

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.002

差速搅拌捏合机的螺棱设计及其螺旋角优化*

樊智敏,石文,郑贤哲,王娜
(青岛科技大学机电工程学院,山东青岛266061)

摘要:针对煤质活性炭制备过程中煤粉物料的混合均匀度问题,根据物料特性,对现有差速搅拌捏合机进行了螺棱的重新设计,使其更能满足特定物料的混合。由于螺棱螺旋角对搅拌质量、搅拌效果有很大影响,对影响螺棱螺旋角的两个因素(物料与螺棱摩擦角、物料内部剪切角)进行了分析,得出一个螺旋角的合理取值范围。对其在合理取值范围之内的螺旋角,通过ANSYS进行了不同螺旋中径螺旋角下螺棱危险节点的应力最大值的分析,归纳出了螺旋角对应力最大值的影响规律。研究表明,在满足合理定义域、物料内部剪切力的条件下,螺棱危险节点的应力最大值在螺棱螺旋角取范围为 $70^\circ < \beta < 75^\circ$ 时最小;当螺棱螺旋角位于这个取值范围内时,螺棱对物料的搅拌质量较高,且螺棱使用寿命更长,工作更为可靠。

关键词: 搅拌捏合机; 螺棱; 螺旋角

中图分类号: TH122; TH6 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)12-1518-06

Improved design for screw arris and optimization of spiral angle of differential velocity stirring kneader

FAN Zhi-min, SHI Wen, ZHENG Xian-zhe, WANG Na

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at solving the mixing uniformity problem of the pulverized coal mixture in the preparation process of coal activated carbon, the screw arris of the differential velocity stirring kneader was redesigned to meet the need for mixing the specific materials according to the material properties. Because of the great influence on the mixing quality and effect by spiral angel, two factors influencing the spiral angel, the frictional angle between materials and the screw arris and the shear angle inside materials were analyzed, and the reasonable value range of the spiral angle was obtained. For the spiral angel within its reasonable value range, the maximum stress value of the dangerous nodes of the screw arris under the spiral angels of different screw arrises was analyzed through ANSYS, and the influence rule of the spiral angle on the maximum stress value was summarized. The results indicate that under the condition of meeting the reasonable domain of definition and the shear force inside materials, the maximum stress value of the dangerous nodes of the screw arris is minimum when the value range of the spiral angel is $70^\circ < \beta < 75^\circ$. When the spiral angle is within this value range, the material mixing quality of the screw arris is higher, the service life of the screw arris is longer, and the work of the differential velocity stirring kneader is more reliable.

Key words: stirring kneader; screw arris; spiral angel

0 引言

差速搅拌捏合机是一种新型高效的卧式双轴全相自清洁型搅拌机,它属于双转子混合设备。该混合设

备主要由装在圆筒形壳体中的两根具有螺旋的转轴所组成。两根转轴相向转动,转轴的转速可以根据物料的性质和混合要求在范围内进行变化。瑞士LIST公司开发的新型卧式双轴搅拌设备属全相型混合设

收稿日期: 2014-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075219)

作者简介: 樊智敏(1963-),男,山西万荣人,教授,博士生导师,主要从事机械传动设计理论与方法、机械系统创新设计等方面的研究。E-mail: zmfan@163.com

备,对物料的适用范围广泛,但其制造成本很高^[1]。为了能让其在适用于特定物料混合的同时,减少加工制造成本,本研究通过对这种设备转轴的分析研究,拟对其螺棱进行设计。

螺棱是搅拌捏合机的核心部分,正常工作情况下,其受到复杂的流体激振力的作用,螺棱在最大应力点处易发生疲劳损坏。为了延长螺棱的使用寿命,需要对螺棱进行结构和参数的优化,以减小其在最大应力点处的应力值。

本研究通过分析物料对螺棱摩擦角、物料内部剪切角对螺旋角的影响,得出螺旋角的一个合理取值范围,然后再利用 ANSYS 有限元分析软件,分析在该范围内螺旋角度对螺棱所承受应力最大值的影响,为差速搅拌捏合机螺棱的优化设计提供理论依据。

1 搅拌机螺棱的选型及设计

1.1 混合物料的特性

搅拌捏合操作涉及流体的流动、传质和传热,所进行的物理和化学过程对搅拌效果的影响也不同,学术界至今对搅拌器的研究还不够,因而搅拌器的选用带有一定的经验性。这里的搅拌捏合设备主要用于煤质活性炭制备。活性炭自 20 世纪初投入工业生产以来,作为吸附材料,在环保、食品、轻工、医药等行业的用量越来越大,在催化剂及其载体方面也有广泛应用。我国活性炭产量近年来增长很快,年生产能力超过 20 万吨,但绝大部分为低档次品种,高档次品种尤其是一些新类型品种的生产能力严重不足,甚至是空白。而煤质活性炭作为活性炭中使用最广泛的一种,是因为主要原料煤粉资源的丰富且稳定。用煤粉制作活性炭有一道重要的工序就是将煤粉、水、焦油以特定的比例混合均匀,它们混合的均匀程度直接决定活性炭的吸附性能。在这一工序中,煤粉物料在进入反应器前是 200 目 75% 的煤粉、20% 焦油、5% 水,经过短暂混合后完全失去流动性,形成粘性物。在混合设备中,该粘性物质不断被分散、聚合,最终形成均匀的混合物。

1.2 搅拌器的选型

搅拌器按流体流动形态分为轴向流搅拌器和径向流搅拌器。为了满足物料能够进行无间隔连续混合,需要一种带有推进作用的搅拌器。螺棱螺杆式搅拌器是一种典型的轴流型推进搅拌器,它集物料的搅拌、捏合、输送、自清理等功能于一体,并能连续化生产作业,很好地解决了高粘度物料的搅拌与混合所面临的问题。

国外开发的新型卧式双轴搅拌设备的螺棱如图 1 所示。

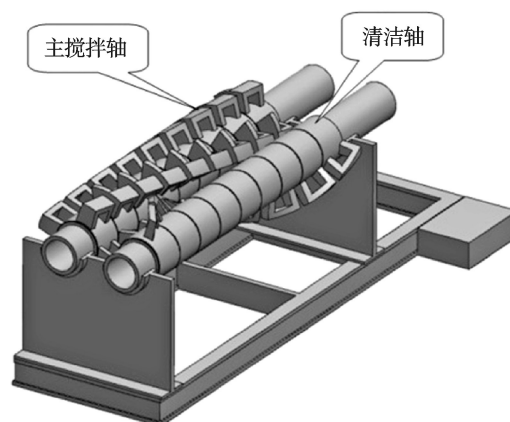


图1 卧式双轴搅拌机螺棱

主搅拌轴单元节模型如图 2 所示。



图2 主搅拌轴单元节模型

清洁轴单元节模型如图 3 所示^[2]。

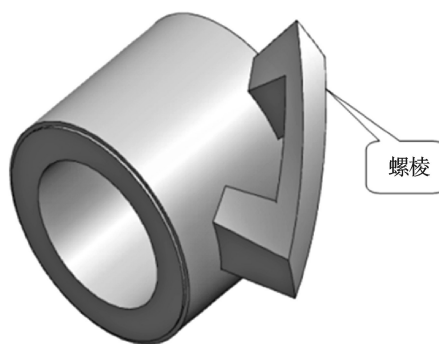


图3 清洁轴单元节模型

从图(1~3)中可以看到,主搅拌轴螺棱上带有切刀,其主要对高粘度物料进行破碎,且螺棱自身的设计也是为了进一步提高搅拌捏合过程中的破碎能力。煤粉混合物是一种低粘度的混合物,在搅拌捏合的过程中所需的破碎力很小。现有的螺棱设计增大了制造成本,但其功能却不能有效地得到利用。

本研究新设计的螺棱,去除了切刀,在继承了原有螺棱较好的推进功能和循环性能的同时,在螺棱中

添加了一个剪切区域,以增大螺棱的剪切作用,使螺棱对物料的分布作用更强烈,进一步加强物料在搅拌捏合过程中的混合均匀度。

改进后主搅拌轴单元如图4所示。搅拌机工作时,主搅拌轴螺棱带动物料单元由搅拌器底部向上运动,由于物料单元处在重力作用下没有其他阻挡,由挤紧状态松脱出来产生分散抛落,如同自落搅拌过程;当搅拌轴螺棱推动该物料单元向下运动时,由于搅拌装置内壁和附近物料的阻力,使物料受到挤压力、摩擦力作用,既有大的流动,又有小范围的挤散和重新混合,等同于强制搅拌过程。

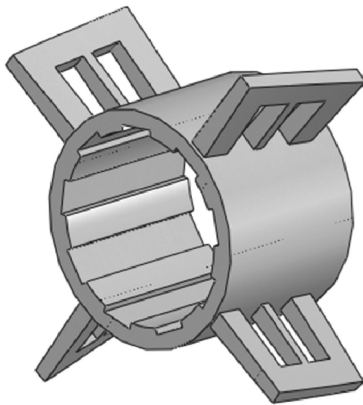


图4 改进后主搅拌轴单元

主搅拌轴的主要功能是搅拌,而清洁轴主要功能是“清洁”主搅拌轴。改进后的清洁轴单元节模型结构如图5所示。当主搅拌轴和清洁轴捏合时,会刮去螺棱上的滞留物料,使滞留物减至最少,起到相互清洁的作用。

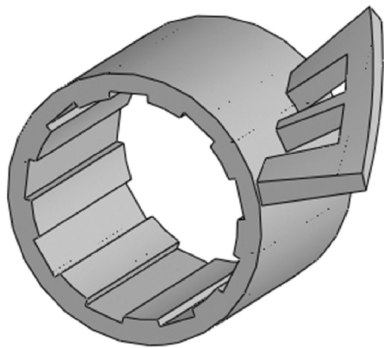


图5 改进后清洁轴单元节模型

2 螺棱螺旋角的优化

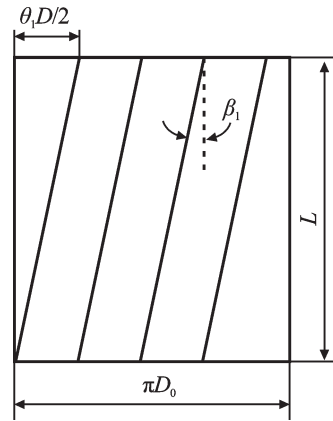
2.1 螺旋角的影响

螺棱中径螺旋角对搅拌质量、搅拌效率都有很大的影响。由搅拌捏合机原理可知,主搅拌轴和清洁轴对物料的作用各不相同,前者主要使物料形成径向运

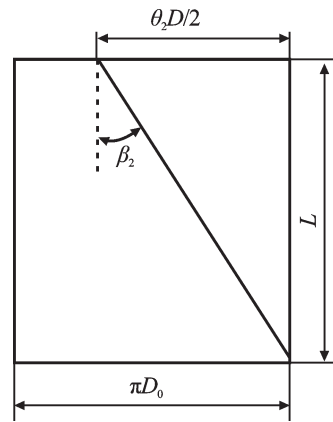
动,后者则使物料产生轴向运动,物料的径向和轴向运动直接与搅拌轴的螺棱螺旋角有关。搅拌机工作时,搅拌轴螺棱将推动物料沿搅拌装置轴向、径向高速循环流动,物料不断地被剪切破碎,从而实现物料在三维空间内的运动,使物料快速分布均匀^[3]。因此,确定主搅拌轴和清洁轴的螺棱螺旋角内在关系对于搅拌捏合机的搅拌混合效果十分重要。

2.2 主搅拌轴与清洁轴螺旋角关系的确定

差速搅拌捏合机搅拌轴沿轴向节圆的(半径为 r_0)平面展开图如图6所示。



(a) 主搅拌轴



(b) 清洁轴

图6 搅拌轴轴向中径平面展开图

由图6中的几何关系可得:

$$\tan \beta_1 = \frac{\theta_1 D/2}{L} = \frac{\theta_1 D}{2L} \quad (1)$$

$$\tan \beta_2 = \frac{\theta_2 D/2}{L} = \frac{\theta_2 D}{2L} \quad (2)$$

式中: β_1 —主搅拌轴螺棱中径 D_0 上的螺旋角, ($^\circ$); β_2 —清洁轴螺棱中径 D_0 上的螺旋角, ($^\circ$); L —两轴的长度, mm; D, D_0 —螺棱的外径、螺棱的平均直径, mm; θ_1 —主搅拌轴螺棱扭转角, ($^\circ$); θ_2 —清洁轴螺棱扭转角, ($^\circ$)。

当清洁轴的转速为主搅拌轴的 k 倍时,为保证主搅

拌轴和清洁轴之间不发生干涉, θ_1 、 θ_2 须满足以下关系:

$$k\theta_1 = \theta_2 \quad (3)$$

由式(1~3)可解得:

$$k \tan \beta_1 = \tan \beta_2 \quad (4)$$

一般情况下,要同时使搅拌机拥有良好的输送性能, θ_1 、 θ_2 、 β_2 需要满足以下关系^[4]:

$$\begin{cases} \theta_1 < 360^\circ/k \\ \theta_2 < 360^\circ \\ \beta_2 > 35 \end{cases} \quad (5)$$

为确定 β_1 和 β_2 值,这里以主搅拌轴螺棱中径的螺旋角 β_1 作为研究对象,取 $\beta = \beta_1$ 。

而螺棱中径螺旋角 β 与螺棱螺旋升角 λ 的关系为:

$$\beta + \lambda = 90^\circ \quad (6)$$

可见,螺旋角的取值可以根据螺旋升角来确定。

2.3 主搅拌轴螺旋升角的确定

在研究煤粉物料与搅拌螺棱之间的摩擦和效率时,通常假定煤粉物料在螺棱上单位面积的阻力系数 n 为常数,按螺旋方式排列的若干螺棱看作近似的螺旋叶片。因此,假定煤粉物料与螺棱的压力是作用在螺旋叶片平均半径 r_0 的螺旋线上,这样便使螺旋叶片中的摩擦、效率问题转化为斜面的摩擦和效率问题。

下面先由摩擦角初选螺旋升角 λ ,煤粉单元 A 在斜面 B 上运动,煤粉物料受力图如图7所示。

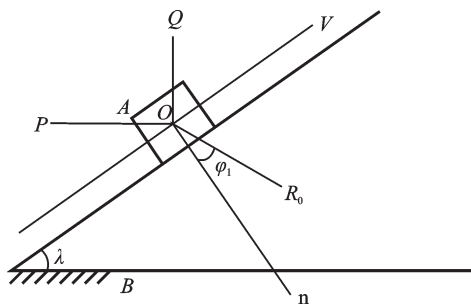


图7 煤粉物料受力图

P —驱动力, N; Q —生产阻力(包括摩擦力,惯性力,离心力,剪切及挤压力等), N; P_0 —理想驱动力, N; η —机械的效率; R_0 —斜面 B 加于物体 A 的总反力, N; f_1 —煤粉对钢的摩擦系数, $f_1 = 0.15 \sim 0.4$ (物料的摩擦系数随着物料相对与钢的滑动速度的减少而提高,煤粉混合物在搅拌机中的状态随着混合时间不同而变化,与钢的滑动速度也在变化^[5]); f_2 —煤粉内部摩擦系数; λ —螺旋升角, ($^\circ$); φ_1 —煤粉对钢的摩擦角, ($^\circ$); φ_2 —煤粉内部剪切角, ($^\circ$); V —煤粉单元的运动方向

由图7可知, R_0 的方向与 A 与 B 运动方向所构成的交角为: $90^\circ + \varphi_1$, 其中:

$$\tan \varphi_1 = f_1 \quad (7)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} f_1 = \tan^{-1}(0.15 \sim 0.4) \quad (8)$$

由此可得: $\varphi_{1\min} = 8.5^\circ$, $\varphi_{1\max} = 21.8^\circ$ 。

做煤粉物料单元受力的矢量三角形如图8所示。

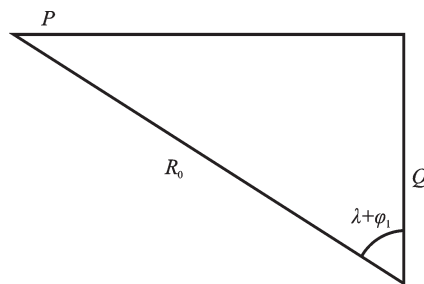


图8 力的矢量三角形

根据图8,有:

$$\vec{Q} + \vec{P} + \vec{R}_0 = 0 \quad (9)$$

$$\tan(\lambda + \varphi_1) = \frac{P}{Q} \quad (10)$$

$$P = Q \tan(\lambda + \varphi_1) \quad (11)$$

如果 A 和 B 之间没有摩擦力,则: $\varphi_1 = 0$ 。由此可得理想状态时的驱动力为:

$$P_0 = Q \tan \lambda \quad (12)$$

根据式(11,12),可得 A 沿 B 斜面上升时的效率:

$$\eta = \frac{P_0}{P} = \frac{Q \tan \lambda}{Q \tan(\lambda + \varphi_1)} = \frac{\tan \lambda}{\tan(\lambda + \varphi_1)} \quad (13)$$

式中, η 的定义域为:

(1) $\tan \lambda = 0$ 时, $\lambda \neq 0$, 当 $\lambda = 0$ 时有条件的自锁。

(2) $\tan(\lambda + \varphi_1) > 0$ 时满足不自锁的条件:

当 $0 < \lambda + \varphi_1 < \pi/2$ 时,可得:

$$\begin{cases} -\varphi_1 < \lambda \text{ (舍去)} \\ \lambda < \frac{\pi}{2} - \varphi_1 \end{cases} \quad (14)$$

当 $\pi < \lambda + \varphi_1 < \frac{3}{2}\pi$ 时,可得:

$$\begin{cases} \pi - \varphi_1 < \lambda \text{ (舍去)} \\ \lambda < \frac{3}{2}\pi - \varphi_1 \text{ (不在实际象限)} \end{cases} \quad (15)$$

(3) 当 $\tan(\lambda + \varphi_1) < 0$ 时, $\eta < 0$, 此域不可取。

由上面的分析可知, λ 的定义域为:

$$\lambda < \frac{\pi}{2} - \varphi_1 \quad (16)$$

将 $\varphi_{1\max}$ 、 $\varphi_{1\min}$ 分别代入式(16),则有:

$$\begin{cases} \lambda_{\min} < \frac{\pi}{2} - \varphi_{1\max} = \frac{\pi}{2} - 21.8^\circ = 68.2^\circ \\ \lambda_{\max} < \frac{\pi}{2} - \varphi_{1\min} = \frac{\pi}{2} - 8.5^\circ = 81.5^\circ \end{cases}$$

得:

$$\lambda < 68.2^\circ \quad (17)$$

物料在运动过程中,不仅受到螺棱摩擦力的作用,而且受到物料之间内部剪切力的作用。煤粉混合

物内部摩擦系数可按式(17)进行计算:

$$f_1 : f_2 = 15 : 20 \quad (18)$$

由式(17)可解得:

$$f_2 = f_1 \frac{20}{15} = (0.15 \sim 0.4) \frac{20}{15} = 0.2 \sim 0.53。$$

煤粉物料内部剪切角:

$$\begin{cases} \varphi_{2\min} = \text{tg}^{-1}0.2 = 11.3^\circ \\ \varphi_{2\max} = \text{tg}^{-1}0.53 = 27.9^\circ \end{cases} \quad (19)$$

由搅拌原理可知, λ 的取值只有在满足物料内部剪切角的范围之内时, 物料才会受到自身剪切力的作用, 加大混合过程中的剪切效果, 故^[6]:

$$11.3^\circ < \lambda < 27.9^\circ \quad (20)$$

在选择实际所需的螺旋升角时, 即要考虑物料本身与螺棱摩擦角的影响, 又要满足物料内部剪切角的要求^[7], 故由式(17, 20)可得实际螺旋升角 λ 的取值范围: $11.3^\circ < \lambda < 27.9^\circ$ 。

再由式(6)可得螺旋角: $\beta = \pi/2 - \lambda$, 解得:

$$62.1^\circ < \beta < 78.7^\circ \quad (21)$$

2.4 螺棱螺旋角对其应力最大值的影响分析

假设搅拌轴螺棱在一个无限范围和完全均一的流体流场中转动, 螺棱旋转并克服流体阻力而做功。一般情况下, 一个完全浸没在物料当中的螺棱, 它将受到垂直于螺棱表面的流体阻力作用^[8]。这个阻力可用流体作用力 F 来表示, 其中 F 力可分解为轴向分力 F_a 和径向分力 F_t , 螺棱表面的流体阻力如图9所示。

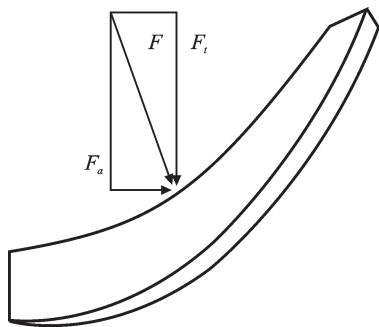


图9 螺棱表面的流体阻力

搅拌轴螺棱在这样理想的流场中, 而且搅拌轴螺棱又设计制造得十分精密、完美, 搅拌轴在旋转当中将无任何质量偏心。这样, 理论上对于通过搅拌轴螺棱的流体流动是完全对称的。则各个螺棱上每一时刻受到的流体作用力 F 大小相同, 方向始终垂直于螺棱表面。

本研究通过 SolidWorks 软件的三维绘图功能, 建立搅拌轴单元节的实体模型, 将建立的模型导入到 ANSYS 中, 完成搅拌轴单元节的有限元建模。对有限

元模型进行边界条件的确定后, 在螺棱上施加载荷 F , 得到搅拌轴单元节的等效应力云图^[9-10]如图10所示。

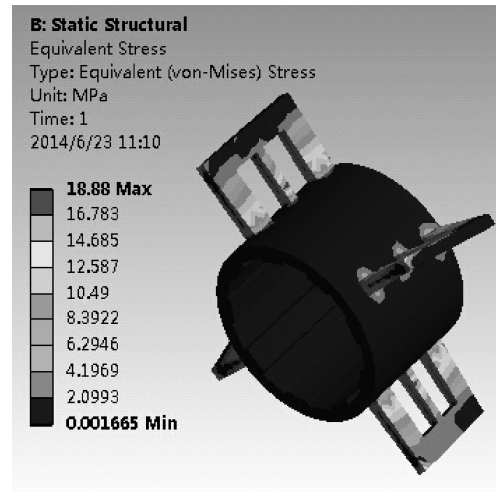


图10 主搅拌轴单元节的等效应力云图

从图10可以看出, 搅拌轴单元节上最大应力发生点均为螺棱中径接近与轴的过渡处, 该现象与实际工况相符合。实际工况中, 搅拌轴与螺棱的过渡部位往往是搅拌轴的应力集中处。搅拌捏合机在工作时, 流体激振力作用于螺棱上, 而螺棱螺旋角的大小如果不同, 则搅拌轴内部的应力必定不同^[11]。由上文可知, 螺棱中径螺旋角在同时满足物料本身与螺棱摩擦角以及物料内部剪切角的需求时, 有 $62.1^\circ < \beta < 78.7^\circ$ 。在这个范围周围, 选取了5个不同的螺旋角度, 研究笔者在取值范围内, 螺旋角度对螺棱上应力最大值的影响。

本研究对其分别进行瞬态动力学分析后, 取同一危险节点做出了不同螺棱中径螺旋角度下的等效应力响应曲线, 如图11所示。

从图11可以看出, 随着主搅拌轴螺棱中径螺旋角由 60° 逐渐增大到 80° 的同时, 危险节点的最大应力先减小后增大, 在 60° 时最大应力接近 40 MPa , 螺棱中径螺旋角在 $70^\circ \sim 75^\circ$ 时, 同一节点的最大等效应力值趋于最小。

综上可得, 在同时满足物料对螺棱摩擦角、物料内部剪切角以及最小应力值的情况下, 将主搅拌轴螺棱中径螺旋角控制在 $70^\circ \sim 75^\circ$ 的范围之内, 再根据搅拌机推进速度的要求, 进一步确定螺旋角的取值^[12]。

3 结束语

(1) 本研究根据所搅拌物料的特殊性, 对原有新型差速搅拌捏合机的螺棱进行了重新设计, 去除了不必要的功能, 增强了所需功能, 并用 SolidWork 建立了

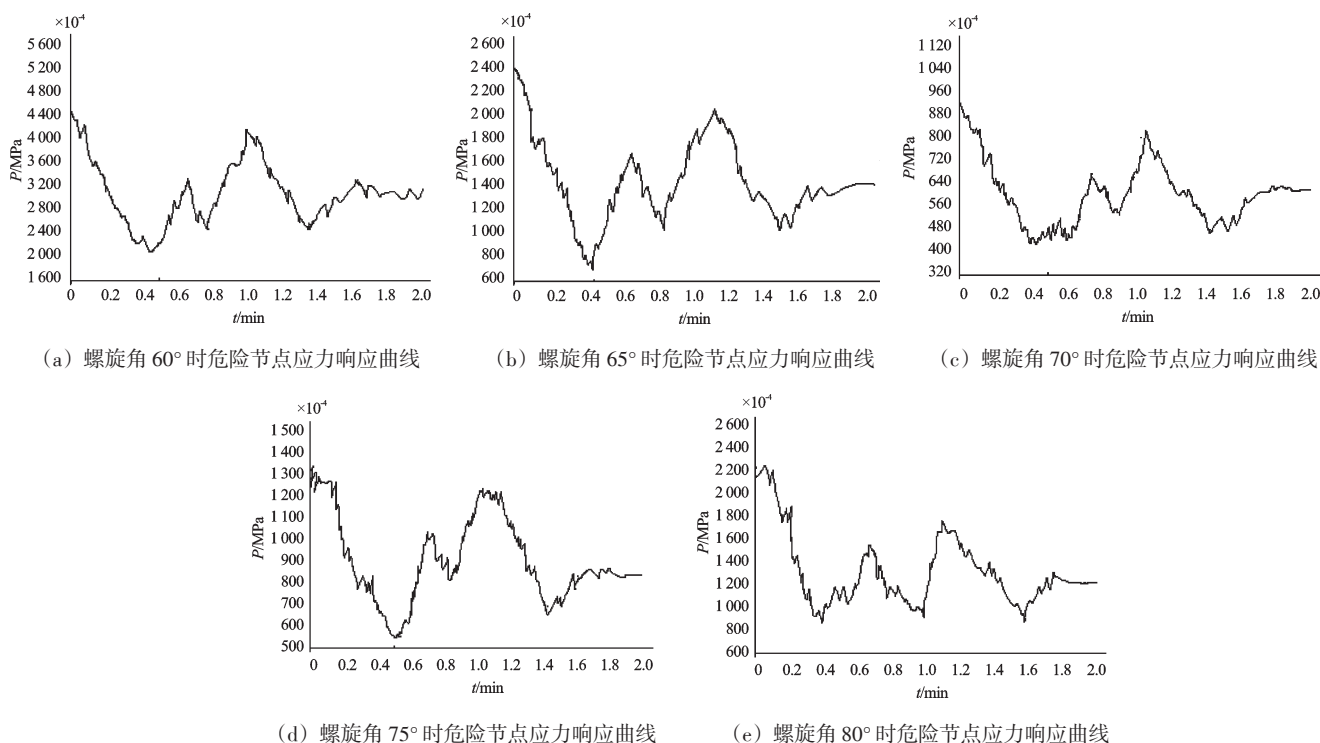


图 11 不同螺棱中径螺旋角下危险节点处的等效应力响应曲线

实体模型。

(2) 本研究确定了螺棱中径螺旋角在搅拌过程中与其他各个参数之间的关系,为选取螺棱中径螺旋角确定了一个范围。

(3) 本研究通过 ANSYS 进行瞬态动力学分析,得到了不同螺棱中径螺旋角下,同一危险节点处的等效应力时间历程响应曲线,以此选取最佳螺棱中径螺旋角。

参考文献 (References):

[1] 陈志平,章序文,林兴华,等. 搅拌与混合设备设计选用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

[2] 樊智敏,徐安军,徐俊. 基于有限元法的新型搅拌捏合机搅拌轴疲劳分析[J]. 青岛科技大学学报:自然科学版, 2009,29(3):259-261.

[3] 周凤举. 差速捏合机原理及应用[J]. 有机氟工业, 2000, 21(4):11-12.

[4] 冯忠绪,赵利军,王鹏,等. 双螺旋无轴搅拌机[J]. 工程机械, 2014, 45(1):68-72.

[5] 张绪祥. 一种摩擦系数计算方法[J]. 机械设计与制造, 2006,2(1):44-45.

[6] 刘军旭. 一种新型双轴搅拌机的设计与应用[J]. 新技术新工艺, 2014, 21(4):7-9.

[7] 樊智敏,胡丽萍,孙维光. 搅拌捏合机搅拌轴螺棱外形曲线形成过程[J]. 青岛科技大学学报:自然科学版, 2006, 29(5):434-437.

[8] 李超,陈礼祥. 双轴混凝土搅拌机主要参数的设计计算[J]. 建设机械技术与管理, 2001,46(1):7-9.

[9] 毛大鹏,李建勇,王恒,等. 基于 ANSYS Workbench 的固晶臂结构柔性动力学分析[J]. 机电工程, 2012,29(10): 1146-1147.

[10] 丁毅,苏杰,陈立民. 基于 ANSYS Workbench 的轻质托盘承载性能分析[J]. 包装与食品机械, 2012(2):67-69.

[11] FLEURY P A. Bulk polymerization or copolymerization in a novel continuous kneader reactor [J]. **Macromolecular Symposia**, 2006,24(3):287-294.

[12] POTENTE H, KRETSCHMER K. Process behavior of special mixing element in twin-screw extruders [J]. **International Polymer Processing**, 2001, 16(4):341-350.

[编辑:罗向阳]

本文引用格式:

樊智敏,石文,郑贤哲,等. 差速搅拌捏合机的螺棱设计及其螺旋角优化[J]. 机电工程, 2014,31(12):1518-1523.

FAN Zhi-min, SHI Wen, ZHENG Xian-zhe, et al. Improved design for screw arris and optimization of spiral angle of differential velocity stirring kneader[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(12):1518-1523.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>