无法充满模具,产品内部会残留内应力;而注射速率过高,则熔体流动速率过大,产生的内应力也过大,这两种情况都会导致产品发生翘曲变形。根据注塑机最大注射速率,将注射速率选定为40~55 cm³/s。

注射时间:与注射速率的影响相同,较长或较短的注射时间都会对产品的质量产生不良影响,在此选定注射时间为2.4~3 s。

保压压力:将PP熔体注射到模具中后,由于熔体的冷却收缩会导致产品尺寸发生变化,通常利用电液系统对其进行保压,在冷却过程中向模具内补充PP熔体。如果保压压力过低,没有足够的PP熔体进行补充,则产品会发生收缩而导致翘曲变形;保压压力过高,会使模具内的流体流动速率过大,从而产生较大的内应力,也会导致翘曲变形。因而选定的保压压力范围为35~65 MPa。

保压时间:保压时间对产品质量的影响与保压压力的影响类似,保压时间较短容易造成产品尺寸收缩,较长的保压时间会增大模具内PP流体的内应力,会造成翘曲变形。因而选定的保压时间为2.0~3.5 s。

冷却时间:产品没有经过充分冷却,脱模后没有电液系统的保压作用,会发生较大的尺寸收缩,产生翘曲变形;但若冷却时间过长,保压过程则会增大PP熔体的内应力,同样造成翘曲变形。因而冷却时间设定为23.5~25.6 s。

1.2 正交实验设计及仿真

对注塑制件翘曲变形量的影响因素有浇注系统、冷却方式和注塑成型参数,笔者对这三种因素进行仿真,进而筛选出最优的注塑条件。

(1) 浇注系统的仿真。

在注塑成型过程中,浇口的位置、数目以及流道半径和形状都会在很大程度上影响PP熔体的流动平衡,影响PP熔体内应力的残留情况,从而影响PP制件的翘曲变形量。合适的浇注系统可以降低制件的翘曲变形量,减少缺陷,提高表面质量。结合PP熔体的流动特性,最佳的浇口位置为制件的中心位置,通过改变浇口位置和数目以及流道半径和形状,设计了以下5种注塑方案:

(a) 单浇口,双流道。浇口位于制件中心位置,直径为1 mm,主流道为圆锥形,小口直径为3 mm,大口直径为7 mm,支流道为圆形,直径为7 mm。

(b) 单浇口,单流道。浇口位于制件中心位置,直径为1 mm,流道为圆锥形,小口直径为3 mm,大口直径为7 mm。

(c) 双浇口,双流道。浇口直径为1 mm,主流道为圆锥形,小口直径为3 mm,大口直径为7 mm,支流道为圆形,直径为7 mm。

(d) 双浇口,双流道。浇口直径为1 mm,主流道和支流道皆为圆锥形,小口直径为3 mm,大口直径为7 mm。

(e) 双浇口,双流道。浇口直径为1 mm,主流道和支流道皆为圆形,直径为7 mm。

在相同的注塑参数下(注塑机料筒温度220℃,模具温度60℃,注射时间2.6 s,保压时间10 s,保压压力50 MPa)对以上五种注塑方案进行仿真,仿真结果表明,最终制件的翘曲变形量分别为2.166, 2.180, 2.158, 2.161, 2.182 mm,这说明第三套注塑方案更适合注塑制备高质量的PP薄壁制品。

(2) 冷却系统的仿真。

冷凝管路的排列、数目、直径和冷却用水的温度都在很大程度上影响着PP熔体在模具中的冷却速率,进而影响制品的翘曲变形量。根据PP的流变性能和实际注塑经验,笔者设计了9种不同的冷

却系统,利用上述注塑参数进行仿真,具体实验方案和仿真结果见表 1。结果表明,不同的冷却方式对制件的翘曲变形影响不大,但相对来说第二套冷却方案更适合该 PP 薄壁制品的注塑成型。

表 1 采用不同冷却系统方案的仿真结果

方案 编号	冷凝管 根数	排列 方向	直径/mm	冷却水温度/℃	翘曲变形量/mm
1 [#]	2	X	6	25	2.159
2 [#]	2	X	8	25	2.158
3 [#]	2	X	10	25	2.161
4 [#]	2	Y	8	25	2.160
5 [#]	2	X	8	15	2.161
6 [#]	2	X	8	35	2.161
7 [#]	4	X	8	25	2.161
8 [#]	6	X	8	25	2.162
9 [#]	8	X	8	25	2.162

利用 CAD UG 5.0 对薄壁制品建模后导入 Moldflow 软件中,利用 Moldflow 软件,结合弹性力学和流体力学等性能,对薄壁制品注塑成型进行 CAE 分析。如图 1 所示,将第二套冷却方案的工艺参数在 CAE 模流分析软件中对 PP 薄壁制品的翘曲变形进行仿真模拟,结果表明当进入冷凝管的水温为 25.02℃,对制件进行冷却后水温升至 28.59℃;制件各部位达到从模具中顶出温度的时间为 12.84~34.67 s,制件中部先达到顶出温度,边缘部位较晚达到顶出温度;制件经冷却后,各部位的温度为 37.27~71.55℃,其中除制件边角部位温度较高外,其他部分温度均低于 50℃;经方案 2 冷却所得 PP 薄壁制件的翘曲变形为 2.158 mm,其中制件边角部分和制件中心部位的翘曲变形量相对较大。

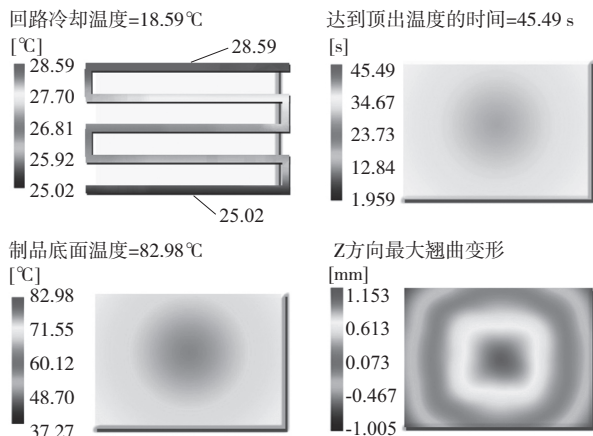


图 1 采用方案 2 冷却系统的注塑工艺仿真结果

通过对上述注塑工艺参数的讨论和范围选定,选取注塑机的料筒温度(A)、模具温度(B)、注射时间(C)、保压压力(D)、保压时间(E)五个最主要的因素,在所确定的每个工艺参数范围内平均选定 4 个

工艺参数,具体工艺参数见表 2。

表 2 因素 4 水平取值表

水平	因素				
	A/℃	B/℃	C/s	D/MPa	E/s
1	180	60	2.4	35	2.0
2	190	65	2.6	45	2.5
3	200	70	2.8	55	3.0
4	210	75	3.0	65	3.5

根据表 2 中工艺参数及其水平的划分,采用 5 因素 4 水平的正交试验矩阵,利用 $L_{16}(4^5)$ 正交表,利用 Taguchi 法设计出单指标正交试验方案,具体试验方案如表 3 所示。为了得到最佳工艺,传统方法需要对 45 个实验参数进行评估,而正交试验只需要对 16 组实验进行评估,筛选出对产品翘曲变形影响最大的实验因素。

表 3 正交实验方案及结果

试验号	A/℃	B/℃	C/s	D/MPa	E/s	翘曲变形/mm
1 [#]	180	60	2.4	35	2.0	2.107
2 [#]	180	65	2.6	45	2.5	1.879
3 [#]	180	70	2.8	55	3.0	1.819
4 [#]	180	75	3.0	65	3.5	1.702
5 [#]	190	60	2.6	55	3.5	1.819
6 [#]	190	65	2.8	65	2.0	1.839
7 [#]	190	70	3.0	35	2.5	1.798
8 [#]	190	75	2.4	45	3.0	1.892
9 [#]	200	60	2.8	65	2.5	1.724
10 [#]	200	65	3.0	35	3.0	1.813
11 [#]	200	70	2.4	45	3.5	1.829
12 [#]	200	75	2.6	55	2.0	2.026
13 [#]	210	60	3.0	45	3.0	1.771
14 [#]	210	65	2.4	55	3.5	1.721
15 [#]	210	70	2.6	65	2.0	1.753
16 [#]	210	75	2.8	35	2.5	1.855

利用 CAD UG 5.0 对薄壁制品建模后导入 Moldflow 软件中,通过 MLD 将所创建的薄壁制品模型导入到 MPI 模块中,利用 Fusion 法进行网格划分。结合实际生产中的浇注系统,确定采用一模一腔热流道系统,其中主流道为圆锥形,小口直径为 3 mm,大口直径为 7 mm,分流道为圆孔型,直径为 7 mm,浇口为圆形,直径为 1 mm,冷却管道为 2 根, X 轴向排列,管道直径为 8 mm,采用水温为 25℃的冷却水进行冷却。利用 Moldflow 对表 2 中 16 组正交实验的翘曲变形量进行仿真,实验结果见表 3 和图 2。由图 2 可看出,注射时间(C)、保压压力(D)、保压时间(E)三个工艺参数对产品的翘曲变形影响较大,且随着注射时间、保压压力和保压时间的增大,注塑制品的翘曲变形量较低。表 2 中第四组正交实验的翘曲变形量最低,为 1.702 mm。该注塑

成型参数为:注塑机料筒温度 180℃,比传统工艺的料筒温度低约 40℃;模具温度为 75℃,相对传统工艺较高;注射时间、保压时间和保压压力都较高,分别为 3.0 s、3.5 s 和 65 MPa,更有利于降低该制件注塑成型的翘曲变形量。

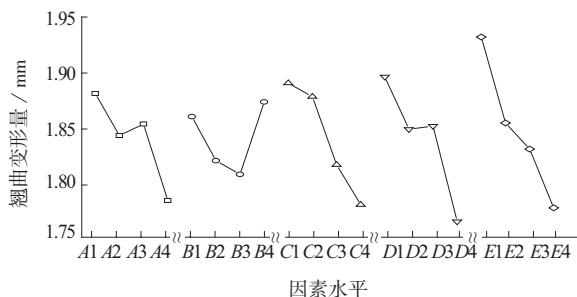


图2 各工艺参数对翘曲变形量的影响

2 注塑工艺参数仿真

通过对正交实验的仿真模拟得知,最为优化的注塑工艺为:注塑机料筒温度 180℃,模具温度 75℃,注射时间 3.0 s,保压时间 3.5 s,保压压力 65 MPa。

利用 Moldflow 软件,结合弹性力学和流体力学等性能,对薄壁制品注塑成型进行 CAE 分析。并结合公式 (1) 和公式 (2),采用有限元方法对注塑成型过程进行模拟分析。

$$\eta = \alpha \gamma^{\beta} \exp[CT] \quad (1)$$

其中, η 为黏度, α 为黏度系数, γ 为剪切率, β 为剪切系数, C 为温度系数, T 为温度。

$$\gamma' = A_1 + A_2 X + A_3 Z + A_4 X^2 + A_5 XZ + A_6 Z^2 \quad (2)$$

其中, γ' 为黏度, $A_1 \sim A_6$ 是多项式的 6 个系数, X 为剪切速率, Z 为温度。

图 3 为优化工艺的翘曲变形仿真结果。由图 3 可知,该 PP 薄壁制品在正交实验优化后的工艺条件下进行注塑加工时,总的翘曲变形量为 1.417 mm。其中由于冷却引起的翘曲变形量约为 0.159 mm,而由收缩和取向引起的翘曲变形分别约为 1.853 mm 和 0.904 mm,这说明冷却对 PP 薄壁制品的翘曲变形影响较小,而收缩和取向对翘曲变形的影响较大。目标制件的尺寸为 230 mm × 136 mm × 43 mm,该优化工艺下对其进行注塑加工的翘曲变形百分比约为 3.30%。为了更直观地体现正交试验优化后注塑工艺的改善,也对传统工艺下(注塑机料筒温度 220℃,模具温度 60℃,注射时间 2.6 s,保压时间 10 s,保压压力 50 MPa)注塑加工 PP 薄壁制品进行了仿真研究。其总的翘曲变形量为 1.797 mm。其中由于冷却引起的翘曲变形量约为 0.075 mm,而

由收缩和取向引起的翘曲变形分别约为 1.938 mm 和 0.670 mm,传统工艺下对 PP 薄壁制品进行注塑加工的翘曲变形百分比约为 4.18%。相比之下,优化后的工艺可以在很大程度上降低 PP 薄壁制品注塑加工时的翘曲变形量。

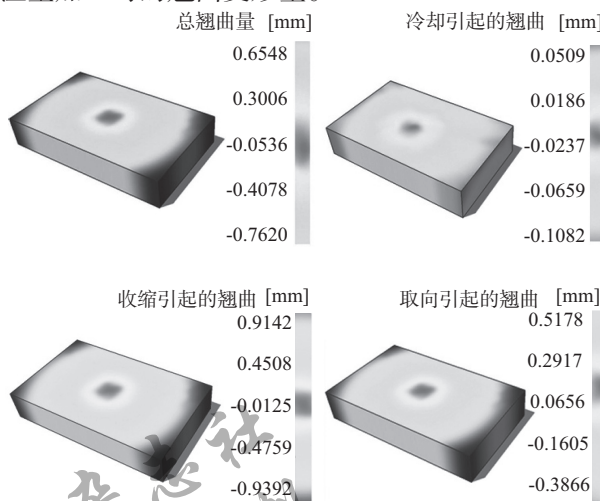


图3 优化工艺的翘曲变形仿真结果

3 结论

(1) 通过 Moldflow 对利用 Taguchi 法和 $L_{16}(4^5)$ 正交表所设计出单指标正交试验方案进行仿真模拟发现,注射时间、保压时间、保压压力三个工艺参数对产品的翘曲变形影响较大,最优注塑参数为注塑机料筒温度 180℃,模具温度 75℃,注射时间 3.0 s,保压时间 3.5 s,保压压力 65 MPa。

(2) 在 CAE 模流分析软件中对优化工艺和传统工艺注塑加工 PP 薄壁制品的翘曲变形进行仿真,结果表明优化工艺的翘曲变形百分比约为 3.30%,而传统工艺的翘曲变形百分比为 4.18%,优化后的注塑工艺大大降低了 PP 薄壁制品注塑加工的翘曲变形量。

(3) 通过 CAE 模流分析软件中对 PP 薄壁制品注塑加工的翘曲变形进行仿真发现,冷却对 PP 薄壁制品的翘曲变形影响较小,而收缩和取向对翘曲变形的影响较大。

参考文献

- [1] 王戈. 汽车后视镜注塑成型工艺优化研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
Wang Ge. Optimization of injection molding parameters for wing mirror [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [2] 丁玉兴, 温守东. 影响塑料注射制品内应力的因素探讨 [J]. 承德民族师专学报, 2003(2): 68-69.
Ding Yuxing, Wen Shoudong. An approach on the factors which

- influence the internal stress of plastic injection products[J]. Journal of Chengde Teachers College for Nationalities, 2003(2):68-69.
- [3] Chang R Y, Tsaur B D. Experimental and theoretical studied of shrinkage, warp and sink marks of crystalline polymer injection molded parts[J]. Polymer Engineering and Science, 1995, 35(15):2115-2122.
- [4] 王忠利, 琚爱云, 赵磊. 某型电机上盖注射成型工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(12):65-68.
- Wang Zhongli, Ju Aiyun, Zhao Lei. Optimization of injection molding process parameters for a certain type motor cover[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(12):65-68.
- [5] 王利霞, 杨杨, 王蓓, 等. 注塑成型工艺对制品收缩率变化的影响及工艺参数优化[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(2):173-176.
- Wang Lixia, Yang Yang, Wang Bei, et al. Investigation of the influence of processing parameter on volumetric shrinkage variation of plastic injection molded parts and process optimization[J]. Polymer Material Science and Engineering, 2004, 20(2):173-176.
- [6] 马浩军, 胡广洪, 阮雪榆. 利用 Moldflow 软件分析解决注塑件翘曲问题[J]. 模具技术, 2002(5):57-60.
- Ma Haojun, Hu Guanghong, Ruan Xueyu. Using Moldflow software to analyze and solve the problem of the warp of injection molding parts[J]. Die and Mould Technology, 2002(5):57-60.
- [7] 李金良, 冯刚, 张朝阁. 一种基于注塑 CAE 的确定塑料收缩率的方法研究[J]. 塑料工业, 2015, 43(2):49-52.
- Li Jinliang, Feng Gang, Zhang Chao. Research on determination method of plastic shrinkage rate based on injection molding CAE[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(2):49-52.
- [8] Oktem H, Erzummlu T, Uzman I. Application of taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part[J]. Materials and Design, 2007, 28:1271-1278.
- [9] 茆茂, 朱先琦. 基于正交试验法的镜框注塑工艺参数优化[J]. 南昌工程学院学报, 2015, 34(3):51-55.
- Mao Mao, Zhu Xianqi. Optimization of injection molding process parameters of mirror frame based on orthogonal test[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2015, 34(3):51-55.
- properties of isotactic polypropylene and rubber modified isotactic polypropylene [J]. Polymer, 2002, 43:3279-3293.
- [11] 付一政, 安峰, 曲静波, 等. β 晶型成核剂增韧改性聚丙烯及其共混物的力学性能与结晶行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(2):185-188.
- Fu Yizheng, An Feng, Qu Jingbo, et al. The mechanical properties and crystallization behavior of the modified PP and its blends modified by beta nucleating agent[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2006, 22(2):185-188.
- [12] Grein C, Germain Y. Influence of β -nucleation on the mechanical properties of isotactic polypropylene and rubber modified isotactic polypropylene [J]. Polymer, 2002, 43:3279-3293.
- [13] 祝宝东, 王鉴, 董维超, 等. 氧化聚丙烯的存储与接枝研究[J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(6):1043-1047.
- Zhu Baodong, Wang Jian, Dong Weichao, et al. Storage and slid-phase grafting of oxidized polypropylene oxide [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2012, 26(6):1043-1047.

杜邦果糖基聚酯项目取得突破

杜邦公司的工业生物科学业务部和 Archer Daniels Midland Co.(ADM) 公司合作开发出一种技术, 有望带来一种崭新的可持续发展树脂, 成为聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 的替代材料。合作双方表示, 他们发现了一种突破性的工艺, 由此生产出的单体能取代对苯二甲酸, 这是 PET 的主要原料。该工艺以果糖为起点, 这是一种衍生自许多生物来源的丰富且低成本的糖类。其终点是呋喃二羧酸甲酯 (FDME), 这种单体可像对苯二甲酸一样在热塑性聚酯生产中发挥作用。

杜邦的生物材料全球生物业务总监 Simon Herriott 说, 其突破性在于, 可以在果糖转 FDME 工艺中得到高产量, 相比其他的 FDME 生产路线更具经济可行性。

Herriott 接受《塑料新闻》电话采访说:“通常, 果糖制 FDME 的工艺只能得到低产量。”糖类化学已经得到了广泛的研究, 但制成 FDME 的低产量路线限制了其效用和推广意义。杜邦和 ADM 公司目前正在美国伊利诺斯州新建一座 60 吨年产能的设施, ADM 在这里建有一座大型的加工厂。这座试验工厂有望在年底前投用。合作双方已经为研

究人员供应了一定数量的样本, 供其研究新的聚合物生产。

Herriott 说, 合作双方不认为基于 FDME 的聚合物在食品接触应用中会带来问题。基于 FDME 的聚酯将成为 PET 的替代品。

(中塑在线)

2015 年全国日用塑料产量前十名省市出炉, 广东居首

2015 年 1~12 月, 全国日用塑料制品产量为 592.66 万 t。塑料制品产量前十名的省市分别是广东、浙江、湖北、四川、江苏、河北、山东、福建、河南和天津。前三省份日用塑料制品产量占据全国产量的 50.4%。广东日用塑料制品产量占全国日用塑料制品产量的 22.3%, 成为全国日用塑料制品产量最高的地区。2015 年, 在国家一系列政策密集出台的环境下, 在国内市场强劲需求的推动下, 我国日用塑料制品产业整体保持平稳较快增长。自 2011 年以来, 全国日用塑料制品产量整体保持稳步增长的态势, 产量均高于 400 万 t。同时, 全国日用塑料制品产量的增长率也一直保持上行态势, 由 2011 年的 -29.0% 逐步上涨至 2014 年的 22.9%。2014 年全国日用塑料制品产量增长速度达到近五年来最高值, 但产量与 2010 年的 645.86 万 t 相比, 仍减产了 66 万吨。(中塑在线)