

单螺杆挤出机计量段模拟研究

Simulation of measurement section of single screw extruder for PLA

黄志刚¹ 刘 凯^{1,2} 李梦林¹ 张宏建¹

HUANG Zhi-gang¹ LIU Kai^{1,2} LI Meng-lin¹ ZHANG Hong-jian¹

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048; 2. 北京二七轨道交通装备有限责任公司, 北京 100072)

(1. School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
2. Beijing Feb. 7th Railway Transportation Equipment Co., Ltd., Beijing 100072, China)

摘要:针对 3 种不同类型聚乳酸(PLA)专用螺杆的计量段结构,运用 Polyflow 软件进行三维流场模拟 3 种不同类型混炼结构,分析聚乳酸挤出过程的三维等温流场。结果表明:在相同的工艺条件下,不同的单螺杆结构,流道内聚乳酸各物理量的值存在较大差异性;普通型单螺杆的熔体的轴向速度和压力较大,利于螺杆挤出过程,但熔体剪切速率小、熔体黏度大,从而导致挤出熔体质量较差;菠萝型单螺杆的熔体的轴向速度和剪切速率较大且黏度值较小,因此具有较好的塑化能力;菠萝型和销钉型单螺杆在流道内会出现环流的情况,不利于熔体输送。

关键词:聚乳酸;单螺杆挤出机;计量段;流场模拟

Abstract: For polylactide (PLA) dedicated screw rod of different type of melt conveying paragraph, using Polyflow software for three dimensional flow field simulation three species different type mixed refining structure, analysis polylactide extrusion process of three dimensional isothermal flow field. Results showed that: in same of process conditions, different of single screw rod structure conditions, the physical properties of flow road within polylactide exists differences; ordinary type single screw rod of melt body of axis to speed and pressure larger, conducive to screw rod extrusion process, but melt body shear rate is smaller, and melt viscosity is bigger, led to extrusion melt body of quality poor; the axial velocity and shear rate of pineapple type single-screw melts is larger, but viscosity is smaller, so it has better plasticizing ability; pineapple type single-screw and pin type single-screw in circulation will flow in the case, and is not conducive to melt-conveying.

Keywords: polylactide; single screw extruder; measurement section; flow field simulation

随着人们对食品包装材料的需求量及环境友好性要求

逐年提高,可生物降解材料逐渐成为当前研发的热点^[1-2]。至今为止,作为已经规模化的可生物降解塑料聚乳酸(PLA)全球年产能已达到 15 万 t 左右^[3]。作为中国聚乳酸加工的主要方法之一,单螺杆挤出成型在聚乳酸大规模的加工生产中有着举足轻重的地位。对于螺杆挤塑机,各国学者对螺杆的固体输送、停留时间、流场等理论进行研究^[4-6],并进行了相关的优化等。Moysey 等^[7]采用离散单元法(DEM)对单螺杆挤出机中固体颗粒的流入和输送的过程进行模拟,同时研究了固体输送段的压力分布情况^[8];Jaluria 等^[9]通过理论分析和数值模拟的方法,研究了固体输送段和螺槽中的欠料区模型;Hwang 等^[10]通过三维数值模拟分析,建立了紊乱型单螺杆的非线性模型等。但针对聚乳酸挤出的三维流场模拟研究,目前中国还未涉及,因此加强对聚乳酸挤出过程的研究对实际生产具有指导意义。本试验在理论研究基础上,运用流体仿真软件 Polyflow,针对 3 种不同类型聚乳酸挤出机专用螺杆的计量段进行模拟分析,得到 3 种螺杆计量段流道内轴截面 PLA 熔体的速度场、轴向速度场、压力场、剪切速率场、速度场和黏度场,并对 3 种螺杆混合性能进行相关分析。旨为后续研究 PLA 螺杆挤出机提供依据。

1 数值仿真方法

运用 Polyflow 计算过程见图 1。

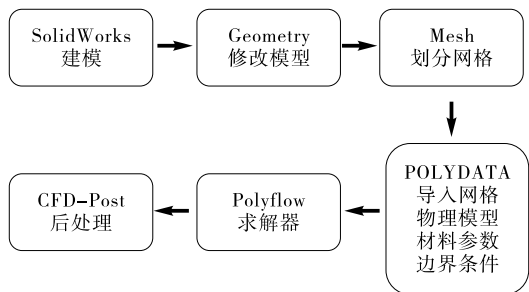


图 1 Polyflow 计算过程导图

Figure 1 Process map of Polyflow calculation

作者简介:黄志刚(1966—),男,北京工商大学教授,博士。
E-mail:huangzg@btbu.edu.cn

收稿日期:2015-08-30

1.1 物理模型

1.1.1 3 种单螺杆几何模型的建立 采用 Polyflow 的网格重叠技术,运用 SolidWorks 对 3 种单螺杆分别进行物理建模,然后对其流道即熔体区域进行建模。则计算模型就分为熔体区域和 3 种不同的单螺杆两个部分。其中流道为被计算部分,单螺杆为运动部件。

普通型单螺杆为普通螺纹型单螺杆。普通螺纹型单螺杆是目前单螺杆挤出行业运用最早也是运用最广的一种单螺杆,本试验所用的普通螺纹型单螺杆基本参数为:单螺杆根径 0.035 m,螺距 0.040 m,螺棱宽度 0.004 m 螺杆长度 0.170 m,落槽深度 0.005 m。其螺纹的横截面采用梯形横截面(图 2),普通螺纹型单螺杆的二维正视图见图 3。

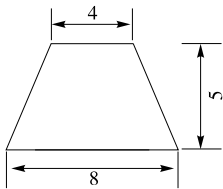


图 2 螺纹横截面图

Figure 2 Cross-sectional view of thread

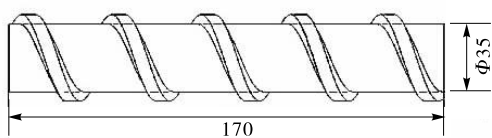


图 3 普通型单螺杆计量段螺纹示意图

Figure 3 Sketch map of measurement section of ordinary type single-screw

菠萝型单螺杆其前面部分为普通螺纹,后面则为菠萝混炼头,普通螺纹段的参数数据与普通型单螺杆一致,混炼段由 64 个小长方体构成,长方体的底为 8 mm 的正方形,高 5.5 mm,每两个长方体之间的间距为 8.69 mm。菠萝型混炼头的具体参数见图 4。

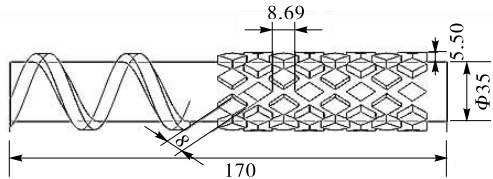


图 4 菠萝型混炼头单螺杆计量段螺纹示意图

Figure 4 Sketch map of measurement section of pineapple type single-screw

销钉型单螺杆与菠萝型单螺杆相似,其前端螺纹部分为普通螺纹,螺纹数据与普通型单螺杆的齿形一致,销钉型单螺杆的根径为 35 mm,销钉段由 80 个销钉组成,销钉由一个圆柱和半球组成,圆柱底的半径为 2 mm,高为 3.5 mm,圆柱的上方是一个半径为 2 mm 的半球。销钉段的数据见图 5。

1.1.2 流动区域几何模型和边界条件 流动区域为环状结构,其内径为 35 mm,外径为 50 mm,长度为 170 mm。

在模拟计算时,模型采用的是进口出口零压差的压力条

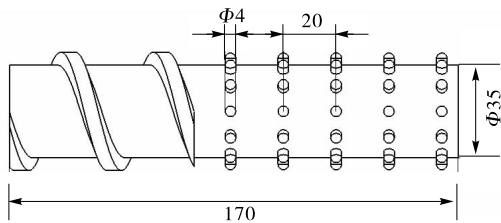


图 5 销钉型单螺杆计量段螺纹示意图

Figure 5 Sketch map of measurement section of pin type single-screw

件,流道壁面无滑移的条件,整个模拟过程的温度为 190 ℃,螺杆转速为 60 r/min。

1.2 数学模型

1.2.1 基本假设 在进行单螺杆挤出过程的三维流场模拟计算时,需要考虑流场的复杂性。这与物料的性质、流动时的状态、采用的加工条件以及流场的几何形状等因素有关。为了达到方便计算以及使流动过程达到研究要求的目的,可以做出以下几点假设:

- (1) 聚合物熔体为不可压缩流体;
- (2) 聚合物熔体在叶片单元内的流动是层流;
- (3) 壁面无滑移,即物料在机筒内壁面以及螺杆表面无滑移;
- (4) 物料在螺杆流道内的状态是三维拟稳态层流,此种状态下流道全充满;
- (5) 熔体的重力、惯性忽略不计。

1.2.2 控制方程 基于上述假设条件,描述螺杆流道内 PLA 流动的控制方程为:

连续性方程:

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{1}$$

运动方程:

$$\nabla p I + \nabla \cdot \tau = 0 \tag{2}$$

本构方程:

$$\tau = 2\eta(\dot{\gamma})D \tag{3}$$

$$D = (\nabla u + \nabla u^T)/2 \tag{4}$$

式中:

u ——速度, m/s;

p ——压力, Pa;

I ——单位张量;

τ ——应力张量, Pa;

η ——表观黏度, Pa · s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s⁻¹;

D ——变形速率张量, s⁻¹。

描述聚合物流变特性的本构方程有:牛顿流体、幂律和 Carreau 等方程。本试验选用 Carreau 方程,Carreau 模型方程既能够反映高聚物熔体在低剪切速率和高剪切速率的牛顿流体特性,又能反映高聚物熔体在中间剪切速率的剪切变稀特性。在温度为 190 ℃ 的条件下,PLACarreau 本构方程模型方程为:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 (1 + \lambda_c^2 \dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2} \tag{5}$$

式中:

η_0 ——零剪切黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

λ_c ——松弛时间, s ;

n ——非牛顿指数。

1.3 有限元模型的建立

为精确计算,使用有限元法求解非线性耦合的方程,采用六面体和四面体网格划分方法分别对形状规则的挤出通道和不规则的单螺杆部分进行网格划分。3 种构型的单螺杆以及其流道划分的网格见图 6。

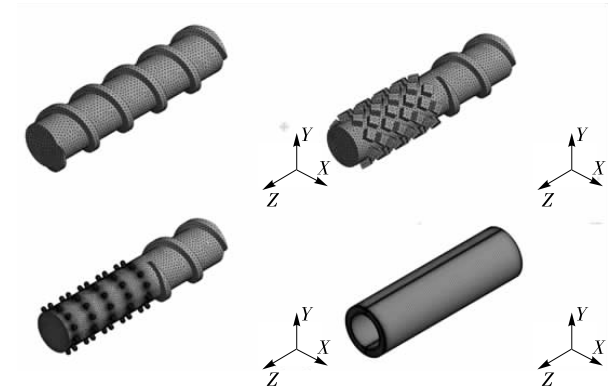


图 6 3 种构型的单螺杆以及其流道划分的网格图

Figure 6 3 types of single screws and meshing of flow road

其中普通型单螺杆、菠萝型单螺杆、销钉型单螺杆螺杆、流道区域网格数分别为 54 923,60 943,76 836,339 360,节点数分别为 11 345,13 116,16 325,35 700。

螺杆的运动会导致网格的重复划分,为了克服此弊端给计算过程带来的繁复工作,在模拟中采用了 Polyflow 软件特有的网格叠加技术。根据这一技术,软件计算时会自动将料筒流道部分的网格和单螺杆组合在一起,生成真实流道的网格。当流道变化时, Polyflow 会自动根据螺杆转速和在 Polydata 中设置的时间步长重新生成新的流道实体和相应网格。根据 Polyflow 的网格叠加技术所构建出来的三维网格,螺杆流道区域网格均为 339 360,3 种螺杆网格叠加之后的网格数依次为 394 283,400 303 和 416 196。

对于离散后的方程代数数组的数值求解,每个单元内压力用线性插值,速度用 mini-element 插值的方法,黏度采用 Picard 法进行迭代,采用隐式欧拉法进行求解。全部的求解过程在 HPXW9300 工作站上完成。

2 结果与分析

在进出口压差恒定为零的条件下,把挤出过程的工艺条件设定为,单螺杆的转速 60 r/min,使用 Polyflow 软件数值仿真模拟不同的螺杆结构在相同的转速和温度条件下单螺杆挤出机计量段内 PLA 熔体的三维等温流场,分析 3 种结构单螺杆流道内轴截面 PLA 熔体的轴向速度场、压力场、剪切速率场、速度场和黏度场。

2.1 轴向速度场图分析

图 7 为普通型单螺杆、菠萝型单螺杆和销钉型单螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的轴向速度场。由图 7 可知,轴向速

度最大的位置出现在落槽最中间的位置,菠萝型单螺杆流道内熔体的较大轴向速度值分布范围最广,最大的轴向速度出现在菠萝型螺纹的螺槽内,普通型单螺杆螺筒的最大轴向速度值次之,且分布范围比较广,销钉型单螺杆只是在前面的常规螺纹阶段出现了最大的轴向速度,在销钉阶段没有出现较大的轴向速度值;从流场图来看,普通型单螺杆提供的轴向输送速度比较稳定但是最大值不如菠萝型单螺杆,菠萝型单螺杆能提供最大的轴向速度,但是在挤出过程中速度起伏过大不利于挤出,销钉型单螺杆的两项指标最弱。

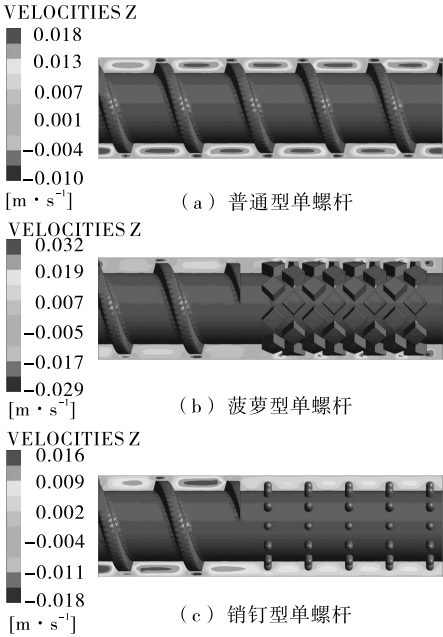


图 7 3 种单螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的轴向速度场
Figure 7 Axial velocity field axial section view of PLA melt of 3 types single screws measurement section

2.2 压力流场图分析

图 8 为普通型单螺杆、菠萝型单螺杆和销钉型单螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的压力流场图。由图 8 可知,菠萝型单螺杆的压力最大值最大,但是分布区域较小,仅在常规螺杆与混炼段螺纹的接触位置产生了较大压力差,这样比较有利于物料混合。普通型单螺杆居中,且其压力分布较为均匀。销钉型螺杆压力最大值最小。可见菠萝型单螺杆的建压能力最强,销钉型单螺杆螺筒的建压能力居中,普通型单螺杆的最弱。

2.3 剪切速率流场图分析

图 9 为普通型单螺杆、菠萝型单螺杆和销钉型螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的剪切速率场。由图 9 可知,普通型单螺杆流道内熔体的剪切速率分布都比较均匀,菠萝型单螺杆流道内熔体的剪切速率最大,但是分布不均匀,低剪切速率占的面积较大,销钉型大螺杆跟普通型单螺杆相似,但是低剪切速率分别范围较广。由于大的剪切速率会减少熔体停留时间不利于提高熔体质量,但由图 9 可知高剪切速率仅分布在螺棱部分,而非熔体主要分布的螺槽部分,故菠萝型单螺杆的高剪切速率并未对停留时间造成较大影响。

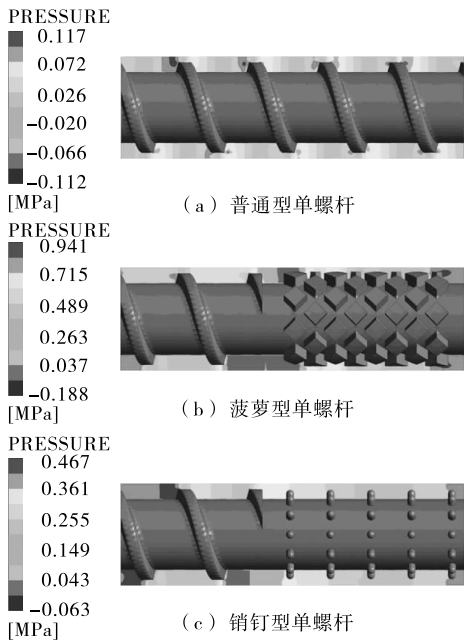


图 8 3 种单螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的压力流场图
Figure 8 Pressure flow field axial section view of PLA melt of 3 types single screws measurement section

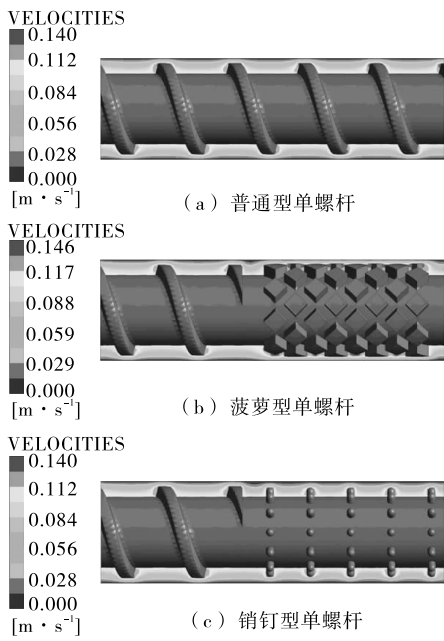


图 10 3 种单螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的速度场
Figure 10 Velocity field axial section view of PLA melt of 3 types single screws measurement section

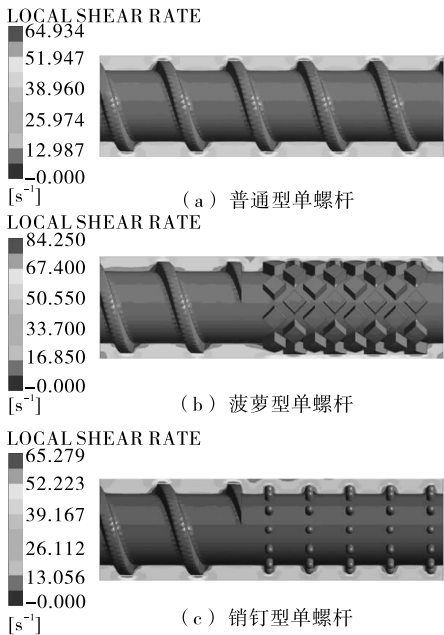


图 9 3 种单螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的剪切速率场
Figure 9 Shear rate field axial section view of PLA melt of 3 types single screws measurement section

2.4 速度流场图分析

图 10 为普通型单螺杆、菠萝型单螺杆和销钉型单螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的速度场。由图 10 可知,菠萝型单螺杆流道内靠近单螺杆螺棱位置的 PLA 熔体速度较大,且明显比普通型单螺杆和销钉型单螺杆的速度要大,但靠近机筒处速度几乎为零,速度分布梯度较大,整体速度没有普通型单螺杆和销钉型单螺杆的均匀,普通型单螺杆、菠萝型单螺杆和销钉型单螺杆流道中心轴截面的平均速度分别为 9.777×10^{-3} , 12.103×10^{-3} , 9.748×10^{-3} m/s,菠萝型单螺杆流道内 PLA 熔体的整体平均速度明显较大。

2.5 黏度流场图分析

图 11 为普通型单螺杆、菠萝型单螺杆和销钉型单螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的黏度场。由图 11 可知,3 根单螺杆的黏度最小值都出现在螺棱周围,且黏度最大值差别不大,但是菠萝型单螺杆的黏度最大值比普通型单螺杆和销钉型单螺杆的要略小,结论不明显。但是根据图 12 可知,菠萝型单螺杆的黏度值要远小于其余两根螺杆,所以在某种程度上可以说明菠萝型单螺杆的塑化能力要比其它两根螺杆要好。

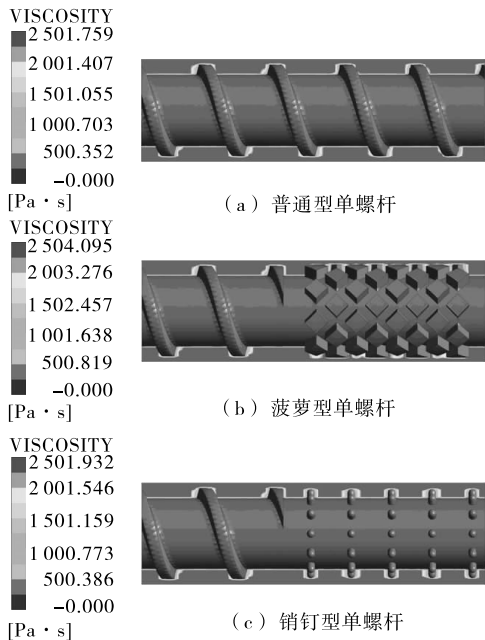


图 11 3 种单螺杆计量段轴截面 PLA 熔体的黏度场
Figure 11 Viscosity field axial section view of PLA melt of 3 types single screws measurement section

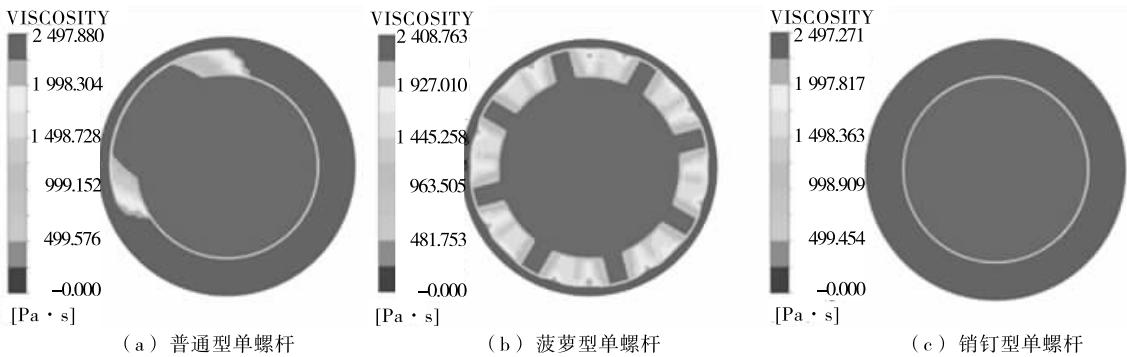


图 12 3 种单螺杆通道内横截面 PLA 熔体的黏度场

Figure 12 Viscosity field cross-sectional view of PLA melt of 3 types single screws measurement section

3 结论

- (1) 不同的单螺杆结构在相同的工艺条件下,单螺杆流道内各物理量的值存在较大差异性。
- (2) 在同种转速以及温度条件下,普通型单螺杆的熔体的轴向速度和压力都明显偏大,非常有利于螺杆挤出过程,表明其螺杆挤出最顺畅。但是此螺杆的熔体的剪切速率偏小,且熔体的黏度偏大,从而导致挤出熔体的质量较差。
- (3) 菠萝型单螺杆的熔体的轴向速度和剪切速率较大,且菠萝型单螺杆的黏度值要远小于其余两根螺杆,所以菠萝型单螺杆具有较好的塑化能力。
- (4) 菠萝型和销钉型单螺杆的压力以及销钉型单螺杆的轴向速度出现负值即在距离出口 50 mm 的这个平面出现了环流的情况,这种情况不利于熔体输送的进程,会使单螺杆熔体输送的过程变得缓慢。

参考文献

[1] Zhou Ying-xin, Huang Zhi-gang, Diao Xiao-qian, et al. Characterization of the effect of REC on the compatibility of PHBH and PLA[J]. Polymer Testing, 2015, 42: 17-25.

[2] 冯瑞华. 生物降解材料研究和产业发展分析[J]. 材料导报, 2014, 28(9): 119-123.

[3] Weng Yun-xuan, Zhou Ying-xin, Zhang Min. The development and commercialization of biobased[J]. Biodegradable Plastics in China Industrial Biotechnology, 2014, 10(2): 73-78.

[4] Funaki A, Takubo T, Kanai T. Experimental analysis for extrusion screw geometry to produce highly transparent polypropylene sheets [J]. Polymer Engineering and Science, 2010, 50(2): 420-427.

[5] 黄志刚, 刘凯, 付晓宇, 等. 单螺杆挤出机固体输送段的优化设计[J]. 中国塑料, 2014, 28(11): 104-107.

[6] 张先明, 许忠斌, 冯连芳. 螺杆挤出机中停留时间分布模拟研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 21(6): 1-5.

[7] Moysey P A, Thompson M R. Modelling the solids inflow and solids conveying of single-screw extruders using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2005, 153(2): 95-107.

[8] Moysey P A, Thompson M R. Discrete particle simulations of solids compaction and conveying in single screw extruder[J]. Polymer Engineering and Science, 2008, 48(1): 62-73.

[9] Jaluria Yoqesh, Yan L, Chiruvella R V. Modeling and simulation of the solids conveying and unfilled regions in polymer extrusion[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1999, 18(1): 15-26.

[10] Hwang W R, Kwon T H, 蒋果. 紊乱型单螺杆挤出机的动力学建模及其三维数值分析[J]. 橡塑技术与装备, 2002, 28(1): 12-19.

信息窗

美研究人员称高脂饮食影响人认知能力

吃高脂饮食可不止令你发胖那么简单。美国佐治亚医学院研究认为,它还会影响你的认知能力。

研究人员把雄性小鼠分成两组,给予不同饮食。一组小鼠饮食中 10%热量来自饱和脂肪,另一组则有 60%。研究人员分别在 4 周、8 周、12 周过后给小鼠测量体重、食量、胰岛素与血糖,并分析它们大脑海马体中的突触标记以及小神经胶质细胞被激活后产生的细胞活素。大脑中的海马体负责学习与记忆,突触标记负责神经连接。

研究人员发现,12 周后高脂饮食的老鼠都变得肥胖,

细胞活素增加、突触标记减少、活性降低。研究人员在《大脑、行为与免疫》杂志上发表文章说,体内堆积过多脂肪会引发炎症,从而刺激小神经胶质细胞做出免疫反应——吃掉大脑中的感染物质。随着老鼠变得肥胖,小神经胶质细胞越来越“懒”,它们不再四处游走,而是就地开始“吃”神经突触。这让老鼠的学习效率下降。不过也不要太焦虑,研究人员还发现,只要坚持低脂饮食 2 个月,恢复正常体重,上述情况就会发生逆转。

(来源:www.cifst.org.cn)