

圆筒内层流对流换热的最佳速度场及工程应用

苏 欣, 孟继安, 程新广, 过增元

(清华大学 工程力学系, 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 在粘性耗散一定的条件下, 以热量传递势容耗散取得极值为优化目标, 利用变分方法可以导出稳态层流对流换热的场协同方程。该文利用场协同方程, 通过 Fluent 6.0 对含有均匀内热源、边界条件与实际搅拌器相近的圆筒内水的对流换热进行数值求解, 得到了由多个涡构成的、规则合理的速度场分布。在粘性耗散和圆筒体积一定的条件下, 最佳速度场会随着圆筒长径比的不同而发生变化, 而且在某些条件下得到的优化流型与工业中搅拌器的常用流型十分相似。这些优化流型对搅拌器的选择和设计具有一定的辅助意义。

关键词: 对流换热; 场协同方程; 最佳速度场; 涡流; 搅拌; 流型

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2005)05-0677-04

Optimal velocity field for laminar convection heat transfer in a cylinder and its application in engineering

SU Xin, MENG Ji'an, CHENG Xinguang, GUO Zengyuan

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of Ministry of Education, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The field coordination equation for steady laminar convection heat transfer was derived for constant viscous dissipation using the variational method to maximize the heat transport potential capacity dissipation. The field coordination equation was numerically solved using Fluent 6.0 for water convection heat transfer in a cylinder with uniform inner heat sources, with boundary conditions similar to those for practical agitator tanks. The regular velocity fields had several vortexes. The results show that the optimal velocity field varies with changing cylinder slenderness ratio when the viscous dissipation and the cylinder volume are kept constant. Some of the optimal flow patterns are very similar to common agitator flow patterns. The optimal flow patterns can facilitate the design and selection of agitators.

Key words: convection heat transfer; field coordination equation; optimal velocity field; vortex flow; agitation; flow pattern

场的分布特性, 改变速度场是强化对流换热的一个最直接的途径。在实际工程中强化换热技术的研究和应用大多是在经验的基础上设计某种具体的强化技术, 然后通过实验和数值计算归纳出适用于一定范围的经验关联式^[1~3]。由于研究人员依经验所选取的具体强化技术并不着眼于场的分布特性, 因而也不可能找到在流动总耗能一定条件下的最佳速度场。过增元^[4, 5]提出了对流换热场协同的基本概念, 指出对流换热强化要求速度场和温度场之间相互协同, 即彼此存在着最为合理的空间分布。

受场协同思想的启发, 在工程中选择和设计具体强化换热措施时, 可以首先考虑在一定边界条件下什么样的速度场能使对流换热的整体性能达到最优, 在得到确切的最佳速度场后, 再通过实施某种具体手段, 产生近似于最佳速度场的流场。

工业搅拌罐内的速度场分布对于实现均匀混合、强化传热等搅拌目的有很大的影响, 因而选择和设计合适的搅拌器并得到优化的搅拌流型十分必要。搅拌器的选择与搅拌目的、液体粘度、搅拌转速和搅拌罐的容积等因素有关, 但目前主要还是依靠经验进行选择, 这样的选择有较大的局限性。

本文基于对稳态层流对流换热场协同方程进行数值求解, 在不同几何形状的条件下得到了各不相同的、由多个涡构成的优化速度场分布, 这种优化流场对搅拌器的选择和设计会有一定的帮助。

1 场协同方程

孟继安^[6]以热量传递势容耗散作为传热性能优劣的评判标准, 同时用粘性耗散来评价流动过程中机械能的损失, 认为在一定机械能损失条件下的最

收稿日期: 2004-05-14

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究项目(G2000026301)

作者简介: 苏欣(1980-), 男(汉), 吉林, 硕士研究生。

E-mail: suxin98@mails.tsinghua.edu.cn

通讯联系人: 过增元, 中国科学院院士,

E-mail: dengzy@tsinghua.edu.cn

对流换热过程的整体性能取决于速度场和温度

佳速度场可以通过变分求解得到,并推导得到了稳态层流条件下的场协同方程:

$$\mu \nabla^2 U - \nabla P - \rho U \cdot \nabla U + (C_\Phi \nabla T + \rho U \cdot \nabla U) = 0 \quad (1)$$

其中: U 为速度; T 为温度; P 为压力; ρ 为密度; μ 为粘性系数; C_Φ 是一个与输入粘性耗散功有关的常数; A 是变分推导过程中得到的一个新的输运变量,将其定义为逆温度。输运方程为

$$\lambda \nabla^2 A + \rho c_p U \cdot \nabla A = \lambda \nabla^2 T \quad (2)$$

其中: λ 为导热系数, c_p 为比热容。

对流换热过程还必须同时满足以下基本方程:

质量守恒方程

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0, \quad (3)$$

能量守恒方程

$$\lambda \nabla^2 T - \rho c_p U \cdot \nabla T + \dot{q} = 0 \quad (4)$$

其中 \dot{q} 为内热源强度。

场协同方程、逆温度方程与质量守恒方程、能量守恒方程一起构成了一个封闭的方程组,在给定的边界条件下求解这个方程组就可以得到该边界条件所对应的最佳速度场分布。场协同方程的物理含义就是对流换热强化过程中为了达到最大收益或者最小付出的目的,速度场应保持的基本特征。因而,场协同方程最直接的意义就在于对各种具体强化换热技术的选择和实施具有理论指导作用。

2 圆筒内水的层流对流换热最佳速度场的求解

2.1 物理背景、边界条件和求解方法

本文利用场协同方程对含均匀内热源的圆筒内水的层流对流换热进行数值求解,这个简单的模型有着很强的实际意义。因为工业搅拌中很多都伴有产生热效应的物理、化学反应,经常要求将搅拌液体冷却到一定温度或者维持在一定温度以保持最佳工艺条件,获得最佳反应效果。

工业搅拌中的液体有很多是高粘性的,在很多情况下搅拌属于层流流动,在满足流动相似的条件,小尺度圆筒内水的流动与大尺度圆筒内高粘流体的流动是类似的。假设圆筒内含均匀内热源,边界条件为上下底面绝热,侧壁面等温,如图1所示。这与仅在侧壁面设置冷却夹套、内部反应热发生均匀的搅拌罐的边界条件是基本一致的。不同模型的求解区域划分的网格数均为40000左右。因设定条件下圆筒内温差很小,水的物性参数均选为定值。数值计算时除求解连续方程、动量方程(场协同方程)和

能量方程外,还要求解逆温度方程。数值计算采用 Fluent 6.0, 逆温度方程的求解使用 Fluent 6.0 提供的 UDF 功能。其中逆温度 A 的边界条件为: 等温壁面, $A = 0$; 绝热壁面, $\nabla A = 0$ 。压力与速度的解耦采用 SIMPLEC 算法,动量、能量、逆温度方程的离散均采用 QUICK 格式。

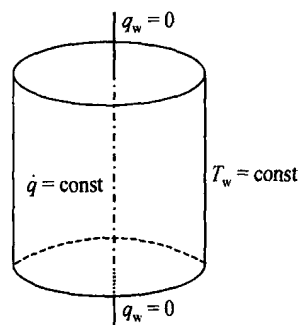


图1 数值计算的物理模型

2.2 计算结果及分析

数值计算时,圆筒模型的体积保持一定,变化圆筒的长径比,以考查长径比对最佳速度场的影响。在圆筒体积为 $6.28 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 、圆筒内均匀内热源强度为 200 W/m^3 、侧壁面温度为 280 K 、粘性耗散为 $6.48 \times 10^{-9} \text{ J}$ 的条件下,本文通过求解场协同方程分别得到了圆筒长径比为 $1/8$ 、 $1/4$ 、 $1/2$ 、 1 和 2 几种情况下的最佳速度场分布。

计算结果表明:不同长径比对应的最佳速度场分布是各不相同的,优化流型与圆筒的几何形状有着极为密切的关系。当长径比为 $1/8$ 时,圆筒内横向截面形成 10 个小涡,纵向无涡;长径比为 $1/4$ 时,圆筒内横向截面形成 4 个涡,纵向形成 2 个小涡(图2);长径比为 $1/2$ 时,圆筒内纵向截面形成 2 个涡,横向无涡(图3);长径比为 1 时,圆筒内纵向截面形成 4 个涡,横向无涡(图4);长径比为 2 时,圆筒内纵向截面没有形成涡,而是产生螺旋式上升和下降的循环流动,横向形成 2 个涡。为节省篇幅,本文只选取了速度场比较典型的 3 种情况(长径比分别为 $1/4$ 、 $1/2$ 和 1)的圆筒内速度场分布图。

虽然不同几何形状对应的最佳速度场的具体形式是不同的,但是它们有一个共同的特点即都是由多个涡构成的规则流型,而且各个优化流型在其对应的几何条件下,在直观上对于强化传热是十分明显和合理的。因为在只通过圆筒的侧壁面散热的条件下,如果要将圆筒中心部分产生的热量及时地传送到壁面,最好的途径就是形成一个从中心到外壁面的循环流动,也就是涡流的形式。涡流分为横向涡

和纵向涡两种形式, 因为在不同几何条件下横向涡和纵向涡的流动阻力代价和传热效率是不同的, 所以最佳速度场的具体形式会随着长径比的不同而发生变化。

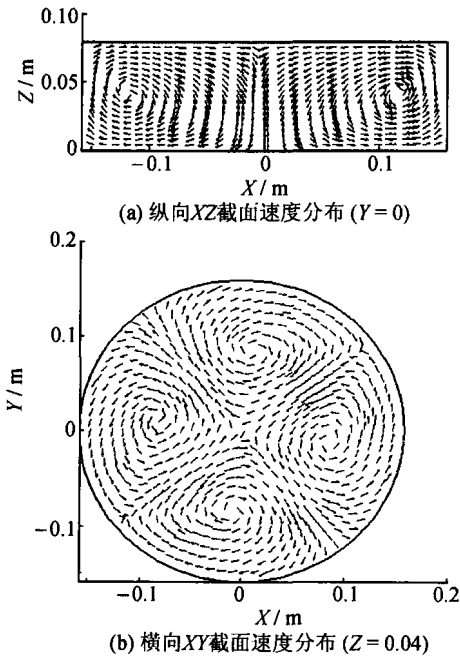


图2 长径比为 1/4 的圆筒 ($D=0.318\text{m}$, $H=0.0795\text{m}$) 内速度场

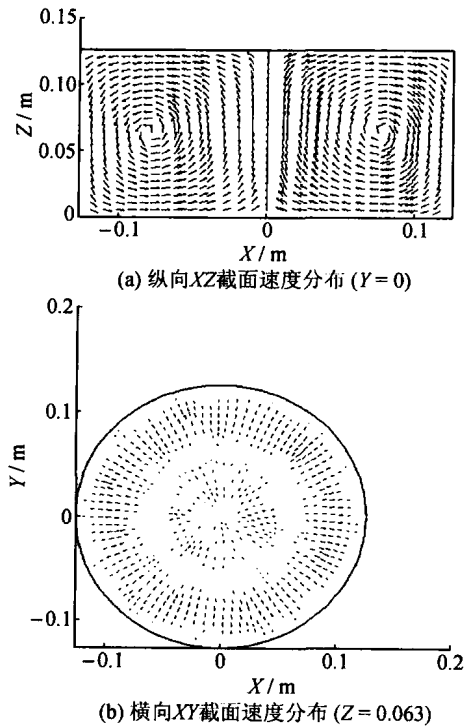


图3 长径比为 1/2 的圆筒 ($D=0.252\text{m}$, $H=0.126\text{m}$) 内速度场

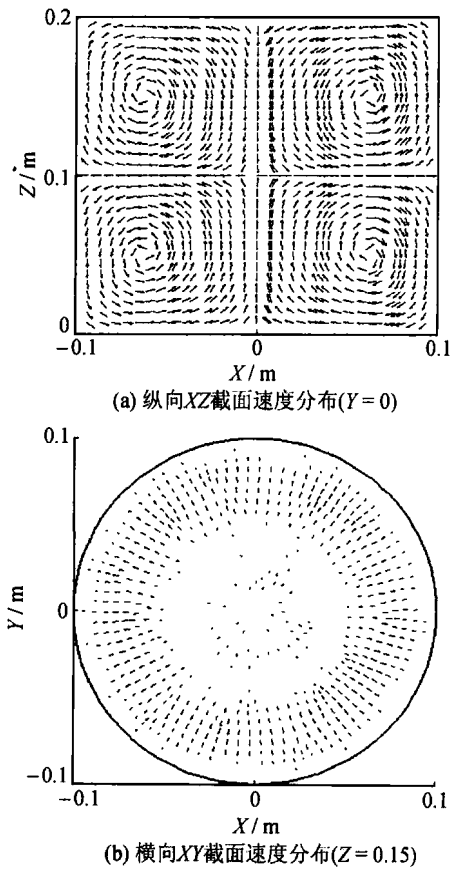


图4 长径比为 1 的圆筒 ($D=0.2\text{m}$, $H=0.2\text{m}$) 内速度场

3 最佳速度场的分析和设计在工程中的应用

值得注意的是, 求解场协同方程所得到的部分优化流型与工业搅拌中的常用流型是非常近似的。图5所示为推进式搅拌器的流型, 图6所示为平直叶涡轮搅拌器的流型, 可以看出这两种工程常用流型与图3和图4的流型基本相同。在工程实际中, 如果一个搅拌罐的几何形状和冷却方式等条件已经确定, 可以利用场协同方程求解出其对应的最佳速度场分布, 这样就可以根据理论上的优化流型来帮助进行搅拌器类型的选择。

需要指出的是: 虽然在纵向涡的形式上十分相似, 但是图3和图4的流型与工业中的实际搅拌流型还是有所差别的, 因为工业搅拌中会产生周向的流动, 而由场协同方程求得的优化流场是没有周向流动的。在层流和轴对称的条件下, 周向流动在很大程度上是沿着等温线运动, 因此对强化传热的贡献不大, 这说明在工程搅拌中某些条件下的周向流动所消耗的能量是没有收益的。建议设计一种新的搅拌装置, 实现无周向流动的优化流型, 这将会大大提

高某些条件下的搅拌效率。

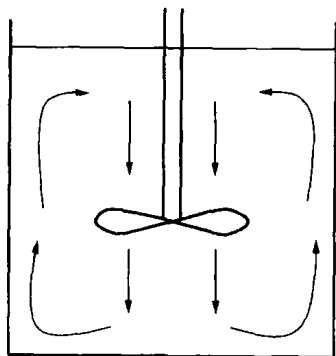


图5 推进式搅拌器的搅拌流型

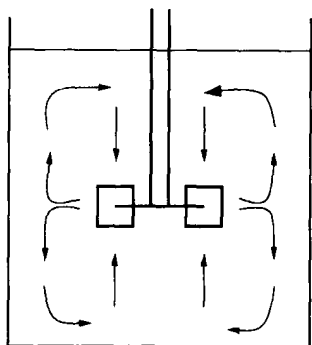


图6 单层平直叶涡轮搅拌器的搅拌流型

4 结 论

1) 在粘性耗散和圆筒体积一定的条件下,数值求解场协同方程可以得到一定边界条件对应的最佳速度场分布,不同长径比的圆筒对应的最佳流型是各不相同的。

2) 不同几何形状对应的最佳速度场的具体形式虽然不同,但都是由多个涡构成的规则流型,它能加强圆筒中心热量向外的传递,强化传热的效果是十分明显和合理的。

3) 利用场协同方程所得的优化流型与工业搅拌中的常用流型非常近似,这表明最佳速度场对搅拌器的选择和设计有一定的辅助意义。

参考文献 (References)

- [1] Bergles A E. Handbook of Heat Transfer Applications [M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [2] Bergles A E. Some perspectives on enhanced heat transfer—Second generation heat transfer technology [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1988, **110**: 1082 ~ 1096.
- [3] 顾维藻, 神家锐, 马重芳. 强化传热 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
GU Weizao, SHEN Jiarui, MA Chongfang. Enhanced Heat Transfer [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [4] GUO Zengyuan. Mechanism and control of convective heat transfer—Coordination of velocity and heat flow fields [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**(7): 596 ~ 599.
- [5] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41**(14): 2221 ~ 2225.
- [6] 孟继安. 基于场协同理论的纵向涡强化换热技术及应用 [D]. 北京: 清华大学, 2003.
MENG Ji'an. Enhanced Heat Transfer Technology of Longitudinal Vortices Based on Field Coordination Principle and Its Application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese)

科技简讯

清华大学10项成果荣获2004年度 国家科学技术奖

2005年3月28日,在北京人民大会堂隆重召开的2004年度国家科学技术奖励大会上,清华大学共有10项优秀科技成果获得国家科学技术奖励。郑泉水、张尧学、黄勇、过增元、裴京、聂建国6位教授代表获奖项目出席大会。

在这10项优秀科技成果中有国家自然科学奖二等奖1项,国家技术发明奖二等奖3项,国家科学技术进步奖二等奖6项。

清华大学航天航空学院郑泉水和黄克智完成的“张量函数表示理论与材料本构方程不变性研究”项目获国家自然科学奖二等奖;清华大学材料工程系黄勇等完成“陶瓷胶态成型新工艺”项目、清华大学计算机科学与技术系张尧学等完成的“基于索普卡(SOPCA)网络结构的索普卡电脑”项目及清华大学精密仪器与机械学系殷纯永等参加完成的“先进制造中空间几何尺寸测量的现场校准方法和装置”项目获国家技术发明奖二等奖;清华大学航天航空学院过增元等完成的“基于场协同理论的传热强化技术及其应用”项目以及清华大学精密仪器与机械学系裴京等完成的“超大容量光盘数据库应用信息系统”项目等荣获国家科学技术进步奖二等奖。

截至2004年度,清华大学共获国家科技三大奖318项,其中国家自然科学奖31项,技术发明奖93项,科技进步奖194项。

(<http://news.tsinghua.edu.cn>)