

重庆科技学院



# 毕业论文

题 目 达钢五流 T 型中间包内钢液流动  
行为的数值模拟研究

学 院 冶金与材料工程学院

专业班级 冶金工程 2010-04

学生姓名 周 丹 学号 2010440501

指导教师 王宏丹 职称 讲 师

评阅教师 高艳宏 职称 副教授

2014 年 6 月 4 日

# 注 意 事 项

## 1. 设计（论文）的内容包括：

- 1) 封面（按教务处制定的标准封面格式制作）
- 2) 原创性声明
- 3) 中文摘要（300 字左右）、关键词
- 4) 外文摘要、关键词
- 5) 目次页（附件不统一编入）
- 6) 论文主体部分：引言（或绪论）、正文、结论
- 7) 参考文献
- 8) 致谢
- 9) 附录（对论文支持必要时）

2. 论文字数要求：理工类设计（论文）正文字数不少于 1 万字（不包括图纸、程序清单等），文科类论文正文字数不少于 1.2 万字。

3. 附件包括：任务书、开题报告、外文译文、译文原文（复印件）。

## 4. 文字、图表要求：

- 1) 文字通顺，语言流畅，书写字迹工整，打印字体及大小符合要求，无错别字，不准请他人代写
- 2) 工程设计类题目的图纸，要求部分用尺规绘制，部分用计算机绘制，所有图纸应符合国家技术标准规范。图表整洁，布局合理，文字注释必须使用工程字书写，不准用徒手画
- 3) 毕业论文须用 A4 单面打印，论文 50 页以上的双面打印
- 4) 图表应绘制于无格子的页面上
- 5) 软件工程类课题应有程序清单，并提供电子文档

## 5. 装订顺序

- 1) 设计（论文）
- 2) 附件：按照任务书、开题报告、外文译文、译文原文（复印件）次序装订
- 3) 其它

## 学生毕业设计（论文）原创性声明

本人以信誉声明：所呈交的毕业设计（论文）是在导师的指导下进行的设计（研究）工作及取得的成果，设计（论文）中引用他（她）人的文献、数据、图件、资料均已明确标注出，论文中的结论和结果为本人独立完成，不包含他人成果及为获得重庆科技学院或其它教育机构的学位或证书而使用其材料。与我一同工作的同志对本设计（研究）所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

毕业设计（论文）作者（签字）：

年 月 日

## 摘 要

近年来国内外冶金工作者为提高中间包钢液中夹杂物去除效率，采取了一系列措施来增大和强化中间包的冶金功能。其主要的措施是在中间包内加合适的控流装置（如挡墙、挡坝等），使中间包内能够形成合理的流场和温度场，促进夹杂物的充分上浮。

本课题以达钢五流 T 型中间包为研究对象，依照中间包的 actual 尺寸利用 ANSYS 软件建立有限元模型，并以计算流体力学的理论为基础，建立描述中间包内钢液的流动、热传递以及夹杂物运动的数学模型，再运用 FLUENT 软件进行数值模拟计算。本课题的主要研究内容和结论如下：

① 方案 1 中，在中间包底部存在短路流，钢液在浇注区湍动能较强，有强烈的回流，引起液面波动。中间包温度分布均匀性差，但 3 个出水口间的最大温差为 6.2K。该方案对于各尺寸夹杂物去除率不理想，为 4 种方案中最低。

② 方案 2 中，在注流区形成回流湍动能较弱，小颗粒的夹杂物碰撞长大比例少，故该挡墙对于粒径小的夹杂物去除率不尽如意。在中间包浇注区，钢液流场和温度分布较为合理，3 个出水口温差仅为 0.8K。钢液在浇注区形成循环流，并往中间包钢液面流动，促进夹杂物的上浮排除，对于大颗粒的夹杂物排除率与加 2#挡墙的中间包接近。

③ 方案 3 中，在中间包挡墙内形成强烈回流促进夹杂物碰撞长大。在中间包浇注区钢液流动和温度分布合理，形成循环流，并且钢液带一定角度往上流动，从而被顶渣吸收，夹杂物去除率为四种方案中最理想，100 $\mu\text{m}$ 、70 $\mu\text{m}$ 、50 $\mu\text{m}$  和 30 $\mu\text{m}$  的上浮率分别达到了 99.12%、97.27%、90.25%和 76.46%。同时 3 个出水口的最大温差也较小，为 1.6K，满足连铸顺行。

④ 方案 4 中，在注流区起到与加 2#挡墙有相同的效果。但在中间包浇注区，钢液流动和温度分布比较混乱。加该挡墙夹杂物去除效果不理想，仅使小颗粒夹杂物相对于无控流装置有少许提升。

综上所述，方案 3 即加 2#挡墙的中间包冶金效果最优，钢液流场分布合理、平稳，各出水口处的温差不大，夹杂物的上浮率较高，一定程度上能够提升中间包的精炼效果。

**关键词：**中间包 数值模拟 挡墙 流动 夹杂物

## ABSTRACT

In order to improve the efficiency of inclusion removal in tundish, domestic and international metallurgists have taken a series of measures to strengthen and enlarge the function of the tundish metallurgy. The main measure is that appropriate flow control devices installed in the tundish form a reasonable flow and temperature fields and promote inclusions floating fully in the tundish.

In this paper, the research object is the actual T-type tundish of five flow at Dazhou Iron & Steel Group Co, Ltd. The compute model was established by ANSYS software according to the actual size of the tundish. Based on the fluid mechanics theory, the mathematical model was set up to describe the steel flow and heat transfer and inclusion trajectory in the tundish, and then the problem was calculated by FLUENT software. The main contents and conclusions are as follows:

① In the case 1, there is a strong by-pass flow at the bottom of the tundish. The turbulent kinetic energy of liquid steel in the fluid input area is strong, and there is strong reflow in the other area. It may be lead to the surface fluctuation in the tundish. In the tundish, the temperature distribution is not uniform. The temperature disparity of three outlets is 6.2 K. In this case, the inclusion removals for different sizes are not ideal, and it is the lowest in the four cases.

② In the case 2, the reflow is weaker than case 3 and case 4 inside the baffle, it is not conducive to the small inclusion to collision and growth. So the rate of inclusion removal is unsatisfactory. In the fluid input area, the steel flow and temperature distribution is rational, and the temperature disparity of three outlets is only 0.8 K. In this case, the reflow stream is formed in the casting area, and promote the inclusion removal. For the large inclusions, the rate of inclusion removal is approach to the case 3.

③ In the case 3, a strong reflow forms in the baffle, and it is good to the small inclusions collision and growth. In the fluid input area, both the steel flow and temperature distribution are rational. The recycle stream is formed in other area, and the steel flow upward to the surface, and then the inclusions are absorbed by the top slag. The removal of inclusions is the biggest in the four cases. The 100 $\mu$ m, 70 $\mu$ m, 50 $\mu$ m, and 30 $\mu$ m inclusion removal rate were 99.12%, 97.27%, 90.25% and 76.46%. At the same time, the temperature disparity of three outlets were 1.6 K. It meets casting anterograde.

④ In the case 4, the 2# baffle plays the same role inside the baffle area. But in the fluid input area, the steel flow and temperature distribution is chaotic. This kind of baffle is not

ideal for inclusion removal, compared with the case 3, it only promotes the small inclusion removal.

In general, the design of 2# baffle is the best, the flow of molten steel is reasonable and stable, and only a little temperature difference is between the three outlets. The inclusion removal is the biggest. It could improve the refining effect in the tundish to some extent.

**Keywords:** tundish; numerical simulation; baffle; flow; inclusion

## 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
1 绪 论.....	1
1.1 连铸技术的发展概况.....	1
1.2 中间包冶金.....	1
1.2.1 中间包冶金的发展.....	2
1.2.2 中间包的作用.....	2
1.2.3 中间包的冶金功能.....	2
1.3 中间包内钢液流动行为的研究方法及现状.....	2
1.3.1 中间包内钢液的流动特性.....	2
1.3.2 中间包内钢液流动行为的研究方法.....	3
1.3.3 中间包内钢液流动行为的研究现状.....	4
1.4 本课题研究目的及主要内容.....	5
1.4.1 本课题研究目的.....	5
1.4.2 本课题研究的主要内容.....	5
1.5 小结.....	6
2 中间包内钢液流动行为的数值模拟.....	7
2.1 FLUENT 软件简介.....	7
2.1.1 FLUENT 软件的基本组成.....	7
2.1.2 FLUENT 软件的用途.....	7
2.1.3 FLUENT 软件的求解步骤.....	8
2.2 流场数值模拟的基本原理.....	8
2.2.1 有限体积法.....	8
2.2.2 基本假设.....	9
2.2.3 控制方程.....	9
2.2.4 边界条件.....	11
2.3 中间包计算模型的建立及方案的设计.....	12
2.3.1 中间包几何模型.....	12
2.3.2 研究方案及其网格模型.....	13
2.4 数值求解.....	16
2.5 小结.....	17
3 结果与分析.....	18

---

3.1 中间包内钢液的流场分析 .....	18
3.2 中间包内钢液的温度场分析 .....	21
3.3 钢液中夹杂物的上浮情况分析 .....	28
3.4 小结 .....	29
4 结 论 .....	30
参考文献 .....	31
致 谢 .....	33
在读本科期间参加的科研项目 .....	34



# 1 绪 论

## 1.1 连铸技术的发展概况

连续铸钢（Continuous Casting）技术是一个具有重大意义的技术变革，它取代了拥有 100 多年历史的模铸技术。连续铸钢作为一种将成分和温度达到生产要求的钢水直接浇铸成合格钢坯的生产工艺，这对于钢铁生产来说是一次技术的飞跃<sup>[1]</sup>。采用了连续铸钢技术以后，钢冶炼车间的生产流程和物流控制发生了巨大的改变，对于实际生产车间的自动化、连续化和为大幅度改善环境、提高产品质量提供了有利条件。

1840 年贝塞斯（Sellers）连续铸铅专利的获得，以及 1850 年贝思迈（Bessemer）通过使用水冷旋转双辊连铸机对锡箔、玻璃板和铅板完成了成功浇铸，为连续浇铸金属液的思想奠定了一定的基础。1943 年，现代连铸之父 S.Junghans 在德国成功完成了世界上第一台能够对钢液进行连续浇铸的实验连铸机，并且给出了浸入式水口、振动水冷结晶器和对结晶器使用保护剂等看法，并且从 20 世纪中叶到 1976 年，快速地推进发展传统连铸技术，超过 5000 个相关的专利已经出现在连续铸造方面。20 世纪 80 年代至 90 年代，连续浇铸所占的比例不断增加，连铸机作业率、拉坯速度，以及铸坯产量和质量等也都在不断地增长。同时，浇铸钢种越来越多，生产成本越来越低。进入 21 世纪后，在各工业发达国家传统连续铸钢的生产高效化获得了巨大的进步。开发与应用连续铸钢技术，已然成为衡量评价钢铁工业综合技术水平的重要标志之一。

我国作为钢铁生产大国，在 20 世纪 50 年代，我国就已着手研究连铸技术，并开始进行工业实验。上海钢铁公司早在 1957 年就有一台高架立式的方坯连铸机在其中心试验室里边儿完成了，紧接着的第二年我国第一台应用于工业生产的立式连铸机也在唐山钢铁厂建立完成，与此同时，一台用于工业实际生产的连铸机也在重庆第三钢铁厂完成了建立，这几台连铸机也是世界上最早出现的<sup>[2]</sup>。20 世纪 80 年代以来，我国钢铁企业大范围地进行连铸化的改造，越来越多的全连铸型车间投入生产。我国在 1999 年底时就拥有 342 台连铸机，共计 1088 流，并有了 13503.5 万吨的产能，连铸坯产量也跃居世界上第一，高达 9367 万吨；在 2000 年时连铸坯已有 1 亿多吨的产量，到 2003 年时超过了 2 亿吨；中国连铸机的数量在 2005 年末时就有 673 台，共计 2171 流，铸坯年产量高达 39887 万吨，其中薄板坯连铸机和板坯连铸机的铸坯年产量约占总铸坯量的 41.2%，全国连铸比约为 96.71%<sup>[3]</sup>。目前，中国连续铸造技术，设备和生产水平都已经达到世界先进国家。

## 1.2 中间包冶金

中间包冶金技术是一种特殊的炉外处理的技术，它在钢进行熔炼、精炼，再到凝固成为固态连铸坯的整个生产过程中起着至关重要的作用。

### 1.2.1 中间包冶金的发展

起源于 20 世纪 70 年代的中间包冶金研究工作，在 20 世纪 80 年代以猛烈的势头向前推进发展，到 80 年代中叶时我国也逐步开始了对中间包冶金的研究。在 20 世纪 80 年代早期，来自多伦多大学的麦克莱恩（A.McLean）教授第一次给出了“中间包冶金学”这一概念，国内外学者随着对中间包冶金作用认识地逐渐加深，慢慢地将实验研究的成果转变为生产实际的应用当中，并且逐步为冶金界所接受<sup>[4]</sup>。在过去的三十多年中，国内外关于中间包冶金的学术研究成果都已经成功地应用于生产实践当中，“中间包冶金学”这个观念已在冶金行业建立并得到充分地认可，随着研究的不断深入，其内涵也在不断地丰富<sup>[5]</sup>。

### 1.2.2 中间包的作用

作为炼钢工艺流程中衔接钢包与结晶器的中间反应器皿，传统连铸中间包的作用主要有：

① 合理贮存钢液，实现开浇、停浇和换包等操作地顺利进行，以保证连续、稳定地供给钢液；

② 钢液的有效分流，有利于多流连铸机由中间包的各个水口将钢液分别分配到其相对应的结晶器里边；

③ 使钢液流股对结晶器里的凝固坯壳冲刷力度减小，并降低钢液的静压力，保持中间包中钢液面的稳定，。

传统的连铸中间包仅仅具备了储存钢液，将其分配到结晶器中，以及稳定注流的功能，由于人们对连铸坯的质量要求不断提升，故将中间包用作钢包和结晶器中间的一个精炼反应器皿<sup>[6]</sup>。

### 1.2.3 中间包的冶金功能

中间包作为炼钢工艺过程中提高钢质量与产量的冶金反应容器，还具有一些精炼功能：

① 钢液的流动形态得到较大地改善，死区的面积相对减小，防止了短路流和卷渣现象的发生，延长了钢液停留在中间包内的时间，同时可改善钢液中夹杂物的去除效果；

② 避免了钢水的二次污染，即避免了钢包下渣、钢水的二次氧化以及耐火材料的侵蚀等危害；

③ 添加合金工艺，钢水成分微调和改善夹杂物形态；

④ 对钢水的温度进行精确控制，可以在需要的时候采取加热的措施，让钢水的过热度始终保持在平稳的状态。

## 1.3 中间包内钢液流动行为的研究方法及现状

### 1.3.1 中间包内钢液的流动特性

作为连续浇铸过程的冶金反应容器，中间包内钢液流动的特征对能量和物质的传递

起决定性作用。考虑到钢液流入和流出的条件, 以及其复杂的结构, 中间包内的流动体系通常是一种非理想的连续流<sup>[7]</sup>。

鉴于中间包射流对中间包内钢水流动形态的巨大影响, 一般在研究过程中将中间包入口处的速度视为垂直于中间包的入口, 故而现在的许多学者研究了中间包二维和三维速度对流动状态和长水口插入深度的影响情况<sup>[8, 9]</sup>。钢液流动注射法通常被认为是液-液喷射, 当钢水以较大速度到达中间包底部之时, 则会转变为驻点流动。当钢水以较大速度从钢包水口流出时, 在注流区域的附近将产生一个带负压的区域, 导致空气被卷入到中间包内, 进而使钢液被二次氧化。当钢液从中间包水口流出时, 若钢液面处于某一个临界的高度之下时, 出水口的上面将会出现漩涡状。

处于工作状态的中间包, 钢包中的钢液由于其自身的重力, 注入到中间包内。在不同时间中间包内熔池中的不同部位存在温度差, 其主要原因在于中间包和钢包内存在温度差, 温度较高的钢包钢液流入中间包后, 在注流附近便形成较高温度区, 从而与熔池其他区域之间就产生了较为显著的温度区域层次。但是, 在一些早期的中间包研究中, 人们认为钢水体积受温度变化而产生的涨缩, 不足以显著影响中间包内钢液的流动, 或者认为钢包与中间包内钢液的温度均高达 1873K, 相互间几十度温差对中间包过程的影响可以忽略, 因此, 在一些已发表的研究中, 中间包过程的物理和数值模拟条件均被简化为等温状态<sup>[7]</sup>。

### 1.3.2 中间包内钢液流动行为的研究方法

在对中间包冶金技术的研究探索中可以知道, 中间包冶金的研究方法主要包括了数值模拟与物理模拟两种, 这是由钢液的高温性和流动的复杂性, 以及进行实际生产实验所需的高昂费用所决定的。

物理模拟是基于相似原理对实体模型进行一定比例地放大、缩小操作来构造物理模型。中间包内发生的物理和化学过程十分复杂, 中间包内钢液的流动因多种因素的变化而发生改变, 为了更加清楚地了解各因素对其流动的影响情况, 更好地指导实际生产过程, 可以通过物理模型实验的方法对中间包的冶金反应过程进行模拟。这种方法较为简单, 易于实施, 因而被国内外许多的研究者所用。但也存在一些缺点, 主要是测量物理量有较大误差, 且物理模型与中间包实体之间仍存在较大差异。

数学模拟是运用微分方程和代数方程来建立数学模型的理论, 可用于对一个过程或其某个方面的描述, 它可以将其分为半经验模型、机理模型和输入输出体系模型<sup>[10]</sup>。为了更好地了解中间包内钢液的流动行为, 可用计算流体力学的思想对中间包流场进行求解。计算流体力学的研究方法, 其本质属性包括计算机实验和数值模拟, 在遵循传统的物理原理的基础上, 还对多维多相系的存在以及各反应过程情况进行了考量。此法可代替很多实物实验研究, 并且能够对其无法观察到的现象、反应机理, 以及变化过程进行监测。然而, 数值模拟会随着差分方法和物理方程选择的改变, 而有不同的精度结果, 因而数值模拟的结果并不完全准确, 但对实际工业生产有较为客观准确的指导作用, 之

后还应通过多次的物理模拟实验、实际生产实验进行验证后方可投入到生产之中。

### 1.3.3 中间包内钢液流动行为的研究现状

近年来,有关中间包冶金过程的研究越来越引起人们的关注,国内外学者使用中间包内钢液流动的物理模拟和数值模拟的方法也很多,并通过这些研究得到的成果来指导实际生产。

钟良才<sup>[11]</sup>针对七流的中包加不同的控流装置后,通过数值模拟来对钢水的流动行为进行模拟研究。对原中包中的隔流挡墙进行改进,并配合湍流抑制器和导流坝改善7流中包内钢液的流动模式,使钢液停留在中包的时间延长,死区面积缩小,给夹杂物的上浮提供了充裕的时间。

Mehdi Alizade 等人<sup>[12]</sup>在非等温的条件下对连铸中包进行了物理模拟(即水模实验),该实验表明在等温和非等温两种条件下,在钢液的混合程度方面,等温情况下的混合程度比非等温情况下的要小,得出的 RTD 曲线都有较大的差别。

Liangcai ZHONG 等<sup>[13]</sup>针对四流中包进行了数学模拟研究,发现加了湍流控制器的中包里钢水的流动形态有明显改善,防止了钢液在其表面产生回流与喷溅的现象。与此同时,挡墙挡坝和湍流抑制器等控流的装置通过合理的方式组合起来,使同一侧的中包的内、外两侧的出水口拥有比较相似的 RTD 曲线,这样就避免了在同一侧的两个出水口流动情况差别大的问题,因而获得更好的钢液流动状态,夹杂物的去除率也大幅提高,铸坯质量得到改善。

段善勇<sup>[14]</sup>在对重钢五流方坯连铸中包的分析研究之后得出,运用正交实验的方法并选用四水平、五因素对挡墙进行设计。在物理模拟和数值模拟双重研究下,得出在最优参数的情况下,加多孔挡墙能够充分发挥中包洁净钢液效果,保证了温度的均匀化,且同时改善了钢液的流动行为,提高了夹杂物的去除率。该研究针对普碳钢,在水口前面加平行的挡墙,有助于钢液温度的均匀,避免了底部击穿的危害,有助于多炉连浇。

陈俊俊<sup>[15]</sup>等通过水模拟实验对包钢的五流非对称中包冶金的技术进行了改造,采用导流隔墙作为中包的控流装置,同时对导流隔墙上小孔的位置和直径来调节包内水钢液的流动,并分析比较得出最优的方案。

M.L.Lowry 等<sup>[16]</sup>运用数学和物理模型的方式对中包进行研究,让钢水成分和温度的分布更均匀,提高了钢水的停留时间平均约达 35%,实验和模拟的结果很好的契合,从而可以知道控流装置为多孔挡板的方案最合理。

S.P.steak<sup>[17]</sup>通过物理模拟对某中包进行了研究,发现未加控流装置的中包内钢液平均停留时间是 70s,而加了挡墙和挡坝以后达到了 180s,加多孔挡板之后则延长至 230s,并且得出加了挡墙、挡坝和挡板后,给夹杂物的上浮提供了充足的时间。

富平原等人<sup>[18]</sup>运用物理模拟的方法对 3 流 T 型和梯形中包,以及其内钢液的流动行为作了研究,确定了中包内挡墙、挡坝的合理尺寸和位置,并得到了梯形中包在多方面都比 T 型中包更为良好的结论。在加了挡墙与挡坝的中包里,水口处的夹杂

物去除率得到显著提高,将T型中间包换成梯形中间包,夹杂物去除率由6%增加到39%。

K.saylor<sup>[19]</sup>对中间包钢液流场问题进行了物理模拟研究,此研究表明了,加了合适尺寸的挡墙和挡坝的中间包对钢水湍动能强度可显著降低,且增加了钢水在中间包内的平均停留时间,使活塞流区域的面积也增加了超过了一倍,防止了在钢包进行开浇的时候中间包内的钢水产生强烈冲击力的问题。

王一成等人<sup>[20]</sup>针对中间包内钢液流动情况建立了水力学模型,该实验研究发现,未加任何控流装置的中间包内五个流的流动形态明显的不相同,水口附近的钢液流股响应的的时间特别短暂,而加了挡渣堰、V型挡墙和等腰梯形挡墙的中间包大大地改善了包内钢液流场的分布,并且提高了出水口1和5的温度。

佐祥均<sup>[21]</sup>通过数值和物理模拟两种方法,针对重钢的1号方坯连铸中间包相关情况得出了合理的湍流控制器能够很大程度上使钢液的流动行为得到改良,钢水停留在中间包里的时间得到了增加,钢水中夹杂物的上浮率得到显著提高。在加了湍流控制器以后,对于粒径较大的夹杂物(50微米、75微米)能够更好地去除,粒径较小的夹杂物(5微米)也有部分被去除。

## 1.4 本课题研究目的及主要内容

### 1.4.1 本课题研究目的

由于广大用户对钢材质量的要求逐渐趋向于严格化,作为精炼反应器的中间包也逐渐受到了人们的关注。中间包作为连续铸钢生产流程中所必需的一种中间设备,是炼钢生产中由间歇操作到连续操作的衔接点。它不仅应用于钢液的储存和分配,也可以作为一个钢液精炼的容器。通过中间包冶金手段,可以连铸坯的质量提高,并且稳定其工艺流程。而加了控流装置后的中间包,无论是其包内钢液的温度和成分的均匀,还是非金属夹杂物的去除率都得到了很大的改善。

鉴于达州钢铁集团有限公司的主要产品由原来的螺纹钢改变成了硬线钢(如45号钢、60号钢、70号钢等中高碳钢),故对钢液的纯净度要求有所提升。为了进一步提高中间包钢液中夹杂物去除率,本课题旨在设计出一种连铸中间包控流装置,即加尺寸和结构合理的挡墙,提高钢液的纯净度,从而获得高质量的铸坯。

### 1.4.2 本课题研究的主要内容

本课题以达钢五流T型中间包为研究的对象,研究的重点内容是控流装置的设计,对不加任何控流装置的中间包和加不同挡墙的中间包内流场、温度场和不同尺寸夹杂物去除率的模拟研究,并对分析比较中间包内尺寸不同的夹杂物在不同控流装置设计和布置情况下的去除效果。主要的计算内容包括:

① 利用FLUENT这一软件对不加控流装置的中间包内的钢水流动状态与传热耦合过程进行数值模拟研究。依据模拟结果,再对中间包内流场、温度场的基本特征和不同尺寸夹杂物的上浮率进行分析。

② 利用 FLUENT 这一软件对加不相同挡墙时中间内进行流动与传热耦合过程的三维数值模拟研究。依据模拟结果，再对加不同挡墙后的中间包内钢液流场、温度场的特征以及不同挡墙设计下不同尺寸夹杂物的去除率进行分析。

③ 分析比较不同挡墙设计对中间包内钢液流场、温度场以及其内不同大小的夹杂物去除效果的情况，获得最佳的挡墙设计及其工艺参数，为工业实验的进行奠定基础。

## 1.5 小结

本章简要介绍了连铸技术的发展、中间包冶金的发展及其作用和冶金功能、钢液流动的特性和研究方法，总结了国内外学者对中间包内钢液流动行为的研究概况，最后阐述了本课题的研究目的及主要内容。

## 2 中间包内钢液流动行为的数值模拟

### 2.1 FLUENT 软件简介

FLUENT 软件在商业 CFD 软件包的世界领域内越来越流行, 适用于涉及到流体、传热和化学反应工程问题等, 拥有领先的数值模拟方法、充足的物理模型和巨大的处理功能, 在美国市场的占有率达到 60%。

#### 2.1.1 FLUENT 软件的基本组成

一般认为 FLUENT 软件包由下面几个部分所构成:

① 前置处理器: GAMBIT 是生成网格的预处理器, 是一种特殊的 CFD 前置处理器, 拥有非常强的模型处理能力。

② 求解器: 作为流体计算的核心部分, 针对专业领域的不同, 可以将其划分为如下的类别:

- 1) FLUENT4.5: 采用结构化网格求解器;
- 2) FLUENT6.2.16: 通用 CFD 求解非结构化的网格;
- 3) FIDAP: 通用 CFD 求解器是利用有限元的思想, 主要运用于流固耦合的;
- 4) POLYFLOW: 专用 CFD 求解粘弹性流动的问题;
- 5) MIXSIM: 专用 CFD 软件求解液体搅拌混匀的问题;
- 6) ICEPAK: 专用 CFD 软件分析控制热度。

③ 后处理器: FLUENT 软件在求解方面具有很强的功能。(除此之外, Tecplot 同样是一种功能极强的后置处理器, 能够把很多计算结果变得显而易见。)

#### 2.1.2 FLUENT 软件的用途

FLUENT 软件在汽车、航空、加工的设备或机械、以及电子, 发电, 水利, 材料加工, 建筑设计, 环境保护等领域得到了广泛的应用, 其主要的模拟计算能力包括<sup>[22]</sup>:

- ① 使用非结构化自适应网格中的各种流动求解二维或三维区域;
- ② 非牛顿或牛顿流体;
- ③ 可压、不可压的流动;
- ④ 无粘性的层流、湍流;
- ⑤ 瞬态或稳态分析;
- ⑥ 质量, 化学组分, 热量, 动量以及湍流模型;
- ⑦ 离散相(如颗粒, 液滴, 气泡)的轨迹和连续相耦合的模拟;
- ⑧ 不同热交换, 例如强制对流, 自然对流, 混合对流及辐射等;
- ⑨ 多孔介质中的流动;
- ⑩ 复杂外形的自由表面流动。

### 2.1.3 FLUENT 软件的求解步骤

利用 FLUENT 解决问题的步骤如下所示<sup>[23]</sup>:

- 1) 对某一区域流场的各项几何参数进行定义, 然后进行网格的划分;
- 2) 启动所需要的求解器;
- 3) 输入网格;
- 4) 检查网格;
- 5) 选择所需要的求解器的类型;
- 6) 选择求解过程所用的方程;
- 7) 定义物质的属性;
- 8) 定义边界的条件;
- 9) 调整控制参数;
- 10) 初始化流场;
- 11) 开始求解;
- 12) 迭代完成之后, 对计算结果进行检查;
- 13) 储存结果;
- 14) 在得出不理想的结果时, 能够通过物理模拟或网格的调整重新进行计算。

## 2.2 流场数值模拟的基本原理

### 2.2.1 有限体积法

有限体积法 (Finite Volume Method), 是目前 CFD 软件包的离散化方法, 它被应用得很多, 其基本思想是: 划分计算区域网格, 所以在每一个网格节点的非反复的相互控制体积。对每个控制体积的积分可通过需要求解的控制方程 (即是微分方程) 来实现, 进而获得一组离散方程<sup>[3]</sup>。根据未知解的近似解的方法可以控制体积法中的离散方法采用一种局部逼近, 并根据积分区域的方法, 控制体积法中的子域法加权残数法。

通用流体力学微分方程:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\mu\phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right] + S \quad (2.1)$$

控制体积法的主要步骤主要如下:

① 解区域使其离散化, 包含了对时间和空间两个区域的离散化 (通常被采用的模式有: 一阶迎风式的混合模式、中心差分的模式、乘方的模式和指数的模式等); 节能型控制在任何控制量及间隔时间的空间和时间的积分方程。

② 选择未知函数及其导数的局部分布曲线的时间和空间的整合。

③ 依据选好的型线对各个项进行积分, 并根据节点上的未知数, 改写为代数方程。通过离散得到的方程如下:



$$\alpha_p \phi_p = \alpha_E \phi_E + \alpha_w \phi_w + b \quad (2.2)$$

采用控制容积法中的积分控制方程，以产生在其控制节点的离散方程。通过在积分过程中选定型线来推出离散方程，型线的作用也将在离散方程建立起之后结束。所以选取型线的标准为：能够形成具有很好数值特征的离散方程，以便实施。

① 容积界面上的相容性：为了避免相容性遭到破坏，可认为界面上的流量由相邻的控制容积共同确定，且在控制容积界面上的任意一个流量都有且只有一个固定的值。

② 所有系数均为正值：离散化方程中通用的相关系数  $\alpha_p$ 、 $\alpha_E$ 、 $\alpha_w$  均为正数。

③ 源项具有负斜率：线性源项  $S = S_0 + S_p \phi_p$  的  $S_p$  为负或零。

④ 邻近系数之和原则：在基本方程中仅仅包含了变量的二阶项时，有  $\alpha_p = \sum \alpha_{nb}$  即  $\alpha_p$  是邻近节点的系数之和。

### 2.2.2 基本假设

由于中间包内钢液的流动极为复杂，因此需要对中间包内钢液流动作出如下的假设：

① 中间包内钢水的流动状态被假设为不可压缩的且具有稳态性质的黏性流动；

② 初始状态为静态，即是说壁面处的拉速为零，且湍动能  $k = 0$ ，湍动能耗散率  $\varepsilon = 0$ ；

③ 忽略中间包覆盖物（如保护渣等）和钢液面波动的影响，中间包液面被看作是自由液面；

④ 将钢液看作均相介质；

⑤ 将中间包的热量传输过程看作是稳态过程；

⑥ 夹杂物视为极小球状物，其对流场的影响忽略不计；

⑦ 夹杂物与钢液的密度差驱使夹杂物向上运动。

### 2.2.3 控制方程

中间包内钢液流动这一复杂过程可通过如下的偏微分方程表示：

① 连续性方程

根据净质量法“在同一时间段内，它在微元流体里，单位时间内增加的质量”，针对处于稳态的流体可以得出连续性方程：

$$\frac{\partial(\rho\mu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\mu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\mu)}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

② 动量方程（N-S 方程）

动量守恒定律可以描述为：微元体中流体的外部力量作用与其动量对时间的变化率相等。动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g \quad (2.4)$$

式中,  $\rho$ 是钢液的密度,  $\rho=6880 \text{ kg/m}^3$ ;  $P$ 是压力, Pa;  $g$ 是重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $u$ 是速度,  $\text{m/s}$ ;  $\mu$ 是有效粘度,  $\mu=0.0062 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $i$ 和 $j$ 表示坐标轴的方向。

### ③ 能量方程

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} H) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{C_p} \nabla H \right) + S_h \quad (2.5)$$

式中,  $C_p$ 是流体比热容,  $\text{J/kg}\cdot\text{°C}$ ;  $S_h$ 是热源相;  $k$ 是流体的导热系数,  $\text{W/m}\cdot\text{°C}$ ;  $H$ 为热焓, 定义为:

$$H = \int_{T_{ref}}^T C_p dT + h_{T_{ref}}^0 \quad (2.6)$$

### ④ $k$ - $\varepsilon$ 双方程模型

中间包内的钢液流动均为湍动流动, 通常为大众所采用的湍流模型是标准  $k$ - $\varepsilon$ 模型, 其方程如下:

#### 1) 湍动能 ( $k$ ) 方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (2.7)$$

#### 2) 湍动能量耗散率 ( $\varepsilon$ ) 方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.8)$$

式中,  $u_i$  ( $i=1,2,3$ ) 分别表示三个坐标轴方向的速度值;  $k$ 为湍动能;  $\varepsilon$ 为湍动能耗散率;  $G$ 为湍动能产生项;  $\mu_{eff}$ 为有效粘性系数。

其中,

$$G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.9)$$

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu \quad (2.10)$$

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.11)$$

表 2.1 湍流模型系数的取值

$C_1$	$C_2$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1.43	1.93	0.09	1.0	1.3

### ⑤ 夹杂物运动方程

模拟夹杂物在中间包内的运动通常选择离散相模型进行模拟，且由假设可得，在中间包内非金属夹杂物的上浮速度是遵守斯托克斯方程的，其运动方程为：

$$\frac{\partial \rho C_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u C_i}{\partial x} + \frac{\partial \rho v C_i}{\partial y} + \frac{\partial \rho (w + w_{jz}) C_i}{\partial z} = \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{in}} \left[ \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right] + S_i \quad (2.12)$$

## 2.2.4 边界条件

结合达钢 5 流 T 型中间包的实际情况，给出如下边界条件：

① 入口：入口处设置为 velocity-inlet，长水口内径为  $D_{in} = 70mm$ ，入口速度设置为  $v_{in} = 150 \times 150 \times 2.5 \times 5 \div (3.14 \times 35^2 \times 60) = 1.2186m/s$ ，由经验公式可知：

$$k_{in} = 0.01 v_{in}^2 \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_{in} = \frac{2k_{in}^{1.5}}{D_{in}} \quad (2.14)$$

② 出口：出口处设置为 outflow，流动设置为自由流动，各物理量沿该法向导数均为零。

③ 中间包液面：即为自由表面，各物理量的法向导数均为零。

④ 对称面：对称面设置为 symmetry，垂直于该平面的速度为零，其它各物理量的梯度也均为零。

⑤ 壁面：各壁面设置为无滑移边界条件，其钢液表面散热量和传热量视为常数，如表 2.2。

表 2.2 中间包各壁面的边界条件

边界	中间包顶面	中间包宽侧面	中间包窄侧面	中间包底面
散热量/ $Q(W/m^2)$	15000	3800	3200	1400

⑥ 夹杂物：入口设置为 reflect(反射)；各壁面设置为 reflect(反射回钢液)，且设为 constant 1（全部反射）；中间包液面设置为 trap(追踪)；出口设置为 escape(渣层捕捉)。

## 2.3 中间包计算模型的建立及方案的设计

### 2.3.1 中间包几何模型

本课题的研究对象是达钢的五流 T 型中间包, 如图 2.1 所示, 生产工况参数如表 2.3 所示。

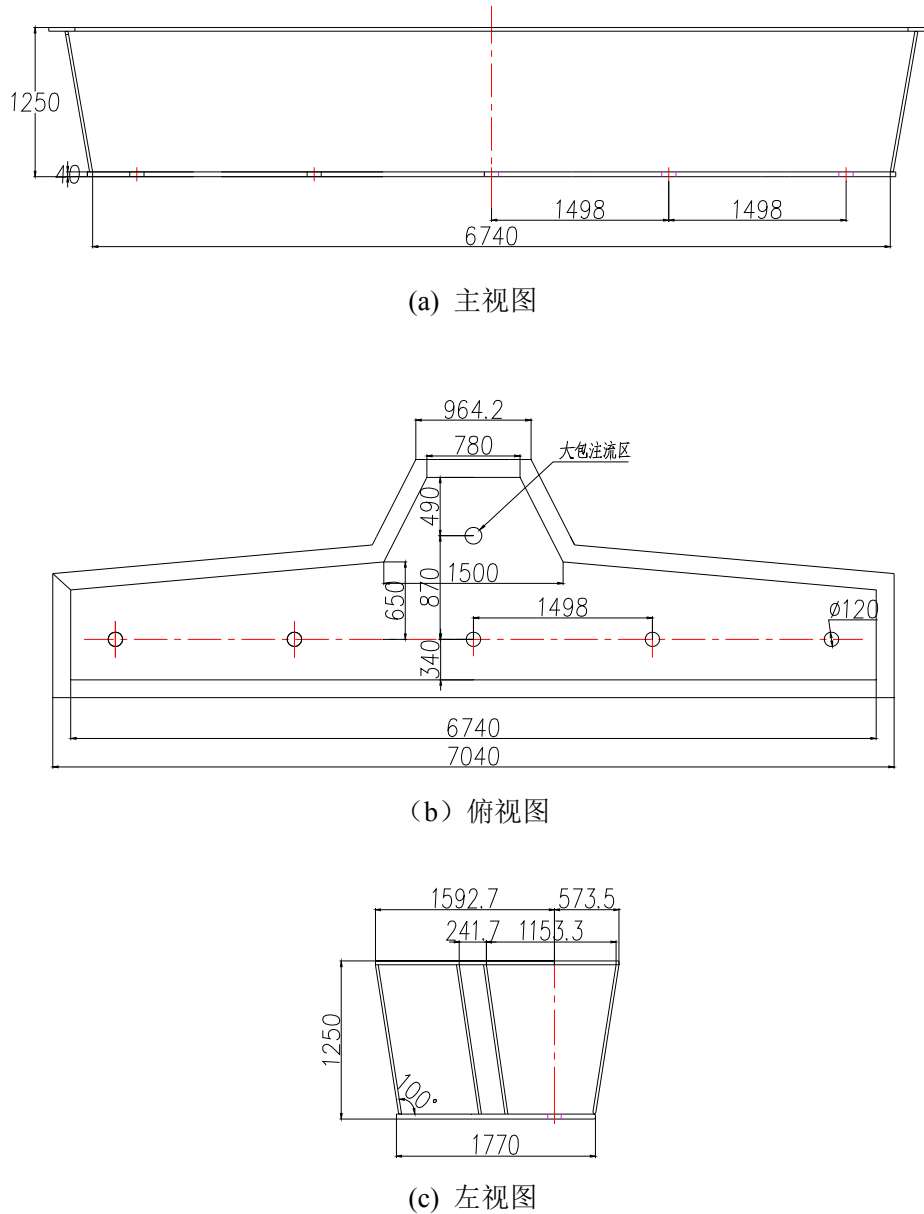


图 2.1 中间包的几何尺寸

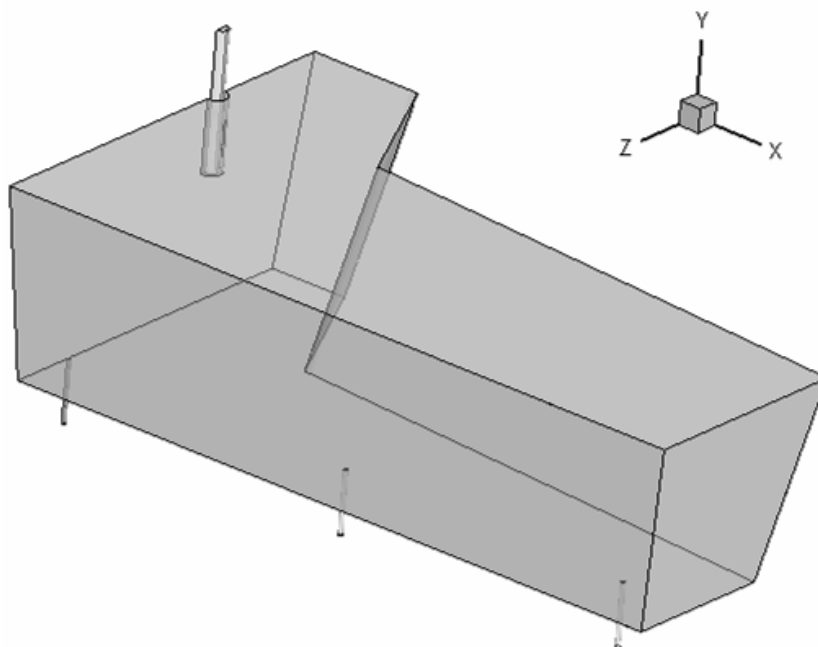
表 2.3 中间包的生产工况参数

参数	数值
流间距 (mm)	1498
长水口内径 (mm)	70
水口插入深度 (mm)	350
浇铸钢种	45 号钢
入口速度 (m/s)	1.2186
出口内径 (mm)	22

### 2.3.2 研究方案及其网格模型

本课题研究的是达钢的 5 流 T 型中间包, 为了能够进一步提高中间包内钢液夹杂物的去除率, 缩小中间包各个出口处钢液的温差, 通过数学模拟的方式分析研究最为合理的中间包内挡墙的尺寸。鉴于该中间包的对称性, 在用 ANSYS 软件计算时只对其右半边部分进行模拟, 坐标原点取在中间包对称面的底边顶角上, 坐标轴方向如图右上角所示。根据已知条件和前人工作总结分析, 设计了如下方案。

① 方案 1 是未装任意控流装置中间包, 图 2.2 即为该方案的三维图及其计算区域的网格划分。



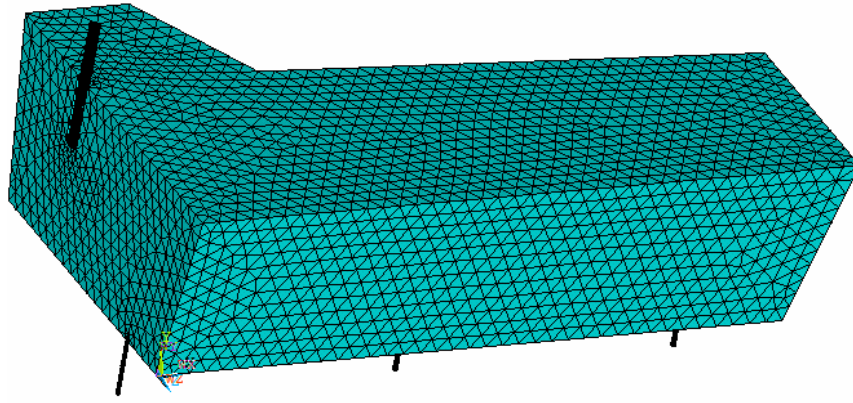


图 2.2 方案 1（无挡墙）

② 方案 2 为加 1#挡墙的中包，1#挡墙的形状为 U 型，中间挡墙不开任何孔，侧墙上开四个直径均为 80mm 的孔，四孔处于上偏 15°、右偏 45°位置上。

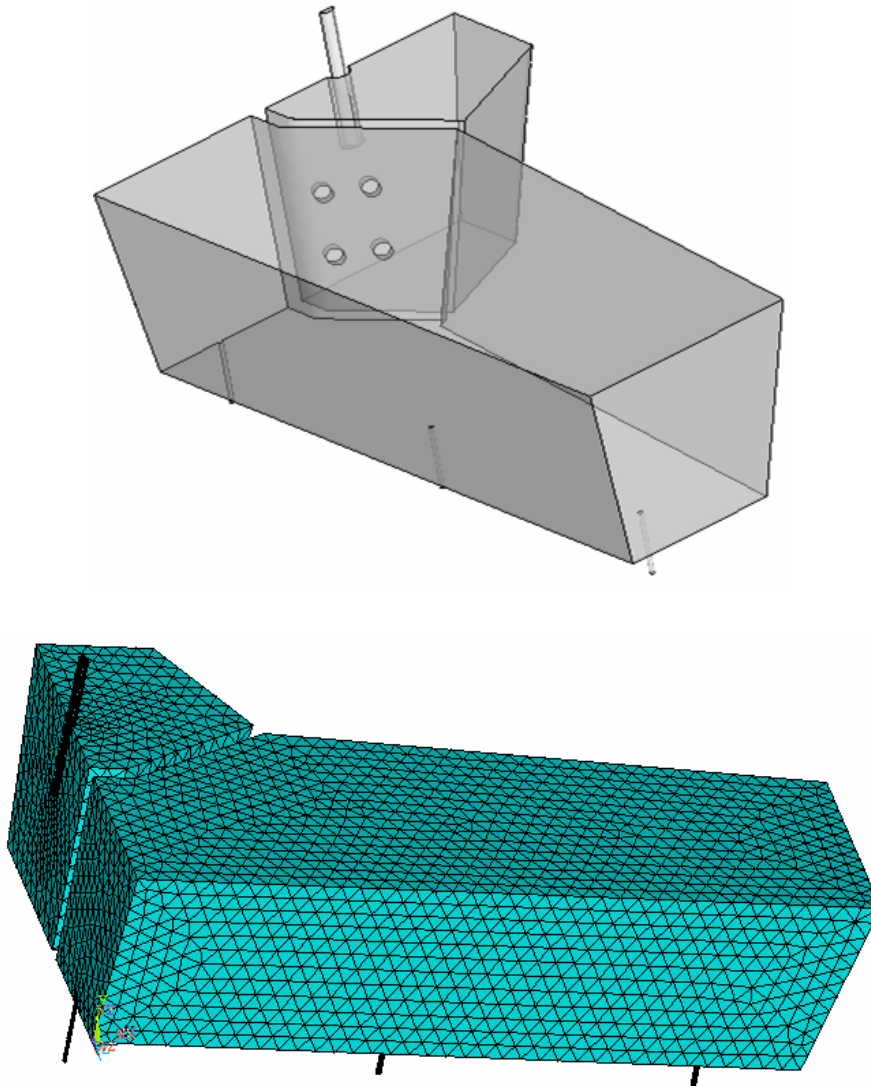


图 2.3 方案 2（加 1#挡墙）

③ 方案3为加2#挡墙的中包,挡墙2的形状为U型,中间挡墙开一个直径为60mm的孔,侧墙开两个直径均为90mm的孔,两孔处于上偏15°、右偏45°位置上。

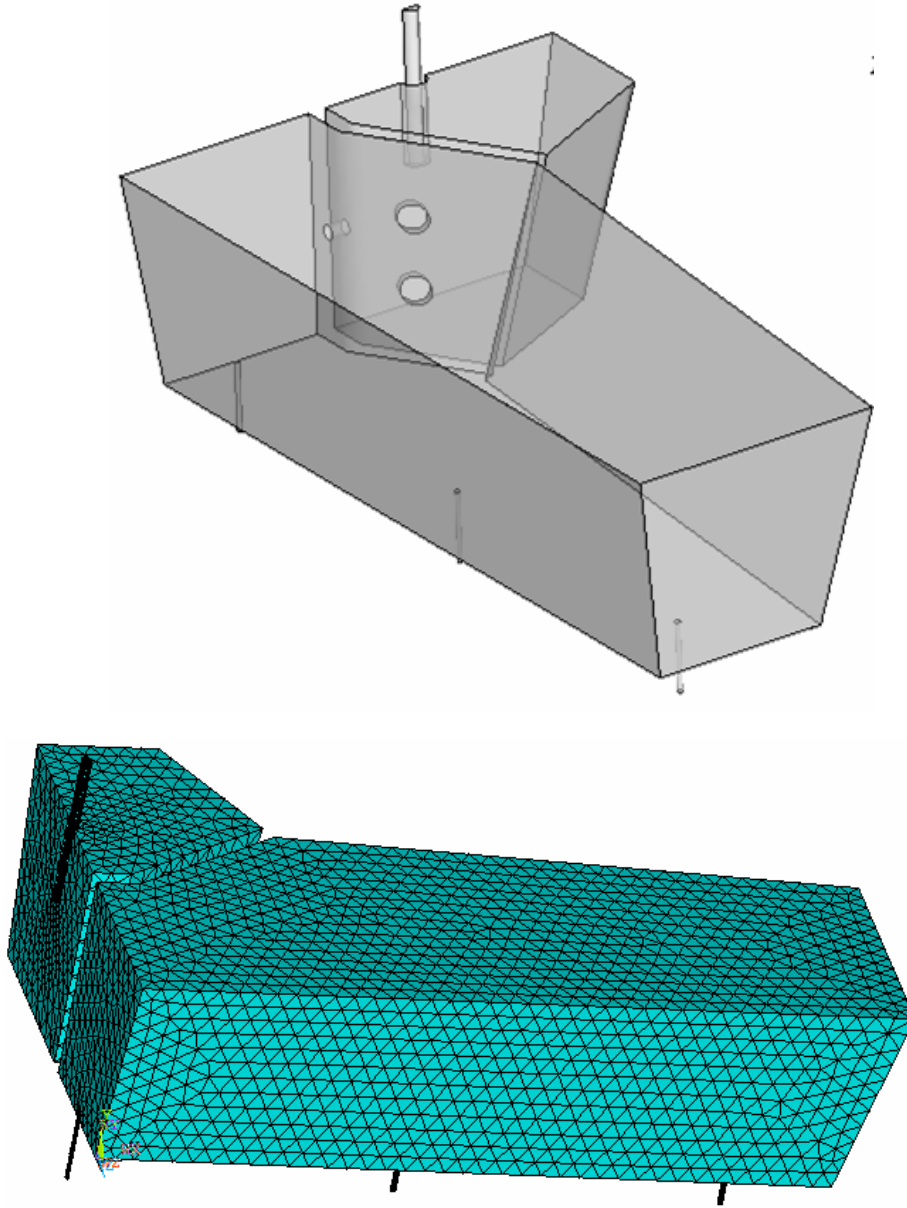


图 2.4 方案 3 (加 2#挡墙)

④ 方案 4 为加 3#挡墙的中包,3#挡墙为直角形的挡墙,侧面墙开一个直径为200mm的孔,中间挡墙不开任何孔。

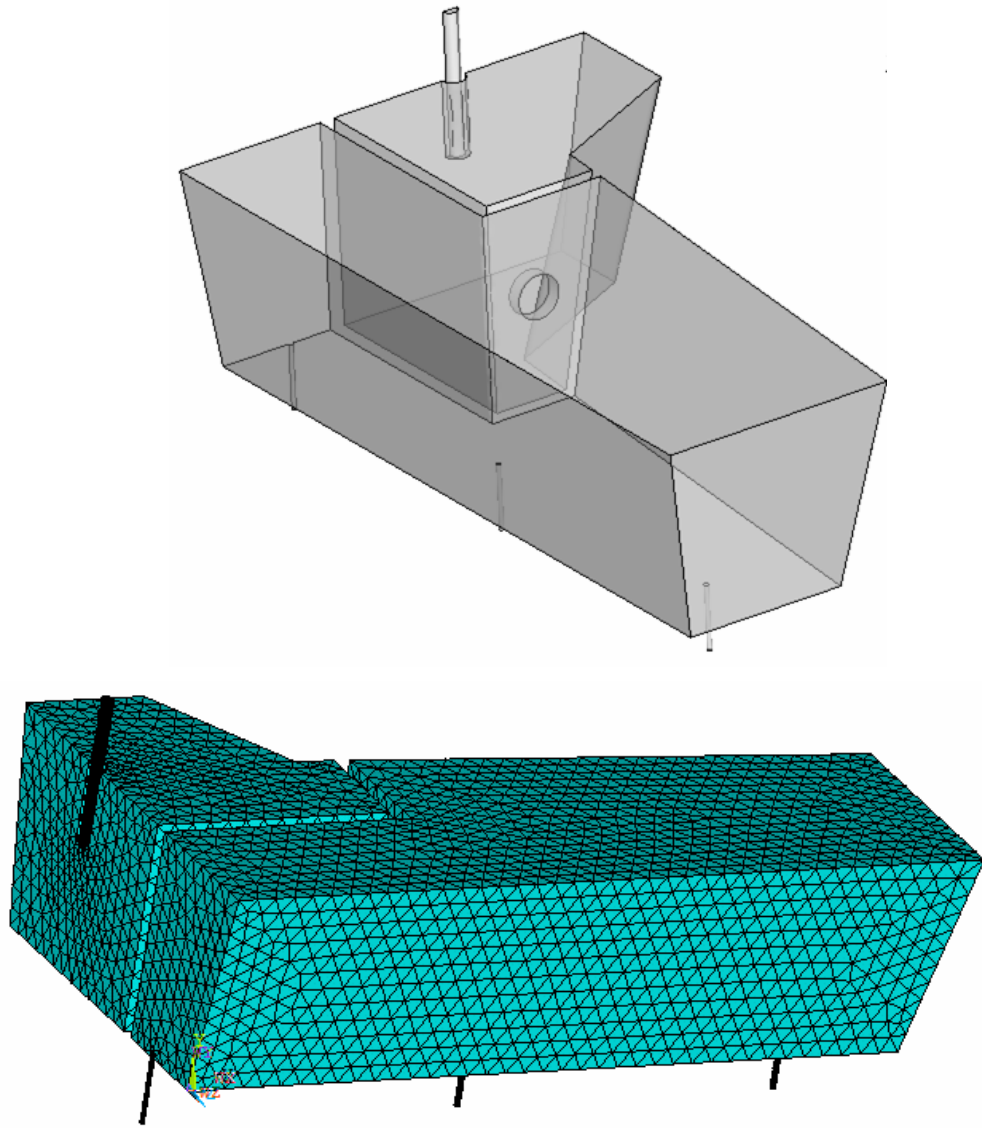


图 2.5 方案 3 (加 3#挡墙)

## 2.4 数值求解

本课题以达钢五流 T 型中间包炼 45 号钢的实际操作流程和结构参数为例, 如表 2.4 所示, 运用 FLUENT 模拟计算, 使用 SIMPLE 算法, 设置其收敛残差为  $10^{-4}$ 。



表 2.4 中间包数值模拟基本物性参数

参数	取值
密度(kg/m <sup>3</sup> )	6880
钢液粘度 (kg/m s)	0.0062
浇注温度(K)	1823
导热系数(W/m. K)	42.4
比热 (J/kg K)	480
浇注速度 (m/s)	1.2186
钢包长水口直径 (mm)	70

## 2.5 小结

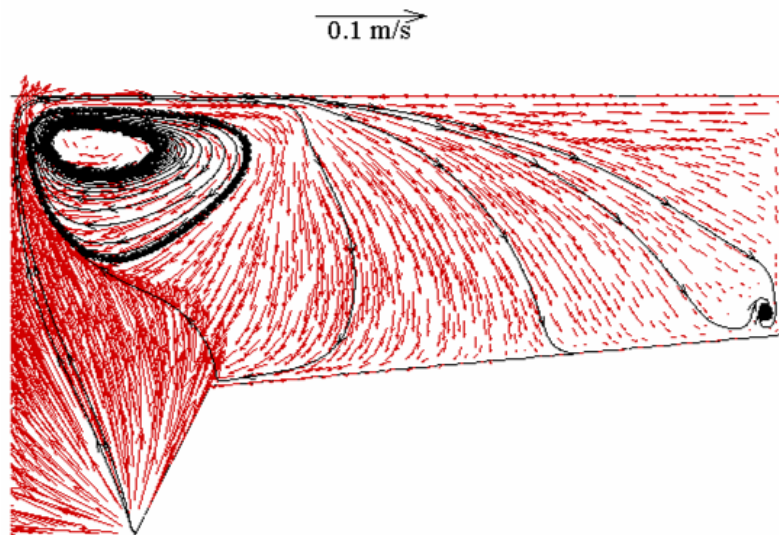
本章简要介绍了商业软件 FLUENT 的基本组成、用途和求解步骤，详细地阐述了数值模拟的基本原理和数学模型的建立，最后给出了本课题所设计的研究方案。

### 3 结果与分析

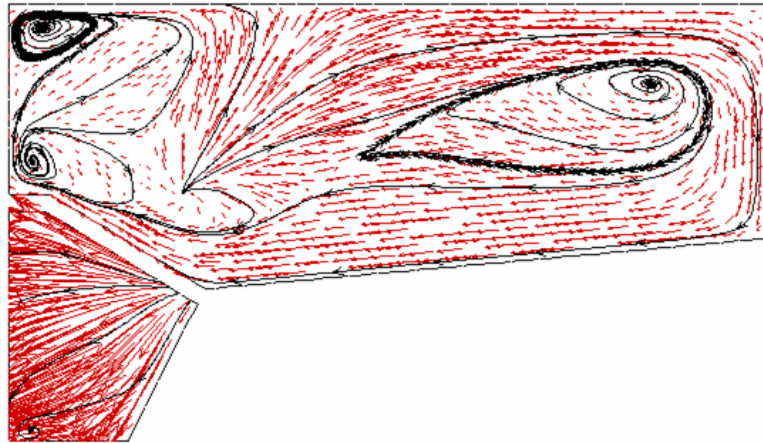
本课题运用 FLUENT 软件对几种实验方案进行模拟计算,然后利用 TECPLOT 软件作出中间包内的流场和温度场图,最后再运用 OriginPro 8 绘出不同尺寸夹杂物的去除率比较图。

#### 3.1 中间包内钢液的流场分析

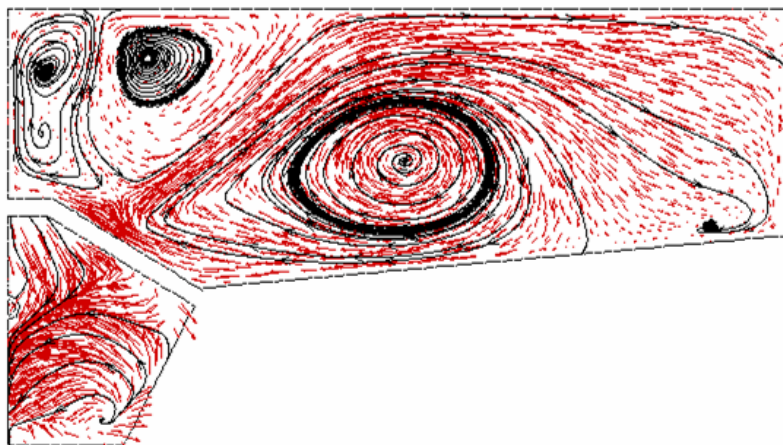
图 3.1 为 T 型中间包顶面的流场图。由无控流装置中间包顶面的流场图 (a) 可以看出,钢包中的钢液经由长水口流入到中间包,并直接到达中间包的底部,在包壁面的反弹作用下向四面散开,浸入式水口的上方产生了一个顺时针的小型环流,在该环流的影响下,中间包的底部同时也形成了一个极小的环流,中间包短流现象明显,钢液不能很好的达到广范围的循环。与无控流装置的中间包相比,加了挡墙的中间包钢液流动情况明显得到改善,出现了更多更大的回旋流,这样就延长了钢水在中间包内的逗留时间,促进了夹杂物的去除。进一步分析加不同挡墙中间包的钢液流场图可以看出,加 1#挡墙和 3#挡墙的中间包内钢液流动还是较为混乱,虽然形成了部分的回流,但仍存在一定范围的死区,不能让钢液在中间包内得到充分地混合。相比之下,加 2#挡墙的中间包内钢液从长水口流出后在包内形成了较为稳定的回流区,对中间包内钢水的成分和温度的均匀有很好的效果,延长了钢水在中间包中的逗留时间,有利于夹杂物的上浮。



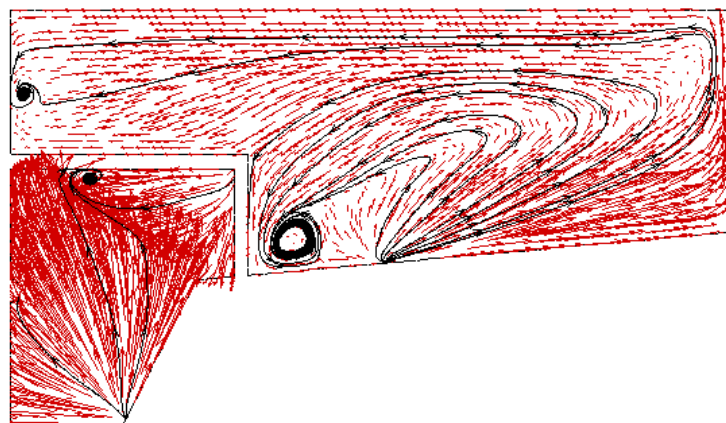
(a) 方案 1 (无挡墙)



(b) 方案2 (加1#挡墙)



(c) 方案3 (加2#挡墙)

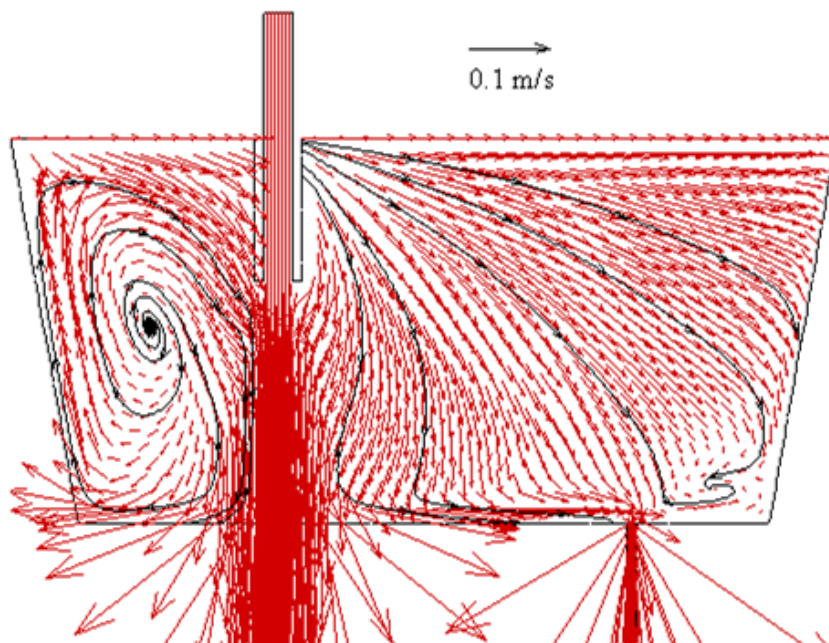


(d) 方案4 (加3#挡墙)

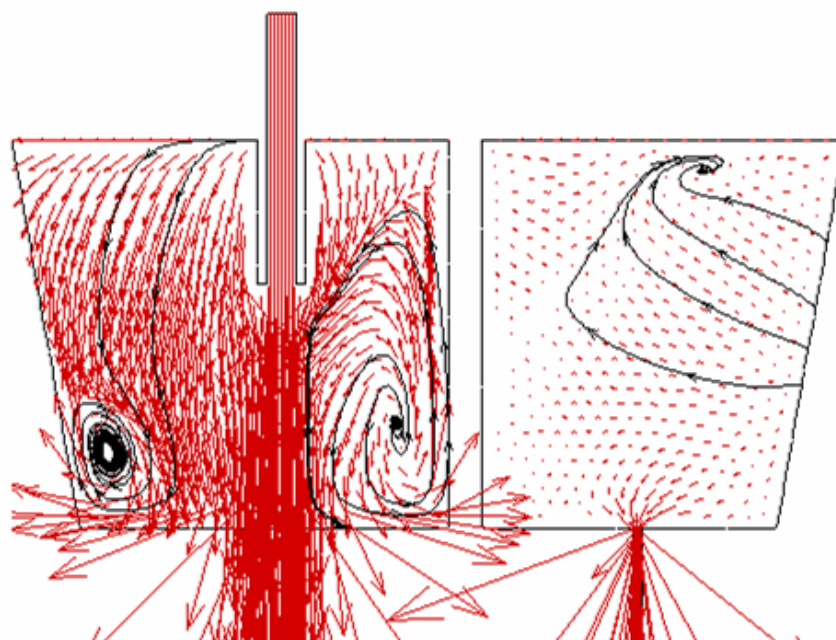
图 3.1 中间包内钢液面的流场

图 3.2 为 T 型中间包对称面的流场图。如图 3.2 (a) 所示, 在未加任何控流装置的中  
间包流场中, 钢包内钢液以较大的速度由长水口注入到中间包, 在中间包底部冲击力  
的作用下, 以较大的速度反弹回流, 向四面散开, 而且湍动能很大。由于底部存在击穿

流，导致了钢包注流区内温度较高的钢水在中间包中待的时间较短，死区面积较大，夹杂物上浮率降低，铸坯质量下降。从图 3.2 (b)、(c)、(d) 中可以看出，在加了挡墙后，湍动能的强度得到了控制，避免了液面的波动和紊流地进一步扩散，有利于夹杂物的上浮，减少了中间包中底部击穿流的现象，对提高铸坯的质量有一定的作用。进一步对比分析加了挡墙的各个方案对称面的流场图可以得出，加了 2#挡墙 的中间包由于形成了更好的回流区，其湍动能强度更小，钢液在中间包内的时间也有所增加，从而达到更好地净化钢液的目的。

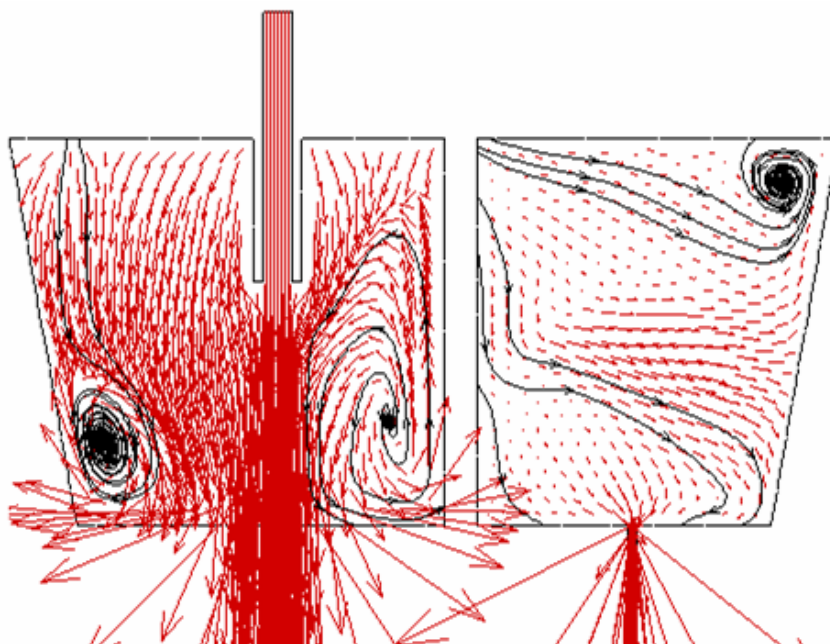


(a) 方案 1 (无挡墙)

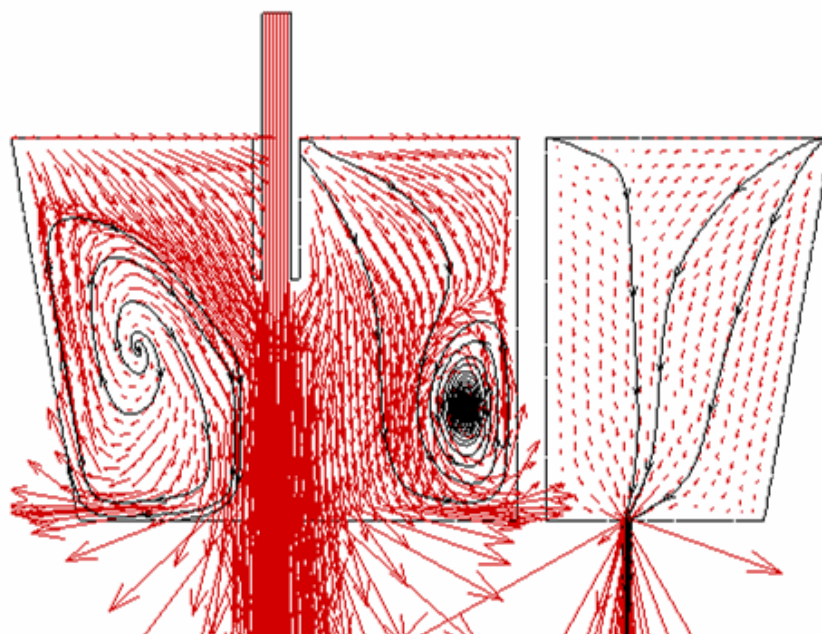


(b) 方案 2 (加 1#挡墙)





(c) 方案3 (加2#挡墙)



(d) 方案4 (加3#挡墙)

图 3.2 中间包对称面的流场

### 3.2 中间包内钢液的温度场分析

在非等温的条件下，中间包内钢液流动行为的研究对生产实际的指导作用尤为重要，也越来越受到广大学者的青睐。在钢水连铸过程钢包注入到中间包内，通过包的流数和相关工艺参数，再流入到结晶器里边。在这个过程中，经常需要超过10分钟到几十分钟，没有额外的加热的情况下，钢水辐射热到环境中导致钢包、中间包的温度一直在

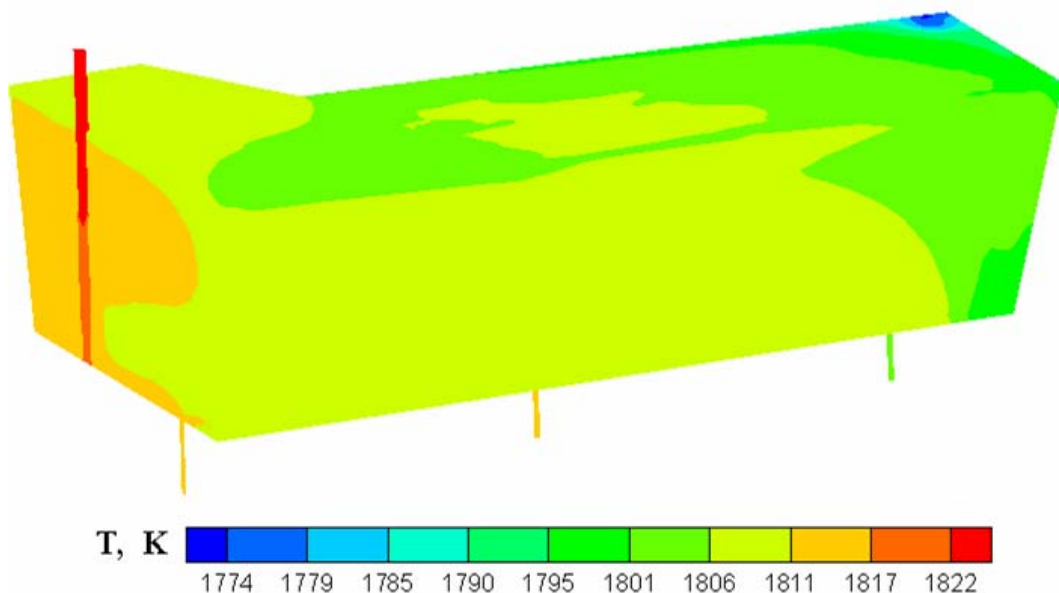
下降，此时钢包内和流入中间包后的钢液温度在不同的时间段有一定的变化，但基本处于相对稳定的状态<sup>[24]</sup>。

图3.3、3.4、3.5分别为各个方案中间包的三维温度场、顶面温度场和对称面温度场。无控流装置的中间包内钢液的最高温度达到了1820.0K，也是中间包入口区的温度，中间包出口的钢液温度为1805.5K，从中间包入口到其出口温度降低了14.5K，钢液之间出现了高、低温度不同的层次，但由于无控流装置的中间包内钢液存在短路流的情况，导致中间包顶部的温度仍然较低，并且在中间包上方的棱角处出现明显的低温现象。再观察加了挡墙的各个中间包温度场，不难看出在加了挡墙以后，其中间包内钢液的最高温度达到了1821.0K，中间包出口的钢液温度为1808.6K，从中间包入口到其出口温度降低了12.4K，也产生了高、低温度的分层，且在中间包上方的棱角处出现了极小范围的低温现象，但相比中间包无控流装置，其温度要高些，而且有更均匀的分布。分析比较各图，可以得出：

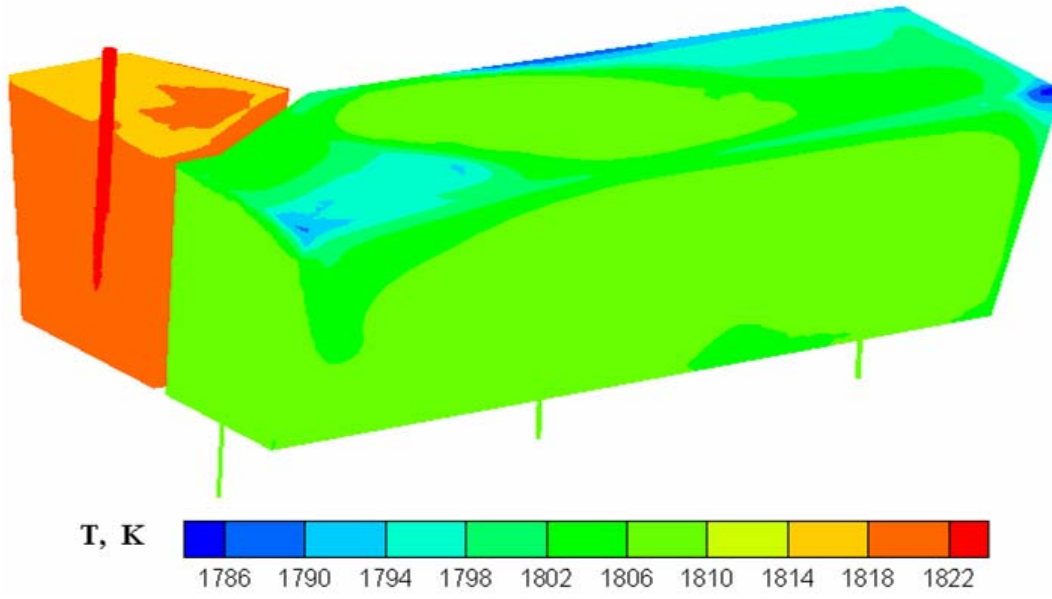
① 未加任何控流装置的中间包的温度场有较大面积的低温区，并且在钢液入口周围温度迅速地下降，这表明了几乎全部的高温钢液都聚集在中间包的底面部分，没有较高温度的新鲜钢液到达中间包钢液的顶部；

② 在加1#挡墙和3#挡墙的各个方案中，因为挡墙的作用使温度高的钢水在挡墙内完全地搅拌混匀，从而缓和了钢水的降温速度，缩小了低温区域的面积，但是在钢液流过挡墙以后，随着混合后的钢液逐渐向中间包底部流动，温度降低的速度加快；

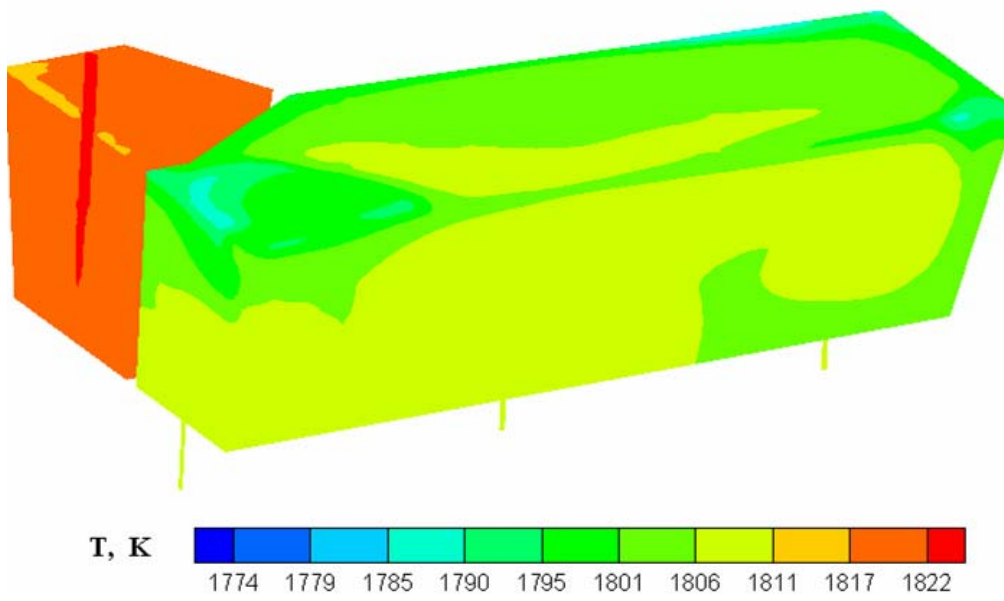
③ 在加2#挡墙的方案中，其中间包温度场中，低温区域的面积显著缩小，在钢水入口周围及钢水通过挡墙之后的全过程中降温速度变缓，温度分布更为均匀。



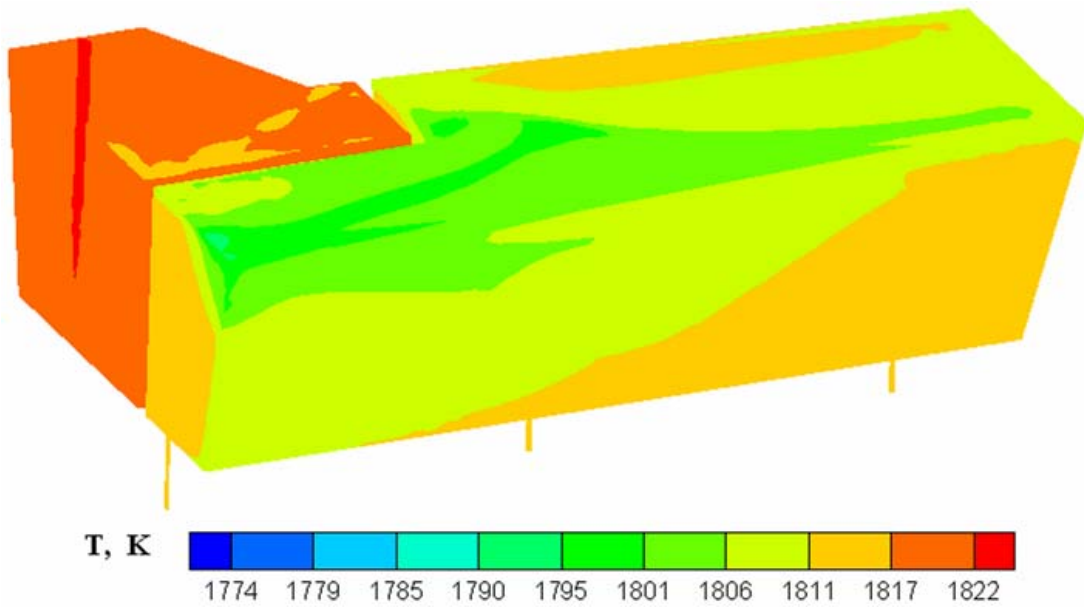
(a) 方案1 (无挡墙)



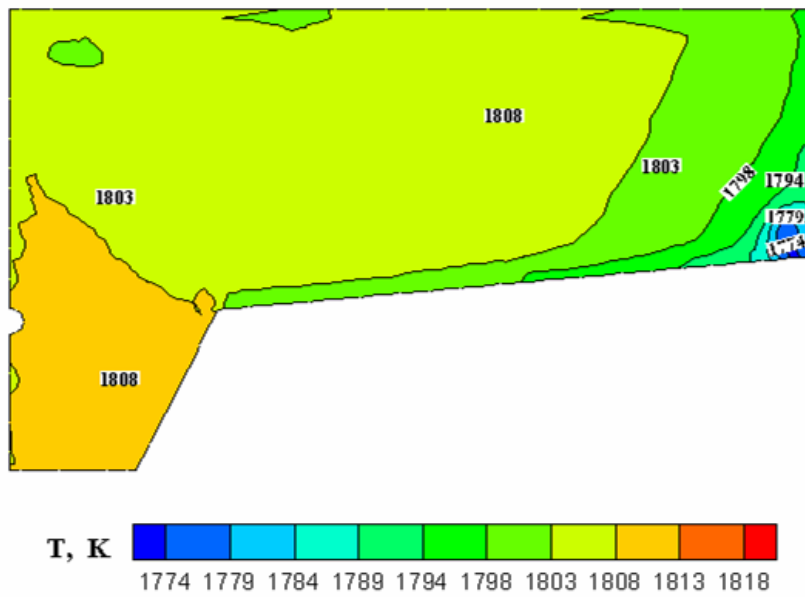
(b) 方案 2 (加 1#挡墙)



(c) 方案 3 (加 2#挡墙)

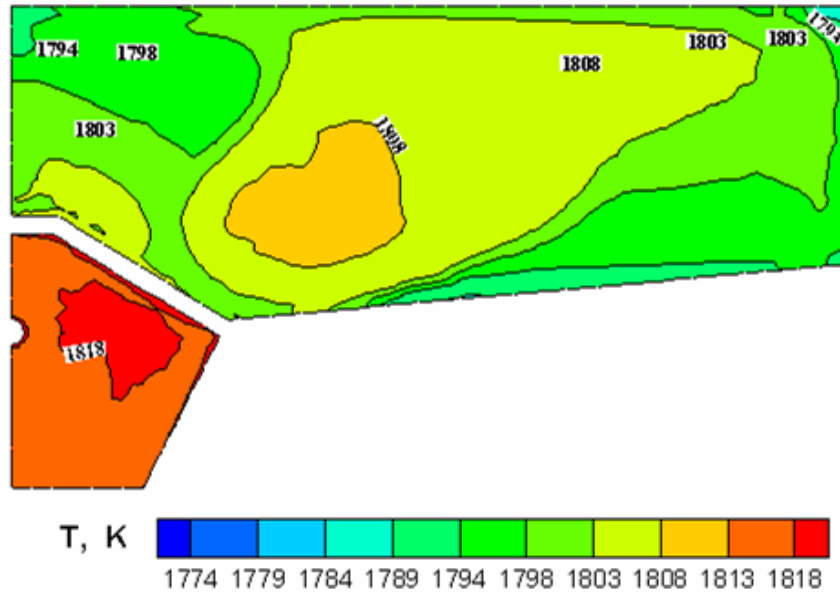


(d) 方案4 (加3#挡墙)  
图3.3 中间包的三维温度场

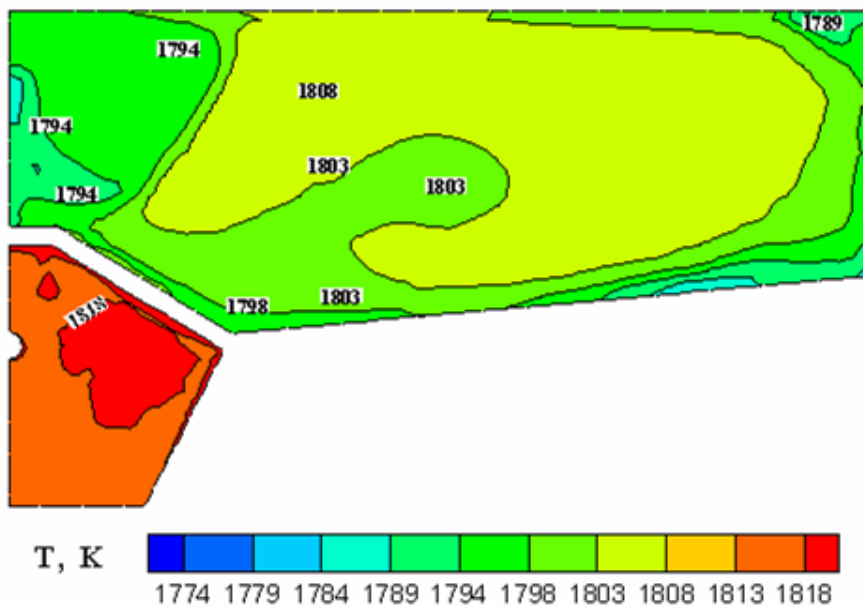


(a) 方案1 (无挡墙)

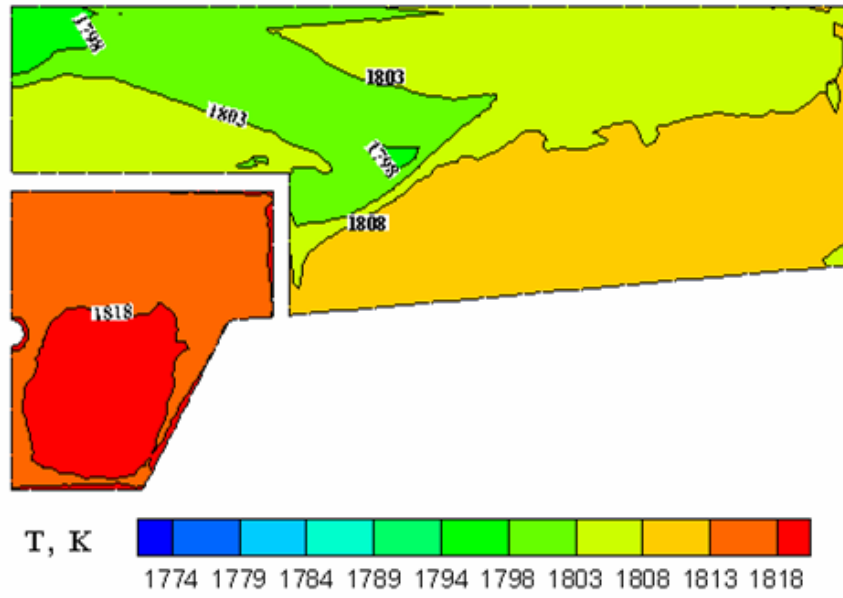




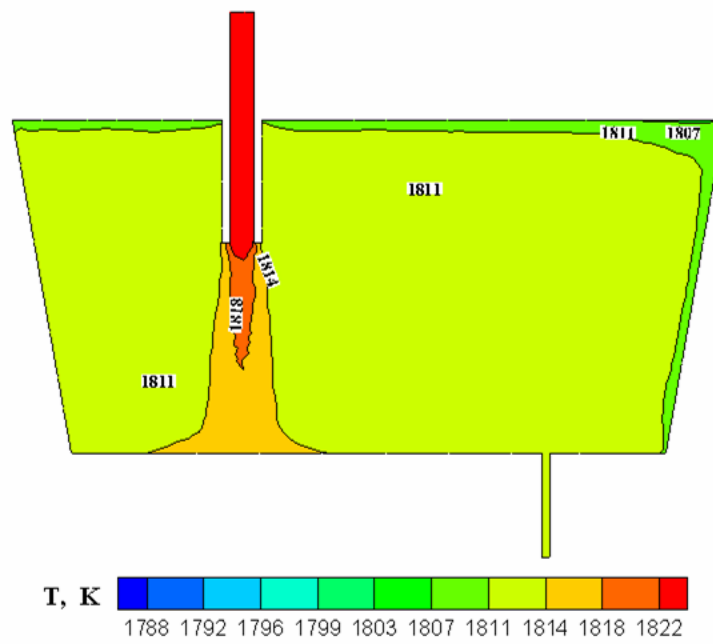
(b) 方案 2 (加 1#挡墙)



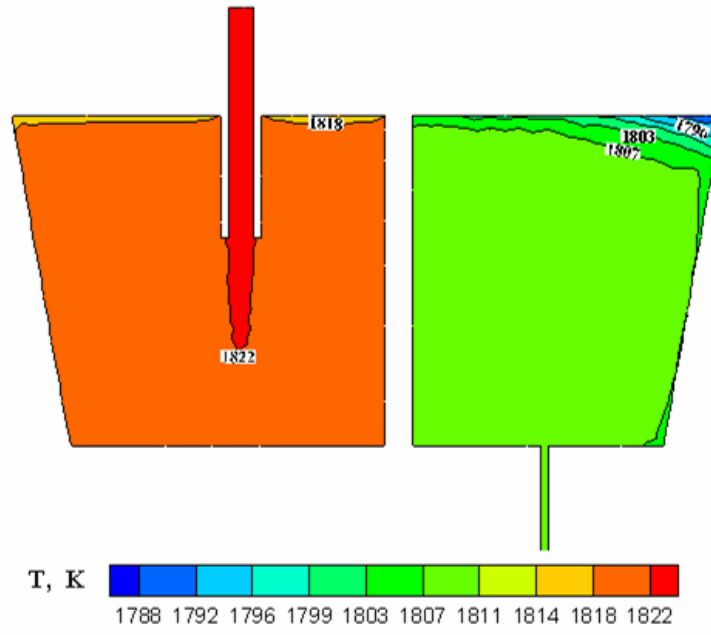
(c) 方案 3 (加 2#挡墙)



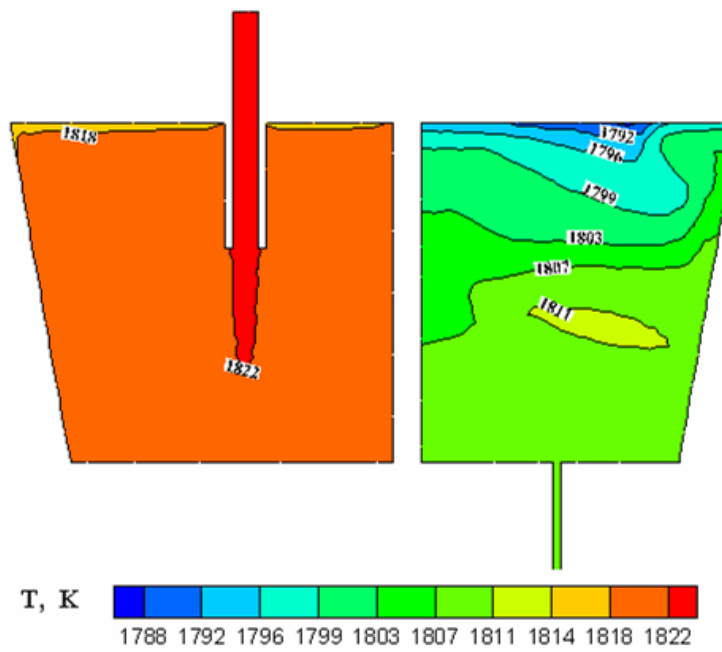
(d) 方案4 (加3#挡墙)  
图3.4 中间包顶面的温度场



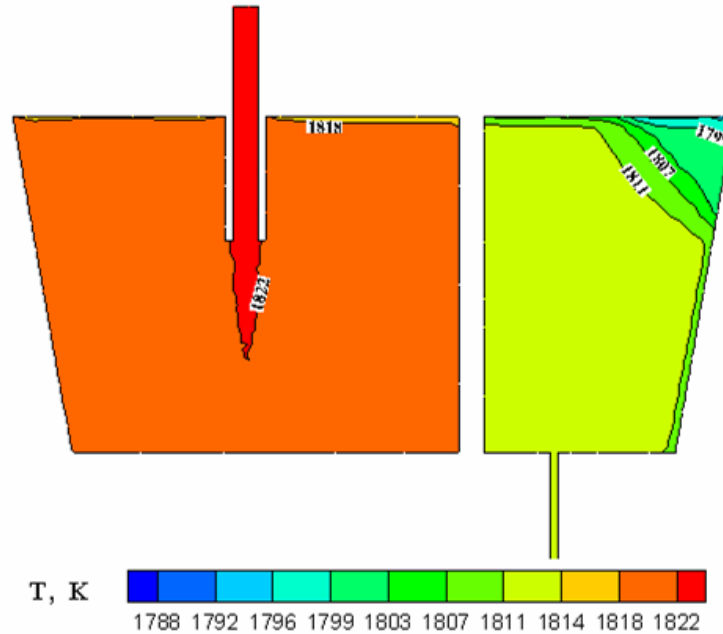
(a) 方案1 (无挡墙)



(b) 方案 2 (加 1#挡墙)



(c) 方案 3 (加 2#挡墙)



(b) 方案2 (加1#挡墙)

图 3.5 中间包对称面的温度场

表 3.1 为各个方案中各出水口处的温度分布情况表。由表分析可得，未加控流装置的中包各出水口处的温差最大，为 6.2K，加 2#挡墙的温差最小为 0.8K，但都能够保证连铸生产的顺行。但是加 2#挡墙的中包内温度场分布不均匀，其顶部存在一部分的低温死区，浇注运行的平稳性不能保证。加 3#挡墙的中包与加 2#挡墙的中包具有相同的温差，但其温度场分层较多，不利于浇铸的平稳运行。

表 3.1 不同方案下的出水口温度

方案	各水口温度(K)			$\Delta T$ (K)
	Out 1	Out 2	Out 3	
Case 1	1811.8	1811.5	1805.5	6.2
Case 2	1809.3	1809.7	1808.9	0.8
Case 3	1808.8	1810.2	1808.6	1.6
Case 4	1810.4	1811.4	1813.1	1.7

### 3.3 钢液中夹杂物的上浮情况分析

表 3.1 即为 4 个方案的不同尺寸夹杂物上浮率，按其绘出图 3.6，比较分析图片可以看出，加了挡墙的中包比未加挡墙的中包内各种尺寸的夹杂物上浮率都有明显的提高。再对加不同挡墙的中包进行分析，可以看出对于颗粒大的夹杂物而言，其去除率都很高。对于颗粒小的夹杂物来说，加 1#挡墙和 3#挡墙的中包的去除率仍然较低。从夹杂物的整体去除率来看，加 2#挡墙的中包的夹杂物去除率最高。达到这样好的去夹杂物效果，主要是由于此方案加的 2#挡墙之后，经由长水口流下的钢液在 2#挡墙的

作用下,中间包内钢液的湍动能削弱,被抑制在2#挡墙内的注流区域,钢液在此区域产生了很好的循环流动,消除了短路流,避免了带着夹杂物的钢液直接流向中间包的各个出水口,并且夹杂物在此区域内猛烈地碰撞聚集长大,带着一定的角度向中间包各个壁面(尤其是顶面)运动,大大缩短了夹杂物上浮去除的路径,促进顶渣对夹杂物的吸收,从而明显地提高夹杂物的去除率。由于 $30\mu\text{m}$ 级的夹杂物颗粒比较小,碰撞长大的几率相对较小,所以对其的去除率并没有得到特别显著地改善。

表 3.1 夹杂物上浮率

方案 \ 粒径	100 $\mu\text{m}$	70 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
case1	94.46%	85.85%	71.08%	52.31%
case2	98.44%	92.12%	74.40%	61.08%
case3	99.12%	97.27%	90.25%	76.46%
case4	98.08%	97.77%	78.31%	55.23%

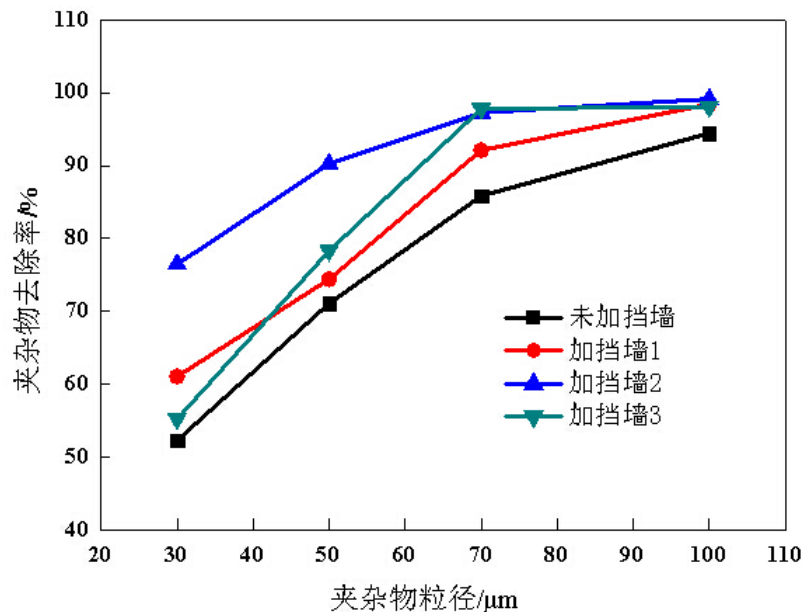


图 3.6 各个方案不同尺寸的夹杂物上浮率比较图

### 3.4 小结

本章通过对比的方法分析了各个方案中钢液的流场、温度场及其夹杂物的去除率,得出的结论是加2#挡墙的方案最优。

## 4 结 论

以达钢五流T型中间包为研究对象，采用数值模拟的方法，对不同控流装置的中间包进行了研究，分析了中间包内钢液的流场的变化情况、温度场的变化情况以及夹杂物去除率的情况，得出了以下结论：

① 未加控流装置的中间包内钢液的流动有明显的短路流现象，缩短了钢液在中间包内的停留时间，甚至有部分的钢液直接从水口处流出，这样就导致了绝大多数的夹杂物来不及上浮去除，而直接进入到了结晶器中，降低了铸坯的质量；

② 在加1#挡墙和3#挡墙的方案中，由于挡墙的阻碍作用，在包内形成了一定范围的回旋流，延长了钢液在中间包内的停留时间，同时为夹杂物的去除提供了更多的条件和机会，从而在一定程度上改善了中间包内钢液的流动形态。在不同粒径的夹杂物去除率上，也比未加任何控流装置的中间包有明显的提高。当然，需要指出的是，在挡墙的作用下，中间包中间出口钢液的流出速度较慢。

③ 在加2#挡墙的方案中，钢液通过挡墙孔流出以后，钢液的湍动能强度降低，形成了较大范围的回旋流区域，更大程度上地延长了钢液在中间包内流动途径，使钢液的成分得到了很好的混合均匀，钢液的温度分布层次现象减弱，趋于均匀化。同时，为夹杂物的去除提供了充分的时间，去除率达到了理想的效果。

综上所述，方案3即加2#挡墙的中间包冶金效果最优，钢液流场分布合理、平稳，各出水口处的温差不大，夹杂物的上浮率较高，一定程度上能够提升中间包的精炼效果。

## 参考文献

- [1] 国磊. 微型连铸机的设计[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.
- [2] 李慧春. 连铸坯凝固传热过程的数值模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- [3] 张体广. 五流小方坯中间包的结构优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [4] 王建军, 曲英. 中间包冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [5] 陈英. 中间包新型结构设计与物理数学模拟[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2007: 3-4.
- [6] 贺友多, Sahai Y. 不同因素对连铸中间包流场的影响[J]. 金属学报, 1988, 24 (2): 79-86.
- [7] 干勇. 连续铸钢过程数学物理模拟[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [8] 彭世恒. 中间包等温和非等温过程的基础研究和数值模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2000.
- [9] Sahai Y, Burval M D. Proc. Of the Electric Furnace Conf [C]. 1992: 469.
- [10] 王建军, 周俐, 王雪松. 中间包夹杂物运动行为的数模研究[J]. 安徽工业大学学报, 2001, 17 (4): 40-43.
- [11] 钟良才, 史迪, 王海, 等. 7 流连铸中间包钢液流动数学模拟[C]. 第十六届全国炼钢学术会议论文集, 北京: 中国金属学会炼钢学会, 2010: 314-321.
- [12] Mehdi ALIZADEH, Hossein EDRIS, Ali SHAFYEI. Fluid Flow and Mixing in Non Isothermal Water Model of Continuous Casting Tundish [J]. JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL, 2008, 15(2): 7-13, 22.
- [13] ZHONG Liangcai, LI Baokuan, ZHU Yingxiong, et al. Fluid Flow in A Four-strand Bloom Continuous Casting Tundish with Different Flow Modifiers [J]. ISIJ International, 2007, 47(1): 88-94.
- [14] 段善勇. 重钢五流方坯连铸中间包控流装置及冶金效果的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [15] 陈俊俊, 史彧宏, 武文斐, 等. 连铸中间包技术改造与多孔控流挡墙的优化设计[J]. 冶金能源, 2007, 26 (5): 22-26.
- [16] Lowry M L and Sahai Y. Modeling of thermal effects in liquid steel flow in tundishes [C]. Steelmaking Conference Proceedings, 1991, (8): 505-511.
- [17] S. P. Steak, D. J. Harris, A. McLean, T. R. Meadowcroft and J. D. Young: Proc. Of the Znd process Technology Conf. TMS, Warrendale, PA, 1981: 232.
- [18] 富平原. 中间罐对钢水中夹杂去除能力的研究[J]. 连铸, 1998, 17(6): 15-16.
- [19] K. saylor, D.B.LoveandB.v.Patil.Use of Flow Modifiers to Improve Performanee of a Tundish. Steelmaking Conference Proceedings, 1997: 313-324.
- [20] 王一成, 韩金玉, 刘大方, 等. 五流 T 型非对称中间包内控流装置优化水模型[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19 (10) : 21-24.
- [21] 左祥均. 重钢 5 流方坯连铸中间包内钢液流动和夹杂物运动的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [22] 马延杰. 水泥砂浆包装机背压式喂料原理的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.

- [23] 林文武. 4110柴油机进气歧管进气回流数值仿真及优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [24] 杨小容. 连铸中间包内钢中夹杂物运动行为模拟研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2004.



## 致 谢

在这里，首先感谢王宏丹老师在我选题、开题和模拟研究、论文撰写等过程中给我的指导和建议，同时还有感谢同组的同学们在我遇到问题时给我提供的解决方案，并且耐心地给我讲解，在此再一次衷心感谢我的恩师给我的指导和建议。

另外，大学四年里其他任课教师授给我比较好的专业基础知识，使自己在完成本次课题任务前打下了良好的基础。

同时，感谢那些和我一起完成本次课题的同学们，正是他们的鼓励和支持自己才能够坚持完成了本次课题。

最后，感谢参加评审和论文答辩的各位老师，感谢他们能够舍弃自己的时间来审阅本篇论文并提出他们宝贵的意见。

## 在读本科期间参加的科研项目

参与王宏丹老师指导的 2012 年重庆市级大学生创新训练计划项目《连铸中间包自旋式湍流控制器的设计与数值模拟优化》，协助申请了实用新型专利“连铸中间包自旋式湍流控制器”，专利号为 ZL201320337963.1；以及在中文核心期刊《热加工工艺》发表论文 1 篇。撰写了项目结题报告，并于 2014 年 5 月完成了项目结题答辩，顺利结题。