

# 在工程流体力学教学中引入 CFD 工程案例的探讨

李宝宽<sup>1)</sup> 荣文杰 刘中秋 李林敏

(东北大学冶金学院, 沈阳 110819)

**摘要** 在长期的工程流体力学教学过程中, 发现学生对这门课普遍存在畏难情绪, 对复杂的理论知识掌握困难. 考虑到工程流体力学的研究方法分为理论分析方法, 实验方法和数值方法, 而其中数值方法在传统教学中应用的较少, 所以试图通过适当增加数值方法的应用来改善教学效果. 随着本科生对计算机应用能力的增强以及知识面的逐渐扩展, 本文提出增加结合专业背景, 理论知识及软件应用的综合案例以满足当前课程及学生发展的需求.

**关键词** 工程流体力学, 教学研究, 计算流体力学, 数值模拟

**中图分类号:** O35 **文献标识码:** A

**doi:** 10.6052/1000-0879-17-261

《工程流体力学》是东北大学能源与动力工程专业本科生的一门重要的专业基础课, 开设于大二下学期. 保证学生深入理解并充分掌握该课程的相关知识, 为后续课程奠定扎实的理论基础是教学的基本需求. 然而由于课程本身抽象难懂, 以及大多数学生对流体运动的感性认识明显地比固体运动贫乏, 导致这门课程在开设过程中效果不佳, 学生对工程流体力学知识只是被动接受而非主观吸收, 由此也引发了很多高校教师对工程流体力学课程教学改革的广泛探讨<sup>[1-6]</sup>. 随着计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 在最近 20 年的飞速发展, 教学过程中的数值方法有待加强. 因此本文提出将 CFD 引入教学, 通过分配部分课时让学生学习 CFD 的建模, 计算和分析流程, 加深对抽象概念和方程的理解, 让学生接触工程流体力学前沿发展, 增强学习兴趣从而提高教学效果.

## 1 工程流体力学与 CFD

CFD 是一种以计算机为手段, 通过求解由质量、动量和能量等守恒方程组成的偏微分方程组, 并借助图像显示工具给出空间中的速度、压力以及

温度等信息的方法. 由于其物质耗费少, 具有很好的操作性及可重复性, 而且可以预测实验难以测量的量, CFD 已经得到越来越广泛的应用, 成为科学研究中与做实验一样重要的一种手段, 是研究工程流体力学的重要方法. 常用的 CFD 计算软件有 Fluent, CFX 和 Phoenix 等.

将 CFD 引入工程流体力学课程并不是一个全新的想法, 目前已经有很多教学人员做过相关的探讨<sup>[7-10]</sup>, 然而随着本科生对计算机应用能力的增强以及知识面的逐渐扩展, 加入单一知识点的 CFD 算例到课程中显得过于简单. 本文认为结合专业背景, 理论知识及软件应用的综合案例可以满足当前课程及学生发展的需求. 本文以 Fluent 软件模拟钢包的多相流过程并结合实验为案例进行介绍.

## 2 教学案例

### 2.1 相似理论的理解

在工程流体力学的实验研究中, 有原型实验和模型实验两种实验方法. 进行模型实验应遵循相似原理和准则. 相似理论分为完全相似和局部相似. 完全相似是指, 满足两流动现象相似的全部动力相似准则, 这在实践中是很难做到的. 而局部相似则是对某一具体问题, 只考虑对流动起主导作用的动力相似准则. 在钢包的水模型实验中, 考虑几何相似和动力相似. 通过水模型实验可以巩固加深学生对相似原理这个知识点的学习.

几何相似

$$k_1 = \frac{l_m}{l_p} \quad (1)$$

动力相似

$$k_2 = \frac{F_m}{F_p} \quad (2)$$

2017-07-19 收到第 1 稿, 2017-08-09 收到修改稿.

1) 李宝宽, 博士, 教授, 主要研究方向为高温熔体多相流. E-mail: libk@smm.neu.edu.cn

**引用格式:** 李宝宽, 荣文杰, 刘中秋等. 在工程流体力学教学中引入 CFD 工程案例的探讨. 力学与实践, 2018, 40(1): 93-95

Li Baokuan, Rong Wenjie, Liu Zhongqiu, et al. Discussion on introducing CFD engineering case into the teaching process of engineering fluid mechanics. *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(1): 93-95

式中下标  $m$  代表模型,  $p$  代表原型.  $l$  表示特征长度,  $F$  表示流场中的力, 如惯性力, 黏性力, 重力和压力等. 其中惯性力和重力主导结晶器内钢液的流动, 动力相似处理时应优先保证  $Fr$  数 (表征惯性力和重力相对大小的无量纲参数) 相等.

钢包, 应用于炼钢厂、铸造厂在转炉前承接钢水、进行浇注作业, 被广泛用于工业、钢铁、冶金等行业, 是东北大学能源与动力工程专业学生需要掌握的工程应用之一. 对于本科生而言, 生产实际中的设备陌生而复杂, 为了让学生能够直观地了解钢包运行过程, 先引入水模型实验. 如图 1 所示, 针对底吹钢包过程, 建立了一个 1:3 的水模型实验, 因钢液温度高达  $1500^{\circ}\text{C}$  以上, 而水的动力黏度与钢液相近, 用水来模拟钢液, 食用油模拟渣层, 氮气模拟氩气. 实验中在渣层上方安置一面与水平面成  $45^{\circ}$  的平面镜来观察渣层的形态并通过相机拍摄. 对于气泡则采用高速摄像机捕捉其运动过程. 气泡则通过多孔透气砖来注入, 因此气泡在液相中以离散的形式存在, 气体流量则通过流量计监测. 实验的操作参数由相似理论以及实际钢包的操作参数确定.

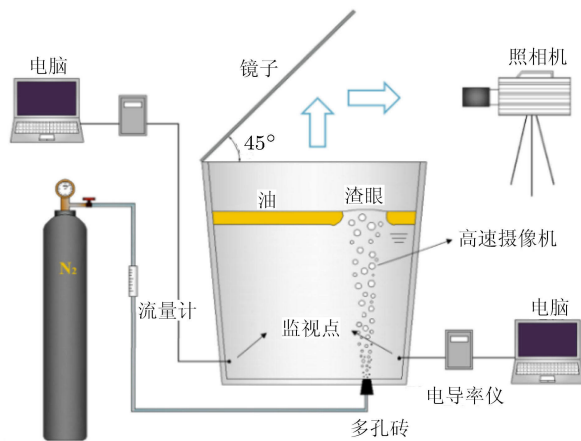


图 1 底吹钢包水模型实验系统图

## 2.2 描述流体运动的两种方法

流体, 运动和力是构成流体力学的三个基本要素, 其中对于第二要素“运动”, 有两种描述方法, 即欧拉法和拉格朗日法. 学生对这两种方法的掌握往往是课堂上领会, 应用中却很难分辨. 两种方法的方程描述如下:

欧拉法着眼于空间点, 把流体物理量表示为空间位置和时间的函数. 在直角坐标系中, 流体物理量  $B$  的空间分布可表为

$$B = B(x, y, z, t) \quad (3)$$

拉格朗日法中表示流体质点最重要的物理量是矢径, 在任一时刻  $t$ , 流体质点  $(a, b, c)$  相对坐标原点的位置矢量为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(a, b, c, t) \quad (4)$$

在钢包模拟过程中, 空气、渣和钢液在空间上连续分布, 模拟采用欧拉法; 而气泡呈离散分布, 所以其计算采用拉格朗日法, 通过对钢包的数值模拟可以加深学生对这两种方法的理解并且形成深刻印象. 在数值模拟的建模过程中涉及连续性方程和动量方程等, 对于这些复杂的方程形式, 学生需要具备一定的数学基础才能理解其求解过程, 而在数值模拟过程中, 对这些枯燥的理论公式进行生动的数值求解, 可以帮助学生更好的理解. 钢包的数值模拟过程考察了不同气体流量 ( $70 \sim 130 \text{ L/h}$ ), 不同渣层厚度 ( $20 \sim 50 \text{ mm}$ ) 的情况, 并对渣眼的开合周期进行探讨. 参数的设定也同时体现了数值模拟低成本, 高效率的优势.

## 2.3 计算结果

对该模型得到的渣眼面积结果与实验结果进行了对比, 列出不同渣厚情况下 ( $h = 20 \text{ mm}$ ,  $h = 40 \text{ mm}$ ,  $h = 50 \text{ mm}$ ) 的渣眼时均结果与对应流量下实验得到的照片进行对比如下:

从对比的图 2 中可以看出, 计算得到渣眼面积与实验结果吻合较好, 该模型对实验过程中的多相流过程预测准确.

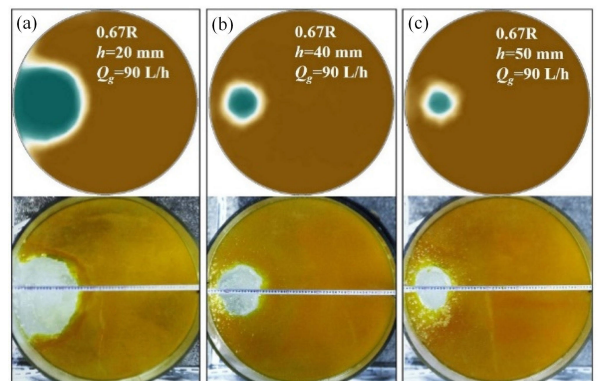


图 2 不同渣厚情况下, 渣眼面积计算结果与实验结果的对比

实验中发现, 底吹钢包的过程中存在渣层的波动, 渣眼大小的振荡以及气流的脉动等非稳态特性. 针对渣眼时开时合的过程, 将计算得到的  $70 \text{ L/h}$  流量下, 一个渣眼的开合的非稳态过程展示在图 3 中, 每个状态的时间间隔为  $0.4 \text{ s}$ .

图 3 为一个较大渣眼产生和闭合的过程, 从渣眼的速度场中可以看出, 渣眼的形成伴随着一股较强的上涌流动. 在气柱底部, 可以发现, 气泡存在一个周期性的鼓包过程, 在此过程中发生较多的气泡合并. 然后气泡变得离散并携带钢液向上运动. 图中箭头标记的位置即一个气泡簇散开上浮的过程, 其周期约为 0.5s, 一个气泡簇携带的钢液易形成较强的流动, 在到达渣层位置时便容易吹开渣层, 形成渣眼.

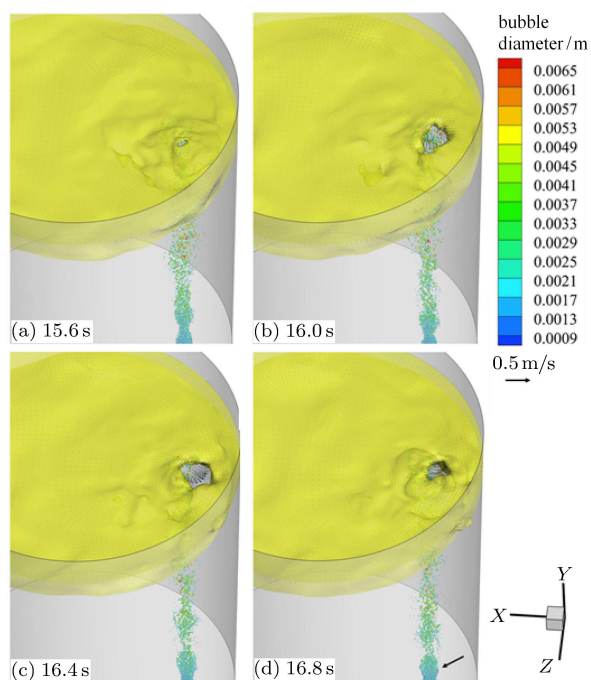


图 3 渣眼的一个开合周期

### 3 结束语

本文提出在本科生工程流体力学课程中引入 CFD 环节来提高教学效果, 并以钢包的水模型实验和数值模拟为例进行介绍, 该案例涉及相似原理, 流体运动的两种描述方法和基本方程等多个知识点. 结合专业背景, 理论知识及软件应用的综合案例一方面可以让学生在在学习专业知识的同时, 了解本专业在实际生产中的应用; 另一方面, 让学生接触前沿的软件开发从而开拓视野, 激发学习兴趣, 为以后的工作和科研奠定基础.

### 参 考 文 献

- 1 陶海升. 流体力学课程教学与课程考核改革的实践. 教育教学论坛, 2015, (17): 91-93
- 2 杨扬, 张勤星, 王利霞等. 工科流体力学教学方法与改革. 大学教育, 2015, (5): 129-130
- 3 许栋, 及春宁, 白玉川. 基于生活实践的工程流体力学启发性教学初探. 力学与实践, 2016, 38(2): 195-198
- 4 譙雯, 周云开. FLOW-3D 在流体力学教学改革中的应用及探讨. 高教学刊, 2017, (8): 77-78, 80
- 5 陈庆光, 张明辉, 朱绪力等. 流体力学课程教学中几个基本概念的教学方法. 力学与实践, 2015, 37(1): 138-141
- 6 吴琼, 王文欢, 刘海龙等. 流体力学实验教学改革与探索. 2016, (42): 124-125
- 7 谢翠丽, 倪玲英. 《工程流体力学》本科课程引入 CFD 教学的探讨. 力学与实践, 2013, 35(3): 91-93
- 8 蒋光彪, 殷水平, 陈胜铭等. CFD 软件及源程序辅助工程流体力学课程教学的探索与实践. 高等建筑教育, 2015, 24(5): 154-157
- 9 郑捷庆, 邹锋, 张军等. CFD 软件在工程流体力学教学中的应用. 中国现代教育装备, 2007, (10): 119-121
- 10 王莹, 孙晓晶. CFD 数值模拟在计算流体力学项目驱动实践教学中的应用. 教育教学论坛, 2016, (6): 141-142

(责任编辑: 周冬冬)