

重庆科技学院



毕业设计（论文）

题 目 重钢 210 t RH 精炼过程钢液流动
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 2010-01

学生姓名 牟康乐 学号 2010444134

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 9 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

RH 是真空循环脱气的简称，是目前钢铁生产中使用非常广泛的一种精炼方法。世界上第一台真空循环脱气装置是由联邦德国鲁尔钢铁公司和海拉斯公司于 1957 年共同研制开发的，因此称为 RH。后来随着钢铁生产技术的不断改革，RH 法由最初仅用来钢液脱气，发展为集脱气，脱碳，脱氧，脱硫，去除夹杂物以及调整钢液温度和成分等功能为一体的真空精炼装置，在生产高质量钢种领域起到了举足轻重的作用。自从 RH 装置诞生以来，冶金工作者研究发现，影响 RH 精炼功能的重要因素是钢液的循环流动，循环流动的大小直接对 RH 装置的冶金功能起到很大的影响作用。而影响钢液循环流量的因素又有很多，例如，真空室的真空度，吹氩孔的吹氩流量等。

本文在前人研究的基础上，借助 CFD 商业软件建立真空精炼过程中钢液流动的数学模型，再借助 Fluent 软件进行计算，通过数学模拟的方法探讨 RH 装置中钢液的流动以及吹氩对钢液循环流动和混合特性的影响。针对重钢 210 t RH 精炼装置，以 90、120、150、180 m³/h 的吹氩量进行模拟计算，计算结果表明：

① 本模拟以 90 m³/h，120 m³/h，150 m³/h 为吹氩量，随着吹气量的增大，RH 装置中下降管处的钢液流动速度逐渐增大；当吹气量为 180 m³/h 时，下降管处钢液的流速反而降低了，说明吹氩量也有一个饱和值，应该控制好吹氩流量的范围。

② 当吹氩量在合理的范围之内，提高吹氩量会增加钢液的循环流动，下降管处的钢液流股对钢包内的钢液起到很大的搅拌作用。

③ 在合理的吹氩流量范围之内，提高吹氩量会提高钢包内钢液的湍动能，加大钢液的循环流动。

关键词：RH 精炼 吹氩 循环流量 数值模拟

ABSTRACT

RH is abbreviation of vacuum degassing, it is a very widely method of refining used in the current steel production. The world's first vacuum degasser circulation was developed in 1957 by the Federal German Ruhr steel company and Hellas. Later, with the continuous reform of steel production technology, RH has many functions, such as degassing and decarburizations, deoxygenating, desulphurization, removal of inclusions and adjust the temperature and composition of liquid steel and other functions. RH has played a pivotal role in the field of production of high quality steel.

Since the birth of RH devices, metallurgy workers found the important factors that affect the function of RH refining of molten steel is circulating. The size of the metallurgical circulating has direct influence in RH equipment. But there are many factors that affect the flow of molten steel cycle, for example, degree of vacuum chamber, argon flow. This article is based on the previous studies, I established the mathematical model with commercial CFD software to simulate the flow of liquid steel vacuum refining process. Then it is calculated by means of Fluent software. We explore the flow of liquid steel in RH device by mathematical simulation methods, and find argon blowing how to impact the molten steel circulation and mixing characteristics. For 210 t RH refining unit, We use the amount of argon that are 90、120、150、180m³/h. We get the following conclusions.

① With the amount of argon blowing increases, the flow velocity increases at the drop of liquid steel pipe in RH device. But when the amount of argon is 180m³/h, the flow velocity is reduced. This indicates that the amount of argon has a saturation value.

② When the amount of argon within a reasonable range, improving argon will increase the amount of circulating liquid steel, liquid steel at the drop played a significant role in agitation.

③ Within a reasonable range of argon flow, improving argon will increase the amount of molten steel ladle turbulent kinetic energy, increase the circulation of liquid steel.

Keywords: RH refining; argon blowing; circulation flow; mathematical simulation

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
1 绪 论.....	1
1.1 RH 的发展.....	2
1.1.1 RH 装置的发展阶段.....	2
1.1.2 多功能 RH 装置的发展.....	3
1.2 RH 装置的结构与工作原理.....	5
1.3 RH 的冶金功能.....	5
1.3.1 脱气.....	5
1.3.2 脱碳.....	6
1.3.3 去夹杂、调整钢液成分及均匀钢液温度.....	6
1.4 国内外研究现状.....	7
1.5 本文研究目的及主要内容.....	9
2 RH 精炼过程中钢液流动的数值模拟研究.....	11
2.1 软件简介.....	11
2.1.1 ANSYS 软件介绍.....	11
2.1.2 FLUENT 软件介绍.....	12
2.2 建立数学模型.....	13
2.2.1 基本假设.....	13
2.2.2 控制方程.....	13
2.2.3 RH 装置有限元模型的建立.....	14
2.3 边界条件.....	15
2.4 数值求解.....	16
2.5 结果与分析.....	16
2.5.1 速度矢量图.....	16
2.5.2 速度云图.....	19
2.5.3 湍动能云图.....	22
3 结 论.....	25
参考文献.....	26
致 谢.....	27

1 绪 论

随着社会的不断进步，钢铁在国民经济建设中起着很大的作用，而且人们对钢材质量的要求越来越高。以前，钢铁生产遵循三步走，即：炼铁，炼钢，模铸，但随着人类对钢材质量的要求提高，三步走法生产钢材已无法满足社会的需要，所以，钢铁生产流程从原来的三步法发展为现在的多步法，即：先经过高炉炼铁，在进行铁水预处理，然后经过转炉（或电炉）完成脱碳、脱硫等冶金任务，之后将转炉冶炼结束的钢水进行二次精炼，最后将钢包运至连铸机上，开始浇注。

钢液的二次精炼就是炉外精炼，就是将原来要在转炉里完成的炼钢任务，如：除气去夹杂、深脱碳、均匀钢水成分和调整钢液温度等，转移到炉外精炼装置中进行，目的在于强化冶炼过程、提高生产率、提高钢材质量和扩大钢材品种，而且还可以降低能耗，从而降低钢材成本。目前，大多数钢铁公司使用的炉外精炼装置有：LF（钢包精炼法）、RH（真空循环脱气法）、VD（真空提升脱气法）、VOD（真空吹氧脱碳）、AOD（氩氧脱碳法）等。这些装置不仅能够提高生产效率、提高钢材质量，而且在降低能耗和成本、优化生产工艺方面起着不可忽视的作用。

RH 就是指真空循环脱气，是目前生产纯净钢最常用的精炼手段之一，它可以生产出高质量的钢种。RH 精炼是所有精炼工艺中精炼速度最快的，它可以很好搭配转炉和连铸的生产，起到很好的协调作用。近年来，RH 精炼法已发展为高质量钢生产不可或缺的流程。相对于其他精炼装置，RH 装置具有以下几个优点：

① 脱气效果较好。由于输入驱动气体，在上升管内生成大量气泡核，进入真空室的钢液又喷射成级细小的液滴，大大增加了钢液脱气表面积，因而有利于脱气的进行。

② 温降小。一般处理温降只有 30~50℃，而且在脱气过程中还可进行电加热，因此钢液在炉内只需少许过热。

③ 处理范围较大。用同一设备能处理不同容量的钢液，也可以在电弧炉和感应炉内进行处理。

④ 合金化。在循环处理初期，要求每隔 10 分钟取样和测温各一次；在接近处理终了时，每隔 5 分钟取样测温各一次。根据取样分析的结果，如须补加合金材料，（包括脱氧剂或其他添加剂）时，可操作自动控制的加料料斗，在不破坏真空的条件下，以恒定的加料速率将合金料加入真空室中。图 1.1 表示了 RH 精炼工艺流程。

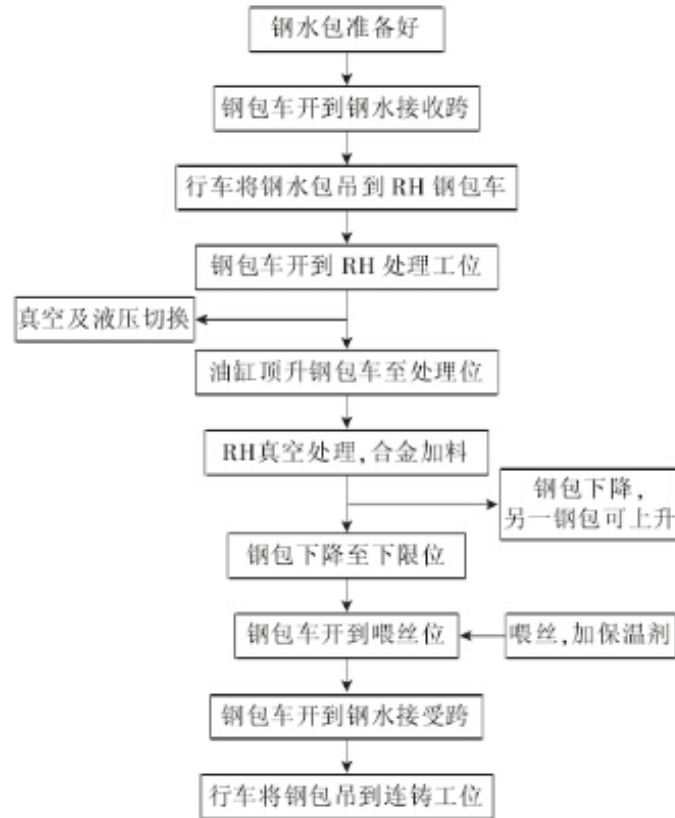


图1.1 RH 操作工艺

1.1 RH 的发展

1.1.1 RH 装置的发展阶段

RH 装置是以研制出世界上第一台真空循环脱气装置的两家德国公司 Ruhstahl 及 Heraeus 的名字命名的。它是一种将转炉生产的钢水转移到专门的冶金容器中冶炼的装置。最初只用于钢液脱气，慢慢发展为集脱气、脱碳、脱硫、去夹杂、均匀钢水温度和调节钢水成分等为一体的钢水精炼设备。RH 经历了几十年的发展，成为一种处理量大、冶炼效果好的设备，适合大多数钢铁联合企业使用，RH 发展到今天，大体分为三个阶段^[1]。

① 1959年—1969年，试用阶段

德国的 Ruhstahl 及 Heraeus 公司联合开发了 RH 真空循环精炼工艺，解决了钢液脱氢的问题，具有很好的脱氢效果。上世纪六十年代，我国上海重型机械厂和大冶钢厂分别引进了小型的 RH 设备，用于冶炼电炉生产的合金结构钢。

② 1969年—1990年，开发阶段

在这段时间里，RH装置及技术取得了突破性的进展，各个钢铁企业根据不同的冶炼需求，开发了RH—OB，RH—KTB，RH—PB，RH—MFB等多功能RH装置，使得RH具备更多的冶金功能，可以冶炼超低碳及不锈钢等。

③ 1990 年一至今，普及阶段，与连铸搭档，技术上进一步发展和完善

1990 年以后，RH 装备和技术获得进一步改进和发展。传统的模铸发展为连续铸钢，RH 开始普遍与连铸相搭配，实现了转炉—连铸的稳定生产，优化了 RH 工艺，设备参数，扩大处理能力；开发了多功能 RH 精练技术和装备；开发了 RH 升温技术和热补偿；完善了 RH 轻处理工艺、设备；实现了全钢水处理。

1.1.2 多功能 RH 装置的发展

最初的 RH 装置主要是用来脱气的，但随着科学技术的不断发展和人们对高质量钢种需求的不断提高，又在之前装置的基础上，开发了具有多功能冶金作用的 RH 装置，从而使 RH 成为集脱气、脱碳、去夹杂、调整钢液成分和均匀钢液温度为一体的冶金设备。多功能 RH 装置主要有 RH—OB，RH—KTB，RH—PB，RH—MFB 等。

① RH—OB

RH—OB 是 Ruhrstahl Heraeus with Oxygen Blowing 的简称。依据 VOD 在减压条件下进行吹氧脱碳的原理，1972 年新日铁室兰厂研制出了 RH—OB 真空吹氧技术。这一工艺的开发，使得 RH 装置也可以和 VOD 一样，进行深脱碳处理。该设备是在 RH 真空室的侧壁上安装一支氧枪，向真空室表面的钢液吹氧，该方法不仅可以生产不锈钢，也可以生产超低碳钢。

RH—OB 的工作原理是利用真空室侧壁的氧枪将氧气吹到真空室的钢液面，使 RH 装置具有了强制脱碳的效果。这种方法的优点有：使转炉有跟好的生产率、铬回收率高、所使用的铬为廉价的高碳铬铁、成品性能好，质量稳定。图 1.2 是 RH—OB 装置图。

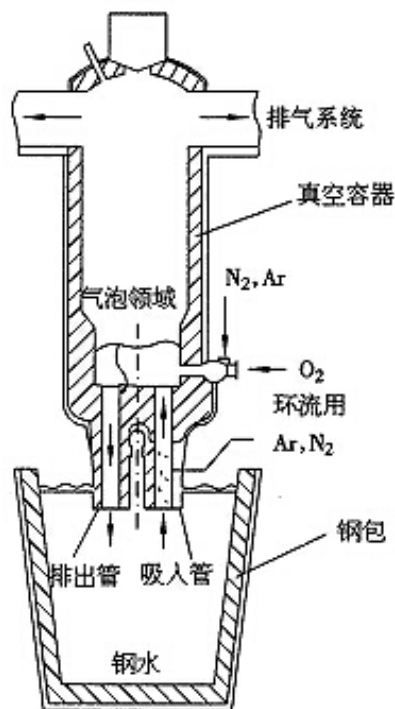


图 1.2 RH—OB 装置图

② RH—KTB

RH装置有一个缺点是长时间处理会导致钢液的温度降低，使得金属粘附在RH真空室器壁上。为了解决这一问题，日本于1988年研制出了RH—KTB法。该法是在RH装置顶部安装一支垂直的氧枪，就如同转炉吹氧那样。这种方法将脱碳反应生成的CO再次氧化，使其燃烧放热，从而提高了真空室内的温度，解决了因温降而使金属粘附在真空室器壁上的问题。

RH—KTB的关键作用是CO的二次燃烧，使燃烧的热量加热钢水，从而不用加铝提温，可以很好的降低钢液中的夹杂物。

RH—KTB的脱碳速率比传统的RH要快，初始碳含量高，达到同样的脱碳终点，处理时间较RH缩短约3分钟，可以生产超深冲用薄板钢。图1.3为RH—KTB的装置图。

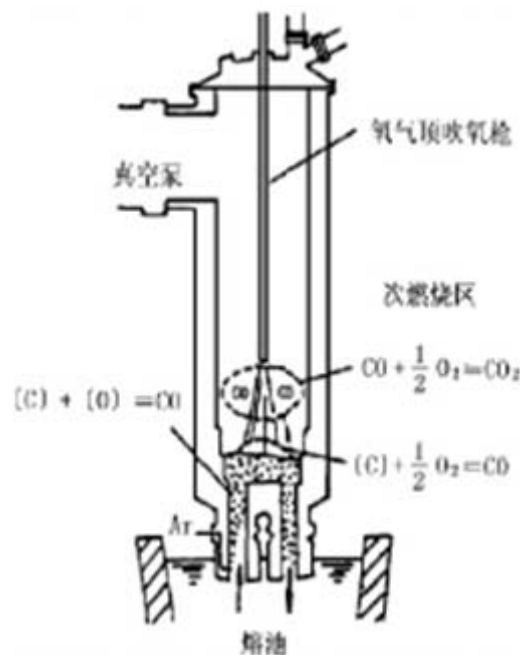


图1.3 RH—KTB装置图

③ RH—PB

RH—PB法是1992年日本新日铁名古屋厂研制出的。它主要是在RH装置真空室下部增加喷吹管，向循环流动的钢液中喷吹所需要的粉剂。采用这种方法，喷入的脱硫剂可以与钢液充分接触、反应，从而达到很好的脱硫效果，可以到到硫含量小于 $(5-10) \times 10^{-4}\%$ 的钢水。

④ RH—MFB

RH—MFB是1993年日本新日铁制铁所研发出的，与RH—KTB法一样，是提高钢液温度和防止金属在真空室内壁附着的方法，同时也适合超低碳钢的冶炼。他它在RH真空室上方设置了上下升降自由、可以按需要使用纯氧或者“纯氧+LNG”的多功能喷嘴。

“纯氧+LNG”在处理钢液时和等待时通入天然气，天然气燃烧使真空室内壁和钢液升

温，清除真空室内壁形成的结瘤物；纯氧则用于铝的氧化使钢液升温和促成脱碳。

1.2 RH 装置的结构与工作原理

RH 装置由内部砌有耐火材料的真空室、可以吸入钢液的上升管和可以排出钢液的下降管等组成。图 1.4 为真空循环脱气装置的结构图。

RH 装置的工作原理是：将钢包移动到 RH 工位之下，下降 RH 装置，使 RH 装置的上升管、下降管插入到钢液中，真空室用真空泵抽气。由于真空作用，使得钢液从上升管和下降管上升到压差高度（约 1.48m），这时，在位于上升管 1/3 的位置处的吹氩孔位置吹入驱动气体氩气，这样使得上升管内的钢液的表现密度小于下降管的钢液密度，在氩气的带动下，上升管中的钢液随氩气泡上升进入真空室，钢液在真空室内在真空的作用下剧烈运动，完成脱气处理，在重力的作用下，钢液沿下降管进入到钢包中，这样就完成了循环流动。

真空循环脱气法具有很多优点，例如，脱气效果好、精炼速度快、处理容量大、精炼过程的温降小、适用范围广泛等。由于吹入了氩气，在上升过程中生产大量的气泡，进入真空室在真空的作用下，钢液又喷射成小的液滴，增加了脱气表面，有利于脱气的进行。

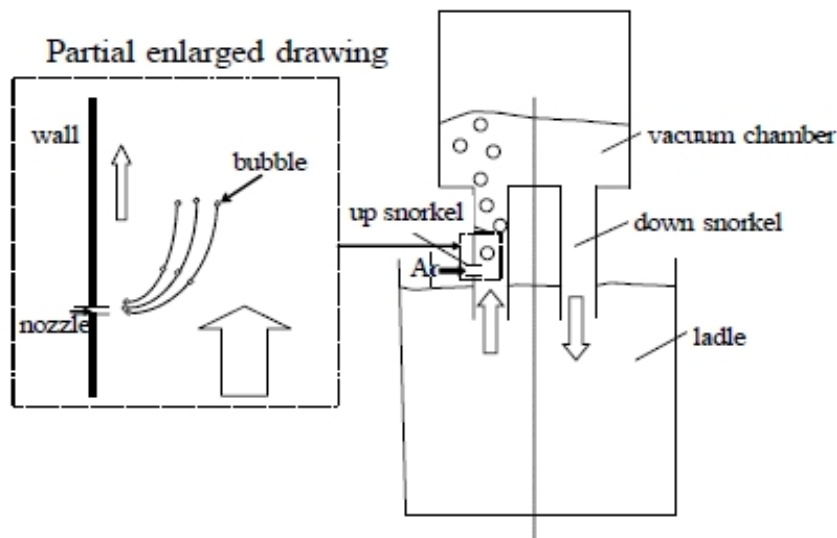


图1.4 RH精炼装置示意图

1.3 RH 的冶金功能

1.3.1 脱气

气体在钢液中大多都是有害的，为了得到质量更好的纯净钢，必须将钢水中的气体含量降低到一定的范围之内，钢液中主要的有害气体有氢气、氮气、氧气。

真空循环脱气法脱氢的效果非常明显，脱氧钢可脱氢约65%，未脱氧钢可脱氢70%。处理后钢中的氢含量都降到 $2 \times 10^{-4}\%$ 以下。如果延长处理时间，氢含量还可以进一步降

低到 $1 \times 10^{-4}\%$ 以下。通过统计记录后发现，最终氮含量近似的与处理时间成正比。

RH装置的脱氮效果不是很明显，而且在有些钢种中，适当加氮不但对钢的质量没有坏处，反而有好处。在RH装置脱气过程中，当原始的氮较低的时候，例如钢液中氮含量小于 $40 \times 10^{-4}\%$ 时，通过RH处理前后氮含量基本没有变化。当钢液中氮含量大于 $100 \times 10^{-4}\%$ 时，RH装置的脱氮效率一般也只有10%—20%。

在真空循环处理的过程中，钢液中的碳有一定的脱氧作用，尤其是当钢液中原有的碳含量较高时，如处理未脱氧钢时，这种效果更加的明显。实际测得表明，RH处理过程中脱碳量和脱氧量之比约为3:4，这表明钢液中溶解氧的脱除，主要是依靠真空作用下的碳氧反应，即， $[C]+[O]=CO$ ，真空条件加速了碳氧反应的进行，从而达到很好的脱氧效果。

1.3.2 脱碳

RH装置具有很好的脱碳效果，如果采取一定的措施，如侧吹氧、顶吹氧等，可以在很短的时间内（20min），将钢液中的碳含量脱至 $20 \times 10^{-4}\%$ 之下。脱碳的原理主要还是碳氧反应，脱碳反应主要是在钢液在氩气作用下进入真空室，在真空处理后进入钢包这个循环流动过程中进行的，碳氧反应生成的CO含量对反应的进行有很大的影响，要尽快抽走，这样才能加速碳氧反应，所以，真空度是影响脱碳反映的重要因素。特别是在脱碳前期，较大的抽气能力可以让真空室很快获得较大的真空度，即快速提高真空度。另外，在脱碳速率不变的情况下，适当的延长处理时间也可以使钢液将碳含量降低，但是一般脱碳的时间应控制在10—20分钟，因为当处理时间超过20分钟后，碳含量会保持不变，因此，再延长就没有了意义。图1.5表明了脱碳时间与钢液中碳含量的关系^[2]。

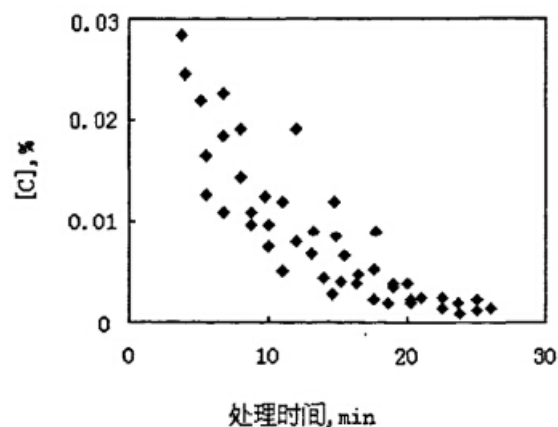


图1.5 脱碳时间与钢液中碳含量的关系

1.3.3 去夹杂、调整钢液成分及均匀钢液温度

RH装置去除夹杂物的影响影响因素有浸渍管的浸入深度、吹氩孔的气孔数、真空度及处理时间^[3]。图1.6表示了总夹杂物的去除率与影响因素之间的关系。

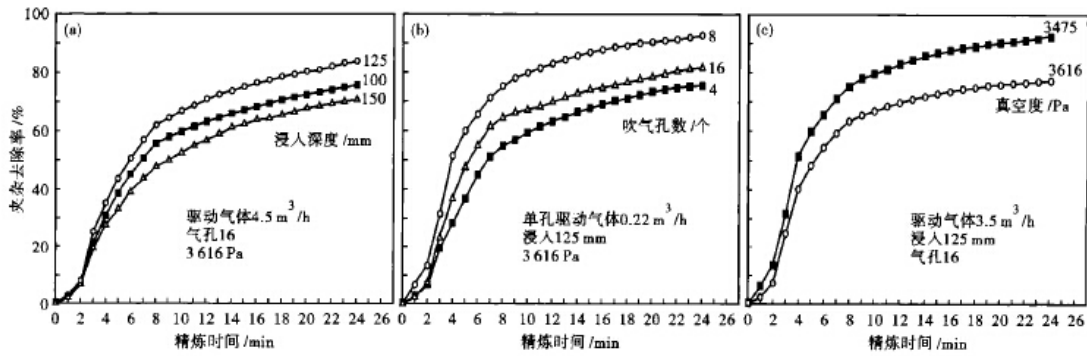


图1.6 各种影响因素与总夹杂物去除率的关系

RH装置工艺流程中有一项是加合金，在精炼过程中，可以根据钢水的成分从而加入合金进行微调，尤其在生产合金钢的时候，可以通过合金加入口加入需要的合金元素，对钢液成分微调。

RH过程中可以很好的补充钢水的温降，在RH—OB、RH—KTB等情况下，碳氧反应生成的CO经过二次燃烧，是一个放热过程，可以补充钢水的温度；而且，在脱氧的过程中，有时会加入铝块去脱氧，这都会提高钢水的温度，使得RH处理过程中温降不是很大，为后面的连铸过程做好准备。

1.4 国内外研究现状

从1959年联邦德国开发出世界上第一台RH精炼装置以来，短短的几十年时间里，不管从RH装置上，还是RH技术上，RH冶金技术取得了突飞猛进的发展，为了不断提高RH装置的精炼效果，国内外冶金工作者做了许多研究。从研究方法大体来看，研究者们主要进行数值模拟研究和物理模拟研究。简单来说，数学模拟就是针对某一研究对象，建立起数学模型来表达某个物理或化学过程的特点，近年来，由于数学模拟具有高效率、低成本等特点，被很多冶金工作者利用，但是利用微分方程组讲一个过程表达出来后，往往会因为方程难以求解或求解代价太高而难以付诸行动。物理模型就是根据所要研究对象的性质，建立起和原对象相似的小规模模型，从而很好的观察现象。最常见的有水模型（水模拟钢液，油脂模拟渣）、空气—水系统（氩气搅拌钢包，空气模拟氩气，水模拟钢液）等。以下是国内外冶金工作者对RH精炼技术的研究现状。

耿佃桥，雷洪，陈芝会等^[4]人对RH装置中钢液的流场、RH精炼过程中的脱碳及脱气过程、RH装置内夹杂物去除过程做了数值模拟。

从芳^[5]在RH真空精炼技术的发展、现状及其设备组成一文中介绍了RH真空精炼技术的发展、现状，阐述了目前RH主要设备组成。对RH—OB，RH—KTB，RH—PB，RH—MFB等设备的结构、冶金原理做了详细的介绍。

随着人们对纯净钢、超低碳钢、不锈钢等钢种的需求量的大增，RH装置已经从单纯的脱气装置发展成为集脱气、脱碳、去夹杂、均匀钢水温度和调整钢液成分为一体的

冶金设备。脱碳成为 RH 精炼过程的主要任务，如果能够很好地了解 RH 装置的脱气脱碳过程，肯定会对脱气脱碳效果起到很大的作用。下面我们就了解下冶金工作者对 RH 脱气脱碳过程的研究。

朱苗勇，黄宗泽^[6, 7]主要做了 RH 装置脱碳的模拟研究。在研究 RH 精炼装置内钢液湍流场的基础上，依据 RH 处理中的脱碳机理，建立 RH 装置内钢液流动与脱碳的数学模型，以此来描述 RH 真空处理过程中碳的行为，为工艺优化提供依据和指导。研究表明，RH 处理过程中，脱碳前期，真空槽内的碳浓度较钢包中的低得多，钢包内的大回流区碳浓度最高，但经过真空槽循环后，浓度明显下降，此时脱碳的速率较大；随着脱碳的进行，真空槽与钢包和钢包内部碳浓度的差别越来越小，脱碳速率也明显降低；有无 KTB 吹氧操作对 RH 精炼脱碳影响很大。

齐凤升，李宝宽，陈海耿^[8, 9]做了旋转磁场作用下循环脱气装置内脱碳过程的模拟研究。采用修正的均相流法建立完整的 RH 装置内钢液湍流流动与脱碳的数学模型，对有无旋转磁场作用时的 RH 系统进行数学模拟计算，系统地分析 RH 系统内的脱碳机理，对比研究电磁搅拌作用下新型 RH 系统的脱碳过程。结果表明，当施加旋转磁场的作用后且电磁感应强度为 0.04 T 时，初期脱碳的速度比无旋转磁场作用时增加了约 15%，这种现象的出现是由于施加旋转磁场后，系统的搅拌能增加了，因此脱碳反应速率提高了。当脱碳反应进行到最后，不同磁感应强度作用下的碳含量向一稳定值趋近。图 1.7 表明了旋转磁场对 RH 脱碳的影响。

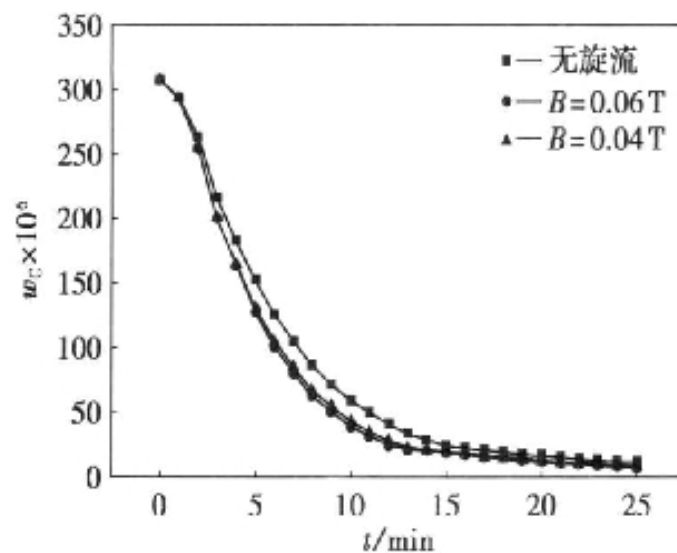


图1.7 磁感应强度对脱碳过程的影响

郁能文^[10]主要对多功能真空循环脱气装置进行了钢液流动和混合特性的水模拟研究。他对一座90 t 多功能RH精炼装置进行了研究，建立了几何相似比为1:5的RH水模型

系统。从而用一系列方法测定了钢液的循环流量、钢液混合时间等。

孙亮, 艾立群, 赵俊花^[11]等做了RH处理过程钢液流动行为的三维数值模拟研究。他们以300 t RH-MFB装置为研究对象, 建立了RH-MFB装置内钢液流场的三维数学模型。采用双流体模型处理气液两相流, 从而分析吹氩量、真空度、吹氩喷嘴排布等因素对钢液流场和循环流量影响。结果表明, 当吹氩流量在4000 L/min以下时, 循环流量随吹氩流量提高而提高; 该装置以真空度67 Pa, 吹氩流量3500 L/min, 浸渍管浸入深度600 mm和上下交错排布16个吹氩喷嘴较合理。

樊世川, 李宝宽, 赫冀成^[12]做了多管真空循环脱气系统循环流动模型。他们采用空间变密度的均相流模型模拟上升管中的气液两相流动。使用纯液相和气液两相之间的密度差作为系统中循环流动的驱动力。上升管中的气相体积分数是通过移植和修正喷气搅拌钢包含气率模型获得。利用真空度技术处理包括钢包、真空室、上升管及下降管在内的复杂几何系统的流场计算。利用本模型对两管和多管真空循环脱气系统在喷气量为5-35 L/min情况下进行数值模拟。分析计算结果表明, 多管系统中的速度比两管的更均匀, 即在下降管面积相同的情况下, 多管循环系统的循环流量大于两管循环系统的循环流量。

张琳, 孙彦辉, 朱进峰等人^[13]以某钢厂RH精炼装置为研究对象, 采用数值模拟的方法对脱气过程中钢液流场进行了计算, 得到了该RH装置在本厂操作条件下的钢液流场情况, 并且很好的对操作中的一些问题进行了解释。然后将数值模拟结果与实践中的经验公式与数据进行比较, 结果表明数值模拟结果可靠。最后利用该数学模型计算了RH内钢液的湍动能耗散情况, 以及钢液循环流量与吹Ar量的关系, 并提出了最佳吹Ar量的控制范围。

1.5 本文研究目的及主要内容

随着现代钢铁冶金的发展, RH工艺渐成钢液精炼过程中必不可少的环节, 可以将转炉中冶炼出的钢液进行很好的处理, 为连铸提供质量可靠, 成分均匀的钢液。RH装置在提高钢水质量、生产效率等上起到了很大的作用。钢液的循环流量对RH装置的冶金效果有很大的影响, 而循环流量的影响因素有很多, 例如吹氩量、真空度等, 所以, 很有必要对钢液的循环流量进行研究。

RH精炼反应的关键性限制环节在于钢液的循环流动和混合, 成分和温度的均匀化、精炼反应的速度和效果等都与钢液的流动和混合密切相关。不同生产线上的RH装置所起的作用也不尽相同, 因此对RH循环与混合特征的研究必须结合实际的生产需要。

本课题以重钢 210 t RH 精炼装置为研究对象, 主要研究 RH 吹氩对钢液循环流量的影响。在分析总结前人工作的基础上, 根据具体的炼钢工艺要求, 首先, 提出假设, 从而确定控制方程, 再建立物理模型以及确定边界条件, 最后利用 CFD 商业软件建立描述重钢 210 t RH 装置内钢液的流动和混合特性的数学模型, 从而模拟钢液的流动, 再利

用 **Fluent** 软件计算 **RH** 装置中的钢液流场，对计算结果做后处理，得到有利于 **RH** 精炼的工艺参数。

研究本课题的前期，我先阅读了大量国内外冶金工作者对 **RH** 装置中钢液流动的数值模拟研究的文献，总结了前人的研究成果。由于本课题采用数值模拟的研究方法，必须得熟练掌握 **ANSYS**，**FLUENT** 等商业软件，所以我对这几种软件进行了系统的学习，掌握了它们的基本操作，为后面的研究做好准备工作。

2 RH 精炼过程中钢液流动的数值模拟研究

2.1 软件简介

计算流体力学在近年来有突飞猛进的发展，而且正在以更快的速度前进。本文进行数值模拟用的主要软件是 ANSYS 和 FLUENT。运用 ANSYS 软件建立 RH 装置的实体模型，再运用 FLUENT 软件进行数值模拟计算，从而得到更好的工艺参数，为工业生产提供可靠的依据。

2.1.1 ANSYS 软件介绍

ANSYS 软件是由世界上最大的软件公司—美国 ANSYS 研制开发的，是一个对结构、电磁场、声场、流场等都可以进行分析的软件。ANSYS 公司主要工作是研发工程仿真软件和技术，其主要产品 ANSYS 被很多工程师所青睐。ANSYS 公司在世界数值模拟软件开发上处于主导地位。ANSYS 软件主要由前处理模块、分析计算模块、后处理模块三部分组成。前处理模块又分为实体建模、划分网格、加载三部分；求解模块又分为结构分析、流体力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析等；后处理模块又分为显示计算结果、输出计算结果（图表，曲线）。ANSYS 有限元软件包是一个具有多用途的有限元法计算机设计程序，用来求得结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题的解答。此套软件具有下列功能：

- ① 以大量的工程学的理论及数值分析理论技术为基础。
- ② 可解决大部分工程上的问题。
- ③ 使用相当有效的解题技术。
- ④ 为使用者着想，可以很好的定义某个问题。
- ⑤ 完全由问题的定义推得结果。
- ⑥ 具备很好的表达图形的能力。
- ⑦ 有大量确保正确的例题可供参考。
- ⑧ 有许多的工程技术人员不断努力研发新的技术。
- ⑨ 每年都举办完善的研讨会，并有可以帮助使用者解决问题的电子布告栏。

ANSYS 的处理流程是：针对某一工程问题，搜集相关资料，决定分析项目，获取材料的机械性质及几何条件、外力、边界条件。之后建立有限元模型，确定材料性质，定义几何形状、产生元素切割。然后施加边界条件、加符合条件、加时间变化情形，之后 ANSYS 进行分析，显示结果，如果结果合理的话就相当于问题已经解决，如果结果不合理，提出改进方法，再建立有限元模型，重复上面操作流程。

ANSYS 软件的解题步骤为：

- ① 建模：建立几何模型
- ② 网格划分：形成有限元模型

- ③ 加载：重力、位移约束，载荷约束
- ④ 求解：指定求解的类型及选用的求解模式
- ⑤ 后处理：查看结果。

2.1.2 FLUENT 软件介绍

FLUENT是目前处于世界领先地位的商业CFD（Computational Fluid Dynamics 计算流体力学）软件包之一，最初由FLUENT Inc.公司发行。2006年2月ANSYS Inc.公司收购FLUENT Inc.公司后成为全球最大的CAE（Computational Aided Engineering 计算机辅助工程）软件公司。

FLUENT是一个用于模拟和分析复杂几何区域内的流体流动与传热现象的专用软件。FLUENT提供了灵活的网格特性，可以支持多种网格。用户可以自由选择使用结构化或者非结构化网格来划分复杂的几何区域，例如针对二维问题支持三角形网格或四边形网格；针对三维问题支持四面体、六面体、棱锥、楔形、多面体网格；同时也支持混合网格。用户也可以利用FLUENT提供的网格自适应特性在求解过程中根据所获得的计算结果来优化网格。

FLUENT是使用C语言开发的，支持并行运算，支持UNIX和Windows等多种平台，采用用户/服务器的结构，能够在安装不同操作系统的工作站和服务器之间协同完成同一任务。同ANSYS软件一样，FLUENT软件也包含3个主要的功能部分，即，前处理、求解器、后处理。其中前处理是指完成计算对象的建模，网格生成的程序；求解器是指求解控制方程组的程序；后处理是指对计算结果进行显示、输出的程序。

FLUENT软件具有丰富的物理模型使其应用广泛，不管是从机翼空气流动到熔炉燃烧，从鼓泡塔到玻璃制造，从血液流动到半导体生产，还是从洁净室到污水处理工厂的设计，另外软件强大的模拟能力还扩展了在旋转机械，气动噪声，内燃机和多相流系统等领域的应用。今天，全球数以千计的公司得益于FLUENT的这一工程设计与分析软件，它在多物理场方面的模拟能力使其应用范围非常广泛，是目前功能最全的CFD（计算流体力学）软件。

Fluent 软件的计算步骤^[14]：

- 1) 定义某一区域流场的各项几何参数，然后进行划分网格；
- 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) 定义物质属性；
- 8) 定义边界的条件；
- 9) 调整解得控制参数；

- 10) 初始化该流场;
- 11) 开始求解;
- 12) 计算结束后检查计算结果;
- 13) 保存结果;
- 14) 如果结果不理想, 可以考虑调整网格或物理模拟重新进行计算。

2.2 建立数学模型

2.2.1 基本假设

在 RH 装置中, 钢液的循环流动受很多因素的影响, 例如气泡的浮力作用、气泡对钢液的搅拌作用、真空度的大小以及温度场的变化等, 由于这些因素的肯定存在, 所以钢液的流动是非常复杂的湍流。而本课题只研究吹氩对钢液循环流动的影响。为了有利于本课题数学模型的建立, 为此做出以下假设:

- ① 忽略温度场对钢液循环流动的影响。
- ② 气体进入钢液后的温度和钢液温度相同。
- ③ 钢液循环流动的主要驱动力为气泡的浮力。
- ④ 固体壁面视为无滑壁面。
- ⑤ 将 RH 装置与钢包看做一个整体, 有利于分析钢液的整体循环流动。
- ⑥ 钢液视为不可压缩的牛顿流体。

2.2.2 控制方程

在假设条件的基础上, 我们认为 RH 装置精炼过程中钢水的循环流动是不受温度场影响、钢液不可压缩的的湍流流动, 利用 k— ξ 双方程模型来表达湍流流动, 它的数学模型可以用以下的偏微分方程表达。

① 连续性方程:

它是物质不灭定律的体现, 又称连续方程。该定律可表述为: 单位时间内流体微元体中质量的增加, 等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。连续方程的张量形式为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

② 动量方程:

它是牛顿第二定律在流体力学中的应用。该定律可表述为: 微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上各种力之和。其张量形式为:

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_l + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i \quad (2-2)$$

③ 湍动能 (k) 方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon - D_k \quad (2-3)$$

式中

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad D_k = 2\mu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \right)^2 \quad (2-4)$$

④ 湍动能耗散 (ε) 方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + f_1 C_1 G \frac{\varepsilon}{k} - f_2 C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + E_\varepsilon \quad (2-5)$$

式中

$$E_\varepsilon = 2 \frac{\mu_t \mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2 \quad f_1 = 1.0, \quad f_2 = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2), \quad Re_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad (2-6)$$

2.2.3 RH 装置有限元模型的建立

① 钢包及RH装置尺寸参数

本课题以重钢 210 t RH 精炼装置为对象, 研究 RH 装置中钢液的循环流动。简化后将钢包和 RH 装置视为圆柱体, 具体的尺寸参数见表 2.1。

表 2.1 重钢 210 t RH 精炼装置尺寸参数

钢包部分 (mm)			RH 装置部分 (mm)						
上口直径	底部直径	钢包液面高度	真空室外径	真空室内径	浸渍管内径	浸渍管长度	浸渍管插入深度	浸渍管的位置	吹氩口位置 (离浸渍管底部)
3777	3204	3360	3040	2146	600	900	500	中间	380、530
钢液密度	钢液粘度	---	真空室高度	吹氩孔孔数	吹氩孔内径	吹氩量	真空室液面高度	---	---
7000	0.006	---	7158	4	2	90 至 180m ³ /h	220	---	---

② 建立模型

根据表 2.1 的尺寸参数, 对钢包和 RH 精炼装置进行简化, 运用 ANSYS 商业软件建立起实体模型并根据实际需要划分网格, 实体模型如图 2.1 所示。

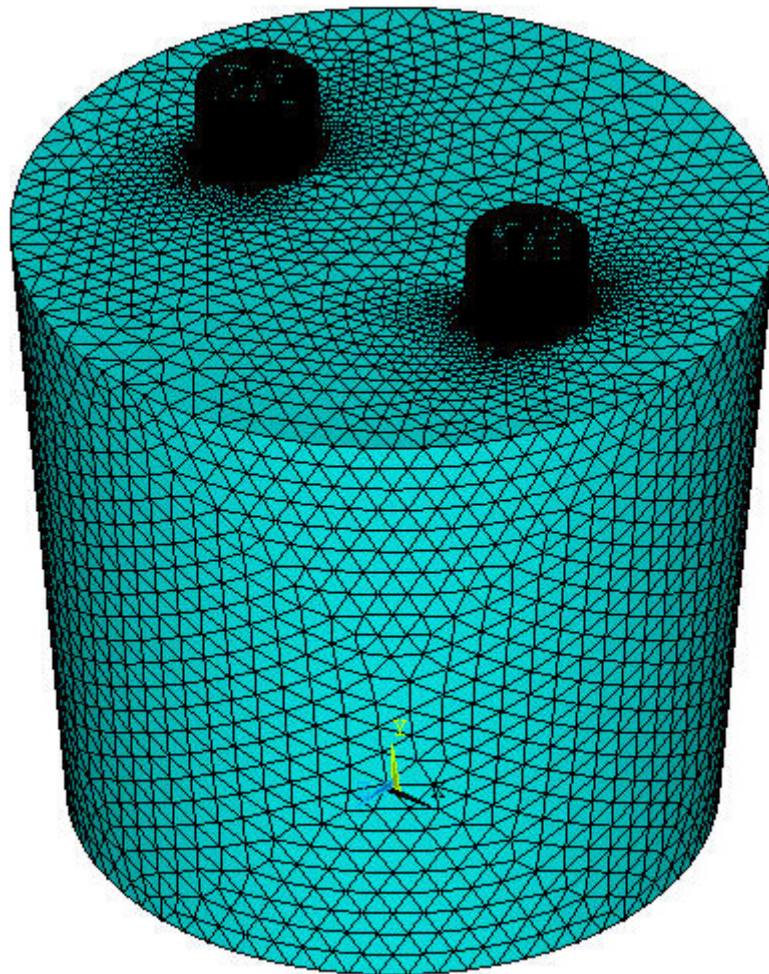


图 2.1 钢包及 RH 精炼装置模型（正视图）

2.3 边界条件

① 为了便于计算和模拟，压力的入口为钢包的液面上方，压力为一个标准大气压，即101.325kPa。

② 上升管的吹氩孔为质量入口。

③ 壁面边界采用无滑壁面。

④ 本模拟计算中模型入口为质量入口，在计算过程中，以90、120、150、180m³/h为吹气量，依据薛立强在优化条件的 RH 流场数值模拟计算^[15]一文中得到的吹气量与循环流量的关系为：

$$Q=3.8\times 10^{-4}G^{0.5}D^{0.8}H_g^{0.7}$$

式中，Q 代表循环流量，t/min；G 代表吹气量，m³/h；D 为浸渍管内径，mm；H_g 为吹气孔距离真空室液面的距离，mm；由此式可以计算出不同吹气量下的循环流量。图2.2

表示了在以90、120、150、180m³/h 的吹气流量与各自循环流量的关系。

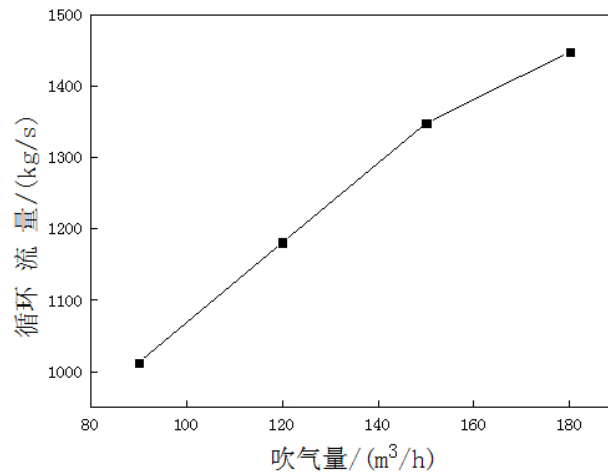


图 2.2 吹气量与循环流量的关系

2.4 数值求解

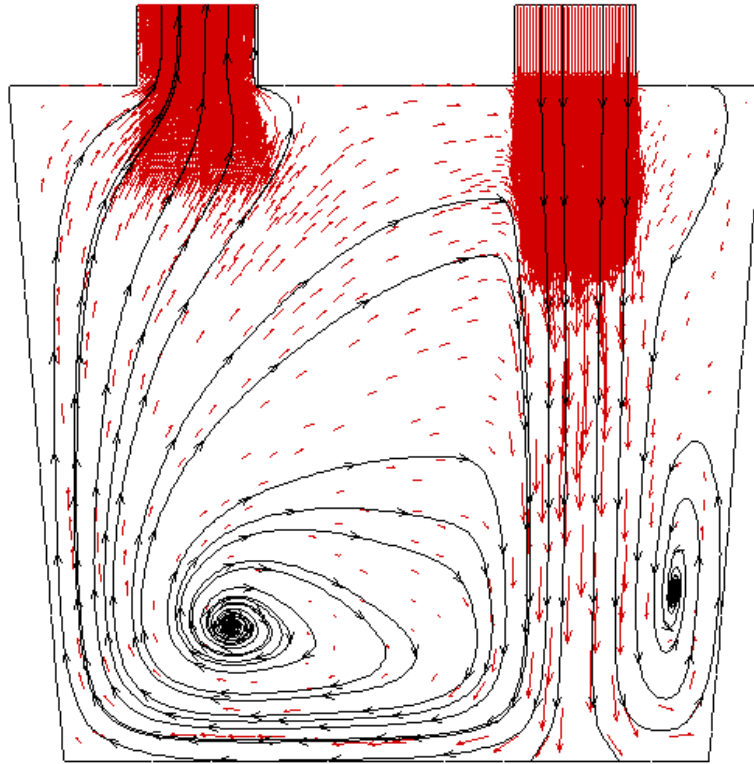
针对建立的实体模型，对其进行划分网格，这样将计算对象转换为有限单元体，把原来在时间和空间域上的连续物理量的场，如速度场、压力场或者温度场等，用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替，通过一定的原则和方法建立这些离散点上场变量之间的关系代数方程式，连续性方程、动量方程和能量方程都是从 CFD 商业软件 Fluent6.2.26中选取的。通过迭代得到各个场变量的近似值，如速度等变量在时间上和空间上的分布。

2.5 结果与分析

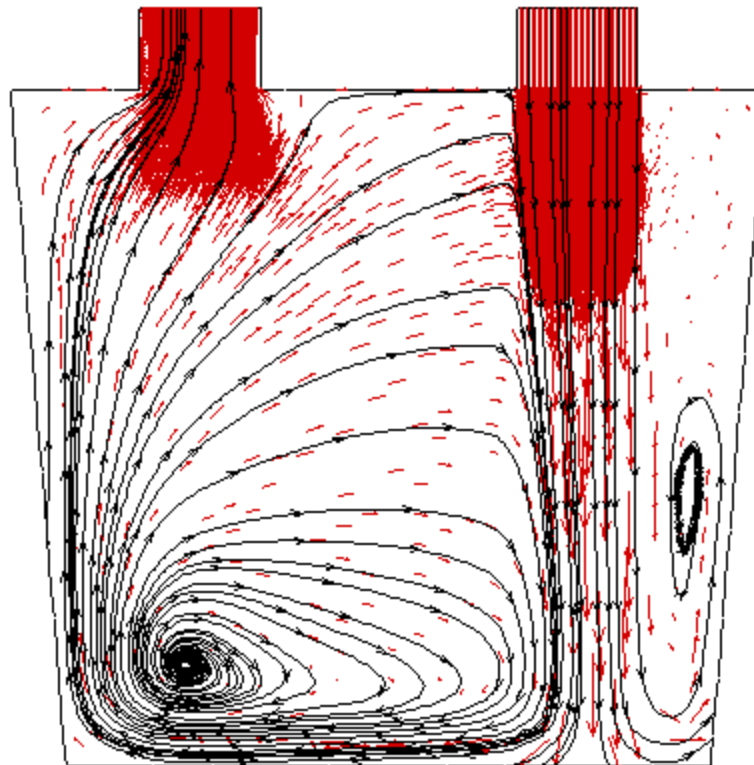
通过数值模拟的计算，得到了在不同吹气量下的钢液的循环流动的速度矢量图、速度云图和湍动能云图。

2.5.1 速度矢量图

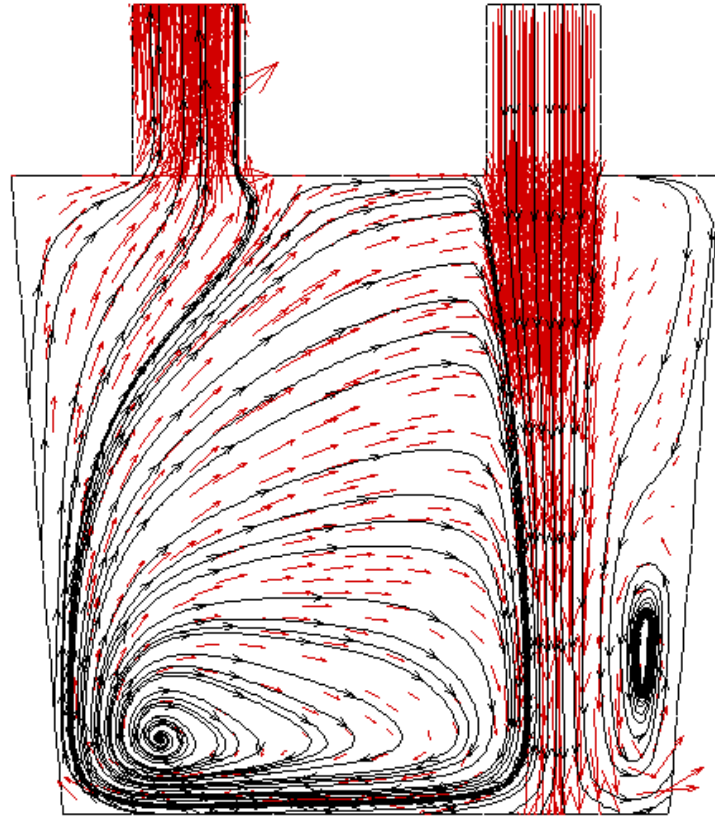
图2.3表示了四种不同的吹氩量下，钢包内钢液流动的速度矢量图。RH 装置中钢液在氩气的驱动和真空的抽吸作用下，进入真空室完成各项冶金任务，随后在重力的作用下流回到钢包。从图2.3可以看出，当吹氩量由小到大变化时，钢包内钢液的循环流动也逐渐剧烈。当吹氩量较小时，下降管处的钢液的流动和速度分布比较发散，而当吹氩量较大时，下降管处的钢液的流动和速度分布比较集中。钢液的这种循环流动在钢包内形成了两个旋流区，从图2.3分析可得，吹氩量逐渐变大，旋流区变得越来越密集，从而说明了吹气量对钢液循环流动的影响。



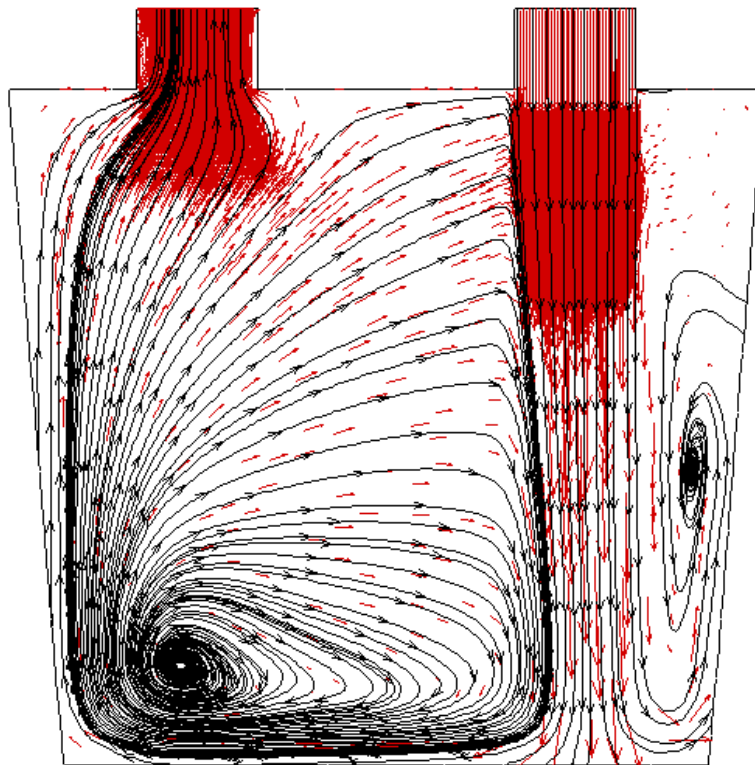
(a) $90 \text{ m}^3/\text{h}$



(b) $120 \text{ m}^3/\text{h}$



(c) 150m³/h

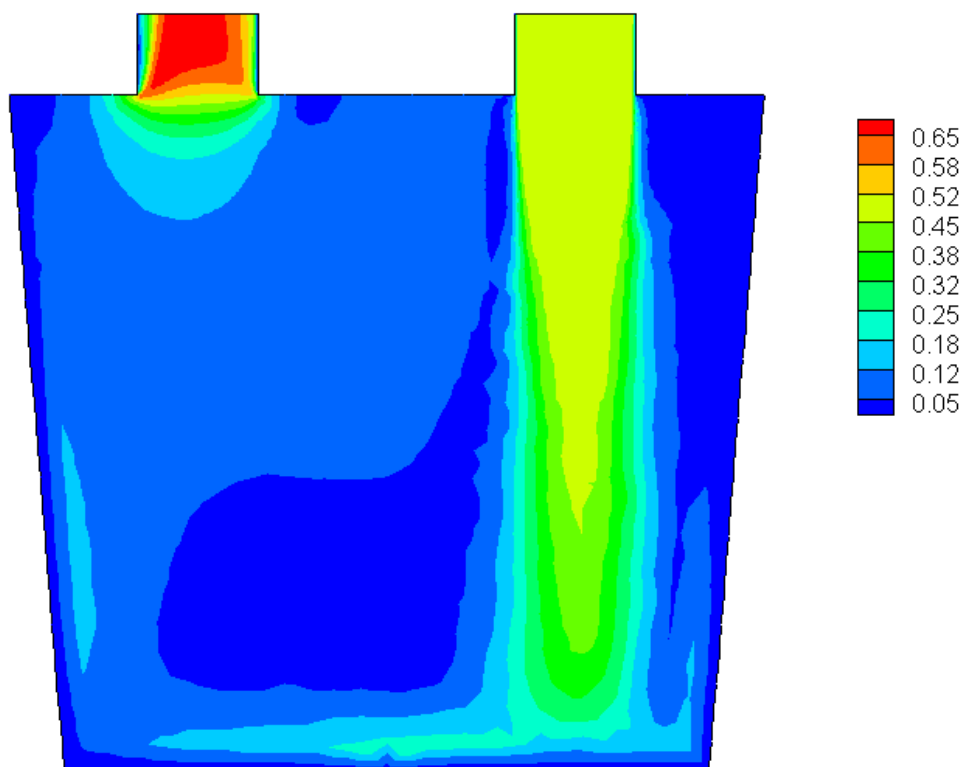


(d) 180 m³/h

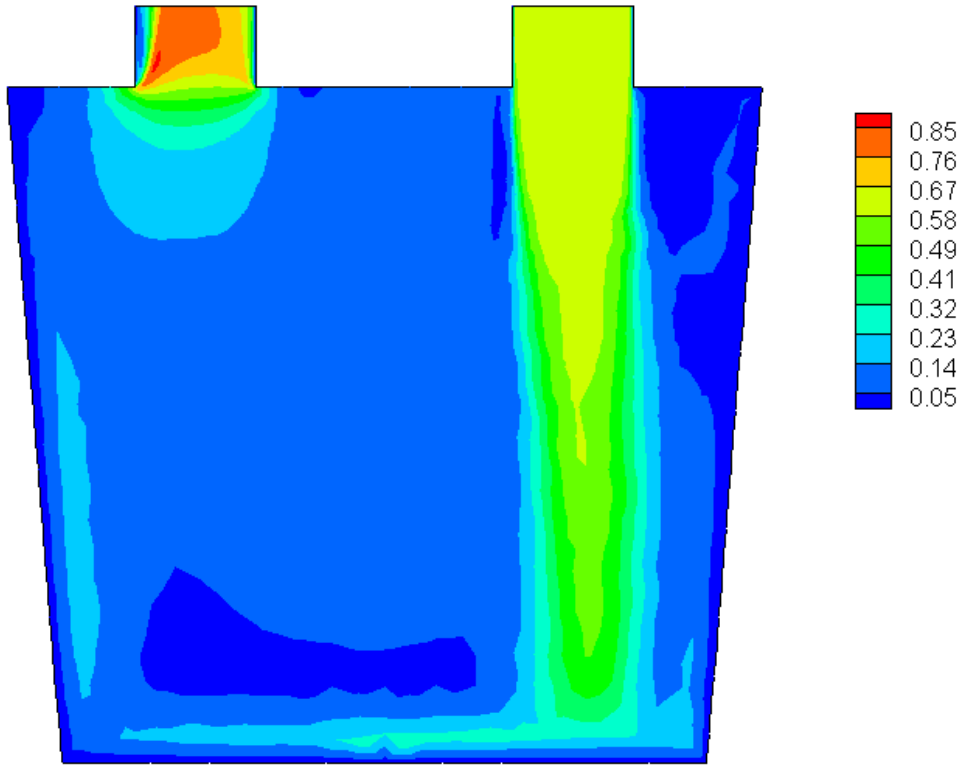
图2.3 不同吹气流量下的钢包内钢液流动的速度矢量图

2.5.2 速度云图

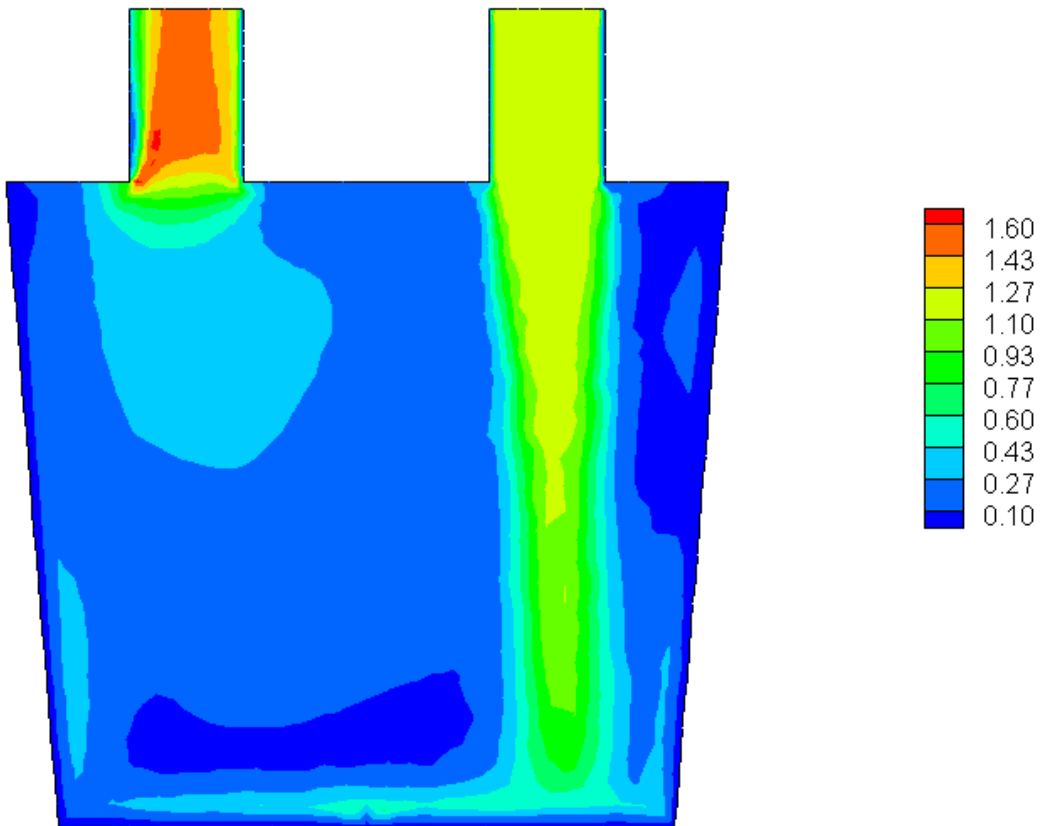
在 RH 精炼过程中，在上升管距底部三分之一处吹入一定流量的氩气，主要是为了使上升管处的钢液密度变小，在上部真空室的抽吸和气泡的驱动力作用下，钢液进入真空室，在真空作用下，气泡不断上升被抽走，带动钢液剧烈运动，使钢液中所含的气体迅速减少，从而达到脱气的目的。后来随着科技的进步，改善 RH 装置和精炼工艺，使得在真空可以完成脱气、脱碳、合金化等多种工艺。在真空室被处理的钢液在重力的作用下，经过下降管流到钢包中。图2.3已经表明，随着上升管吹入氩气流量的增加，经下降管流入的钢液的速度分布密集程度明显不同，而且钢包内钢液在下降管钢液的冲击作用下，形成了旋流，这样对钢包内钢液起到了很大的搅拌作用，对夹杂物的上浮、均匀钢液温度都有好处。但是，这样的循环流动势必会对钢包内壁和浸渍管造成很大的冲刷，使其寿命缩短。速度矢量图代表了钢液的流动方向和大小，但没有给出具体的流动速度，所以我们做出了速度云图。图2.4是不同吹气量下，钢包内钢液循环流动的速度云图，可以更加明显的看到速度的大小和分布。速度云图中不同的颜色区域代表了不同的速度范围，可以很好的看出钢包内钢液不同位置的具体速度。



(a) $90\text{m}^3/\text{h}$



(b) 120m³/h



(c) 150m³/h

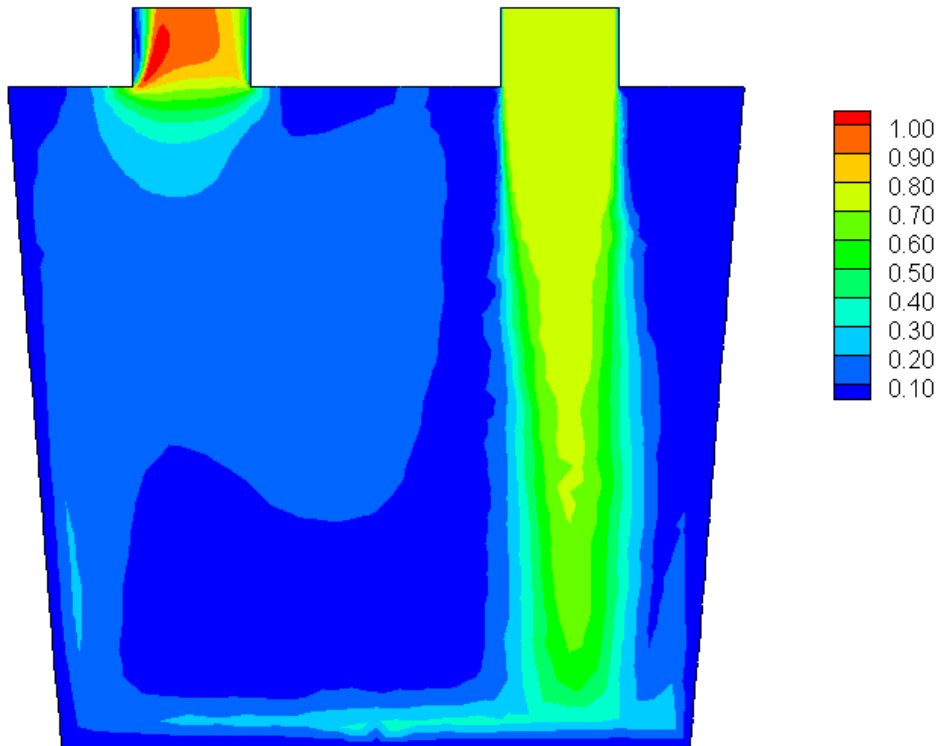
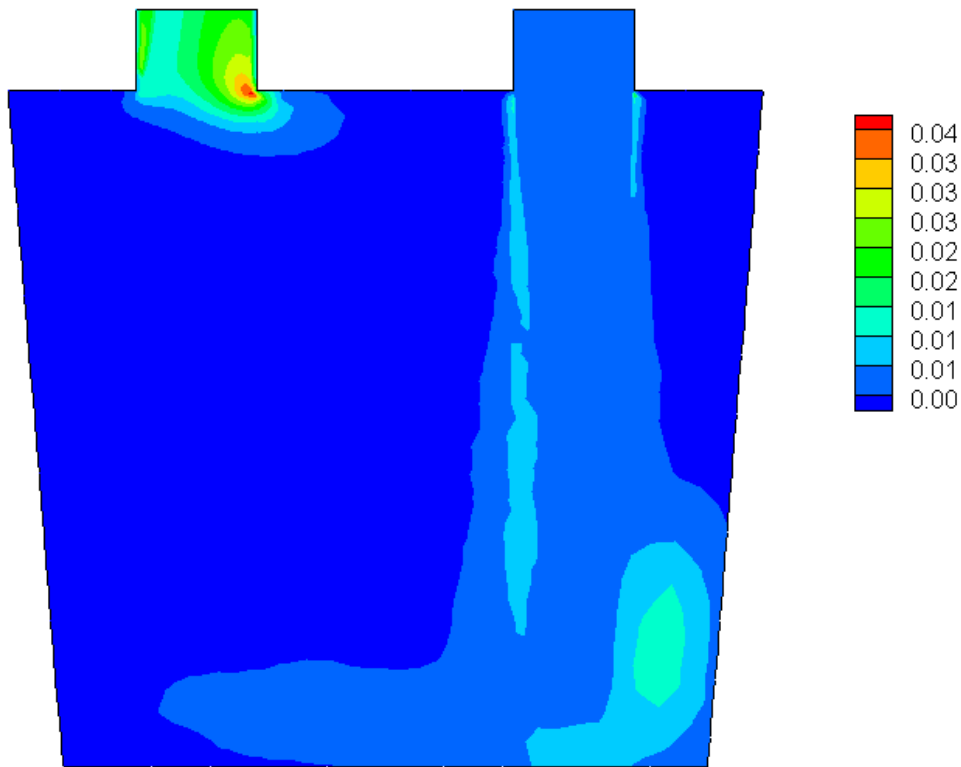
(d) $180\text{m}^3/\text{h}$

图2.4 不同吹氩量下钢包内钢液循环流动的速度云图

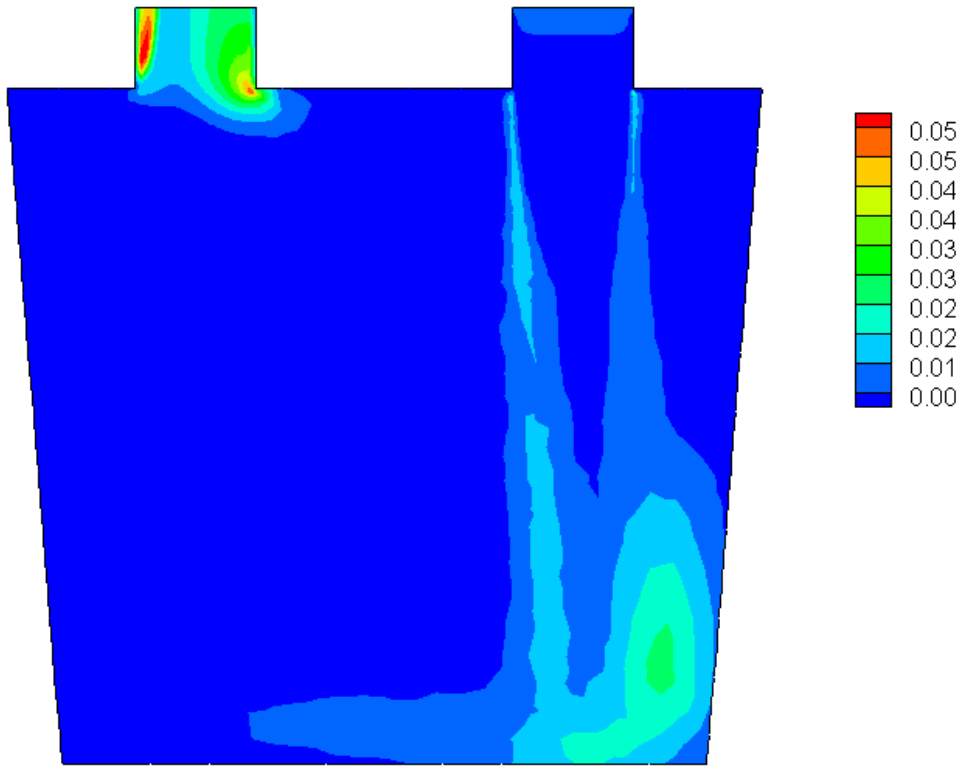
图2.4为吹氩流量为90、120、150、 $180\text{m}^3/\text{h}$ 时得到的模拟结果，从图2.4可以看到，由于气泡浮力的作用，钢液从上升管进入真空室，在真空的作用下完成各种冶金任务，然后在重力的作用下经下降管流回钢包内，从而使真空室熔池与钢包之间形成一个大的流动循环区。当吹氩量为 $90\text{m}^3/\text{h}$ 时，下降管流股中心处速度为 0.52m/s ，流股周围处的速度为 0.18m/s ，流股很明显呈发散状；当吹氩量为 $120\text{m}^3/\text{h}$ 时，下降管流股中心处的速度达到了 0.67m/s ，流股周围处的速度为 0.23m/s ，流股相对比较密集；当吹氩流量为 $150\text{m}^3/\text{h}$ 时，下降管流股中心出的速度达到了最大的 1.3m/s ，流股周围处速度也达到了 0.5m/s 以上，流股非常集中；当吹氩量为 $180\text{m}^3/\text{h}$ 时，下降管流股中心处的速度是 0.8m/s ，流股周围处的流速为 0.4m/s ，流股相对来说比较集中。在RH生产中，往往在钢包液面只能看到钢液微微的波动，而看不到钢包内部的循环流动，这说明钢液从下降管流出对钢液的搅拌比上升管处抽吸对钢液的搅拌作用更大，而且这样也就可以避免卷渣，不易造成钢液的污染。由速度云图分析可得，当吹氩量为 $180\text{m}^3/\text{h}$ 时，下降管处钢液的流速没有吹氩量为 $150\text{m}^3/\text{h}$ 时大，从而表明了吹氩量应该选择在一个合理的范围之内，吹氩量太大不但不会起到加强循环流动的作用，反而会起到负作用。

2.5.3 湍动能云图

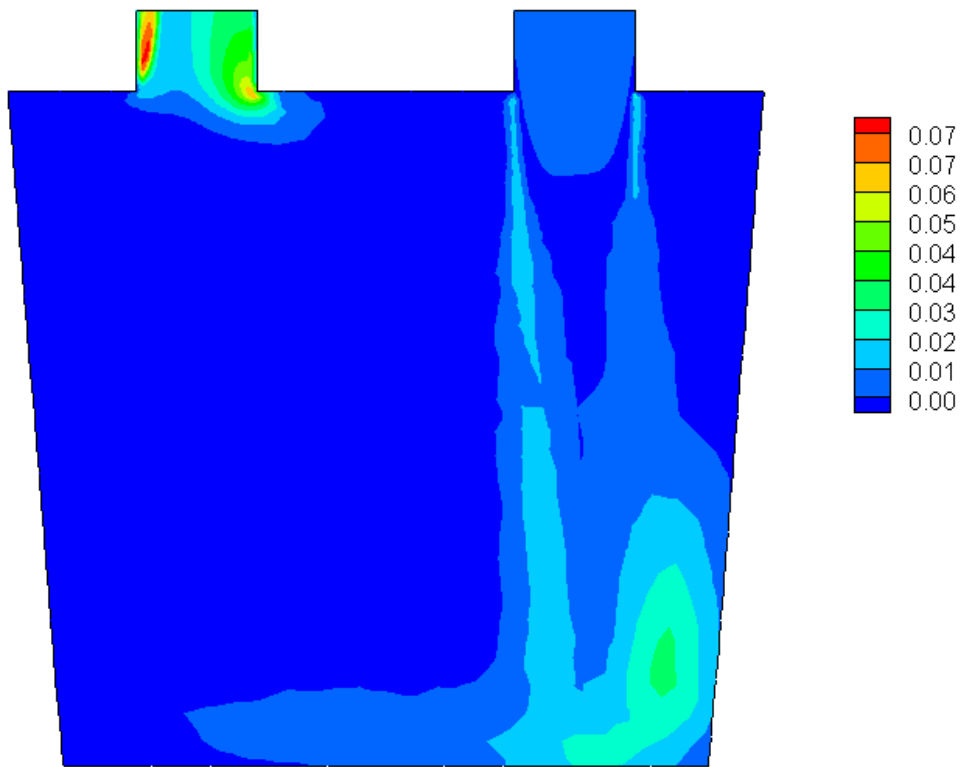
钢液的流动情况是十分复杂的湍流，湍流是流体的一种流动状态，另外一种就是层流。当流速很小时，流体分层流动，互不混合，称为层流，也称为稳流或片流；逐渐增加流速，流体的流线开始出现波浪状的摆动，摆动的频率及振幅随流速的增加而增加，此种流动状况称为过渡流；当流速增加到很大时，流线不再清楚可辨，流场中有许多小漩涡，层流被破坏，相邻流层间不但有滑动，还有混合。这时的流体作不规则运动，有垂直于流管轴线方向的分速度产生，这种运动称为湍流，又称为乱流、扰流或紊流。层流和湍流是以雷诺数的大小划分的，当雷诺数小于2300时，流体流动为层流；当雷诺数大于2300时，流体流动为湍流。湍流动能是湍流速度的涨落方差与流体质量乘积的1/2，是衡量湍流发展和衰退的指标。图2.5表示了 RH 精炼中不同吹氩量之下钢包内湍动能的变化情况。



(a) 90m³/h



(b) 120m³/h



(c) 150m³/h

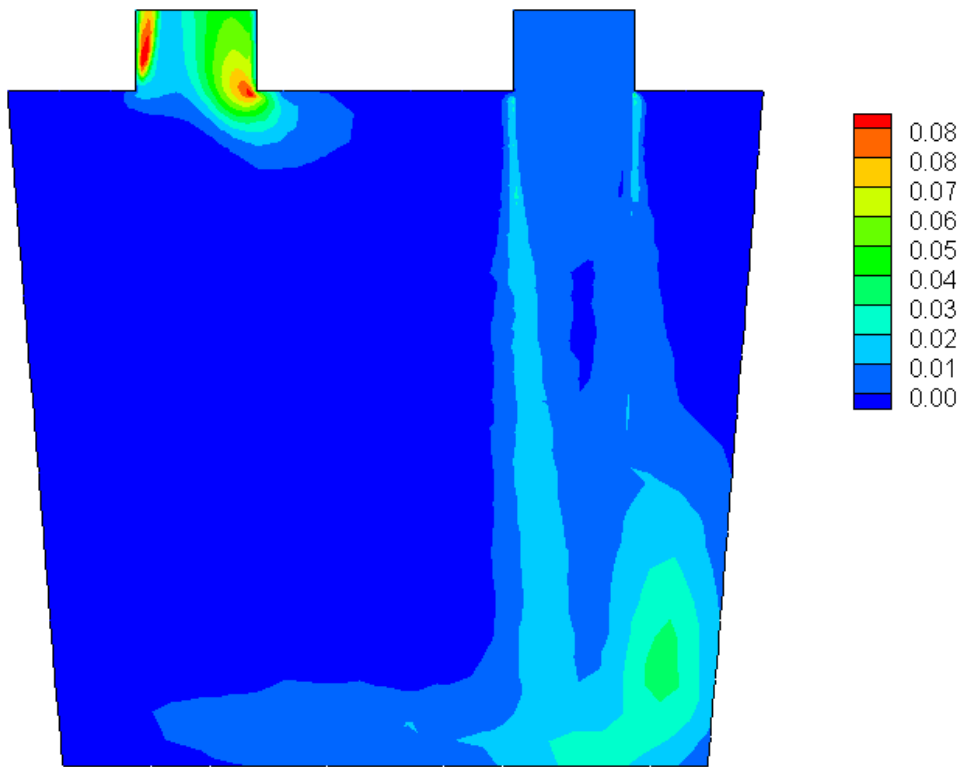
(d) $180\text{m}^3/\text{h}$

图2.5 不同吹氩量之下钢包内湍动能的关系

图2.5表示了在不同吹气量下钢包内的湍动能，由图分析可得，当吹气量逐渐增加，钢包内钢液的湍动能也随着增大，但当吹气量增加到 $180\text{m}^3/\text{h}$ 时，钢包内钢液的湍动能较吹气量为 $150\text{m}^3/\text{h}$ 时变化不大。在适当的吹气量的范围之内，钢包内钢液的湍动能随着吹气量的增大而增大。

3 结 论

本文以重钢210 t RH精炼装置为研究对象，借助ANSYS和FLUENT等软件建立实体模型并进行了数值模拟计算。研究了在不同的吹氩流量下，钢包内钢液的循环流量以及钢液循环流动的情况。通过数值模拟得到以下结论：

① 本模拟以 $90\text{m}^3/\text{h}$ ， $120\text{m}^3/\text{h}$ ， $150\text{m}^3/\text{h}$ 为吹氩量，随着吹气量的增大，RH装置中下降管处的钢液流动速度逐渐增大；当吹气量为 $180\text{m}^3/\text{h}$ 时，下降管处钢液的流速反而降低了，说明吹氩量也有一个饱和值，应该控制好吹氩流量的范围。

② 当吹氩量在合理的范围之内，提高吹氩量会增加钢液的循环流动，下降管处的钢液流股对钢包内的钢液起到很大的搅拌作用。

③ 在合理的吹氩流量范围之内，提高吹氩量会提高钢包内钢液的湍动能，加大钢液的循环流动。

参考文献

- [1] 张辉. RH 精炼钢液的流动的模拟研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
- [2] 杨红岗, 张春亮. RH 脱碳率影响因素的研究[J]. 2007 年 RH 精练技术研讨会论文集.
- [3] 迟云广, 沈巧珍, 彭明耀, 等. 210 t RH 精炼过程夹杂去除和卷渣的物理模拟[J]. 特殊钢, 2011,32(4): 10-13.
- [4] 耿佃桥, 雷洪, 陈芝会, 等. RH 真空精炼过程数值模拟的研究现状及展望[J]. 过程工程学报, 2010, 10(1): 271-275.
- [5] 丛芳.RH 真空精炼技术的发展、现状及其设备组成[J].2010 特钢年会论文集.
- [6] 朱苗勇, 黄宗泽.RH 真空脱碳精炼过程的模拟研究[J].金属学报, 2001, 37(1): 91-94.
- [7] 朱苗勇, 黄宗泽.RH 装置流场的数值模拟研究[J].金属学报, 2000, 36(2): 1175-1176.
- [8] 齐凤升, 李宝宽, 陈海耿.旋转磁场作用下真空精炼装置内脱碳过程的研究[J].东北大学学报, 2009, 30(8): 1159-1162.
- [9] 李宝宽, 霍慧芳, 栾叶君, 等. RH真空精炼系统气液两相循环流动的均相流模型[J]. 金属学报, 2005, 45(1) : 60-66.
- [10] 郁能文. 多功能RH精炼过程的数学和物理模拟[D].上海: 上海大学, 2001.
- [11] 孙亮, 艾立群, 赵俊花, 等.RH处理过程钢液流动行为的三维数值模拟[J].特殊钢, 2009, 30(2): 18-20.
- [12] 樊世川, 李玉宽, 赫冀成.多管真空循环脱气系统循环流动模型[J].金属学报, 2001, 37(10) : 1100-1102.
- [13] 张琳, 孙彦军, 朱进峰, 等.RH精炼过程钢液流动数值模拟和应用[J].北京科技大学学报, 2009, 31(7): 821-823.
- [14] 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.
- [15] 薛利强, 何平, 张海风, 等.优化条件的RH流场数值模拟研究[J].炼钢, 2012, 28(6): 40-43.

致 谢

在论文即将结束之际，谨向半年来给予我无限关怀帮助和指导的王宏丹老师表示由衷的感谢和崇高的敬意。从论文的选题、资料的收集到论文的撰写编排整个过程中，我得到了许多的热情帮助。在这学期里，王老师对我进行了悉心的指导和教育，使我能够不断地学习提高。王老师渊博的学识、严谨的治学态度以及平易近人的作风使我受益匪浅、终生难忘，我相信在今后的工作和生活中，我会时刻保持勤奋刻苦的态度和求实创新的精神。

在此还要感谢这篇论文所涉及到的各位学者。本文引用了数位学者的研究文献，如果没有各位学者的研究成果的帮助和启发，我将很难完成本篇论文的写作。同时感谢我们小组的同学，在这半年里，我们共同学习互相帮助，使我们之间的热情帮助使得我们各自的论文顺利完成。

最后，感谢所有参加评审和论文答辩的各位老师，感谢他们在百忙之中审阅本文并提出宝贵的意见!