

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.01.014

基于 CFD 的流延膜冷却效率研究^{*}

吴哲浩, 麻向军

(华南理工大学聚合物新型成型装备国家工程研究中心, 聚合物成型加工工程教育部重点实验室, 广州 510640)

摘要:以平行流道流延辊为研究对象, 利用计算流体动力学软件对流延膜在流延辊上的冷却过程进行数值模拟, 得到了不同流延膜厚度和流延辊转速条件下流延膜的温度场。结果表明, 流延膜温度分布为中间高两端低, 且靠近冷却水入口一侧的温度低于另外一侧。流延膜的冷却速率随流延膜厚度的增加而降低, 流延膜的冷却效率和宽度方向上的温度分布均匀性随流延膜厚度的减小而提高。流延膜的冷却速率随流延辊转速的升高而降低, 流延膜的冷却效率和宽度方向上温度分布的均匀性随流延辊转速的降低而提高。

关键词: 计算流体动力学; 流延膜; 流延辊; 冷却效率; 温度分布

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)01-064-05

Research on Cooling Efficiency of Casting Film Based on CFD Software

Wu Zhehao, Ma Xiangjun

(National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing, Key Laboratory of Polymer Processing Engineering of the Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract : Taking parallel flow channels casting roller as research object, a numerical simulation of cooling process of casting film on casting roller was made by using computational fluid dynamics(CFD) software. The temperature field of casting film was obtained at different thickness of casting film and rotate speed of casting roller. The results show that temperature distribution of plastic film is high in middle and low at two ends, and temperature of inlet side below the other side. With increasing of thickness of casting film, the cooling rate of casting film drop. Cooling efficiency and uniformity on temperature distribution in width of casting film are improved with reducing of thickness of casting film. With increasing of rotate speed of casting roller, the cooling rate of casting film drop, cooling efficiency and uniformity on temperature distribution in width of casting film are improved with reducing of rotate speed of casting roller.

Keywords : computational fluid dynamics ; casting film ; casting roller ; cooling efficiency ; temperature distribution

平膜挤出成型法又称 T 形模头法, 所得薄膜是连续的片状薄膜, 也称流延膜。其过程是: 挤出机将塑料熔体由一狭缝模头挤出, 挤出的片状物直接流涎到表面镀铬的流延辊上, 骤冷形成薄膜, 再经导辊牵引、电晕处理、切去边料和收卷操作完成薄膜的生产。挤出流延膜生产工艺流程如图 1 所示。

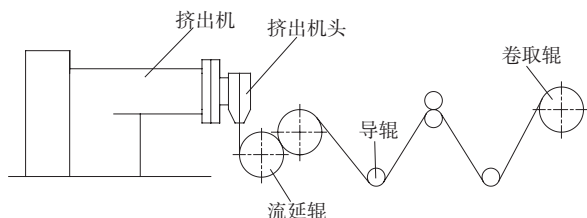


图 1 流延膜生产工艺流程

在薄膜挤出成型过程中, 流延辊的温度场对薄膜的冷却效率和宽度方向温度分布均匀性以及产量具有很大的影响。同时流涎辊温度场受冷却水温度

和流速、冷却辊的直径和冷却水道尺寸、流涎辊的转速和薄膜厚度等因素的综合影响, 因此需要系统地研究流涎辊对薄膜冷却效果与各影响因素间的敏感性^[1]。国内外已经有一些学者对流延膜冷却成型过程进行了研究。国外, K. Toshitaka 等^[2]提出了与流延辊筒相接触的薄膜表面温度的计算公式。此外, D. Silagy 等^[3]对流延膜的加工过程进行了仿真运算, 并且将计算结果与有关实验数据进行了对比。K. Selvanayagam 等^[4]利用 Navier-Stokes 控制方程, 找到了在恒温流涎生产时, 使薄膜厚度一致的较优的控制方式。国内, 李钢等^[5]根据 K. Toshitaka^[2]提出的流延膜与流延辊接触界面温度计算公式, 通

^{*} 国家自然科学基金-广东联合基金项目 (U1201242)

联系人: 麻向军, 副教授, 主要从事材料加工 CAD/CAE 研究

收稿日期: 2014-10-29

过实验数据估算出界面温度,对双进双出螺旋流道流延辊进行了仿真分析,研究了在流延膜成型时流道截面尺寸结构对薄膜冷却效果的影响,得到了在相同流道截面面积的情况下,辊筒的换热效果随流道的长宽比越大而越好的结论。李福森等^[6]通过数值模拟的方法,研究了塑料薄膜在螺旋流道流延辊上非稳态传热过程,得到了辊面温度随时间的变化规律。笔者采用 FLUENT 软件对平行流道流延辊冷却流延膜的过程进行数值模拟,耦合求解流延膜与流延辊间的换热,系统研究流延膜的厚度和流延辊的转速对薄膜冷却效率和宽度方向温度分布均匀性的影响,为合理设置流延膜的冷却工艺参数提供理论依据。

1 计算模型

1.1 物理模型及材料参数

研究的平行流道流延辊的几何模型如图 2 所示。图 2 中 Z 向为流延辊的长度方向,即流延辊的轴向方向,也是流延膜的宽度方向。流延辊的主要零部件有转轴(直径 140 mm,轴向长度 1 600 mm)、外辊筒(直径 500 mm,轴向长度 1 400 mm,厚度 12 mm)、内辊筒(直径 432 mm,轴向长度 1 160 mm,厚度 10 mm)、外端盖、内端盖、导流片等。其中转轴两端设有沿轴心和沿径向的开口,孔径为 40 mm,用于通入和流出冷却水。

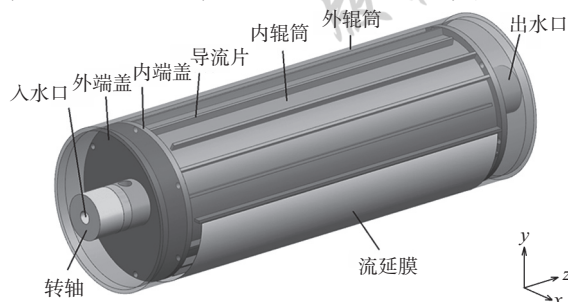


图 2 流延辊和流延膜三维几何模型

流延辊内共设有 6 个平行冷却回路,冷却回路由外辊筒、内辊筒、两个内端盖和导流片构成。冷却水由转轴上的入水口进入辊体,后通过内端盖上的孔口流入冷却回路,经过两次折返,最终由转轴另一端出水口排出。流延辊的材质为钢。薄膜的材料为聚丙烯,宽度为 1 070 mm,包角为 180°。初始温度为 230℃。表 1 为薄膜和流延辊的材料属性。

表 1 材料属性

材料名称	密度 / (kg · m ⁻³)	导热系数 / [W · (m · K) ⁻¹]	比热容 / [J · (kg · K) ⁻¹]
钢	7 800	34.3	509
聚丙烯	735	0.15	2 100

1.2 流体流动和传热的控制方程

流延膜的生产达到稳定状态时,相对于固定坐标系,流延膜和流延辊的温度分布只在很小的范围内作周期性波动,此时可以认为流延膜和流延辊的传热过程是稳态的。

笔者采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对流延辊内冷却水流动及传热进行模拟计算。流延辊内的冷却水为单相连续不可压缩流体,在不考虑体积力的情况下,稳态流体流动与传热过程应满足如下控制方程:

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i U) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(TU) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

湍流动能方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍流耗散率方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: U 为流体速度矢量; $u_i (i=1, 2, 3)$ 为流体速度矢量在坐标 x_i 上的分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为密度, kg / m^3 ; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为压力, Pa ; T 为温度, K ; λ 为导热系数, $\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$; C_p 为比热, $\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$; k 为湍流动能, m^2 / s^2 ; ε 为湍流耗散率, m^2 / s^3 ; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; G_k 为由平均速度梯度产生的湍流动能, m^2 / s^2 。其中:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型中的常数取经验值:

$C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

1.3 网格模型

使用三维造型软件 UG NX 完成流延辊和薄膜的三维建模,导入 Gambit 软件中进行网格划分。为保证所划分的网格具有高的质量以确保数值计算的精度,划分网格时将模型分割成各个规则的子块,同时考虑壁面附近的流体与传热计算结果对整个流延辊冷却薄膜的数值结果准确性有很大影响,选择通过壁面函数来求解壁面附近的区域,壁面函数对网格有一定的要求。根据文献[7]确定壁面第一层网格厚度,设置合理的网格厚度增长率,划分完成后的

整体模型网格均为六面体网格,网格模型如图 3、图 4 所示。单元数量共计为 4 136 480 个。

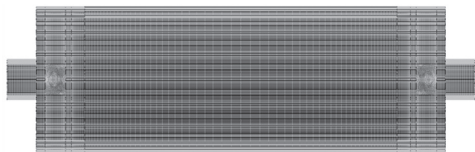


图 3 流延辊和流延膜的网格模型正视图

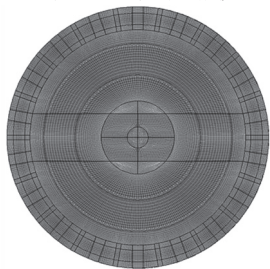


图 4 流延辊和流延膜的网格模型侧视图

1.4 边界条件及数值方法

笔者采用单一变量法分别研究 3 组流延膜厚度和 3 组流延辊转速各自对流延膜冷却效率和宽度方向温度分布均匀性的影响。表 2 为不同流延膜厚度下的流延辊转速的取值。冷却水初始温度为 25℃,冷却回路内冷却水雷诺数为 13 000。研究参数为流延膜厚度时,流延辊转速设置为 20 r/min。研究参数为流延辊转速时,流延膜的厚度设置为 0.1 mm。

表 2 流延膜厚度和流延辊转速的取值

项目	厚度/mm		
	0.100	0.125	0.150
转速/(r·min ⁻¹)	20	25	30

边界条件:入水口为速度入口边界条件,根据冷却回路内冷却水雷诺数和流延辊的尺寸参数换算得出入口速度为 3.0 m/s;出口为压力出口边界条件,出口压力为大气压;流延膜与外辊筒的界面为耦合面,通过耦合求解流延膜与流延辊之间的换热;流延膜的侧面和顶面以及流延辊与空气接触的面均设置为对流换热边界条件,导热系数为 5 W/(m·K),空气温度为 50℃。

在软件中,设置湍流模型为标准模型,近壁面处理方式为标准壁面函数,控制方程采用有限体积法离散,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,压力插值方法选择 Standard 格式,湍动能和湍流耗散率的离散格式均取二阶迎风格式。

2 计算结果与分析

2.1 流延膜冷却过程的温度场

图 5 为流延膜厚度为 0.100 mm、流延辊转速为 20 r/min 时,数值计算得到的流延膜与外辊筒

界面温度场分布云图。从图 5 可以看出,流延膜在流延辊的散热作用下的温度逐渐减低。在宽度方向上,流延膜两端受对流换热的冷却作用,两端的温度低于中部的温度,温度分布呈中间高两端低。

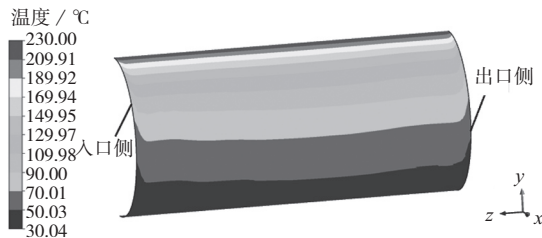


图 5 流延膜与外辊筒的界面温度场云图

另外,冷却水起始温度较低,与流延辊的对流换热作用强,使靠近入口一侧的薄膜温度下降比较快。冷却水在流动过程中不断与辊体进行换热,出口侧的水温高于初始水温,冷却水与流延辊间的温差减小导致换热量变小,因此流延膜靠近出口侧的温度会高于靠近入口侧的温度。

2.2 流延膜厚度对流延膜冷却效率的影响

图 6 为流延膜厚度不同时,流延膜周向温度随流延膜宽度中心线上周向角度的变化。从图 6 可以看出,流延膜的冷却速率随膜温的下降而降低,这是因为膜温度降低的同时外辊筒的温度也在降低,外辊筒与冷却水之间的温差变小,使得换热量减小,最终导致流延膜的冷却速率随膜温的下降而降低。并且从 3 组厚度的流延膜温度变化曲线可以看出,流延膜的厚度越小,冷却速率越大。

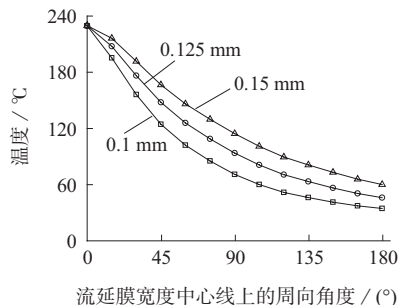


图 6 流延膜周向温度随流延膜宽度中心线上周向角度的变化

图 7 为流延膜厚度不同时,流延膜离开流延辊时宽度方向的温度随流延膜宽度方向的距离的变化规律。从图 7 可以看出,流延膜两端的温度梯度较大,会导致端部位置的薄膜翘曲变形,实际生产过程中会进行切边处理,除去流延膜翘曲变形的部分。

表 3 为除去切边部分,流延膜宽度在 -500 ~ 500 mm 范围内时,3 组厚度的流延膜脱离流延辊时宽度方向的温度值。

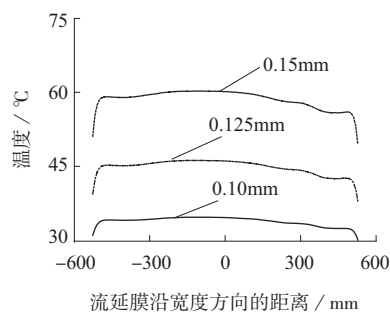


图7 流延膜宽度方向温度随流延膜宽度方向距离的变化

表3 不同厚度流延膜脱离流延辊时宽度方向的温度/°C

项目	厚度/mm		
	0.100	0.125	0.150
平均温度	33.7	44.7	58.5
温度标准差	0.792	1.272	1.520

由表3数据可知,流延膜的厚度越大,其脱离流延辊时的平均温度越高,即流延膜的冷却效率随流延膜厚度的增大而降低。同时可以看出,流延膜的厚度越小,其宽度方向温度的标准差越小,流延膜温度分布越均匀,即流延膜宽度方向温度分布的均匀性随流延膜厚度的减小而提高。实际生产中,当所生产流延膜厚度较大时,需通过调整冷却回路内冷却水雷诺数和冷却水温度等工艺参数来提高流延膜宽度方向温度分布的均匀性。

2.3 流延辊转速对流延膜冷却效率的影响

图8为不同流延辊转速下,流延膜周向温度随流延膜宽度中心线上周向角度变化的规律。由图8可知,流延辊的转速越高,流延膜的冷却速率就越低,这是因为流延辊的转速越高,流延膜贴附在流延辊上的时间越短,由于流延膜在冷却过程中其主要的热量是由流延辊带走的,接触时间短导致流延膜传递至流延辊的热量降低,使得冷却速率降低。

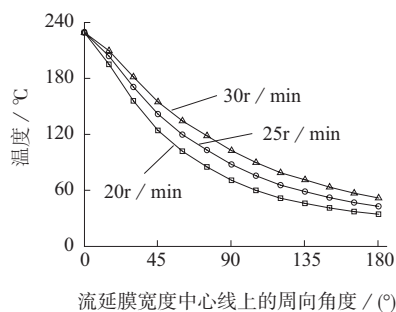


图8 流延膜周向温度随流延膜宽度中心线上周向角度的变化

图9为不同流延辊转速下,流延膜离开流延辊时宽度方向的温度随流延膜宽度方向距离的变化规律。切边处理除去流延膜两端温度梯度较大的部位,流延膜宽度在-500~500mm范围内时,3组流延辊转速下流延膜脱离流延辊时宽度方向的温度如表

4所示。由图9及表4可知,流延辊的转速越高,流延膜脱离流延辊时的平均温度也越高,即流延膜的冷却效率随流延辊的转速增大而降低。另外,流延辊的转速越低,流延膜宽度方向温度的标准差越小,流延膜温度分布均匀性越高,即流延膜宽度方向温度分布的均匀性随流延辊转速的降低而提高。在实际生产过程中,需要设置合理的流延辊转速,使得提高薄膜产量的同时保证薄膜的质量。

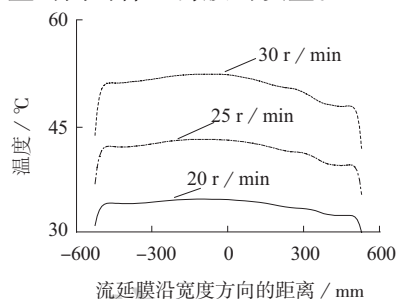


图9 流延膜宽度方向温度随流延膜宽度方向距离的变化

表4 不同流延辊转速下流延膜脱离流延辊时宽度方向的温度/°C

项目	转速/(r·min ⁻¹)		
	20	25	30
平均温度	33.7	41.5	50.3
温度标准差	0.792	1.248	1.578

3 结论

(1) 在流延辊的散热作用下,流延膜温度逐渐下降。在宽度方向上,流延膜温度分布呈中间高两端低,流延膜靠近入口侧的温度低于另外一侧。

(2) 流延膜的冷却速率随流延膜厚度的增加而降低。流延膜的冷却效率和宽度方向上的温度分布均匀性随流延膜厚度的减小而提高。

(3) 流延膜的冷却速率随流延辊转速的升高而降低。流延膜的冷却效率和宽度方向上温度分布的均匀性随流延辊转速的降低而提高。

参考文献

- [1] 杨鸣波. 聚合物成型加工基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009:114-117.
Yang Mingbo. Foundation of polymer forming and processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009:114-117.
- [2] Toshitaka K, Gregory A C. 塑料薄膜加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Toshitaka K, Gregory A C. Technology of plastic film processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [3] Silagy D, Demay Y, Agassant J F. Numerical simulation of the film casting process[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1999, 30(1):1-18.
- [4] Selvanayagam K, Götz T, Sundar S, et al. Optimal control of film casting processes[J]. International Journal for Numerical Methods in

- Fluids, 2009, 59(10):1 111-1 124.
- [5] 李钢, 孙宇, 董野. 基于 Fluent 仿真的流延辊流道设计研究 [J]. 塑料, 2008, 37(6):35-38.
- Li Gang, Sun Yu, Dong Ye. Design of casting roller's flow channel based on Fluent simulation[J]. Plastic, 2008, 37(6):35-38.
- [6] 李福森, 王栓虎, 李欣兴. 塑料薄膜在流延辊上冷却过程的数值模拟 [J]. 塑料科技, 2011, 39(2):35-38.
- Li Fusen, Wang Shuanhu, Li Xinxing. Numerical simulation of cooling process of plastic film on casting roller[J]. Plastics Science and Technology, 2011, 39(2):35-38.
- [7] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001:360-361.
- Tao Wenquan. Numerical heat transfer [M]. Second Edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001:360-361.

巴斯夫喷涂聚氨酯泡沫塑料获美国环境保护署认证

巴斯夫的喷涂聚氨酯泡沫塑料获得美国环境保护署 (EPA) 和国际标准评估服务委员会 (ICC-ES) 能源之星 (ENERGY STAR) 密封和隔热保温认证。EPA 住宅方案认证强调产品的能源效率和建筑应用。

“此次获得 ICC-ES 和美国 EPA 的密封和隔热保温认证也再次证明了巴斯夫恪守住宅节能和建筑安全的承诺。我们提供能满足多样、独立性能的优质产品。”巴斯夫技术专员 Eric Banks 表示:“EPA 能认可我们喷涂聚氨酯泡沫塑料产品的隔热保温性能,并将其纳入能源之星计划,我们感到很自豪。密封和隔热保温认证也是对我们产品为更舒适、节能的住宅所创造价值的认可。”

能源之星认证要求厂商能提供安装说明及应用图解。该计划针对美国墙体、天花板、屋顶板以及楼面系统所用的隔热保温材料。

(中国聚合物网)

DSM 在华成立塑料研发中心,助力中国连接器行业

DSM 工程塑料公司 (DSM Engineering Plastics) 是 DSM 高性能材料集团属下的一个业务单元,该公司现已在江苏省江阴市新建了一家研究和技术中心,为中国各地的客户提供支持服务。

据了解,全新的区域开发服务中心 (RDSC) 是一所世界级的实验室和应用工程技术设施,将为现有和未来的中国用户提供本地语言的技术支持。该中心提供的服务包括材料测试和特性鉴定,以及牌号和应用开发。新中心将提供现场支持服务,这项服务以往只能由 DSM 位于日本、荷兰、中国台湾或美国的其它技术设施提供。

DSM 工程塑料亚太区营销总监 Jan Waninge 称:“这是 DSM 在中国和亚洲工程塑料增长战略计划的重要里程碑,中国是 DSM 近期全球远景规划中最重要的市场之一。”

新中心初期将集中全力支持和扩大业已在不同国家由当地应用工程师开展的工作,他们为市场提供设计和仿真支持。

Jan Waninge 表示:“这种方式已为全世界用户带来好处。Stanyl PA46 HF 系列材料采用高流动性技术,能够满足全球连接器行业的需求。该系列产品的特点是流动性很高,而且材料强度毫不逊色,因此可以制造出流变长度很长、壁厚极小的连接器。Stanyl PA46 材料具有很强的引脚夹持力,以及很好的高温可焊性,它是现今连接器行业的首选材料。我预期随着我们现在及未来用户开始使用新技术中心,这个程

度的专用化不久也将在中国普及。” (工程塑料网)

可循环利用终极塑料研制成功

塑料在人们生活中极为常见,从电子设备到包裹、交通工具,而使用后的废塑料却很难分解,通常几百年也不会腐烂,它们燃烧时,可能使化学物品进入环境中,在空气中产生有毒物质。最近,美国北达科他州立大学 (NDSU) 研究人员开发出一种新型塑料,在特殊光照下能降解还原成分子,这些分子还可再次生产新塑料。相关论文发表在最近出版的《应用化学》上。

研究小组用水果中的果糖制作了一种分子溶液,然后将其转化为塑料 (聚合物)。据物理学家组织网近日报道,把这种塑料暴露在 350 nm 的紫外线下 3 h,就能完全分解为原来的可溶性分子。

“真正的可持续利用包括把材料分解为构成它的基本物质。我们证明了能把它分解为基本物质,并重新生成聚合物。”该校可持续材料科学中心的穆昆德·斯比说。他们用农作物中的油料种子、纤维素、木质素和蔗糖作为生产塑料的基本分子,再将基本分子合成高聚物分子,最终形成塑料。

“这种‘摇篮到摇篮’的方式带来了一种新塑料,能很容易降解,也为人们在生产终端产品时,减少对化石燃料的依赖及减少所需原材料提供了可能。”涂料与聚合物材料系教授迪恩·韦伯斯特说。

“我们的策略有可能用生物质造出新材料,使用后经光照降解,减轻环境中有害化学物质的压力。”西瓦古鲁·杰拉曼说。

该校联合北达科他实验项目激励竞争研究 (ND EPSCoR) 成立了可持续材料科学中心,多家实验小组联合生物质、可再生资源来生产聚合物和混合物。斯比的实验室负责制作单体和生物基触发器,西瓦古鲁小组专门研究光化学和光降解,韦伯斯特的小组在研究聚合物化学。“通过团队合作,我们能完成这项研究。我们需要每个人的专业知识来解决这一问题。”斯比说。

研究人员还指出,在把这种来自生物质的塑料做成产品、推向商业化之前,还需要进一步研究评估它的耐用性和强度。“分解塑料的最好触发器是什么?最好的单体是什么?我们能造出的最好高聚物是什么?”斯比说。在今后的两年里,他们还将把这种塑料用在汽车、电子器材及其它设备上,检验它们的工作性能。

(中国聚合物网)