

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.08.018

基于ANSYS的聚氨酯发泡机搅拌器结构设计及优化

江明会¹,梅益¹,罗彦英¹,余书发²

(1. 贵州大学机械工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州华云汽车饰件制造有限公司, 贵阳 550025)

摘要:为解决现有聚氨酯发泡机原料搅拌器因笨重而引起功率和材料的浪费、搅拌效率低等问题,采用响应面分析法对聚氨酯料罐内搅拌器进行结构轻量化设计。设计了一种四叶平直叶开启式涡轮搅拌器,以其搅拌轴和搅拌叶片为主要研究对象。首先,将UG_NX建立的几何结构导入ANSYS中对两者进行有限元静力学分析。根据搅拌器的实际工况,分别施加力与载荷后,求解得到变形图和等效应力图。其次,在静力学分析的基础上对叶片进行响应面分析。以质量最小为优化目标,叶片的厚度和宽度为设计变量,叶片在对应的力与载荷条件下所受的应力与变形为约束条件,最后求解得到质量最小且满足应力、应变条件下所对应的最优结构尺寸方案。最后,为避免搅拌轴发生共振,对搅拌轴进行模态分析,得到其前六阶的振型和固有频率。最终仿真结果表明,叶片质量减少为原来的31%,且最大变形仅为0.035 mm,最大等效应力为7.52 MPa。证明采用响应面分析法对搅拌轴及叶片的结构进行轻量化设计能够满足强度要求。

关键词: 聚氨酯; 搅拌轴; 搅拌叶片; 有限元分析; 响应面分析

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)08-0112-07

Structural Design and Optimization of Mixer for Polyurethane Foam Machine Based on ANSYS

Jiang Minghui¹, Mei Yi¹, Luo Yanying¹, Yu Shufa²

(1. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Huayun Automobile Trim Manufacturing Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract : Aiming at the problems that the raw material agitator of the polyurethane foaming machine is bulky, which causes waste of power and materials, and leads to low mixing efficiency, the structural lightweight design of the agitator in the polyurethane material tank was carried out by using the response surface analysis method. A four-leaf open-type turbine agitator with straight blades was designed, with its agitating shaft and agitating blades as the main research objects. First, importing the geometric structure established by UG_NX into ANSYS to perform finite element static analysis on both. According to the actual working conditions of the agitator, after applying force and load respectively, the deformation diagram and equivalent stress diagram were obtained by solving. Secondly, the response surface analysis of the blade was carried out on the basis of the static analysis. The optimization goal was to minimize the mass, the thickness and width of the blade were the design variables, and the stress and deformation of the blade under the corresponding force and load conditions were the constraint conditions. Finally, the optimal structural size scheme with the minimum mass and satisfying the stress and strain conditions was obtained. In order to avoid the resonance of the stirring shaft, the modal analysis of the stirring shaft was carried out to obtain the first six order vibration shapes and natural frequencies. The final simulation results show that the mass of the blade is reduced to 31% of the original, and the maximum deformation is only 0.035 mm, and the maximum equivalent stress is 7.52 MPa. It is proved that the light-weight design of the structure of the stirring shaft and blades by using the response surface analysis method can meet the strength requirements.

Keywords : polyurethane ; mixing shaft ; mixing blade ; finite element analysis ; sponse surface analysis

基金项目: 贵阳科技计划项目(筑科合同[2022]5-38)

通信作者: 梅益, 教授, 博士, 研究方向为智能制造工艺及设备、制造业信息化、数值模拟技术

收稿日期: 2023-06-18

引用格式: 江明会, 梅益, 罗彦英, 等. 基于ANSYS的聚氨酯发泡机搅拌器结构设计及优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8): 112-118.

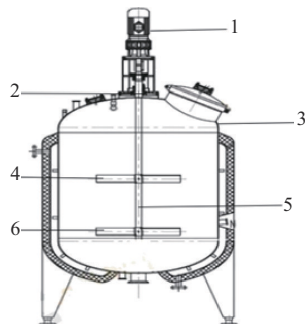
Jiang Minghui, Mei Yi, Luo Yanying, et al. Structural design and optimization of mixer for polyurethane foam machine based on ANSYS[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 112-118.

聚氨酯作为世界六大合成材料之一,其具备优异的力学、声学、电学和耐化学性等性能^[1],也具有优良的绝声、防震、防水功能。聚氨酯制品的加工流程主要包括原料的搅拌、混合液的混合、产品的后期成型。其中,原料的搅拌在聚氨酯发泡生产中占有重要组成地位,其搅拌效果关系到聚氨酯发泡产品后期成型质量的好坏。原料的搅拌主要通过料罐中的搅拌器来实现,搅拌器决定原料的搅拌效果,由电机、减速器、搅拌轴和搅拌叶片等组成。近年来,国内外学者对各种类型的搅拌器进行了大量的研究,但研究主要侧重于搅拌器流体特性的数值模拟,主要探究搅拌器的搅拌桨的安装角度、位置等结构参数对其搅拌效果的影响关系^[2-5]。对搅拌器的关键部件的有限元分析鲜有报道,为了提高搅拌器的搅拌效果及搅拌器的轻量化设计,减少搅拌器在生产过程的生产成本。为此,对搅拌轴和搅拌叶片进行设计和静力学分析,采用响应面法对搅拌器的叶片结构尺寸进行优化,以达到叶片的轻量化设计。最后,对搅拌轴进行模态分析。

1 搅拌器总体设计

1.1 方案设计

搅拌器的工作原理是原料在料罐内在电动机的带动下,搅拌轴经减速器减速到所需转速后,带动搅拌叶片进行转动,使料罐内的流体进行旋转,经过一段时间后,液体达到充分混合。为此,根据搅拌的工作原理及搅拌目标,对该搅拌器结构进行设计。以电机为搅拌器动力,搅拌轴通过减速器减速后,以一定转速带动搅拌叶片转动,从而实现原料自动搅拌。其结构如图1所示。



1—电机及减速器;2—轴封;3—料罐;4—上层搅拌叶片;
5—搅拌轴;6—下层搅拌叶片

图1 搅拌系统结构示意图

1.2 搅拌叶片的设计

搅拌叶片的主要作用是搅拌料罐内的液体,使其达到充分混合。因此,搅拌叶片的设计和安装对

于搅拌混合起着决定性作用。搅拌叶片的设计包括其形状和安装位置的设计,该搅拌器叶片采用四叶开启涡轮直叶片,共为两层,每层有四个叶片;为使料罐内各个深度的原料都能够搅拌得充分均匀,选择在搅拌轴末端和中间固定一个叶轮,两者的轴向间距为620 mm。为了减少叶片在搅拌过程所受的阻力,在叶片上设计小孔,并在每个叶片边缘倒圆角,其叶片结构如图2所示。

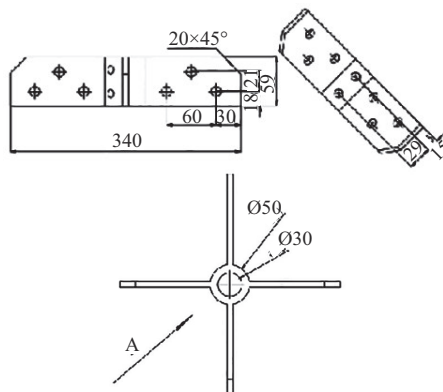


图2 搅拌叶片结构图

1.3 搅拌轴的设计

搅拌轴的作用是带动搅拌器叶片转动,进而搅拌物料。因此,搅拌轴的设计关系到整个搅拌器的稳定。搅拌轴的支撑方式选用悬臂轴结构,搅拌轴通过键槽与减速器连接。搅拌轴末端设计的四个通孔用以固定搅拌器叶片,用螺钉栓将其固定在搅拌轴上。搅拌轴的设计如图3所示。

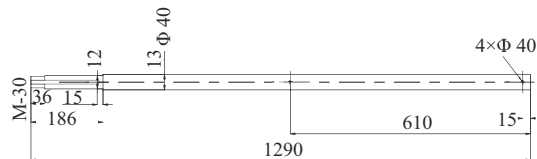


图3 搅拌轴结构设计图

1.4 电机的选型

在聚氨酯发泡机料罐中,其搅拌器以电机作为动力源,与减速器连接带动搅拌轴进行搅拌。在实际生产中,若选用电机功率过小,则无法实现搅拌,反之,又会造成功率的浪费。所以,电机的合理选型很重要。笔者以聚氨酯发泡机为例进行电机的选型。为使电机正常启动,一般将其启动转矩选为正常工作状态下的2.5倍。

搅拌器功率分为搅拌功率 P_s 和搅拌作业功率 P_x 。因料罐内的物料为聚醚多元醇或异氰酸酯,其中聚醚多元醇密度比异氰酸酯大,直接以聚醚多元醇为搅拌液体设计搅拌器,其密度 ρ 为1 400 kg/m³,

聚醚多元醇黏度 μ 为2 000 mPa·s;介质流动的雷诺数 R_e 为:

$$R_e = \frac{\rho n d_i^2}{\mu} = 80 \quad (1)$$

式中: n 为叶片转速,取0.783r/s; d_i 为搅拌器直径,单位m。

计算得到雷诺数 R_e 为80,小于2 300,表明料罐内流动始终为层流流动。

搅拌器功率与搅拌液体的密度成正比,与搅拌叶片转速的3次方成正比,与搅拌器直径的5次方成正比^[6]。搅拌器功率计算如式(2):

$$P = N_p \times \rho \times n^3 \times d_i^5 = 39W \quad (2)$$

式中: P 为搅拌器功率,单位kW; N_p 为功率准数; ρ 为密度,单位kg/m³; n 为叶片转速,单位r/s。其中,查Bates的算图^[7]得 N_p 为3.9,将其代入公式(2)后,算得搅拌功率 $P \approx 39W$ 。

因本试验一共有两层涡轮,则需计算双层涡轮的系数,则平直叶开式涡轮搅拌器的系数的计算如式(3):

$$f = 1.9 + 0.9(i - 2) = 1.9 \quad (3)$$

式中: f 为系数, i 为搅拌器层数, i 取2。

两层涡轮搅拌器的总搅拌功率为:

$$P_s = f \times P = 39 \times 1.9 = 0.074W \quad (4)$$

式中: P 为单层的搅拌功率。

根据实际情况得搅拌作业功率 $P_z \approx 0.03$ kW,将式(4)中 P_s 的值代入式(5)中,得到搅拌器总功率:

$$N_z = 1.3 \times (0.074 + 0.03) \div 0.85 \approx 0.16 \text{ kW} \quad (5)$$

则电机所需功率为:

$$N = 2.5N_z = 2.5 \times 0.16 = 0.4 \text{ kW} \quad (6)$$

最后选Y2-80M1-4用于搅拌器驱动马达,其额定功率为0.55 kW,额定转速为1 400 r/min。

1.5 减速机的选型

该料罐选用减速器减速,其所选电机的额定转速1 400 r/min,功率为0.55 kW,搅拌器转速需满足40~50 r/min^[8]。该搅拌中传动比设为30,搅拌器转速为47 r/min。因所选电机安装方式为卧式,而搅拌器是顶入式,根据搅拌器工作实际情况,选择蜗轮蜗杆减速器。最终该搅拌器的减速器选为NMRV063^[8]。其功率计算如公式(7):

$$P_m = P_2 \cdot K_A \cdot K_s \cdot K_R < P_1 \quad (7)$$

式中: P_m 为力学强度计算功率,单位kW; P_2 为负载功率,单位kW; K_A 为工况系数(即使用系数),取1.25; K_s 为安全系数,取1.3; K_R 为公称功率利用系

数,为1.2; P_1 为公称输入功率。

最终得到公式(8):

$$P_m = P_2 \cdot K_A \cdot K_s \cdot K_R = 0.16 \times 1.25 \times 1.3 \times 1.2 = 0.312 < P_1 = 0.55 \quad (8)$$

综上,所选减速器型号适合。

2 搅拌器关键部件的有限元仿真

2.1 搅拌轴及搅拌叶片的静力学仿真

$[M]$ 为结构的质量矩阵, $\{x\}$ 为加速度矢量, $[C]$ 为结构阻尼矩阵, $[K]$ 为结构刚度矩阵, $\{\dot{x}\}$ 为速度矢量, $\{x\}$ 为位移矢量, $\{F_{(t)}\}$ 为力矢量。得出公式(9):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F_{(t)}\} \quad (9)$$

当在线性静力学分析与动态静力学分析时,其方程分别简化为公式(10)和公式(11):

$$[K]\{x\} = F \quad (10)$$

$$[K]\{x\} = \{F_{(t)}\} - [M]\{\ddot{x}\} \quad (11)$$

2.2 搅拌轴的有限元分析

搅拌轴性能的好坏对搅拌器会产生很大影响。搅拌轴主要用于传递电机的输入扭矩,为了保证其有效实现传递动力的功,对搅拌轴进行有限元静力学分析,进一步验证搅拌器在工作过程的稳定性。文章前期已使用UG—NX对搅拌轴进行实体建模,将其几何结构导入ANSYS中进行静强度分析。

搅拌轴模型如图4所示。首先,为将搅拌轴简化,将轴上的小孔、圆角、倒角、螺纹等不必要特征去除,其模型如图4a所示。搅拌轴的材料选用45钢,在对搅拌轴进行材料指定后,对搅拌轴进行网格划分,其整体网格划分情况如图4b所示。



(a) 几何结构; (b) 网格划分模型

图4 搅拌轴模型

检查其网格划分的单元质量无问题后,对其进行受力分析,在搅拌轴一端的键槽处添加力,因其动力来自于与键槽接触的电机所提供,电机的输出功率为0.55 kW,输出转速为1 400 r/min,得到电机输出扭矩为^[9]:

$$T_1 = \frac{9550P}{n} = 3.75 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (12)$$

式中, P 为电机输出功率,单位kW; n 为电机输出转速,单位r/min; T_1 为输出扭矩,单位N·m。

减速器输出扭矩 T 的计算公式如公式(13):

$$T = T_1 \times i \times \eta = 90 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (13)$$

式中: T 为减速器的输出扭矩,单位 $\text{N}\cdot\text{m}$; i 为减速器减速比; η 为减速器传动系数,取0.8。

减速器与键槽直接相连,故在键槽处的圆柱面施加力矩为 $90\text{ N}\cdot\text{m}$,对搅拌轴另一端添加固定约束。对搅拌轴进行静力学分析,得到其等效应力图和等效应变图如图5所示。

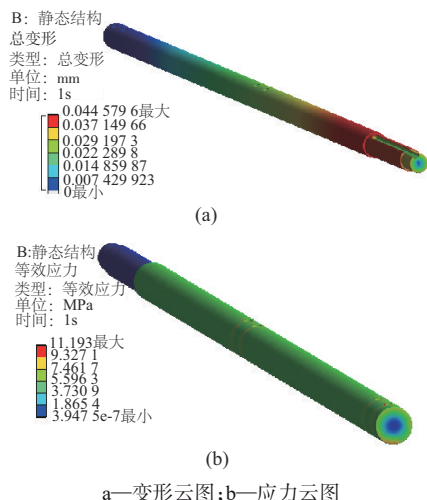


图5 搅拌轴静力学分析图

由图5可知,其最大等效应力出现在搅拌轴的最右侧位置,其值约为 11.19 MPa 。轴选用45钢作为仿真的材料,其屈服强度为 295 MPa ,可知,轴的最大等效应力远小于其所选材质的屈服强度。所以,该轴的设计满足了强度要求。

为使该搅拌器能够在搅拌过程稳定、安全,对其搅拌叶片进行静强度分析。搅拌叶片模型如图6所示,为将模型中的小孔、圆角、螺纹等不必要特征去除后得到其模型,如图6a所示。其中,选用Q235钢作为叶片的结构材料,通过四面体网格对叶片进行网格划分,其整体网格见图6b。

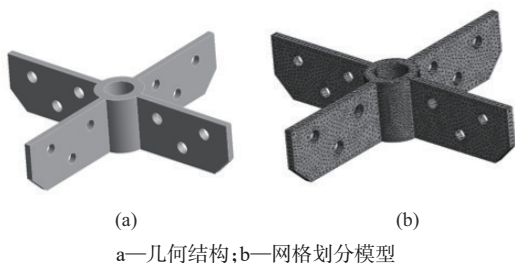


图6 搅拌叶片模型

检查其网格划分的单元质量无问题后,对其受力分析,在叶片内圆柱面固定,在叶片边缘端添加 62.18 N 的力。最终其等效应力图、总变形图见图7。

由图7可见,搅拌叶片的最大变形为 0.02 mm ,

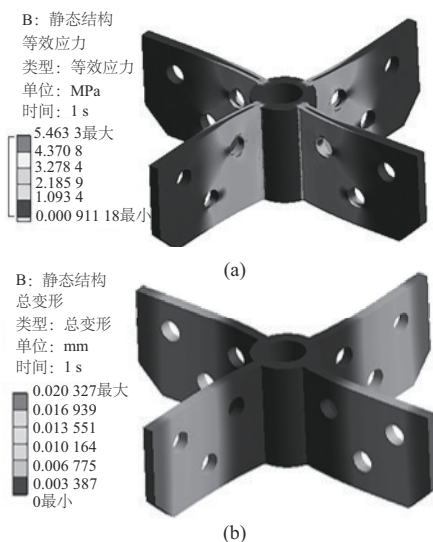


图7 搅拌叶片静力学分析

最大等效应力发生在圆柱面与叶片接触的附近,也仅为 5.46 MPa ,其最大等效应力小于其所选材质的屈服强度。所以,该叶片设计符合强度要求。以下在满足结构强度要求的条件下利用响应面优化对搅拌器尺寸进行优化设计。

3 搅拌叶片结构尺寸优化

3.1 设置变量和确定优化目标

通过对搅拌叶片进行分析,再结合叶片静应力分析结果,在不影响搅拌叶片工作性能的基础上确定以搅拌叶片最小质量作为优化目标。针对搅拌叶片的结构,通过改变搅拌器叶片的宽度(w)和厚度(d)两个尺寸参数。添加固定约束和力,分析其产生的应力应变情况,从而对结构进行优化。在Workbench中设置搅拌叶片的设计参数的范围^[10],根据搅拌器结构形式的尺寸限制,给定设计变量的范围^[11]。其优化尺寸的变化范围设定见表1,将其设置为输入参数,质量、叶片的变形量、最大等效应力设置为输出参数。

表1 设计参数取值范围范围 mm

参数	初始值	下限	上限
w	80	59	120
d	8	7.2	8.8

3.2 灵敏度分析

灵敏度分析是指运用数学的方法来分析输入参数和输出参数之间的关系,得到各个参数之间的变化规律,并将对结构影响较大的参数作为优化参数^[12],最终得到了2个变量对搅拌叶片的质量、变形

及应力变化的关系,设计变量与输出变量灵敏度如图8所示。

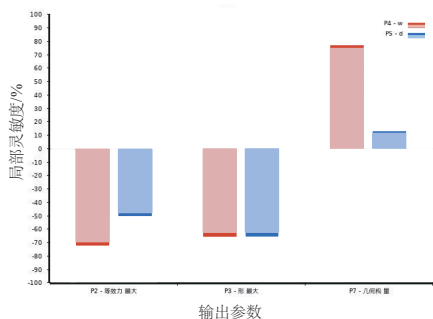


图8 设计变量与输出变量灵敏度

由图8可知,纵坐标为灵敏度,指设计变量对目标变量的影响,灵敏度的值可为正负值。横坐标为输出变量,即目标变量。当灵敏度的值为正数时,则表明设计变量与目标变量的关系为正相关;当灵敏度的值为负数,则表明设计变量与目标变量的关系为负相关。 w 和 d 对应力和应变的影响较大,且呈负相关;对搅拌器质量的影响较大,且呈正相关。所以,在尺寸优化中,可选取 w 和 d 的尺寸作为调整值。

3.3 响应曲面法分析及结果

有限元响应面法主要用于分析输入变量与输出变量之间的关系。笔者将得到设计点进行敏感性分析及响应力曲面分析后,最终得到关于搅拌叶片宽度和厚度二者对搅拌叶片的质量、整体变形和等效应力的响应曲线,如图9~图11所示。由图9可知,

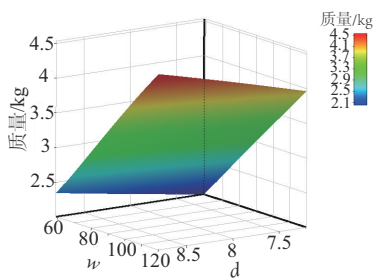


图9 w, d 对质量的响应图

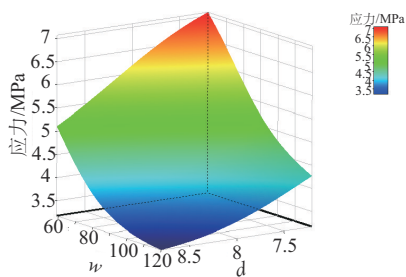


图10 w, d 对应力的响应图

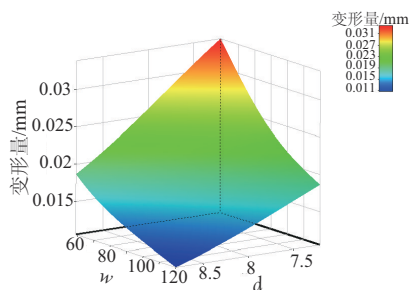


图11 w, d 对应变的响应图

其响应面基本成平面,不存在明显的弯曲,表明几何结构的质量非线性关系不强。图10为响应曲面,存在明显的弯曲,等效应力的最大值与 w, d 表现出较为强烈的非线性关系。同理,图11中,其响应曲面也存在明显的弯曲,变形量的最大值与叶片的 w 与 d 的非线性关系比较强烈。

3.4 搅拌叶片优化结果分析

根据轻量化设计的原理将搅拌器的质量作为优化目标。为满足优化轻量化的要求,将质量的最小候选点嵌入到当前模型,并在更新后进行求解,最终得到表2的尺寸值。

表2 优化前后尺寸对比

参数	初值	优化后	圆整后
DS_kuan	80	59.011	59
DS_B	8	7.2008	7

在更新有限元模型后,对静力学分析过程重新求解,可得优化后的静应力分析结果,其结果如图12所示,优化后的搅拌叶片的最大变形为0.035 mm,其变形满足要求。最大等效应力发生在圆柱面与叶片接触的附近,开有小孔的附近受力较大,但最大应力值仅为7.52 MPa,其最大等效应力小于其所选材质的屈服强度。

表3为优化前后质量对比,由表3可知,质量的优化比较明显,优化后质量比优化前的质量减少了31%。结果表明,在相同承载情况下,优化后叶片的整体变形量和等效应力在原来基础上减小。其尺寸参数的优化不但降低了生产成本,且满足强度要求,同时大量地节约了生产搅拌器的材料,也进一步实现了搅拌器轻量化的目标。

4 搅拌轴的模态分析

4.1 模态仿真的基本理论

模态分析是动力学分析中的基础内容,可用于结构的动态设计和设备的故障诊断,在产品的设计之前可以预先避免可能引起的共振^[13]。假定模型为无阻尼自由振动时,忽略系统阻尼造成的影响^[14],其过

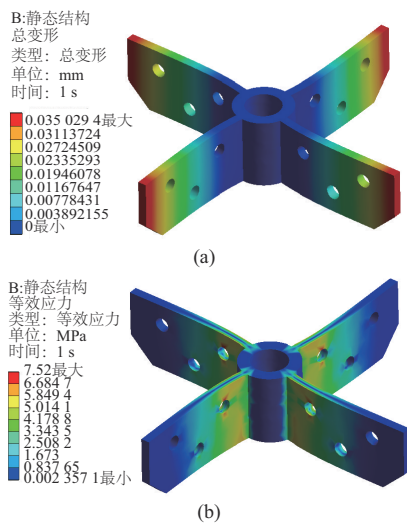


图12 静应力分析结果

表3 优化前后质量对比

项目	优化前	优化后	优化前后之差
质量	2.900 6	1.999 1	0.901 5

程可简化为如公式(14):

$$[M]\{u\} + [K]\{u\} = 0 \quad (14)$$

式中: $[M]$ 代表结构的质量矩阵, $[K]$ 为结构的刚度矩阵, $\{u\}$ 为节点加速度向量, 在模态分析中, 其固有频率和振型都可以通过方程式得到。

4.2 搅拌轴的模态仿真分析

搅拌轴作为搅拌器的关键部件, 其结构稳定性与设计的合理性对原料混合效果的好坏起着决定性作用, 从振型图中可以看出, 1阶、2阶振型中, 搅拌轴前端发生弯曲; 3阶、4阶振型中, 搅拌轴中部发生弯曲, 且弯曲幅度大; 在5阶、6阶振型中, 搅拌轴多部位发生弯曲, 且弯曲幅度大; 其对应振型如图13所示。

搅拌轴在搅拌器中扮演非常重要的角色, 为避免搅拌轴在实际工作中产生共振, 需对搅拌轴进行模态分析。因对搅拌轴进行仿真, 在实际工作中, 其可能低阶模态下受影响, 故仿真分析了其前6阶的振型^[15]。其模态结果列于表4。

该搅拌轴的额定工作转速是 47 r/min, 根据公式(15), 得到激振频率 $f = 0.78$ Hz, 与固有频率相差大, 因此, 在应用中不会引起共振。

$$f = \frac{n}{60} \quad (15)$$

5 结论

对进行搅拌器的设计以及对搅拌轴和搅拌叶片进行有限元分析。首先, 在对搅拌系统中的搅拌

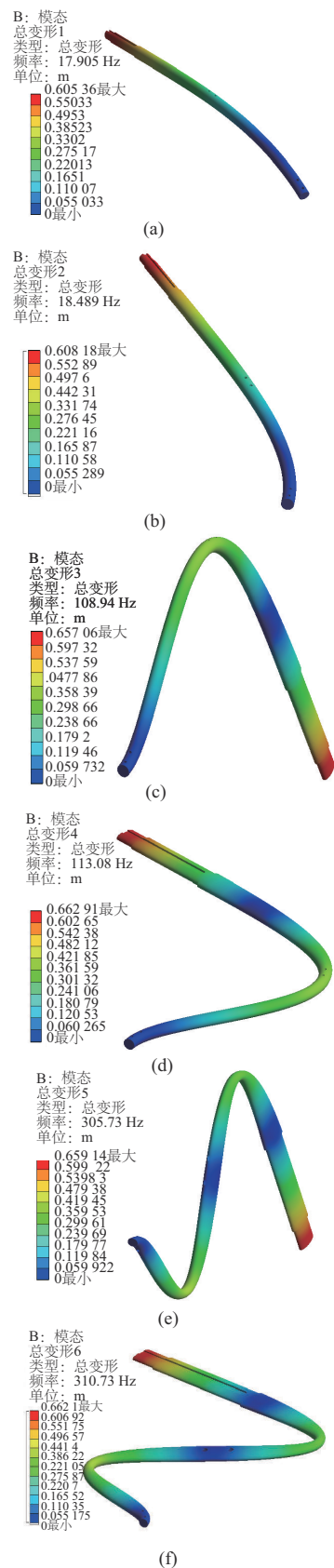


图13 搅拌轴模态图

表4 搅拌轴各阶仿真模态结果

阶数	固有频率/Hz	振型
1	18.16	前部弯曲
2	18.72	前部弯曲
3	110.52	中部弯曲
4	114.48	中部弯曲
5	309.89	多段弯曲
6	314.65	多段弯曲

轴和搅拌叶片进行静力学分析后,得到搅拌轴和搅拌叶片初步的等效力、应变关系图。接着,在搅拌叶片静力学分析的基础上,进一步对搅拌叶片进行轻量化设计,采用响应面法对搅拌叶片进行结构优化设计,最终得到最佳方案,实现了搅拌叶片的减重。其分析结果表明:对搅拌叶片进行响应面分析所得搅拌叶片的最小质量所对应的结构,在静力学分析后也满足强度要求。最后,在对搅拌轴进行静力学分析的基础上,又对其进行了模态分析,并给出了前6阶的振型和固有频率。上述研究结果为现代搅拌装置的设计奠定了理论基础。

参考文献

- [1] 胡勇. 蜂窝型聚氨酯发泡材料应用于汽车天窗遮阳板的初步研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(4):122-125.
Hu Yong. Preliminary research on application of cellular polyurethane foaming material to automobile sunroof sunshade[J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(4):122-125.
- [2] 张华波. 开启涡轮式桨叶的混合效果仿真及实验[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
Zhang Huabo. The simulation and experiment of open turbine blade mixing effect[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [3] 王国樑. 颗粒物料搅拌混合设备设计及试验研究[D]. 郑州:郑州大学, 2018.
Wang Guohua. Design and experimental study on mixing device for granular materials[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [4] 田丹宇. 发酵罐及搅拌器的结构设计与分析[D]. 长沙:湖南大学, 2019.
Tian Danyu. Structural design and analysis of fermenter and agitator[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [5] 刘蕾. 新型斜叶桨式搅拌器固液两相流的数值模拟[D]. 西安:西北大学, 2017.
Liu Lei. Numerical simulation of solid-liquid two-phase flow in a new type of inclined blade propeller agitator[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [6] 李尚国. 灭火工程中高效立式制浆系统的设计[J]. 煤矿安全, 2015, 46(12):104-106.
Li Shangguo. Design of high efficient vertical pulping system in fire extinguishing engineering[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(12):104-106.
- [7] 陈乙崇. 搅拌设备设计[M]. 北京:化学工业出版社, 1986.
Chen Yichong. Mixing equipment design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [8] 汤阳阳. 基于模块化的筒式冷却机设计与结构改进[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
Tang Yangyang. Design and structure improved design of cylinder cooling[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [9] 陈作炳, 罗传威, 郑欢. 立式发酵机搅拌阻力矩计算模型的搭建和修正[J]. 机械设计与制造, 2022(4):10-13.
Chen Zuobing, Luo Chuanwei, Zheng Huan. Establishment and modification of the calculation model of stirring resistance moment in vertical fermentation machine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(4):10-13.
- [10] 武照云, 鱼鹏飞, 张毓兰, 等. 基于响应面分析法的粮食搬运RGV抓手优化设计[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(1):50-55.
Wu Zhaoyun, Yu Pengfei, Zhang Yulan, et al. Optimal design of RGV gripper for grain handling based on response surface analysis[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(1):50-55.
- [11] Shi Y H, Zhang G Q, Zhang N, et al. Spindle optimization design of the rice mill based on ansys workbench[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 644/650:807-812.
- [12] 李伟, 李焱哲, 金星. 基于响应面优化法的变速箱壳体结构优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(5):4-7, 13.
Li Wei, Li Yanzhe, Jing Xing. Structural optimization design of gearbox shell based on response surface optimization method[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(5):4-7, 13.
- [13] 刘益滔, 何二宝. 基于有限元的汽车变速器二轴模态特性分析[C]//河南省汽车工程学会. 自主创新、学术交流——第十届河南省汽车工程科学技术研讨会论文集. [出版者不详], 2013: 50-51.
Liu Yitao, He Erbao. Modal analysis of vehicles transmission shaft based on finite element[C]//Independent Innovation and Academic Exchange-Proceedings of the 10th Henan Automotive Engineering Science and Technology Seminar, 2013:50-51.
- [14] 俞俊海. 基于Ansys Workbench的激波轮模态分析[J]. 机电产品开发与创新, 2021, 34(3):113-115.
Yu Junhai. Modal analysis of shock wheel based on Ansys Workbench[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2021, 34(3):113-115.
- [15] 戴兵, 陈再良. 聚氨酯发泡设备自动搅拌系统的设计及有限元仿真[J]. 机械工程师, 2019(12):68-71.
Dai Bing, Chen Zailiang. Design and finite element simulation of automatic mixing system for polyurethane foaming equipment[J]. Mechanical Engineer, 2019(12):68-71.