**三棱柱全啮型挤出机混合元件几何学研究**

柳志康[[1]](#footnote-1),1 范元勋1,2 张家诚1

（1.南京理工大学 机械学院， 南京 210094）

摘要：本文根据新型玻璃纤维增强材料生产工艺需求，提出了一种双螺杆挤出机用三棱柱全啮合混合元件，阐释了其啮合设计理论，并发展了一种偏心设计方法，以及讨论了偏心设计下设计参数的取值范围。本文再根据几何学原理详细分析了此种元件的几何性质，推导了设计参数与混合腔体积的表达式，并用数值拟合的方法简化了表达式以应用于实际设计，最后通过对混合曲面法线分析，得出了输送能力与元件螺旋参数的关系，给出了参数选择合理范围。本文不但为此元件的设计制造及混合实验提供了必要的理论准备，而且在相似的双螺杆挤出机元件几何构型设计方面具有一定的参考价值。

关键词：玻璃纤维 混合元件 双螺杆挤出机 设计理论

Geometry Study of Fully Wiped Triangular Prism Mixing Component for Twin-Screw Equipment

Liu Zhikang1  Fan Yuanxun1  Zhang Jiacheng1

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing Univ. of Science&Technology, Nanjing 210094)

**Abstract:** According to the requirements of the production process of new glass fiber reinforced materials, this paper proposes a full-mesh triangular prism mixing element for twin-screw extruders, explains its full meshing design theory, and develops an eccentric design method, under which the range of the design parameters have also been discussed. In this paper, the geometric properties of the components are analyzed in detail according to the geometric principle. The expressions of the design parameters and the volume of the mixing cavity are derived. The numerical fitting method is used to simplify the expression to be applied to the actual design. Finally, the analysis of mixed surface normal shows the relationship between the conveying capacity and the component spiral parameters, and gives a reasonable range of parameter selection. It not only provides the necessary theoretical preparation for the design, manufacture and mixing experiments of this component, but also has certain reference value in the geometric design of similar ones.

**Keywords:** Glass fiber; Mixing component; Twin screw extruder; Design theory

0介绍

在聚合物生产制备领域，双螺杆挤出机是现今聚合物共混改性使用最多的设备之一[1]，作为挤出机核心的混炼元件则是决定了挤出机的材料制备性能的关键。随着新型材料的不断发展，相应的制备工艺被相继提出，因此为了满足不同的需求，挤出机的混炼元件成为了国内外专家学者的研究热点并开发出了一系类新型元件，如日本研发的VCTM元件、美国的FTX Polygon元件、德国的RGS元件以及国内的 S型元件都各有特点[2]。而诸多的材料制备工艺中，玻璃纤维因其低廉的成本和良好的性能常被作为材料增强改性的添加剂，各类玻纤增强塑料、增强橡胶、增强水泥等制品层出不穷[3]。

本文根据一玻纤增强材料实际生产所需的工艺要求，提出了一种新型的三棱柱混合元件，如图1所示，此种混合元件其由类三角形端面扭转拉伸一定距离而成。本文从运动学和几何学的角度出发，在BOOY[4]研究的螺杆端面截型设计方法的基础上，详细阐释了三头共轭端面截型的构造方法并确立了其数学模型以保证混合元件可实现全段啮合，使双螺杆挤出机不丢失其自洁性，并提出了一种适应性偏心设计方法，使此种元件具备良好的互换性，能安装在现有的双螺杆挤出机设备上，同时提升混合能力。另一方面，本文也分析建立了混合腔的流道体积和元件混合面的数学模型，均旨在为进一步的制造及实验提供必要的设计理论方法。



图1 三棱柱混合元件

1端面构型

三棱柱混合元件的端面采用的是三头螺杆端面，如图2所示。在同向啮合双螺杆挤出机中，元件旋转方向和速度都相同，由相对运动原理可知，端面的旋转可看作绕的圆平动[5]。若端面截型外接圆半径为，中心距为，内切圆半径为，由BOOY的双螺杆几何学原理可知 端弧在间作圆平动时形成圆弧包络线，半径为内切圆半径。在之外， 包络形成圆心为，半径为中心距，与相切的圆弧。包络线则是是圆心为，半径为并与相切的圆弧。此时易证、、对应角度相等，设为。

若定义：

 (1)

则由几何关系可知为， 为，顶端圆弧对应的角度也为,因此圆周角的构成为：

 (2)

将式（1）代入式（2），解得:

 (3)



图2 端面构型

因此，以为原点的端面曲线极坐标式可写成

(4)

特殊的，当时，端面构型如图所示，两外接圆中心距达最小，有

此时端面截型曲线极坐标方程为:

 (5)

其中：

2偏心设计

2.1偏心设计优势

元件采用偏心设计，装配结构和混合性能都会比非偏心元件有优势。首先在结构上，双螺杆挤出机中输送螺杆和机筒很多厂家已经形成了标准化系列化产品，如图3所示，当螺杆选定时，为了保证啮合，机筒圆的大小和中心距就是螺杆外圆和装配中心距。螺杆元件一般有单头、双头，正确装配时螺杆的根圆与混合元件内切圆全等，因此如果非偏心混合元件正确装配则螺杆根圆需取大值，以至于传输空腔受限，整体混合量降低。偏心设计便很好地解决了这一矛盾，使得螺杆根圆较小时依然能正确装配。

性能上偏心螺杆的混合腔更大，且类似于Chris Rauwendall[6]的楔形螺棱设计，提供了足够的拉伸混合流场，在非熔融状态下的纤维混合工况中极大程度的维持了纤维的长度，从而使得混合材料混合后能有更好的性能。

2.2设计方法

如图3所示，机筒圆半径为，中心距为，若偏心距为，则由几何关系可知，混合元件端面中心距与螺筒中心距相同为，外接圆半径满足下式：

 (6)



图3 偏心元件

根据相对运动学可知端面构型依然是由绕内接圆圆心的平动包络线形成，所以非偏心混合元件端面构型的几何分析式同样适用于偏心的情况。将式(6)代入式(1)有：

 (7)

即有:

 (8)

设计时，一般以现有机筒的顶圆半径和中心距作为已知条件。采用非偏心设计则混合元件外接圆与相等，偏心设计时外接圆与存在式(6)所述关系。若将与的比值和偏心距与的比值作为设计的重要参数，设：

 (9)

将式代入式中，得到：

 (10)

实际产品上最小值为1，所以，特别的，时为非偏心设计。

选取系列值绘制与的关系如图4所示：



图4 不同值的与的关系

可见偏心距越大，相同的对应的端弧角越大，的取值范围为：，而当已知的时便可通过选取合适的偏心距获取所需的端面截型。

3混合腔分析

3.1混合腔体积分析

混合腔体积是衡量混合工作能力的重要指标，Potente H[7]在研究多过程非啮合元件时也着重考量了混合体积。体积越大则所能容纳的物料越多，但也容易局部堆料以至混合不均匀。因而了解混合腔体积与混合元件的关系既是元件设计的重要参考，又是进一步研究混合物流体在混合腔内力学作用的必要准备。

混合腔的体积是螺筒体积与混合元件体积的差值，若混合腔深度为，则有：

 (11)

式中：——混合腔体积；

——螺筒截面积；

——混合元件端面面积。

由几何方法推导螺筒截面积为：

 (12)

混合元件端面面积为：

(13)

将式(12)、(13)代入式(11)，并引入体积系数：

 (14)

得到为：

 (15)

式中：；；

用MATLAB绘制系列值的与的关系如图5所示：

可以看出随着偏心的增大，体积不断增大，而同一偏心距下，与几乎呈线性递减关系，这表明，若螺筒的半径确定，在混合元件全啮合的条件下，混合腔的体积会随着中心距的增大而减少。所以为了保证足够的混合空间，中心距不能过大。

图中也可以看出，较小的取值空间造成与在同一值下有较强的线性关系，因此可用MATLAB将式(15)拟合成含参数的一次式，以方便的求得的近似值，拟合式为：

 (16)

式中 ：；



图5 不同值的与的关系

3.2输送能力分析

物料在混合腔内流动时所受的表面力是分析其流体力学行为的重要因素，产生在物料与元件的接触面上，作用方向为接触面的法线方向，而接触面即为元件的侧面，以图1中段形成的右旋螺旋面为例，其数学模型为：

 (17)

式中：

对混合建立混合面法线模型则可初步了解物料的表面力作用情况。

啮合曲面法线矢量式为：

 (18)

令：

 (19)

法线向量式有：

(20)

Carrot C[8]，谢林生[9]研究螺杆输送能力时均考虑了螺杆对物料的推力，而推力正是沿着螺杆轴向，因此表征了混合元件的输送能力，为了避免纤维的卡阻，混合件需要一定的输送能力，但输送能力过大则会丧失拉伸混合能力。建立轴法线单位分量的数学模型以分析设计参数、对元件输送能力和混合能力的影响。

由向量式推导法线单位向量分量为：

 (21)

令：

 (22)

将式(19)、(22)代入式(21)得关于，，的函数，且有：

 (23)

分析函数的单调性可知，的最大值的为：

 (24)

选取系列绘制与的关系如图6所示:



图6 与的关系

由图可知，大致上，当时，输送能力随着的增加剧减，且越大递减速度越大，而当时，输送能力较弱变化平缓，当时，元件几乎没有了输送能力。因而为了保留输送能力，设计时要使得。

4总结

本文针对实际生产需求，提出了一种能够产生足够拉伸流场的新型三棱柱混合元件，并从几何学角度阐释了此种元件的设计方法，分析了元件流道的几何性质。由上述几何学原理推导可知：

双螺杆挤出若要保有自洁能力，混合元件需实现全段啮合，因此同向旋转时端截面实时接触且不干涉，此时端截面曲线满足式(4)，且装配时要有正确的安装相位，而啮合面满足式(17)。

在一般设计不能适配现有挤出机或混合腔体积过小时可采用偏心设计，偏心设计能适配比值更小的螺筒圆与中心距组合，产生更多的混合腔体积，增强以拉伸流场为主导的分布混合。

混合腔体积随着螺筒半径与中心距的增加而降低，随着偏心距的增大而增大，数量关系满足式(15)，具体设计时也可以用拟合式(16)作近似计算。

元件的输送能力随着导程的增大而减小，设计时，为了保证良好的混合性能的同时能有一定的输送能力，可取，当时输送能力强，丧失了混合性能，时几乎没有输送能力，因而当玻纤较多时容易堆积卡阻。

参考文献

[1] 王远, 马秀清. 新型捏合盘元件不同螺杆构型混合性能的数值模拟[J]. 橡塑技术与装备, 2016(12):63-67.

[2] 石保虎,何和智.啮合同向双螺杆挤出机新型螺杆元件的结构和性能[J].塑料科技,2011,39(08):81-84.

[3]赵皎云.泰山玻纤的现代化成品物流管理[J].物流技术与应用,2011,16(01):44-47.

[4] Booy M L . Geometry of fully wiped twin-screw equipment[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2010, 18(12):973-984.

[5]刘光知.同向双螺杆挤出机啮合特性及其计算机辅助设计(CAD)[J].中国塑料,1993(01):50-57.

[6]M.Delpilarnoriegae, Chrisrauwendaal. 挤出过程的问题分析及解决方案[M]. 化学工业出版社材料科学与工程出版中心，2003.

[7]Potente H , Kretschmer K , Hofmann J , et al. Process Behavior of Special Mixing Elements in Twin-screw Extruders[J]. *International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society*, 2001, 16(4):341-350.

[8]Carrot C , Guillet J , May J F , et al. Modeling of the conveying of solid polymer in the feeding zone of intermeshing co-rotating twin screw extruders (p 700-708)[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2010, 33(11):700-708.

[9]谢林生,缪国兵,陈小洪.双转子连续混炼机固体物料输送过程研究[J].现代塑料加工应用,1997(04):43-47.

1. 作者简介：1.柳志康(1994-)，男，汉族，江苏南京人，南京理工大学研究生，主要从事机械生产设备研究与设计等，(E-mail)[maisuilzk@126.com](mailto:maisuilzk@126.com)

   2.范元勋（1964-）（通讯作者），男，汉族，江苏南通人，南京理工大学机械工程学院教授、硕士生导师，主要从事机械设计及理论研究等，（Email）fanyx@mail.njust.edu.cn [↑](#footnote-ref-1)