

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.03.014

基于能量等效的双转子连续混炼机混炼段相似放大研究探讨*

龚树云¹, 方程¹, 马玉录¹, 谢林生¹, 李建立^{1,2}, 吴张琪¹, 夏平¹, 司向¹, 刘琥¹

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237; 2. 北京石油化工学院化工机械系, 北京 102617)

摘要: 根据双转子连续混炼机自身特性和等效平均停留时间、等价转子顶部剪切速率的原则, 以能量等效为衡量混合效果的准则, 提出双转子连续混炼机混炼段相似放大设计的流程及其理论模型。在该模型确定的转子转速和喂料速率下, 利用 Polyflow 软件模拟了机筒内径分别为 30 mm 和 100 mm 的双转子连续混炼机混炼段和卸料段内的流场特征, 以能量等效为指导准则, 通过对流场特征和混合效果进行分析, 对所提出的相似放大设计理论模型进行了验证。

关键词: 相似放大; 能量等效; 双转子连续混炼机; 流场模拟; 混炼段; 卸料段

中图分类号: TQ320.663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2012)03-0057-05

Study on Similarity Scale-Up Model for Mixing Section of Two-Rotor Continuous Mixer Based on Equivalent Energy

Gong Shuyun¹, Fang Cheng¹, Ma Yulu¹, Xie Linsheng¹, Li Jianli^{1,2}, Wu Zhangqi¹, Xia Ping¹, Si Xiang¹, Liu Hu¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Department of Chemical Machinery, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: As a criterion of equivalent energy to be used for measuring mixing performance, similarity scale-up design process and theory model for mixing section of two-rotor continuous mixer was proposed according to characteristics of the machine, equivalent average residence time and equivalent shear rate at the top of the rotors. Moreover, the flow field feature of mixing and discharging sections in two-rotor continuous mixers with 30 mm and 100 mm in barrel inner diameter were simulated with Polyflow software in the condition of the rotors rotational speed and the feed rate were determined by the model. The proposed similarity scale-up theory model was validated by analyzing the flow field feature and mixing performance under the guideline of equivalent energy.

Keywords: similarity scale-up; equivalent energy; two-rotor continuous mixer; flow field simulation; mixing section; discharging section

双转子连续混炼机作为一种既可以连续工作又具有优异分散和分布混合特性的高分子材料混炼设备, 被广泛地应用于聚烯烃树脂合成、高分子共混物等的混合造粒、高填充母料制备、橡塑共混等领域。目前, 我国在役的大型连续混炼造粒机组主要从日本制钢、神户制钢、美国 Farrel 公司及意大利 Pomini 公司进口, 相关关键技术还掌握在国外大公司的手里, 这严重制约了国内相关产业的发展 and 自主创新。因此, 开展双转子连续混炼造粒机组的研究, 尤其是放大设计准则方面的研究, 对于突破国外公司的技术垄断、发展具有自主知识产权的连续混炼装备, 有着重要的社会和经济价值。国内外已有许多学者对密炼机、单螺杆挤出机、双螺杆挤出机的放大设计问题进行过较深入的研究并提出了多种放大设计理论^[1-5], 近十年来国内也有不少学者深入研究了密炼机和双螺杆挤出机的放大设计问题^[6-7],

本课题组对双转子连续混炼机混炼段的放大设计开展了较深入的研究^[8-9], 但还有待进一步深入。笔者首次将混炼段与卸料段作为整体, 探讨其放大设计问题。基于能量等效的原则, 提出双转子连续混炼机混炼段相似放大设计理论模型, 采用 Polyflow 软件模拟了机筒内径为 30 mm 和 100 mm 的双转子连续混炼机混炼段和卸料段的流场, 并以能量等效为准则, 通过对流场特征和混合效果进行分析, 验证了所提出的相似放大设计理论模型的准确性。

1 双转子连续混炼机混炼段和卸料段相似放大设计理论模型

1.1 能量等效相似放大设计流程

基于能量等效的双转子连续混炼机混炼段相

* 上海市产业化重大专项(10521100605)

联系人: 谢林生, 主要研究方向为材料加工及设备

收稿日期: 2011-12-19

似放大设计按图1所示过程进行。首先根据机筒内径放大系数(放大前后机筒内径之比)和剪切等效原则,确定放大后的几何尺寸和工艺参数,然后以能量等效为混合效果的衡量准则,通过模拟或者实验验证放大前后设备流场特征和混合能力是否相近似,如果相差较远则继续对几何参数和工艺参数进行微调。

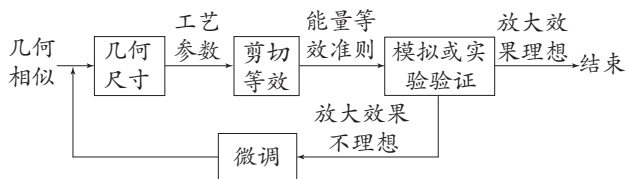


图1 能量等效相似放大设计流程

1.2 能量等效准则

放大设计过程至关重要的一点是保证放大后设备混炼段和卸料段的流场基本特征、混合效果及比能耗等与放大前的相同或相近。表征混炼段流场基本特征与混合效果的参数有多种^[10]。连续混炼过程中机械能主要通过摩擦耗散、塑性耗散和粘性耗散转化成热能输入物料中,因此,机械能输入的强度和分布是影响混炼效果的一个关键因素。要保证放大前后混炼效果等效,一个重要前提是放大前后机械能输入等效。因此,笔者认为基于能量等效的双转子连续混炼机混炼段与卸料段相似放大过程中,应着重从放大前后能量等效的角度来选择放大前后混炼段与卸料段内物料混合效果的表征参数,如表1所示。

表1 基于能量等效的相似放大设计理论模型的评价指标

评价内容	评价指标
流场基本特征	压力 P
	温度 T
	剪切速率 $\dot{\gamma}$
	混合指数 λ
分散混合效果	解聚功率密度 N_{mix} ^[9]
分布混合效果	瞬时混合效率 e_{η} ^[11]
	时间平均混合效率 $\langle e_{\eta} \rangle$ ^[11]

表1中 N_{mix} 、 e_{η} 、 $\langle e_{\eta} \rangle$ 的计算式如下:

$$N_{\text{mix}} = \eta \dot{\gamma}^2 \quad (1)$$

$$e_{\eta} = \frac{\dot{\eta}/\eta}{(\ddot{D}:\ddot{D})^{1/2}} \quad (2)$$

$$\langle e_{\eta} \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t e_{\eta} dt \quad (3)$$

式中: η ——黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1} ;

$\dot{\eta}$ —— η 的实际时间导数;

$\ddot{D}$ ——变形速率张量;

t ——材料质点从混炼段入口运动到当前位置所经历的时间, s 。

N_{mix} 是研究固态填充物附聚体在聚合物熔体中破碎解聚时提出的一个流场参数,它主要表征混炼流场对附聚体的做功能力,该值越大则分散混合效果越好。 N_{mix} 以简洁的形式综合反映了物料流变参数和剪切速率对分散混合效果的影响,比单纯采用剪切速率作为分散混合效果评价指标更全面^[9-10]。 e_{η} 、 $\langle e_{\eta} \rangle$ 反应物料在流道内所经历的拉伸、挤压作用,也反应转子对物料做功的效果。

笔者认为如果物料在放大前后的混炼段与卸料段内所经历的 N_{mix} 和 e_{η} 、 $\langle e_{\eta} \rangle$ 一样或近似,则认为放大前后的双转子连续混炼机混合效果近似,达到等效放大的目标。否则必须对主要结构参数(如转子直径、机筒内径)和运行参数(主要是转子转速、产量)做进一步的微调,直至放大前后混合效果近似。

1.3 能量等效相似放大设计理论模型

D.B.Todd^[12] 在分析 Farrel 连续混合机相似放大问题时,提出采用混合机的等效平均停留时间 $[\bar{t}$, 见式(4)]来表征混合机的生产能力,用等价转子顶部间隙处的 $\dot{\gamma}$ [见式(5)]来表征转子的转速。假设总填充系数和物料密度与混合机尺寸无关,若令转子顶部间隙 $\propto$ 转子直径的平方根,则产量和转子转速的放大关系如式(6)、式(7)所示。从立体几何上看,双转子连续混炼机的自由体积与转子直径的立方近似地成正比,当转速一定时,转子顶部的线速度随转子直径增大而增大,物料粘性耗散产热也就越多,而机筒内壁面积随转子直径的平方增大,导致通过机筒内壁向外传导的热量受限。基于此,笔者提出基于能量等效的双转子连续混炼机混炼段与卸料段相似放大方法,并认为双转子连续混炼机相似放大过程中,按式(7)表征转子转速,但适当减小物料体积流率,将表征产量的式(6)修正为式(8)。

$$\bar{t} = \frac{\phi V_F}{Q} \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi D N}{\delta} \quad (5)$$

$$\frac{Q_l}{Q_s} = \frac{V_{F_l}}{V_{F_s}} = \left(\frac{D_l}{D_s} \right)^3 \quad (6)$$

$$\frac{N_l}{N_s} = \left(\frac{D_s}{D_l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\frac{Q_l}{Q_s} = \left(\frac{D_l}{D_s} \right)^{2.8} \quad (8)$$

式中: $\bar{t}$ ——混合室内等效平均停留时间, s;

ϕ ——混合室内总填充系数;

V_F ——混合室内自由体积, m^3 ;

Q ——物料体积流率, m^3/s ;

D ——转子直径, mm;

N ——转子转速, r/min ;

δ ——转子顶部间隙, mm;

下标 s, l——分别表示原型机、放大后样机。

2 模拟验证

为考察采用能量等效相似放大对流场特征、混合效果及比能耗等的影响,笔者用 Polyflow 软件作为计算平台,采用网格重叠技术和示踪粒子技术,对机筒内径分别为 30 mm 和 100 mm 的双转子连续混炼机混炼段及卸料段的三维非等温非牛顿流场进行模拟和分析。若将机筒内径为 30 mm 的小型双转子连续混炼机(以下简称 S)混炼段和卸料段的转速设为 950 r/min ,产量为 24 kg/h ,则对于机筒内径为 100 mm 的双转子连续混炼机(以下简称 L)混炼段和卸料段,据 1.3 中式(7)~(8)可算出其转子的转速为 500 r/min ,产量为 890 kg/h 。

2.1 数学与有限元模型

基本假设:①流道被完全熔融的物料全充满;②熔体为不可压缩广义非牛顿流体;③流体流动为层流;④忽略惯性力、重力等体积力;⑤壁面无滑移。则流场的控制方程如下:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (9)$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} = 0 \quad (10)$$

$$\rho C_p \vec{v} \cdot \Delta T = K \Delta^2 T + \vec{\tau} : \Delta \vec{v} \quad (11)$$

本构方程为:

$$\vec{\tau} = 2\eta(\dot{\gamma})\vec{D} \quad (12)$$

式中: $\vec{v}$ ——速度向量, m/s ;

p ——压力, Pa;

$\vec{\tau}$ ——偏应力张量, Pa;

ρ ——密度, kg/m^3 ;

C_p ——比热容, $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$;

K ——热导率, $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$;

T ——温度, K;

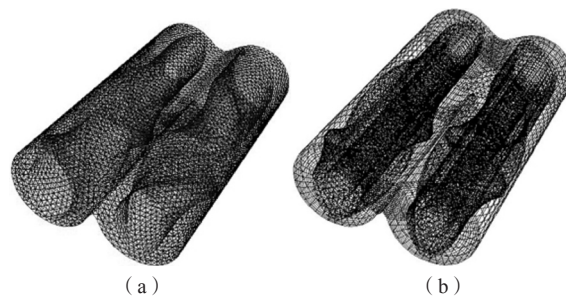
η ——表观黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

表观黏度由 Carreau-Yasuda 模型给出^[13]:

$$\eta = 1580[1 + (0.17\dot{\gamma})^{0.64}]^{\frac{0.7-1}{0.64}} \quad (13)$$

图 2 为 S 混炼段和卸料段的有限元网格模型。采用网格重叠技术进行流场计算时,为节省计算时

间,将转子内部的材料切除了一部分,形成了相对较大的圆孔。对于两个混炼段与卸料段,在建立几何模型、划分网格及进行模拟计算时均采用笛卡尔坐标系,坐标原点在混炼段入口截面左右转子旋转中心连线的中点。场计算采用的收敛精度为 10^{-4} ;进行混合任务计算,示踪粒子总数取 2000 个,且这些示踪粒子初始时刻随机分布在整个入口截面。



a—转子 0° 固定流道有限元模型; b—网格重叠有限元模型

图 2 机筒内径为 30 mm 的混炼段和卸料段构型

2.2 结果与讨论

(1) 放大前后流场变化

图 3 为能量等效相似放大前后流场基本特征的变化图。图 3a 表示流道横截面上一个旋转周期内流道从入口到卸料段末端各横截面上的平均压力。由图 3a 可以看出:①边界条件相同时, S 和 L 混炼段与卸料段中不同横截面上的平均压力近似,都是从混炼段入口截面到正反向螺棱交汇截面(无量纲轴向坐标大概在 0.35 的截面)逐渐升高,之后又逐渐降低,而卸料段则保持一样的负压不变;②根据相似放大前后混炼段与卸料段横截面上的平均压力沿轴向的变化趋势没有改变,可以预测放大前后混炼段与卸料段的压力分布相似。由于压力梯度是流体流动的驱动力,而放大前后混炼段和卸料段流场的压力分布相似,可知速度分布也应该相似。

图 3b 表示流道横截面上一个旋转周期内流道从入口到卸料段末端各横截面上的平均温度。由图 3b 可以看出,边界条件相同时, S 和 L 混炼段与卸料段中不同横截面上的平均温度沿轴向具有近似的变化趋势,但 L 混炼段与卸料段不同横截面上的平均温度比 S 的要稍微高一些,这是由于放大后流道壁按转子直径放大倍数的平方增大,导致靠近转子根部的粘性热很难散发出去,从而使温度有所上升。这一问题在实际工业中可以通过增加转子的芯部冷却来解决。

图 3c 统计了 2000 个示踪粒子从入口到卸料口截面所经历的剪切速率的累计概率分布情况。从

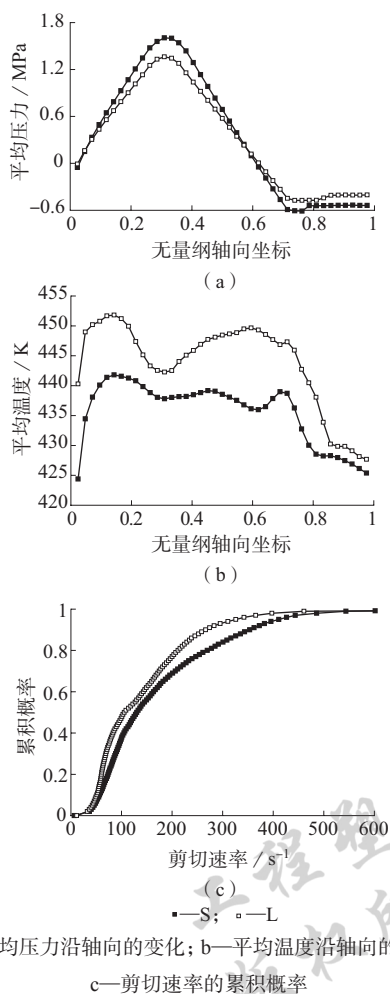


图3 能量等效相似放大前后流场基本特征的变化

图3可以看出,物料在S和L混炼段与卸料段中所经历的剪切过程近似等效,只是L中剪切速率高于350 s⁻¹的部分比S少约5%。

综上所述,在由能量等效相似放大设计理论模型确定的转子转速和喂料速率下,S和L双转子连续混炼机混炼段与卸料段的流场基本特征保持近似。

(2) 放大前后混合效果的变化

图4统计了2000个示踪粒子从入口到卸料口截面所经历的混合指数的累积概率分布情况。

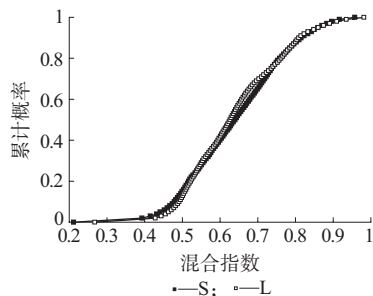


图4 卸料口截面上混合指数的累积概率

从图4可以看出,除在0.6~0.7区段S和L中

混合指数稍有偏离外,其余几乎是相同的,表明物料在放大前后的混炼段与卸料段中所经历的拉伸与剪切之比是近似的。

图5为S和L混炼段与卸料段中2000个示踪粒子从入口到卸料口截面所经历的 N_{mix} 的累积概率分布。由图5可知,当2000个粒子从入口运动到卸料口时,对于S和L混炼段与卸料段,都有60%左右的粒子经历的 N_{mix} 在15 mW/m³以下;但S中经历15~30 mW/m³的粒子有约10%,而L中约为30%;S中经历的 N_{mix} 在30 mW/m³以上的粒子约占30%,而在L中这一比例约占10%。总体来说物料在放大后的混炼段与卸料段中所经历的 N_{mix} 是近似的,可知物料经过L混炼段与卸料段后的分散混合效果与S是近似的。

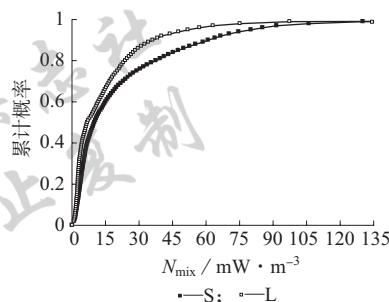


图5 卸料口截面上解聚功率密度的累积概率分布

图6表示流道轴向各截面上 e_η 的平均值。由图6可知,S和L中混炼段中 e_η 的趋势是近似的,且都为正值,说明在流道中物料经历了强烈的拉伸作用,而拉伸能很好地促进分布混合。

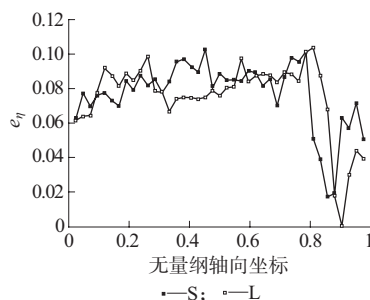


图6 流道轴向各横截面上变化趋势图

图7表示 $\langle e_\eta \rangle$ 的累积概率分布情况。由图7可知,当2000个粒子从入口运动到出口时,绝大部分都经历了 $\langle e_\eta \rangle$ 大于零的流场形态,这表明物料在混炼段与卸料段中经历了强烈的拉伸作用和少量的挤压作用。具体来讲,S和L混炼段与卸料段中有3%左右的示踪粒子经历了挤压作用,90%左右的示踪粒子经历的 $\langle e_\eta \rangle$ 在0~0.1之间,5%左右的示踪粒子经历了0.1以上的 $\langle e_\eta \rangle$ 。

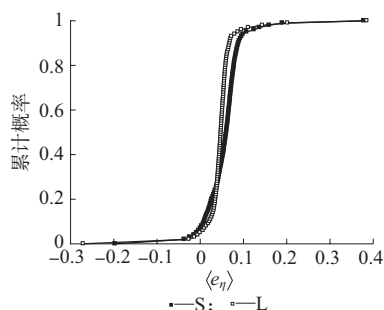


图7 卸料口截面上的累积概率分布

综上所述,在由能量等效相似放大设计理论模型确定的转子转速和喂料速率下,S和L双转子连续混炼机混炼段与卸料段的分散混合和分布混合效果是近似的。

3 结论

(1)L混炼段与卸料段流道内的平均压力、剪切速率等流场特征和S混炼段与卸料段中基本一致,而这两个参数表征了流道内物料的速度场和剪切状态,说明物料在两种混炼段和卸料段中运动状态和剪切过程是近似的。

(2)L混炼段与卸料段流道内的混合指数、解聚功能密度、瞬时混合效率、时间平均混合效率和S混炼段与卸料段中基本相似,而混合指数、解聚功能密度、瞬时混合效率、时间平均混合效率是表征混合能力的特征参数,从而说明L混炼段与卸料段保持了S混炼段与卸料段的优越的分散混合、分布混合能力。

(3)对S和L双转子连续混炼机混炼段和卸料段流场的模拟和分析,从数值模拟方面验证了笔者所提出的基于能量等效的双转子连续混炼机混炼段相似放大设计理论模型的可行性。

参考文献

- [1] Yi B, Fenner R T. Scaling-up plasticating screw extruders on the basis of similar melting performance [J]. *Plastics and Rubber: Processing*, 1976, 1: 119-123.
- [2] Rauwendaal C. Scale-up of single screw extruders [J]. *Polymer Engineering and science*, 1987, 27: 1 059-1 068.
- [3] Agur E E. Extruder Scale-up in a corotating twin-screw extrusion compounding process [J]. *Adv Polym Techn*, 1986, 6 (2): 225-231.
- [4] Bigio D, Wang K. Scale-up rules for mixing in a non-intermeshing twin-screw extruder [J]. *Polymer Engineering and Science*, 1996, 36 (23): 2 832-2 839.
- [5] Nakatani M. Scale-up theory for twin-screw extruder, keeping the resin temperature unchanged [J]. *Advances in Polymer Technology*, 1998, 17 (1): 19-22.
- [6] 陈可娟,何敏,林辉.相似放大理论在密炼机结构设计中的应用[J].*华南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 37 (8): 35-44.
- [7] 董中华,江波,许澍华,等.啮合同向双螺杆挤出机的相似放大[J].*塑料*, 2004, 33 (5): 82-86.
- [8] 王健平.相似放大理论在大型啮合同向旋转双螺杆挤出机设计中的应用[J].*塑料*, 2007, 36 (3): 66-68, 84.
- [9] 谢林生.双转子连续混炼机的分散与分布混合的表征及其强化[D].上海:华东理工大学, 2008: 14-25, 79-83.
- [10] 李建立,龚树云,马玉录,等.双转子连续混炼机混炼段相似放大初探[J].*中国塑料*, 2011, 25 (6): 97-102.
- [11] Zhang Xianming, Feng Lianfang, Chen Weixing, et al. Numerical simulation and experimental validation of mixing performance of kneading discs in a twin screw extruder [J]. *Polym Eng Sci*, 2009, 49 (9): 1 772-1 783.
- [12] Todd D B. 塑料混合工艺及设备[M].北京:化学工业出版社, 2002: 247-253.
- [13] Bai Yun, Sundararaj U, Nandakumar K. Nonisothermal modeling of heat transfer inside an internal batch mixer [J]. *AICHE Journal*, 2010, 57 (10): 1-13.

鞍山君利工程塑料有限公司

鞍山君利工程塑料有限公司是股份制企业,生产以工程塑料为主的改性材料。由教授级高级工程师、中国塑料加工工业协会专家委员会专家负责生产技术。可为用户提供增强、增韧、复合、阻燃、环保阻燃、抗静电、耐磨、塑料合金类系列改性工程塑料。公司竭诚为用户“量身订做个性化需求的产品,为客户创造价值”。公司通过 ISO9001:2000 国际质量管理体系认证。公司宗旨:信誉第一;质量第一。

欢迎新老客户前来指导、合作!

- 改性品种:PA66、PA6、PP、PE、ABS、AS、HIPS、POM、PC、PC/ABS、PBT、PET、PVC等系列改性塑料。
- 适用行业:家电、汽车、机械、铁路、纺织、石油化工、煤矿、农业等。

经理:徐长旭 13604228259, xuchangxu315@163.com

总工:赵文聘 13804910274, zhaowenpin315@163.com

地址:辽宁省鞍山市腾鳌镇黄县 邮编:114225 电话:0412-8935903 传真:0412-8935803 网址:www.asjls.com