

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.11.010

L型异型材气辅共挤气辅段长度的预测*

何建涛¹, 柳和生¹, 黄益宾², 黄兴元¹, 邓小珍¹

(1. 南昌大学机电工程学院聚合物成型实验室, 南昌 330031; 2. 上饶师范学院上饶市高分子材料辅助成型重点实验室, 江西上饶 334001)

摘要:以L型双层共挤异型材为研究对象,采用Phan-Thien and Tanner(PTT)本构方程,应用Arrhenius方程来描述温度对黏度的影响,通过有限元方法分析了聚丙烯(PP)/聚苯乙烯(PS)熔体在气辅共挤口模内的三维黏弹非等温流动过程,对比分析了不同流率下气辅共挤口模所需的最短气辅段长度,同时分析了口模出口面的剪切速率及第一法向应力差的分布情况。结果表明,气辅共挤并不能完全消除挤出胀大,但能极大地降低挤出胀大;通过分析流道内的压力、剪切速率及第一法向应力差分布可以确定一个合适的气辅段长度;随着熔体流率的增加,气辅共挤口模所需的最短气辅段长度也相应地增加,但增速并不明显。

关键词:异型材;气辅共挤;非等温;黏弹流动;数值模拟

中图分类号: TQ 320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)11-0046-05

Gas-assisted Length Prediction of L-shaped Profile Gas-assisted Coextrusion

He Jiantao¹, Liu Hesheng¹, Huang Yibin², Huang Xingyuan¹, Deng Xiaozhen¹

(1. Polymer Processing Research Lab, School of Mechanical and Electric Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Shangrao Key Laboratory for Auxiliary Processing of Macromolecular Material, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China)

Abstract: Taking L-shaped coextrusion profile as an example, the three-dimensional non-isothermal viscoelastic flow process of polypropylene(PP) and polystyrene(PS) in gas-assisted coextrusion die were investigated by the finite element method, the polymer melts were characterized by Phan-Thien and Tanner(PTT) constitutive equation and the Arrhenius equation was used as temperature-dependent viscosity law. The shortest gas-assisted length needed for the gas assisted die as well as the distribution of pressure, shear rate and the first normal stress difference at die exit were discussed in different flow rate. The results reveal that die swell can't be eliminated absolutely in gas-assisted coextrusion, but it can be reduced vastly. An appropriate gas-assisted length can be obtained after analysing the distribution of pressure, shear rate and the first normal stress difference in the die. The shortest gas-assisted length needed for the die increase as the flow rate increase, but the increasing speed is low.

Keywords: profile; gas-assisted coextrusion; non-isothermal; viscoelastic flow; numerical simulation

气辅挤出技术自2001年由R. F. Liang^[1]提出以来,在近几年得到了较快的发展。黄兴元等^[2-4]对气辅挤出的研究表明,气辅技术能基本消除传统挤出过程中的挤出胀大,黄益宾等^[5]对矩形分层气辅共挤的研究表明,气辅技术不仅能基本消除共挤过程中的挤出胀大,还能有效地缓解黏性包围现象。在气辅挤出成型中,气辅挤出口模气辅段长度是最关键的一部分,国内外学者对气辅段长度的研究表明,气辅段长度过短,弹性变形来不及回复,仍会产生挤出胀大,气辅段长度过长则会影响气垫膜层的稳定性,难以形成稳定的气辅挤出^[6-8]。

笔者以聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS)两聚合物熔体为研究对象,对两熔体在L型分层气辅共挤口模内的流动进行了三维黏弹非等温数值模拟,通过分析共挤流道内压力、剪切速率以及第一法向应力

差(N_1)的分布预测了L型分层气辅共挤口模所需的气辅段长度。

1 数值研究方法

1.1 几何模型和有限元模型

该模型为L型双层共挤异型材,两层熔体的厚度相等,沿挤出方向上分为过渡段和气辅共挤段,为减小计算量,只考虑熔体在模内流动区域,忽略熔体在模外流动区域。该几何模型如图1所示,OGHIJK为两熔体汇合面,也即气体入口面。ABCDEF为共挤口模入口1,A'B'C'D'E'F'为共挤口

* 国家自然科学基金资助项目(51163011);江西省青年科学基金资助项目(20121521090005);赣鄱英才555工程领军人才培养计划

联系人:柳和生,教授,主要从事高分子材料成型加工研究工作
收稿日期:2013-08-17

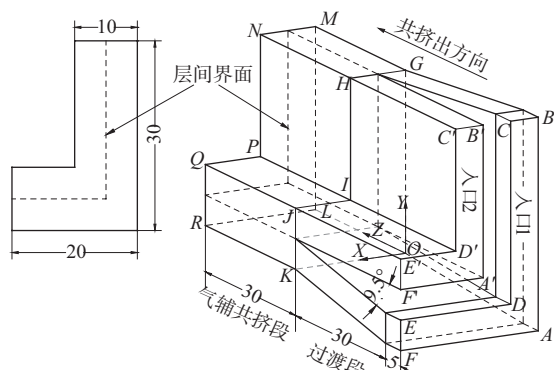


图1 几何模型

模入口2,过渡段两流道夹角为 9.5° ,该模型结构简单,形状规则,故采用8节点6面体单元来划分网格。由于在气体入口面附近流场变化较大,故在口模气辅段和气体入口面附近适当加密网格,图2为有限元网格模型。

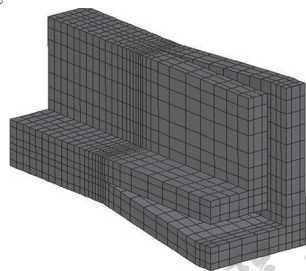


图2 有限元网格模型

1.2 数学模型

假设两种聚合物均不可压缩,熔体间互不相溶,流动为非等温稳态流动,忽略重力和惯性力的影响。在以上假设下,流场的控制方程如下:

连续性方程:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho V \cdot \nabla V = -\nabla P + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

$$\text{能量方程: } \rho C_p V \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \tau : \nabla V \quad (3)$$

式中: V ——速度矢量;

∇ ——哈密顿算子;

ρ ——熔体密度;

P ——熔体静压力;

τ ——偏应力张量;

C_p ——熔体定压比热容;

T ——熔体温度;

k ——熔体导热系数。

1.3 本构方程

使用能反映聚合物黏弹性且易收敛的 Phan-Thien and Tanner (PTT) 本构模型^[9],其方程如下:

$$\tau = 2\eta_2 D + \tau_1 \quad (4)$$

$$\exp \left[\frac{\varepsilon \lambda}{\eta_1} \text{tr}(\tau_1) \right] \tau_1 + \lambda \left[\left(1 - \frac{\xi}{2} \right) \nabla \tau_1 + \frac{\xi}{2} \Delta \tau_1 \right] = 2\eta_1 D \quad (5)$$

式中: η_1, η_2 ——零剪切黏度中弹性和黏性分量;

D ——形变速率张量;

τ_1 ——偏应力张量中弹性分量;

ε ——和拉伸黏度性能有关的参数;

λ ——松弛时间;

ξ ——和剪切黏度相关的参数。

偏应力张量 τ_1 上的 Δ 符号表示下随体时间导数, ∇ 表示上随体时间导数。

非等温条件下,考虑黏性生热对黏度的影响,温度对黏度的影响采用 Arrhenius 方程来描述^[10]:

$$\eta = A \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (6)$$

式中: η ——黏度;

A ——参考温度时的零剪切黏度;

E ——熔体活化能;

R ——气体常数, $8.32 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T_0 ——参考温度, K。

1.4 材料物性参数

模拟所用材料为 PP 和 PS,挤出温度为 473K,参考文献^[11-13]设置 PTT 本构参数及材料的其它参数,具体参数见表 1。

表1 材料参数

项 目	PP	PS
$\eta_0 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	1 500	2 700
λ / s	0.1	0.2
ε	0.16	0.23
ξ	0.25	0.18
s	0.12	0.12
$E / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	37.2	26.6
$k / [\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	0.15	0.17
$C_p / [\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	2 100	1 900
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	910	1 030

1.5 边界条件

分别用 f_n, f_s 表示边界面的法向应力和切向应力,用 v_n, v_s 表示边界面的法向速度和切向速度,不考虑熔体与周围环境的热交换。

(1) 口模入口面。

$ABCDEF$ 和 $A'B'C'D'E'F'$ 分别为入口 1 和入口 2, PP 和 PS 分别从入口 1 和入口 2 进入,两入口的流率分别称为 Q_1 和 Q_2 。假设入口处的流动为充分发展流,入口处的温度为 473K。

(2) 口模过渡段壁面。

假设壁面无滑移,采用边界条件 $v_n=0, v_s=0$,口

模壁面温度为 473K。

(3) 口模气辅段壁面。

假设壁面无摩擦,采用边界条件 $v_n=0, f_s=0$, 口模壁面温度为 473K。

(4) 口模出口面。

出口面(图1中LMNPQR)上熔体的 $f_n=0, v_s=0$ 。

(5) 层间界面。

忽略两熔体的表面张力,假设熔体间无相对滑移,界面上的速度场和应力场连续,界面上温度连续,热通量连续。

2 模拟结果分析

为了更直观地查看熔体压力、剪切速率及第一法向应力差沿挤出方向的变化规律,根据图1中的坐标系定义了4条轨迹线,分别为由点(-2.5, -2.5, -35), (-2.5, -2.5, -30), (2.5, 2.5, 0) 及 (2.5, 2.5, 30) 组成的轨迹 I, 由点(-5, 12.5, -35), (-5, 12.5, -30), (0, 15, 0) 及 (0, 15, 30) 组成的轨迹 II, 由点(7.5, 7.5, -35) 及 (7.5, 7.5, 30) 组成的轨迹 III, 由点(10, 20, -35) 及 (10, 20, 30) 组成的轨迹 IV。轨迹 I 和 III 主要考察两熔体在 L 型口模截面转角处的流场分布,因为口模壁面的剪切速率较大,且在气体入口附近会产生应力集中,轨迹 II 和 IV 主要考察 L 型口模截面长边两侧壁面的流场变化情况。在挤出成型过程中,最常改变的工艺参数为挤出流率,因此,计算了3种流率下的流场分布, $Q_1=1.8 \text{ cm}^3/\text{s}$, $Q_2=1.4 \text{ cm}^3/\text{s}$; $Q_1=2.7 \text{ cm}^3/\text{s}$, $Q_2=2.1 \text{ cm}^3/\text{s}$; $Q_1=3.6 \text{ cm}^3/\text{s}$, $Q_2=2.8 \text{ cm}^3/\text{s}$, 分别称为流率 Q_A , Q_B 和 Q_C 。

2.1 熔体压力分析

图3为不同挤出流率时熔体压力沿轨迹 I 和 III 的分布情况,由图中曲线可以看出随着挤出流率的增加,所需的挤出压力也越大。以流率 Q_A 为例,对气辅段曲线放大分析,发现在 $Z=4 \text{ mm}$ 左右熔体压

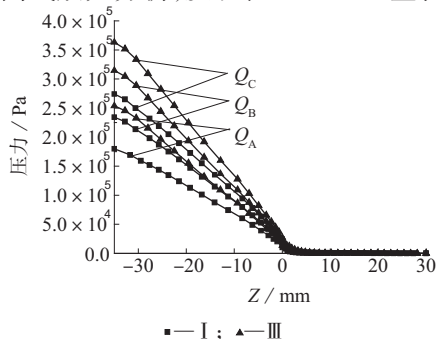


图3 不同流率时轨迹 I 和 III 的压力分布

力值已非常接近零,但仍有一个很小的压力值,在该点之前,熔体压力降低较快,而在该点之后,熔体压力缓慢向零靠近。因此,选择该点作为流率 Q_A 时气辅共挤口模所需的最短气辅段长度参考点,因为超过该点后通过加长气辅段来减小压力值没有明显的效果,反而会使气辅挤出不稳定。在以下剪切速率和第一法向应力差分析中,也采用类似的方法确定最短气辅段长度。分析发现3种流率所需的最短气辅段长度区别不大,分别为4,5和6 mm左右。

2.2 剪切速率分析

图4至图6分别为3种流率下各轨迹沿挤出方向的剪切速率分布,从3个图形中均可看出口模壁面(II和IV)的剪切速率要比其余两轨迹的大,同时,随着共挤流率的增加,剪切速率也随之增加。通过观察轨迹 I 和 II 在 $Z=0 \text{ mm}$ 之前的剪切速率分布可以发现其呈上升趋势,这是由于在过渡段,该侧流道横截面积沿挤出

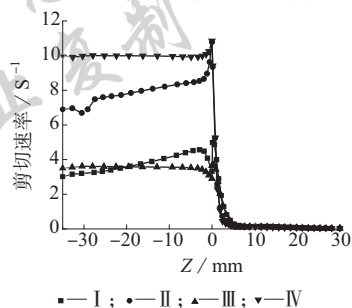


图4 流率 Q_A 时各轨迹的剪切速率分布

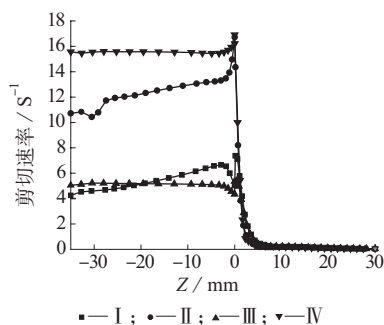


图5 流率 Q_B 时各轨迹的剪切速率分布

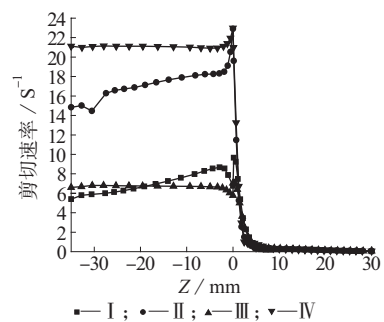


图6 流率 Q_C 时各轨迹的剪切速率分布

方向逐渐减小,从而造成熔体流动加快,故剪切速率也增大。在气体注入处,熔体与口模壁面由粘着无滑移突变成完全滑移,这种运动状态的突变造成熔体剪切速率在气体注入处产生突变,剪切速率突然增大,而后又迅速减小。应用前文的分析方法得出3种流率下的最短气辅段长度分别为10,11和12 mm左右。

2.3 N_1 分析

N_1 可以有效地表征高分子材料的弹性大小,其值大小对挤出胀大和挤出表面不稳定现象有很大的影响^[14]。图7至图9分别为3种流率下各轨迹的 N_1 分布。与剪切速率分布类似, N_1 随着流率的增加而增大,且口模壁面处的值较大。同时,在气体入口处 N_1 会产生突变,从而造成应力集中。采用前文的分析方法,3种流率的最短气辅段长度分别为10,11和12 mm左右。

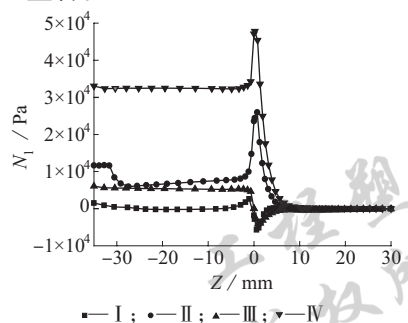


图7 流率 Q_A 时各轨迹的 N_1 分布

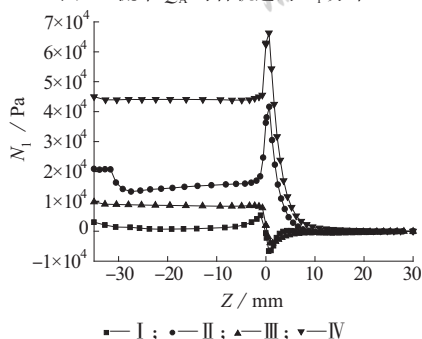


图8 流率 Q_B 时各轨迹的 N_1 分布

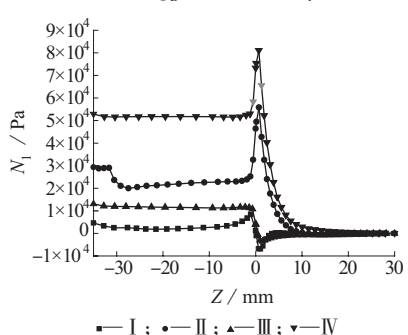


图9 流率 Q_C 时各轨迹的 N_1 分布

2.4 气辅段长度的确定

以上的分析表明,流率对气辅段长度的影响并不大,在此情况下可忽略流率的影响。3种流率下的最短气辅段长度分别为10,11和12 mm。在口模设计的过程中,考虑到熔体的松弛时间等其它因素,应在此值基础上将气辅段长度延长10~20 mm^[6]。

2.5 口模出口面剪切速率、 N_1 分布

为了研究熔体经过气辅段后的流场分布,图10至图12分别列出了3种流率下口模出口面的剪切速率及 N_1 分布云图。从图10中可以看出,熔体经过气辅段后仍有极少量的剪切速率分布和 N_1 分布,证明熔体内部仍有少量的残余应力,由此可以推测熔体在离开口模后仍会有少量的挤出胀大,且对比3个图可知流率越大,残余应力越大,从而会导致更大的挤出胀大。以上研究表明气辅技术并不能够完全消除挤出胀大,但可以极大地减小挤出胀大。这与棒材气辅挤出和矩形分层气辅共挤实验结果相符^[2,5]。

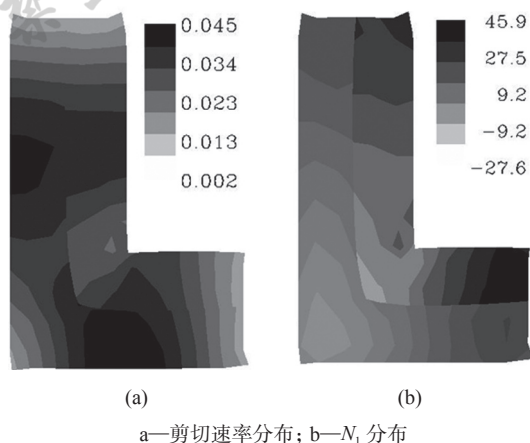


图10 流率 Q_A 时口模出口面剪切速率及 N_1 分布

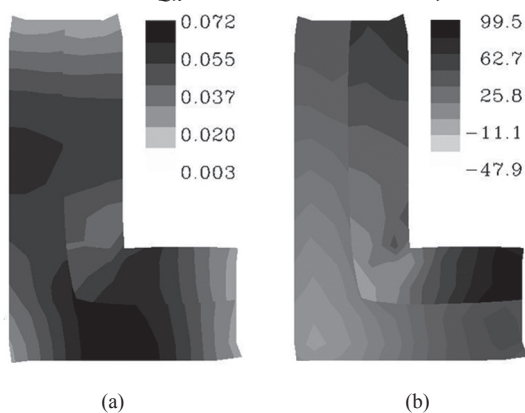


图11 流率 Q_B 时口模出口面剪切速率及 N_1 分布

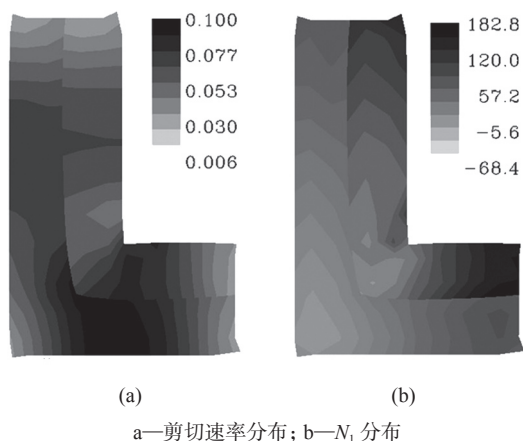


图 12 速率 Q_c 时口模出口面剪切速率及 N_1 分布

3 结论

数值模拟结果表明,气辅技术并不能完全消除挤出胀大,但可以极大地减小挤出胀大。通过对流道内的压力、剪切速率和第一法向应力差进行分析可以确定一个合适的气辅段长度。随着熔体流率的增加,气辅共挤口模所需的最短气辅段长度也相应地增加,但增速并不明显。因此,在口模设计之前,可以根据挤出流量先进行数值模拟,然后将模拟结果作为口模设计的参考,这将有助于提高气辅共挤口模设计的效率和可靠性。

参考文献

- [1] Liang R F, Mackley M R. The gas-assisted extrusion of molten polyethylene[J]. Journal of Rheology, 2001, 45(1):211-226.
- [2] 黄兴元,柳和生,周国发,等. 气体辅助挤出的实验研究[J]. 中国塑料, 2005, 19(3):17-19.
Huang Xingyuan, Liu Hesheng, Zhou Guofa, et al. The experimental study of air-assisted extrusion of polymer[J]. China Plastics, 2005, 19(3):17-19.
- [3] 柳和生,卢臣,黄兴元,等. T型异型材气辅口模挤出胀大的数值模拟和实验研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(1):158-161.
Liu Hesheng, Lu Chen, Huang Xingyuan, et al. Numerical simulation and experimental study on die swell of T-shaped plastic profile extrusion from a gas-assisted die[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(1):158-161.
- [4] 肖建华. 气辅挤出成型中挤出物直径的理论预测和实验研究[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(5):35-37.
Xiao Jianhua. Theoretical predict and experimental research of product diameter in gas-assisted extrusion[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(5):35-37.
- [5] 黄益宾. 聚合物气体辅助共挤成型的理论和实验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
Huang Yibin. Theoretical and experimental study on polymer gas-assisted co-extrusion[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
- [6] 黄兴元. 聚合物气体辅助口模挤出成型的理论及实验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2006.
Huang Xingyuan. Theoretical and experimental study of polymer gas-assisted extrusion from dies[D]. Nanchang: Nanchang University, 2006.
- [7] 肖建华,柳和生,黄兴元,等. 气辅挤出胀大比与滑移段长度的关系[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(7):166-169, 174.
Xiao Jianhua, Liu Hesheng, Huang Xingyuan, et al. The relationship between extrudate swell ratio and the length of slip part in gas-assisted extrusion[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2009, 25(7):166-169, 174.
- [8] Arda D R, Mackley M R. Sharkskin instabilities and the effect of slip from gas-assisted extrusion[J]. Rheol Acta, 2005, 44(4):352-359.
- [9] Phan-Thien N, Tanner R I. A new constitutive equation derived from network theory[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1977, 2(4):353-365.
- [10] 徐佩弦. 高聚物流变学及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 59-60.
Xu Peixian. Polymer rheology and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 59-60.
- [11] 黄益宾,柳和生,黄兴元. 聚合物双组分复合共挤成型的挤出胀大研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(4):657-665.
Huang Yibin, Liu Hesheng, Huang Xingyuan. Study on extrudate swell in polymer bicomponent coextrusion process[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4):657-665.
- [12] Ishikawa T, Kihara S, Funatsu K. 3-D numerical simulations of nonisothermal flow in co-rotating twin screw extruders[J]. Polymer Engineering and Science, 2000, 40(2):357-364.
- [13] Wu Tingqi, Jiang Bo, Xu Shuhua, et al. Three-dimensional nonisothermal simulation of a coat hanger die[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 101(5):2911-2918.
- [14] 肖建华,柳和生,黄兴元,等. 气辅挤出口模中滑移段长度对压力降和第一法向应力差的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(6):167-170.
Xiao Jianhua, Liu Hesheng, Huang Xingyuan, et al. Influence of slip length of gas-assisted extrusion die on pressure drop and first normal stress[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2009, 25(6):167-170.

中国需求下滑导致国际纤维价格下降

据日本经济新闻报道,用于服装和内饰产品的纤维材料的国际价格正在下跌。以作为合成纤维代表的聚酯和天然

纤维的代表棉花为例,中国的春季服装需求呈现增长乏力的态势。此外,聚酯还受到作为原料的原油降价的影响。

(中国聚合物网)