

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.06.008

基于流体分析的发酵釜搅拌器强度计算

马 腾, 丁健华, 陈 涛*, 李伟忠, 杨象岳, 刘延雷

(杭州市特种设备检测研究院, 浙江 杭州 310051)

摘 要:大型搅拌釜的搅拌器强度计算难度较大,且高黏流体介质的搅拌功率和搅拌效果难以预测。针对大型发酵釜的搅拌器设计问题,采用CFD和FEA技术相结合的方法,对发酵釜的搅拌效果和搅拌器强度进行了分析和预测,结果表明,该分析方法考虑了搅拌器工作过程中流体压力对叶片的作用,对大型搅拌器,尤其是搅拌介质为高黏流体的搅拌器强度校核和功率预测能够获得较为准确的结果,同时可获得详细的流场信息及各项特性参数。该分析方法可为大型搅拌器的设计和优化提供参考。

关 键 词:发酵釜;搅拌器;有限元;有限体积;数值模拟

中图分类号:TQ051.72

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)06-0033-05

Fermentation Tank Agitator Strength Calculation Based on the Fluid Analysis

MA Teng, DING Jianhua, CHEN Tao*, LI Weizhong, YANG Xiangyue, LIU Yanlei

(Hangzhou Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310051, China)

Abstract: Large stirred tank agitator strength calculation is difficult, and viscous fluid medium stirring power and stirring effect is difficult to predict. For large fermentation tank agitator design problem, this paper adopted the method of combining the CFD and FEA technology, mixing effect of fermentation tank and the agitator strength were analyzed and predicted, the results showed that the analysis method considering the fluid pressure effect on the blade in the working process. For large mixer, especially the mixing of medium intensity and power of agitator for viscous fluid prediction could get more accurate results, the detailed flow field information and the feature parameters could be obtained at the same time. This analysis method can provide reference for design and optimization of large mixer.

Key words: fermentation kettle; agitator; finite element; finite volume; numerical simulation

承压搅拌釜作为典型的特种设备,广泛应用于生物医药、化学工业以及食品加工工业中。搅拌釜搅拌器的设计难点有2点。首先,搅拌器设计不合理造成的搅拌混合效果不佳,物料混合不均匀,反应不充分。对于剧烈化学反应场合应用的搅拌釜,搅拌效果不好可能引起不可控的化学反应,极易导致釜内局部温度、压力剧烈变化,最终引发设备失效等事故。其次,对于大型搅拌器,尤其在搅拌介质的黏度较高的情况下,搅拌器叶片受力不均匀或启动过程中扭矩过大均可导致叶片强度不够而折弯或折断,且搅拌功率难以准确预测。

如何在保证大型搅拌釜内部搅拌效果的前提下,

设计合理的搅拌结构从而保证搅拌器的强度和可靠性是近年来搅拌器设计的研究重点。近年来,随着计算机技术的应用和普及,基于计算流体力学(CFD)的流场仿真技术和基于有限元方法(FEA)的力学分析技术作为有效的分析计算手段,在搅拌器流场结构模拟和功率计算^[1-6]、固液两相混合时间预测^[7-11]以及搅拌器强度和模态分析^[12]等方面均得到广泛的应用,也有很多相关的科研论文发表。

本文采用计算流体力学软件Fluent对发酵釜进行了内流场流动分析,基于分析结果,评价搅拌效果并预测搅拌器的功率,最后将搅拌器叶片工作过程中流体

收稿日期:2014-05-26;修回日期:2014-07-18

基金项目:黑龙江省重点实验室开放课题(No. hj201309)

作者简介:马腾(1964),男,浙江杭州人,压力容器、压力管道检验员,主要从事压力容器及管道等特种设备检验及相关科研工作。E-mail:chentao_zju@163.com

作用力导入力学分析软件 ANSYS, 进一步对搅拌器模型进行强度和可靠性分析, 流体仿真和固体力学计算的数据交换和耦合借助 Workbench 平台完成。该分析方法将流体分析和固体力学分析有效地结合起来, 能够较全面真实地预测搅拌容器内部流场结构和搅拌器的受力状态, 对大型搅拌器的设计选型、校核分析有较为实用的参考价值。

1 计算模型和方法

1.1 物理模型

图 1 为某大型发酵釜及其搅拌器结构示意图, 如图所示, 该搅拌器采用 2 层 4 叶片 PBT 桨和 1 层 4 叶片 VFBT 桨的组合结构, 发酵釜及搅拌器的设计参数

如表 1 所示。发酵釜内的物料密度为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 动力黏度为 $3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 搅拌器转速为 7 r/min 。

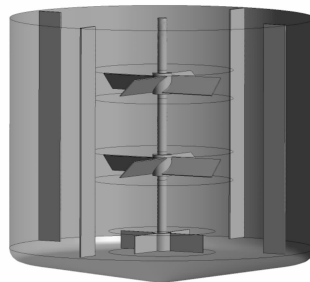


图 1 发酵釜及搅拌器桨叶结构示意图

Figure 1 Structure of fermentation tank and agitator

表 1 发酵釜及搅拌器设计参数

Table 1 Structure parameters of fermentation tank and agitator

发酵釜			挡板			4PBT 叶轮			4VFBT 叶轮		
内径/ mm	液位高度/ mm	底封头深/ mm	宽度/ mm	数量/ 个	间隙/ mm	直径/ mm	叶片 宽径比	距下封头切线 距离/mm	直径/ mm	叶片 宽径比	距下封头切线 距离/mm
18 900	16 510	2 235	1 575	4	315	8 000	0.18	10 160/5 080	6 100	0.18	315

1.2 数值计算模型

分别建立发酵釜内部流体区域和搅拌器模型的整体三维模型, 采用四面体和六面体的混合网格对计算区域进行离散化处理, 为了提高固液交界面数据交换和计算的精度, 重点对交界面和叶片近壁区域进行了网格加密。网格量无关性检验后选取流体区域的计算网格量为 4 525 405, 固体部分计算网格量为 154 291, 流体域及交界面的计算网格如图 2 所示。

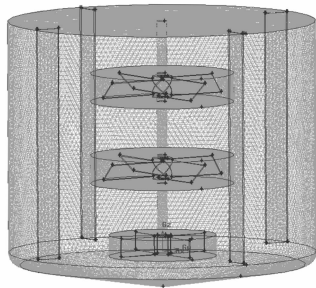


图 2 计算流域网格

Figure 2 Mesh of flow region

1.3 计算方法和边界条件

本文采用有限体积法处理流体区域的方程离散, 同时运用有限体积法和有限单元法相结合的手段对考虑流体压力的搅拌器强度进行计算和分析。发酵釜内流场和搅拌器强度的计算和分析基于分析软件 Workbench, 计算域网格划分采用软件 ICEM, 流场的后处理借助软件 CFD-Post。

2 数值模拟结果与分析

2.1 发酵釜内流场分析结果

发酵釜的内部速度场的详细分布情况如图 3~4 所示, 其中包括各横截面和纵截面的速度分布情况。从速度矢量分布图中可以看出, 发酵釜的总体搅拌效果良好, 形成了较理想的轴向循环效果, 并且在不同高度上的流动速度较为均衡, 唯有液面附近靠近挡板背压面附近位置流动速度相对较低。图 5~6 给出了发酵釜内部机械结构的压力分布云图。由图可知, 搅拌器工作时表面压力最高的区域位于顶端 4PBT 桨叶压力面的叶梢附近。中部的 4PBT 桨和底部的 VFBT 桨表面压力水平较低。

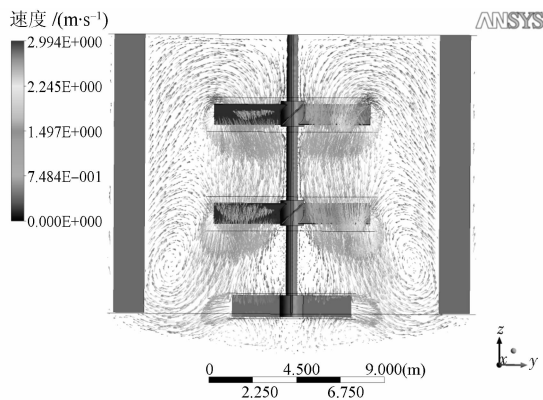


图 3 发酵釜纵截面速度矢量图

Figure 3 Velocity vector distribution on axis cross-section

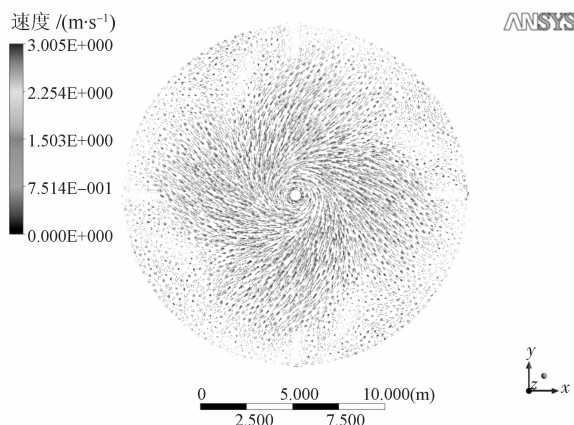


图4 发酵釜横截面(距底部 14 935 mm)
速度矢量图

Figure 4 Velocity vector distribution on
cross-section (height: 14 935 mm)

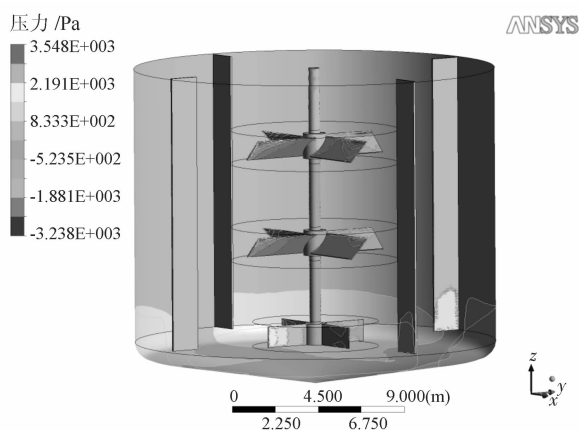


图5 发酵釜内部机械部件表面压力分布图
Figure 5 Pressure distribution on
surface of agitator and tank

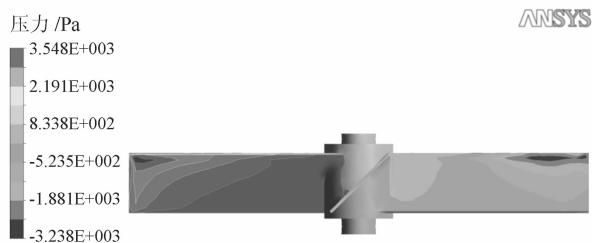


图6 搅拌器顶部 4PBT 叶轮表面压力分布
Figure 6 Pressure distribution on
surface of 4PBT agitator blade

通过发酵釜内流场的分析结果,可得到各搅拌叶轮的扭矩、功率以及总扭矩和搅拌功率。该搅拌器的扭矩和功率预测结果如表 2 所示。

表 2 搅拌器扭矩和功率预测结果

Table 2 Agitator torque and power prediction

部件	扭矩/N·m	功率/kW
顶部 4PBT 叶轮	56 630.6	41.50
中部 4PBT 叶轮	42 489.5	31.10
底部 4VFBT 叶轮	30 461.1	22.30
轴	30.0	0.02
搅拌器总计	129 611.2	94.90

鉴于计算本身和模型建立时存在一定的误差,并且考虑启动功率,特别是物料为非牛顿流体时的启动功率,因此计算结果一般应考虑 20% 的余量,以增加保险系数。同时考虑搅拌器机械效率为 90%,由此作为选择电机的参考。对于分析中的发酵釜,若同时考虑 20% 的余量和 90% 的机械效率,则功率计算值达到 126.5 kW。

2.2 发酵釜搅拌器强度有限元分析

搅拌器模型的载荷及约束如图 7 所示,其中搅拌器载荷考虑了重力、转速以及流体作用在叶片上的压力,流体压力由 CFD 计算结果得出,搅拌器模型约束采用圆柱支撑约束方式。

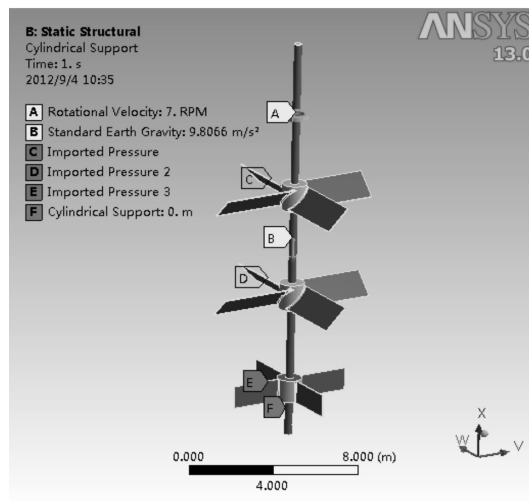


图7 搅拌器强度计算载荷及约束情况

Figure 7 Load and constraints of
agitator strength calculation

图 8 ~ 11 为搅拌器整体的应力、变形分布情况。在重力作用下,搅拌器上部 2 个 PBT 叶轮的叶片整体呈竖直向下变形,叶片顶端变形量最大,而由于 VFBT 叶轮的结构特点,该叶轮受重力影响较小。而搅拌器在工作过程中,流体压力的作用使得叶片相对于旋转方向后弯。综合二者影响,最大变形位置为该叶轮叶片的顶端,对应的最大变形量为 13.5 mm,如图 10 所示。搅拌器最大应力值 27 MPa,位于中部 PBT 叶轮叶

片的根部,如图 11 所示。由于搅拌器顶部 PBT 叶轮受流体压力相对其它叶轮大,因此变形较小。底部的 VFBT 叶轮受流体压力作用产生变形为主,但由于其外径小,因此变形量较小。

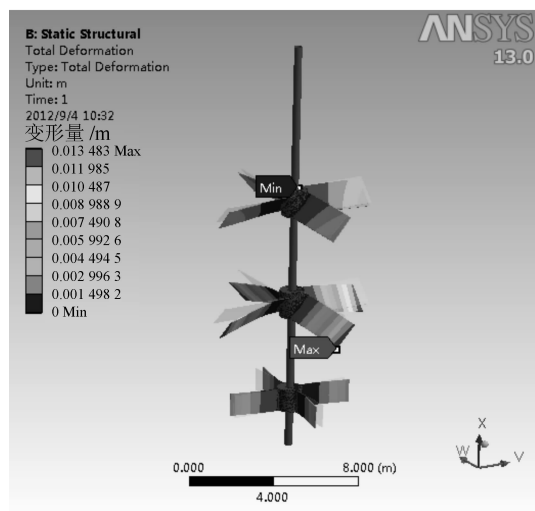


图 8 搅拌器变形分布

Figure 8 Deformation distribution of agitator

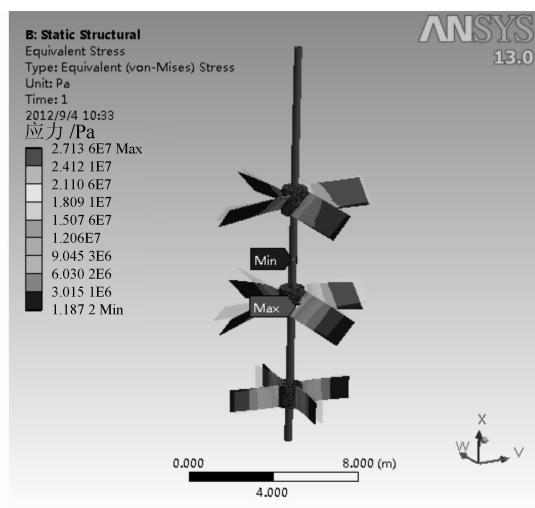


图 9 搅拌器 von-Mises 应力分布

Figure 9 Agitator von-Mises stress distribution

3 结语

利用 CFD 技术对发酵釜内部流动的详细分析,得到了釜内的流场分布情况,并基于流场结果获得搅拌功率。从计算结果可以看到,釜内流动分布较为合理,不同液位高度的流动较为均匀。

基于流场计算结果,进一步对搅拌器进行了强度分析,将流场分析结果作为强度计算的初始边界条件,分析得出搅拌器在工作状态下的应力分布情况和变形

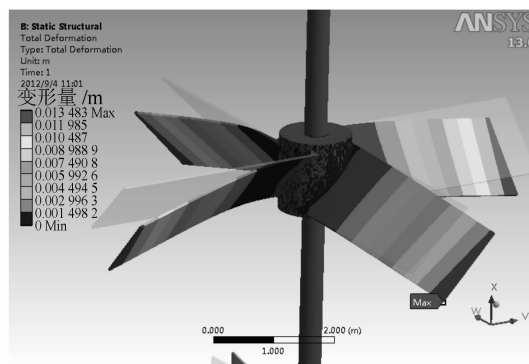


图 10 搅拌器中部 PBT 叶轮变形分布

Figure 10 Deformation distribution of PBT impeller

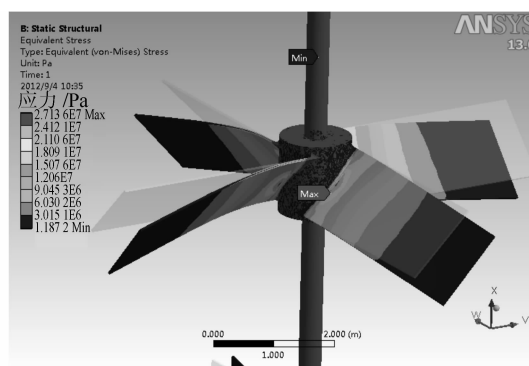


图 11 搅拌器中部 PBT 叶轮 von-Mises 应力分布

Figure 11 Von-Mises stress distribution of PBT impeller

情况。由分析结果可见,该大型搅拌器考虑流体作用的强度校核更符合实际情况,该分析方法对搅拌器的设计优化和校核分析有较为实用的参考价值。

参考文献:

- [1] 方德明,陈涛,杨象岳,等.基于 CFD 流场分析的反应釜搅拌器结构改进[J].轻工机械,2014,32(2):95-98.
- [2] 陈红生,何雄志.结晶罐搅拌流场及传热过程的数值模拟[J].轻工机械,2010,28(4):26-29.
- [3] 马青山,王英琛,施力田,等.多层搅拌桨流动场的测量与数值模拟[J].化工学报,2003,54(12):1661-1666.
- [4] 马青山,聂毅强,包雨云,等.搅拌槽内三维流场的数值模拟[J].化工学报,2003,54(5):612-618.
- [5] WANG Feng, WANG Weijing, MAO Zaisha. Numerical study of solid-liquid two-phase flow in stirred tanks with rushton impeller-(I) formulation and simulation of flow field [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2004,12(5):599-609.
- [6] 王乐勤,杜红霞,吴大转,等.多层桨式搅拌罐内混合过程的数值模拟[J].工程热物理学报,2007,28(3):418-420.
- [7] KASAT G R, KHOPKAR A R, RANADE V V, et al. CFD simulation of liquid-phase mixing in solid-liquid stirred reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2008,63(15):3877-3885.

(下转第 39 页)