

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.01.016

大型双转子连续混炼机转子混炼段混合性能的研究^{*}

张晓强, 黄建东, 江波, 毕超
(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 对 Ø450 大型双转子连续混炼机转子混炼段混合性能和力学性能进行研究。分析啮合间隙、转子导程、转子正反段长度比等几何参数对混炼机剪切应力分布、转子所承受的轴向力和扭矩的影响。研究表明, 转子啮合间隙对转子混合性能和力学性能影响最为显著, 随着啮合间隙的增大, 剪切应力、转子所受的轴向力和扭矩会逐渐下降; 转子导程变化对转子力学性能的影响相对明显; 转子正反段长度比不仅影响转子所承受的轴向力, 而且还影响剪切应力分布, 对转子所受扭矩影响不大。

关键词: 双转子混炼机; 混合性能; 力学性能

中图分类号: TQ330.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)01-0072-04

Study on Mixing Performance of Kneading Section of Rotors in Large-Scale Twin-Rotor Continuous Mixer

Zhang Xiaoqiang, Huang Jiandong, Jiang Bo, Bi Chao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : The mixing performance and mechanical properties of the kneading section of the rotors in Ø450 twin-rotor continuous mixer were studied. The effects of the geometry parameters on the shear stress distribution, axial force and torque were analyzed. The geometric parameters included the kneading clearance, the lead of rotor, and the peak position of the rotor. The results show that the kneading clearance has an important impact on the mixing performance and the mechanical properties. As the kneading clearance increases, the shear stress, axial force and torque decline. The effect of the rotor lead on mechanical properties of rotor is prominent. The peak position of the rotor influences both the rotor axial force and shear stress distribution significantly, but it has no relationship with the torque impacted on the rotors.

Keywords : twin-rotor continuous mixer ; mixing performance ; mechanical properties

大型双转子连续混炼机组是我国石化企业用于高密度聚乙烯挤压造粒的主要装备。在我国自主研发齐鲁石化年产 25 万 t 大型双转子连续混炼机组之前, 国际上能够完成该类装备设计、制造的主要就是法拉尔和神户制钢、日本制钢等少数几个企业, 垄断了整个市场, 成为制约我国石化产业发展的一个重要条件。

混炼系统是大型双转子连续混炼机组自主研发的关键部件, 其中转子又是混炼系统的重中之重。大型挤压造粒机组加工适用范围要求较高, 但又面临转子不易更换, 转速不能调整的限制, 所以提高转子适用范围、提高转子混炼质量和延长转子使用寿命成为大型转子的设计关键。自 2012 年以来, 国内科研人员在中小型双转子连续混炼机混合性能方面开展了很多研究工作^[1-4], 但是由于大型装备独特的工艺过程, 以及加工聚合物物性参数具有较强的非线性特征, 都使得在小型装备上所获得的研究成果

不足以支撑大型装备的研发。

笔者采用 Polyflow 软件对 Ø450 大型双转子连续混炼机组的混合性能和力学性能进行研究。分析啮合间隙、转子导程、转子正反段长度比等几何参数对混炼机混合性能的影响。使用剪切应力分布作为混合性能的量化指标, 选用转子所承受的轴向力和扭矩作为力学性能的量化指标。笔者所研究内容可为大型双转子连续混炼机组挤压系统开发提供理论指导。

1 有限元模拟

模拟中采用网格重叠技术以减少网格划分的难度。为了详细地描述转子段的混炼状态, 在一个转子转动周期内取 60 个结果。然后, 利用统计分析模块计算初始时刻布置在转子入口处 3 000 个粒子

^{*} 北京高等学校青年英才计划项目

联系人: 毕超, 副教授, 主要从事高分子材料挤出混炼设备研究

收稿日期: 2014-10-27

的流动轨迹,并沿着粒子轨迹对混炼量化指标进行统计分析。

1.1 基本假设

物料在双转子混炼机螺纹元件内的流动为三维、非定常、黏性、全展流动;物料在螺槽内的流动过程与外界不发生热交换;忽略重力和惯性力的影响;壁面无滑移。

1.2 边界条件

入口:给定流量流率,设定密度为 $8.68 \text{ m}^3/\text{s}$;出口:定义为 outflow;外壁面:壁面无滑移,速度为 0;左右转子孔:法向速度和切向力为 0;左右转子:给定速度 370 r/min ,方向相反,向内相对转动。

1.3 几何模型和网格划分

大型双转子连续混炼机转子的混炼段模型如图 1 所示,基本参数见表 1 所示。

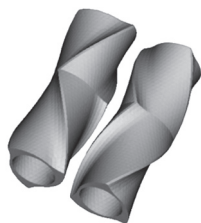


图 1 转子混炼段几何模型

表 1 转子元件基本参数

转子外径	转子内径	机筒内径	啮合间隙	导程	长度比
460	300	470~500	5~20	1200~2400	1:2~4:1

为精确描述转子构型,对转子采用四面体网格进行网格划分,见图 2 所示。为提高计算精度,对流体区域选用六面体网格进行网格划分,见图 3 所示。流体区域网格约 10 万个,转子区域控制在 3 万左右,确保 32G 内存的计算机能够顺利完成计算。

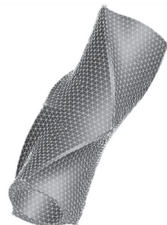


图 2 转子的网格划分

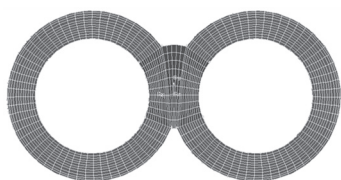


图 3 流体区域的网格划分

1.4 本构方程

计算中所用物料为聚乙烯(PE),采用 Bird-Carr-

eau 本构方程模型:

$$\eta = (\eta_0 - \eta_\infty) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{[(n-1)/2]} \quad (1)$$

式中: η_0 为零剪切黏度 ($5000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$); η_∞ 为无限大剪切速率下物料的黏度 ($100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$); λ 为松弛时间 (0.5 s); $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为幂律指数 (0.45)。

2 结果与讨论

2.1 几何参数对转子段混合性能的影响

众所周知,对于大型双转子连续混炼机组来说,混炼系统施加到物料上的剪切是物料充分塑化的主要因素。剪切不足会造成物料塑化不充分,过高的剪切应力会造成分子链断裂。转子设计中要权衡各个几何参数对剪切应力的影响,同时考虑物料体系所需的剪切应力范围。

(1) 啮合间隙的影响。

图 4 为不同啮合间隙下的平均最大剪切应力分布曲线。由图 4 可以看出,随着啮合间隙的增加,物料在混炼段内所受到的平均最大剪切应力分布曲线的峰值往低剪切方向移动且分布的宽度减小。表 2 为不同啮合间隙下的平均最大剪切应力。

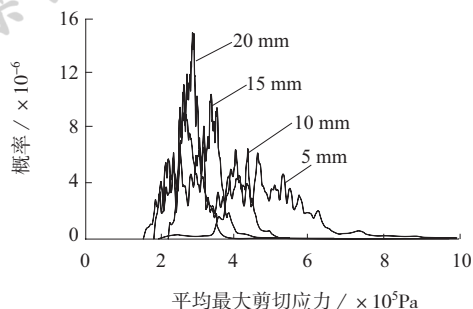


图 4 不同啮合间隙下的平均最大剪切应力分布曲线

表 2 不同啮合间隙下的平均最大剪切应力

项目	啮合间隙 / mm			
	5	10	15	20
平均最大剪切应力 / Pa	560 003.4	342 172.6	292 674.4	271 082.5
平均最大剪切应力分布方差 / Pa ²	171 096.7	70 878.1	56 939.6	47 451.4

由图 4 和表 2 可知,随着啮合间隙的增大,物料所受的剪切应力明显减小。当啮合间隙由 5 mm 增加到 20 mm 时,物料在转子段内受到的平均剪切应力降低了 51.59% 。同时,增大啮合间隙还有利于提高物料承受剪切应力的均匀性,有利于保证物料性能一致。

(2) 转子导程的影响。

图 5 为不同导程下的平均最大剪切应力分布曲线。由图 5 可知,当转子正反段长度比恒定、正反

段转子导程数值大小相同时,随着导程从 1 200 mm 增加到 2 400 mm,示踪粒子经历平均最大剪切应力分布曲线更加偏向高剪切应力数值一侧。

表 3 为不同导程下的平均最大剪切应力。从表 3 可以看出,当转子导程从 1 200 mm 增加到 2 400 mm 时,流场内平均最大剪切应力提高了 5.03%。但是,平均最大剪切应力的分布方差随着导程的增加显著增大。可见,过大的转子导程不利于获得性能均匀的混炼物料。

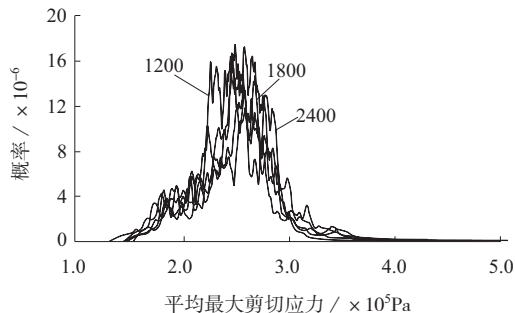


图5 不同导程下的平均最大剪切应力分布曲线

表3 不同导程下的平均最大剪切应力

项目	导程/mm		
	1 200	1 800	2 400
平均最大剪切应力/Pa	251 594.45	255 917.42	264 266.81
平均最大剪切应力分布方差/Pa ²	33 161.996	42 124.184	48 309.504

(3) 转子正反向导程段长度比的影响。

为了获取较大的剪切,将转子导程确定为 2 400 mm,研究正向导程和反向导程长度比对剪切应力的影响。表 4 为不同正反段长度比下的平均最大剪切应力。由表 4 中数据可见,当正反段长度比为 1 : 1 时,示踪粒子所经历最大剪切应力的平均值最大。但是从混炼剪切均匀性角度上讲,当长度比为 4 : 1 时,剪切得均匀性最好。

表4 不同正反段长度比下的平均最大剪切应力

项目	长度比				
	1 : 2	1 : 1	2 : 1	3 : 1	4 : 1
平均最大剪切应力/Pa	267 908	273 681	264 266	265 540	265 187
平均最大剪切应力分布方差/Pa ²	52 320.3	51 653.1	48 309.5	50 475.2	45 955.8

2.2 几何参数对转子段力学性能的影响

转子所受轴向力和扭矩对转子的寿命有直接影响。轴向力的正方向与挤出方向一致,当反向导程段长度大于正向导程段长度时,其转子所受的轴向力就会与挤出方向一致,即为正;当正向导程段长度大于反向导程段长度时,轴向力方向就与挤出方向相反,即为负。

图 6 为啮合间隙为 20 mm,转速为 370 r/min,导程为 2 400 mm 时,转子所受轴向力随转动位置的变化。由图 6 可看出,由于采用三头螺旋结构,所以在转子转动过程中,转子所受轴向力周期性变化,周期为 120°,且左右转子受力状态相差 60° 相位。

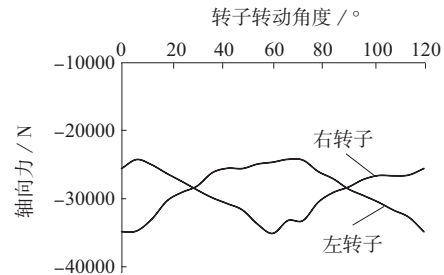


图6 转子所受轴向力随转动位置的变化

(1) 啮合间隙的影响。

图 7 为不同啮合间隙下的平均轴向力曲线。从图 7 可以看出,转子啮合间隙由 5 mm 增加到 20 mm,转子所受轴向力由 25 262.86 N 变为 9 424.86 N,减小了 62.69%。由此可见,随着转子啮合间隙的增加,转子所受轴向力显著减小。图 8 为不同啮合间隙下的平均扭矩曲线。由图 8 可以看出,转子所受的扭矩也由 83 787 N·m 变为 49 056 N·m,减小了 41.45%。可见,增加啮合间隙是改善转子受力状态的重要因素。

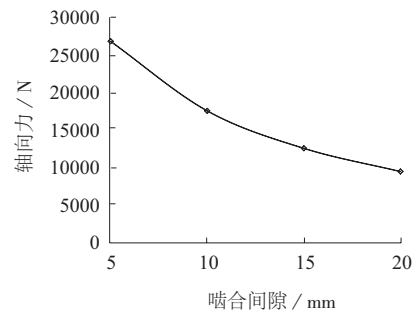


图7 不同啮合间隙下的平均轴向力曲线

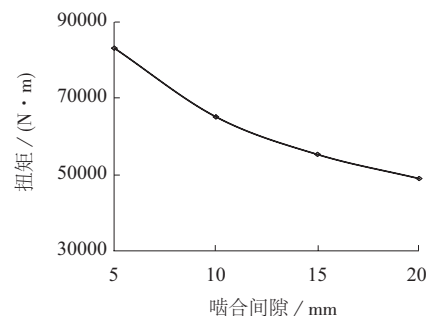


图8 不同啮合间隙下的平均扭矩曲线

(2) 导程的影响。

图 9、图 10 分别为正反段导程相同时,导程

大小对轴向力和扭矩的影响。由图9可以看出,当正反段导程大小相同时,增大转子导程,转子所受轴向力逐渐减小。当导程从1200 mm增加到2400 mm时,转子所受轴向力由48966.86 N变为28079.28 N,减小了42.66%。由图10可以看出,转子所承受扭矩随转子导程的增加,在1800 mm导程处出现极大值,但在研究导程范围内扭矩数值变化很小。

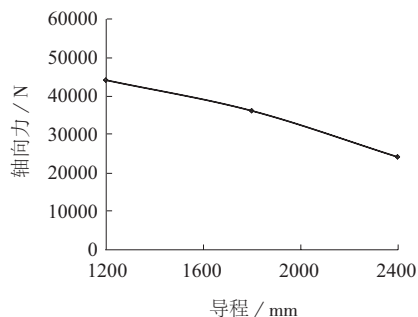


图9 导程大小对轴向力的影响

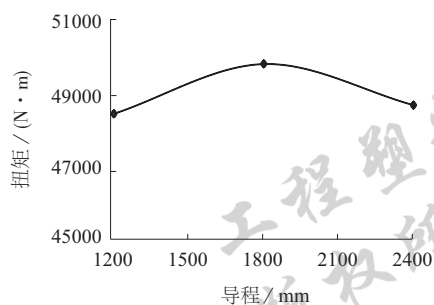


图10 导程大小对扭矩的影响

(3) 正反段长度比对轴向力的影响。

图11为转子总长度固定为2400 mm,转子的正反段长度比由0.5增加到4.0时转子所受轴向力的曲线。从图11可以看出,当转子长度比为1:1时,转子所受的轴向力基本为0。当长度比小于1,即反向导程段长度大于正向导程段长度时,转子所受轴向力与挤出方向一致。当正向导程段长度大于反向导程段长度时,轴向力方向与挤出方向相反,且随着长度比增加,轴向力增大。

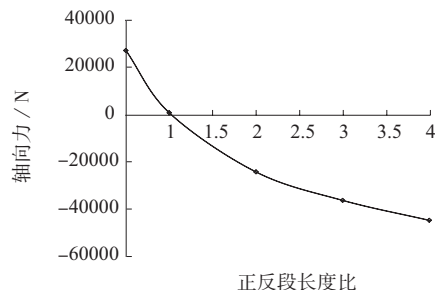


图11 不同正反段长度比下的平均轴向力曲线

图12为转子总长度固定为2400 mm,转子的

正反段长度比由0.5增加到4.0时转子所受扭矩的曲线。从图12可以看出,随着转子正反段长度比的增加,转子所受扭矩曲线基本为一条直线,从数据上看,在长度比从0.5~4.0变化的过程中,其扭矩最大值与最小值的差别仅为0.34%,由此可见正反段长度比对转子所受扭矩的影响不大。

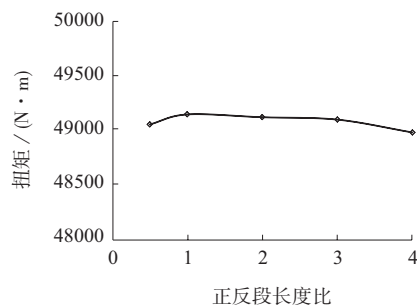


图12 不同长度比下的平均扭矩曲线

3 结论

试验研究表明:(1) 转子啮合间隙的选取对剪切应力、转子所承受的扭矩和轴向力的影响最为显著。随着啮合间隙的增大,剪切应力、转子所受的轴向力和扭矩会逐渐下降;(2) 正反段导程大小相同时,增大转子导程,转子所受扭矩和平均最大剪切应力变化不显著,轴向力逐渐减小;(3) 正反段长度比对转子所受扭矩影响不大,但对轴向力的影响显著。在转子正反段长度比为1:1时,转子所受的剪切力最大,但是从混炼剪切均匀性角度上讲,当长度比为4:1时,剪切得均匀性最好。

参考文献

- [1] 刘晓鸣,谢林生,马玉录,等. 双转子连续混炼机转子混炼段流场的数值研究[J]. 中国塑料,2006(11): 95-99.
Liu Xiaoming, Xie Linsheng, Ma Yulu, et al. Numerical simulation of flow fields in the mixing section of the rotor of a two-rotor continuous mixer[J]. China Plastics, 2006(11): 95-99.
- [2] 张霞,谢林生,马玉录. 双转子连续混炼机混炼段拉伸作用的研究[J]. 中国塑料,2010(3): 108-113.
Zhang Xia, Xie Linsheng, Ma Yulu. Study on stretching effect in mixing section of two-rotor continuous mixers[J]. China Plastics, 2010(3): 108-113.
- [3] 缪国斌,田华,谢林生. 双转子连续混炼机混炼段的剪切应力[J]. 常州大学学报(自然科学版),2011(4):32-36.
Miao Guobin, Tian Hua, Xie Linsheng. Study of shear stress of double rotor continuous mixer in mixing process[J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2011(4):32-36.
- [4] 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(6):102-107.
Li Jianli, Gong Shuyun, Ma Yulu, et al. Similar scale-up of mixing section of a two-rotor continuous mixer[J]. China Plastics, 2011(6):102-107.