

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.03.014

振动场作用下双波螺杆混炼性能数值模拟^{*}

柳天磊

(震德塑料机械有限公司,广东佛山 528300)

摘要:借助于三维数值模拟思想,对双波螺杆混炼段构建物理简化模型,并应用聚物流体分析软件 POLYFLOW 及粒子示踪法对比研究该混炼段在稳态与动态条件下的混炼性能。结果表明,双波螺杆螺槽的特殊结构导致熔体粒子各流场参数波动周期性变化;引入振动场可使熔体粒子受到的压力和作用力降低,并可使流场获得稳定的黏度;存在最佳振动强度,使得波状螺槽内熔体粒子受到剪切作用达到最大值及粒子受力实现稳定降低。

关键词:双波螺杆;振动力场;混炼性能;数值模拟

中图分类号: TQ320.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)03-0057-05

Numerical Simulation on Mixing Properties of Double Wave Screw Under Vibration Force Field

Liu Tianlei

(ChenDe Plastics Machinery Co. Ltd., Foshan 528300, China)

Abstract: With CFD software POLYFLOW, simplified models for double wave screw unit was built, three dimensional numerical simulation was carried out. And finally, using particle tracing manner, the mixing behavior of wave screw mixing unit with and without vibration force field was comparatively analysed. The results show that flow field parameters of the tracing particles change wave-like and periodically due to its special groove structure. Introducing vibration force field can lower the pressure and the acting force that the particles suffer, as well as steady viscosity. There is some vibration intensity for the best shearing action and steadily lowering action force that those melt particles undergo in wave screw groove.

Keywords: double wave screw ; vibration force field ; mixing efficiency ; numerical simulation

波状螺杆是 George A Kruder^[1-5] 于 1975 年前后设计的一种新型螺杆,因其螺槽底部呈波状变化而得名,其主要目的是解决单螺杆混炼质量差、塑化能力低等问题。最初,George A Kruder 设计出单波状挤出机用螺杆,通过改变螺槽深度成波状变化的变槽深结构来替代传统的等深螺槽结构。随后,George A Kruder 通过改变波槽数、波槽循环周期、主副螺棱结构等方法设计了双波挤出螺杆、多波挤出螺杆,并成功地把波状流道思想引入到注塑机螺杆设计中。美国 HPM 公司^[6] 通过双波螺杆实验表明,与普通螺杆相比,双波螺杆熔融温度低,加工高抗冲聚苯乙烯 (HIPS) 时产量可提高 50%,加工线性低密度聚乙烯 (PE-LLD) 时产量可提高 75%。W. R. Heathe^[6] 在计量段实现多个波状段与屏障混炼段串联设计,通过聚对苯二甲酸乙二醇酯-聚萘二甲酸乙二醇酯 (PET-PEN) 混合实验表明,在相同的温度和背压条件下,波状螺杆比传统螺杆循环时间缩短了 20%;在循环时间及背压相同时,波状螺杆比传统螺杆操作温度降低了 10℃。

相对于国外以实验研究为主,我国对波状螺杆的研究更侧重于理论分析和计算机数值仿真。陈子运等^[7-8] 提出了双槽波状螺杆内聚合物熔融的物理及数学模型,对于低密度聚乙烯 (PE-LD) 的仿真试验结果表明,在同等操作条件下,波状螺杆所需要的熔融段长度仅为普通螺杆的 58%,且随螺杆转速增加前者熔融速率比后者提高更快。张康生^[9] 根据傅立叶导热定律等理论设计了新型双波状分离型螺杆,与传统螺杆相比,使用双波状螺杆生产制品每吨能耗下降了 38.53%,生产效率提高了 16.27%,产品一次成品率提高了 5.36%。笔者尝试把瞿金平等^[10] 提出的塑料电磁动态塑化理论应用到波状螺杆中,对双波螺杆混炼段利用流体分析软件 ANSYS POLYFLOW 分析不同振动力场参数对波状螺杆混合效果的影响,为改进螺杆设计提供借鉴和指导。

^{*}2012 年广东省佛山市顺德区院市合作项目 (2012YS03)

联系人: 柳天磊,硕士,主要从事塑料成型机械优化设计及仿真模拟研究工作

收稿日期: 2014-01-03

1 模型与材料

为了简化分析,作如下假设^[1]:熔体流动为连续、等温的层流;熔体不可压缩,沿机筒和螺杆表面无滑移;忽略重力的影响和界面的表面张力。

1.1 物理模型及网格划分

图 1 为普通三段式螺杆模型,其中 L 表示螺杆的工作段, L₁ 为物料输送段, L₂ 为压缩段, L₃ 为计量段,笔者所设计的波状螺杆位于螺杆压缩段 L₂,为双波螺杆,其模型如图 2 所示。结合生产实际状况及减少网格单元数和计算量,对本波状螺杆混炼段去心化,其长度为 239 mm,螺距与直径均为 72 mm,螺槽共设 3 对上、下波,偏心距为 3 mm,上下波基圆直径均为 60 mm;流道是环形柱体,内径是 55 mm,外径是 74 mm,长度是 243 mm。波状螺杆段网格模型网格数 9 103,流道网格数 18 924。利用粒子示踪技术分析波状螺槽内的流场参数,进而评价流场整体参数分布和波状混炼段混炼性能。

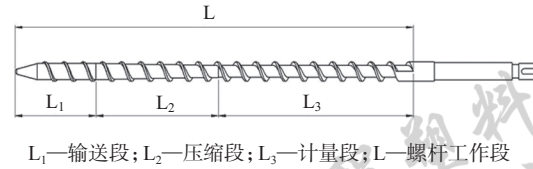


图 1 普通三段式螺杆示意图

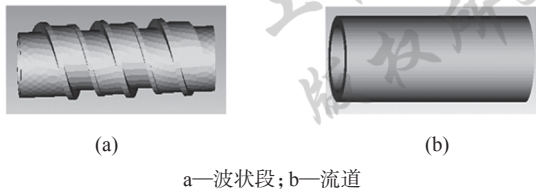


图 2 波状螺杆波状段构型设计

叠加振动场为正弦场,销钉与螺杆元件作轴向振动,设轴向振动位移 S 为:

$$S = A \sin 2\pi ft \tag{1}$$

式中: A 为销钉与螺杆轴向振动振幅, f 为销钉与螺杆轴向振动频率。对上式两边求导,则得到销钉与螺杆元件轴向振动速度 v 为:

$$\nu = 2\pi fA \cos(2\pi ft) \tag{2}$$

仿真模拟中 f 依次取 5, 10, 20 Hz, A 依次取 0.1, 0.5, 1 mm, 可得到叠加大动力场后动态分析参数,整理如表 1 所示。

表 1 叠加大动力场参数

参数	$2\pi fA/\text{mm}$	$2\pi f/\text{rad}$	相位
动态 1	15.7	31.4	$\pi/2$
动态 2	6.28	62.8	$\pi/2$
动态 3	31.4	62.8	$\pi/2$
动态 4	62.8	62.8	$\pi/2$
动态 5	62.8	125.6	$\pi/2$

1.2 材料及模拟方法

模拟采用 Bird-Carreau Law 本构模型来表征混炼熔体的黏度 η :

$$\eta = \eta_0 [1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \tag{3}$$

式中: η_0 为零剪切黏度, Pa·s; λ 为松弛时间, s; n 为 Cross 定律指数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s⁻¹。

模拟用聚合物为聚丙烯 (PP), 其物性参数为 $\eta_0=26\,470\text{ Pa}\cdot\text{s}$, $n=0.38$, $\lambda=2.15\text{ s}$, $\rho=9.1\times 10^{-4}\text{ g/mm}^3$, 入口流量 $Q=92\,300\text{ mm}^3/\text{s}$, 转速 $N=60\text{ r/min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 熔体压力

表 2 为不同振动强度参数编号。

表 2 不同振动强度参数编号

编号	f/Hz	A/mm
1 [#]	0	0
2 [#]	5	0.5
3 [#]	10	0.5
4 [#]	20	0.5
5 [#]	10	0.1
6 [#]	10	0.5
7 [#]	10	1

图 3、图 4 分别是流道内熔体压力在不同 f 与 A 作用下随时间变化曲线。

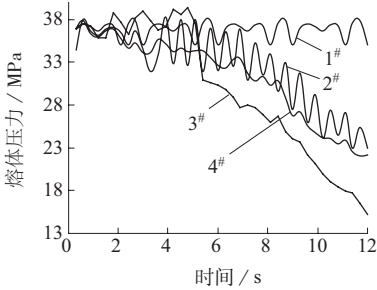


图 3 不同 f 下熔体压力随时间变化曲线

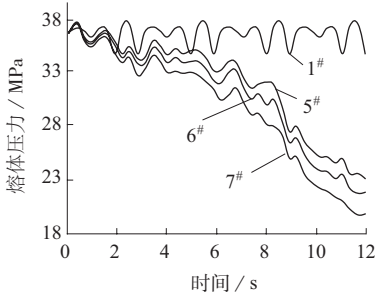


图 4 不同 A 下熔体压力随时间变化曲线

图 3 中,稳态加工 $f=0\text{ Hz}$, $A=0.5\text{ mm}$ 时 (即无叠加大动力场,下同),流道内熔体压力在 0~12 s 内围绕数值 36 MPa 上下周期性波动变化,其周期约为 3 s;叠加大动力场后,熔体压力随时间仍然呈现出周期性变化,但这种周期性呈现出衰减趋势,

且随着 f 的提高熔体压力的波动幅度逐渐衰减,波动周期增长。图4中,假设保持 $f=10$ Hz不变, A 从0.1 mm逐渐增加到1 mm,此时熔体压力同样呈现出周期性衰减变化,不同的是其波动幅度与波动周期表现出相似的变化。

图5为波状螺杆局部视图。波状螺杆波状螺槽变化的周期性导致其流道内熔体物料聚散流动,从而使其压力呈现波动变化。在分析不同振动参数对熔体压力的影响原因时,用振动强度表示振动力场的强弱,其值大小正比于 f 与 A 的乘积。图3中,引入振动力场加剧了流道内熔体高分子的解缠绕作用,大分子链断裂,小分子链增多,熔体分子间自由体积增多,导致熔体压力下降;随着振动强度的增大,高分子链间的解缠绕作用增强,熔体压力下降速度增大,解缠绕后的分子链恢复缠绕的速度下降,导致熔体压力波动周期增长。对比图3、图4可知,对流道熔体压力波动的影响而言, A 的影响略小于 f 。

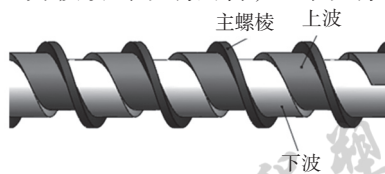


图5 波状螺杆局部视图

2.2 γ

图6为稳态时波状螺杆流道内熔体受到的 γ 随时间变化曲线, γ 呈现出明显的周期性变化,每一个 γ 极大值之后均会有一个极小值对应,这与无振动场时熔体压力周期性变化的原因类似。

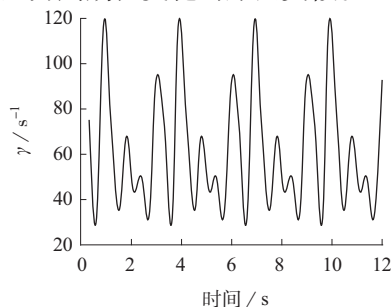


图6 无叠加振动场时流道内 γ 随时间变化曲线

波状螺槽无论是上波流道还是下波流道按照物料流入时间先后均分为收敛流道和发散流道,如图7所示。物料流经收敛流道时,随着流道空间逐渐变窄,物料经受的拉伸和剪切作用逐渐增强,在波峰中达到最大值;在经受较强的拉伸和剪切作用后,物料从收敛流道进入发散流道,随着流道空间增大,物料内部因经受强拉伸和强剪切作用而产生的黏性耗散能量得以释放,从而避免物料因局部过热而

分解。另外,波状螺槽的波峰与波谷相间排列,流向波峰的一部分物料会在压力作用下流向相邻的波谷区,这也避免了物料局部过热分解,增强了物料压力与温度分布的均匀性,从而使波状螺杆有更广泛的物料适应性。

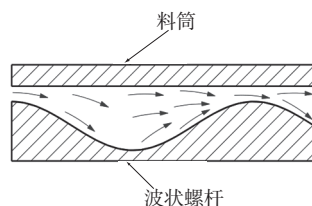


图7 波螺槽流道展开图

图8、图9分别为不同 f 和 A 下平均 γ 随时间变化对比柱状图。从图8可知,随着振动场的引入,平均 γ 增幅较大,但并不随 f 成正比例增大,相反,在达到某一值时平均 γ 开始下降。这说明存在最佳振动强度,使得该振动场作用下流道内熔体受到的剪切作用达到最大值。图9也印证了这一结论,在 $f=10$ Hz时,平均 γ 随着 A 值的增大逐渐减小。可以进一步推出,最佳振动强度在 $f=5$ Hz, $A=0.5$ mm与 $f=10$ Hz, $A=0.5$ mm之间。

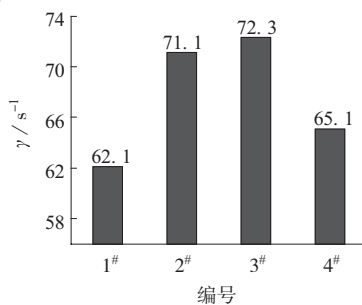


图8 不同 f 下的平均 γ

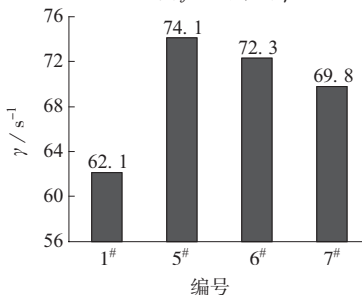


图9 不同 f 下的平均 γ

2.3 混合指数

混合指数表征了熔体内粒子运动形式和运动强度,其数值在0~1之间变化,最小值为0时表征纯旋转运动,最大值1时表征纯拉伸运动,均值0.5时则表征简单剪切运动。不同 f 和 A 下混合指数随时间变化曲线如图10、图11所示。由图10可知,与简化螺槽内流场的分析结果不一样,稳态加工时

混合指数不再为常数,而是呈现出剧烈的波动变化,这也是因为波状螺杆螺槽流道结构的周期性波状变化引起的。在波状螺槽的收敛区,物料粒子承受强剪切作用,而波状螺槽波峰与波谷的相间分布又导致物料粒子发生旋转运动。

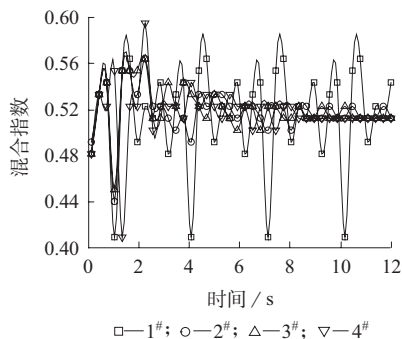


图10 不同 f 下混合指数随时间变化曲线

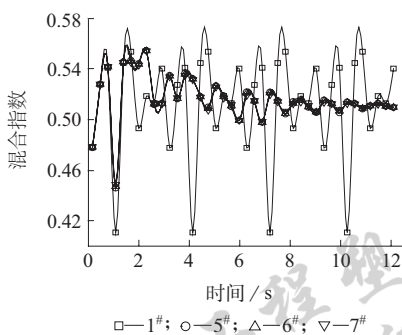


图11 不同 A 下混合指数随时间变化曲线

对比图10、图11,引入振动力场极大地减弱了曲线的波动,曲线波动幅度逐渐衰减到0.51~0.52区间内,波动周期也逐渐减小到稳定值。 f 改变时,还可以分辨出曲线的波动变化;当 f 不变、 A 变化时,曲线波动趋于一致,相互重叠,已经无法分辨出。这说明相对于 A 而言, f 的改变更能影响混合指数的分布。

波状螺杆引起螺槽波状变化导致物料混合指数在0.4~0.6区间内剧烈振荡变化,此时物料粒子以剪切运动为主,伴随有旋转运动和拉伸运动。振动场引入后,一开始物料熔体大分子链缠绕较多,在波状螺杆上波和下波的作用下仍然受到急剧变化的剪切作用和拉伸作用;随着振动力场持续地增强,大分子链的解缠绕速率增大,小分子链增多,物料的剪切、旋转和拉伸流动也受到轴向的振动叠加,波状螺槽作用机理改变,使不断解缠绕的物料熔体受到的旋转和拉伸作用逐渐减弱,而剪切作用趋向稳定。

2.4 η

示踪点处 η 的变化与混合指数的变化类似,并

且和流场内 γ 的变化成反比例关系,这是因为三个流场指数间有间接的关系。混合指数是流道内剪切场、拉伸场等流场的表征,而热塑性材料大部分有“剪切变稀”的特性。

图12、图13分别为不同 f 和 A 下熔体 η 随时间变化曲线。熔体 η 随振动参数变化的原因与混合指数的机理相似。波状螺槽的周期性波状变化导致熔体中粒子受到的剪切作用周期性变化,导致其 η 周期性波状变化。而振动场的引入增加了粒子运动的多变性,使粒子不会受到过强剪切作用或者拉伸作用,熔体 η 保持在稳定值,这样就克服了 η 急剧变化导致黏性耗散生热,增加了熔体温度的均匀性。

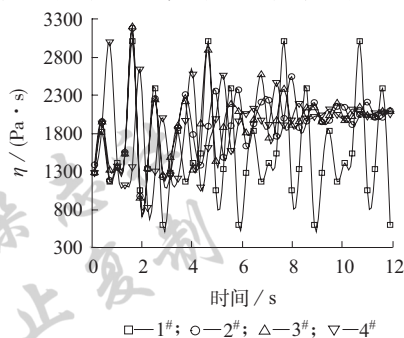


图12 不同 f 下熔体 η 随时间变化曲线

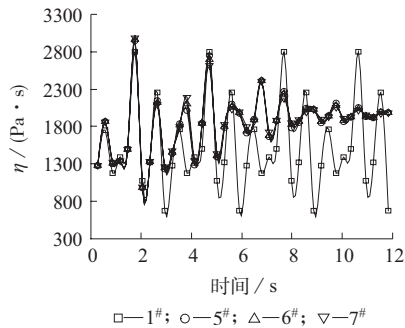


图13 不同 A 下熔体 η 随时间变化曲线

3 结论

波状螺杆因其波状结构的特殊性,其塑化过程中更容易获得稳定均匀的压力分布、受力分布,使其加工物料适应性广泛;其波峰处的强剪切作用与波谷处强剪切作用的释放使其呈现出急剧波动变化的现象,但其数值波动范围有限,不会由于“剪切变稀”、黏性耗散生热导致物料分解,这种温和的波动使其有“万能螺杆”的美誉。

引入振动力场后,波状螺杆的螺槽流道受到轴向的振动激励,使熔体粒子受到的压力与作用力均降低,在小范围振荡变化的剪切作用数值变化范围进一步缩小,使其 η 及混合作用均趋于稳定的小幅波动。通过改变振动力场振动参数,设置不同振动

强度的振动激励,可以获得不同稳定值 η 和混合指数的塑化效果。该结论对于加工性能参数变化值比较小的热塑性物料有一定的参考意义,对于改进波状螺杆设计和应用也有一定的参考价值。

参考文献

- [1] George A Kruder. Extruder with short cycle multichannel wave screw:US 4277182[P].1981-07-07.
- [2] George A Kruder. Injection molding machine with multichannel wave screw:US 4285600[P].1981-08-25.
- [3] George A Kruder. Extrusion method with short cycle multichannel wave screw:US 4356140[P].1982-10-26.
- [4] George A Kruder.Multichannel extrusion screw with a zig-zag undercut barrier:US 5035509[P].1991-07-30.
- [5] George A Kruder, William N Calland.Triple channel wave screw:US 5375992[P].1994-12-27.
- [6] Heathe W R.Double wave screw:US 6227692B1[P]. 2001-05-08.
- [7] 陈子运,彭玉成,任鸿烈.波状螺杆的熔融速率[J].华南工学院学报,1985,13(1):29-40.
- [8] 陈子运.波状螺杆及其应用[J].塑料,1987(5):15-19.
Chen Ziyun.Wave screws and their applications[J].Plastics, 1987(5):15-19.
- [9] 张康生.新型双波状分离型螺杆[J].塑料包装,1999,9(1):34-39.
Zhang Kangsheng. New double wave screw[J]. Plastics Packing, 1999,9(1):34-39.
- [10] 瞿金平,冯彦洪,彭响方,等.高分子材料动态加工新技术[J].高分子通报,2008(10):1-5.
Qu Jinping, Feng Yanhong, Peng Xiangfang, et al. Novel dynamic processing technologies for polymers[J]. Polymer Bulletin, 2008(10): 1-5.
- [11] 柳天磊.振动力场强化塑料挤出过程混合机理研究[D].江门:五邑大学,2011:18-25.
Liu Tianlei. Research on mixing mechanism under vibration force field in extruding process [D]. Jiangmen: Wuyi University, 2011:18-25.

欢迎订阅 2014 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘,请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊,是中国合成树脂供销协会会刊,荣获首届、第二届、第三届国家期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2014 年定价 15 元/期,全年 180 元。目前杂志社尚有部分 1986 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊,荣获多项省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2014 年定价 15 元/期,全年 90 元。目前杂志社尚有部分 1992 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号(1973 年)至 2013 年底共 41 卷 290 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号(1992 年)至 2013 年底共 22 卷 96 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发

售。分别利用这两种合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。

《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 530 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 230 元。

邮局汇款:

收款单位:济南市天桥区田庄东路 3 号杂志社

邮编:250031

电话:(0531)85878223 85878057 85878278

传真:(0531)85947355

银行汇款:

户 名:中国兵器工业集团第五三研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

账 号:1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>