

摘 要

为了保证沉淀池的稳定运行和出水水质达标，利用数值模拟方法准确地描述饮用水处理厂辐流式沉淀池中的流态及固相颗粒的行为和分布显得至关重要。与其他常用于对沉淀池进行数值模拟的经验模型、固体通量模型等相比，计算流体力学 (CFD) 模型在精度上具有明显的优势。本文以商用计算流体力学软件 FLUENT 为工具，通过比较不同进水流速、挡板长度和挡板位置对颗粒沉降的影响，对辐流式沉淀池中的流态和固相颗粒行为进行了模拟和分析。结果表明，固相颗粒在沉淀池中的行为和分布受进水流速、颗粒粒径以及挡板长度和位置的影响，呈现出不同于理想沉降理论的轨迹；颗粒粒径越小，颗粒受漩涡的影响越大，从而沉淀效果就越差；挡板的设置有利于减小漩涡对颗粒沉降的影响，合适的挡板长度和位置可以使得颗粒去除率大大提高。本研究为辐流式沉淀池的结构设计提供了可靠的依据。

关键词：辐流式沉淀池，计算流体力学，数值模拟，饮用水处理

Abstract

In order to ensure the stable operation of sedimentation tanks and water quality standards, the use of numerical simulation to accurately describe the flow profile and the solid-phase flow behavior and distribution of particles of the sedimentation tank in potable water treatment is essential. Compared with other commonly used models for numerically simulating sedimentation tank such as empirical models and solid mass flux model, computational fluid dynamics (CFD) has greater advantages in simulate accuracy. Based on the commercial CFD software package FLUENT, the flow profile and the solid behavior are simulated by comparing the influence of different water flow rate, baffle length and location on the particle removal efficiency, and analyze the flow profile and solid behavior in the circular sedimentation tank. The results showed that the solid-phase particles' precipitation behavior and their distribution were both effective with the inlet velocity, particle size and the location and the length of the baffle, with showing the difference to the theory of settling ideal track. When the particle size is smaller and the impact of the vortex is greater, the effect of the precipitation is worse; while the appropriate length and position of baffle can make particle removal efficiency greatly enhanced. In this study, the result supported a reliable and useful basis for optimizing the design of the circular sedimentation tank.

Key words: Circular sedimentation tank, computational fluid dynamics, numerical simulation, potable water treatment

目 录

第一章 前 言	1
1.1 课题背景	1
1.2 沉淀工艺及构筑物的现状	2
1.3 沉淀池数值模型的研究现状	5
1.4 辐流式沉淀池的设计	11
1.5 本文研究内容	13
第二章 辐流式沉淀池CFD数值模拟基础	15
2.1 计算流体动力学(CFD)基础知识	15
2.2 利用GAMBIT建模	22
2.3 应用FLUENT进行求解	27
2.4 计算模型网格独立性的验证	34
2.5 典型算例的结果展示。	36
2.6 模型有效性验证	39
第三章 沉淀池不同参数下CFD数值模拟的分析讨论	42
3.1 不同进水流速对流场的影响	42
3.2 不同挡板位置对流场的影响	45
3.3 不同挡板长度对流场的影响	49
3.4 实际沉淀池模型与修正后沉淀池的比较	54
第四章 利用DPM模型模拟沉淀池的颗粒轨迹	56
4.1 离散相模型简介	56
4.2 离散相模型的求解过程概述	56
4.3 应用于辐流式沉淀池的DPM模型的参数设置	57
4.4 挡板长度对颗粒沉降的影响	62
4.5 挡板位置对颗粒沉降的影响	64
第五章 结论与建议	67
5.1 结论	67
5.2 建议	67
参 考 文 献	68
致 谢	70
附 录	71
声 明	80

第一章 前言

1.1 课题背景

随着我国社会经济的发展和人们物质生活水平的提高，人们对生活用水，特别是饮用水的水质要求越来越高。这些年来，我国给水处理工艺发展迅速，已接近甚至超过了西方发达国家。给水处理的常规工艺^[1]如图 1-1 所示。

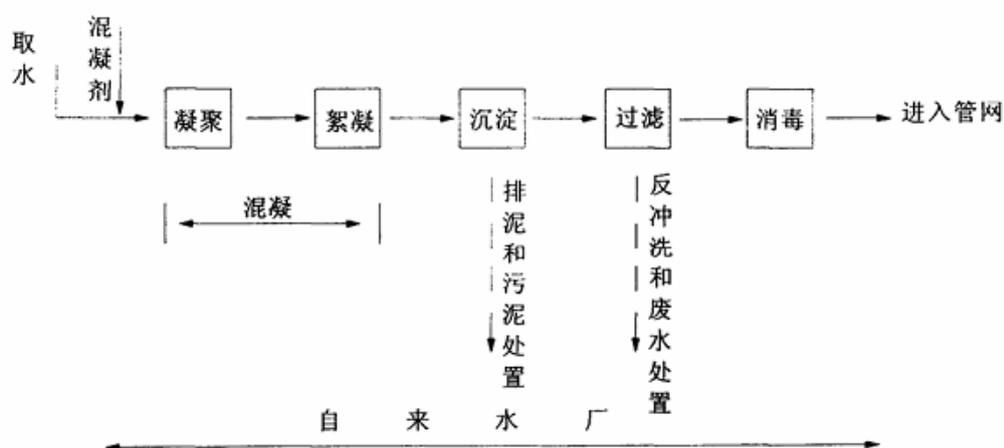


图 1-1 给水处理常规工艺示意图

在这样一系列的过程中，混凝、沉淀和过滤是至关重要的步骤，在这三者中沉淀过程是大量去除水中悬浮物和杂质的重要过程。沉淀过程的好坏直接关系到整个水处理工艺的优劣。沉淀过后出水浊度的高低，对后续过滤过程影响很大，沉淀过后出水浊度较大将加重过滤的负荷，导致经济成本的提高和出水效果的不理想；若沉淀效果良好，大量的悬浮物和杂质在沉淀中被去除，这样就能提高出水质量，降低成本。

沉淀池是水处理流程中一个必不可少的重要环节，水处理厂的总投资中约有 25% 用于沉淀池，其设计好坏将直接影响到水处理系统的成败。目前，有关沉淀池的设计原理主要还是依据理想沉淀池的三条假定，忽略了水流流态对沉淀池的影响，具有较大的主观性。因此，使有些沉淀池在实际运行过程中达不到预期的处理效果，有必要做进一步的研究。

1.2 沉淀工艺及构筑物的现状

1.2.1 沉淀理论研究

在水处理中，根据悬浮液中固体的浓度和颗粒特性，悬浮固体的分离沉降可以分为以下几种基本形式^[2]：

(1) 分散颗粒的自由沉降

当颗粒浓度较低或者不具有絮凝性能，也就是颗粒相互接触后不产生聚集，沉淀属于分散颗粒的自由沉降。此时颗粒在其沉降过程中沉速将不会发生变化，颗粒所交换的液体，在上升时不造成对其他颗粒沉速的影响。水处理中低浓度的除砂和预沉属于这种类型。在重力场中，颗粒受到重力作用而下沉，同时受到液体浮力以及颗粒下沉时液体对颗粒的摩擦阻力作用。当这些作用力达到平衡时，颗粒将以等速下沉，此时的沉降速度称为稳定沉速。当颗粒为球形时，其沉降速度为：

$$u_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} d} \quad (1-1)$$

式中， u_s ——颗粒的沉速，m/s；

d ——颗粒的直径，m；

g ——重力加速度，m/s²；

C_D ——阻力系数；

ρ 、 ρ_s ——颗粒和液体的密度，kg/m³。

由实验可知，阻力系数(C_D)与雷诺数(Re)有关，也就是说，阻力系数(C_D)随着沉降阻力中粘滞力与惯性力的作用大小而有所区别。对于不同的雷诺数(Re)，可以采用不同的公式进行计算。

(2) 絮凝颗粒的自由沉降

在混凝沉淀池中悬浮物大多具有絮凝性能，因而其沉降不再像分散颗粒那样保持沉速不变。当颗粒碰撞而聚集后，其沉速加快。大多数混凝沉淀都属于这一种，对于絮状结构颗粒沉速的研究目前还不多见。丹保宪仁利用沉降管和摄影的方法，对絮凝颗粒的粒径、有效密度和沉速进行了测定，并建立了絮凝颗粒的密度公式。

(3) 拥挤沉降

当颗粒浓度增加时，颗粒间的间隙相应减小，颗粒下沉所置换的液体体积的上涌将对周围颗粒的下沉产生影响。颗粒的实际沉降速度将是由自由沉降时的沉速减去液体的上涌速度。当颗粒浓度不太高时，只使得沉淀速度产生一定的降低，颗粒还可保持个别的沉速形式。随着颗粒浓度的继续增大，经过一段时间的平衡，沉速较快的颗粒沉至下层，相应增加了下层的浓度，使下层的上涌速度加大，最终使悬浮液的全部颗粒以接近相同的沉速下沉，形成界面形式的沉降，故又称作层状下降。水处理中高浊度水的沉淀以及澄清池中澄清水和泥渣的分离都属于这一类。拥挤沉降时单位颗粒的沉速将小于同一颗粒在自由沉降时的沉速。此时的沉降速度为：

$$u'_s = \beta u_s \quad (1-2)$$

式中， β ——沉速降低系数($\beta < 1$)。

许多学者认为，拥挤沉降中的沉降减低系数应为体积浓度的函数。

(4) 压缩沉降

压缩沉降液称为污泥的浓缩。当沉降颗粒积聚在沉淀池的底部后，先沉降的颗粒将承受上部沉积污泥的重量。颗粒间的空隙水将由于压力增加和结构的变形而被挤出，使污泥的浓度提高。因此污泥的浓缩过程也是不断排出空隙水的过程。各种污泥浓缩池及沉淀池积泥区的污泥浓缩均属于这一类。

关于压缩沉降的计算，常以 Kynch 沉淀理论为基础。Kynch 沉淀理论的基本假设为：①悬浮固体层的任何水平面内固体的浓度是均匀的，且颗粒以相同的沉速下沉；②颗粒的沉速只是其所在位置处颗粒浓度的函数，即 $u=f(C)$ ；③整个沉降高度的初始浓度分布是均匀的，或者是沿着沉降深度逐渐增加。根据上述假设，Kynch 建立了高度为 h 处的颗粒运动应符合：

$$u = \frac{dh}{dt} = \frac{d\Phi}{dC} \quad (1-3)$$

式中， u ——固体颗粒的下沉速度，m/s；
 h ——颗粒所处的高度，m；
 Φ ——固体颗粒通量， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

C ——固体颗粒浓度， kg/m^3 。

1.2.2 沉淀池种类介绍

沉淀池根据具体布置可以设计成多种形式：

(1) 竖流式沉淀池

在 20 世纪 50 年代设计的小型水厂中有不少采用了竖流式沉淀池。这种沉淀池效果较差，目前已不选用。原有的竖流沉淀池也被改造为各种类型的澄清池。

(2) 辐流式沉淀池

普通辐流式沉淀池呈圆形或正方形，直径(或边长)6m—60m，最大可达 100m，池周水深 1.5m-3.0m。用机械出泥，池底坡度大于 0.05，其构造为中心进水，周边出水，中心转动排泥。为了使布水均匀，进水管设穿孔挡板，穿孔率为 10%-20%，出水水堰采用锯齿堰，堰前设挡板，拦截浮渣。

(3) 平流式沉淀池

平流式沉淀池是水厂设计中应用较早也是较普遍的一种沉淀形式，它既可以用作滤前沉淀处理，也可用作预沉或终沉淀处理。主要特征是构造简单，池深较浅，造价低，沉淀效果稳定，操作管理方便。主要缺点是平面面积较大，池深较浅，因而常限制后续滤池的选用。

平流式沉淀池一般适宜用作大、中型水厂的混凝沉淀，尤以大型水厂更为经济、合适。对于沉淀最终处理的工业用水，常可根据出水水质的要求来控制投加量，节省药耗。

(4) 气浮池

气浮池在国外已有一定的历史，在国内该技术应用还不是十分普遍，从 20 世纪 70 年代起，苏州、昆明、武汉等地先后应用了气浮池进行处理，为气浮池的应用积累了经验。气浮池由于需要投加空气，要有一套相应的配套设施，因而设备较多，耗电量较高。

(5) 斜板(管)沉淀池

斜板(管)沉淀池是把与水平面成一定角度的众多斜板(管)放置于沉淀池中构成，水从下往上流动(也有从上往下流动，或水平方向流动的)，颗粒则沉于斜板(管)底部或中部当颗粒积累到一定程度时，便自动滑下。

1.2.3 沉淀池的发展

在20世纪60年代以前主要采用平流式、竖流式和辐流式沉淀池，60年代起各种澄清池盛行一时；70年代后，主要是斜板、斜管及“复合型”的沉淀池。通常所见的污水处理厂中多使用平流式和辐流式沉淀池，而在给水处理中常使用斜管和平流式沉淀池，辐流式沉淀池则更多用于给水处理的预处理阶段。我国的济南和兰州等城市也将辐流式沉淀池应用于二次沉淀中。

沉淀构筑物形式的改进导致了沉淀效率的提高。通过研究分析，沉淀效率提高的原因可归结以下几点：

- (1) 沉淀面积增大，主要体现在斜板与斜管的运用上；
- (2) 水流流态的改变，其结果是导致了水流稳定性增强(体现在弗劳德数(Fr)的增大和雷诺数(Re)的减小上)；
- (3) 沉淀动力因素的增多(从单一依靠颗粒自身重力到综合利用重力、水流阻力和离心力等)。

纵览沉淀构筑物的历史，我们还可以发现：从最早的平流式沉淀池到20世纪70年代以后的斜板、斜管沉淀池，沉淀池的设计或开发都是在依靠颗粒矾花自身重力沉降的基础上围绕怎样增大沉淀面积和改变水流流态这两方面进行的。所以，目前的沉淀池基本上只满足了上述三点原因中的前两点。然而，第三点原因才是影响沉淀效率的主要原因，因为力的大小、多少才是决定颗粒沉速快慢、除去效率高低的决定性因素，但是目前在这方面的研究比较少。

1.3 沉淀池数值模型的研究现状

在数值模拟方面，自从1982年Harvey第一次将计算流体力学(CFD)引入到搅拌槽内二维流动场的预测开始，对搅拌槽内流动特性的数值模拟研究就已经迅速地发展起来。从二维数值模拟到三维数值模拟，从单相流到多相流，国内外研究者针对不同的沉淀池条件进行了大量的数值模拟研究^[2]。

1.3.1 国外学者对污水处理厂沉淀池的数值模拟研究

国外对沉淀池流场的研究比较早，始于20世纪80年代。瑞典Larsen可能是最早将CFD应用于二沉池的，尽管他对模型进行了简化，但是仍然发现了“密度流”的存在^[3]。Devantier和Larock通过Galerkin有限元法来模拟圆形二次沉淀池中的稳态

二维流体。他们主要研究了沉淀池内部的沉积所导致的密度流，但是没有研究沉淀池入口区域的流场。在他们建立的模型中，采用了改进的k- ϵ 紊流模型，该模型通过大量的计算来保证对流场进行良好的紊流预测。该研究的不足之处是，建立的综合模型仅能对低固体负荷情况进行模拟，且入流悬浮固体浓度最大值被限定在1400mg/L，这是由于计算过程非稳定性所导致的，这种非稳定性可以通过网格的细分来解决，但是高精度的网格会导致运算量大增，这就对计算机硬件有所要求，由于我们目前所使用的计算机的物理内存有限，所以无法实现对高浓度负荷情况下的模拟。1998年，德国的Deininger等人对辐流式沉淀池的流速和固体沉降进行了数值模拟研究，他们创建了两相三维模型来研究流场状态^[4]。Scott A. Wells 和David M. LaLiberte进行了辐流式沉淀池中密度流状态的数值模拟，1998年，Scott A. Wells 和David M. LaLiberte就三个敞口辐流式沉淀池中水温梯度对密度流的影响进行了研究^[5]。

2006年，法国新奥尔良大学的McCorquodale等人利用二维CFD模型对矩形二沉池进行了水力特性研究，他们利用CFD对二维非稳定流函数-涡量方程进行了求解。经过对二沉池中的流速和固体分布的模拟发现，在二沉池入口处设置穿孔挡板可加快絮凝物的沉降速度。McCorquodal等人通过研究发现，CFD数值模拟在优化沉淀池设计以及提高其沉淀性能方面非常有用^[6]。同年，西班牙的By Barry Wroff利用CFD模拟了设置了双挡板的辐流式沉淀池的流场。

2007年，威立雅环境研究发展中心的Benedek Gy.Plo'sz等人对配置了去除污泥吸提系统的平底辐流式沉淀池进行了一维数值模拟。他们发现，(1)利用一维沉淀池模型包括对澄清区固相的分散、仿真都会使出水固体浓度和污泥床高度恶化；(2)在一维沉淀池模型中，入流层应该设置在浓度高于进水的上一层的上面，并且入流层的极限深度应该严格控制在整个沉淀池深度的53%；(3)尽管离散模型可以解释沉淀池浓缩过程中流动条件的影响，但是通过对广泛的流动条件的调查发现，文献中对于相互关联性的评估是极其有限的^[7]。同时，Michael Weiss、Benedek Gy.Plosz 和Gyriil Printemps等人又将CFD用于模拟平底辐流式沉淀池中的活性污泥的沉降规律，他们发现，污泥床中的污泥粘度决定了活性污泥的流动和沉降速率^[8]。

2009年，英国伯明翰大学土木工程学院的J.Bridgeman等人通过分析湍流耗散率，清楚地阐明了CFD在湍流池中的应用好处。CFD分析表明，当实验罐状容器中的流体以相同的速度混合时，尽管其分布不均匀，但方形容器中产生的湍流耗散率

要明显高于圆形容器的。对于大规模机械絮凝池，研究显示，改变流量只对分配速度梯度值产生很小影响，改变搅拌速度对其速度梯度分布没有产生重大影响。对于液压絮凝池，在挡板中的絮凝单元中存在大的回流区和死区^[9]。

1.3.2 国内学者对污水处理厂沉淀池的数值模拟研究

随着我国科学技术水平的不断提高，国内许多学者也开始利用数值模拟技术对二沉池内的污泥浓度、水流等进行模拟研究，更将其应用于二沉池的结构设计优化，通过优化模型求得最佳的沉淀池设计尺寸。

湖南大学环境科学与工程系的曾光明等人早在 2002 年就以典型城市污水处理厂平流矩形沉淀池速度和浓度分布计算为例，利用涡量一流函数法建立控制方程，并以有限差分法中的控制容积法对方程进行了离散，求出速度分布场后，利用二维浓度迁移方程对沉淀池浓度分布进行了计算。通过与实验数据的对比，验证了方法的有效性与可行性。另外还对沉淀池数值模拟的应用进行了初步探索^[10]。但是他们并没有真正使用数值模拟方法计算沉淀池的流态等，只是对其进行了数学方法的计算求解。

2003 年，东华大学环境学院的郭生昌等应用大型通用计算软件 Fluent 6.0 版本中的“多相欧拉模型”的原理，在动量方程中考虑了曳力、虚质量力、浮力的作用，对平流式沉淀池在不同挡板长度、挡板位置、颗粒尺寸、流量下的流场和浓度场进行了详细计算和分析，为充分了解沉淀池的流态、沉淀池内部悬浮颗粒物的沉淀运动规律优化沉淀池的工程设计，达到工程经济和社会效益的统一提供了充分的依据^[11]。

2005 年，同济大学环境科学与工程学院的屈强等利用 $k-\varepsilon$ 两方程紊流模型，采用 SIMPLEC 求解方法，借助大型流体力学软件 FLUENT 对折流式沉淀池内二维单相流速度场进行了数值模拟，表明池内存在着短流和较大的死区，改造成相同尺寸的平流式沉淀池后，短流减少，死区减小，容积利用率增加。但是他并没有考虑悬浮物的影响，而且未对悬浮物进行模拟^[12]。

2006 年，清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室的肖尧等用数值模拟的方法准确描述城市污水处理厂二沉池中的流态及固相的分布，与其他常用于对二沉池进行数值模拟的经验模型、固体通量模型等相比，计算流体力学(CFD)模型在精度上具有明显优势。以基于计算流体力学的商用软件 FLUENT 为工具，用欧拉-拉

格朗日和欧拉-欧拉方法对辐流式二沉池的流态，尤其是固相行为和分布进行了模拟研究。结果表明，固相颗粒在二沉池中的行为和分布受颗粒的粒径、密度等自身属性以及漩涡等特殊流动现象的影响，呈现出不同于理想沉降理论的轨迹；颗粒粒径及密度越小，颗粒则越易受漩涡等的影响，沉淀池的泥水分离效果也就越差。将模拟结果与实际污水处理厂的数据对比，表明该模拟结果可靠，对工程实际具有一定的指导意义^[13]。

另外 2007 年，中国科学技术大学地球与空间科学学院七系的蒋成义等人对辐流式二沉池中异重流进行了计算流体力学模型的研究。他们采用多相流欧拉模型，标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Boussinesq 假设研究了二沉池中活性污泥和表面散热引起的异重流。表面散热的计算采用经验方程，将数值计算结果同实验结果作了比较，结果表明 CFD 模型能较好地预测辐流式二沉池的流场、温度场和污泥分布。研究还表明， $Fr_p^2 Gr / Re^2$ 表示了不均匀温度分布引起的浮升力与不均匀污泥分布引起的作用力的比值，用它可以判断两种作用力在异重流的形成当中的相对大小^[14]。

2008 年，中国市政工程西南设计研究院的白玉华等出了描述沉淀池内水流运动的控制方程，采用基于有限体积法求解原理的商用软件 FLUENT6.1 求解了 $k-\varepsilon$ 双方程模型，速度与压强解耦采用了 SIMPLE 算法，计算结果与已验证的其它模拟资料吻合良好。基于 Fluent 平台可以进行二次程序开发，如进一步加入沉降模型，而水动力学计算是进行后序工作的基础，指出了基于 Fluent 进行平流式沉淀池流速场模拟的准确可靠性。计算结果表明池内存在两处死水区：在挡板后存在一个较大的回流区，该处的漩涡逆时针旋转；另一个回流区在出水堰底板附近，该处的漩涡顺时针旋转^[15]。

2009 年，哈尔滨工业大学的刘百仓等人为了了解圆形沉淀池内水流在无温差及存在温度差时的特点，建立了描述圆形沉淀池内水流运动的 $k-\varepsilon$ 双层湍流数学模型，采用交错网格系统，压力与速度解耦时采用了 SIMPLE 方法，控制方程的求解方法为混合有限分析解法。对中心进水周边出水圆形沉淀池的模拟结果表明，所建立数学模型的模拟结果与文献资料吻合良好。在无温差且低污染物浓度 $<150-200\text{mg/L}$ 时，池内存在一个很大的回流区；低温水进入高温水池时，常会产生异重流现象；高温水进入低温水池时，会产生浮力流现象^[16]。

以上都是基于二维沉淀池的 CFD 数值模拟，天津大学环境科学与工程学院的王晓玲等人于 2007 年建立了平流式沉淀池水流的三维两相流模型，在动量方程中考

虑了相间界面力的作用，以及悬浮物体积分数和两相间密度差的影响；应用计算流体力学软件STAR-CD对模型进行求解。结果表明，沉淀池内宽度方向速度分布是非均匀的；进水口下方和污泥斗上方存在回流区；进水区水流湍动能较大，而沉淀区内很小；同时比较了出水口处是否设置挡板以及挡板深度对流场的影响。对实验结果进行验证，流场模拟值与实验值吻合很好^[17]。

1.3.3 国内外学者对饮用水处理厂沉淀池的数值模拟研究

虽然，许多学者已经将 CFD 数值模拟应用到了污水处理中的沉淀池中描述其水流和固体的去除效果等，然而在饮用水处理的沉淀池中使用 CFD 模拟的研究却少之又少，尤其在国内对这方面的研究更少。

2004 年，法国的O.FLAMANT等人对常规的饮用水处理厂沉淀池中的污泥沉淀进行了CFD数值模拟，他们用有限差分法和试验方法对水平对流方程进行了求解，为了获得沉淀池内部的整个流场状态，他们利用PIV技术对流速进行了测定^[18]。

2006 年，多伦多大学土木工程系的M.R.Templeton, R.Hofmann等人利用CFD模拟和全面示踪试验(使用钡或氟)研究了加拿大三座水处理厂沉淀池挡板的影响。研究表明，CFD模拟可以可靠地替代示踪测试以确定水力停留时间，从而可以提供更好地预测化学消毒和消毒副产物的形成的性能^[19]。

2007 年，希腊亚里士多德大学化学学院化学技术司的Athanasia M. Goula等人将CFD用于评定进水水温变化对于饮用水处理沉淀池中污泥沉降的影响。结果表明，当进水温度升高时，沉淀池中有一个上升的浮力羽，它使环流从顺时针变成逆时针旋转。表面流体浓度高于出水流，致使颗粒物仍然处于悬浮状态。这一过程将使粒径为 250 毫米的颗粒去除率从 99.5%降到 76.0%。由于暖水不断涌进沉淀池，从而使得温度差减小，对流减弱沉淀效率开始增加。因此，仅仅 1.1 摄氏度的温度差异就足以引起温度异重流，从而在二沉池中产生短回流区^[20]。

此外Athanasia M. Goula等人还更加详细地对饮用水处理厂辐流式二沉池的设计进行了CFD模拟，主要是研究了入水口处控制挡板的影响^[3]。他们研究了一个标准沉淀池和一个修正挡板后的沉淀池进行对比模拟分析。经研究发现，挡水板减小了进口回流区并加强了直接以高速进入沉淀池底部的固体的沉降速度。值得注意的是，即使是很小的颗粒速度差异，也足以引起颗粒沉降率的很大的变化；在他们的研究中，使用挡板后总的污泥去除率从 90.4%增加到了 98.6%。

总结以上可知，CFD 数值模拟在沉淀池中的应用如表 1-1 所示：

表 1-1 CFD 在沉淀池中的应用

池型	软件	维数	湍流模型	模拟内容	流体模型	结论	研究年份
平流式	FLUENT	2	标准 $k-\varepsilon$	流线和速度分布	单相流	池内存在两处死水区：在挡板后存在一个较大的回流区；另一处在出水堰板附近 ^[15] 。	2008(污水处理)
	STAR-CD	3	RNG $k-\varepsilon$	水流和悬浮物速度分布	两相流	沉淀池内宽度方向速度分布非均匀；进水区水流湍动能较大，而沉淀区内较小 ^[17] 。	2007(污水处理)
折流式	FLUENT	2	标准 $k-\varepsilon$	流场和速度分布	单相流	将折流式沉淀池改造成相同尺寸的平流式沉淀池后，短流减少，死区减小，容积利用率增加。但未考虑悬浮物的影响 ^[12] 。	2006(污水处理)
辐流式	SIMPLE	3	标准 $k-\varepsilon$	水温对流速的影响	单相流	在无温差时且低污染物浓度 $<150-200\text{mg/L}$ 时，池内存在一个很大的回流区；低温水进入高温水池时，常会产生异重流现象；高温水进入低温水池时，会产生浮力流现象 ^[16] 。	2009(污水处理)
	FLUENT	2	标准 $k-\varepsilon$	流场，固相行为和分布	两相流	固相颗粒在二沉池中的行为和分布受颗粒粒径、密度等自身属性以及漩涡等特殊流动现象的影响 ^[13] 。	2006(污水处理)
	FLUENT	2	标准 $k-\varepsilon$	异重流	多相流	CFD 模拟能较好地预测辐流式二沉池的流场、温度场和污泥分布 ^[14] 。	2007(污水处理)
	FLUENT	2	SST $k-\omega$	流场和固相颗粒分布	两相流	进水口控制挡板对沉淀池流场和固相沉降效率有很大的影响 ^[3] 。	2008(饮用水处理)

1.4 辐流式沉淀池的设计

1.4.1 辐流式沉淀池结构特点

如图1-2所示，辐流式沉淀池由进水管、出水管、沉淀区及排泥装置组成。沉淀池表面呈圆形，污水从池中心进入，呈水平方向向四周辐射流动，流速从大到小变化，污水中悬浮物在重力作用下沉淀，澄清水从池四周溢出。

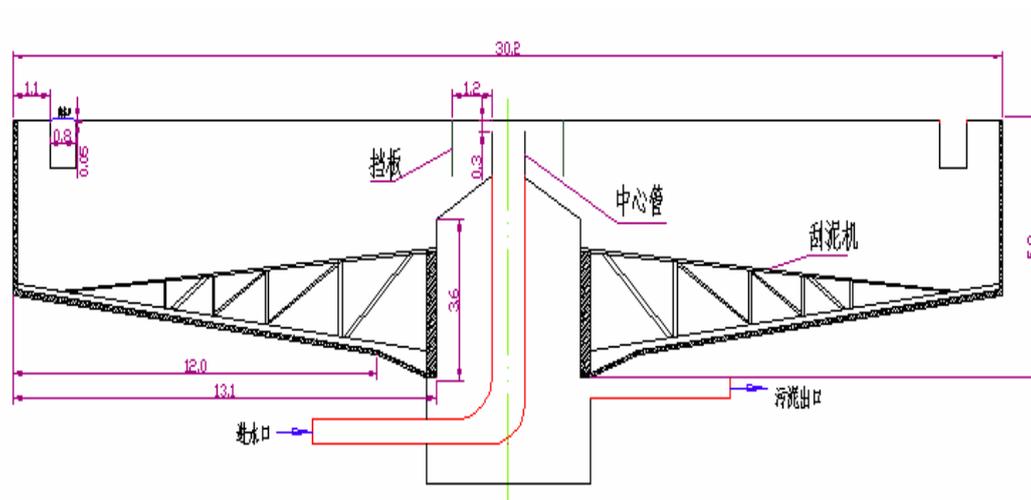


图1-2 辐流式沉淀池结构示意图

1.4.2 辐流式沉淀池结构设计与计算

(1) 沉淀区的计算：

沉淀池的表面积为

$$A_1 = \frac{q_{v,\max} t}{nq_0} \quad (\text{m}^2) \quad (1-4)$$

沉淀池的直径为

$$D = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi}} \quad (\text{m}) \quad (1-5)$$

沉淀池水深为

$$h_0 = \frac{q_{V,\max} t}{nA_1} \quad (\text{m}) \quad (1-6)$$

式中, $q_{V,\max}$ —— 最大时设计水量, m^3/h ;
 q_0 —— 沉淀池的表面负荷率, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
 n —— 设计池数;
 h_0 —— 沉淀区的有效深度, m ;
 t —— 沉淀时间, h , 一般采用 $1.5 \sim 2.0\text{h}$;
 A_1 —— 沉淀池的池面面积, m^2 ;
 D —— 沉淀池的直径, m 。

(2) 污泥区计算: 每日产泥量为

$$V_{\text{总}} = \frac{VNt}{1000} \quad (\text{m}^3) \quad (1-7)$$

式中, $V_{\text{总}}$ —— 贮泥期间产生的污泥总量, m^3 ;
 V —— 每个设计人口每日产生的污泥量, $\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$;
 N —— 设计人口数, 人;
 T —— 两次排泥的间隔时间, d 。

(3) 沉淀池的总高度(H)

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 \quad (1-8)$$

式中, h_1 —— 保护高度, 一般取 0.3m ;
 h_3 —— 缓冲层高, m ;
 h_4 —— 污泥斗以上部分的高度(与刮泥机械高度相关), m ;

h_5 —— 污泥斗高度，m。

1.5 本文研究内容

目前，对于沉淀池的工作机理主要还是基于理想沉淀池的假设：(1)水流沿着水平方向流动，在过水断面上各点流速相等，并在流动过程中始终相等；(2)悬浮颗粒处于自由沉淀状态，即在沉淀过程中，颗粒之间互不干扰，颗粒的沉速不变；(3)悬浮物一旦达到池底就认为被去除。国内现行的有关沉淀池的设计原理主要还是依据以上三条假定，这样就可以对悬浮物进行静态沉降试验，确定其截留沉速或停留时间。所以，一般在设计沉淀池的过程中，主要的控制指标是表面负荷和停留时间。然而在确定了主要的控制指标以后，在沉淀池的其它方面(如进水流速、挡板淹没深度、挡板位置等等)都没有具体的确定办法，只有供参考的取值范围，这样在设计时就只能采取经验方法，不易使结构最优化。

另外，沉淀池是基于理想假定情况下得到的模型，所以与实际工程中运行的工况存在一定差距。长期以来，都是通过建立实验模型或现场测试通过改变实验条件和实验参数来进行校核和优化。虽然结果比较可靠，但实验周期比较长，耗费也比较大，而且主、客观影响因素太多。更为重要的是，实验手段只能给我们一个宏观的结果，无法直观地看到沉淀池内部流场的形态。

本次毕业设计就是尝试将 CFD 技术应用到沉淀池结构设计的研究中来。利用商用软件 **Fluent** 对沉淀池进行固液两相流瞬态数值模拟，结合相关理论分析沉淀池内部流场特性，为沉淀池的设计和运行管理提供一些有益的参考依据。本论文工作的主要内容入如下：

(1) 在查阅大量中英文文献的基础上，全面了解辐流式沉淀池的结构及其内部流体流动的特点，以饮用水处理为背景，选择建立合适的计算流体动力学数值模拟用结构模型；

(2) 利用 **Fluent** 软件对辐流式沉淀池内的固液两相流动问题进行数值模拟，分析水流在沉淀池内的的流场和悬浮物的浓度场分布；

(3) 通过对不同工况的计算，分析沉淀池结构参数和颗粒粒径对流场的影响，为沉淀池结构优化提供依据。

具体的研究步骤如下：

(1) 以英文资料为主，进行文献检索；

- (2) 阅读并有针对性研究相关文献；
- (3) 整理思路，明确研究对象及目标；
- (4) 练习使用 Gambit 软件进行实体建模，并学习边界条件的设置；
- (5) 学习使用 Fluent 软件的使用，并掌握边界条件和求解条件的设置、计算结果的分析与显示方法；
- (6) 选择合适的结构尺寸参数，用 Gambit 软件进行二维实体建模；
- (7) 使用 Fluent 软件进行单相流体下的计算模拟，并设法对计算结果的正确性进行分析评估，必要时在 Gambit 下重新进行网格划分等工作，消除网格划分因素对计算结果的影响；
- (8) 使用 Fluent 软件进行两相流体下的计算模拟，掌握并能准确阐述实施多相流体数值模拟计算的要点；
- (9) 保持其它参数不变，改变网格划分模型、湍流模式、模拟方式等，进一步研究各种情况下的流场；进行挡板位置、挡板高度以及不同入流流速下的流场数值计算，并使用 Origin 软件绘制相关的变化曲线；
- (10) 利用 DPM 模型示踪不同粒径的固相颗粒在沉淀池中的运动轨迹；
- (11) 利用 DPM 模型示踪挡板位置、挡板长度以及入流流速对颗粒沉降的影响。

第二章 辐流式沉淀池 CFD 数值模拟基础

2.1 计算流体力学(CFD)基础知识

2.1.1 计算流体力学概述

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 是 20 世纪 60 年代起伴随计算机技术迅速崛起的学科。在经过半个世纪的迅猛发展后, 这门学科已相当成熟, 成熟的一个重要标志是近十几年来, 各种 CFD 通用性软件包陆续出现, 成为商品化软件, 为工业界广泛接受, 性能日趋完善, 应用范围不断扩大。各种 CFD 通用软件的数学模型的组成都是以纳维-斯托克斯方程组与各种湍流模型为主体, 再加上多相流模型、燃烧与化学反应流模型、自由面流模型以及非牛顿流体模型等。

通用 CFD 商业软件自 1981 年英国的 CHAM 公司推出求解流动与传热问题的商业软件 PHOENICS 以后, 国际软件业中迅速形成了通称为 CFD 的软件产业市场。至今, 全世界已经约有 50 余种的流动与传热计算商业软件。常用的 CFD 软件^[21]见表 2-1。

表2-1 常用CFD软件

软件名称	主要应用
FLUENT	求解流动和传热问题的通用软件
PHOENICS	流动、传热和燃烧通用软件
CFX	流动和传热通用软件
STAR-CD	流动、传热和燃烧通用软件
NUMECA	流动、传热、多相流和化学反应等分析软件
Griden、Tecplot、 Pastran、Natrán、Gambit、EnSight	常用的 CFD 前后处理软件

CFD 软件结构包括三个组成部分: 前处理器、求解器、后处理器。其中, 前处理用于完成前处理工作 (建模、划分网格、设定边界条件等); 求解器的核心式数值

求解方案,常用数值求解方案有:有限差分、有限元素、谱方法和有限体积法;后处理器的目的是有效地观察和分析流动计算结果(矢量图、等值曲线等)。

近几十年来,CFD有了很大的发展,替代了经典流体力学中的一些近似计算法和图解法。过去的一些典型教学试验,如Reynolds实验,现在完全可以借助CFD手段在计算机上实现。所有涉及流体流动、热交换、分子运输等现象的问题,几乎都可以通过计算流体力学的方法进行分析和模拟。CFD不仅作为一个研究工具,而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、环境工程、食品工程、海洋结构工程、工业制造等领域发挥作用。CFD技术现已发展到完全可以分析三维粘性湍流及漩涡运动等复杂问题的程度。

2.1.2 计算流体力学的控制方程和求解过程

(1) 控制方程

流体流动受到三条基本的物理守恒定律的支配:质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。控制方程式这些守恒定律的数学描述^[21]。

①质量守恒方程,也称为连续方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2-1)$$

式中, ρ ——密度;

t ——时间;

u ——速度矢量;

$\operatorname{div}()$ ——散度。

②动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{u}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (2.2a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{u}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_y \quad (2.2b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \vec{u}) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (2.2c)$$

式中, p ——作用在流体微元上的压力;

u 、 v 、 w ——速度矢量 \vec{u} 分别在 x 、 y 、 z 上的分量;

$S_x = F_x + s_x$, $S_y = F_y + s_y$, $S_z = F_z + s_z$, 其中, F_x 、 F_y 、 F_z 是微元体上的体力, 一般来说 s_x 、 s_y 、 s_z 是相对的二阶小量, 对于粘性为常数的不可压缩流体来说, $s_x = s_y = s_z = 0$ 。动量守恒方程也称为纳维-斯托克斯方程。

③能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u} T) = \operatorname{div}\left(\frac{k}{c_p} \operatorname{grad} T\right) + S_T \quad (2.3)$$

式中, c_p ——比热容;

T ——温度;

k ——流体的热传导系数;

S_T ——流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转化为热能的部分, 有时简称为粘性耗散项。

(2) 求解过程

CFD的求解过程为了进行CFD计算, 用户可借助商用软件来完成所需要的任务, 也可自己直接编写计算程序。两种方法的基本工作过程是相同的, 无论是流动问题、传热问题, 还是污染物的运移问题, 无论是稳态问题, 还是瞬态问题, 其求解过程都可用图2-1表示^[20]。

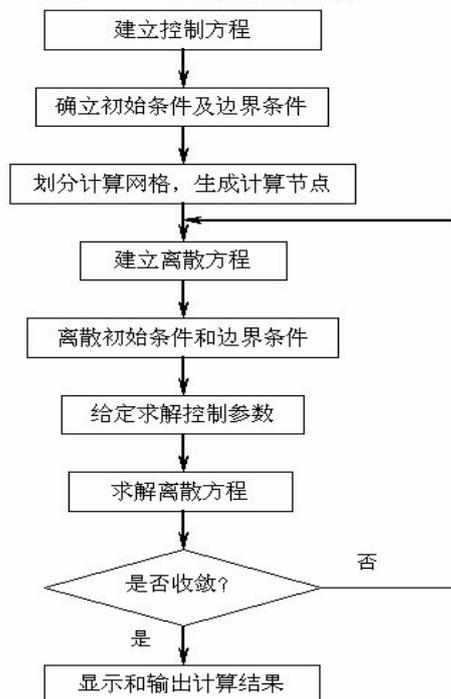


图2-1 CFD求解流程图

①建立控制方程

建立控制方程，是求解任何问题前都必须首先进行的。一般来讲，这一步是比较简单的；因为对于一般的流体流动而言，可根据流体动力学的分析直接写出其控制方程。例如，对于水流在水轮机内的流动分析问题，若假定没有热交换发生，则可直接将连续方程与动量方程作为控制方程使用。当然，由于水轮机内的流动大多是处于湍流范围，因此，一般情况下，需要增加湍流方程。

②确定边界条件与初始条件

初始条件与边界条件是控制方程有确定解的前提，控制方程与相应的初始条件、边界条件的组合构成对一个物理过程完整的数学描述。

初始条件是所研究对象在过程开始时刻各个求解变量的空间分布情况。对于瞬态问题，必须给定初始条件。对于稳态问题，不需要初始条件。

边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或其导数随地点和时间的变化规律。对于任何问题，都需要给定边界条件。例如，在锥管内的流动，在锥管进口

断面上，我们可给定速度、压力沿半径方向的分布，而在管壁上，对速度取无滑移边界条件。对于初始条件和边界条件的处理，直接影响计算结果的精度。

③划分计算网格

采用数值方法求解控制方程时，都是想办法将控制方程在空间区域上进行离散，然后求解得到离散方程组。要想在空间域上离散控制方程，必须使用网格。现已发展出多种对各种区域进行离散以生成网格的方法，统称为网格生成技术。

不同的问题采用不同数值解法时，所需要的网格形式是有一定区别的，但生成网格的方法基本是一致的。目前，网格分结构网格和非结构网格两大类。简单地讲，结构网格在空间上比较规范，如对一个四边形区域，网格往往是成行成列分布的，行线和列线比较明显。而对非结构网格在空间分布上没有明显的行线和列线。

对于二维问题，常用的网格单元有三角形和四边形等形式；对于三维问题，常用的网格单元有四面体、六面体、三棱体等形式。在整个计算域上，网格通过节点联系在一起。目前各种 CFD 软件都配有专用的网格生成工具，如 FLUENT 使用 GAMBIT 作为前处理软件。多数 CFD 软件可接收采用其他 CAD 或 CFD/FEM 软件产生的网格模型。如 FLUENT 可以接收 ANSYS 所生成的网格。当然，若问题不是特别复杂，用户也可自行编程生成网格。

④建立离散方程

对于在求解域内所建立的偏微分方程，理论上是有真解（或称精确解或解析解）的。但由于所处理的问题自身的复杂性，一般很难获得方程的真解。因此，就需要通过数值方法把计算域内有限数量位置（网格节点或网格中心点工仁的因变量值当作基本未知量来处理，从而建立一组关于这些未知量的代数方程组，然后通过求解代数方程组来得到这些节点值，而计算域内其他位置上的值则根据节点位置上的值来确定。

由于所引入的应变变量在节点之间的分布假设及推导离散化方程的方法不同，就形成了有限差分法、有限元法、有限元体积法等不同类型的离散化方法。

在同一种离散化方法中，如在有限体积法中，对对流项所采用的离散格式不同，也将导致最终有不同形式的离散方程。

对于瞬态问题，除了在空间域上的离散外，还要涉及在时间域上的离散。离散后，将要涉及使用何种时间积分方案的问题。

⑤离散初始条件和边界条件

前面所给定的初始条件和边界条件是连续性的，如在静止壁面上速度为 0，现在需要针对所生成的网格，将连续型的初始条件和边界条件转化为特定节点上的值，如静止壁面上共有 90 个节点，则这些节点上的速度值应均设为 0。这样，连同所建立的离散的控制方程，才能对方程组进行求解。

在商用 CFD 软件中，往往在前处理阶段完成了网格划分后，直接在边界上指定初始条件和边界条件，然后由前处理软件自动将这些初始条件和边界条件按离散的方式分配到相应的节点上去。

⑥给定求解控制参数

在离散空间上建立了离散化的代数方程组，并施加离散化的初始条件和边界条件后还需要给定流体的物理参数和湍流模型的经验系数等。此外，还要给定迭代计算的控制精度、瞬态问题的时间步长和输出频率等。

在 CFD 的理论中，这些参数并不值得去探讨和研究，但在实际计算时，它们对计算的精度和效率有着重要的影响。

⑦求解离散方程

在进行了上述设置后，生成了具有定解条件的代数方程组。对于这些方程组，数学上已有相应的解法，如线性方程组可采用 Gauss 消去法或 Gauss-seidel 迭代法求解，而对非线性方程组，可采用 Newton-Raphson 方法。在商用 CFD 软件中，往往提供多种不同的解法，以适应不同类型的问题。这部分内容，属于求解器设置的范畴。

⑧判断解的收敛性

对于稳态问题的解，或是瞬态问题在某个特定时间步上的解，往往要通过多次迭代才能得到。有时，因网格形式或网格大小、对流项的离散插值格式等原因，可能导致解的发散。对于瞬态问题，若采用显式格式进行时间域上的积分，当时间步长过大时；也可能造成解的振荡或发散。因此，在迭代过程中，要对解的收敛性随时进行监视，并在系统达到指定精度后，结束迭代过程。

⑨显示和输出计算结果

通过上述求解过程得出了各计算节点上的解后，需要通过适当的手段将整个计算域上的结果表示出来。这时，我们可采用线值图、矢量图、等值线图、流线图、云图等方式对计算结果进行表示。

所谓线值图，是指在二维或三维空间上，将横坐标取为空间长度或时间历程，将纵坐标取为某一物理量，然后用光滑曲线或曲面在坐标系内绘制出某一物理量沿空间或时间的变化情况。矢量图是直接给出二维或三维空间里矢量（如速度）的方向及大小，一般用不同颜色和长度的箭头表示速度矢量。矢量图可以比较容易地让用户发现其中存在的漩涡区。等值线图是用不同颜色的线条表示相等物理量（如温度）的一条线。流线图是用不同颜色线条表示质点运动轨迹。云图是使用渲染的方式，将流场某个截面上的物理量（如压力或温度）用连续变化的颜色块表示其分布。

现在的商用 CFD 软件均提供了上述各表示方式。用户也可以自己编写后处理程序进行结果显示。

2.1.3 FLUENT 软件模型

FLUENT是目前国际上比较流行的商用CFD软件包，在美国的市场占有率为60%。凡是跟流体、热传递及化学反应等有关的工业均可使用。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能，在航空航天、汽车设计、石油天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。其在石油天然气工业上的应用包括：燃烧、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚积、多相流、管道流动等等。Fluent的软件设计基于CFD软件群的思想，从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，采用不同的离散格式和数值方法，以期在特定的领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合，从而高效率地解决各个领域的复杂流动计算问题。

对于液相湍流的模拟，Fluent软件提供了一系列比较完整的湍流模型，可供不同要求问题的选择。其中在Fluent6.1版本中包括的一方程模型有Spalart-Allmaras模型，两方程模型有k- ϵ 模型、k- ω 模型、完全雷诺应力模型(RSM)以及大涡模型(LES)。以上这几种湍流模型对于计算机的内存以及时间的消耗按顺序增加。

对于两相流，Fluent提供了几种模拟的方法供选择，包括Eulerian-Eulerian方法和Eulerian-Lagrangian方法。其中Eulerian-Eulerian方法，又包括以下三种模型：VOF模型、Mixture模型和Eulerian模型^[22]。

2.1.4 利用 FLUENT 的优势

Fluent具有较强的计算通用性与丰富的显示功能，对工程应用灵活方便，主要表现为^[2]：

(1) 它可以分析沉淀池内部难以解决的复杂的流体湍流流动问题，以及受实验条件和测试手段限制而使实验难以实现的流场研究问题；

(2) 可以对各种几何结构、各种流动介质的工程实例问题进行模拟计算，且输入的各种条件简单易懂，便于工程人员的实际应用；

(3) 软件的计算和丰富的显示功能，能输出两相流的分布云图、各个不同位置的体积比(浓度)、速度矢量图和流函数图等等。同时在计算机屏幕上可以形象的显示出各个物理量在模拟对象内的分布；

(4) 拥有先进的前处理软件Gambit和后处理软件Tecplot，可以方便的进行建模和模拟资料处理。

利用Fluent软件各种强大的功能，就可以不必花费许多精力去编制这类程序而将重点放在针对沉淀池的优化上面来。可以这么说，利用现成的商业软件进行数值模拟在工程应用领域是一个很有发展前景的方向，它将成为越来越多研究者解决实际工程问题的一个有效手段。

2.2 利用 GAMBIT 建模

2.2.1 几何模型的选取

本文选用希腊亚里士多德大学Athanasia M等人研究的萨洛尼卡市饮用水处理厂的辐流式沉淀池模型，该池半径为15.1m，池深5.9m，池底坡度为0.05，总体积为2960m³，该池简化模型如图2-2所示。

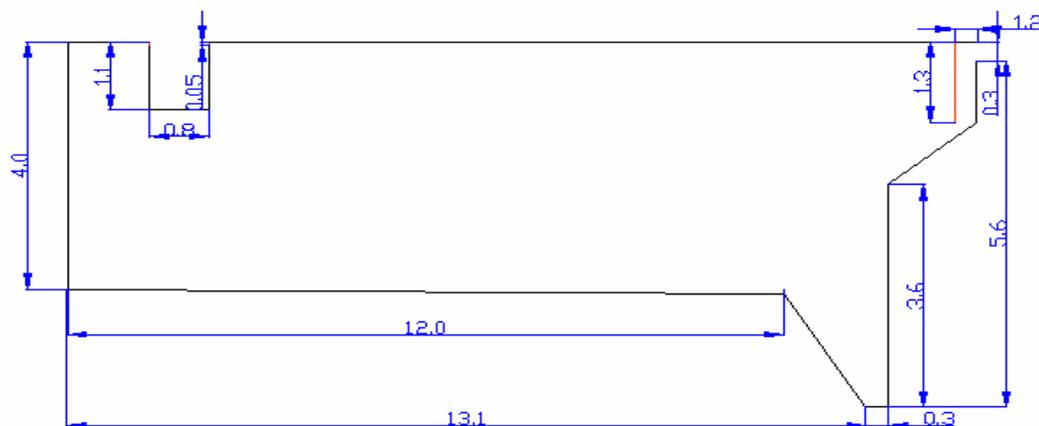


图2-2 辐流式沉淀池简化模型

经过反复的计算以及和外文参考文献进行比较发现，如果将对称轴设定为y轴，那么计算结果与文献不符，因此选择x轴作为对称轴，如图2-3所示。

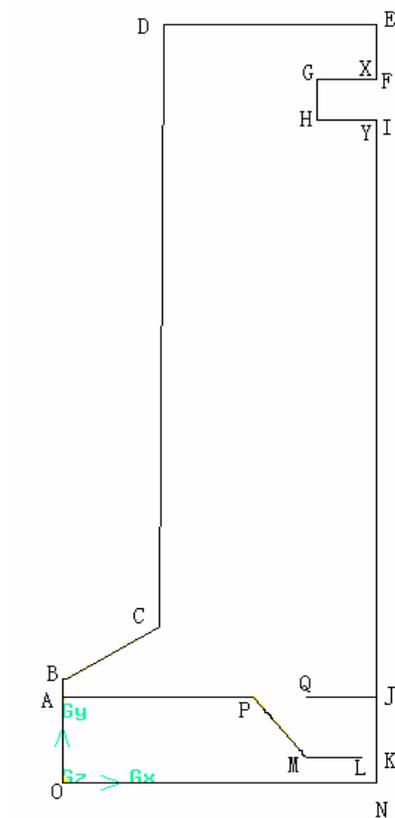


图2-3 以x轴为对称轴的沉淀池模型示意图

2.2.2 网格的划分

网格划分的工作可分为三个步骤：一是建立模型，二是划分网格，三是定义边界。从严格意义上讲，结构化网格是指网格区域内所有的内部点都具有相同的毗邻单元；同结构化网格的定义相对应，非结构化网格是指网格区域内的内部点不具有相同的毗邻单元。网格的质量对于数值计算的正确性和稳定性起着非常重要的作用。因此经过反复尝试和试验比较，首先用Split命令对模型进行了区域的划分，如图2-4所示。

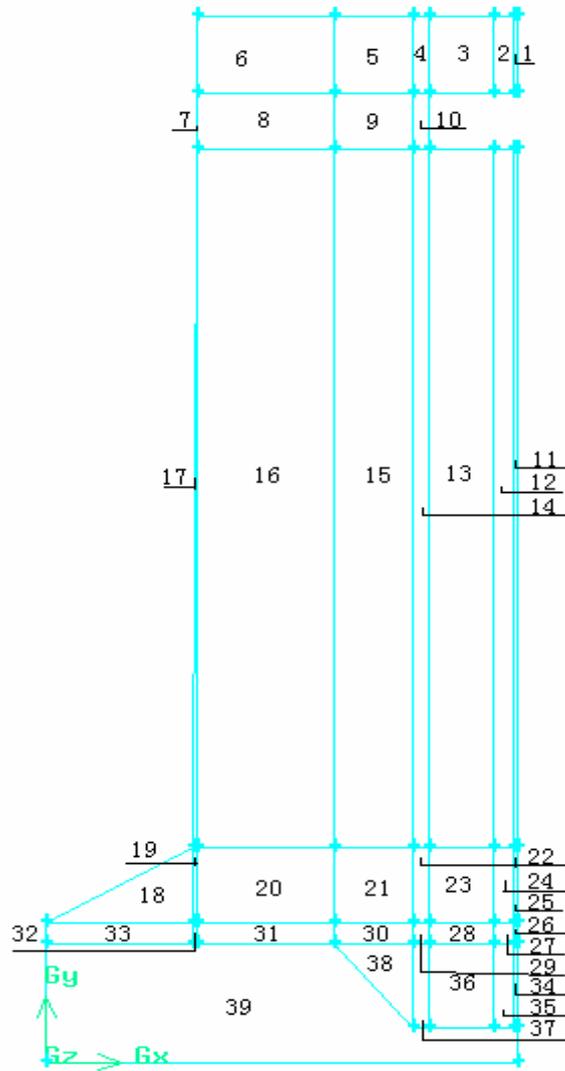


图2-4 辐流式沉淀池模型分割示意图

根据模型区域的特点，选择合适的网格，具体网格划分方法如表2-2所示。

2.2.3 边界条件的设定

所有的CFD问题都需要有边界条件，对于瞬态问题还要有初始条件。流场的解法不同，对边界条件和初始条件的处理方式也不一样。所谓边界条件，是指在求解域的边界上所求解的变量或其一阶导数随地点及时间变化的规律。只有给定了合适的边界条件，才能计算得出流场的解。因此，边界条件是使CFD问题有定界的必要条件，任何一个CFD问题都不可能没有边界条件。CFD模型中，基本的边界条件包

括：流动进口边界、流动出口边界、压力进口边界、压力出口边界、壁面边界、对称边界、周期性（循环）边界等。本模型的边界设定如表2-2所示。

表2-2 沉淀池模型在Gmbit中的条件设定

项目	设定的条件描述
Gambit 网格设置	Edge 5、13、27、30、42、55、60、62: double sided, Successive Ratio(Ratio1=Ratio2= 1.05), Interval size=0.08; Edge25和Edge36: Successive Ratio=1.05 (Invert), Interval size=0.02 Face1、2、11、12、24、25、26、27、34、35: Elements: Quad; Type: Map; Smoother: None; Interval size: 0.01 Face3、17、23、28、29、36、37: Elements: Quad; Type: Map; Smoother: None; Interval size: 0.02 Face4、5、6、7、8、9、10、13、14、15、16、33、19、30、31、32: Elements: Quad; Type: Map; Smoother: None; Interval size: 0.04 Face18: Elements: Tri; Type: Pave; Interval size: 0.02 Face20、21、22: Elements: Quad; Type: Map; Smoother: None; Interval size: 0.05 Face38: Elements: Tri; Type: Pave; Interval size: 0.01 81408cells, 152353 faces, 72487 nodes
典型的边界条件	Edge LK: Velocity Inlet; Edge YI: Pressure Outlet1; Edge XF: Pressure Outlet2; Edge ON: axis; Edge AB/BC/CD/DE/EF/XG/GH/HY/IJ/JK/JQ/LM/MP/PA: Wall

所得到的具体网格划分如图2-5所示：

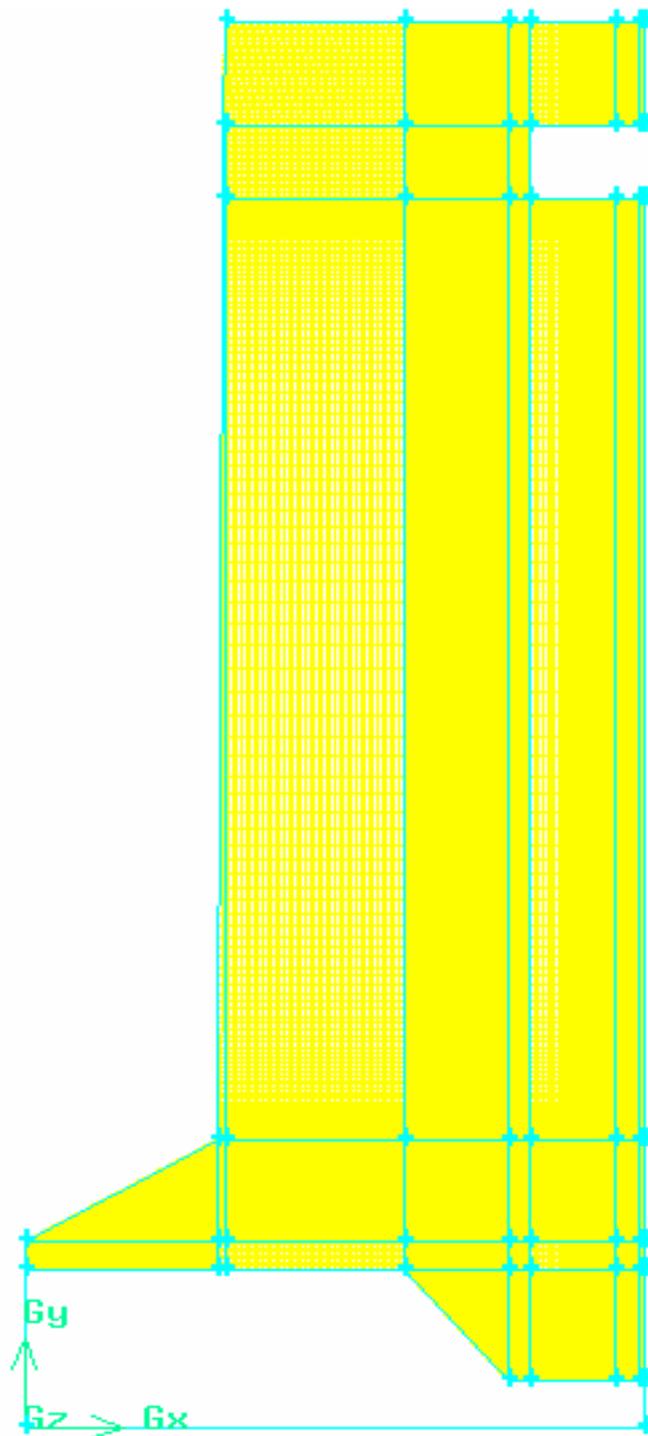


图2-5 辐流式沉淀池模型网格划分示意图

2.3 应用 FLUENT 进行求解

2.3.1 求解器的选择

FLUENT中有两种求解器，即分离求解器(segregated solver)和耦合求解器(coupled solver)。分离求解方法即分别求解各个控制方程的方法。图 2-6 为分离求解流程图。与分离算法分别求解各个方程相反，耦合算法同时求解连续方程、动量方程和能量方程。在上述流场控制方程被求解后，再求解湍流、辐射等方程，所用方法与分离算法中相同。图 2-7 为耦合求解流程图^[21]。

这两种求解器的求解对象是相同的，即它们所求解的控制方程均为描述质量守恒、动量守恒和能量守恒的连续方程、动量方程和能量方程。在考虑湍流和化学反应时，还要加上湍流方程和化学组元方程。它们都用有限体积法作为对计算对象进行离散求解的基础方法，有限体积法的主要工作包括：通过网格划分将空间区域分解成由离散的控制体组成的集合；在控制体上用积分形式构造离散变量的代数方程；将离散方程线性化，然后通过求解线性化方程获得变量的迭代解。

两种求解器的区别在于它们所使用的线性化方法和求解离散方程的方法是不同的。segregated solver 主要用于不可压缩或低马赫数压缩性流体的流动，coupled solver 最初用做高速可压流的计算。当前这两种解算方式都适用于大范围的流体计算(从不可压到高度可压)，但是 coupled solver 在高速可压流计算中具备一定的优势。

流体的控制方程是非线性方程，在数值求解过程中需要将非线性方程在网格单元中化为线性方程，然后再进行求解。所谓隐式格式和显式格式是对方程进行线性化和求解的两种不同方式。隐式格式将未知的流场变量(密度、速度、能量等)同已知量之间的关系用方程组的形式加以表达，然后通过求解方程组获得未知变量的值。显式格式则是将未知的流场变量写作已知量的显式函数形式，因此每个变量可以用一个方程单独进行求解。

基于以上两种求解器和显式隐式两种求解格式，FLUENT 有以下三种组合求解方法：

Segregated Solver: 该算法源于经典的 SIMPLE 算法。其适用范围为不可压缩流动和中等可压缩流动。这种算法不对 Navier-Stokes 方程联立求解，而是对动量方程进行压力修正。该算法是一种很成熟的算法，在应用上经过了很广泛的验证。

这种方法拥有多种燃烧、化学反应及辐射、多相流模型与其配合，适用于汽车领域的 CFD 模拟。

Coupled Explicit Solver: 这种算法由 FLUENT 公司与 NASA 联合开发，主要用来求解可压缩流动。该方法与 SIMPLE 算法不同，而是对整个 Navier-Stokes 方程组进行联立求解，空间离散采用通量差分分裂格式，时间离散采用多步 Runge-Kutta 格式，并采用了多重网格加速收敛技术。对于稳态计算，还采用了当地时间步长和隐式残差光顺技术。该算法稳定性好，内存占用小，应用极为广泛。

Coupled Implicit Solver: 该算法是其它所有商用 CFD 软件都不具备的。默认条件下，FLUENT 使用 segregated solver，但是高速可压流，具有强烈体积力(浮力，旋转力)的耦合流以及非常精细网格的流动，可以选择耦合隐式求解方法(coupled implicit solver)求解能量和动量方程。该算法也对 Navier-Stokes 方程组进行联立求解，由于采用隐式格式，因而计算精度与收敛性要优于 Coupled Explicit 方法，但却占用较多的内存(是非耦合求解迭代时间的 1.5-2.0 倍)。如果电脑内存不足，可以使用 segregated solver 或者 coupled explicit solver，但是 coupled explicit solver 需要更长的时间达到收敛。该算法另一个突出的优点是可以求解全速度范围，即求解范围从低速流动到高速流动。

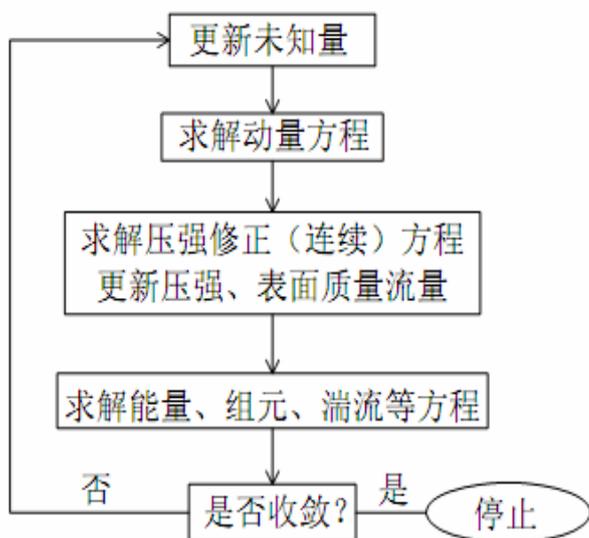


图 2-6 分离求解方法求解流程

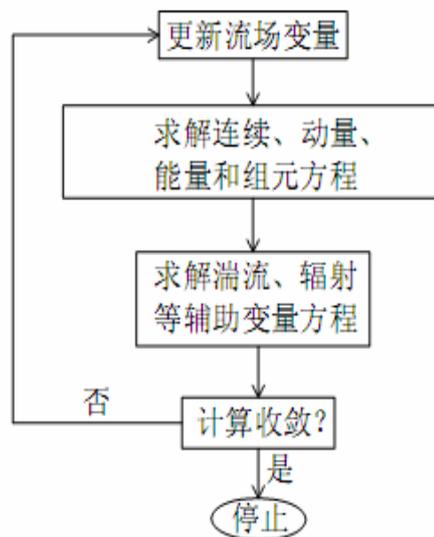


图 2-7 耦合求解方法求解流程

本模型采用非耦合定常隐式求解模型。

2.3.2 湍流模型的选择

FLUENT 中采用的湍流模拟方法包括 Spalart-Allmaras 模型、standard(标准) $k-\epsilon$ 模型、RNG(重整化群) $k-\epsilon$ 模型、Realizable(现实) $k-\epsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型、 $v2-f$ 模型、RSM(Reynolds Stress Model, 雷诺应力模型)模型和 LES(Large Eddy Simulation, 大涡模拟)方法。根据计算中使用的变量数目和方程数目的不同,湍流模式理论中所包含的湍流模型又被分为二方程模型、一方程模型和零方程模型(代数模型)等大类。

最早的 Spalart-Allmaras 模型是用于低雷诺数流计算的,特别是在需要准确计算边界层粘性影响的问题中效果较好。FLUENT 对 Spalart-Allmaras 进行了改进,主要改进是可以在网格精度不高时使用壁面函数。在湍流对流场影响不大,同时网格较粗糙时,可以选用这个模型。该模型是一种新出现的湍流模型,还未能成功地在工程中得到普遍应用。此外,同其它一方程模型一样,Spalart-Allmaras 模型的稳定性也比较差。

Fluent中包含标准和SST $k-\omega$ 两种模型。这两种模型有相似的形式,有方程 k 和 ω 。SST和标准模型的不同之处是:

- 从边界层内部的标准 $k-\omega$ 模型到边界层外部的高雷诺数的 $k-\epsilon$ 模型的逐渐转变
- 考虑到湍流剪应力的影响修改了湍流粘性公式

(1) 标准 $k-\omega$

标准 $k-\omega$ 模型是一种经验模型,是基于湍流能量方程和扩散速率方程。

标准 $k-\omega$ 模型的方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2.6)$$

式中, G_k ——由层流速度梯度而产生的湍流动能;

G_ω ——由 ω 方程产生的湍流动能;

- Γ_k 、 Γ_ω ——有效扩散项；
 Y_k 、 Y_ω ——由于扩散产生的湍流；
 S_k 、 S_ω ——用户自定义。

(2) SST k- ω 模型

SST k- ω 模型更适合对流减压区的计算。另外它还考虑了正交发散项，从而使方程在近壁面和远壁面都适合。

SST k- ω 模型流动方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.8)$$

式中， D_ω ——正交发散项。

2.3.3 控制参数的设置

将msh.文件导入Fluent中，进行网格检查后，最小单元体积为 $5.25202e-4m^3$ 。

(1) 材料和物相的设置：本文中设置连续相材料为Water-Liquid， H_2O ；

(2) 操作条件：考虑重力， $x=-9.8m^2/s$ ；

(3) 边界条件的设置：本文模型所采用的边界条件是速度入口和压力出口。根据模型的特点以及给定的数据，参数的设置选用湍流强度和湍流长度如表 2-3 所示。其具体设置如图 2-8 所示。

表 2-3 速度入口、压力出口边界条件参数设置

边界	湍流强度	湍流长度
速度入口	4.5%	0.3
压力出口 1	6%	0.05
压力出口 2	6%	0.05

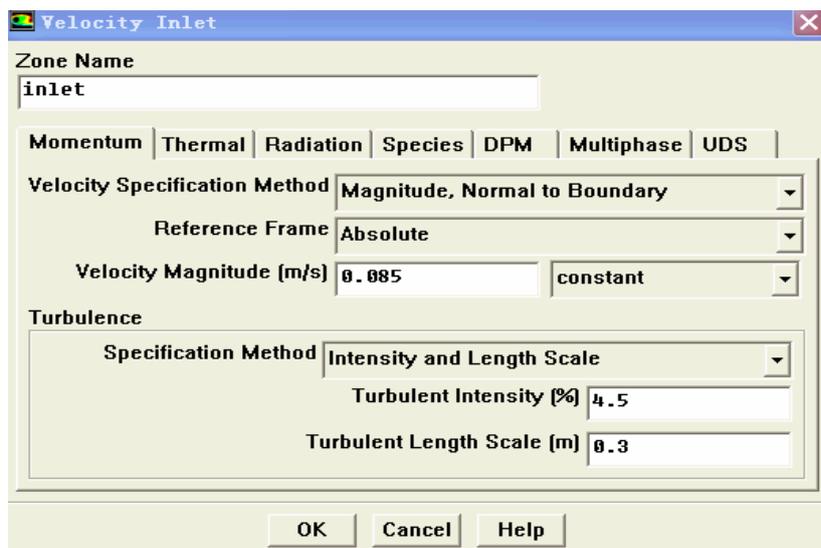


图 2-8 速度入口边界设置

(4) 求解控制的设置

分离算法中采用压强速度耦合算法进行计算，具体格式包括 SIMPLE、SIMPLEC 和 PISO 三种。

PISO 算法针对 SIMPLE 算法中每个迭代步获得的压强场与动量方程偏离过大的问题，在每个迭代步中增加了动量修正和网格畸变修正过程，因此虽然 PISO 在每个迭代步中的计算量大于 SIMPLE 算法和 SIMPLEC 算法，但是由于每个迭代过程中获得的压强场更准确，所以使得计算收敛得更快，也就是说获得收敛解需要的迭代步数大大减少了。PISO 格式通常被用于非定常计算，但是它也可以用于定常计算。

PISO 格式的另一个优势是可以处理网格畸变较大的问题。如果在 PISO 格式中使用邻近修正 (neighbor correction)，可以将亚松弛因子设为 1.0 或接近于 1.0 的值。而在使用畸变修正 (skewness correction) 时，则应该将动量和压强的亚松弛因子之和设为 1.0，比如将压强的亚松弛因子设为 0.3，将动量的亚松弛因子设为 0.7。如果同时采用两种修正形式，则应将所有松弛因子设为 1.0 或接近于 1.0 的值。

“迎风” (Upwind) 这个概念是相对于局部法向速度定义的。所谓迎风格式就是用上游变量的值计算本地的变量值。一阶迎风格式和二阶迎风格式都可以看作流场变量在上游网格单元控制点展开后的特例：一阶迎风格式仅保留 Taylor 级数的第一项，因此认为本地单元边界点的值等于上游网格单元控制点上的值，其格式精度为

一阶精度。二阶迎风格式则保留了Taylor级数的第一项和第二项，因而认为本地边界点的值等于上游网格控制点的值与一个增量 1 的和，因而其精度为二阶精度^[23]。

在 Fluent 中的 Solve—Control 的设置中，本文选用压力-速度耦合模型(PISO)，而动量、湍动能和湍流耗散率都选择二阶迎风设置，由于压力模型的不同，使得网格的收敛也有不同之处。如表 2-4 所示，经过分析比较，考虑到收敛所用的时间长短，本文选用 Second Order 压力模型用于下面的数值模拟计算中。

表 2-4 不同求解器设置对于收敛的影响比较

选项		参数设置		收敛的迭代次数	
1	Pressure-Velocity Coupling	PISO		19928	
	Under-Relaxation Factors	保持所有的参量不变 (Pressure: 0.3; Density: 1; Body Forces: 1; Momentum: 0.7)			
	Discretization	Pressure	Standard		
		Momentum	Second Order Upwind		
		Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind		
Turbulent Dissipation Rate		Second Order Upwind			
2	Pressure-Velocity Coupling	PISO		不能收敛于 10^{-6}	
	Under-Relaxation Factors	保持所有的参量不变(Pressure: 0.3; Density: 1; Body Forces: 1; Momentum: 0.7)			
	Discretization	Pressure	PRESTO!		
		Momentum	Second Order Upwind		
		Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind		
Turbulent Dissipation Rate		Second Order Upwind			
4	Pressure-Velocity Coupling	PISO		18463	
	Under-Relaxation Factors	保持所有的参量不变(Pressure: 0.3; Density: 1; Body Forces: 1; Momentum: 0.7)			
	Discretization	Pressure	Second Order		
		Momentum	Second Order Upwind		
		Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind		
Turbulent Dissipation Rate		Second Order Upwind			
5	Pressure-Velocity Coupling	PISO		不能收敛于 10^{-6}	

Under-Relaxation Factors	保持所有的参量不变(Pressure: 0.3; Density: 1; Body Forces: 1; Momentum: 0.7)	
Discretization	Pressure	Linear
	Momentum	Second Order Upwind
	Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
	Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind

求解控制参数的具体设置如图 2-9 所示。

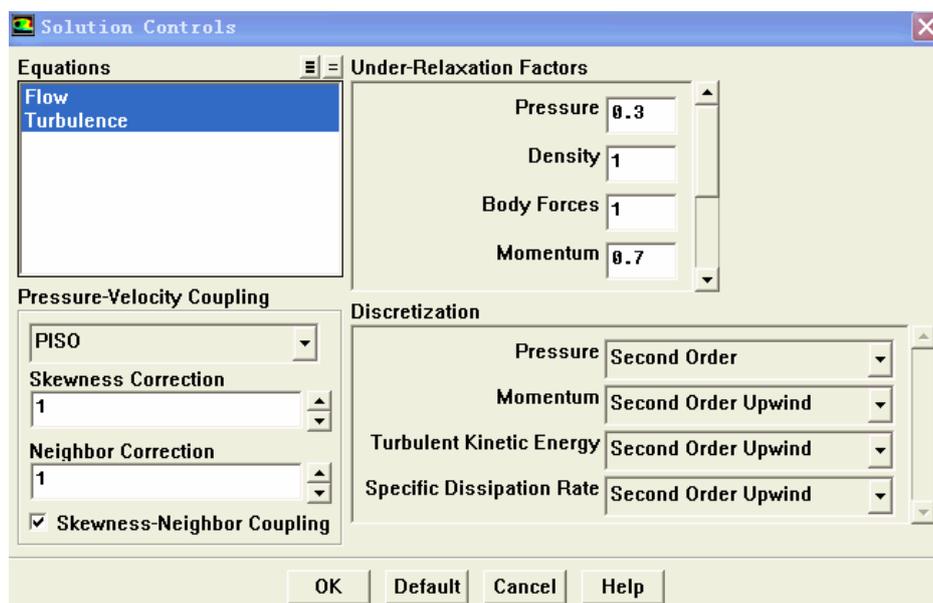


图 2-9 求解控制参数设置

(5) 初始化设置

在开始进行计算之前，必须为流场设定一个初始值。设定初始值的过程被称为“初始化”。如果把每步迭代得到的流场解按次序排列成一个数列，则初始值就是这个数列中的第一个数，而达到收敛条件的解则是最后一个数。显然如果初始值比较靠近最后的收敛解，则会加快计算过程，反之则会增加迭代步数，使计算过程加长，更严重的是如果初始值给的不好，有可能得不到收敛解。

本文中根据辐流式沉淀池进水的特点，用速度入口的初始值对全局进行初始化，定义初始时，整个池内充满水。对于整个辐流式沉淀池模型的 Fluent 设置，如表 2-5 所示。

表 2-5 辐流式沉淀池模型的具体 Fluent 参数设置

Fluent Models	Version	2ddp		
	Solver	Solver:Pressure ;Based;Space:Axisymmetric;Formulation:Implicit;Time:Steady; Velocity Formulation:Absolute;Gradient:Green-Gauss Ceill Based;Porous Formulation:Superficial Velocity.		
	Viscous	Model:k-omega(2 eqn);k-omega Model:SST;Model Constants:Alpha*_inf=1, Alpha_inf=0.52, Beta*_inf=0.09, R_beta=8;Turbulent Viscosity:none.		
Operating Conditions	Pressure	Operating Pressure(Pascal)=101325;Reference Pressure Location:x=0m, y=0m.		
	Gravity	Gravitational Acceleration:X=-9.8m/s ² , Y=0 m/s ²		
Boundary Conditions		Velocity-inlet, Pressure-outlet, Wall, Symmetry		
Solution Controls	Pressure-Velocity Coupling	PISO		
	Under-Relaxation Factors	Keep all the default values (Pressure: 0.3; Density: 1; Body Forces: 1; Momentum: 0.7; Turbulent Kinetic Energy: 0.8; Turbulent Dissipation Rate: 0.8; Turbulent Viscosity:1;)		
	Discretization	Pressure	Second Order	
		Momentum	Second Order Upwind	
		Volume Fraction	Second Order Upwind	
Turbulence Kinetic Energy		Second Order Upwind		
Solution Initialization	Compute from: inlet; Reference Frame: Relative to Cell Zone; Gauge Pressure:0;Others will change automatically.			
Residual monitors	Convergence Criterion	Continuity:10 ⁻⁶		
		x-velocity: 10 ⁻⁶ ;y-velocity: 10 ⁻⁶		
		k: 10 ⁻⁶ ;omega: 10 ⁻⁶		

2.4 计算模型网格独立性的验证

网格间距的大小对于模拟的计算结构有着直接的影响。网格间距越小，即网格数越多，计算结果越精确，但收敛所要花费的时间越长；相反，网格间距越大，收

敛所用时间越短，但计算结果出现偏差的可能性越大。因此在进行数值模拟之前对网格独立性的验证，对于得到更加精确的结果有着十分必要的作用。

在Gmbit网格划分时，分别对不同的网格数进行了验证。设置网格数分别为127330、152398、244905，并将其分别导入Fluent中，其他参数设置同上，从而得到流速等值线图，网格独立性的比较验证如表2-6所示。

表2-6 网格独立性的比较

网格数 (个)	收敛残差	计算得到的流速等值线图	结论
127330	10e-5		在这种情况下，模型迭代计算只能收敛到10e-5，当继续减少残差时将不再收敛，因而不能达到本文的要求。
152398	10e-6		此时，经迭代能够收敛到10e-6，并且速度等值线图比较清晰。
244905	10e-6		当继续减少网格间距时，收敛残差仍能达到10e-6，并且流线与网格数为152398时的相差不大。

经比较发现，当网格数大于15万时，计算得到的流速等值线相差不大；当网格数小于15万时，流线差异较大。因此本文选用152398个网格进行下面的计算。

2.5 典型算例的结果展示

Fluent具有强大的后处理功能，可以直接显示出某一面上的计算结果。不仅可以表示速度、压力等的云图、矢量图，还可以利用XY-Plot来显示某一位置的散点图。本节将展示出本研究中的典型的计算结果。

进口流速为0.085m/s时的单向流计算得到的速度云图如图2-10所示。

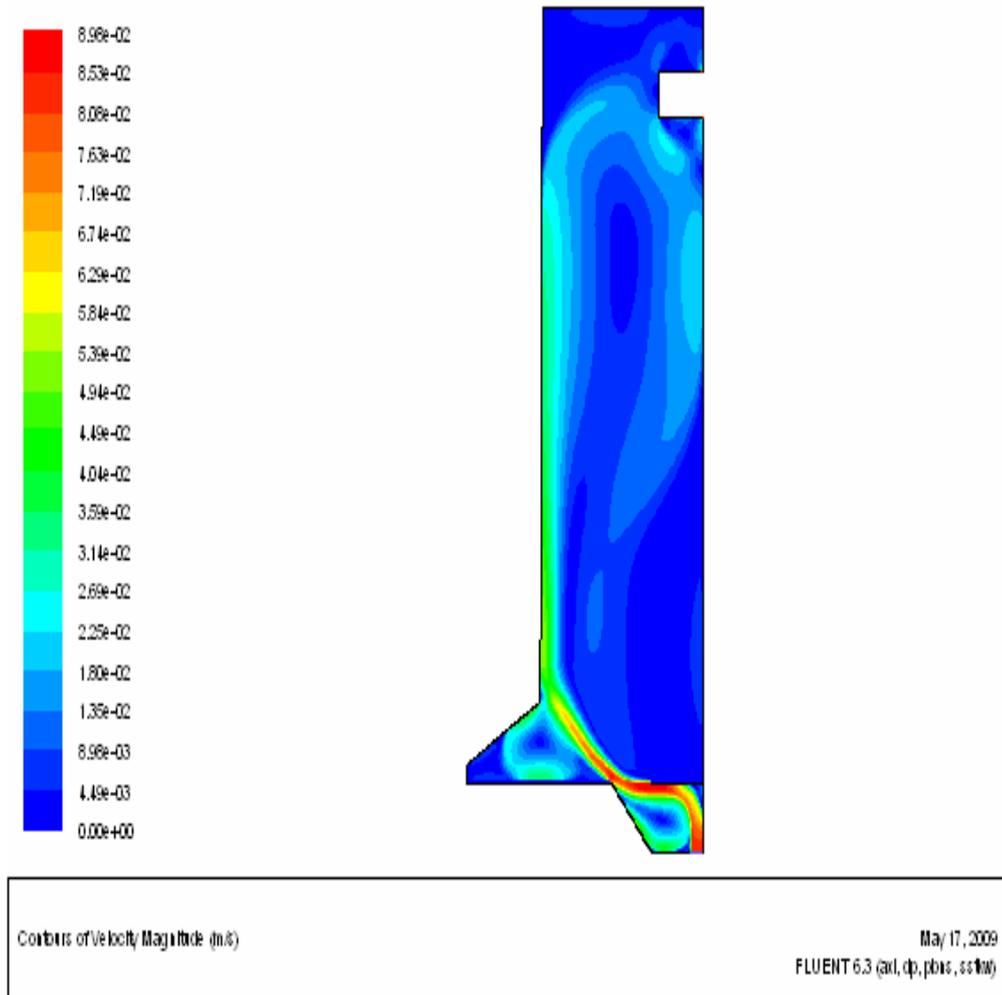


图2-10 进口流速为0.085m/s时的单向流计算得到的速度云图

进口流速为0.085m/s时的单向流计算得到的速度矢量图如图2-11所示。

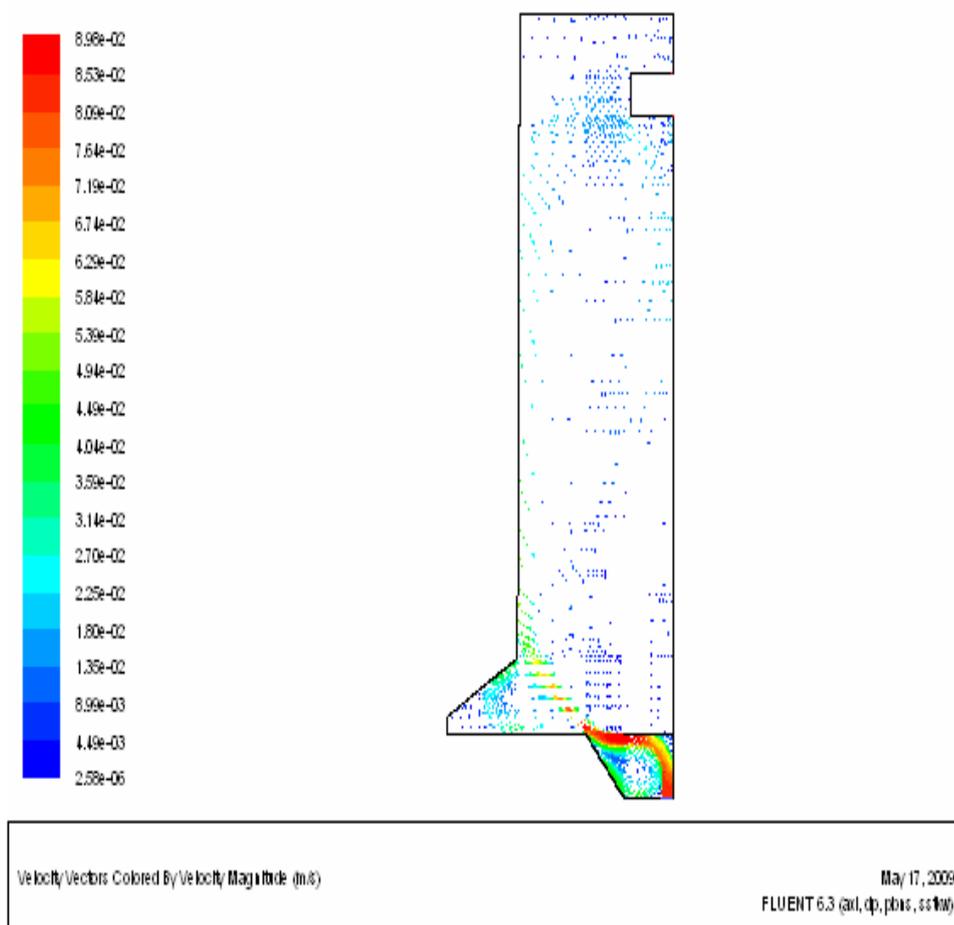


图2-11 进口流速为0.085m/s时的单向流计算得到速度矢量图

进口流速为0.085m/s时的单向流计算得到的水流的迹线图如图2-12所示。

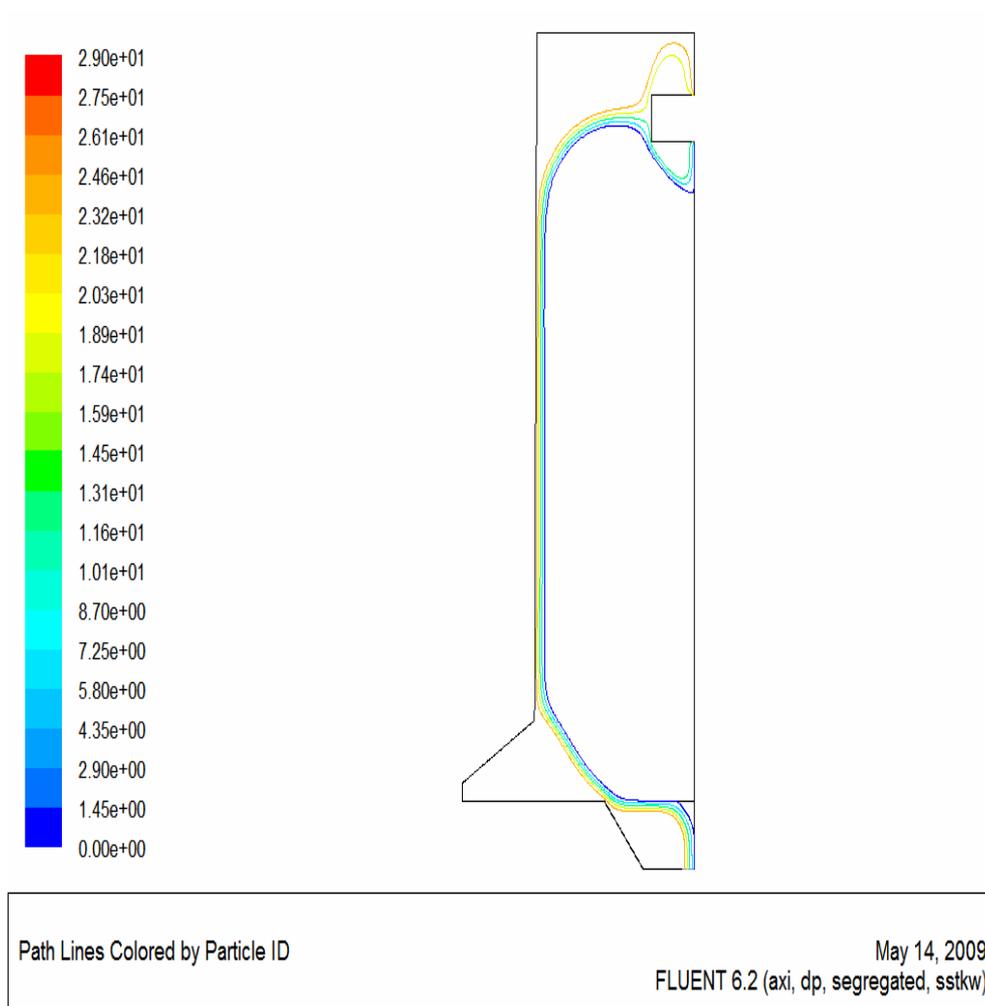


图2-12 进口流速为0.085m/s时的单向流计算得到的水流的迹线图

利用XY-Plot计算得到的压力出口outlet1、outlet2的速度的分布散点图如图2-13所示。

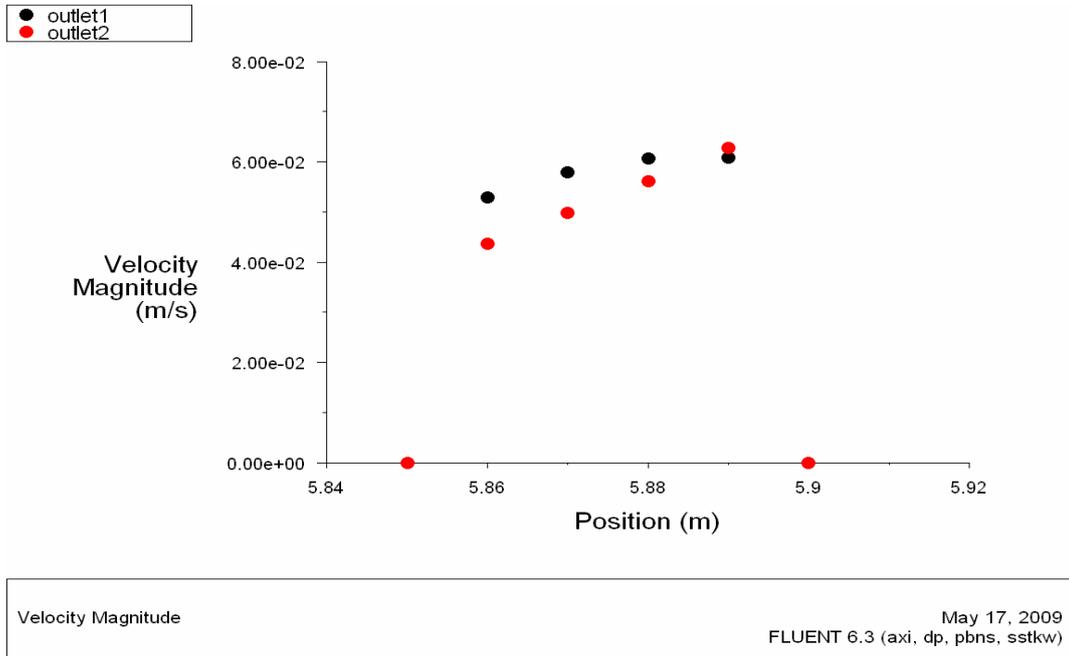
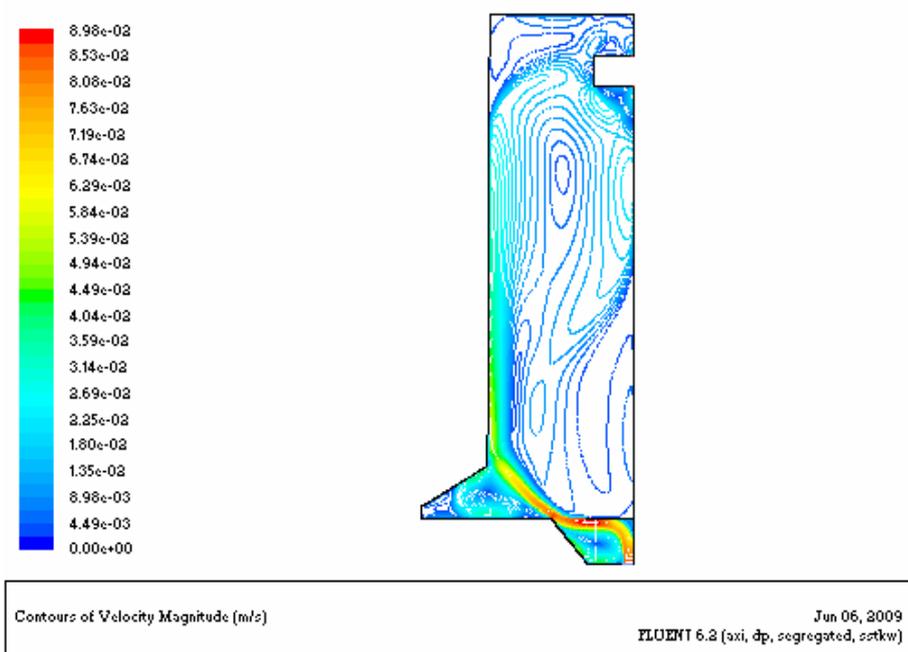


图2-13 压力出口outlet1、outlet2的速度分布散点图

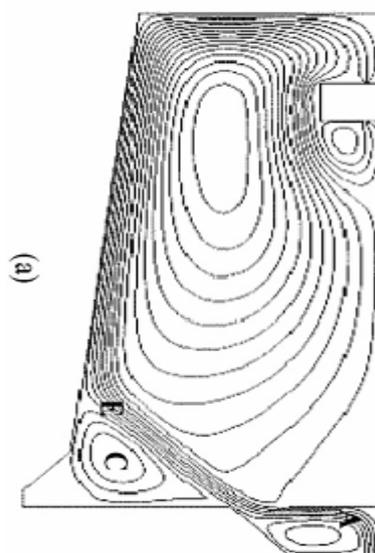
由图2-13可以看出，outlet1在X=5.88m处达到最大，然后逐渐减少，当到达池壁时速度减为零；outlet2出口位置的流速呈现逐渐增大的趋势，基本符合沉淀池出水口的实际情况。

2.6 模型有效性验证

将本研究得到的速度等值线图与参考文献中的结果进行比较，如图2-14所示。



(a) 本研究计算得到的单向流速度等值线图



(b) 外文文献计算得到的单向流速度等值线图

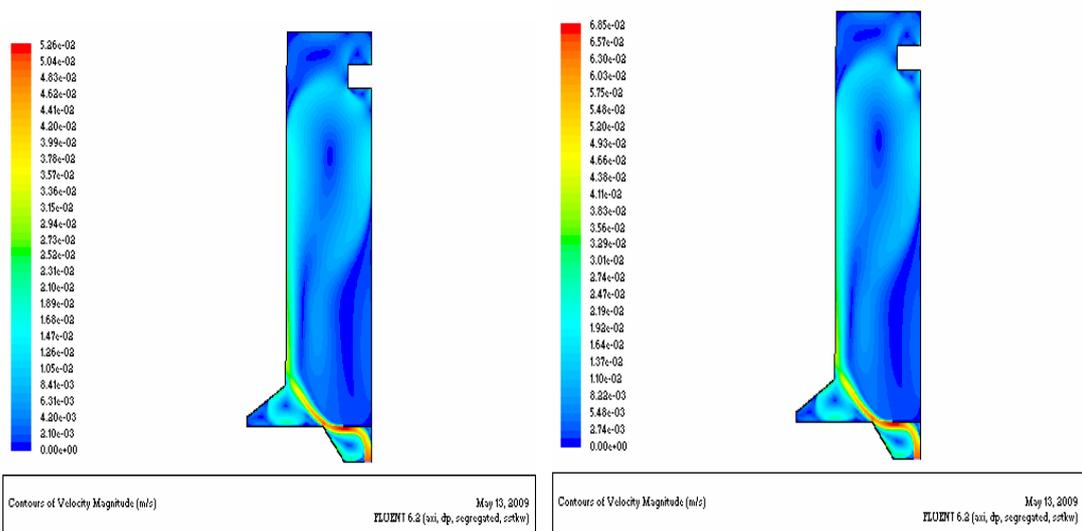
图2-14 模型有效性验证比较图

由图2-14可知,本研究计算得到的速度等值线图与参考文献计算得到的结果相比,都存在四个主要的回流区,并且速度大小的分布情况也基本相似,即池体中央、挡板后面的位置流体速度小,在挡板的引导下,流体以较高的速度流向池底并在污泥斗上部形成回流区。由此可以看出,本文所做研究虽与参考文献有一定得差异,但总体的研究结果有很好的一致性,模型得到了验证。

第三章 沉淀池不同参数下 CFD 数值模拟的分析讨论

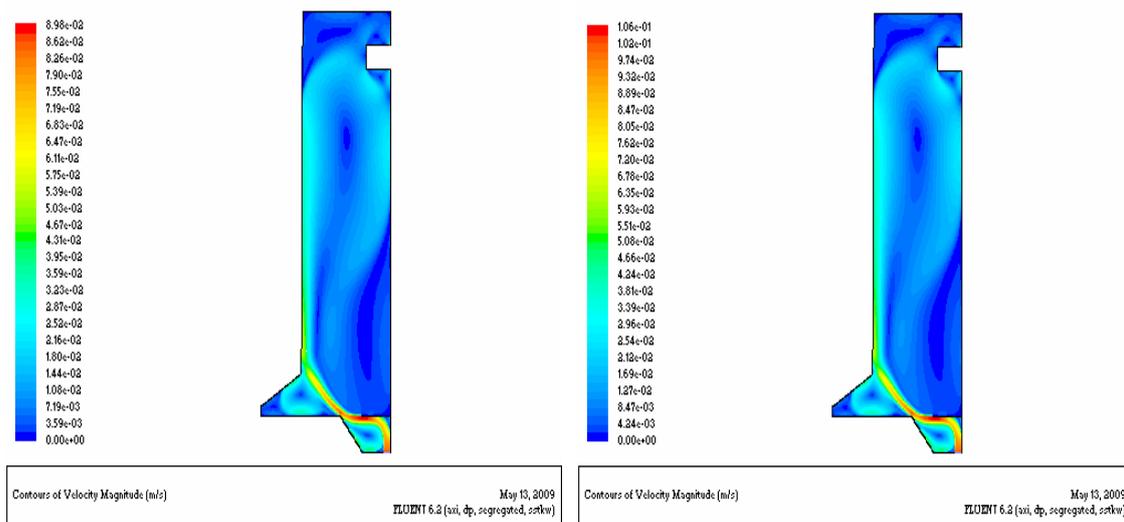
3.1 不同进水流速对流场的影响

经过多次反复尝试和试验发现，不同的进水流量对于流场有着一定的影响，从而对颗粒物的沉降产生影响。本节主要讨论在不加入颗粒物的条件下，进水流量对于流场的影响。分别将进口流速设置为0.05m/s，0.065m/s，0.085m/s，0.1m/s和0.15m/s，计算得到的速度云图如图3-1所示。



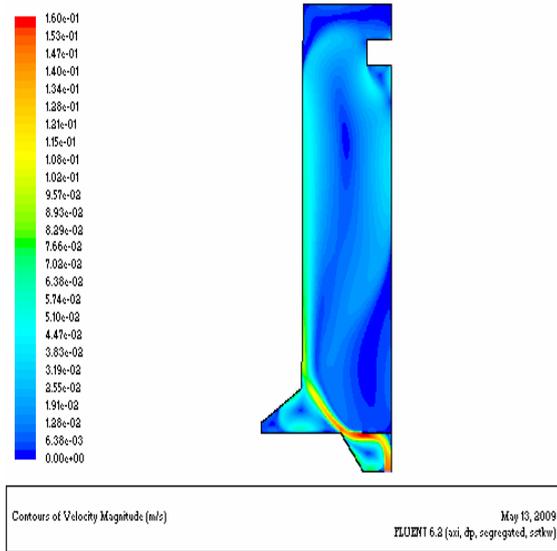
(a) 入口流速为0.05m/s;

(b) 入口流速为0.065m/s



(c) 入口流速为0.085m/s;

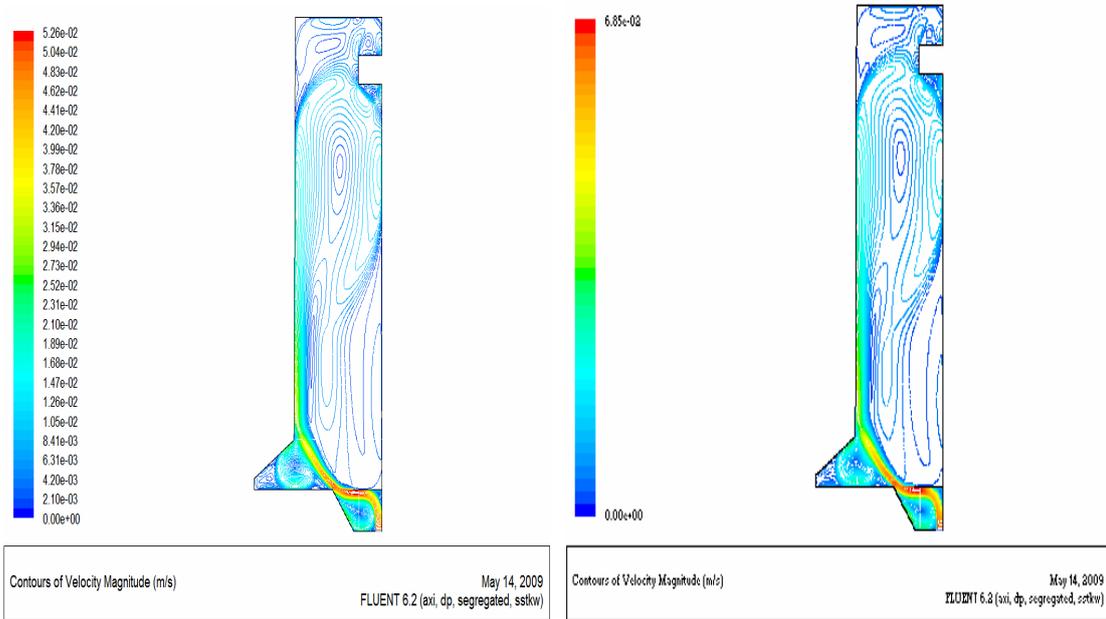
(d) 入口流速为0.1m/s



(e) 入口流速为0.15m/s

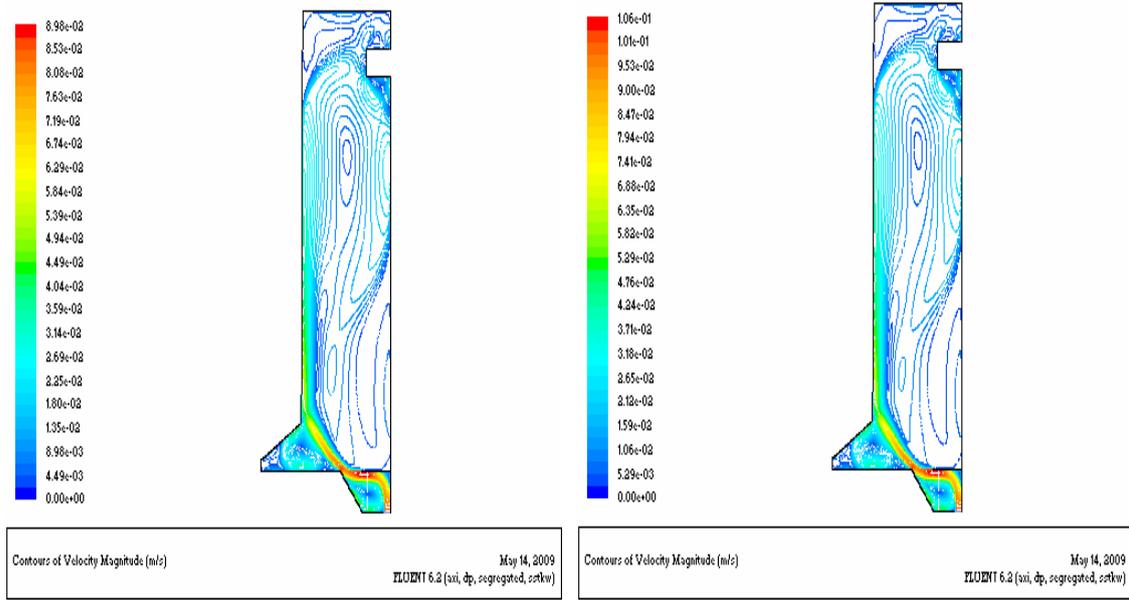
图3-1 不同入口流速计算得到的速度云图

速度等值线图的比较如图3-2所示。



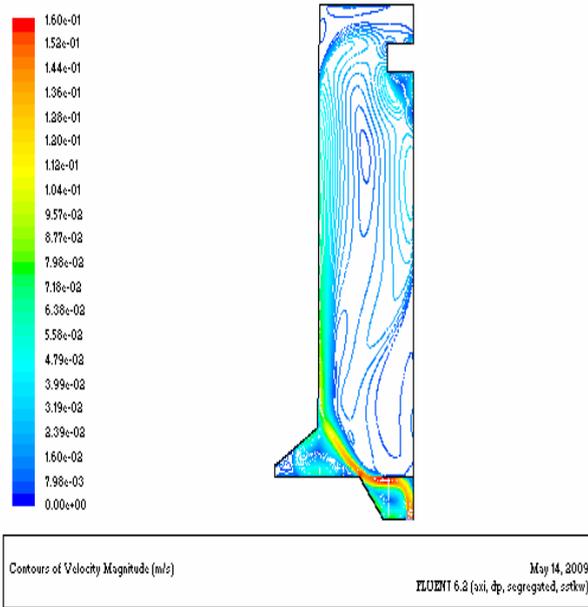
(a) 入口流速为0.05m/s;

(b) 入口流速为0.065m/s



(c) 入口流速为0.085m/s;

(d) 入口流速为0.1m/s



(e) 入口流速为0.15m/s

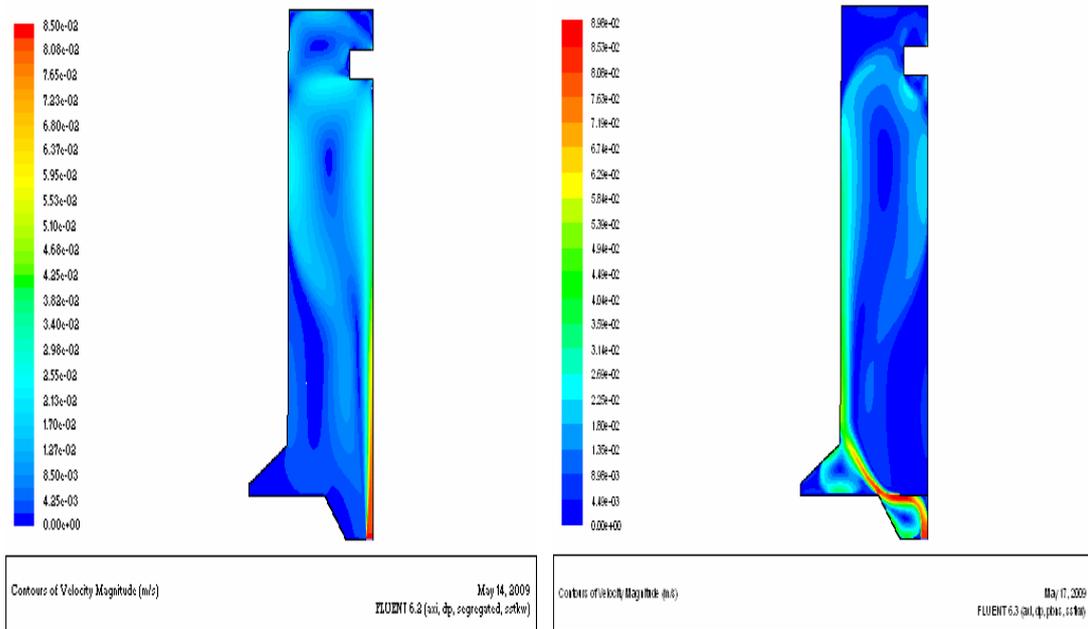
图3-2 不同入口流速计算得到的速度等值线图

通过图3-1和3-2的分析，比较可以看出：在不同的进水流量下，速度场的变化不是很大。当入口流速设定为参考值0.085m/s时，沉淀池中存在四个主要的回流区，

一个位于进水口附近，一个位于污泥斗，一个在沉淀池中心，还有一个位于出水口附近，这些回流区对于颗粒的沉降产生了一定的影响。

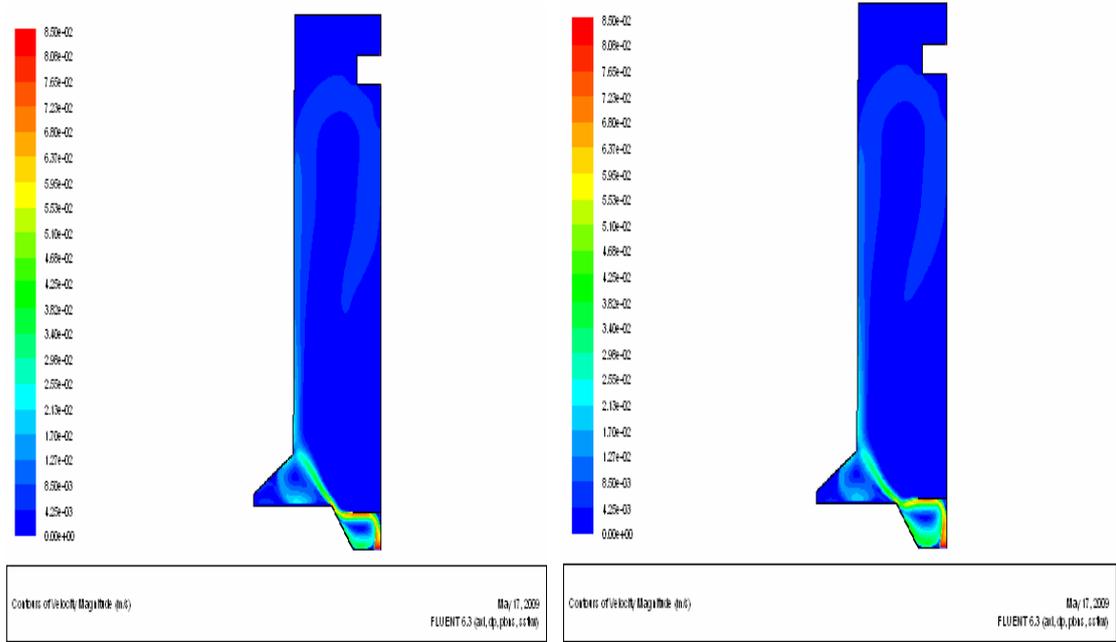
3.2 不同挡板位置对流场的影响

本节主要讨论在进口流速为0.085m/s，挡板长度为1.3m的条件下，不同挡板位置对流场的影响，计算得到的速度云图如图3-3所示。



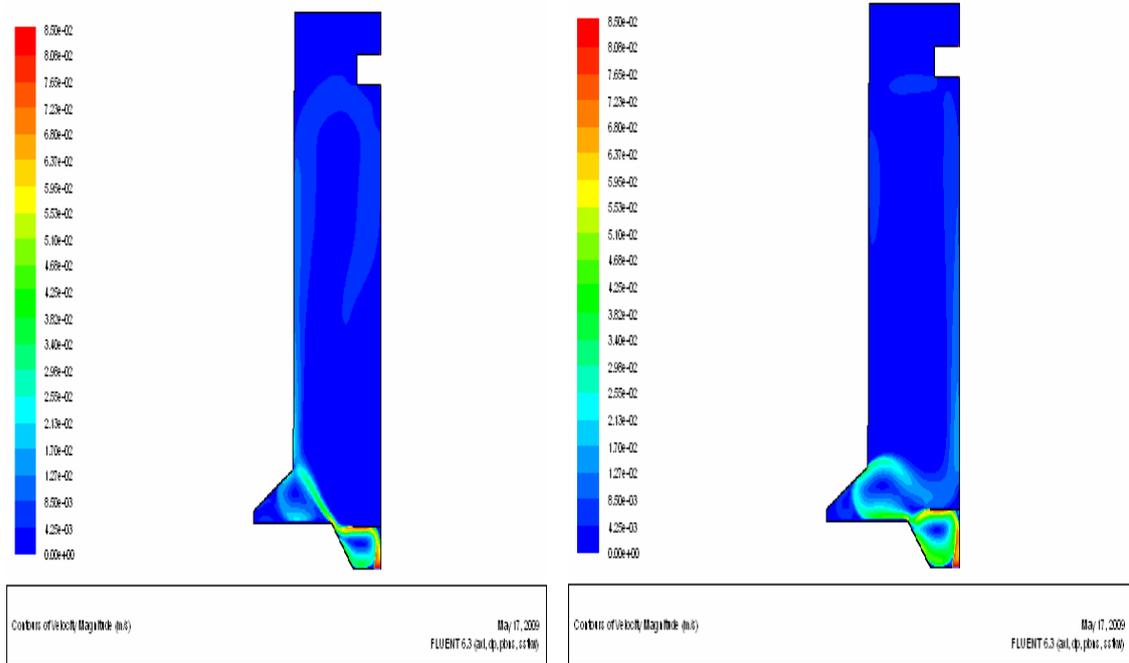
(a) 无挡板时;

(b) 挡板位于y=1.5m处



(c) 挡板位于 $y=1.6\text{m}$ 处;

(d) 挡板位于 $y=1.7\text{m}$ 处

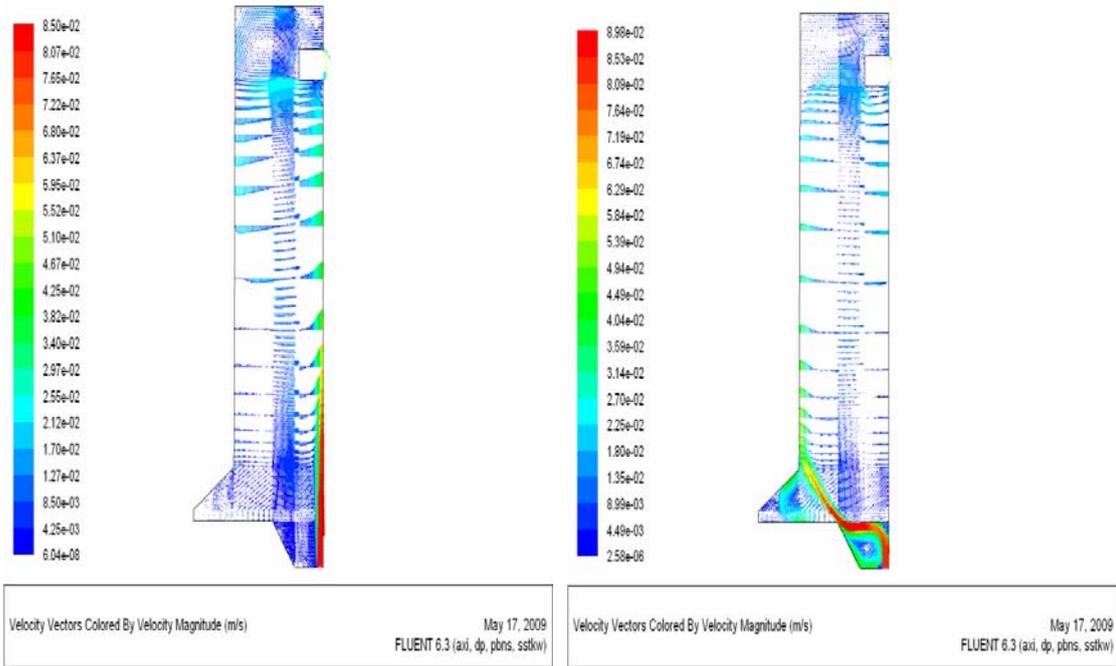


(e) 挡板位于 $y=1.8\text{m}$;

(f) 挡板位于 $y=2.0\text{m}$

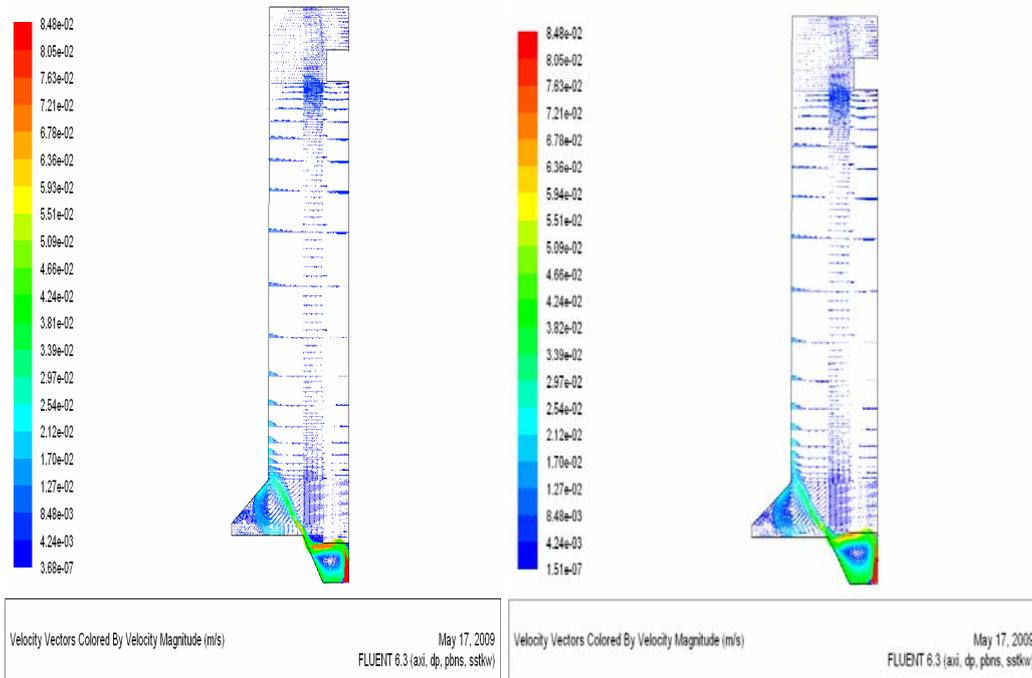
图3-3 不同挡板位置计算的速度云图

速度矢量图如图3-4所示。



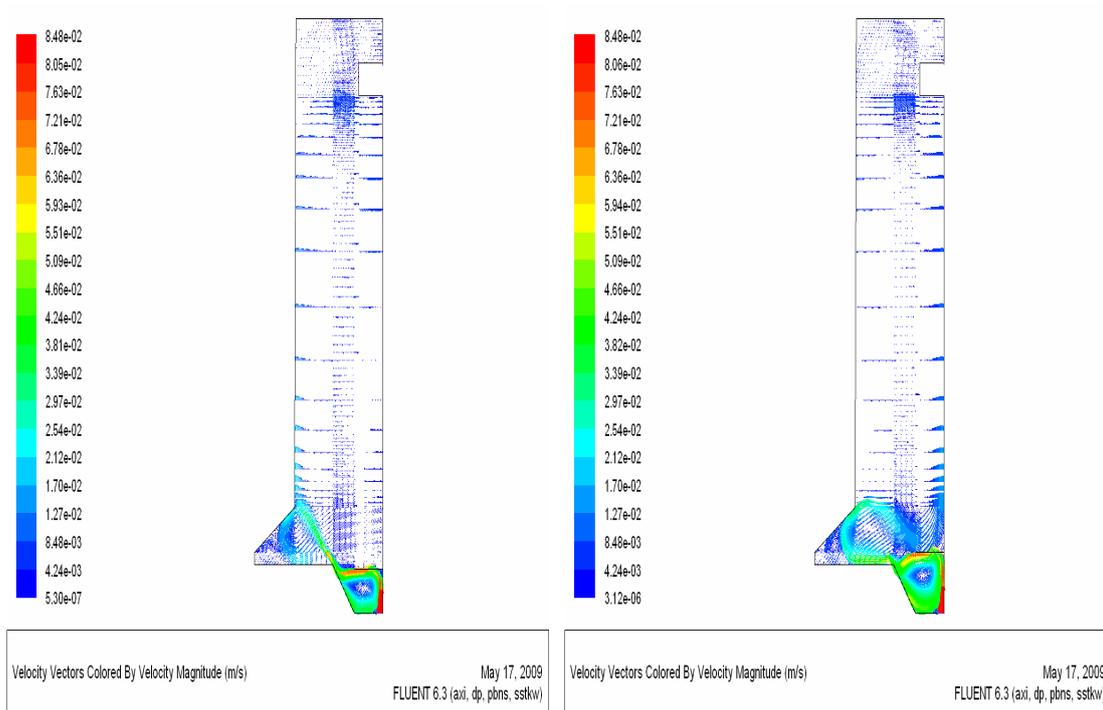
(a) 无挡板时;

(b) 挡板位于y=1.5m处



(c) 挡板位于y=1.6m处;

(d) 挡板位于y=1.7m处



(e) 挡板位于 $y=1.8\text{m}$ 处;

(f) 挡板位于 $y=2.0\text{m}$ 处

图3-4 不同挡板位置计算得到的速度矢量图

分别在挡板位置为 $y=1.1\text{m}$ 、 1.2m 、 1.3m 、 1.4m 、 1.5m 的条件下，在 Fluent 中设置 Surface->Iso-surface->Iso-value 为 1.84，即在 $x=1.84\text{m}$ 处建立一个面，然后设置 Report->Surface Integrals 下的 Report Type 选择 Area-Weighted Average，在 Field Variable 下选择 Velocity，计算 $x=1.84$ 位置的平均流速，得到的相应的平均流速如表 3-1 所示。

表 3-1 不同挡板位置条件下 $x=1.84\text{m}$ 处的平均流速值

挡板位置 /m	1.5m	1.6m	1.7m	1.8m	2.0m
X=1.84m 处的平均流速 m/s	0.019141503	0.012002796	0.010468369	0.011848835	0.020215515

将数据导入Origin数据处理软件中，得到X=1.84m处的平均流速与挡板位置关系曲线图，如图3-3所示。

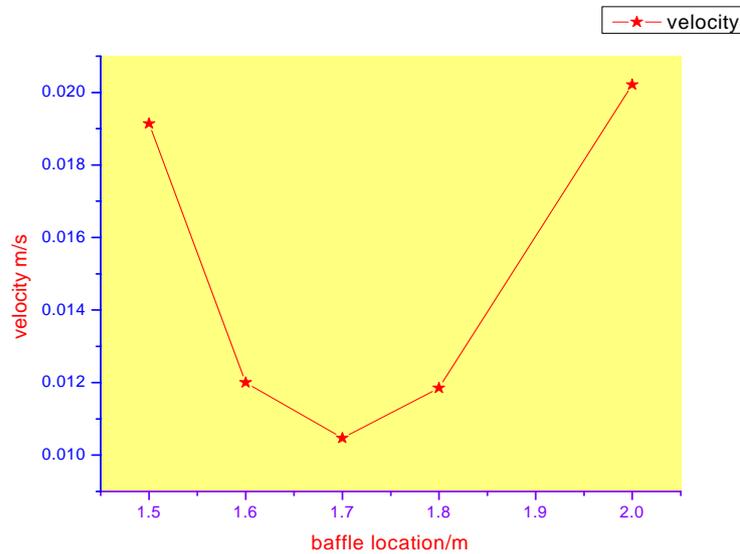
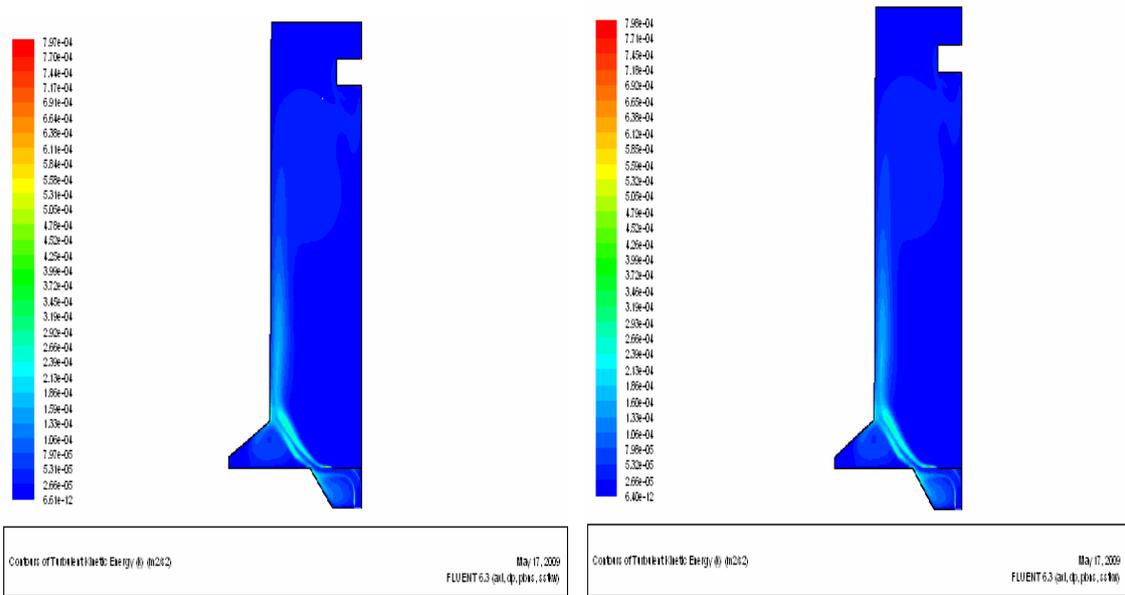


图3-3 不同挡板位置下x=1.84m处的平均流速曲线图

由图3-3可以看出，当挡板位置从y=1.5m增加到y=1.7m时，在x=1.84m即污泥斗上部的平均流速呈现递减的趋势；而当挡板继续远离入口时，污泥斗上部的平均流速又增加，当y=1.7m时，平均流速最小，并且此时流速对颗粒沉降的影响也就越小，因此实际工程中，可以将挡板设在y=1.7m处。

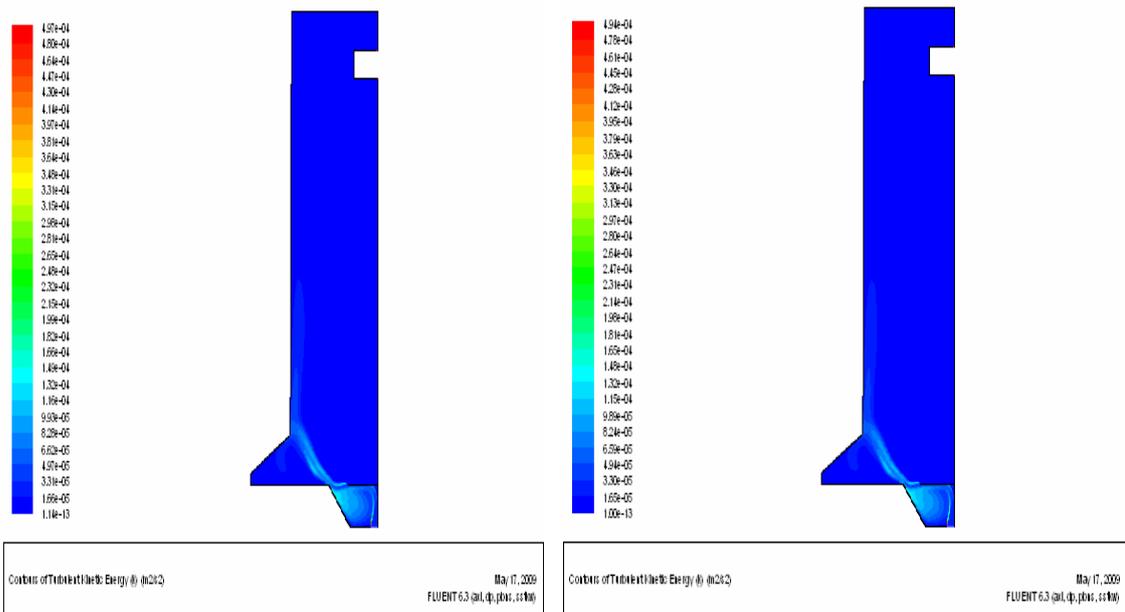
3.3 不同挡板长度对流场的影响

挡板的浸没深度，即挡板的长度对沉淀池的流态有很大的影响，因此本节在挡板位于y=1.7m处，进口流速为0.085m/s的条件下，讨论挡板长度分别为1.1m，1.2m，1.3m，1.4m和1.5m时，对于流场的影响情况，计算得到的湍流动能云图如图3-4所示。



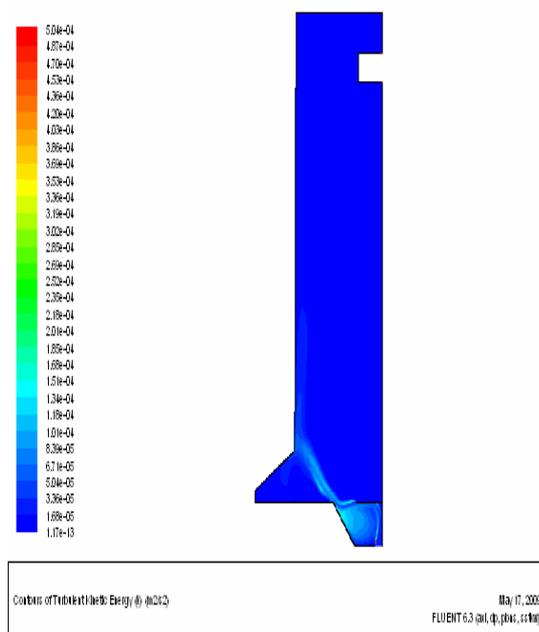
(a) 挡板长为1.1m;

(b) 挡板长为1.2m



(c) 挡板长为1.3m;

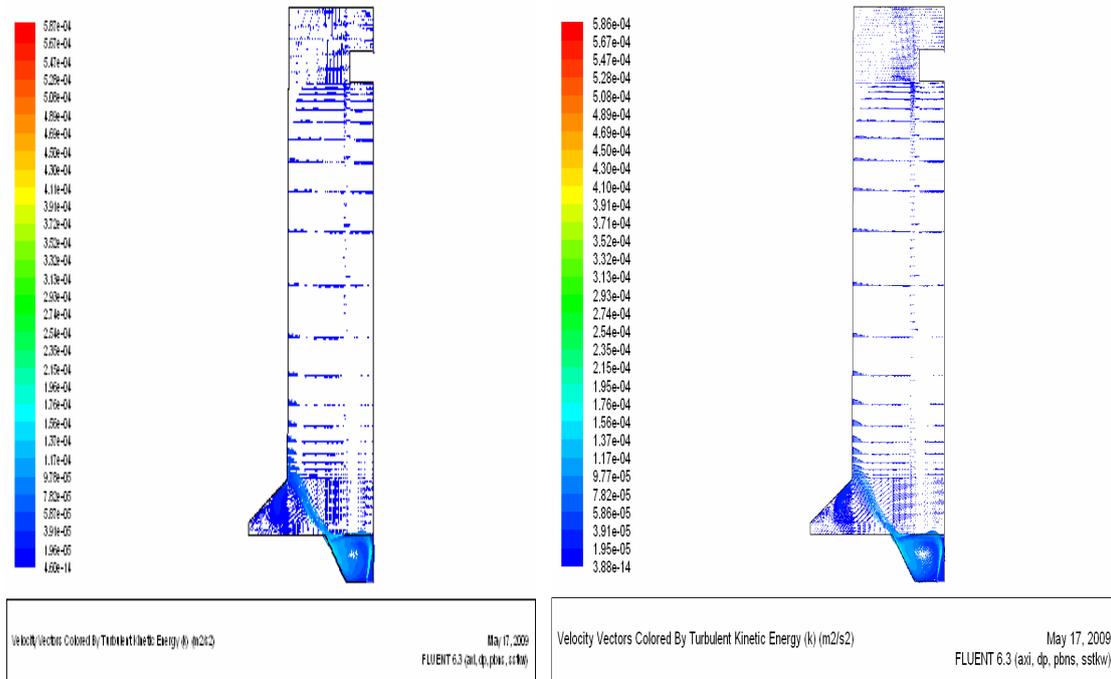
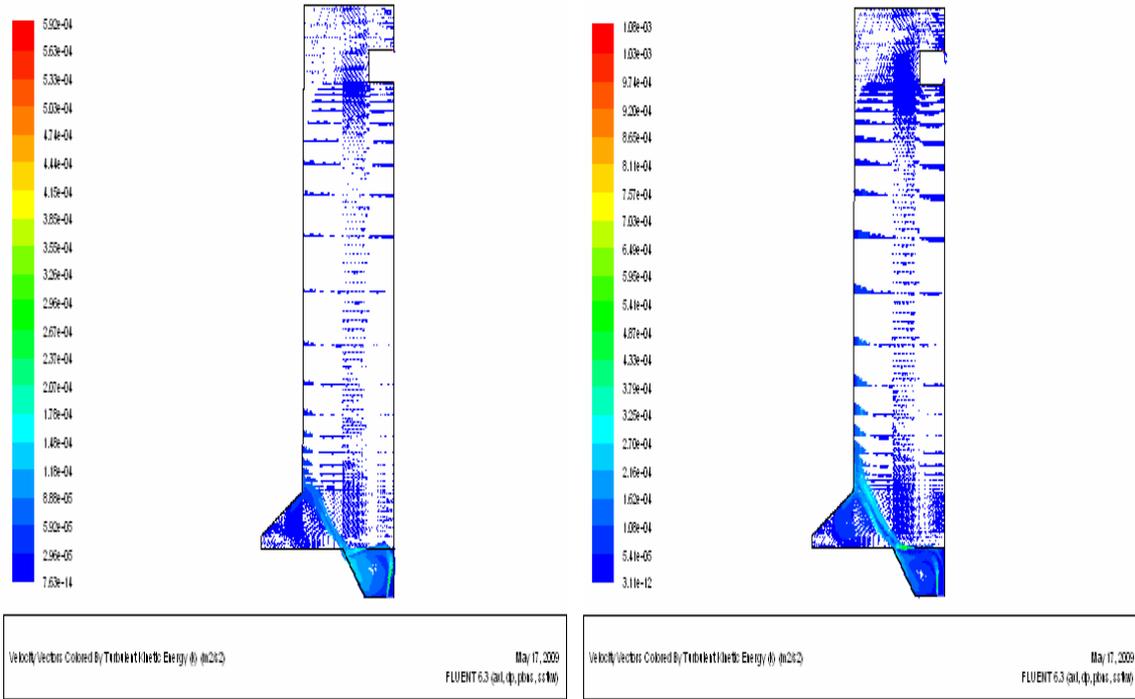
(d) 挡板长为1.4m

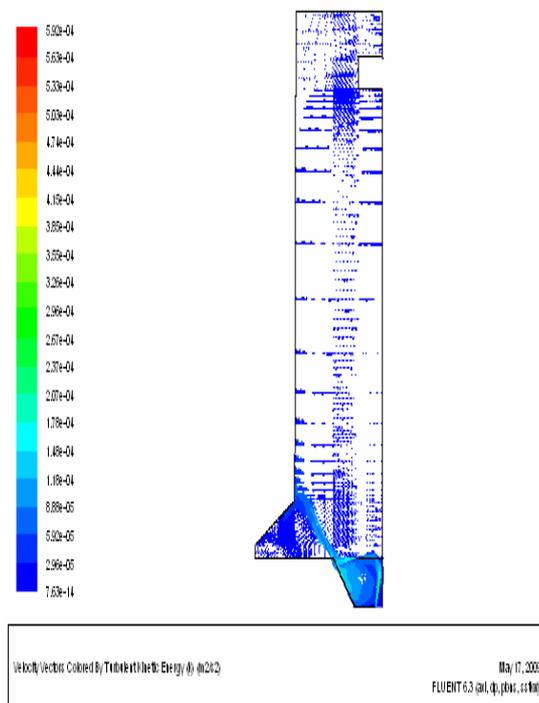


(e) 挡板长为1.5m

图3-4 不同挡板长度下计算所得的湍流动能云图

湍流动能矢量图如图3-5所示。





(e) 挡板长度为1.5m

图3-5 不同挡板长度计算得到的湍流动能矢量图

分别在挡板长度为 1.1m、1.2m、1.3m、1.4m、1.5m 的条件下，在 Fluent 中设置 Surface->Iso-surface->Iso-value 为 1.84，即在 $x=1.84\text{m}$ 处建立一个面，然后设置 Report->Surface Integrals 下的 Report Type 选择 Area-Weighted Average，在 Field Variable 下选择 Turbulent Kinetic Energy，计算 $x=1.84$ 位置的平均湍流动能，得到的相应的平均湍流动能如表 3-2 所示。

表 3-2 不同挡板长度下的 $x=1.84\text{m}$ 处的平均湍流动能

挡板长度/m	1.1m	1.2m	1.3m	1.4m	1.5m
X=1.84m 处的平均湍流动能	7.2816838e-5	7.1612099e-5	1.9399684e-5	1.9510066e-5	2.0811583e-5

将以上数据导入 Origin 数据处理软件中，得到 $x=1.84\text{m}$ 处的平均湍流动能与挡板长度关系的曲线图，如图 3-6 所示。

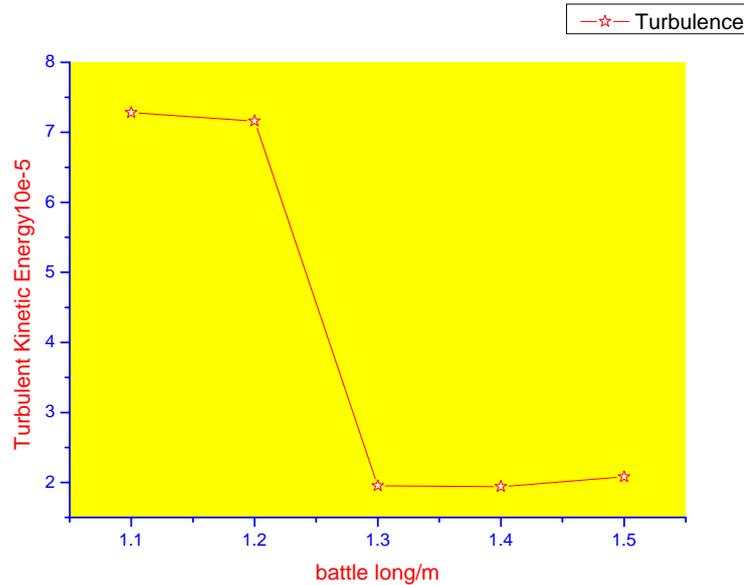
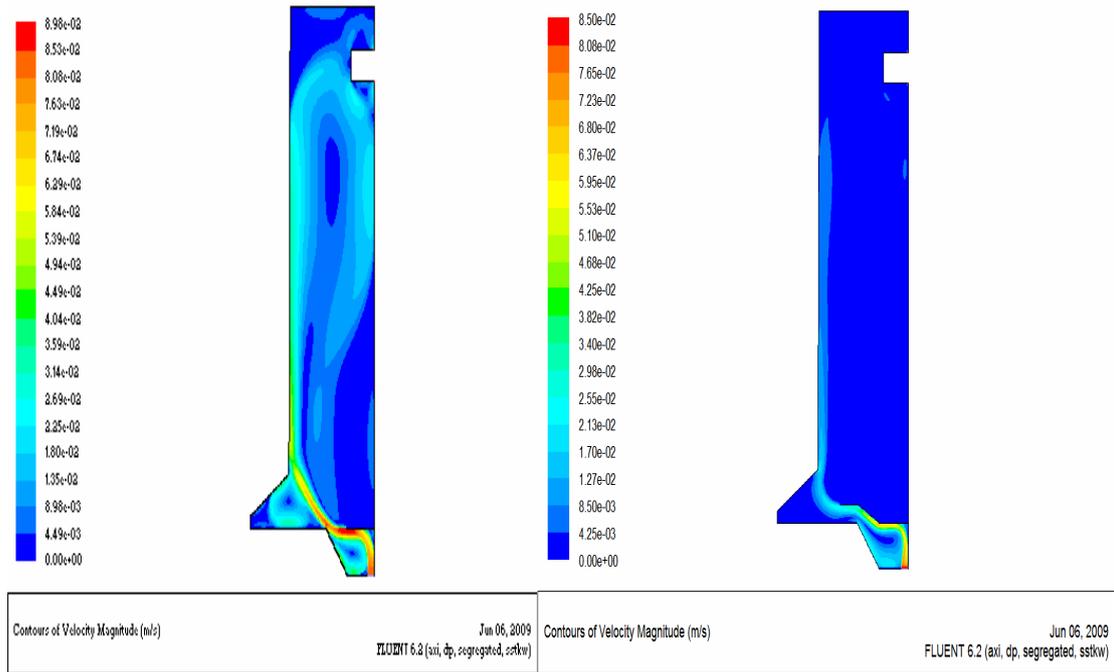


图 3-6 $x=1.84\text{m}$ 处不同挡板长度下的平均湍流动能曲线图

由图 3-6 可以看出，随着挡板长度的增加，污泥斗上部的平均湍流动能呈现减小的趋势，直到挡板长度为 1.3m。当挡板长度继续增加时，湍流动能平稳增加，对颗粒沉降效率影响较小。因此当挡板长度等于 1.3m 时，污泥斗上部的平均湍流动能最小，颗粒沉降效率最高，所以实际工程中可选用挡板长度为 1.3m。

3.4 实际沉淀池模型与修正后沉淀池的比较

由 3.3 节可知，随着挡板长度的增加，漩涡对颗粒沉降的影响越小，从而更加有利于固相的沉降，提高了沉淀池的污泥去除率。本节在参考外文文献的基础上，继续增加入口控制挡板的长度，并将实际沉淀池模型与修正后沉淀池的流场进行比较，如图 3-7 所示。



(a) 实际沉淀池模型

(b) 修正后沉淀池模型

图 3-7 实际沉淀池与修正后沉淀池的流场比较

由图 3-7 可知，将控制挡板设置成图(b)形式，十分明显地减小了污泥斗上部的回流区以及池体中心的回流区，这大大降低了漩涡对固相颗粒沉降的影响，从而有效地提高了沉淀池的去除效率。该结论与外文参考文献所得结论恰好一致，因此说明本研究相对正确。

第四章 利用 DPM 模型模拟沉淀池的颗粒轨迹

4.1 离散相模型简介

DPM 模型可以用来模拟流场中的离散相，它的特点是使用方便，模拟思路清晰，计算中可以对颗粒运动轨迹进行跟踪，结果直观；其缺点是，计算结果无法得到离散相各种场图，为结果分析造成很大不便。

Fluent 提供了如下的离散相模型选项^[24]：

(1) 使用 Lagrangian 坐标下的共识计算颗粒的轨迹。这些公式涉及了稳态及非稳态条件下离散相的惯性力、曳力和重力。

(2) 连续相中的漩涡对于离散相扩散产生的扰动进行预测。

(3) 离散相的加热和冷却。

(4) 液滴的蒸发和沸腾。

(5) 提供对颗粒燃烧的模拟，可以通过对会发份析出和焦炭燃烧来模拟煤粉的燃烧。

(6) 可以选择是否进行连续相与离散相的耦合计算。

(7) 液滴的破碎和合并。

Fluent 的这些模型可以用来对许多离散相的问题进行模拟，包括颗粒的分离与分级，喷雾干燥，烟雾的扩散，液体中气泡的搅浑，液体燃料和煤的燃烧。

Fluent 中的离散相模型假定第二相（分散相）非常稀薄，因而颗粒-颗粒之间的相互作用、颗粒体积分数对连续相的影响均未加以考虑。这种假定意味着分散相的体积分数必然很低，一般来说要小于 10%~12%。但颗粒质量承载率可以大于 10%~12%，即用户可以模拟分散相质量流率等于或大于连续相的流动。

4.2 离散相模型的求解过程概述

在 Fluent 模型中，可以通过定义颗粒的初始位置、速度、尺寸以及每个（种）颗粒的温度来使用此模型。依据对颗粒物理属性的定义而确定的颗粒初始条件可以用来初始化颗粒的轨道和传热/质计算。当颗粒穿过流体运动时，颗粒的轨道以及传热量、传质量可通过当地流体作用于颗粒上的各种平衡作用力、对流/辐射引起的热量/质量传递来进行计算。可通过图形化界面或文本界面输出计算出的颗粒轨

道以及相应的传热/质量。既可以通过在一个固定的流场中（非耦合方法）来预测离散相的分布，也可以在考虑离散相对连续相有影响的流场（相间耦合方法）中考察颗粒的分布。相间耦合计算中，离散相的存在影响了连续相的流场，而连续相的流场反过来又影响了离散相的分布。可以交替计算连续相和离散相直到两相的计算结果都达到收敛标准^[25]。

对于稳态问题，可采用以下步骤求解：(1)求解连续相流动；(2)添加离散相；(3)如果需要的话可以求解耦合流动；(4)对计算结果进行后处理。

对于非稳态问题，可通过以下步骤求解：(1)添加离散相；(2)初始化流场；(3)设定时间步长。

对于非耦合问题，Fluent 会在每个时间步长的最后更新离散相的位置；对于耦合问题，在每次相间耦合计算中离散相的位置都会更新。

4.3 应用于辐流式沉淀池的 DPM 模型的参数设置

根据 DPM 模型的求解步骤，本研究的参数设置如下：

1. 设置离散相初始条件：在 Fluent 的离散相计算中，用户可的主要输入项是初始条件项。初始条件定义了离散相每组颗粒流的起始位置、速度及其他各种参数。这些初始条件构成了决定每个颗粒的瞬时状态值的颗粒因变量的初值。

2. 射流源的选择：Fluent 中提供了 10 种射流源^[26]：

- ①单点射流源(single)
- ②组射流源(group)
- ③锥形射流源（仅适用于三维情况）(one)
- ④面射流源(surface)
- ⑤平口雾化喷嘴(plain-orifice atomizer)
- ⑥压力-旋流雾化喷嘴(pressure-swirl atomizer)
- ⑦平板扇叶(flat-fan atomizer)
- ⑧空气辅助雾化(air-blast atomizer)
- ⑨气泡雾化喷嘴(effervescent atomizer)
- ⑩从文件中读取射流源数据(read from a file)

若仅希望对每种初始条件设定单值，用户应该创建单点射流源；若希望对初始条件设定为一个范围（即一个尺寸范围或初始位置范围），应该创建一个组射流源。

3. 颗粒类型

当设定一系列初始条件时，应该定义颗粒类型。DPM中所包含的颗粒类型如下所示^[27]。

①惯性颗粒(**inert**): 服从力平衡以及受到加热/冷却的一种离散相类型（颗粒、液滴或气泡）。

②液滴(**drop**): 是一种存在于连续相气流中的液滴颗粒。它服从力的平衡并受到加热/冷却的影响。

③燃烧颗粒(**combusting**): 是一种固体颗粒。它遵从受力平衡、加热/冷却过程、挥发份析出过程以及异相表面反应机制。

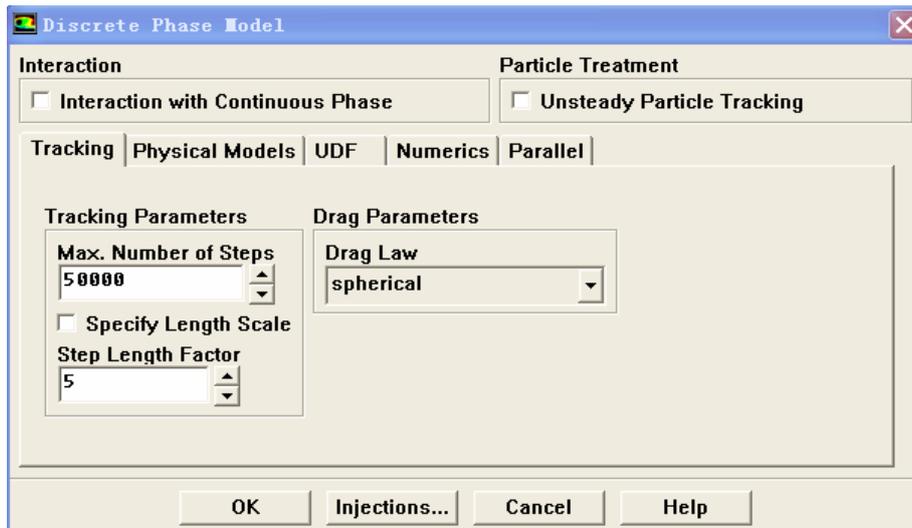
在简化的辐流式沉淀池模型中，具体 Fluent 的设置如表 4-1 所示。

表 4-1 使用 DPM 模型的 Fluent 的参数设置

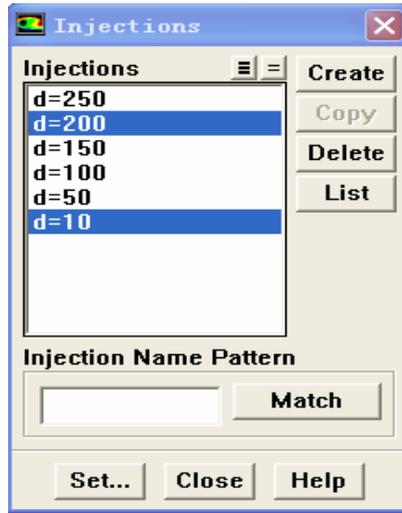
Fluent Models	Version	2ddp	
	Solver	Solver:Pressure ;Based;Space:Axisymmetric;Formulation:Implicit;Time:Steady; Velocity Formulation:Absolute;Gradient:Green-Gauss Ceill Based;Porous Formulation:Superficial Velocity.	
	Viscous	Model:k-omega(2 eqn);k-omega Model:SST;Model Constants:Alpha*_inf=1, Alpha_inf=0.52, Beta*_inf=0.09, R_beta=8;Turbulent Viscosity:none.	
	Discrete Phase Model	Tracking Parameters:Max.number of Steps:50000;Step Length Factor=5;Drag Law:spherical.	
Set Injection Properties		Injection Name:d=10, d=50, d=100, d=150, d=200, d=250;Injection Type:surface;Release From Surfaces:inlet;Particle Type:Inert;Material:arsenic-hydride;Diameter Distribution:Uniform;Point Properties:X-Velocity=0m/s, Y-Velocity=0.085m/s, Diameter=0.00001m, Total Flow Rate=0.15kg/s.	
Operating Conditions	Pressure	Operating Pressure(Pascal)=101325;Reference Pressure Location:x=0m, y=0m.	
	Gravity	Gravitational Acceleration:X=-9.8m/s ² , Y=0 m/s ²	
Boundary Conditions		Velocity-inlet, Pressure-outlet, Wall, Symmetry	
Solution Controls	Pressure-Velocity Coupling	PISO	

	Under-Relaxation Factors	Keep all the default values (Pressure: 0.3; Density: 1; Body Forces: 1; Momentum: 0.7; Turbulent Kinetic Energy: 0.8; Turbulent Dissipation Rate: 0.8; Turbulent Viscosity:1;)	
	Discretization	Pressure	Second Order
		Momentum	Second Order Upwind
		Volume Fraction	Second Order Upwind
		Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
Solution Initialization	Compute from: inlet; Reference Frame: Relative to Cell Zone; Gauge Pressure:0;Others will change automatically.		
Residual monitors	Convergence Criterion	Continuity: 10^{-6}	
		x-velocity: 10^{-6} ; y-velocity: 10^{-6}	
		k: 10^{-6} ; omega: 10^{-6}	

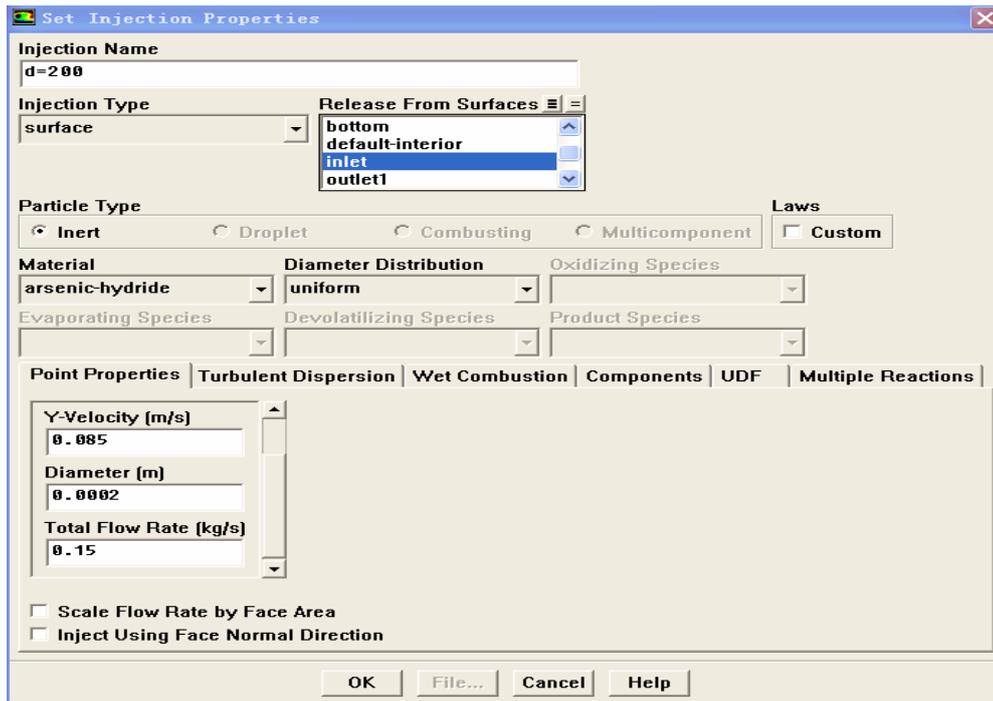
DPM 模型具体的参数设置控制面板如图 4-1 所示。



(a)DPM 控制面板



(b)射流源控制面板

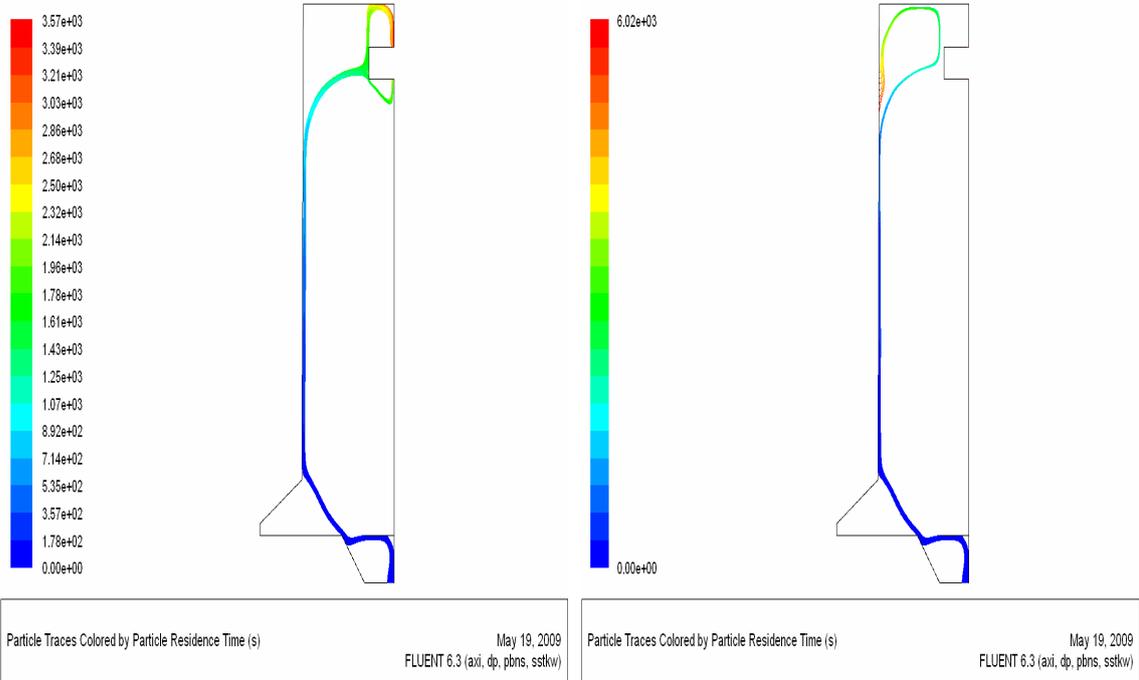


(c)射流源属性设定面板

图 4-1 DPM 具体参数设置示意图

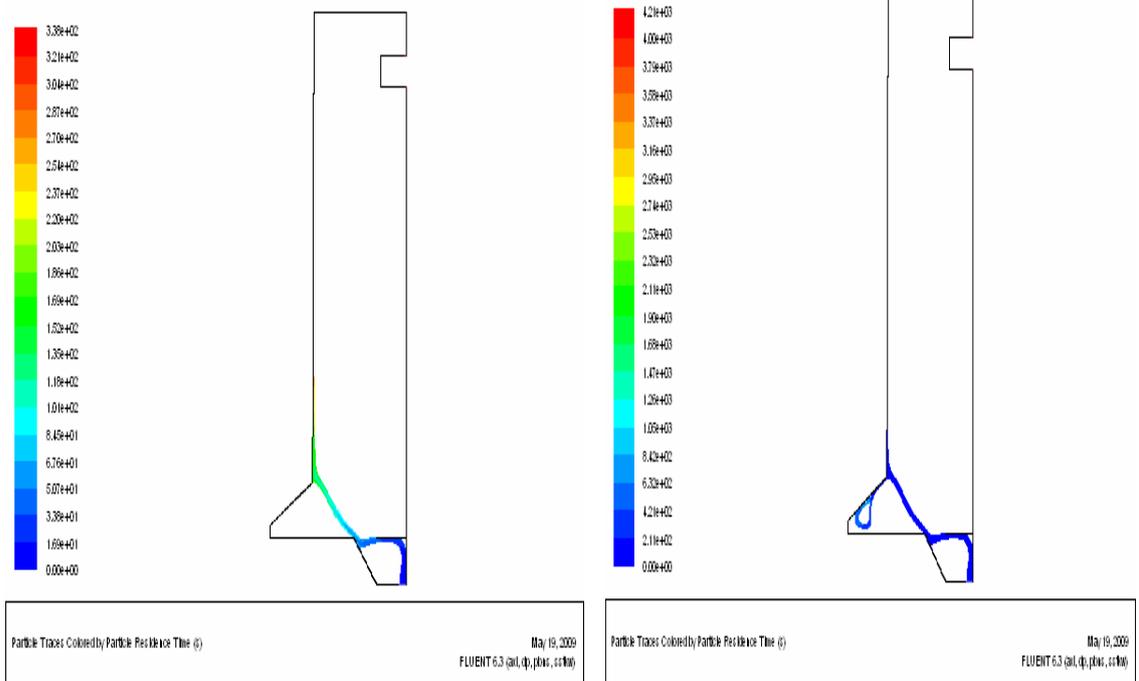
在挡板长度保持 $L=1.3\text{m}$ ，挡板位于 $y=1.7\text{m}$ 处时，使用 DPM 模型讨论不同粒

径 $d=10\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $250\mu\text{m}$ 的颗粒进入辐流式沉淀池后的运动轨迹如图 4-2 所示。



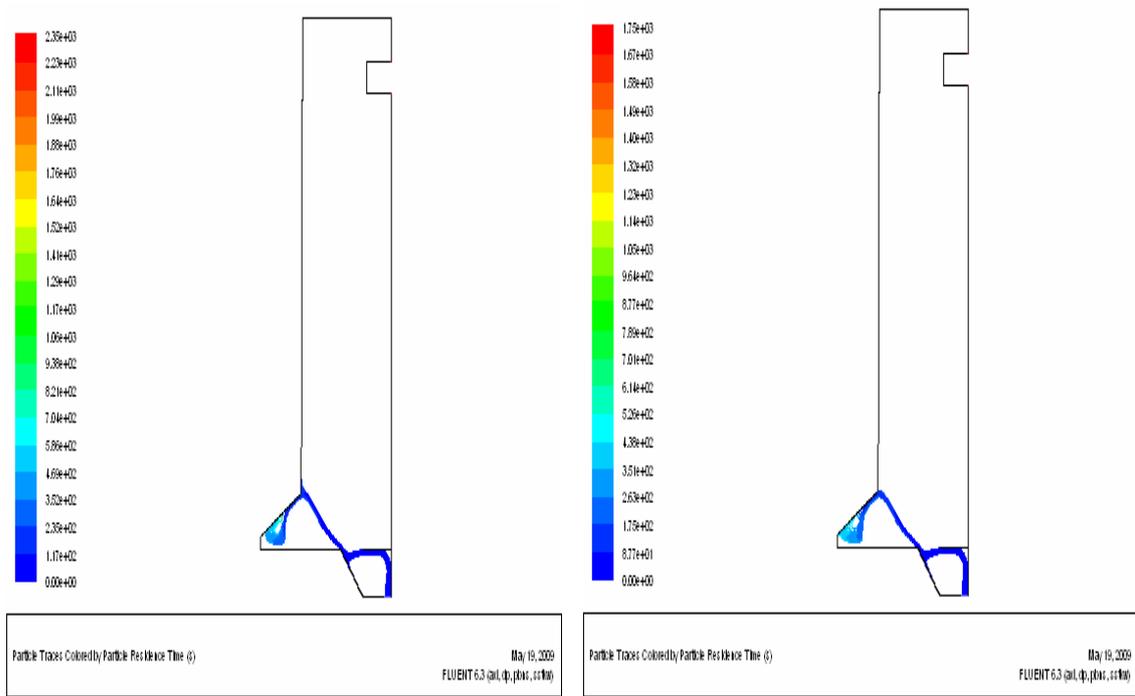
(a) $d=10\mu\text{m}$ 时;

(b) $d=50\mu\text{m}$ 时



(c) $d=100\mu\text{m}$ 时;

(d) $d=150\mu\text{m}$ 时



(e) $d=200\mu\text{m}$ 时;

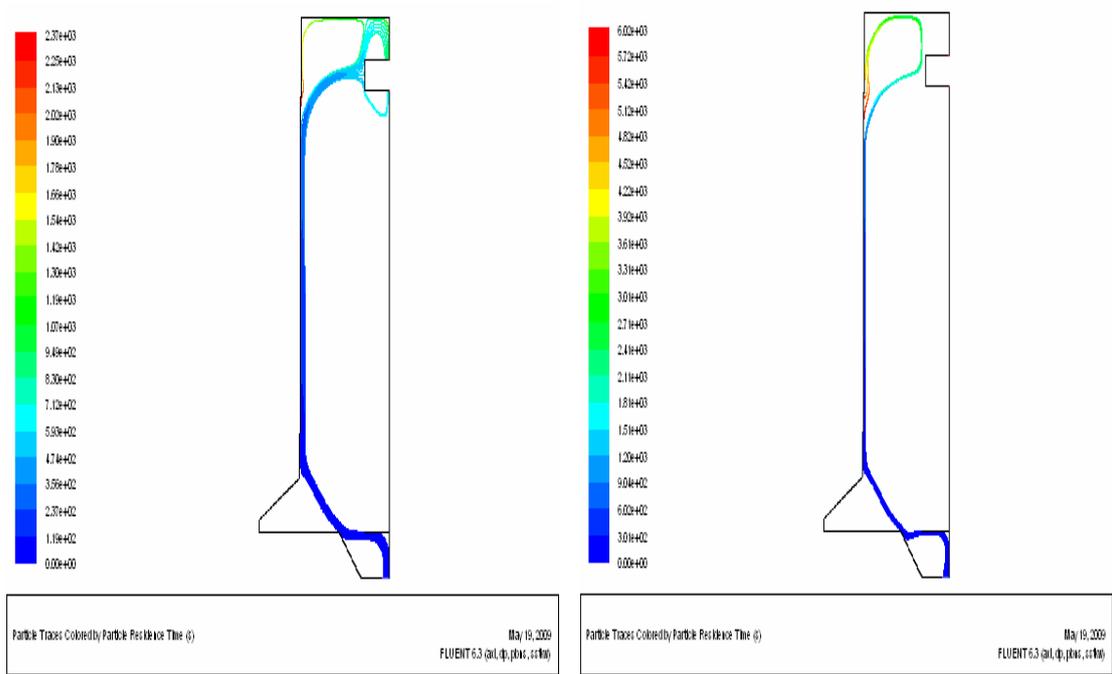
(f) $d=250\mu\text{m}$ 时

图 4-2 不同粒径在沉淀池中的运动轨迹图

由图 4-2 可知，粒径为 150、200、250 μm 的颗粒进入沉淀池后，很快在重力作用下沉降下来，并被进水口的大漩涡卷入泥斗而离开流场。粒径为 100 μm 的颗粒在沉降过程中受漩涡的影响较小，没有被卷入泥斗，而是被池底壁面(即沉淀池中的泥层)捕获，也实现了泥水分离。而粒径为 10、50 μm 的颗粒由于沉降速度较慢，并未受到进水口附近大漩涡的影响，但在其缓慢沉降的过程中受到了池中上部漩涡的影响，而偏离了正常的沉降轨迹。

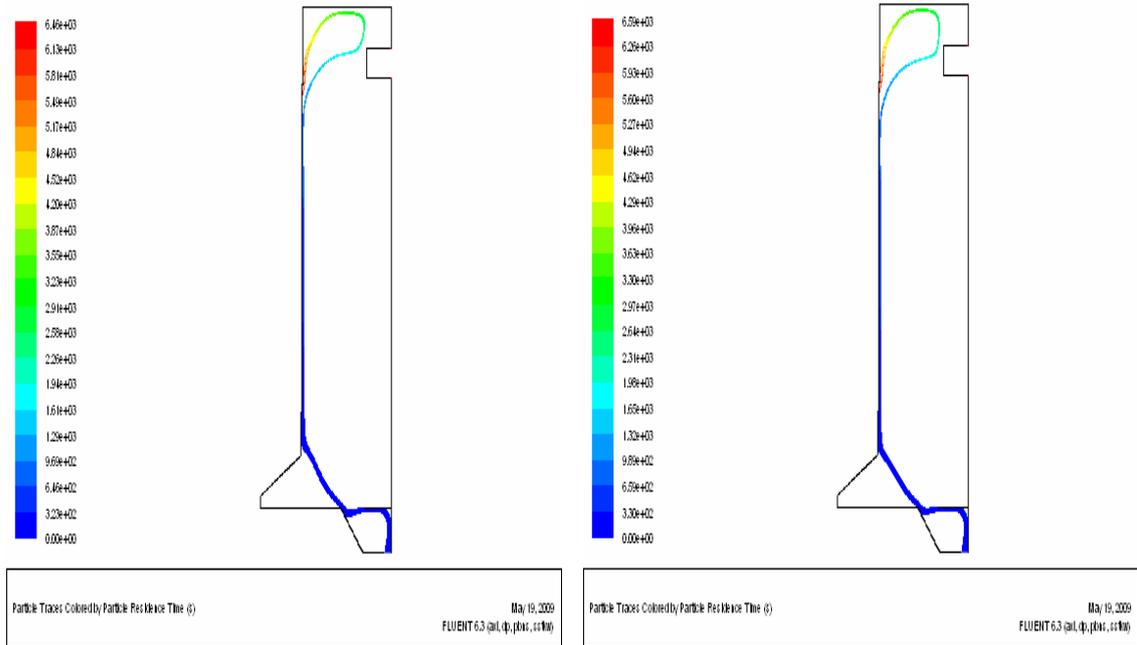
4.4 挡板长度对颗粒沉降的影响

根据 4.3 节的比较分析，本节研究讨论挡板位于 $y=1.7\text{m}$ 处，粒径为 50 μm 的条件下，挡板长度对于颗粒沉降的影响，如图 4-3 比较所示。



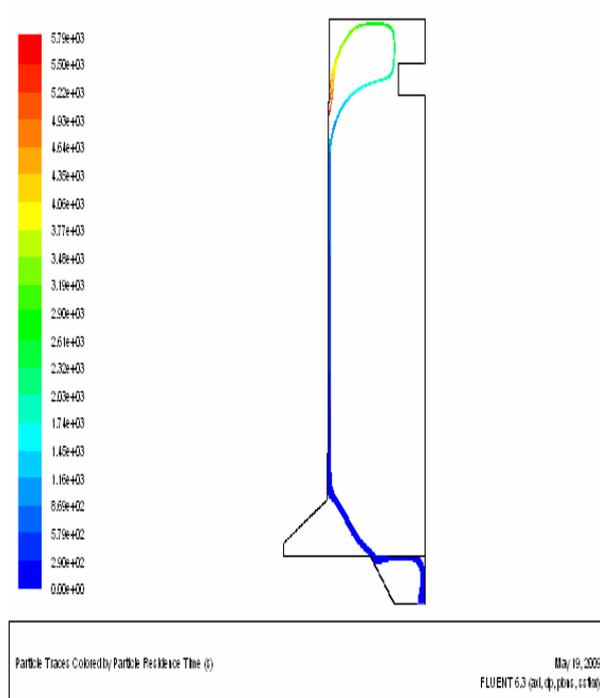
(a) 挡板长度为 1.1m, $d=50\mu\text{m}$;

(b) 挡板长度为 1.2m, $d=50\mu\text{m}$



(c) 挡板长度为 1.3m, $d=50\mu\text{m}$;

(d) 挡板长度为 1.4m, $d=50\mu\text{m}$



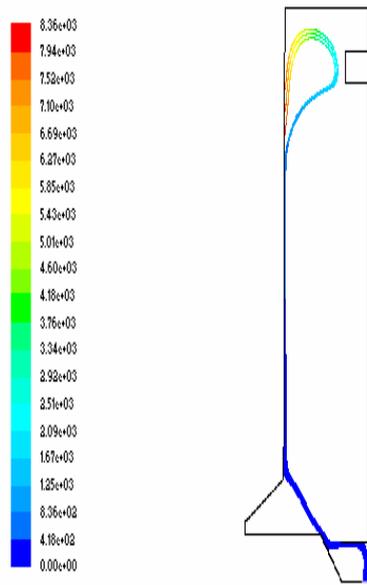
(e) 挡板长度为 1.5m, $d=50\mu\text{m}$

图 4-3 不同挡板长度对粒径为 $50\mu\text{m}$ 的颗粒沉降的影响

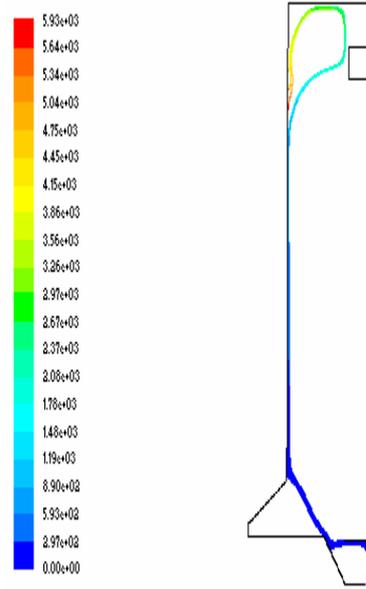
由图 4-3 比较分析可知, 当挡板长度较小 (为 1.1m) 时, 大部分颗粒随水流从出水口流出, 只有少部分颗粒被池底捕捉 (即沉降下来)。但当挡板长度增加到 1.2m 时, 所有颗粒都沉降下来, 并随着挡板长度的进一步增加, 出口附近的漩涡对颗粒的沉降影响由小变大, 当挡板长度为 1.3m 时, 漩涡对颗粒的影响最小, 因此, 为了优化沉淀池的设计, 可选择挡板长度即挡板浸没深度为 1.3m。

4.5 挡板位置对颗粒沉降的影响

本节主要讨论不同的挡板位置对粒径为 $50\mu\text{m}$ 的颗粒在沉淀池中沉降的影响, 当挡板长度为 1.3m, 进口流速为 0.085m/s 时, 不同的挡板位置对颗粒沉降的影响如图 4-4 所示。



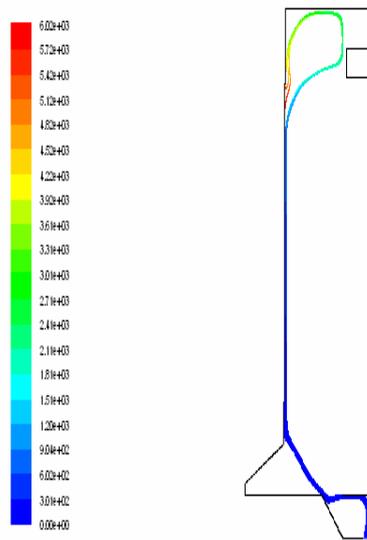
Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s) May 25, 2009
 FLUENT 6.2 (xui, dp, segregated, c2kw)



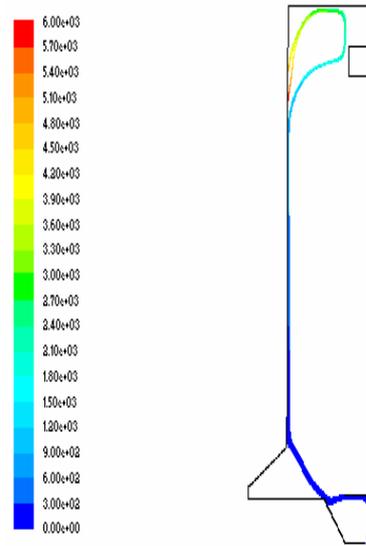
Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s) May 25, 2009
 FLUENT 6.2 (xui, dp, segregated, c2kw)

(a) 挡板位置为 $y=1.5\text{m}$, $d=50\mu\text{m}$;

(b) 挡板位置为 $y=1.6\text{m}$, $d=50\mu\text{m}$



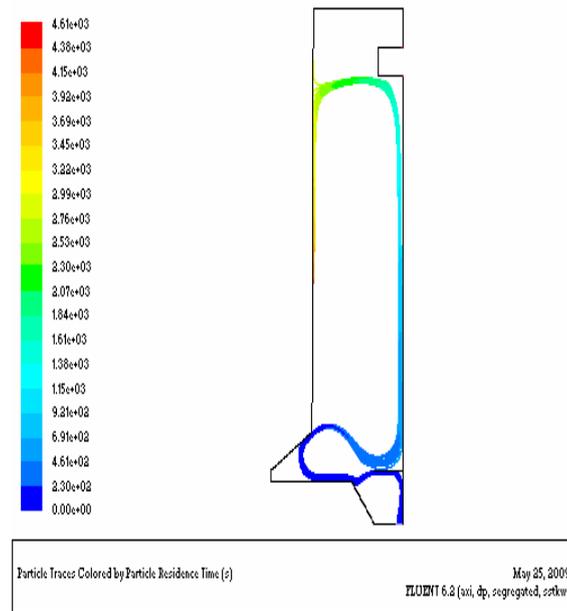
Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s) May 19, 2009
 FLUENT 6.2 (xui, dp, segregated, c2kw)



Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s) May 25, 2009
 FLUENT 6.2 (xui, dp, segregated, c2kw)

(c) 挡板位置为 $y=1.7\text{m}$, $d=50\mu\text{m}$;

(d) 挡板位置为 $y=1.8\text{m}$, $d=50\mu\text{m}$



(e) 挡板位置为 $y=2.0\text{m}$, $d=50\mu\text{m}$

图 4-4 不同挡板位置对粒径为 $50\mu\text{m}$ 的颗粒沉降的影响

由图 4-4 可知，当挡板位于 $y=1.5\text{m}$ 时，沉淀池内的出口漩涡对颗粒影响较小，颗粒能够较快的被池底捕捉，从而沉降下来；当挡板逐渐向池内移动时，漩涡对颗粒的影响增大，颗粒在池内的停留时间也增长，但最终并没有随水流从出水口流出，而是全部都沉降了。当挡板移动到 $y=2.0\text{m}$ 时，挡板对进水的阻留配水的作用减小，颗粒在池体中心漩涡的作用下先随水流流向池顶，然后再在出口漩涡的作用下沉降到池底，最终也达到了去除固体颗粒的效果。但是和实际辐流式沉淀池的三角堰溢流的情况相比较可知，当挡板位于 $y=2.0\text{m}$ 时，颗粒很可能随水流溢出沉淀池，降低了沉降效率，所以通过比较分析可知，当挡板为于 $y=1.7\text{m}$ 时沉淀池去除颗粒效果最好。

第五章 结论与建议

5.1 结论

本研究主要处理了饮用水处理厂辐流式沉淀池的典型的数值模拟方法，它基于 CFD 原理的商用软件 FLUENT 模拟，有效地描述了沉淀池中流态及固相颗粒的行为和分布，并且讨论了不同的入流流速、挡板长度以及挡板的不同位置对于流态和固相颗粒沉降的影响，为优化辐流式沉淀池的结构设计提供了可参考的依据。

结果表明，当没有设置挡板时，沉淀池的进流速度相当大，从而使得固体颗粒也随水流很快的流向出水口，颗粒的去除效果很差。当设置挡板，并延长挡板的长度，可以减小进水的回流区，从而可以很明显的提升颗粒的沉降效率。不同的挡板位置对于沉淀池固相颗粒的沉降也有很大影响。在利用 DPM 模型示踪颗粒在沉淀池中的行为时发现，挡板位于距离进水口较近和较远的位置都将影响颗粒的沉降效率。为了使得沉淀池的结构更加优化，固相颗粒去除效果更好，本文经研究发现可以选择进水流速为 0.085m/s，挡板长度为 1.3m，挡板位于 $y=1.7\text{m}$ 处，这个结果与参考文献中的试验结果相似。

5.2 建议

本文对于辐流式沉淀池的结构、运行原理以及数值模拟等方面的研究经历了由易到难、由简单到复杂的过程。从建模到模拟计算，中间遇到了好多问题，其中有些问题在老师的指导和自己的努力研究下得到了解决，但是有些更为复杂的问题，由于时间和能力有限，依然没有得到解决。

(1)网格划分阶段，网格的均匀性和精确性还不能完全尽如人意，由于本研究参考国外文献，饮用水处理厂中辐流式沉淀池的结构简化模型和实际模型还有一定的差距，有待更进一步接近于实际池体。

(2)本文主要研究了辐流式沉淀池的流态情况，并使用 DPM 模型对固相行为和分布进行了简单的示踪模拟，而对于多相流的研究有待进一步加深。

(3)本文采用的 DPM 模型中，假设颗粒是规则的球形结构，这与实际沉淀池中固相有差别；另外，本文假设沉淀池中固相颗粒是灰质的，而实际沉淀池中的颗粒材质也不尽相同，所以这方面有待进一步与实际更接近。

(4)由于悬浮颗粒的浓度差较大，以及进水温度和池内温度等差异，必然存在异重流现象，而且异重流对沉淀池的运行效果影响很大，因此需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 龚然. 给水处理厂平流式沉淀池的数值模拟研究[D]:[硕士学位论文]. 环境科学与工程学院: 河海大学, 2006
- [2] 肖军伟. 沉淀池的数值模拟与参数影响分析[D]:[硕士学位论文]. 市政环境工程学院: 哈尔滨工业大学, 2006
- [3] Athanasia M. Goula, Margaritis Kostoglou, Thodoris D. Karapantsios, et al. A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 140: 110-121
- [4] A.Deiniger, E.Holthausen, P.A.Wilderer. Velocity and solids distribution in circular secondary clarifiers:Full scale measurements and numerical modelling[J]. Elsevier Science Ltd, 1998, 10(32): 2951-2958
- [5] Scott A.Wells, David M.Laliberte. Winter Temperature Gradients in Circular Clarifiers[J]. *Water Environment Research*, 1998, 7(70): 1274-1279
- [6] McCorquodale, J.Alex, Griborio, et al. Application of a CFD model to improve the performance of rectangular clarifiers[J]. *Water Environment Foundation*, 2006: 310-320
- [7] Benedek Gy.Plosz, Michael Weiss, Gyril Printemps, et al. One-dimensional modeling of the secondary clarifier-factors affecting simulation in the clarification zone and the assessment of the thickening flow dependence [J].*Water Research*, 2007, 41: 3359-3371
- [8] Michael Weiss, Benedek Gy.Plose, Karim Essemiani, et al. Suction-lift sludge removal and non-Newtonian flow behavior in circular secondary clarifiers: Numerical modeling and measurements [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 132: 241-255
- [9] J.Bridgeman, B.Jefferson, S.A.Parson. The development and application of CFD models for water treatment flocculators [J].*Advances in Engineering Software*, 2009: 1-11
- [10] 曾光明, 葛卫华, 秦肖生等. 数值模拟方法在二维沉淀池优化设计中的应用[J]. *环境工程*, 2002, 20(2): 10-12
- [11] 郭生昌, 陈亮, 胡晋明. 平流式沉淀池流场的计算及探讨[J]. *江苏环境科技*, 2003, 16(2): 10-12
- [12] 屈强, 马鲁铭, 王红武. 辐流式二沉池固液两相流数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(9): 1212-1216

- [13] 肖尧, 施汉昌, 范茏. 基于计算流体力学的辐流式二沉池数值模拟[J]. 中国给水排水, 2006, 22(19): 100-104
- [14] 蒋成义, 吴春笃, 黄卫东等. 辐流式二沉池中异重流的计算流体力学模型研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 845-851
- [15] 白玉华, 朱勇, 马林伟等. 平流式沉淀池内水流运动的数值模拟[J]. 西南给排水, 2008, 130(2): 14-16
- [16] 刘百仓, 罗麟, 马军等. 圆形沉淀池内温差异重流与浮力流的数值模拟[J]. 哈工大学报, 2009: 1-11
- [17] 王晓玲, 杨丽丽, 张明星等. 平流式沉淀池水流三维 CFD 模拟[J]. 天津大学学报, 2007, 40(8): 921-930
- [18] O.Flamant, A.Cockx, V.Guimet, et al. Experimental analysis and simulation of drrtling process[J]. Institution of Chemical Engineers, 2004, 82(B4): 312-318
- [19] M.R.Templeton, R.Hofmann, R C Andrews. Case study comparisons of computational fluid dynamics (CFD) modeling versus tracer testing for determining clearwell residence times in drinking water treatment[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2006, 5: 529-536
- [20] Athanasian M. Goula, Margaritis Kostoglou, Tjodoris D Karapantsios, et al. The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment— A computational fluid dynamics study[J]. Water Research, 2008, 42(2): 3405-3414
- [21] 刘策. 平流式沉淀池的 CFD 数值模拟[D]:[本科毕业论文]. 北京:北京石油化工学院,2008
- [22] 韩占忠, 王敏, 兰小平. Fluent 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004年6月. 32-59
- [23] 江帆, 黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008年5月.184-196
- [24] 于勇, 张俊明, 姜连田. Flunet 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008年9月. 145-153
- [25] 王帅. DPM 模型的基本操作和注意事项[J].数值计算与工程仿真, 2005, 4(1), 37-41
- [26] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007年4月. 80-92
- [27] FLUENT 中英文帮助第十九章

附录：

辐流式沉淀池模型的 journal 文件

```
/ Journal File for GAMBIT 2.2.30, Database 2.2.14, ntx86 BH04110220
/ Identifier "45657"
/ File opened for write Mon May 25 14:58:41 2009.
/ Journal File for GAMBIT 2.3.16, Database 2.3.14, ntx86 SP2006032921
/ Identifier "new try"
/ File opened for write Fri May 08 15:36:11 2009.
/ Journal File for GAMBIT 2.3.16, Database 2.3.14, ntx86 SP2006032921
/ Identifier "new practise"
/ File opened for write Fri May 08 13:56:09 2009.
vertex create "O" coordinates 0 0 0
vertex create "N" coordinates 5.9 0 0
vertex create "A" coordinates 0 1.7 0
vertex create "B" coordinates 0 2 0
vertex create "C" coordinates 1.84 3.1 0
vertex create "D" coordinates 1.9 15.1 0
vertex create "E" coordinates 5.9 15.1 0
vertex create "F" coordinates 5.9 14 0
vertex create "X" coordinates 5.85 14 0
vertex create "G" coordinates 4.8 14 0
vertex create "H" coordinates 4.8 13.2 0
vertex create "Y" coordinates 5.85 13.2 0
vertex create "I" coordinates 5.9 13.2 0
vertex create "J" coordinates 5.9 1.7 0
vertex create "K" coordinates 5.9 0.5 0
vertex create "L" coordinates 5.6 0.5 0
vertex create "M" coordinates 4.6 0.5 0
vertex create "P" coordinates 3.6 1.7 0
vertex create "Q" coordinates 4.6 1.7 0
edge create straight "O" "N"
edge create straight "O" "A"
```

edge create straight "A" "B"
edge create straight "C" "B"
edge create straight "C" "D"
edge create straight "D" "E"
edge create straight "E" "F"
edge create straight "F" "X"
edge create straight "X" "G"
edge create straight "G" "H"
edge create straight "H" "Y"
edge create straight "Y" "I"
edge create straight "I" "J"
edge create straight "J" "K"
edge create straight "K" "L"
edge create straight "L" "M"
edge create straight "M" "P"
edge create straight "P" "A"
edge create straight "J" "Q"
edge create straight "K" "N"
edge create straight "Q" "P"
edge split "edge.19" percentarclength 0.038461538 connected
edge split "edge.6" percentarclength 0.9875 connected
edge split "edge.22" percentarclength 0.84 connected
edge split "edge.6" percentarclength 0.73417722 connected
edge split "edge.6" percentarclength 0.93103448 connected
edge create straight "Y" "vertex.20"
edge create straight "vertex.21" "X"
edge create straight "vertex.23" "G"
edge create straight "H" "vertex.22"
edge create straight "Q" "vertex.24"
edge split "edge.6" percentarclength 0.62962963 connected
edge create straight "vertex.25" "P"
edge split "edge.22" percentarclength 0.23809524 connected
edge split "edge.11" percentarclength 0.76190476 connected
edge split "edge.9" percentarclength 0.23809524 connected
edge split "edge.25" percentarclength 0.76190476 connected

edge create straight "vertex.29" "vertex.28"
edge split "edge.31" percentarclength 0.91791045 connected
edge split "edge.31" percentarclength 0.93495935 connected
edge split "edge.33" percentarclength 0.082089552 connected
edge split "edge.41" percentarclength 0.065040651 connected
edge split "edge.5" percentarclength 0.90833349 connected
edge split "edge.5" percentarclength 0.92660535 connected
edge create straight "G" "vertex.30"
edge create straight "H" "vertex.31"
edge create straight "vertex.30" "vertex.32"
edge create straight "vertex.32" "vertex.34"
edge create straight "vertex.31" "vertex.33"
edge create straight "vertex.33" "vertex.35"
edge split "edge.48" percentarclength 0.99677514 connected
edge split "edge.50" percentarclength 0.99444282 connected
edge split "edge.18" percentarclength 0.47222222 connected
edge create straight "vertex.36" "vertex.37"
edge create straight "vertex.37" "vertex.38"
edge split "edge.53" percentarclength 0.031578951 connected
edge create straight "C" "vertex.39"
edge split "edge.55" percentarclength 0.87826087 connected
edge split "edge.42" percentarclength 0.87826087 connected
edge split "edge.31" percentarclength 0.12173913 connected
edge split "edge.30" percentarclength 0.87826087 connected
edge create straight "vertex.27" "vertex.26"
edge create straight "vertex.26" "L"
edge create straight "M" "Q"
edge split "edge.62" percentarclength 0.87826087 connected
edge split "edge.27" percentarclength 0.87826087 connected
edge split "edge.13" percentarclength 0.87826087 connected
edge create straight "C" "vertex.40"
edge create straight "vertex.40" "vertex.41"
edge create straight "vertex.41" "vertex.42"
edge create straight "vertex.42" "vertex.43"
edge create straight "vertex.43" "vertex.44"

edge create straight "vertex.44" "vertex.45"
 edge create straight "vertex.45" "vertex.46"
 edge split "edge.16" percentarclength 0.8 connected
 edge create straight "vertex.22" "vertex.47"
 edge split "edge.57" percentarclength 0.78571429 connected
 edge split "edge.58" percentarclength 0.78571429 connected
 edge split "edge.59" percentarclength 0.78571428 connected
 edge split "edge.31" percentarclength 0.21428571 connected
 edge split "edge.61" percentarclength 0.78571428 connected
 edge split "edge.65" percentarclength 0.78571428 connected
 edge split "edge.66" percentarclength 0.78571428 connected
 edge split "edge.67" percentarclength 0.78571428 connected
 edge create straight "B" "vertex.48"
 edge create straight "vertex.48" "vertex.49"
 edge create straight "vertex.50" "vertex.49"
 edge create straight "vertex.50" "vertex.51"
 edge create straight "vertex.51" "vertex.52"
 edge create straight "vertex.52" "vertex.53"
 edge create straight "vertex.53" "vertex.54"
 edge create straight "vertex.54" "vertex.55"
 edge split "edge.15" percentarclength 0.16666667 connected
 edge create straight "vertex.20" "vertex.56"
 face create wireframe "edge.23" "edge.7" "edge.28" "edge.8" real
 face create wireframe "edge.9" "edge.38" "edge.37" "edge.28" real
 face create wireframe "edge.25" "edge.38" "edge.36" "edge.29" real
 face create wireframe "edge.29" "edge.26" "edge.39" "edge.45" real
 face create wireframe "edge.39" "edge.32" "edge.33" "edge.47" real
 face create wireframe "edge.33" "edge.6" "edge.43" "edge.51" "edge.48" real
 face create wireframe "edge.54" "edge.44" "edge.52" "edge.51" real
 face create wireframe "edge.54" "edge.48" "edge.50" "edge.41" real
 face create wireframe "edge.41" "edge.47" "edge.49" "edge.40" real
 face create wireframe "edge.45" "edge.10" "edge.46" "edge.40" real
 face create wireframe "edge.12" "edge.13" "edge.27" "edge.74" real
 face create wireframe "edge.73" "edge.62" "edge.27" "edge.35" real
 face create wireframe "edge.11" "edge.62" "edge.30" "edge.72" real

```

face create wireframe "edge.71" "edge.60" "edge.30" "edge.46" real
face create wireframe "edge.49" "edge.60" "edge.42" "edge.70" real
face create wireframe "edge.69" "edge.42" "edge.55" "edge.50" real
face create wireframe "edge.52" "edge.55" "edge.5" "edge.68" real
face create wireframe "edge.4" "edge.85" "edge.57" real
face create wireframe "edge.57" "edge.68" "edge.58" "edge.86" real
face create wireframe "edge.58" "edge.69" "edge.59" "edge.87" real
face create wireframe "edge.70" "edge.59" "edge.88" "edge.80" real
face create wireframe "edge.80" "edge.71" "edge.61" "edge.89" real
face create wireframe "edge.61" "edge.72" "edge.65" "edge.90" real
face create wireframe "edge.65" "edge.73" "edge.66" "edge.91" real
face create wireframe "edge.74" "edge.67" "edge.66" "edge.92" real
face create wireframe "edge.84" "edge.83" "edge.92" "edge.19" real
face create wireframe "edge.83" "edge.91" "edge.82" "edge.22" real
face create wireframe "edge.82" "edge.90" "edge.81" "edge.34" real
face create wireframe "edge.81" "edge.89" "edge.31" "edge.24" real
face create wireframe "edge.31" "edge.88" "edge.79" "edge.21" real
face create wireframe "edge.87" "edge.78" "edge.18" "edge.79" real
face create wireframe "edge.86" "edge.77" "edge.78" "edge.53" real
face create wireframe "edge.85" "edge.77" "edge.56" "edge.3" real
face create wireframe "edge.14" "edge.94" "edge.19" "edge.15" real
face create wireframe "edge.93" "edge.63" "edge.22" "edge.94" real
face create wireframe "edge.34" "edge.63" "edge.16" "edge.76" real
face create wireframe "edge.24" "edge.64" "edge.76" "edge.75" real
face create wireframe "edge.17" "edge.64" "edge.21" real
face create wireframe "edge.1" "edge.20" "edge.2" "edge.56" "edge.53" \
    "edge.18" "edge.17" "edge.75" "edge.16" "edge.93" "edge.15" real
physics create "inlet" btype "VELOCITY_INLET" edge "edge.15" "edge.93"
physics create "outlet1" btype "PRESSURE_OUTLET" edge "edge.12"
physics create "outlet2" btype "PRESSURE_OUTLET" edge "edge.8"
physics create "battle" btype "WALL" edge "edge.19" "edge.22" "edge.34" \
    "edge.24"
physics create "symmetry" btype "SYMMETRY" edge "edge.1"
physics create "wall" btype "WALL" edge "edge.16" "edge.75" "edge.17" \
    "edge.18" "edge.53" "edge.56" "edge.6" "edge.32" "edge.26" "edge.25" "edge.37"

```

```
"edge.23" \  
  "edge.7" "edge.9" "edge.36" "edge.10" "edge.11" "edge.35" "edge.13" \  
  "edge.67" "edge.84" "edge.14" \  
physics create "bottom" btype "WALL" edge "edge.43" "edge.44" "edge.5" \  
  "edge.4" "edge.3"
```

```
undo begingroup  
face delete "face.38" onlymesh  
face mesh "face.38" triangle size 0.01  
undo endgroup  
undo begingroup  
face delete "face.37" onlymesh  
face mesh "face.37" map size 0.02  
undo endgroup  
undo begingroup  
face delete "face.36" onlymesh  
face mesh "face.36" map size 0.02  
undo endgroup  
undo begingroup  
face delete "face.34" "face.35" onlymesh  
face mesh "face.34" "face.35" map size 0.01  
undo endgroup  
undo begingroup  
face delete "face.18" onlymesh  
face mesh "face.18" triangle size 0.02  
undo endgroup  
undo begingroup  
face delete "face.33" onlymesh  
face mesh "face.33" map size 0.04  
undo endgroup  
face mesh "face.19" "face.32" map size 0.04  
undo begingroup  
face delete "face.31" onlymesh  
face mesh "face.31" map size 0.04  
undo endgroup
```

```
undo begingroup
face delete "face.30" onlymesh
face mesh "face.30" map size 0.04
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.28" "face.29" onlymesh
face mesh "face.28" "face.29" map size 0.02
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.26" "face.27" onlymesh
face mesh "face.26" "face.27" map size 0.01
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.20" onlymesh
face mesh "face.20" map size 0.05
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.21" "face.22" onlymesh
face mesh "face.21" "face.22" map size 0.05
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.23" onlymesh
face mesh "face.23" map size 0.02
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.24" "face.25" onlymesh
face mesh "face.24" "face.25" map size 0.01
undo endgroup
undo begingroup
edge delete "edge.5" keepsettings onlymesh
edge mesh "edge.5" successive ratio1 1.05 ratio2 1.05 size 0.08
undo endgroup
undo begingroup
edge delete "edge.55" keepsettings onlymesh
edge mesh "edge.55" successive ratio1 1.05 ratio2 1.05 size 0.08
```

```
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.17" onlymesh
face mesh "face.17" map size 0.02
undo endgroup
undo begingroup
edge delete "edge.42" keepsettings onlymesh
edge mesh "edge.42" successive ratio1 1.05 ratio2 1.05 size 0.08
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.16" onlymesh
face mesh "face.16" map size 0.04
undo endgroup
undo begingroup
edge delete "edge.60" "edge.30" "edge.62" "edge.27" "edge.13" keepsettings onlymesh
edge mesh "edge.60" "edge.30" "edge.62" "edge.27" "edge.13" successive ratio1 \
    1.05 ratio2 1.05 size 0.08
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.14" "face.15" onlymesh
face mesh "face.14" "face.15" map size 0.04
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.13" onlymesh
face mesh "face.13" map size 0.04
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.11" "face.12" onlymesh
face mesh "face.11" "face.12" map size 0.01
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.7" "face.8" "face.9" "face.10" onlymesh
face mesh "face.7" "face.8" "face.9" "face.10" map size 0.04
undo endgroup
undo begingroup
```

```
face delete "face.6" "face.5" "face.4" onlymesh
face mesh "face.6" "face.5" "face.4" map size 0.04
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.3" onlymesh
face mesh "face.3" map size 0.02
undo endgroup
undo begingroup
face delete "face.2" "face.1" onlymesh
face mesh "face.2" "face.1" map size 0.01
undo endgroup
save
```