

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.04.016

基于流固耦合的密炼机转子瞬态工作特性研究

何延东¹, 韩博宏²

(辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁抚顺 113001)

摘要:采用双向流固耦合计算方法,对密炼机转子系统进行瞬态模拟分析。转子应力从转子棱顶到转子根部逐渐增大,最大值出现在轴肩部位,而此部位并没有发生转子形变;最大变形出现在棱顶部位;转子棱部等效应力的最大值远小于转子轴部,最大等效应力出现在长棱和短棱相接区域;棱部最大变形的部位是流体具有最大速度的区域。通过对转子瞬态变形曲线分析发现异向转子更稳定,两种转向转子最小变形值趋势一致,但最大变形量差距较大,异向转子变形量较同向转子波动范围更小且异向转子应力分布相对集中,这也有利于提高转子的使用寿命。

关键词:密炼机;流固耦合;转子;瞬态

中图分类号:TQ320.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2021)04-0084-05

Research on Transient Performance of Internal Mixer Rotor Based on Fluid-Structure Coupling

He Yandong¹, Han Bohong²

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: The transient simulation analysis of internal mixer rotor system was carried out by using two-way fluid-structure coupling calculation method. The rotor stress increases gradually from the top of the rotor edge to the root of the rotor, and the maximum stress appears at the shoulder of the shaft, but there is no rotor deformation in this position. The maximum deformation appears at the top of the edge. The maximum equivalent stress of the rotor's edge is far less than that of the rotor's shaft, and the maximum equivalent stress appears in the region where the long edge and the short edge meet. The maximum deformation of the edge is the region where the fluid has the maximum velocity. By analyzing the transient deformation curve of the rotor, it is found that the opposite rotor is more stable. The trend of the minimum deformation of the two steering rotors is the same, but the difference of the maximum deformation is large. The fluctuation range of the deformation of the opposite rotor is smaller than that of the same rotor, and the stress distribution of the opposite rotor is relatively concentrated, which is also beneficial to improve the service life of the rotor.

Keywords: internal mixer; fluid-structure coupling; rotor; transient

密炼机是物料混合的主要设备,用于聚合物的加工^[1-5],尤其在橡胶混炼中发挥重要作用。物料的流动会对转子产生力的作用,进而使转子发生变形。笔者对4WS型密炼机转子进行双向瞬态流固耦合模拟计算,分析在流场作用下转子的等效应力与变形,为新型、高效混合设备研发提供理论依据。

1 数学模型

密炼机内流体为非牛顿流体,并且为不可压缩流体,计算时采用如下假设:流场内流体为层流、在

流域内壁面上无滑移、流场是等温的、流体重力忽略不计、流体充满密炼机^[6-7]。流场本构方程采用Carreau数学模型描述流体性质^[8-12]:

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

式中, $\eta(\dot{\gamma})$ 为剪切率为时物料的黏度; η_0 为物料的初始黏度; λ 为黏弹性特征时间; η_{∞} 为无穷剪切黏度; n 为幂律指数。

在流固耦合面上满足速度协调条件^[13]:

$$V_i^f = V_i^s = V_i^s \quad (2)$$

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0061)

通信作者:何延东,副教授,主要从事流体机械传动与控制研究 E-mail: 57424824@qq.com

收稿日期:2021-02-03

引用格式:何延东,韩博宏.基于流固耦合的密炼机转子瞬态工作特性研究[J].工程塑料应用,2021,49(4):84-88.

He Yandong, Han Bohong. Research on transient performance of internal mixer rotor based on fluid-structure coupling[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(4):84-88.

力平衡条件:

$$\sigma_{ij}^f n_j^f + \sigma_{ij}^s n_j^s = \tau_i^f \quad (3)$$

式中, V_i^f 、 V_i^s 分别为耦合面速度、流体速度、结构速度在 i 方向的分量; σ_{ij}^f 、 σ_{ij}^s 分别为流体、固体应力张量; n_j^f 、 n_j^s 分别为流体、固体界面单位外法向线矢量; τ_i^f 为作用在耦合面的外力。

2 计算方法

2.1 网格划分

以剪切型转子 4WS 为模型,短棱与长棱的长度比为 1 : 1.6,如图 1 所示。网格划分采用六面体网格,如图 2 所示。

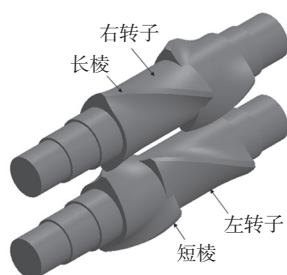


图 1 转子几何模型



图 2 转子网格模型

2.2 边界条件

边界条件设置如图 3 所示。转子一端设置成固定约束 (Fixed Support), 为全自由度约束; 转子轴承接触面设置成圆柱形约束 (Cylindrical Support), 用来约束转子径向自由度^[14]; 与流体的接触面设置成流体 - 固体接触面 (Fluid Solid Interface), 用于与流体进行数据交换。流场和结构场数据传递如图 4 所示。

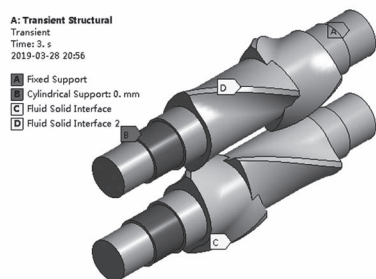


图 3 转子边界条件

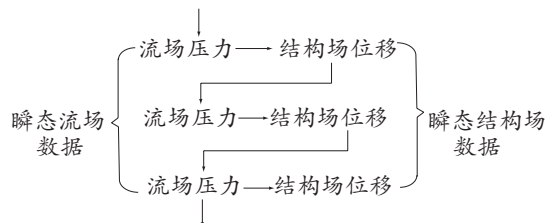
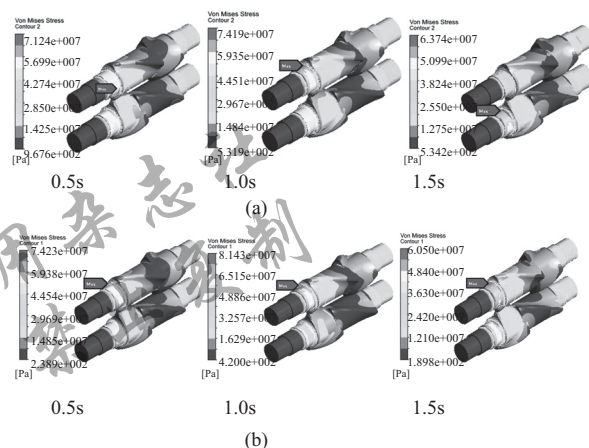


图 4 双向耦合计算数据传递示意图

3 应力应变分析

3.1 转子等效应力

密炼机工作过程中,转子在流场的作用下会发生应力应变^[15],并且应力分布随时间而发生改变,不同时刻转子上的应力分布不同,如图 5 所示。



转子: a—同向; b—异向

图 5 不同时刻转子等效应力云图

图 5a 为不同时刻转子应力分布云图。各时刻的最大应力和最小应力值在随时间变化,最值出现的位置也在随时间不断变化。从图中可看出最大应力值分布在靠近轴肩位置,在左右转子上交替出现,最小应力值出现在棱顶位置,应力梯度从棱根部位向棱顶不断扩散,最小应力的面积也随之减小,但最大应力的面积并没有随之增大,说明应力分布不断集中,逐渐趋近中间值。同一时刻左右转子的应力分布存在很大差异,左转子的最小应力面积始终比右转子大,这与左右流场的速度不同有关。右流场的速度大于左流场,应力分布集中较快,从 0.5 ~ 1 s,左转子的最小应力分布变化微小,而右转子上的最小应力面积发生明显变化,左转子直到 1.5 s 应力分布才发生较大变化。

当左右转子向相反方向转动时,应力分布出现不同现象,图 5b 为异向转子不同时刻的应力分布情况。各时刻最大应力值比同向转子大,最小应力值比同向转子小。异向转子下右转子在各时刻的分布

变化情况与同向转子大致相同,但左转子在各时刻的应力分布不同,0.5 s和1 s相比,左侧转子的最小应力面积不减反增,与同向转子情况下相反,说明异向转子所受应力随时间波动比异向转子大,但都在许用应力范围内。

转子棱部形状对整个转子受力有重要影响^[16],因此对转子棱部做进一步分析,如图6所示。

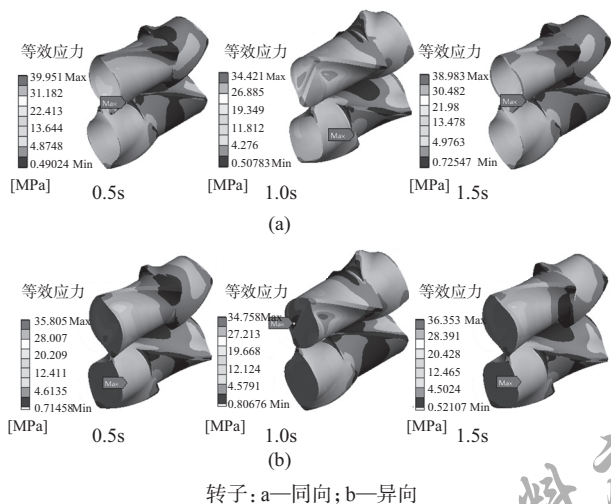


图6 不同时刻转子棱部等效应力云图

图6a为同向转子不同时刻转子棱部的应力分布云图,最大应力分布在转子长棱和短棱相接处。转子棱部等效应力的最大值远小于转子轴部,0.5 s和1.5 s左转子的应力分布大体相同,只在长棱中间位置出现细微变化,从0.5~1.5 s左转子刚好转过360°,所以转子棱部的等效应力具有周期性。右转子在不同时刻的等效应力分布变化比左转子显著,1 s右转子长棱的梯度更为明显,等效应力从转子根部到转子棱顶部位在逐渐减小。左转子长棱在不同时刻的应力分布显示,当转子棱部转到转子中心区域,等效应力会减小,这是由于在棱顶转过的区域,物料的流动速度增大造成的。

图6b为异向转子不同时刻转子棱部的等效应力云图,各转子的最大应力分布在转子棱根部。同一时刻异向转子的转子棱部应力分布与同向转子有显著区别,异向转子应力最大值比同向转速小。异向转子0.5 s和1.5 s云图中,左转子应力分布相同,再次证明了转子棱部的等效应力分布具有周期性。

3.2 转子变形

密炼机工作过程中,转子在流场的作用下会产生形变,图7为同向转子和异向转子在不同时刻的转子变形云图。同向转子最大变形发生在转子棱顶

部位,并随时间变化,在各棱顶交替出现。转子变形从转子棱根部向转子棱顶位置不断扩散,梯度清晰,但最大变形部位和最大等效应力位置不同,转子轴肩位置是最大等效应力出现的位置,此处并没有发生形变,转子棱顶部位是应力最小值出现的位置,而转子最大变形发生在棱顶部位,尤其是转子长棱和短棱过渡区。异向转子最大变形同样发生在转子棱顶位置,随时间变化在各棱之间交替出现,梯度分布与同向转子相同。两种情况下最大的区别就是,同一时刻最大变形出现的位置不同,最大变形值也不同,异向转子的转子变形最大值比同向转子大,异向转子转子变形的最大值随时间变化较大。通过图7中0.5 s和1 s变形云图可看到左转子的变化情况,当转子棱部转过流域中心区域时,棱顶会发生最大变形,整个过程中,转子棱顶发生最大变形的面积会逐渐增大直至最大,然后逐渐减小直至最小甚至消失,但是同向转子下1 s左转子长棱棱顶最大变形面积较大。从转子等效应力云图和转子变形云图来看,转子变形与转子等效应力呈负相关,结合应力分析可知,如果使用异向转子密炼机,需要格外注意转子变形,转子正常工作主要靠转子棱部与流场相互作用,所以需要保证转子棱部的形变量,当转子棱部变形达到一定程度,密炼机的混炼结果将达不到预期的效果。

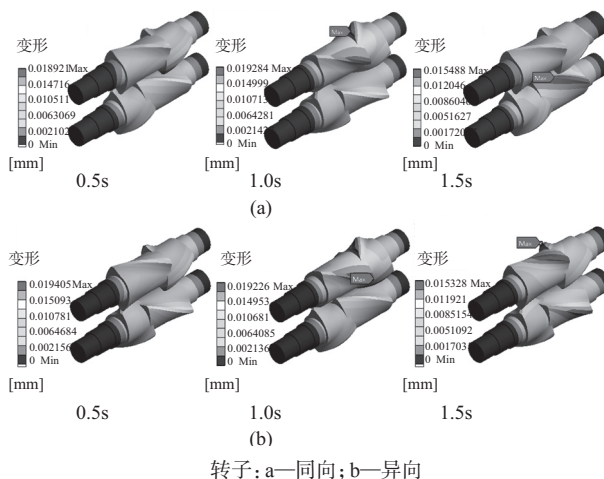


图7 不同时刻转子变形云图

从转子变形分析中可知,最大变形发生在转子棱部,故对转子棱部变形做进一步分析,图8为不同时刻下的转子棱部变形云图。转子棱部最大变形发生在转子棱顶部位,最小变形发生在转子棱根部,转子长棱与短棱的交接处变形较大,转子棱部的变形随时间不断变化,变化梯度比整个转子变形更加显

著。最大变形与最小变形发生的位置与同向转子相同,异向转子棱部最小变形比同向转子略大。 0.5 s 和 1.5 s 异向转子变形较大,最大变形值和最小变形值都大于同向转子, 1 s 最大变形值和最小变形值相差不大,两种情况下各时刻的变形云图最明显的不同在于转子棱顶位置的变形梯度分布。转子棱部的变形远大于转子轴部的变形,转子轴部不接触流体,转子棱部直接接触流体,并相互作用,转子棱部发生最大变形的部位是流体具有最大速度的区域,转子棱部的变形对流场速度分布有直接影响。

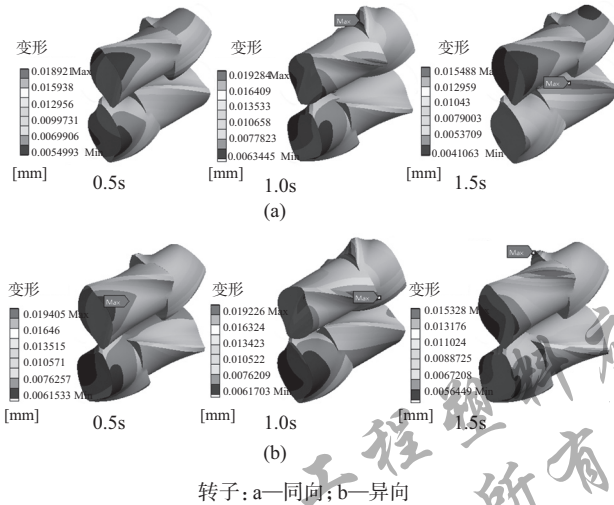


图8 不同时刻转子棱部变形云图

4 瞬态曲线

图9是各时刻的应力曲线。

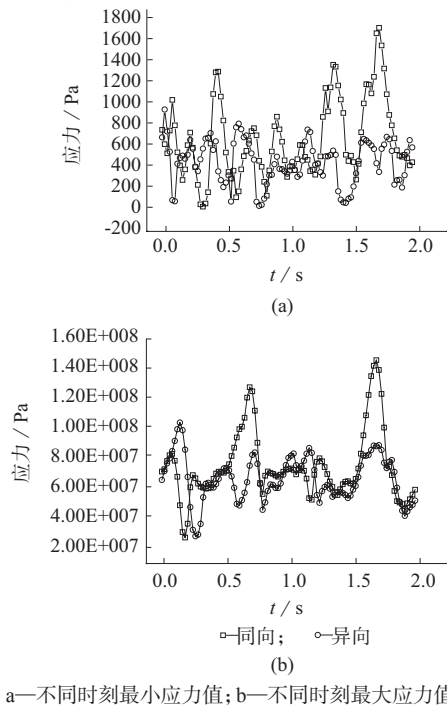
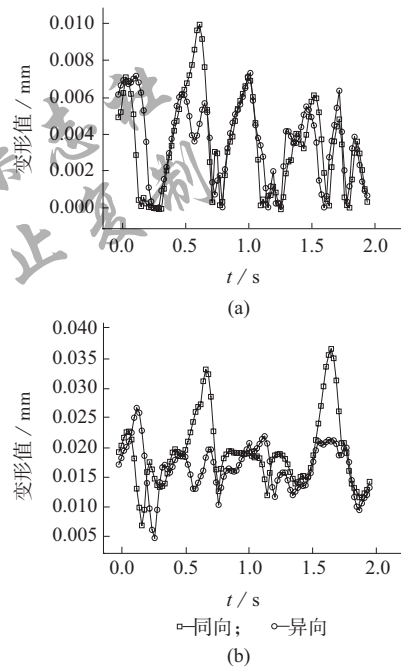


图9 等效应力曲线

两种情况下的最值出现在不同时刻,异向转子各时刻等效应力的最大值和最小值的平均值都比同向转子小。异向转子的波形图走势相对稳定,最值波动比同向转子小,应力值在平均值附近上下波动,说明异向转子的应力分布区间较小,应力较为集中。

转子整体变形云图中显示转子轴部没有发生形变,故提取了转子棱部变形的数据,如图10所示。由图10可以看出,最大变形值和最小变形值出现在不同的时刻,异向转子各时刻最小变形值的平均值大于同向转子,最大变形值的平均值小于同向转子。整个过程中各时刻的最小变形值的趋势大致相同,最大变形值的波形相差较大,异向转子的波形起伏较小,相对稳定。



a—不同时刻最小变形值; b—不同时刻最大变形值

图10 转子变形曲线

5 结论

(1) 转子最大应力出现在轴肩部位,应力梯度从转子棱根部向转子棱顶扩散;转子最大变形出现在棱顶部位,轴部不发生形变。同向转子变形从转子棱根部向转子棱顶位置不断扩散,梯度清晰,转子棱顶部位应力最小。

(2) 相较于同向转子,异向转子的应力和变形的平均值较小,应力和变形分布区间较小,随时间波动较小,相对稳定。

(3) 转子棱部等效应力的最大值远小于转子轴部,由棱顶到棱根呈递增梯度分布,最大等效应力出现在长棱和短棱相接区域。同向转子等效应力比异

向转子大,异向转子的最值波动比同向转子小。转子棱部最大变形部位是流体具有最大速度的区域。

参考文献

- [1] 于清溪. 密闭式橡胶混炼机的技术现状及最近发展[J]. 橡塑技术与装备, 2010, 36(9): 4-17.
Yu Qingxi. Technology status and recent development of closed rubber mixer[J]. Rubber & Plastics Technology and Equipment, 2010, 36(9): 4-17.
- [2] 唐国政, 任振锋. 密炼机 ZZ2 型转子及 6WI 型转子的工作原理和特点[J]. 橡塑技术与设备, 2007, 33(8): 10-14.
Tang Guozheng, Ren Zhenfeng. Working principle and characteristics of ZZ2 type rotor and 6WI type rotor of internal mixer[J]. Rubber & Plastics Technology and Equipment, 2007, 33(8): 10-14.
- [3] 杨顺根. 密炼机的现状发展与趋势[J]. 橡塑技术与装备, 2008, 34(2): 18-23.
Yang Shungen. Current situation, development and trend of internal mixer[J]. Rubber & Plastics Technology and Equipment, 2008, 34(2): 18-23.
- [4] 何跃. 增强橡胶体积拉伸形变连续混炼制备及其结构性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
He Yue. Study on the preparation and structure properties of continuous mixture of reinforced rubber by volume tensile deformation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [5] 于清溪. 密闭式橡胶混炼机的技术现状及最近发展[J]. 橡塑技术与装备, 2010(9): 4-17.
Yu Qingxi. Technology status and recent development of closed rubber mixer[J]. Rubber & Plastics Technology and Equipment, 2010(9): 4-17.
- [6] 高明, 陈立, 朱向哲, 等. 转速对密炼机 HDPE/PS 共混聚合物混合效率的影响[J]. 石油化工高等学校学报, 2015, 28(3): 86-90.
Gao Ming, Chen Li, Zhu Xiangzhe, et al. Effect of rotating speed on mixing efficiency of HDPE/PS blends in internal mixer[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2015, 28(3): 86-90.
- [7] 王洋, 王洪玉, 张翔, 等. 基于流固耦合理论的离心泵冲击焊接叶轮强度分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 131-136.
Wang Yang, Wang Hongyu, Zhang Xiang, et al. Strength analysis of impeller in impact welding of centrifugal pump based on fluid-structure coupling theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 131-136.
- [8] Zhu H, Y Zhigang. Fluid-structure interaction study of three-dimensional vehicle model under crosswind[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(6): 1-10.
- [9] 韩博宏, 何延东, 朱向哲. 密炼机转子系统流场特性研究[J]. 中国塑料, 2020, 34(4): 60-69.
Han Bohong, He Yandong, Zhu Xiangzhe. Research on flow field characteristics of internal mixer rotor system[J]. China Plastics, 2020, 34(4): 60-69.
- [10] 李天照, 高鹤, 朱向哲. 转子相位角对密炼机内流体输运机理的影响[J]. 塑料, 2018, 47(6): 29-33+47.
Li Tianzhao, Gao He, Zhu Xiangzhe. Influence of rotor phase angle on fluid transport mechanism in internal mixer[J]. Plastics, 2018, 47(6): 29-33+47.
- [11] 刘金朋, 李凡珠, 杨海波, 等. 哈克密炼机三维流场的非等温数值模拟研究[J]. 橡胶工业, 2016, 63(7): 429-433.
Liu Jinpeng, Li Fanzhu, Yang Haibo, et al. Nonisothermal numerical simulation of 3D flow field of haque internal mixer[J]. Rubber Industry, 2016, 63(7): 429-433.
- [12] 程志飞, 何延东, 朱向哲, 等. Roller 转子密炼机聚合物流体的混沌混合特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(12): 128-132.
Cheng Zhifei, He Yandong, Zhu Xiangzhe, et al. Chaos mixing characteristics of polymer fluid in roller rotor mixer[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2013, 29(12): 128-132.
- [13] Connolly R K, Kokini J L. 2D numerical simulation of differential viscoelastic fluids in a single-screw continuous mixer: application of viscoelastic finite element methods[J]. Advances in Polymer Technology, 2003, 22(1): 22-41.
- [14] 高鹤, 朱向哲, 佟莹, 等. 4WS 转子密炼机聚合物混沌混合的拉格朗日拟序结构分析[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(6): 1274-1283.
Gao He, Zhu Xiangzhe, Tong Ying, et al. Analysis of lagrangian quasi-order structure of polymer chaotic mixing in 4WS rotor mixer[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2016, 30(6): 1274-1283.
- [15] 钟伟源, 朱荣生, 王秀礼, 等. 基于双向流固耦合的核主泵叶轮力学特性[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 22(6): 24-32.
Zhong Weiyuan, Zhu Rongsheng, Wang Xiuli, et al. Mechanical characteristics of impeller of nuclear main pump based on two-way fluid-structure coupling[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 22(6): 24-32.
- [16] 董振刚, 王宇航, 张兴宁, 等. 三种转子密炼机流体流动和混合特性对比分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2016, 36(6): 43-50.
Dong Zhengang, Wang Yuhang, Zhang Xingning, et al. Comparative analysis of fluid flow and mixing characteristics of three rotor internal mixer[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2016, 36(6): 43-50.