http://pmse.scu.edu.cn

一种折流板双螺杆构型挤出压力脉动响应

喻慧文，魏 矗，王志群，揭旭彰，董沛洲，赵中文，徐百平
（五邑大学 智能制造学部，广东 江门 529020）

摘要：文中提出了一种带有折流板的双螺杆结构，旨在混炼过程中引入对称破缺机理并降低挤出过程的压力波动。为探索折流板双螺杆的挤出特性，自行研制了全程可视化的实验样机。以常温黏弹流体羧甲基纤维素钠（CMC-Na）为实验流体，测量了传统及折流板双螺杆流道机头处的压力响应。首次通过傅里叶变换方法分析了压力脉动的产生机理，探究了螺杆构型、转速及喂料量对压力脉动的影响。结果表明，在较低螺杆转速和喂料量条件下，全充满状态下挤出压力的脉动周期与螺杆转动的周期一致，压力波动幅度随着螺杆转速的增加而增加；压力随喂料量增加而增加，但波动随着喂料量的增加而减小；螺杆旋转1周，传统双螺杆压力呈现双峰曲线，而折流板双螺杆为单峰分布，且峰值更小。粒子图像测速（PIV）显示，折流板双螺杆内啮合区存在物料相互交汇现象，保持啮合的同时实现横向和纵向开放连通，因而导致了压力脉动幅度较小。

关键词：折流板双螺杆；黏弹流体；可视化；压力响应；粒子图像测速
中图分类号：TQ315 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2023）08-0104-10

挤出成型是高分子材料加工的主要成型方式，双螺杆挤出机凭借良好的加工性能成为挤出成型领域的主要加工装备。由于输送过程周期性正位移机理的存在，导致挤出过程不稳定、挤出产品品质不均、表面粗糙等问题，因此，双螺杆挤出体积流量的稳定性影响机理受到越来越多的关注。

为实现双螺杆的稳定挤出，Noriege等[1]提出可以通过控制挤出机输出口模的温度和压力来实现输出体积流量的稳定。对于机头压力的控制，主要通过增加挤出机螺杆的长径比[2]或在机头内设计稳压设备。吴大鸣等[3]研发了一种并联式稳压装置，将装置安装在挤出机与机头之间，相较于传统的熔体齿轮泵[4]，稳压效果得到一定的提升。但是类似添加零部件的方法效果有限，且会降低挤出机的挤出效率。Previdi等[5]研发了一种单螺杆挤出机流量反馈控制系统，系统通过调节机头处的温度和压力进而控制机头流量，并取得了良好的效果。Mitroshin [6,7]等提出计量区域内熔融聚合物压力脉动的频率与挤出机螺杆转速有关，开发了控制挤出机机头压力的系统，通过改变螺杆转速来控制成型工具中的聚合物熔体压力，从而稳定挤出机的瞬时体积生产率，将电缆生产中机头压力脉动幅度降低了52倍，电缆绝缘直径的不规则性也降低，显著提高了电缆的质量，有效保证了挤出机生产效率。此外，研究者们从螺杆结构、挤出工艺等参数对机头压力影响的思路出发，求得了压力计算数学模型[8,9]，从而从改善螺杆排布的思路来提升挤出机机头的稳压效果。

另一方面，混合混炼过程决定物料的熔融效率及塑化质量，为提升混合混炼性能以及挤出过程压力的稳定性，徐百平等[10]将混沌场引入双螺杆加工过程中，发明了一种新型的折流板双螺杆结构。该结构仍然保持2根螺杆的相互啮合实现自洁，螺杆转速比仍为1:1，但打破了左右螺杆的对称性，使得

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0185
收稿日期：2022-11-06
基金项目：国家自然科学基金资助项目（12102306，11972023）；广东省基础与应用基础研究基金（2019A1515110316）；广东省教育厅重点项目（2020ZDZX2051）
通讯联系人：徐百平，主要从事先进成型理论与加工方法研究，E-mail: xubaiping2003@163.com；
喻慧文，主要从事先进成型理论与加工方法研究，E-mail: ddlianyi@163.com

物料在加工过程中保持空间不断变换，经历不断的拉伸与压缩，从而实现了良好的混合性能。

同时，交变的作用力场也为折流板双螺杆的性能探索增加了难度，尤其是螺杆啮合区的速度场及物料流动路径的变化。诸多学者通过可视化挤出设备对双螺杆的物料流动状态、运动轨迹展开了探索。喻慧文等[11,12]基于一种全程可视化双螺杆挤出机通过可视化探索了非牛顿流体在差速双螺杆中的混合过程，考察了不同工况下流体输送状态和轴向混合能力，建立了输送理论模型以及新型螺杆的加工表征方法。

近年来，可视化实验技术也为研究流体输送过程提供了更多的关键细节。其中，粒子图像测速（PIV）技术是一种常用方法，可以实现非接触式的瞬时全流场速度测量。Qi 等[13]通过微 PIV 测量和计算流体动力学 (CFD) 模拟研究了同轴微通道中的液-液两相流；Goyal 等[14]将 PIV 技术应用于高杨程型弗朗西斯涡轮机启动过程中的同步时间相关压力和速度的测量，分析了涡轮机中不稳定性的原因。本文进一步将 PIV 技术用于更加复杂的可视化双螺杆挤出机，测量关键位置的瞬时速度场，为理解挤出过程压力建立机理提供帮助。

因此，本文在研制一种折流板双螺杆可视化实验样机的基础上，以传统双头同向双螺杆为比较对象，在低螺杆转速下，分析了螺杆构型、螺杆转速、喂料量对机头压力脉动规律的影响，为稳压螺杆的结构设计以及挤出机稳压系统的设计提供了理论和数据支撑；同时分析了可视化挤出机双螺杆内速度场以及流线变化，探索了不同螺杆构型对机头压力曲线脉动规律的影响。

1　实验部分

1.1　实验原料

羧甲基纤维素钠（CMC-Na）：fvh6-7，纯度 99.72%，取代度 0.72，重庆力宏精细化工有限公司；荧光示踪粒子：MV-F50，粒子直径 50 μm，北京立方天地科技。

1.2　实验仪器

自研全程可视化折流板挤出设备：SJ35×12 型，广东省高分子材料先进加工工程技术研究中心与五邑大学智能制造学部联合研制；压力传感器：K-35X/80797，瑞士 KLLER；粒子影像测速系统：EM4-2M-4M-5W，北京立方天地科技。

1.3　螺杆构型

Fig.1(a) 为全程可视化挤出机实验配备的双螺杆，采用导程 l=48 mm 的纯螺纹结构，螺杆长径比为 12；Fig.1 (b) 为传统双螺杆构型；Fig. 1(c) 和 Fig.1(d) 为折流板高度分别为 16.5 mm 和 15.5 mm 的折流板

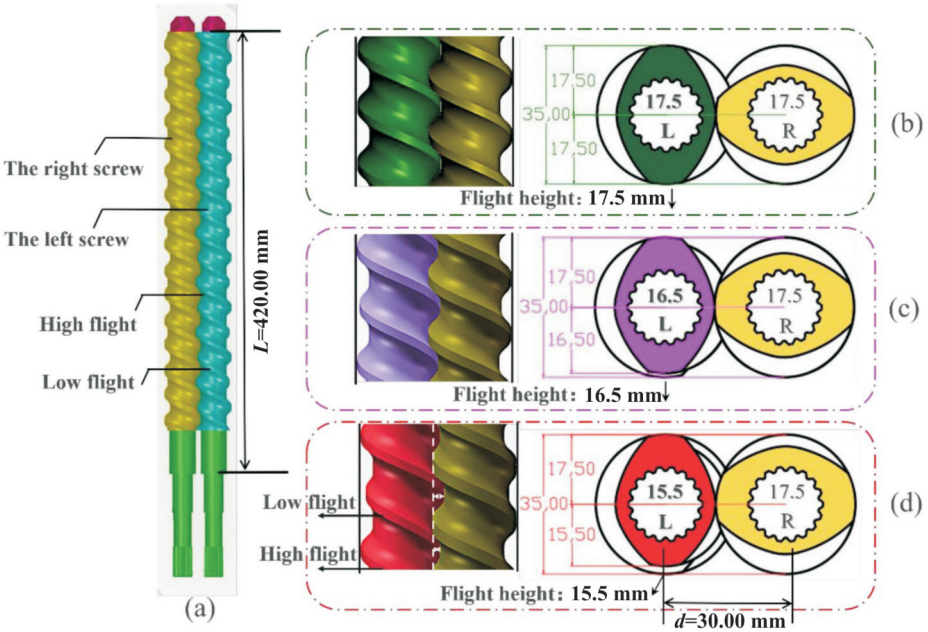


Fig. 1　Screw configuration

(a): screw combination;(b): traditional screw element;(c): Baffle height of 16.5(BNTSE); (d): Baffle height of 15.5(BNTSE)

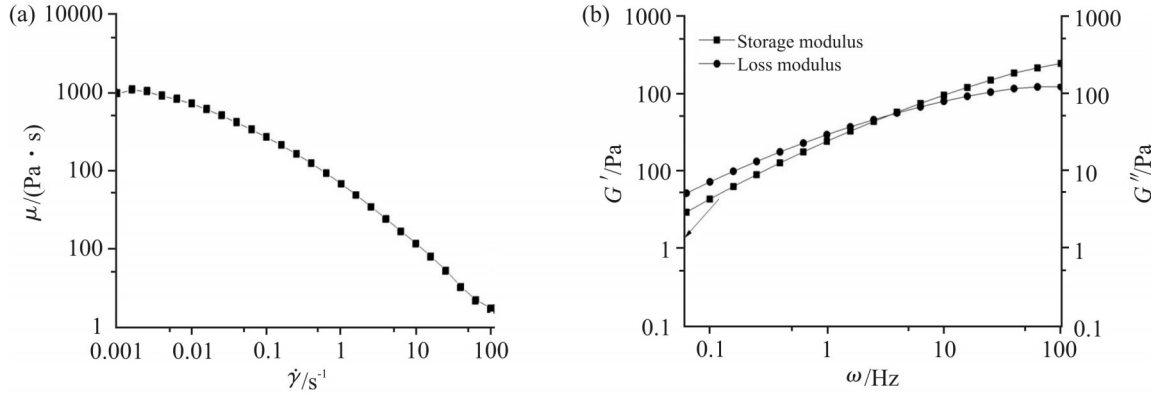


Fig. 2 Rheological properties of experimental fluids

(a): relationship between shear rate and apparent viscosity of CMCNa liquid; (b): relationship between storage modulus or loss modulus of CMCNa liquid and frequencies

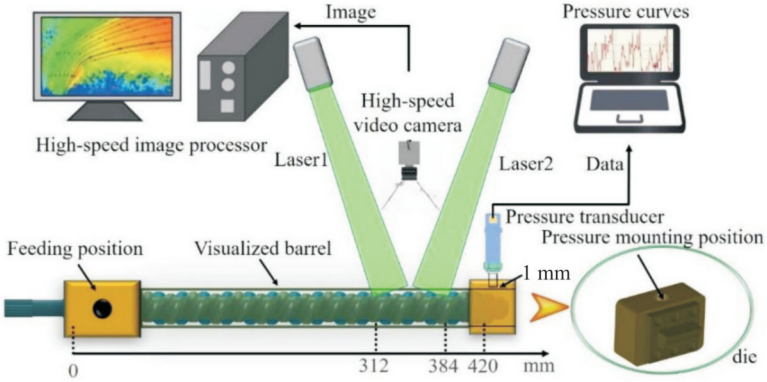


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental devices and method

双螺杆，分别记为TSE17.5，BNTSE 16.5和BNTSE 15.5。如Fig.1(b)所示，传统双螺杆为左右对称结构，其左、右螺杆结构相同，螺棱高度为17.5 mm，螺槽深度5 mm。折流板双螺杆为一种非对称同向啮合双螺杆，左螺杆由1条高螺楞和1条低螺楞相互交替组成，而右螺杆为双头螺纹螺杆，两螺杆的螺楞高度保持一致。如Fig.1(c)和Fig.1(d)所示，左螺杆螺楞高度分别为16.5 mm和15.5 mm，右螺杆螺棱高度均为17.5 mm。同时，折流板双螺杆与传统双螺杆一样具备良好的自洁性能，转动过程中左右两螺杆能保持时刻啮合，因此，16.5 mm和15.5 mm的螺楞高度对应的右螺杆的螺槽深度分别为4 mm和3 mm。

1.4 实验方案

1.4.1 黏弹流体制备过程：将CMC-Na粉末置于烘干箱中，设定温度40 ℃，时间8 h。烘干完成后，以1.5%的配比配置CMC-Na非牛顿流体，多次少量地将CMC-Na粉末加入50 ℃的温水中稳定搅拌，搅拌完成后，静置8 h待气泡排干净后使用，所得模拟流体密度为1040 kg/m^3。

使用旋转流变仪（Anton Paar，奥地利Anton Paar GmbH）测试羧甲基纤维素钠熔体的流变性能，测试平板旋转直径为25 mm，间距为1 mm。将样品置于平台后，恒定温度为25 ℃，剪切速率从0 s^{-1}到100 s^{-1}，得到剪切速率与黏度的关系如Fig.2(a)。

由Fig.2(a)可见羧甲基纤维素钠流体随着剪切速率的增加，黏度下降，具有典型的剪切变稀现象；Fig.2(b)为储能模量和损耗模量随角频率的变化，在低角频率下，实验流体的损耗模量大于储能模量，物料发生黏性形变，随着角频率的进一步增加，其储能模量高于损耗模量，发生弹性形变，具有典型的黏弹特性。可见，羧甲基纤维素钠熔体为具有黏弹特性的非牛顿流体，与高分子加工过程中常用的材料特性一致，因此本实验中采用它作为模拟流体。

1.4.2 机头压力测量：压力传感器布置在挤出机机

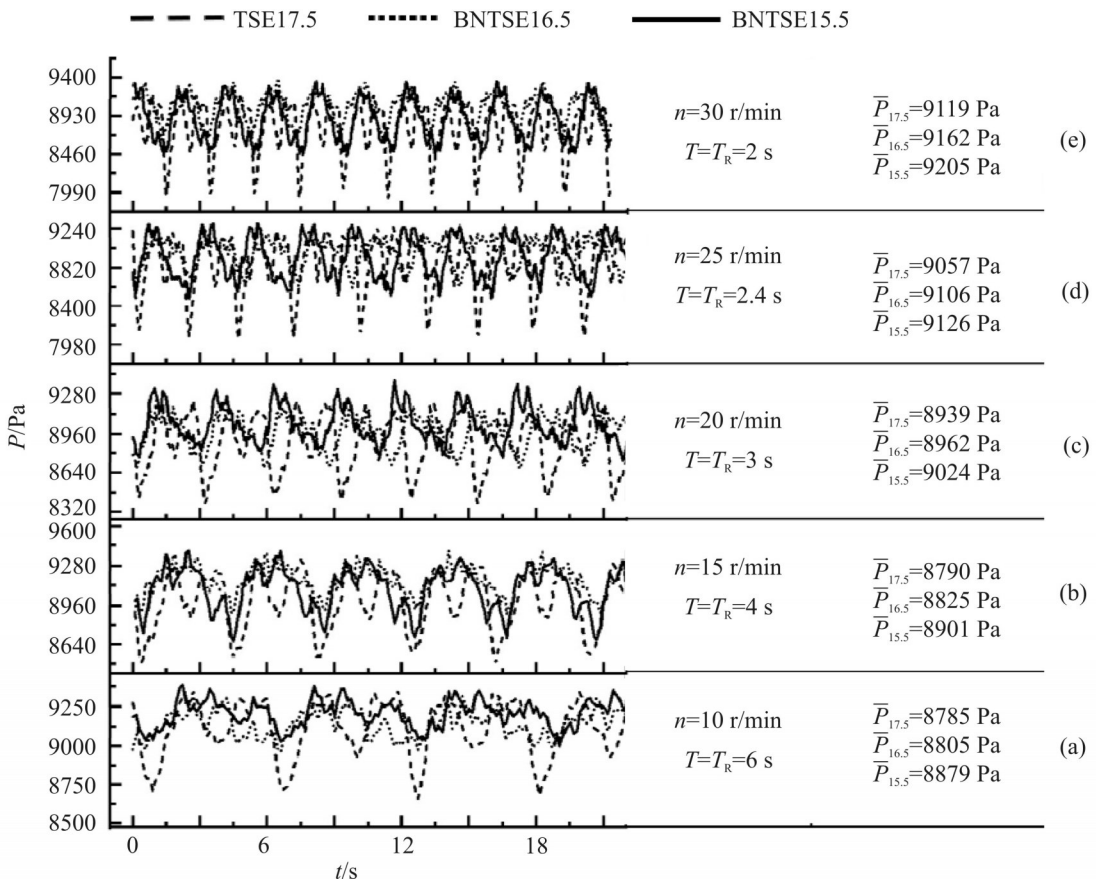


Fig. 4 Pressure curves with time at different rotation speeds of (a) 10 r/min, (b) 15 r/min, (c) 20 r/min, (d) 25 r/min and (e) 30 r/min

头位置，安装位置如Fig.3，离机头内壁距离为1 mm。设定喂料量及转速，挤出稳定后，开启压力采集系统采集CMC-Na流体挤出过程中的机头压力。

1.4.3 速度场测量：将50 μm荧光粒子混入CMC-Na流体中并搅拌均匀，将激光发射器和高速摄像机按图中方式布置，高速摄像机采用高速传输线与工业计算机连接，并通过PFV高速相机控制软件控制拍摄，拍摄区域为312~384 mm处，并同步进行机头压力的测量。

2　结果及讨论

2.1　压力波动周期性

Fig.4为喂料量13.2 kg/h时，TSE17.5，BNTSE16.5和BNTSE15.5分别在螺杆转速10 r/min，15 r/min，20 r/min，25 r/min及30 r/min时的机头压力曲线。设T为挤出压力的脉动周期，单位为s；T_R为螺杆旋转周期，单位为s。初步发现，在螺杆全充满的情况下，当螺杆转速相等时，3个构型压力曲线虽然不同，但都具有一定的脉动规律，且3条曲线的脉动周期相同，同一螺杆的压力曲线脉动周期随着螺杆转速的变化而变化，表明螺杆转速是影响压力脉动周期的重要参数；此外，同构型螺杆在同周期T内，压力随时间变化的趋势存在一致性，表明螺杆构型是影响脉动周期内曲线变化趋势的重要参数。

为进一步探究压力脉动周期与螺杆转速间的关系，如Fig.4所示，在5种螺杆转速下均有T=T_R，即压力脉动周期与螺杆旋转周期相同，进一步证明螺杆转速的改变是造成压力脉动周期发生变化的重要原因。但是不同螺杆转速、螺杆构型测得的压力曲线均有所不同。

2.2　传统双螺杆和折流板双螺杆的压力差异性

2.2.1 机头压力曲线周期特性分析：由于压力脉动周期(T，单位s)和螺杆转速(n，单位r/min)存在一定的相关性，为便于对曲线进行对比分析，Fig.5(a~e)为截取Fig.4中各曲线2个周期T的压力数据，对时间(t)和压力(P)进行无量纲处理，定义$\upsilon = t/T$，$\epsilon = P/\overline{P}$，$\overline{P}$为各曲线的平均压力。Fig.5(f~j)分别为对应的无量纲化后的曲线。

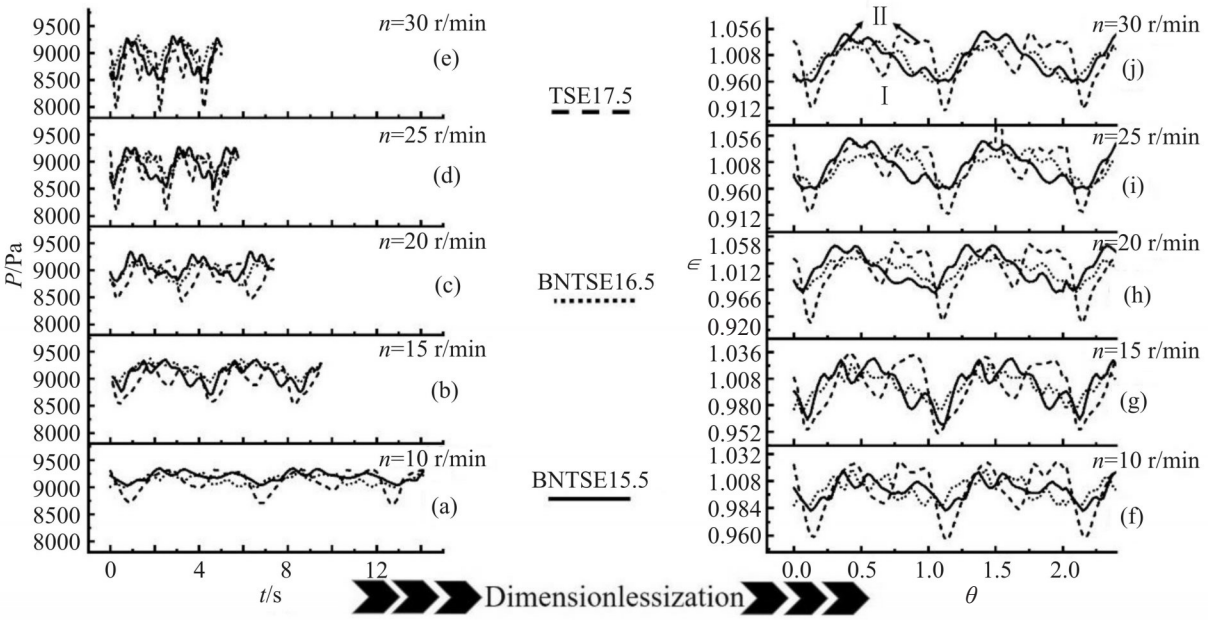


Fig. 5 Dimensionless analysis of extrusion pressure

(a): original pressure curves (10 r/min); (b): original pressure curves (15 r/min); (c): original pressure curves (20 r/min); (d): original pressure curves (25 r/min); (e): original pressure curves (30 r/min); (f): ∈ curves (10 r/min); (g): ∈ curves (15 r/min); (h): ∈ curves (20 r/min); (i): ∈ curves (25 r/min); (j): ∈ curves (30 r/min)

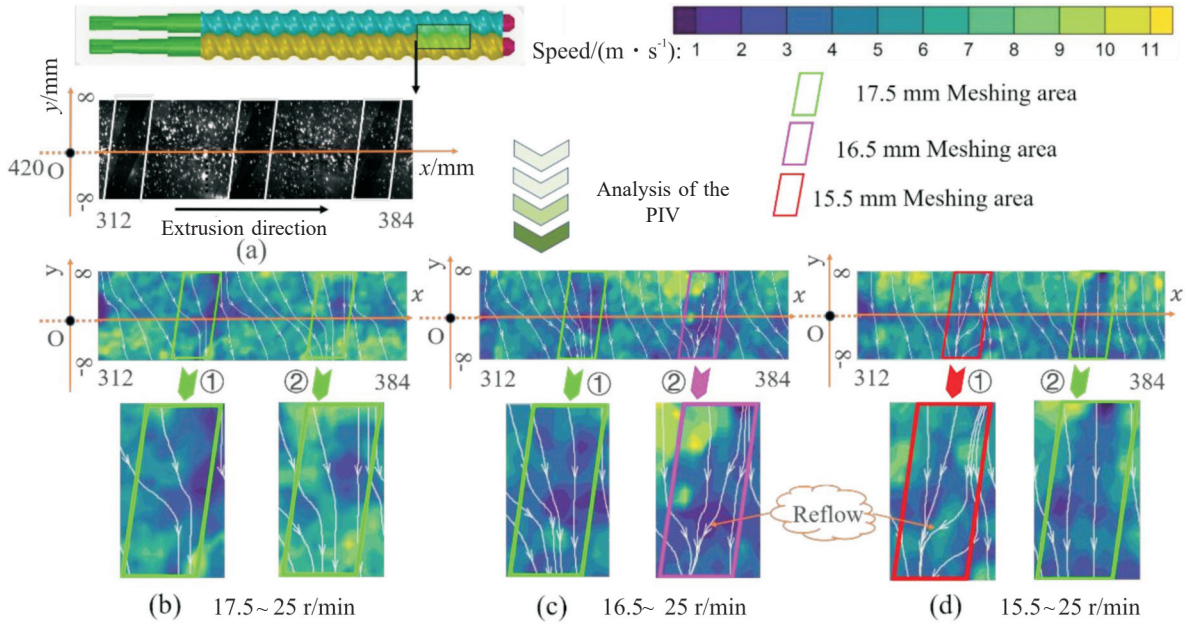


Fig. 6 Velocity field distribution in the screw groove measured by PIV

(a): particle picture; (b): TSE17.5; (c): BNTSE16.5; (d): BNTSE15.5

如Fig.5(a~e)所示，在同螺杆转速条件下，TSE17.5与BNTSE16.5，BNTSE15.5的压力曲线变化趋势存在显著差异，传统双螺杆压力曲线在周期内中间位置出现一个急剧下降的“波谷”，转速越高压力波动幅度越大，当螺杆转速为30 r/min时，压力约为8000~9250 Pa，BNTSE16.5和BNTSE 15.5压力脉动周期的压力曲线变化趋势相似，对应的压力分别为8500~9250 Pa及8600~9300 Pa，均值化处理后相对传统双螺杆较为平稳，压力脉动幅度相比TSE17.5约降低42%和44%。无因次处理结果表明，

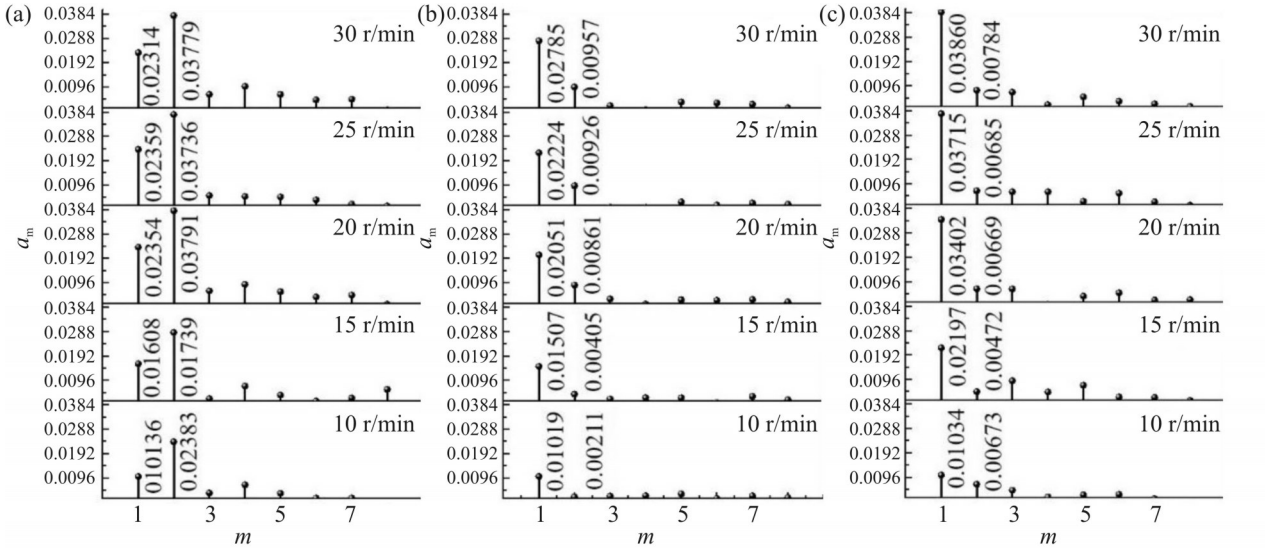


Fig. 7 Fourier transform of extrusion pressure for (a) TSE17.5, (b) BNTSE16.5 and (c) BNTSE15.5

折流板的存在没有改变压力波动的频率，压力脉动的频率与双螺杆的转动频率一致，但折流板改变了压力波动幅度及变化方式。

为进一步分析折流板双螺杆与传统双螺杆压力曲线变化趋势不同的原因，利用PIV技术测量了挤出过程中双螺杆上啮合区螺槽内的速度场和物料的流动状态。

Fig.6(a)为312~384 mm啮合区域的一张粒子图，各组实验拍摄视野相同，经PIV分析后得到该区域的速度场云图。Fig.6 (b~d)分别为TSE17.5，BNTSE16.5和BNTSE 15.5在螺杆转速为25 r/min时的速度场云图及流线图，并分别对螺棱或折流板处进行放大。3种双螺杆在螺棱或折流板处的速度及流线与其周围区域存在明显不同，TSE17.5的区域①、②的左、右螺杆为17.5 mm螺棱，与机筒间的间隙为0.1 mm，流体流经上啮合区时几乎没有与挤出方向相反的回流速度，不足以发生“回流”现象；对于BNTSE 16.5和BNTSE 15.5，区域①左、右螺杆均为17.5 mm螺棱，区域②左螺杆分别为16.5 mm折流板、15.5 mm折流板，与机筒间的间隙分别为1.1 mm和2.1 mm，流体反向分速度较大，使流体发生“回流”现象，推测“回流”现象是导致BNTSE16.5和BNTSE15.5的机头压力曲线没有出现Fig.6(b)中TSE17.5压力曲线双峰的原因。进一步，由Fig.6 (c~d)中的区域②，BNTSE15.5流线曲率相对较大，表明BNTSE15.5的回流量相对更大，由于回流量的影响，导致Fig.6中BNTSE15.5的波峰相对BNTSE16.5在周期T内出现的时间更早。“回流”产生的原因为流体流经折流板双螺杆的矮螺楞时，流体在压力作用下流向另外一侧的前后螺槽，实现了螺槽的横向开放和纵向开放。

2.2.2 压力曲线频谱分析：傅里叶分析在分析周期性数据中应用广泛[11]，傅里叶分析可以将复杂的周期信号分解为多个正余弦信号，并得出相应的周期振幅及相位等参数，对压力脉动曲线进行傅里叶变换，并绘制频谱图，如Fig.7所示。

将Fig.5(f~j)中曲线作为输入信号，按照式(1)进行傅里叶变换：

$$f(\varphi) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos(2\pi m\varphi + \varphi_m) \tag{1}$$

取m=8，将压力信号分解为8组三角函数曲线，分解后的三角函数曲线振幅为a_m，各组三角函数对应的角速度为$2\pi m$，这里，m = 1，2，3…8，则对应频率比为1:2:3:4:5:6:7:8，三角函数曲线分别记为1，2，3，4，5，6，7和8，而φ_m代表压力传递的相位差。将分解后的各组三角曲线对应的频率及振幅绘制成频谱图，Fig.7 (a~c)分别为TSE17.5，BNTSE16.5和BNTSE15.5对应的频谱图。

由Fig.7(a~c)频谱图，结合Fig.1可以看出，传统双头双螺杆存在3个彼此独立的流道，而折流板导致的开放性使得独立流道数减少为2个。对于TSE17.5，1和2的振幅明显更大，“1”表示Fig.5中的TSE17.5压力曲线周期的整体波动，代表螺杆转动周期；“2”的频率为2，即螺杆转速的2倍。传统啮合型双螺杆为双头螺纹，流道纵向开放横向封闭，2根螺杆头部每转动半圈相遇1次，形成1次压力冲

击，因此在1个周期内存在明显的2个波峰I和II。对于BNTSE16.5和BNTSE15.5，“1”表示压力曲线周期的整体波动，2根螺杆头部每转动1圈相遇1次，形成正位移输送，其余三角曲线振幅均远小于“1”，对曲线波动的影响较小，表明曲线的波动主要由“1”表示，与Fig.5中BNTSE16.5和BNTSE15.5的压力曲线周期内的波谷对应。其中，BNTSE16.5的三角函数曲线“1”的振幅相对BNTSE15.5更小，折流板双螺杆构型为一侧双头螺纹，另一侧为单头螺纹中插入折流板，1个导程中折流板所在螺槽能实现横向开放和纵向开放，导致频谱图中只有1个振幅较大的曲线1，折流板结构对应“2”的存在，应该对应于折流板导致的局部正位移冲击作用。

定义P_H为压力波动幅度，即压力曲线1个周期内最大值与最小值之差，并用离散系数C_v对波动程度进行量化：$C_v = \sigma/\overline{P}$，式中：$\sigma$为标准差；$\overline{P}$为压力平均值。不同螺杆构型压力波动幅度及离散系数随转速的变化如Fig.8所示。

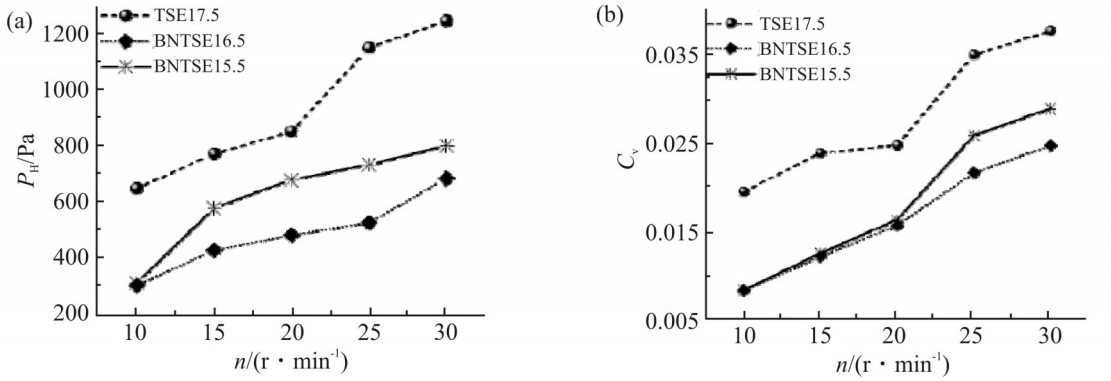


Fig. 8 Effect of screw rotation speed on (a) P_H of pressure and (b) C_V of pressure

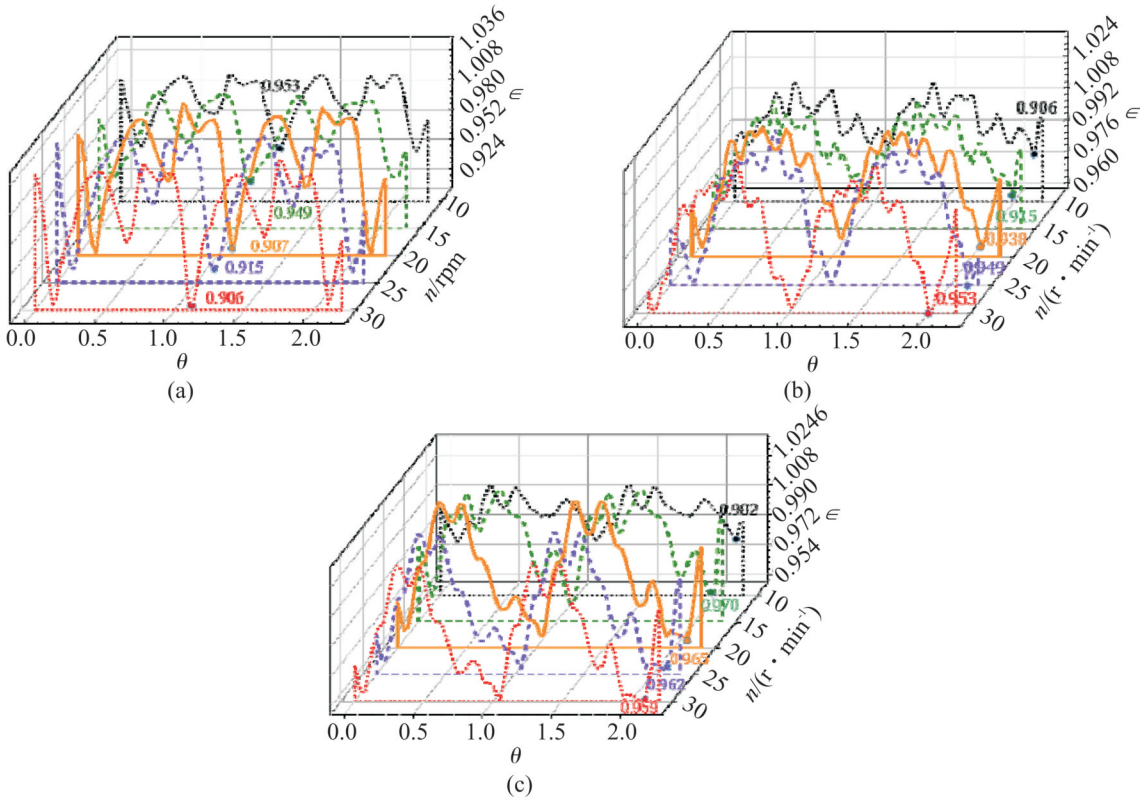


Fig. 9 Pressure curves and average pressure at different rotation speeds for (a) TSE 17.5, (b) BNTSE 16.5 and (c) BNTSE 15.5

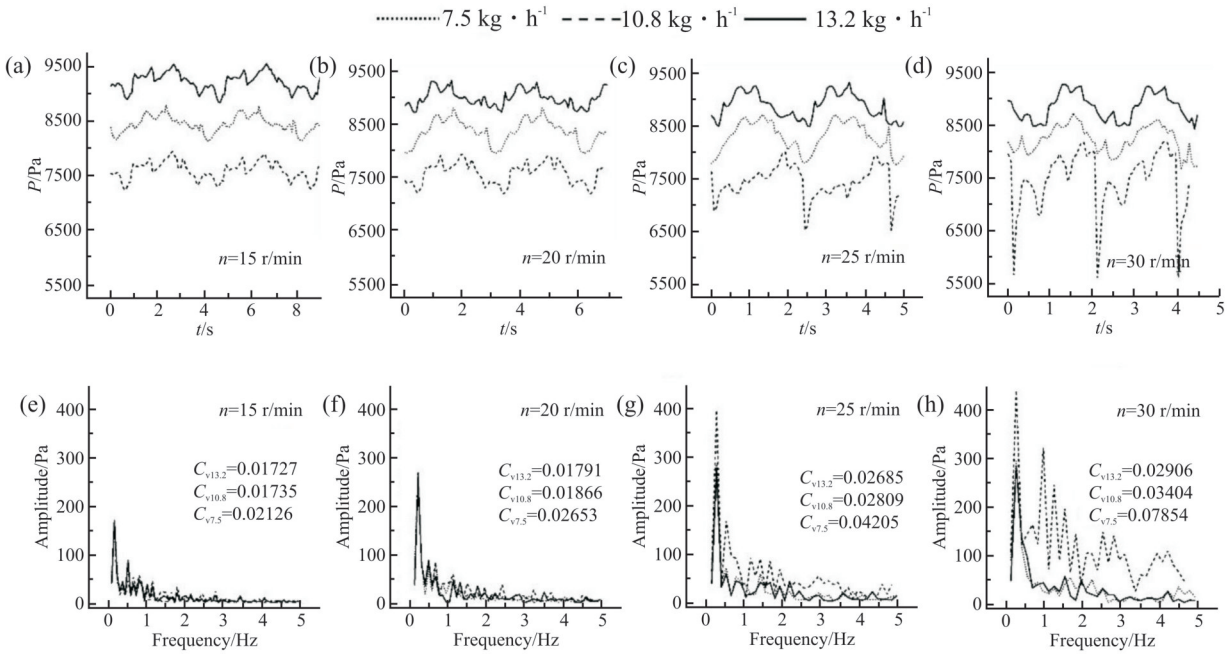


Fig. 10 Pressure with time at different rotation speeds of (a) 15 r/min, (b) 20 r/min, (c) 25 r/min, (d) 30 r/min, and spectrum distributions with *C*v at different rotation speeds of (e) 15 r/min, (f) 20 r/min, (g) 25 r/min, and (h) 30 r/min

结合Fig.7(d)和Fig.7(e),在各转速下的频谱振幅、压力幅值、离散系数均有TSE17.5>BNTSE15.5>BNTSE16.5。数据表明,在低螺杆转速条件下,折流板双螺杆的机头压力波动相对传统双螺杆存在明显的优势,其脉动幅度及波动程度相对更小,在实验转速范围内,相较于TSE17.5,BNTSE16.5和BNTSE15.5的离散系数分别减小了41.32%和34.61%。

2.3　螺杆转速影响

为分析螺杆转速对机头压力波动的影响,得到了不同转速下各构型的无量纲压力曲线。

由Fig.9可见,TSE17.5,BNTSE16.5和BNTSE15.5在不同螺杆转速下的压力曲线变化趋势均存在一致性。结合Fig.8,发现TSE17.5,BNTSE16.5和BNTSE15.5平均压力随转速增加而降低,同时压力波动随转速增加保持增长的趋势,离散系数也逐渐增大。啮合型双螺杆挤出过程中,主要存在拖曳流、正位移输送及漏料等,设定产量一定时,CMC-Na为具有剪切变稀特性[15]的非牛顿流体,转速增加,正位移输送量增加,拖曳流减少,加剧了挤出过程中的压力波动,猜想产量一致的前提下,正位移输送量的增加是平均压力减小的主因。

2.4　喂料量影响

为探究喂料量对机头压力波动的影响,测量了3种BNTSE15.5在喂料量为7.5 kg/h,10.8 kg/h和13.2 kg/h下的机头压力,图中$C_{v13.2}$,$C_{v10.8}$和$C_{v7.5}$为各转速条件下喂料量为13.2 kg/h,10.8 kg/h和7.5 kg/h时的离散系数。

由Fig.10(a~d)可见,同螺杆转速下,机头压力13.2 kg/h>10.8 kg/h>7.5 kg/h,表明随着喂料量的增加,机头压力逐渐增大;螺杆转速达到20 r/min前,13.2 kg/h,10.8 kg/h和7.5 kg/h曲线的变化趋势基本一致,而当螺杆转速达到25 r/min,螺杆的轴向输送能力增大,7.5 kg/h的喂料量难以使机筒内部保持全充满状态,所以曲线7.5 kg/h相较于另外2条曲线出现偏离现象,呈现剧烈波动的状态。当螺杆转速继续增加至30 r/min,物料充满度进一步减小,螺槽内出现气液界面,7.5 kg/h曲线波动程度进一步增加。

由Fig.10(e~h)可知,随着螺杆转速增加,13.2 kg/h,10.8 kg/h和7.5 kg/h曲线振幅及离散系数(C_v)逐渐增大,各螺杆转速下的振幅及C_v均有13.2 kg/h<10.8 kg/h<7.5 kg/h。当螺杆转速为15 r/min和20 r/min时,13.2 kg/h,10.8 kg/h和7.5 kg/h曲线脉动幅度接近,离散系数相差较小。当螺杆转速达到25 r/min或更高时,7.5 kg/h曲线的波动相对更加剧烈,其离散系数迅速增大,压力波动程度迅速增加;当螺杆转速继续增加至30 r/min时,由于充满度进一步减小,螺杆内空腔体积增加,7.5 kg/h曲线波动程

度进一步增加。

在低螺杆转速及低喂料量条件下，当螺杆转速相同时，喂料量越大，机头压力越大；喂料量相同时，随着螺杆转速的增加，机头压力波动愈加剧烈，当螺杆转速过大，机筒内物料为非充满状态时，压力波动开始迅速增大。

3 结论

研制了一种全程可视化折流板双螺杆挤出机实验样机，分析了螺杆构型、转速、喂料量对机头压力的影响，并与传统双螺杆结构进行了对比分析。

（1）双螺杆挤出机的机头压力存在脉动变化，对于传统双螺杆、折流板高度为16.5 mm及15.5 mm的2种折流板双螺杆，压力波动周期均与螺杆转动周期相同。在1个脉动周期内，传统双螺杆压力曲线呈双峰曲线，而2种折流板双螺杆为单峰分布，且峰值更小；结合傅里叶变换分析，2种折流板双螺杆的压力波动存在明显优势。粒子图像测速显示，折流板双螺杆存在左右螺槽及前后螺槽内物料的相互交汇，保持啮合的同时实现横向和纵向开放，是折流板压力保持稳定的主因。

（2）同一构型的双螺杆，在不同螺杆转速条件下，压力曲线变化趋势存在一定的相似性，不同之处在于，曲线各峰值随螺杆转速的增加而增加，表明随着螺杆转速的增加，机头压力波动幅度逐渐增加；喂料量越大，机头压力越大，但压力波动幅度却随着喂料量的增加而减小。

参考文献：

[1] Del Pilar Noriega E M, Rauwendaal C. Troubleshooting the extrusion process: a systematic approach to solving plastic extrusion problems[M]. Munich: Hanser Publications, 2010.

[2] Rauwendaal C. Polymer extrusion[M]. New York: Hanser, 1985.

[3] 牟勇强,吴大鸣,韩国灿,等.单螺杆精密挤出机并联式稳压系统的研究[J].中国塑料,2004,18(3): 90-93.
Mou Y Q, Wu D M, Han G C, *et al*. Study on the parallel pressure stabilization apparatus for single screw extruders[J].China Plastics,2004,18(3): 90-93.

[4] Tian X, Zhu L, Li K, *et al*. Effect of gear pump extrusion processing on the properties of fiber reinforced rubber composites [J]. Polymers, 2020, 12: 985.

[5] Previdi F, Savaresi S M, Panarotto A. Design of a feedback control system for real-time control of flow in a single-screw extruder[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14: 1111-1121.

[6] Mitroshin V N, Kuleshova D I. The system for stabilization of screw extruder productivity[C]. Vladivostok, Russia: 2018 International Multi- Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018.

[7] Mitroshin V N. Polymer melt pressure regulating at the dosing zone of one- screw extruder with pulsating pressure gradient[J]. Bulletin of Samara State Technical University, Issue Technical Sciences, 2011,1: 39-44.

[8] Morozov V V, Bogdanov K A, Ignatenkov V G. The influence of design parameters on the pressure in the extruder for the production of sapropelic feed[C]. Rostov Region, Russian Federation: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 659: 012049.

[9] Priporov I E, Shepelev A B, Yagyaev E R. Improvement of extruders for preparing protein feed from sunflower seeds[J]. Bulletin of Orenburg State Agrarian University, 2020, 2: 145-148.

[10] Xu B P, Yu H W, Kong P. A co-rotating self-cleaning two screw extruder with an internal baffle: EP, 3122532[P].2021-09-29.

[11] 喻慧文, 吴宏武, 徐百平, 等. 一种差速双螺杆非充满熔体输送模型[J]. 高分子材料科学与工程,2018,34(8): 88-95.
Yu H W, Wu H W, Xu B P, *et al*. A kind of conveying model of partially filled fluid in a non- twin screw channel[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018,34(8): 88-95.

[12] 喻慧文,徐百平,吴宏武,等.差速双螺杆非充满输送粘弹流体的可视化[J].高分子材料科学与工程,2018,34(8): 79-87.
Yu H W, Xu B P, Wu H W, *et al*. Visualization of flow patterns of partially filled viscoelastic fluid in a non-twin screw extruder[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018,34(8): 79-87.

[13] Xiong Q Q, Chen Z, Li S W, *et al*. Micro-PIV measurement and CFD simulation of flow field and swirling strength during droplet formation process in a coaxial microchannel[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 185: 157-167.

[14] Goyal R, Cervantes M J, Gandhi B K. Synchronized PIV and pressure measurements on a model Francis turbine during start-

up[J]. Journal of Hydraulic Research, 2020, 58: 70-86.

[15] Arosemena A A, Andersson R, Andersson H I, *et al*. Effects of shear- thinning rheology on near- wall turbulent structures[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 925: A37.

Fluctuation Response of Extrusion Pressure in a Baffled Co-Rotating Non-Twin Screw Channel

Huiwen Yu, Chu Wei, Zhiqun Wang, Xuzhang Jie, Peizhou Dong, Zhongwen Zhao, Baiping Xu

(*School of Intelligent Manufacturing, Wuyi University, Jiangmen 529020, China*)

ABSTRACT: A new type of non-twin screw with an internal baffle is proposed to introduce symmetry break into the mixing process and to reduce the pressure fluctuation in the extrusion process. In order to explore the extrusion characteristics of such a baffle non-twin screw extruder (BNTSE), a visualization extruder with a transparent barrel was developed. Sodium carboxymethyl cellulose (CMC- Na), a viscoelastic fluid at room temperature, was selected as experimental fluid. The response of extrusion pressure of the traditional twin-screw extruders (TSE) and BNTSE were measured. For the first time, Fourier transform was applied to examine the generation mechanism of pressure fluctuation. The influence of screw configuration, screw speed and feed rate on the extrusion pressure was investigated. The experimental results show that under the fully- filled condition of lower screw speed and lower feed rate, the pulsation period of the pressure is equal to the screw periodicity, and the pressure fluctuation increases with the increase of screw speed, and decreases with the increase of feed rate. The extrusion pressure increases with the increase of feed rate. Within one rotation cycle, the pressure curve of the TSE shows a bimodal distribution, while the BNTSE has a single peak distribution with a smaller amplitude. Particle image velocimetry (PIV) shows that there is confluence of materials in the intermeshing regions of BNTSE. BNTSE provides the opening channel in the transverse and longitudinal directions of the screw grooves while keeping their intermeshing rotation, resulting in less pressure fluctuation when compared to TSE.

Keywords: baffle non- twin screw extruder; viscoelastic fluid; visualization extruder; response of extrusion pressure; particle image velocimetry