





**A Dissertation in Engineering of Thermal Physics**

**Diffusion Behavior of Alloying Elements  
Heterogeneous Research in Composite Casting  
Mold**

**By Zhang Penggang**

**Supervisor: Professor Li Baokuan**

**Specialty: Engineering of Thermal Physics**

**Northeastern University**

**Shenyang, China**

**February 2009**



## 独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本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谢意。

学位论文作者签名：张朋刚

日期：2009年7月

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☐      一年 ☐      一年半 ☐      两年 ☐

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：



# 复合浇注连铸结晶器内异质合金元素扩散行为研究

## 摘 要

不锈钢板在建筑、交通、土木、工业生产等领域有广泛的用途，但是由于其内部含有铬、镍等元素，镍元素价格的不断波动使得不锈钢价格波动较大。从总体趋势上来说，不锈钢价格一直在上涨，为了节约经济成本、节约资源，经过科研单位的研究，复合钢板在大多数场合可以替代不锈钢，且价格低廉。然而，国际上目前主要采用爆炸法生产复合钢板，浪费资源且产品质量低。目前比较先进的生产方式是连铸连轧的生产技术，但是要应用于复合钢板的生产，还需要进一步的基础研究。

本论文是对复合钢板的连铸连轧生产所做的基础研究，主要通过水模型的模拟实验来观测分析复合钢板生产过程中的浓度场分布情况，然后在此基础上寻找更加合适的生产方案，这些基础研究对于复合钢板的实际生产具有很好的指导意义。

本文用流经短水口的高锰酸钾溶液模拟复合钢板中的不锈钢溶液，用流经带有隔板的长水口的水模拟复合钢板中的普碳钢溶液。当高锰酸钾溶液流经结晶器的不同缝隙时，就会有不同的浓度扩散现象产生，利用数码设备拍摄高锰酸钾溶液在结晶器不同缝隙的扩散现象，然后对其结果进行处理和分析，得到了实验最佳的浓度场分布方案，也就是复合钢板生产的合适方案。即短水口出水口向下倾斜  $15^\circ$ ，结晶器宽面距离隔板间距为 2.5mm 左右的流动方式可以得到比较长久、持续、稳定和对称的高锰酸钾溶液扩散现象，所以在复合钢板生产过程中可以对实际的水口进行这样的设置。

关键词：复合钢板；水口；浓度；结晶器；扩散



# Diffusion Behavior of Alloying Elements Heterogeneous Research in Composite Casting Mold

## Abstract

Stainless steel plate has a wide range of uses in the construction, transportation, civil, industrial production and so on. However, due to internal stainless steel containing chromium, nickel and other elements, and nickel makes the fluctuation in the price of stainless steel volatile. The general trend from the point of view, the stainless steel prices have been rising. In order to save costs and conserve resources, through research, the majority of occasions in the composite plate can replace stainless steel, and low prices. However, the international use of the explosion is currently the major way of producing composite plate, a waste way of resources and low product quality. At present, more advanced modes of production is the production of continuous casting and rolling technology, but applies to the production of steel sheet, needs for further basic research.

This paper is a basic research on composite plate made by continuous casting and rolling production, mainly through water simulation model to observe and analyse the composite steel production in the process of distribution of the concentration field, and then on this basis to find a more appropriate production program. The basic research for the actual production of steel sheet has a good guidance.

In this paper, Potassium permanganate solution through short outlet simulates stainless steel solution in the composite plate, water through long outlet with partition simulates carbon steel solution. When the potassium permanganate solution pass through the mold at different gap, it will produce different phenomenon of the spread of the concentrations. Using the digital devices to film the potassium permanganate solution in the mold in different proliferation of crack, and then the results of its processing and analysis, to be the best concentration of the experimental field



distribution program, which is the appropriate composite steel production program. That is, downward-sloping short outlet nozzle  $15^\circ$ , wide face mold spacing of 2.5mm from the partition of flow patterns around can be more permanent, sustainable, stable and symmetrical spread of the phenomenon of potassium permanganate solution, so the production of composite plate the process of outlet on the actual settings for this.

**Key word:** composite plate; outlet; concentration; mold; proliferation

# 目 录

独创性声明.....	I
摘 要.....	II
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 不锈钢板的发展状况.....	1
1.1.1 世界不锈钢生产与发展.....	1
1.1.2 世界不锈钢市场的最新进展.....	2
1.1.3 中国不锈钢的生产与发展.....	5
1.2 复合钢板生产技术.....	7
1.2.1 直接轧制法.....	7
1.2.1.1 热轧复合法.....	7
1.2.1.2 冷轧复合法.....	7
1.2.1.3 真空轧制复合法.....	8
1.2.2 电磁连铸复合法.....	8
1.3 选题依据及研究内容和意义.....	9
1.3.1 选题依据.....	9
1.3.2 研究内容及意义.....	9
1.4 本章小结.....	9
第二章 流动显示技术.....	10
2.1 示踪粒子空间流动显示技术.....	10
2.1.1 概述.....	10
2.1.2 示踪粒子流动显示技术的各种方法.....	10
2.2 染色线显示技术.....	11
2.2.1 概述.....	11
2.2.2 染色线显示技术的应用.....	11
2.3 流动显示技术的新发展.....	12
2.4 本章小结.....	12
第三章 双水口结晶器内浓度分布现象.....	13
3.1 概述.....	13
3.2 实验用品介绍.....	13
3.2.1 实验器材介绍.....	13
3.2.2 实验试剂介绍.....	16
3.3 实验方法.....	17
3.3.1 实验方法.....	17

3.3.2 实验步骤及现象.....	19
3.3.2.1 结晶器正前方的实验步骤.....	19
3.3.2.2 结晶器窄面实验现象.....	20
3.3.2.3 结晶器宽面实验现象.....	28
3.3.3 实验结果对比和分析.....	36
3.3.3.1 影响本实验浓度场分布的主要因素.....	36
3.3.3.2 各组实验之间的对比和分析.....	44
3.4 本章小结.....	45
<b>第四章 双水口结晶器壁湍流扩散.....</b>	<b>47</b>
4.1 结晶器窄面壁湍流.....	47
4.1.1 结晶器窄面壁湍流扩散模型理论.....	47
4.1.1.1 对流传质过程的相关准则数.....	48
4.1.2 结晶器窄面壁湍流扩散求解.....	49
4.2 本章小结.....	54
<b>第五章 结论与展望.....</b>	<b>55</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>56</b>
<b>致谢.....</b>	<b>57</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 不锈钢板的发展状况

### 1.1.1 世界不锈钢生产与发展

世界不锈钢工业化生产自1912年由克虏伯建立生产基础至今已有80多年的工业化历史,由于不锈钢具有优良的品质和特征,因而应用范围越来越广,并且世界范围内不锈钢的生产和需求都一直呈现持续增长的趋势。

从不锈钢生产的发展历史看,本世纪50年代起美国获得迅速发展,60年代,随着世界经济的复苏,欧洲的消费量在不断增加,70年代起日本的不锈钢产量超过美国居于世界第一,并一直保持下来,80年代以来,亚洲地区的韩国和中国(包括台湾)的不锈钢生产也有了快速的发展。

不锈钢产品问世以来,世界不锈钢的消费量以每年5.8%的增长速度,引导了不锈钢生产持续高速发展,1950-1995年间西方不锈钢产量由不足10.万t增长至1440万t,平均年增长速度高达6.2%。其中1950年-1970年间,平均年增长速度高达8.2%,1970年以来,钢铁工业发展速度明显缓慢,特别是西方国家产钢量呈下降趋势,但不锈钢仍保持增长的趋势,如1994年世界不锈钢产量达1300多万t,增加12%,1995年产量达1570多万t,增加13%,尽管1996年增长仅为0.5%,但从长远看,可预测至少有5%的增加速度,到2000年世界不锈钢产量将超过1700万t以上,据曼内斯德马格冶金技术公司销售经理Lrose预测至2010年世界不锈钢产量达2500万t。

过去世界范围内不锈钢的生产主要集中在欧洲、美国、日本等工业发达国家,但近年来有向亚洲东移的趋势。例如:1996年世界不锈钢产量中,欧洲维持在40%,日本则从70年代的40%下降到25%,而亚洲其它国家和地区已上升至15.5%的水平。世界主要生产国的不锈钢表观消费量(钢材产量+进口材量-出口材量)美国最高,1993年为2108.9kg/a。其次是日本、德国、意大利、中国、法国、韩国、英国,而不锈钢的人均消费量以奥地利最高,1993年为25.4kg/人,其次为瑞典21.7kg/人,日本16.8kg/人,韩国12.4kg/人,意大利9.9kg/人,法国9.8kg/人,美国8.3kg/人,比利时和英国各为7kg/人,全世界平均2.1kg/人,而中国仅为0.96kg/人。

当前世界不锈钢贸易中,出口国主要是日本和欧洲,而进口国主要是美国和亚洲地区,在场所消费的不锈钢中,板材特别是冷薄板消费量最大,达到 66 万 t/a,预计到本世纪末,世界不锈钢冷轧薄板,每年的消费量将达 900 万 t-1000 万 t。亚洲不锈钢冷轧板的消费量,目前每年以 19%的速度在增长,预计至本世纪末,将从现在年消耗 160 万 t 增加到 300 万 t 左右。在目前所消耗的不锈钢中,奥氏体 Cr-Ni 系占 70%,而马氏体、铁素体 Cr 系不锈钢约占 30%。但是廉价的 Cr 系不锈钢有扩大应用范围,进一步代替 Cr-Ni 系不锈钢的趋势,预计到 2000 年前后 Cr-Ni 系和 Cr 系不锈钢,有可能各为 50%<sup>[1]</sup>。

据英国钢铁分析咨询机构 MEPS 预测 2005 年全球不锈钢产量将上升至 2530 万 t,年增长 3.7%,增长出现减缓。在过去的 1 年间,发达国家不锈钢市场已经出现供应过剩,由此导致美国和欧盟不锈钢基价下调。日本不锈钢产业在进行合理化调整后,年不锈钢产量稳定在 400 万 t 左右。中国台湾省不锈钢产量将温和上升。韩国不锈钢投资力度较大,推动其年产量短期内达到 250 万 t。巴西、印度和南非不锈钢产量也将增长,预计 3 周总计产量为 285 万 t。2005 年中国不锈钢产量将提高 30 万 t,前苏联国家仅能保持 2004 年水平<sup>[2]</sup>。

### 1.1.2 世界不锈钢市场的最新进展

英国商品研究所(CRU)最近发表报告说,2008 年以来虽然世界不锈钢产量未呈现出迅猛增长的强劲势头,然而却在逐季度稳步回升。实际上全球不锈钢产量在去年第 3 季度下至仅 633 万吨低谷之后,从第 4 季度开始回升至 718 万吨,而且今年第一季度进一步回升至 771 万吨,估计第 2 季度可继续增至 792 万吨。但是与上一年同期相比仍为下降。

值得注意的是,目前美国冷轧不锈钢市场比几个月以前更为乐观。虽然从美国经济来看濒于衰退,但是冷轧不锈钢薄板市场需求比今年初的水平有所回升。随着市场购买量的逐渐增加以及进口继续维持在低水平,从而也引起不锈钢加工服务中心库存的明显下降。在这种情况下,美国市场不锈钢基价已由坚稳转为上涨。

而欧洲不锈钢市场发展势头依然是最为强劲。全欧尤其是北欧不仅需求旺盛,而且交货期延长以及价格成功上涨。但是近来有迹象表明,业界也忧虑随着经济增势的趋于减缓,不锈钢用户消费需求相应放慢,从而抑制库存补充的活跃。预计这种态势今后仍将持续下去。此外,还有一关键因素支持着我们预测就是近

期内世界不锈钢生产将继续缓慢回升,而并非是迅猛反弹,其态势如同上一周期回升势头一样。

相比之下,亚洲不锈钢市场却令人担心,主要原因是市场需求疲软,而且库存偏高。市场买家采购谨慎,消费者订购兴趣不大。特别是亚洲生产者仍在控制产量。比如在中国这种状态更为明显,主要原因是全国最大的两个消费地区无锡和佛山冷轧板材需求疲弱以及库存高涨。而在日本,由于库存仍高于人们希望的水平,因此主要不锈钢生产者新日铁住金不锈钢株式会社宣布仍将继续削减产量。鉴于这种情况,中日两国不锈钢厂家今年第一季度难以提高价格,但由于受不锈钢合金成本尤其是铬铁的猛涨,不得不在第2季度讨论提高价格。

除了中国和日本之外,亚洲其它不锈钢市场略显坚挺。由于原材料价格的提高,韩国最大钢铁厂家浦项钢铁公司成功提高了304级冷轧不锈钢薄板销售价格。而且由于日元汇率的坚挺,韩国从日本进口不锈钢价格亦趋于上涨<sup>[3]</sup>。

根据CRU的初步统计,2008年上半年全球不锈钢累计总产量达1563.2万吨,比去年同期略升1%,但是除了中国产量明显增长以外,世界其它主要生产国家和地区普遍趋于平稳或下降。首先,西欧产量为456.1万吨,同比微升0.5%。其中,比利时上升2.3%至87.4万吨;芬兰上升6.9%至57.3万吨;法国下降5.6%至15万吨;德国上升5.4%至85.8万吨;意大利下降7.4%至86.9万吨;西班牙下降2.3%至60.8万吨;瑞典上升1.8%至35.2万吨;英国下降4.2%至20.9万吨;西欧其它国家微升0.2%至6.9万吨。其次,东欧产量为1.5万吨,下降1.4%;独联体为12.7万吨,与去年同期持平;美国为119.3万吨,下降2.9%;巴西为25万吨,上升3.1%;南非为32.5万吨,下降13.7%。另外,上半年亚洲产量则达916.3万吨,同比上升2.7%,其中,中国达417.2万吨,上升10.7%;日本为197.5万吨,下降4.2%;韩国为103.6万吨,下降7.5%;中国台湾为78.6万吨,下降10%。

统计资料还显示,2008年上半年西方世界不锈钢生产达1131.9万吨,同比下降2.1%。其中奥氏体不锈钢产量占891.3万吨,占西方世界不锈钢总产量的比率达78.7%,比去年同期上升2.2个百分点。而上半年全球奥氏体不锈钢产量为1185万吨,所占不锈钢总产量的比率为75.8%,同比上升1.4个百分点。

另外根据CRU的统计,2007年西方世界特殊钢总产量达4977.4万吨,比2006年下降7.2%。其中,合金钢产量为4881.8万吨,下降7.5%。主要包括:美国830.8万吨,下降7%;日本1141.2万吨,剧降25.2%;德国1371.4万吨,上

升 2.5%；法国 224.4 万吨，下降 3.5%；意大利 560.9 万吨，上升 1.9%；英国 77.9 万吨，上升 3.7%；瑞典 292 万吨，上升 2.3%；西班牙 193 万吨，上升 2.6%；比利时和卢森堡 240.3 万吨，上升 1.4%。

而 2007 年西方世界工具钢和高速钢总产量则达 95.6 万吨，比 2006 年增长 10.3%。其中，美国工具钢和高速钢合计产量为 1.6 万吨，下降 3.7%；日本工具钢产量为 12.7 万吨，上升 7.6%，日本高速钢为 1.5 万吨，略降 0.4%；法国合计产量为 10 万吨，上升 12.5%；德国合计产量为 53.3 万吨；意大利合计产量为 2.7 万吨，上升 7.6%；英国合计产量为 1700 吨，剧升 58.8%；瑞典合计产量为 13.6 万吨，上升 5.9%<sup>[4]</sup>。表 1.1<sup>[5]</sup>和表 1.2<sup>[5]</sup>分别给出了世界各地区不锈钢产量和世界各国奥氏体不锈钢产量。

表 1.1 世界各国（地区）不锈钢产量统计  
Table 1.1 World countries (regions) of stainless steel production statistics

国家或地区	1985	1990	1995	1997	1998	1999	2000	2001
日本	263.8	313	392.5	394.2	344.7	337.9	378.1	362.8
美国	152.7	185.1	205.5	216.1	200.9	220	230	240
德国	80.8	114.6	149	148.1	147.9	150	158	160
韩国	2	36	70.4	111.3	123	135	148	148
中国台湾	3.2	15	49.8	81.4	97.1	113	129	139
法国	56	79.7	98	100.6	105.9	111.5	120	127
意大利	50.9	57.4	101.7	102.5	109.6	112	122	125
西班牙	27.1	46.1	76.5	96	101.2	110	115	115
瑞典	43.5	47.1	61.8	72.4	74.6	71	82	90
比利时	15.1	37.2	62.2	62.5	64.8	70	73	76
芬兰	17.6	22.6	43.1	54.3	57.5	60	64	65
英国	28.3	38.8	54.8	55.3	45	48	55	56
南非	9.9	11.9	26	43.9	43	48	54	55
世界合计	791.5	1067.5	1497.9	1635.7	1711.4	1711.4	1861.1	1896.8

表 1.2 世界各国奥氏体不锈钢产量统计

万吨

Table 1.2 Austenitic stainless steel production and statistics around the world 10,000 tons

国家/地区 年份	日本	美国	西欧	其他国家	世界合计
1989	224.5	124.7	328.8	83	761
1990	230.3	138.8	354	101	824.1
1991	238	124.5	340.1	117.2	819.8
1992	220	129.4	365.9	123.8	839.1
1993	227.5	119.5	395.5	137	879.5
1994	242.5	120.1	465.3	168.2	996.1
1995	279.5	137.8	515.3	213.9	1146.5
1996	272.7	126	482.4	248.8	1129.9
1997	283.8	141.8	550.6	283.4	1259.6
1998	246.8	127	566.6	302.4	1242.8
1999	235.2	136.4	597.3	340.3	1309.2
2000 预计	257.1	144.9	643.2	381.4	1426.6
2001 预测	239.8	151.2	664.1	394	1449.1

### 1.1.3 中国不锈钢的生产与发展

我国从上世纪 50 年代初开始生产不锈钢，起步较早，但是在上个世纪发展一直比较缓慢。在上世纪九十年代，不锈钢材年产量一直在 24 万 t 上下徘徊，自给率很低，而当时世界的不锈钢生产量已经到接近 2000 万吨左右。此外，我国生产工艺及装备水平仍比较落后，冶炼设备(电炉)全部小于 30 t，很难配备二次精炼设施，浇铸仍沿用落后的模铸工艺，连铸比仅为 15%。轧钢设备总体水平不高，产品实物质量与国外差距较大。当时生产能力小而分散，均达不到合理经济规模。据统计，当时国内生产不锈钢的厂家多达 20 余家，其中 11 家重点特殊钢厂的不锈钢平均生产能力仅 3 万 t(能力最大的太钢只有 10 多万 t)，主要生产厂家有太钢、上钢三厂、上钢五厂、抚顺钢厂和长城特钢等，所生产的不锈钢材中，铬-镍系奥氏体不锈钢占 70%~75%、铬系铁素体不锈钢占 25%~30%、板带材产量约占 50%，由于工艺技术落后等原因，不锈钢的综合成材率仅为 65%左



右。1995、1996 两年,我国不锈钢材产量分别为 28.03 万 t 和 22.04 万 t,消费量分别约 65 万 t 和 74 万 t。自给率仅分别为 43%和 30%。1997 年不锈钢材产量 19.68 万 t,表观消费量 68.82 万 t,自给率仅 28.60%,缺口部分(尤其是高附加值的薄板)只能依靠大量进口。不锈钢产品中,板带材生产比重偏低,板带材产量仅占不锈钢材总量的 50%,而实际消费量占 60%~65%。另外,当时我国的不锈钢生产厂家分散,专业化程度较差,各个品种的生产都达不到合理的经济规模。

不锈钢的四大类钢种中,我国当时除奥氏体型、马氏体型外,其它各类钢种(铁素体型、 $\alpha + \gamma$  型)由于工艺技术等方面原因都还只能少量生产。即使在可以大量生产的钢种中,也有相当一部分属于国外淘汰系列,例如:含钛 18-8 型奥氏体不锈钢薄板在国外已属淘汰产品(仅占 2%~3%),但我国仍占 90%左右。在产品的品种规格方面,首先是 1 mm 以下的不锈钢薄板,钢厂生产困难,实际产量很小;其次就表面状态而言,仅能提供 2D(热处理酸洗后再磨光)和 2B(热处理酸洗后再冷轧)产品,尚不能提供光亮热处理表面板(BA)、抛光板(HL)、具有连续磨砂表面的不锈钢板(花纹板)等品种。

2000 年以后,中国不锈钢产量在需求持续几年急剧增长的刺激下,开始高速增长,2000 年~2005 年之间增长了 286 万 t,6 年时间增加近 6 倍,2005 年中国不锈钢粗钢产量 316 万 t,比上年增长 79.6 万 t,增长 33.7%,位居世界第二。一个显著的转变是镍系钢比例开始降低,从 2000 年的 90%左右降到 2005 年的 72.8%<sup>[6]</sup>。

近几年我国不锈钢产业发展很快,不到十年时间钢产量从 1998 年的 20 多万吨达到 2005 年的 370 万吨,年均增长速度超过 30%。2005 年全国实际生产不锈钢 370 万吨,钢材 445 万吨,与 2004 年相比钢增长 21%,钢材增长 25%。按国别统计,我国的不锈钢产量已占世界第一位。太钢和上钢一厂共增产钢 56 万吨,其中太钢增产 20 万吨达到 92 万吨,上钢一厂增产 36 万吨达到 56 万吨,由于市场的原因,这两个重点不锈钢企业去年生产能力没有得到充分发挥。2005 年全国进口不锈钢材 305 万吨,和 2004 年相比净增加进口量 22 万吨,其中板材占 21 万吨;出口不锈钢材 40.9 万吨,和 2004 年相比增加 7 万吨。在扣除重复材、不考虑库存变化的情况下,2005 年不锈钢消费量在 590 万吨左右,所以无论从生产和消费量来看,我国均已成为世界不锈钢行业举足轻重的国家,特别是消费量近几年来一直保持世界第一。从品种结构看,进口的 305 万吨钢材中板材为 289 万吨,占 93%,国产钢材中板带材比例也占到 63%左右,所以板带材仍然是

消费结构中的主要品种<sup>[7]</sup>。

## 1.2 复合钢板生产技术

随着工业技术的不断发展,各行各业对结构材料的要求也越来越高,传统不锈钢产品已满足不了工业生产技术不断提高的需要,愈来愈多的行业为了提高容器和构件的使用寿命需要采用优质或贵重的材料,如果在普通金属上包覆一层具有特殊性能的材料来代替纯贵重材料的使用,既可满足使用要求又能避免浪费。在这种情况下,出现了复合钢板。复合钢板具有单层金属材料所不具有的优异性能以及力学功能特性,能够满足高强度、高比刚度、抗疲劳性、尺寸稳定、耐磨、抗振等性能的要求。

复合钢板的研制是由美国于 1860 年开始的。而我国是从 20 世纪 60 年代才开始研制这种新型材料的,1968 年大连造船厂陈火金等同志通过爆炸复合工艺试制成功了国内第一块双金属复合板。复合钢板是由两种性能不同的金属板通过特殊的加工制备方法复合而成的,与单一金属组元相比,经过合理设计组合后的层状复合钢板结合了两种金属组元各自的优点,可以获得单一金属所不具有的物理、化学及力学性能,大大节省稀贵材料,降低成本,具有单种金属材料不可比拟的优点。目前复合钢板的工艺研究方法包括直接轧制法、爆炸制坯轧制法、复合浇注法、反向凝固法以及电磁连铸法。本论文着重介绍一下直接轧制法和电磁连铸法。

### 1.2.1 直接轧制法

直接轧制法又分为热轧复合法、冷轧复合法以及真空轧制复合法。

#### 1.2.1.1 热轧复合法

热轧复合法是将复合材和基材重叠,周围焊接,通过热轧使其结合的方法。其目的是在大的塑性变形下,使复合材与基材完成金属结合,同时得到一定的形状与尺寸。热轧前加热的钢表面形成约 3 mm 厚的氧化膜,将氧化膜用高压水除去再热轧,热轧过程中仍会形成约 10  $\mu$ m 的氧化膜。如金属 Ti,除在表面形成氧化膜,内部 Ti 也吸收氧,在界面附近形成氧的浓化层。因而这些金属即便经酸洗除去氧化膜外,与氧化前的相比,组织仍有较大的变化。

#### 1.2.1.2 冷轧复合法

20 世纪 50 年代,美国首先开始做此研究,他们提出了以“表面处理+冷轧

复合+扩散退火”的三步法生产工艺。冷轧复合时的首道次变形量更大，一般要达到 60%~70%，凭借大的压下量冷轧重叠的多层金属，使它们产生原子结合或棒扣嵌合，通过扩散退火，使之强化。冷轧复合近年来发展较快，这种方法省去了其他各法的精整工序，从冷轧带坯开始生产，能够成卷轧制，生产成本低，适合大批量生产<sup>[8]</sup>。

### 1.2.1.3 真空轧制复合法

由于大气中金属表面覆盖着一层氧化膜、吸着层及表面有凸凹，这种状态严重阻碍金属间的结合。1953 年前苏联首先开始了真空轧制的试验，随后美国、中国、日本开始断续研究。真空轧制复合分为真空热轧和冷轧两种情况。

真空中热轧特征是：非氧化性气氛阻止表面形成氧化物、氮化物，使在大气中因氧化而难以加工的金属变得容易，通过热轧生成的金属新生面的本来特性能够充分发挥，因真空中有助于脱气的效果，可获得清洁的金属表面。前苏联当时是将 W、Mo、Nb、Ta 等稀有金属用于军工产品，后来才作为工业材料。为了提高其附加值，或是为了作为接头材料使用，进行了将异种材料复层结合为目的的研究。而这种研究所需真空度的最低要求是在  $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$  Torr 的情况下才能实现，要得到这样的真空度需要很高的技术。真空中冷轧需要污染极少的超高真空且需将表面磨平或离子冲击等除去表面的阻碍层，使物质表面成活性状态。通过活性表面密切接触达到接合。它具有更广泛的组合自由度，但使凸凹不平的材料表面完全接触，需一定的塑性变形。使活性化的表面保持一定时间也需要一定的真空度。

### 1.2.2 电磁连铸复合法

电磁连铸法尚处于研究阶段。其基本原理是：两种化学成分不同的钢液通过不同的浸入式水口同时注入结晶器，在结晶器的下部安装水平磁场，作用在钢流上的洛伦兹力垂直穿过水平磁场，抑制了钢液的混合，且水平磁场成为一个分界线，依靠磁流体力作用把结晶器熔池分为上、下两部分。通过结晶器冷却作用，上部熔池的钢液凝固成复合钢坯的外层。下部熔池的钢液凝固形成钢坯的内芯<sup>[9]</sup>。

## 1.3 选题依据及研究内容和意义

### 1.3.1 选题依据

复合钢板的电磁连铸生产法是可以让复合钢板连续、成批量生产的方法之一。电磁的作用是将复合钢板的不同成分（普碳钢和不锈钢）分离开，形成上下两个部分，使其不能混合。由此，我们可以采用在一个结晶器内的长水口上面添加隔板的方法形成物理的平面，以阻挡两种不同性质的液体的混合。

同一个结晶器内的长短水口进入结晶器内部以后，会出现各种漩涡和绕流现象，这一点已经在前人的实验中得到验证。但是在结晶器内不仅仅是流场在发生变化，两种不同液体的浓度场也在发生变化。本实验就是借助于不同的化学染色剂和电化学手段，来测试结晶器内混合现象中的浓度场。

### 1.3.2 研究内容及意义

本文主要是通过观察模拟双水口结晶器的物理模型，控制不同水口的流量和流速，然后向短水口中添加化学试剂，来观察和测量结晶器内长水口隔板两侧的浓度场分布情况以及浓度扩散的时间问题。以此为后面的连铸结晶器内长短水口混合现象的研究奠定更坚持的实验基础和理论基础，为复合钢板的实际生产提供更多的数据和依据。

## 1.4 本章小结

本章通过介绍世界和中国不锈钢市场的发展情况，得出复合钢板生产发展的必要性。在复合钢板的生产技术中，选取了目前国际上刚开始研究的电磁连铸复合板并对其进行改进，在改进的基础上提出了本文研究的依据、内容和意义。



## 第二章 流动显示技术

### 2.1 示踪粒子空间流动显示技术

#### 2.1.1 概述

示踪粒子空间流动显示技术是在透明无色的气流或水流中加入一些可见的粒子,如果这些外加的示踪粒子能跟随流体微团一起流动,人们就可以通过可见的外加粒子的运动来观察流体的运动,从而使各种流动现象显示出来。这样,人们能通过目视或照相等方法对气流或水流的运动状态进行直接观察,是我们在感性上获得整个绕流流场的直观形象及其流动发展全过程的流谱图画。该类显示技术已成为理解流动现象和简历反映流动主要特征的理论模型的重要手段。

目前,外加示踪粒子的流动显示技术应用十分广发,特别是和数字图像处理技术相结合,近年来正在发展的多种瞬态全流场测量技术,例如粒子图像测速技术(PIV),激光诱导荧光测速技术(LIF)等将成为今后流体力学中测量复杂的三维非定常流动的有力的手段。这些先进测量技术建立和发展都是以示踪粒子的流动显示技术为基础的参考<sup>[10]</sup>

#### 2.1.2 示踪粒子流动显示技术的各种方法

目前示踪粒子流动显示技术已十分广泛应用于风洞或水洞(水槽)中来显示各种复杂绕流流动。有的主要用于显示复杂流动现象,例如流动的分离、漩涡的形成和发展、漩涡的破裂等;有的则是在粒子流动显示的基础上进行流场的定量测量,对于这类显示技术不但要对示踪粒子所显示的流动速度、轨迹等作精准度分析,同时还将建立和发展各种定量分析的方法。

示踪粒子显示技术按其粒子的物态分为固态示踪粒子、液态示踪粒子和气态示踪粒子。

##### (1) 固态示踪粒子

在水洞或水槽中采用的固态示踪粒子通常有铝粉、有机玻璃粉末和密度接近于水的聚苯乙烯小球等。这种显示方法通常用来定性地观察流谱的形态。在风洞中采用的固态示踪粒子主要是烟颗粒。

##### (2) 液态示踪粒子

这类示踪粒子用于水洞或水槽中的流动显示。实际上这是水流中的染色线显示技术。液态的示踪物通常有稀释的牛奶，它的比重和粘性系数几乎和水相同，又由于牛奶中含有脂肪，在水中不易扩散，所以在水流显示中得到十分广泛的应用。此外，各种染料的溶液特别是荧光染料由于显示清晰又有各种颜色，所以在染色线显示技术中也得到十分普遍的应用。

本论文的实验中采用的浓度场示踪粒子为高锰酸钾溶液。高锰酸钾俗称灰锰氧，化学品英文名称为 *potassium permanganate*，颜色为紫黑色，分子式为  $\text{KMnO}_4$ ，其分子量为 158.04，密度 2.703 克/立方厘米。高于 240℃ 分解，易溶于水、甲醇、丙酮。实际的实验中高锰酸钾溶于水的性能很好，且扩散不是特别快，溶液颜色为紫红色，易于观测现象，所以很适合本实验的操作需要。

### (3) 气态示踪粒子

在水中使用的气态示踪物最多的是通过电解产生的氢气泡，由于它的直径小，所以在显示实验中不仅跟随性好，而且还具有足够的频响。这样，对于非定常流场的显示和测量，氢气泡显示是一种十分合适的测试技术。另一种在水中常用的气态示踪粒子是空气泡，它是通过在水中掺入乳化剂而得到这些微小的空气泡。在风洞中采用气态示踪粒子有彩色氦气泡。

## 2.2 染色线显示技术

### 2.2.1 概述

染色线显示技术实际是在被观测的流场中设置若干点，在这些点上将不断释放某种颜色的液体，它随流过该点的流体微团一起往下游流去，即流过该点的所有流体微团都将被染上颜色。这些流体微团组成了可视的染色线。

### 2.2.2 染色线显示技术的应用

- (1) 流动的分离现象和形态的显示
- (2) 漩涡破裂现象的显示
- (3) 染色线显示技术综合应用

利用染色液的壁面—空间联合流动显示技术不仅为壁面流型和空间流型之间的关系提供了直观的信息，为建立完整的复杂流动结构和形态提供了基础，同

时也为进一步探索形成这类流动的物理机理提供了线索。

此外,还有氢气泡显示技术、烟线显示技术、彩色氦气泡显示技术、蒸汽屏显示技术和片光流动显示技术。由于这些技术在本论文中没有应用,所以不再做详细的介绍<sup>[11]</sup>。

## 2.3 流动显示技术的新发展

新一代流动显示技术有如下特点:

- (1) 与计算机结合,应用计算机辅助技术;
- (2) 采集和输出的是定量信息;
- (3) 具有记录、存储、加工和计算机图像显示功能;
- (4) 以彩色作为参变量,可以同时输出流动图像和数据。

目前发展的新一代流动显示技术一定量化流动显示技术中最引人注目的是粒子成像测速(PIV)和激光诱导荧光(LIF)流动显示技术。目前 PIV 已达到实用阶段, LIF 仍处在研究阶段。

从上个世纪八十年代以后发展起来的主要新的流动显示技术有:粒子图像测速技术(PIV)、激光诱导荧光技术(LIF)、全息照相和全息干涉技术、激光超声测量(LUM)、光学层析技术、流场干涉图的图像处理技术和电子束流动显示与测量技术等。

## 2.4 本章小结

本章介绍了示踪粒子空间流动显示技术、染色线显示技术和流动显示技术的新发展,并且在此基础上给出了本实验要采用的流动显示技术和具体的试剂名称,为下面的具体实验提供了理论依据。





## 第三章 双水口结晶器内浓度分布现象

### 3.1 概述

在普通的钢板连铸生产中,结晶器内只有一个水口,这样的水口不存在不同流体的混合现象,也不存在异种流体浓度场分布不均的情况。本实验为了模拟复合钢板的连铸生产过程,在结晶器内部设置了两根长度不同的水口。短水口是模拟不锈钢液的流动,带隔板的长水口是模拟普碳钢液的流动,这两种实际生产中不同的液体在水模型实验中均用水流体来代替,由于水的无色透明性质,因此不能直接观察结晶器内两种不同液体的浓度场分布情况。为了能达到实验目的。我们特别引入了一些新的方法来观测结晶器内浓度场的分布情况。

### 3.2 实验用品介绍

#### 3.2.1 实验器材介绍

在整个实验过程中用的器材包括带有分隔板的大水箱一个、水箱连接管两根、U型管型结晶器一个、结晶器排水管一根、短水口的玻璃管三根、带隔板的长水口玻璃管两根、电子秤一个、烧杯一个、泡沫塑料若干以及数码摄影 DV 一部。

- (1) 水箱:本实验中水箱是一个正方体结构的水箱,水箱内部分为两部分,一部分用于短水口水箱连接管,约占总体积的四分之一,另一部分用于长水箱连接管,约占总体积的四分之三。

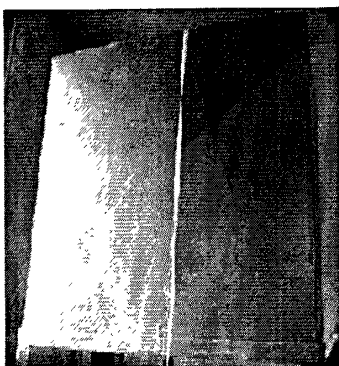


图 3.1 水箱示意图

Figure 3.1 Schematic diagram of water tank

- (2) 水箱连接管：连接水箱与短水口的水箱连接管长度为 1347mm，连接水箱与长水口的水箱连接管长度为 1397mm。



图 3.2 水箱连接管示意图

Figure 3.2 Schematic diagram of water tank connecting pipe

- (3) U 型管型结晶器是一个中空长方体结构。整个 U 型管结晶器分为两部分，前面一部分是个规范的长方体水槽，后半部分为一个带分隔板和排水口的水槽。由于本实验中应用的是前半部分水槽进行实验，所以尺寸也只测量前半部分足够，后半部分的隔板用来稳定整个实验的水位，水口用来排出实验的水。规范长方体水槽高 1210mm，长 520mm，宽 88mm，结晶器所有壁厚均为 10mm。具体结构示意图如图 3.3 所示，主要尺寸在图中已经标出。

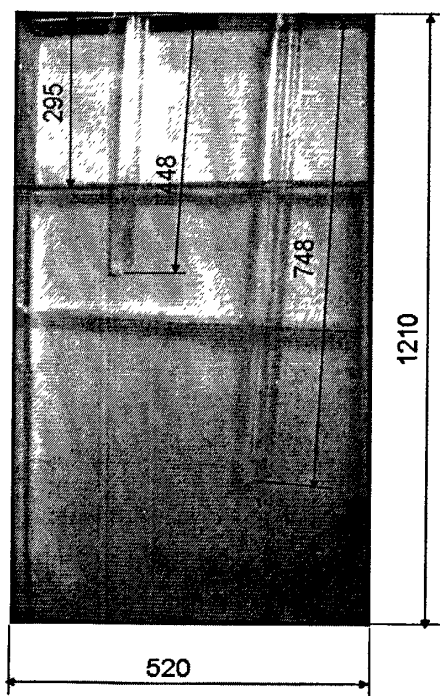


图 3.3 结晶器试验部分基本尺寸示意图

Figure 3.3 Schematic diagram of basic size mold

- (4) 结晶器排水管：结晶器排水管长 6000mm，管径 170mm。用来连接结晶器出水口到室外下水道排水。

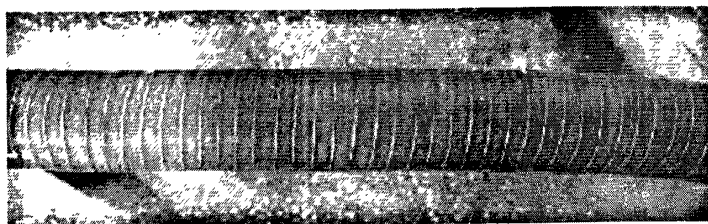


图 3.4 结晶器排水管

Figure 3.4 Mold drain

- (5) 水口：短水口管子三根，长度均为 448mm，出水口的方向分别为水平方向、向上倾斜 15 度方向和向下倾斜 15 度方向，每根管子顶端到水口的距离为 418mm。长水口管子有两根，长度均为 748mm，出水口的方向分别为竖直向下和竖直向下加向上倾斜 15 度，每根管子顶端到隔板的距离均为 490mm，隔板长度为 488mm，每根管子到水口的距离为 712mm。



图 3.5 结晶器水口示意图

Figure 3.5 Schematic diagram of mold outlet

- (6) 电子秤：电子秤用来称量高锰酸钾和氯化钾的质量。
- (7) 烧杯：烧杯用来配置高锰酸钾溶液，以便于观测实验现象。本实验采用的烧杯为 900ml 的烧杯。

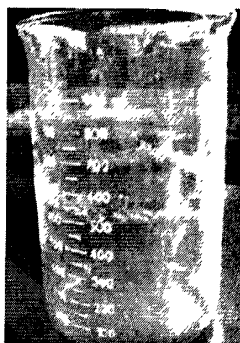


图 3.6 烧杯示意图

Figure 3.6 Schematic beaker

- (8) 泡沫塑料: 实验中需要对长水口的隔板进行前后或者两侧的密封, 经过前期的实验, 发现泡沫塑料是本实验用来密封的最佳选择, 既不浸水、而且有弹性, 易于安装在隔板上并且能较方便的放入结晶器内。

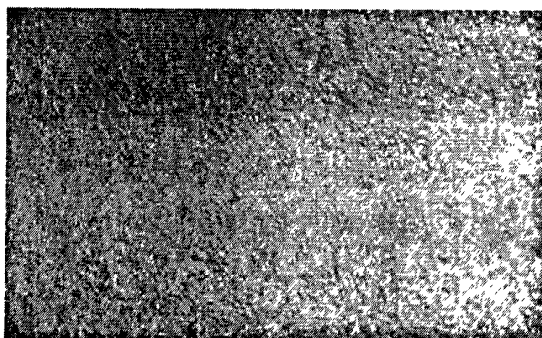


图 3.7 泡沫塑料示意图

Figure 3.7 Schematic diagram of foam

### 3.2.2 实验试剂介绍

- (1) 高锰酸钾: 本实验中高锰酸钾主要用来做成高锰酸钾溶液以显示短水口中流出来的液体浓度现象和分布情况。高锰酸钾的性质在第二章已经做过详细的介绍, 这里不再赘述。高锰酸钾示意图如图 3.8 所示。
- (2) 氯化钾: 氯化钾为白色结晶粉末, 溶于水, 不溶于乙醇。本实验采用氯化钾主要来做电导仪测试的试剂, 测量不同情况下短水口出来的液体流到结晶器内部不同地方所需要的时间。氯化钾示意图如图 3.9 所示。

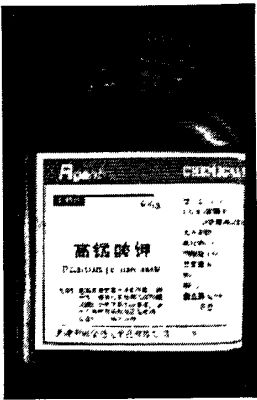


图 3.8 高锰酸钾示意图

Figure 3.8 Schematic diagram of potassium permanganate



图 3.9 氯化钾示意图

Figure 3.9 Schematic diagram of potassium chloride

3.3 实验方法

3.3.1 实验方法

本实验中，短水口的有机玻璃管流动的液体用来模拟实际复合钢板生产中的不锈钢液，长水口有机玻璃管的液体模拟普碳钢液。为了能清晰的观察到不锈钢液在普碳钢液中的浓度分布现象，对于模拟不锈钢液的水进行了特殊处理，这样就可以采用数码设备对实验过程中的现象进行摄像和拍照，使得实验能顺利完成。

其次，在实验过程中为了防止水箱水位过高而溢出，用一条长度适中的细绳连接到两块木块上面，一个木块放置于大水箱之中，另一个木块悬在空中，把水箱将近满水时悬空木块的位置标记出来，这样就可以防止水位过高溢出。

最后，为了得到全面而理想的实验结果，必须对带隔板的长水口有机玻璃管进行处理。当观察结晶器正面的浓度扩散现象时，需要把隔板的前后两侧封住，使得短水口喷出来的液体只从隔板的左右两侧流出；当从结晶器侧面观察浓度扩散现象时，需要把隔板的两侧封住，只让短水口喷出来的液体从隔板的前后两侧流出；但是在实验的过程中发现，在结晶器侧面观察浓度扩散现象时，仅仅封住隔板两侧是不行的，不能得到明显的实验结果，故在结晶器侧面观察时，需要将隔板的两侧封住，还要封住隔板的正前面，只观察后面一侧喷出液体的浓度场，这样实验结果比较理想。

图 3.11<sup>[8]</sup>是连铸成产复合钢坯的原理图，同时也是水模型实验的基础。水模型实验就是在图 3.10 所示的基础上做起来的。只不过用有机玻璃容器来模拟结晶器，用有机玻璃管来模拟钢液的水口，用水的流动现象来模拟钢液流动中的浓度扩散现象。图 3.10 是本实验的装置图。

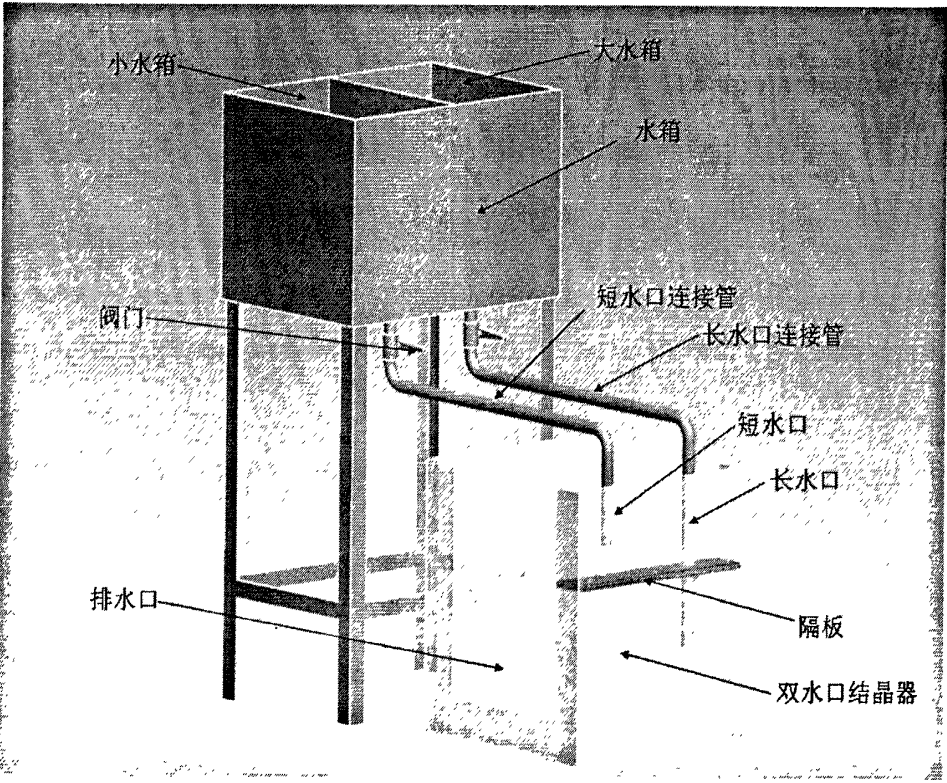


图 3.10 实验装置图

Figure 3.10 Experimental setup

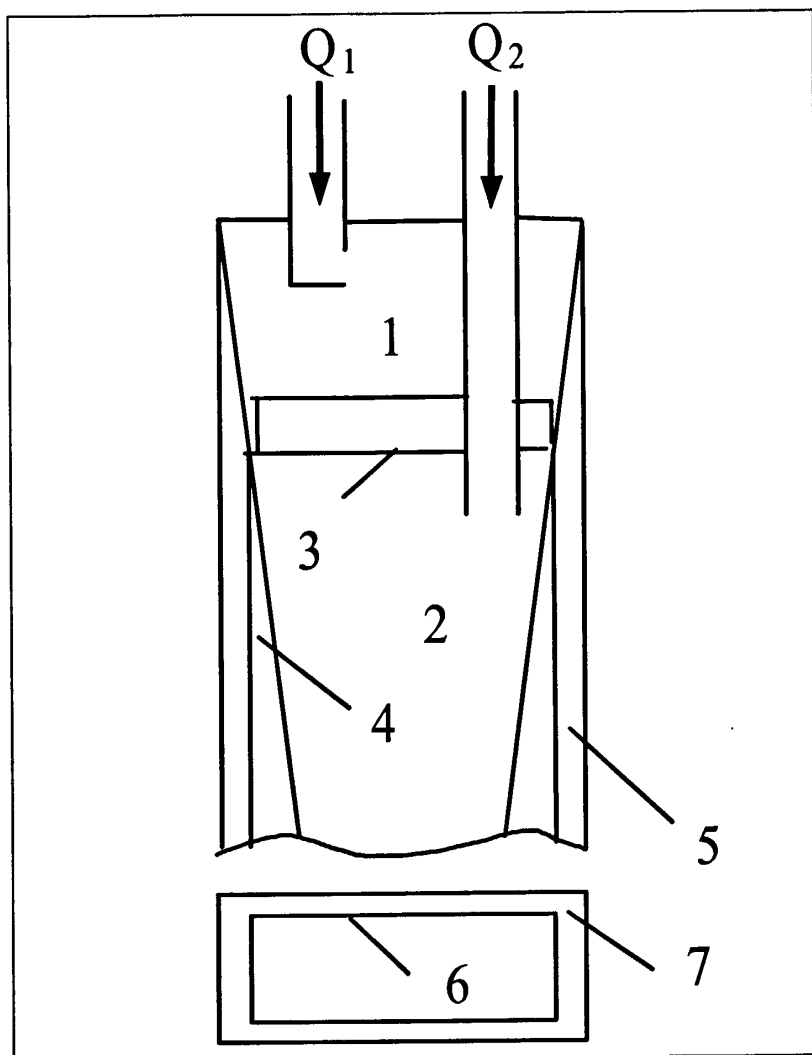


图 3.11 连铸生产复合钢坯原理示意图

1—上熔池 2—下熔池 3—隔板 4—凝固壳(普碳钢)

5—凝固壳(不锈钢) 6—钢坯内芯 7—钢坯外芯

Fig.3.11 The scheme of continuous casting process for clad steel slabs

1—upper pool 2—lower pool 3—magnetic field 4—mold

5—solidified shell 6—solidified shell 7—inner layer 8—outer layer

### 3.3.2 实验步骤及现象

#### 3.3.2.1 结晶器正前方的实验步骤

- (1) 用电子秤称量 3 克的高锰酸钾固体，然后倒入烧杯之中，倒入一定数量的水，用玻璃棒不断搅拌至混合均匀。
- (2) 连接好水箱和龙头之间的管子、水箱和结晶器之间的管道。打开水龙头向



小水箱和大水箱分别注水。

- (3) 当小水箱的水位超过其高高度的四分之一时, 停止向小水箱注水。把 (1) 中配置好的高锰酸钾溶液倒入小水箱中, 然后继续向大小水箱注水, 并且观察小水箱中高锰酸钾溶液的颜色变化, 要一直保证小水箱中的整体颜色为紫红色, 这样才能更好的观察实验现象。
- (4) 用泡沫塑料对长水口隔板的前后两侧进行密封, 保证浸入水中时结晶器前后两侧没有液体渗出。
- (5) 大小水箱的水位达到合适的位置时, 关闭水龙头。安装短水口和带隔板的长水口。为了保证短水口的出水口进入水中, 需要用砖块将结晶器垫高到一定程度。
- (6) 大水箱和长水口连接, 小水箱和短水口连接。打开大水箱的阀门, 排除长水口中的气泡, 待流出长水口中的液体看不到气泡时准备开始实验。
- (7) 打开小水箱下面的阀门, 与此同时准备好 DV 开始在结晶器正前方拍摄实验现象。

### 3.3.2.2 结晶器窄面实验现象

- (1) 短水口出口为水平方向、长水口为竖直方向 (第一组实验)

从短水口流出来的红色高锰酸钾溶液模拟的是不锈钢液体, 从长水口流出来的水模拟的是普碳钢液体。具体现象如图 3.12 至图 3.21 所示。

在图 3.12 之前的 1.5~2.0s 时间里面, 短水口玻璃管中的空气被排除干净。由图 3.12 可以看出, 短水口中液体的流动已经没有任何气泡产生, 且不携带任何气泡, 这是实验中很重要的一点。从实验中可以看到, 从短水口高速流出的液体先冲击到长水口玻璃管隔板以上的玻璃管, 并且继续向玻璃管的右侧迅速扩散; 紧接着, 短水口的液体由于冲击左右的反作用力, 在长水口的隔板上方形成上下两个水平 V 型的流动图像; 然后, 红色的高锰酸钾溶液开始从长水口隔板的右侧缝隙开始流下, 并在在流动的过程中向隔板下方的玻璃管附近扩散。当短水口的流动继续喷出时, 在长水口隔板左侧的缝隙也开始有红色高锰酸钾溶液开始流出, 并且和右侧的流体有相似的流动规律, 一边向下流动, 一边向着隔板下方的玻璃管侧扩散。从整个流动的情况来看, 长水口隔板两侧的流动为基本对称的流动状态。但是, 右侧缝隙的流动开始的比较早, 等到右侧的流动扩散到一定



图 3.12  $t=3s$  的现象

Figure 3.12 Phenomena of  $t=3s$



图 3.13  $t=5s$  的现象

Figure 3.13 Phenomena of  $t=5s$



图 3.14  $t=10s$  的现象

Figure 3.14 Phenomena of  $t=10s$

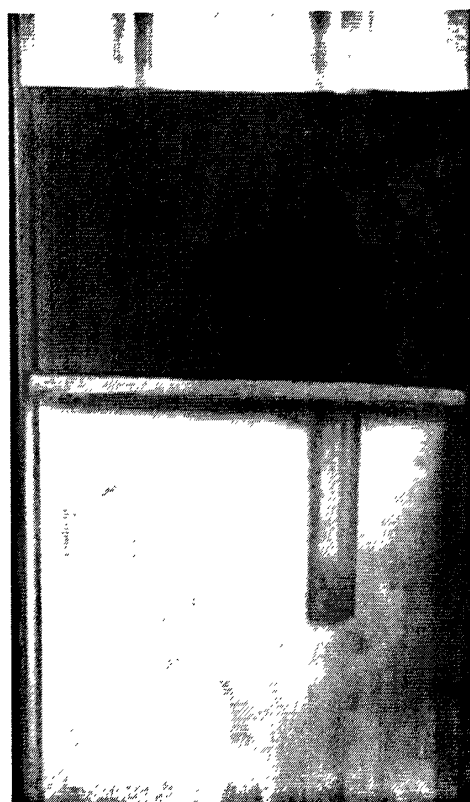


图 3.15  $t=15s$  的现象

Figure 3.15 Phenomena of  $t=15s$

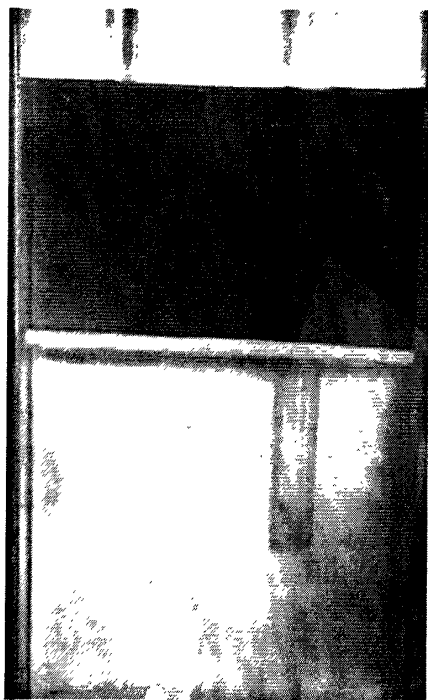


图 3.16  $t=17s$  的现象

Figure 3.16 Phenomena of  $t=17s$



图 3.17  $t=21s$  的现象

Figure 3.17 Phenomena of  $t=21s$

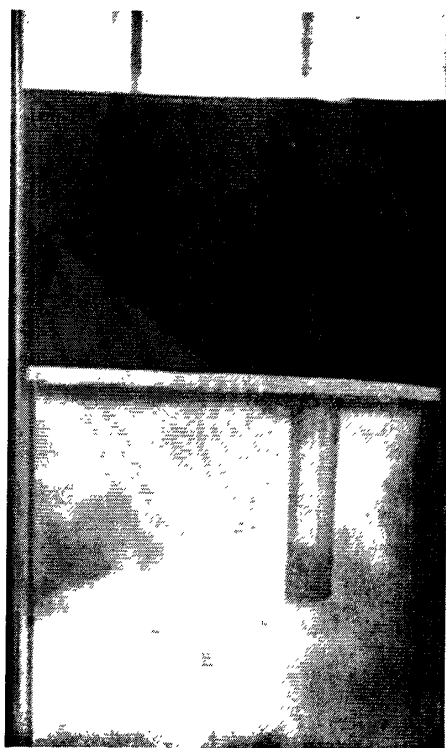


图 3.18  $t=25s$  的现象

Figure 3.18 Phenomena of  $t=25s$



图 3.19  $t=28s$  的现象

Figure 3.19 Phenomena of  $t=28s$

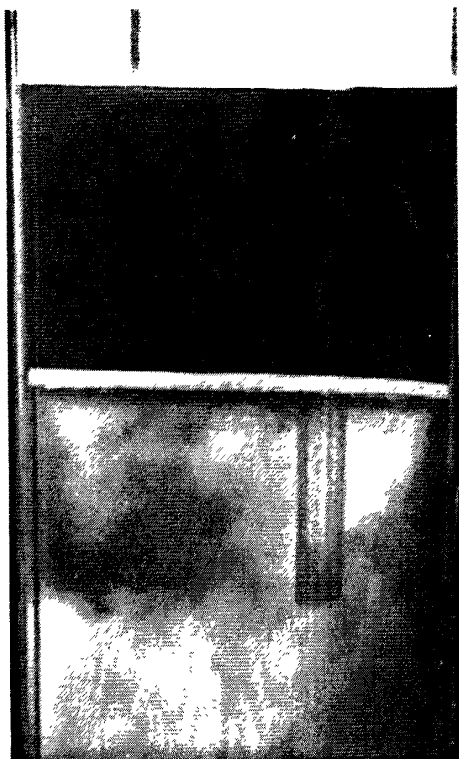


图 3.20  $t = 32s$  的现象

Figure 3.20 Phenomena of  $t=32s$



图 3.21  $t = 35s$  的现象

Figure 3.21 Phenomena of  $t=35s$

程度时，左侧的流动现象才开始，并且和右侧的流动现象有着基本相同的规律。由于高锰酸钾溶液在水中扩散的较快，大约在  $35s$  以后，流动现象就开始变得模糊，再往后就不能清晰的观察流动现象。所以，在本组实验中流动现象观察到  $t = 60s$  左右即可停止。实际中本组实验观察拍摄用了  $95s$  的时间，以进一步观察在浑浊状态下浓度的扩散如何变化。

将本组实验的浓度扩散情况和以前的流场实验对比，可以发现，浓度扩散实验从另一个角度反映了流场的流动状况，与流体流场实验是吻合的。

## (2) 短水口出口为向下倾斜，长水口出口为竖直向下（第二组实验）

第二组实验和第一组实验的步骤相同。在第一组实验结束后，关闭连接短水口的水箱阀门，保持长水口的阀门打开，冲洗结晶器内部红色的高锰酸钾溶液，为了更快速的冲洗，可以把长水口有机玻璃管卸载下来，直接用大水箱的水箱连接管的喷口喷入结晶器内部。在冲洗结晶器的过程中，需要清洗长水口有机玻璃管上面的红的液体，准备接下来的实验备用。

第二组实验的现象如图所示。红色高锰酸钾溶液模拟的是不锈钢溶液，水流体模拟的是普碳钢液体的流动。



图 3.22  $t = 1s$  时的现象

Figure 3.22 Phenomena of  $t=1s$

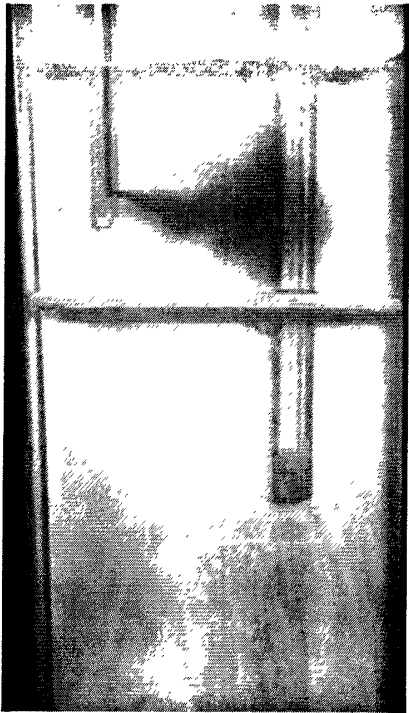


图 3.23  $t = 1.5s$  时的现象

Figure 3.23 Phenomena of  $t=1.5s$



图 3.24  $t = 2s$  时的现象

Figure 3.24 Phenomena of  $t=2s$

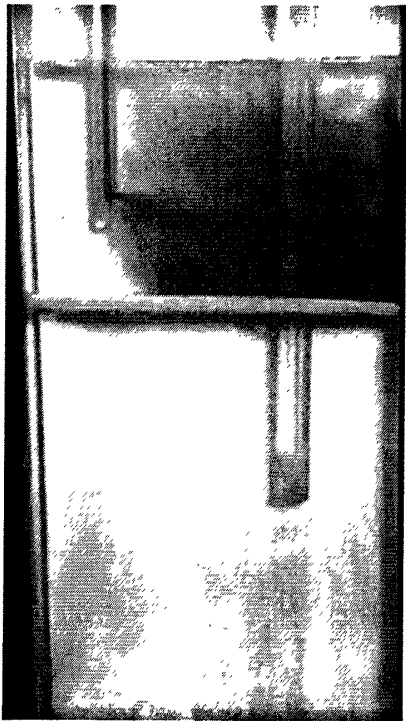


图 3.25  $t = 4s$  时的现象

Figure 3.25 Phenomena of  $t=4s$

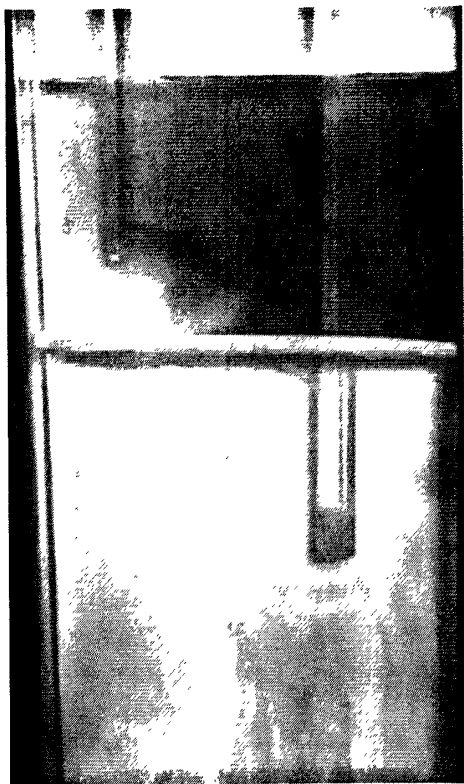


图 3.26  $t = 6s$  时的现象

Figure 3.26 Phenomena of  $t=6s$

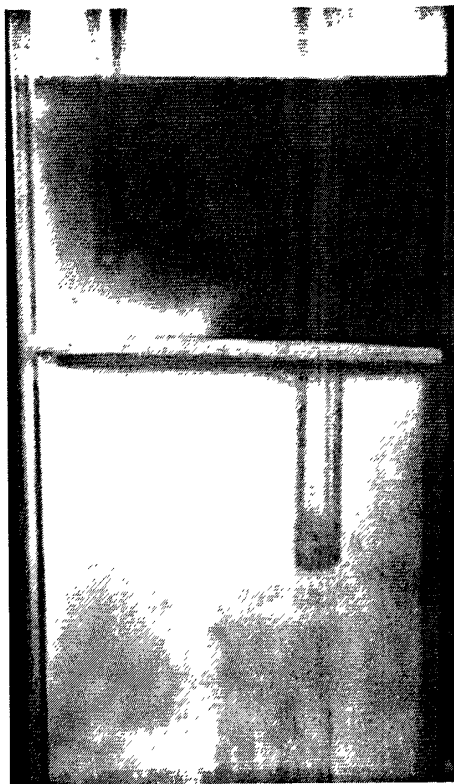


图 3.27  $t = 9s$  时的现象

Figure 3.27 Phenomena of  $t=9s$

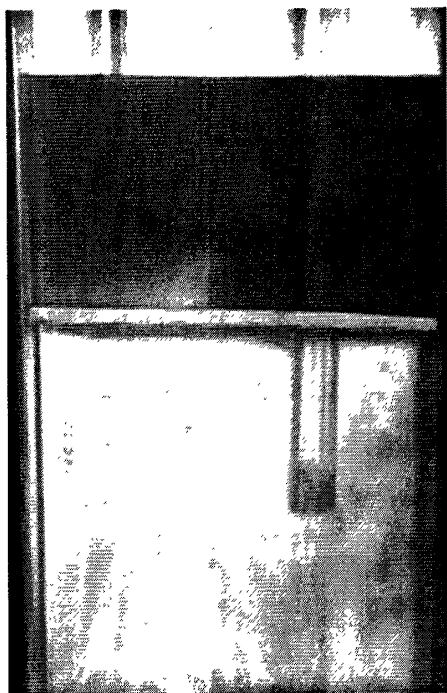


图 3.28  $t = 12s$  时的现象

Figure 3.28 Phenomena of  $t=12s$

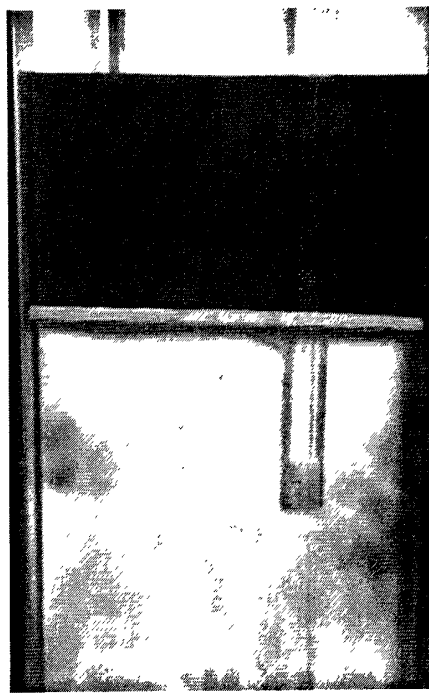


图 3.29  $t = 15s$  时的现象

Figure 3.29 Phenomena of  $t=15s$



图 3.30  $t = 18s$  时的现象

Figure 3.30 Phenomena of  $t=18s$



图 3.31  $t = 20s$  时的现象

Figure 3.31 Phenomena of  $t=20s$



图 3.32  $t = 23s$  时的现象

Figure 3.32 Phenomena of  $t=23s$



图 3.33  $t = 26s$  时的现象

Figure 3.33 Phenomena of  $t=26s$

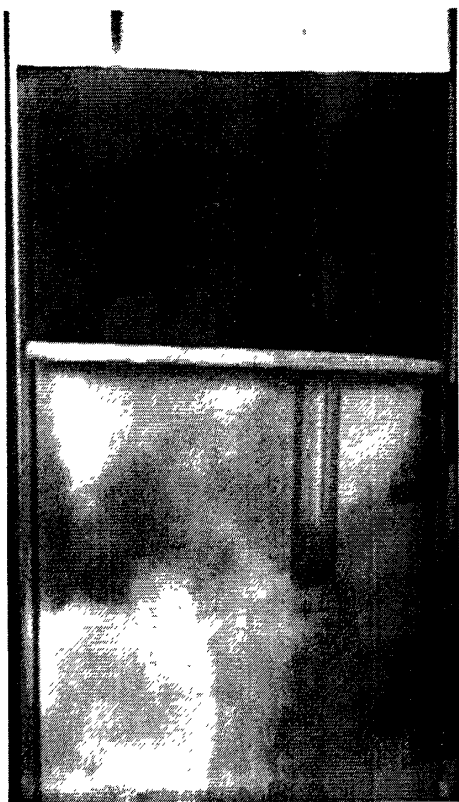


图 3.34  $t = 30s$  时的现象

Figure 3.34 Phenomena of  $t=30s$

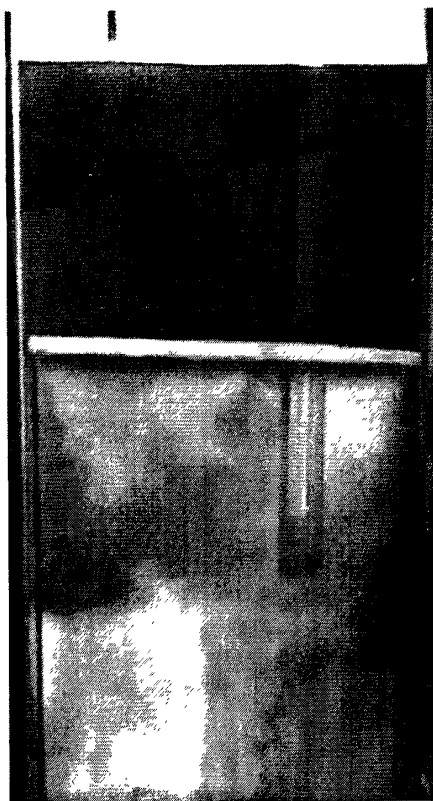


图 3.35  $t = 35s$  时的现象

Figure 3.35 Phenomena of  $t=35s$

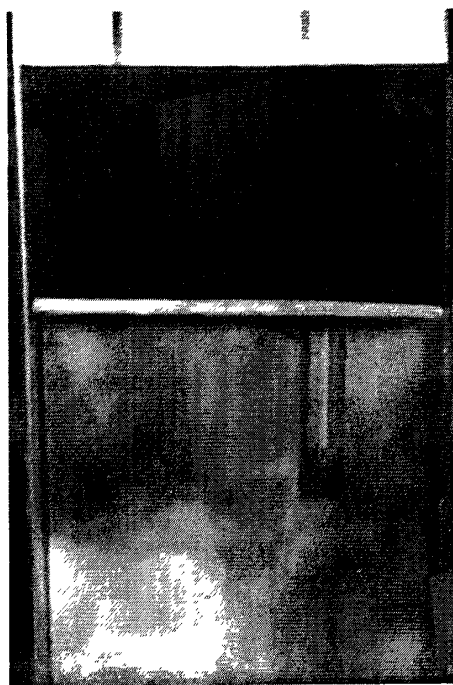


图 3.36  $t = 40s$  时的现象

Figure 3.36 Phenomena of  $t=40s$



从第二组实验可以看出,短水口流体喷向长水口并且迅速向着隔板的右侧开始扩散,在 $t=4.5s$ 时,短水口出来的流体开始向着隔板右侧的缝隙开始流下来,流动的同时不断的向着长水口的出水口方向扩散;在 $t=11s$ 时短水口的流体开始从隔板左侧的缝隙开始流下来,流动的同时不断地向着长水口的出水口方向扩散,隔板两侧缝隙以下的流动呈现出对称的分布。本组实验拍摄用时 81 秒。

第二组实验与第一组实验对比之后,有以下不同之处。第一组实验中隔板右侧缝隙是 $t=5s$ 时开始流下液体,第二组实验是 $t=4.5s$ 时开始流下液体;第一组实验中隔板左侧缝隙是 $t=14s$ 时开始流出液体,第二组实验中左侧缝隙是 $t=11s$ 时开始流下液体。出现这种现象主要是因为第一组实验中短水口为水平出流,当短水口喷出来的流体遇到长水口玻璃管时,流体首先是向上扩散,然后是向下扩散,而第二组实验中短水口的流体喷到长水口玻璃管时先向下扩散,然后向上扩散,所以第一组实验相对于第二组实验从隔板右侧的缝隙流出红色液体的时间会延迟。

表 3.1 前两组实验对比结果

Table 3.1 Comparative results of the previous two experiments

实验组	扩散路径	隔板右侧缝隙流 体流出时间	隔板左侧缝隙流 体流出时间	左右对称程度
第一组	先上后下	$t=5s$	$t=14s$	良好
第二组	先下后上	$t=4.5s$	$t=11s$	良好

3.3.2.3 结晶器宽面实验现象

结晶器侧面的实验步骤与结晶器正前方的实验步骤基本相同,不同的地方在于密封的位置不同。而结晶器侧面的实验需要密封隔板左右两个侧面。

(1) 结晶器双侧宽面实验现象（第三组实验）

如图 3.37 至图 3.42 所示,当对于长水口有机玻璃管隔板的两侧进行密封,站在结晶器侧面观察现象时,发现隔板前后两面的流动也处于一种基本对称的流动状态。由于前后两侧流动过程中通过的液体流量大、流速快,并且在结晶器侧面观察现象时,结晶器侧面的面积小,所以很容易发生扩散而使得观察不能继续进行,故隔板两侧密封的实验条件下只能观察到前 5 秒以内的现象来反应流体的浓度扩散情况。本实验观察总共用时 10 秒。

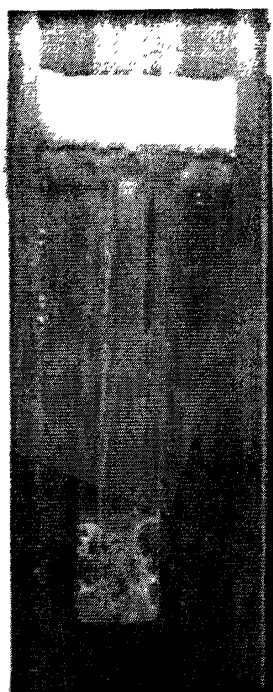


图 3.37  $t=1s$  时的现象

Figure 3.37 Phenomena of  $t=1s$

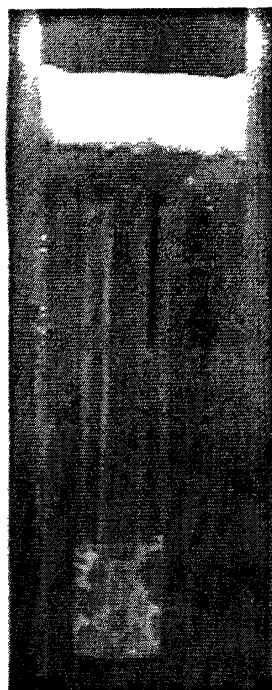


图 3.38  $t=2s$  时的现象

Figure 3.38 Phenomena of  $t=2s$

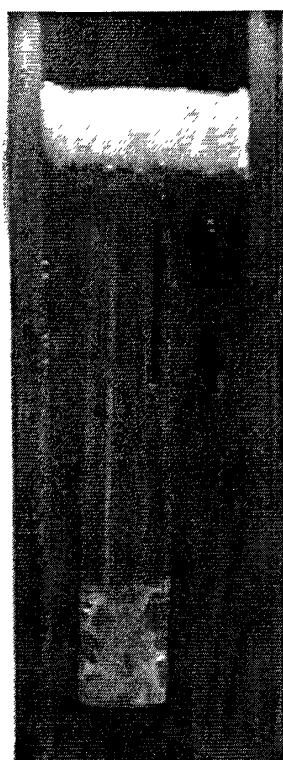


图 3.39  $t=3s$  时的现象

Figure 3.39 Phenomena of  $t=3s$

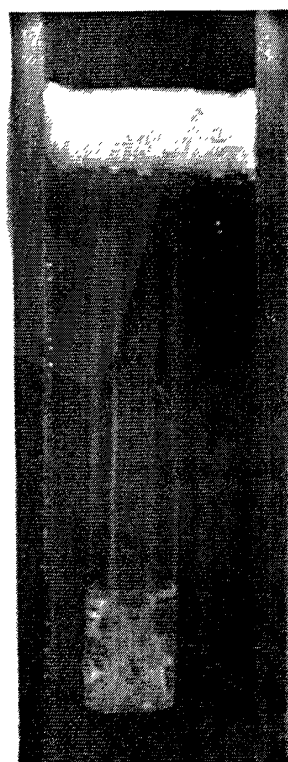
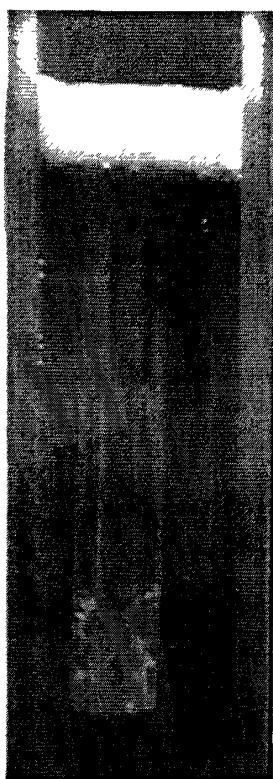
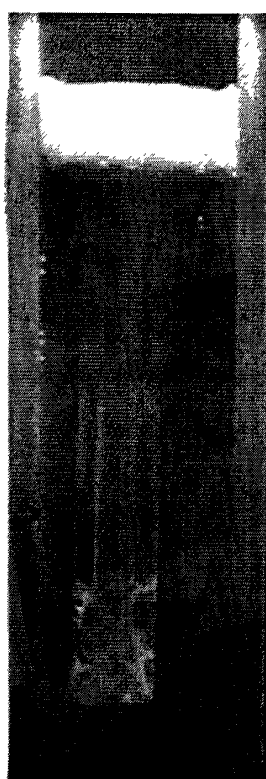


图 3.40  $t=3.5s$  时的现象

Figure 3.40 Phenomena of  $t=3.5s$

图 3.41  $t = 4s$  时的现象Figure 3.41 Phenomena of  $t=4s$ 图 3.42  $t = 4.5s$  时的现象Figure 3.41 Phenomena of  $t=4.5s$ 

## (2) 结晶器单侧宽面实验现象（第四组实验）

为了更清楚的观察不锈钢液在普碳钢液中的浓度扩散情况，将长水口有机玻璃管隔板的前面和左右两侧都封住，只留下隔板里侧可以通过液体。

图 3.43 到图 3.59 反应了短水口喷出的红色高锰酸钾溶液在长水口玻璃管隔板里侧的流动现象。从图中可以看出，当  $t = 2s$  时，在隔板里侧缝隙有微量的红色高锰酸钾溶液出现； $t = 3s$  时，缝隙处的高锰酸钾溶液已经明显出现； $t = 4s$  时，高锰酸钾溶液不但以层流的状态向缝隙以下部位流动，而且开始朝着隔板下面的长水口玻璃管扩散，浓度不断降低；随着时间的推移，里侧缝隙流出的红色高锰酸钾溶液越来越多，并且一直向着隔板下方的长水口玻璃管扩散，直至最后，高锰酸钾溶液越过长水口玻璃管，向着结晶器正面扩散，同时向着长水口玻璃管出水口以下的位置扩散；从  $t = 10s$  开始，越过玻璃管的高锰酸钾溶液开始向结晶器外侧上方扩散，使得图中的右侧位置也出现了微量的红色高锰酸钾溶液；当时间继续推移时，红色高锰酸钾溶液在缝隙下方的浓度达到最大，同时，图中右侧部位的红色高锰酸钾溶液浓度增大，直到实验不能继续观测为止。

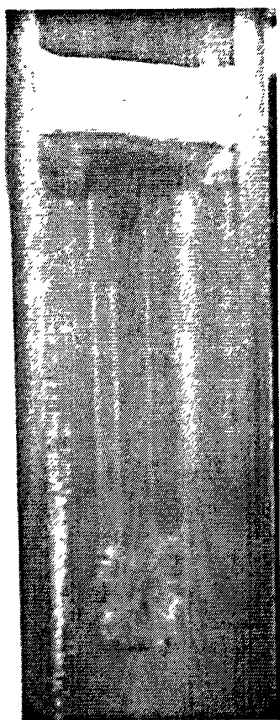


图 3.43  $t = 1s$  时的现象

Figure 3.43 Phenomena of  $t=1s$

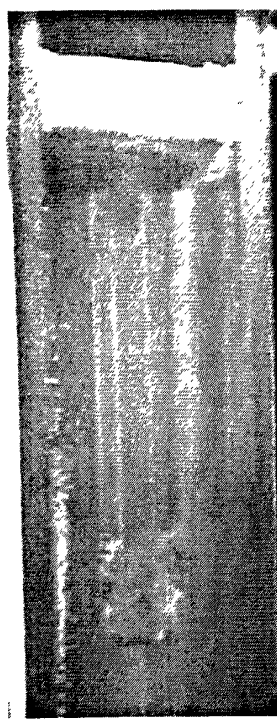


图 3.44  $t = 2s$  时的现象

Figure 3.44 Phenomena of  $t=2s$

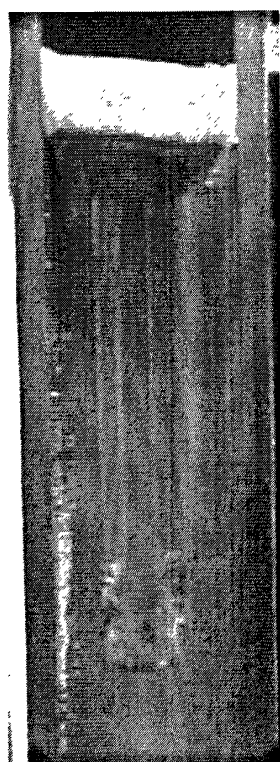


图 3.45  $t = 3s$  时的现象

Figure 3.45 Phenomena of  $t=3s$

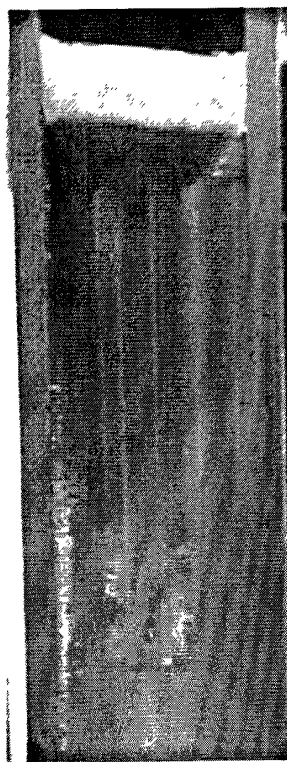


图 3.46  $t = 4s$  时的现象

Figure 3.46 Phenomena of  $t=4s$

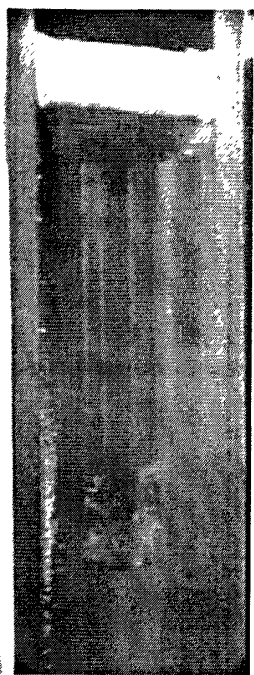


图 3.47  $t=5s$  时的现象

Figure 3.47 Phenomena of  $t=5s$

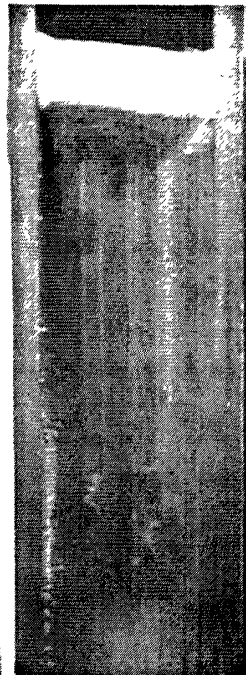


图 3.48  $t=6s$  时的现象

Figure 3.48 Phenomena of  $t=6s$

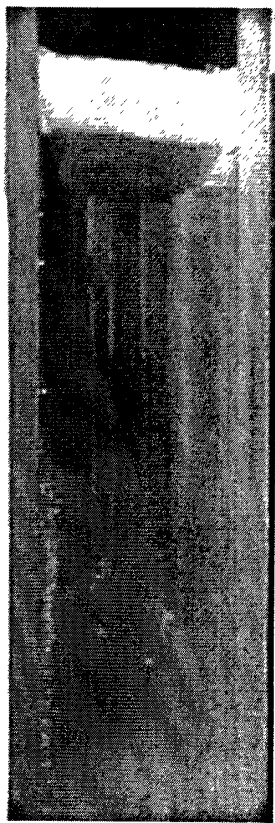


图 3.49  $t=8s$  时的现象

Figure 3.49 Phenomena of  $t=8s$

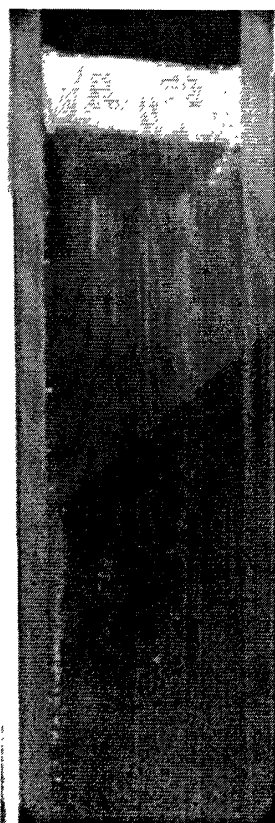


图 3.50  $t=10s$  时的现象

Figure 3.50 Phenomena of  $t=10s$

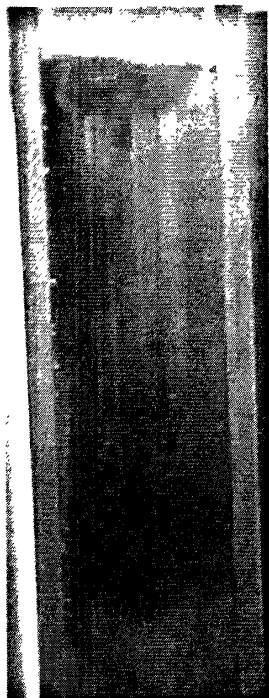


图 3.51  $t=13s$  时的现象

Figure 3.51 Phenomena of  $t=13s$

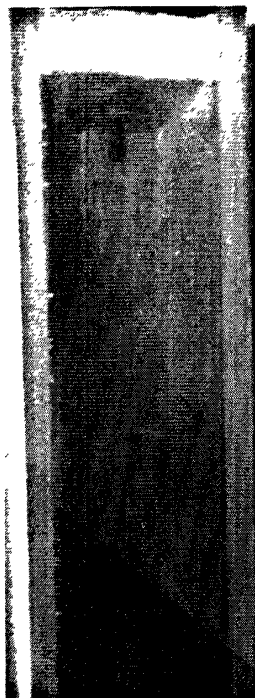


图 3.52  $t=16s$  时的现象

Figure 3.52 Phenomena of  $t=16s$

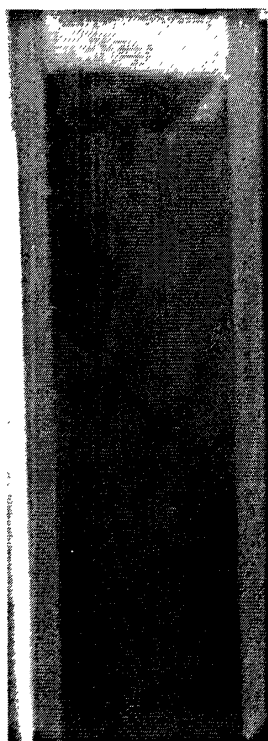


图 3.53  $t=19s$  时的现象

Figure 3.53 Phenomena of  $t=19s$

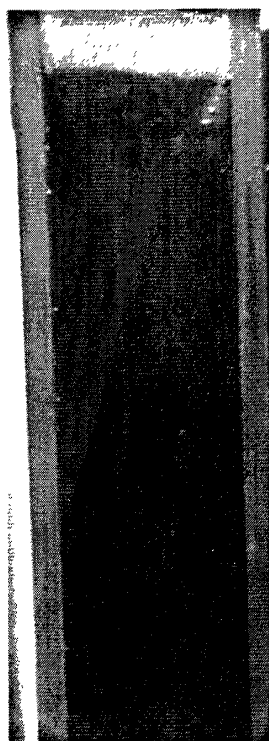


图 3.54  $t=21s$  时的现象

Figure 3.54 Phenomena of  $t=21s$

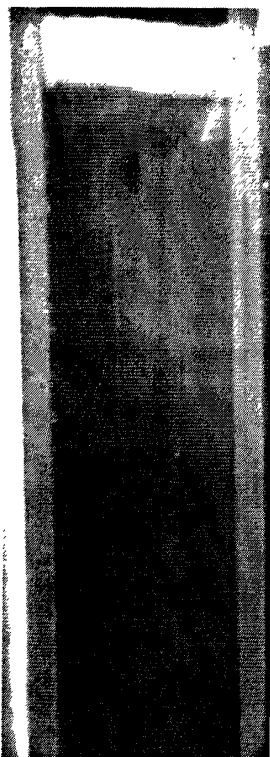


图 3.55  $t = 23s$  时的现象

Figure 3.55 Phenomena of  $t=23s$

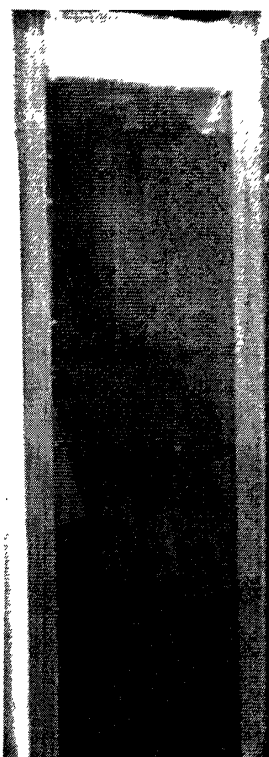


图 3.56  $t = 25s$  时的现象

Figure 3.56 Phenomena of  $t=25s$

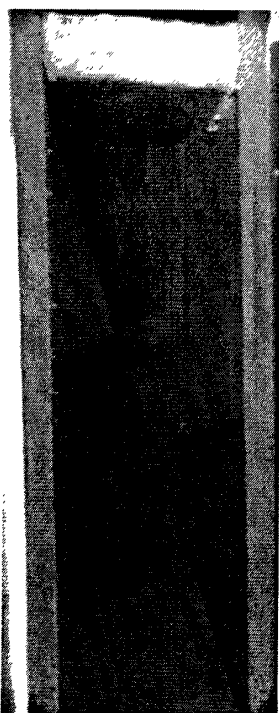


图 3.57  $t = 27s$  时的现象

Figure 3.57 Phenomena of  $t=27s$

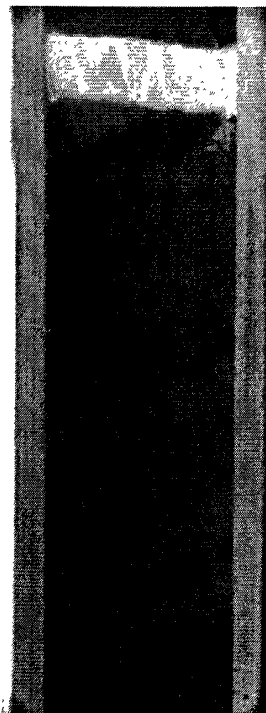


图 3.58  $t = 31s$  时的现象

Figure 3.58 Phenomena of  $t=31s$

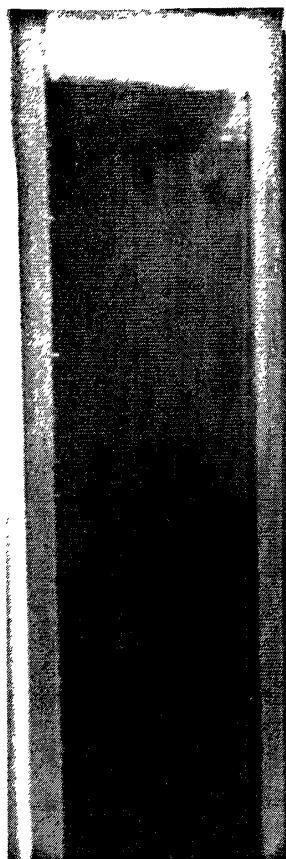


图 3.59  $t = 33s$  时的现象

Figure 3.59 Phenomena of  $t=33s$

与隔板前后两侧流动进行对比,发现单侧流动流量小、流动稳定,更能真实的反应流体流动中红色高锰酸钾溶液的浓度扩散情况。隔板前后两侧流动拍摄时间共计 10 秒,而隔板里侧流动拍摄时间共计 37 秒,在时间上看,时间越长,越能在准确的反应流体的浓度扩散情况。两侧流动中,由于其流量大, $t=2s$  时已经出现了流体从缝隙流出的现象;当  $t=3s$  时,流体已经明显从缝隙流出; $t=4.5s$  时,流体大量从缝隙流出,并且浓度迅速向着隔板下方的长水口玻璃管扩散,当  $t=5s$  时,浓度扩散过快,已经不能继续清晰的观察实验需要的现象。在长水口隔板的里侧流动中,由于三面已经用泡沫塑料密封,流体只能送里侧缝隙流出。 $t=3s$  时,微量的红色高锰酸钾溶液从里侧缝隙流出; $t=4s$  时,缝隙流出的流体现象明显化; $t=8s$  时,较大量的红色高锰酸钾溶液顺着缝隙流出;从  $t=10s$  开始,缝隙流出的高锰酸钾溶液浓度扩散的速度加快,并且开始逐渐向着结晶器外侧的壁面上方扩散;随着时间的推移,高锰酸钾溶液扩散到了隔板下方的大部分位置,实验观察也到此结束。很明显,第四组实验的浓度扩散相对于第三组要慢



很多,并且可以清晰的看到从里侧缝隙流下来的液体呈现出自上而下的弯弧形分布,这和事先预测的实验结果是相符的。

### 3.3.3 实验结果对比和分析

#### 3.3.3.1 影响本实验浓度场分布的主要因素

##### (1) 高锰酸钾溶液的流速

高锰酸钾溶液流速的提高,可以使得流动加快,进而使得短水口的高锰酸钾溶液以更大的动量和动能喷射到长水口玻璃管的壁面上,由于玻璃管的壁面是光滑的,所以高锰酸钾溶液会改变流动方向,分成上下两股流体,向下的流体会迅速靠近长水口的隔板缝隙,直到扩散到隔板下方的水溶液中。流速的提高可以缩短浓度扩散现象开始的时间。

##### (2) 水口出口的形状对流动状态的影响

从短水口流出高锰酸钾溶液,短水口的出口角度变化时,高锰酸钾溶液的扩散方向和先后顺序也是变化的。这个在前几组实验中可以得到明显的结果。

为了更具体的说明这个问题,下面引用钢铁研究总院的魏天秀所进行的理论实验<sup>[12]</sup>来阐述。

当流体流过一个容器时,活塞流、混返流、死水区、旁路击穿流和循环流等流动模式都有可能发生。结晶器内流动可以是上述流动模式的各种组合。并且可以根据从实验测得的各种时间分布函数来判断流动模式。流体离开容器的时间分布函数  $E$ , 称之为流体的停留时间分布函数  $RTD$ 。  $RTD$  以下式作为定义:

$$\int_0^{\infty} E dt = 1 \quad (3-1)$$

即曲线下方的面积为 1。

函数  $I$  称之为容器内部时间分布函数,它被定义为在任意指定时刻  $\theta$ ,  $I d\theta$  为停留时间在  $\theta$  与  $\theta + d\theta$  之间的流体分量。  $I$  与  $E$  的关系是:

$$E = -\frac{dI}{d\theta} \quad (3-2)$$

或

$$I = 1 - \int_0^{\theta} E d\theta \quad (3-3)$$

停留时间分布函数  $RTD$  可以用刺激相应法的实验技术,从实验中测得。

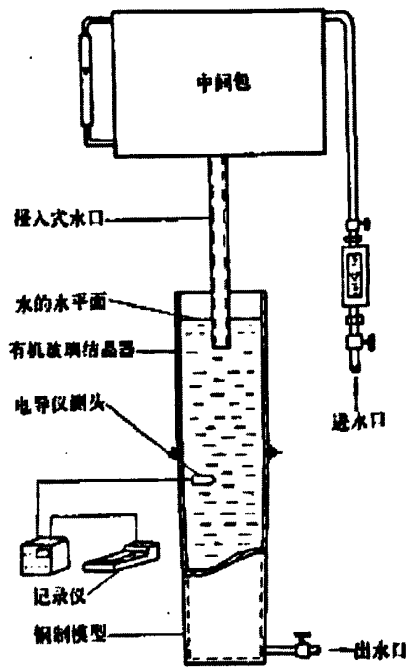


图 3.60 实验装置

Figure 3.60 Experimental setup

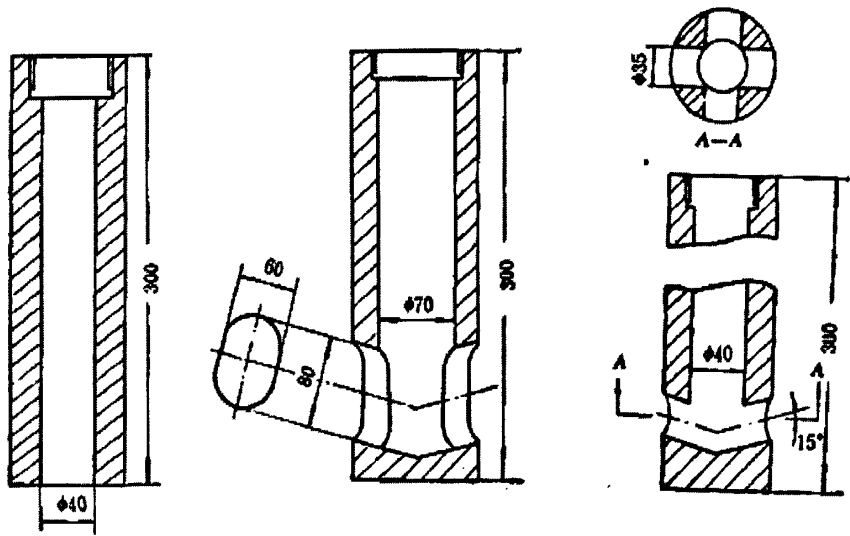


图 3.61 实验用的水口图

Figure 3.61 Experiment with the outlet diagram

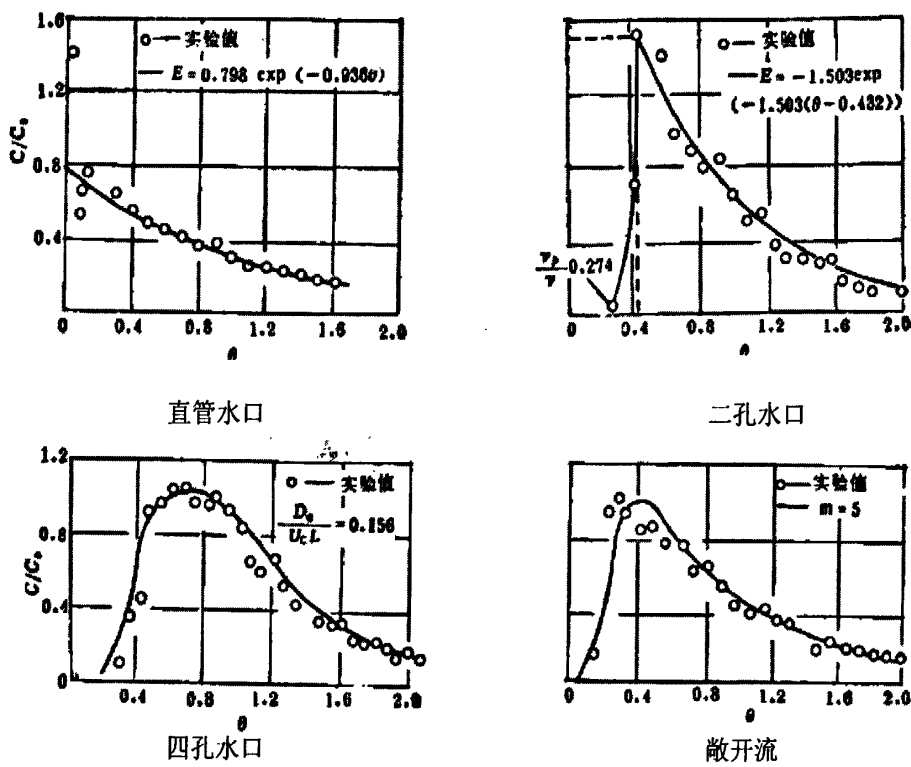


图 3.62 停留时间分布函数

Figure 3.62 Residence Time Distribution Function

实验得到的不同水口的流线照片如下图所示。

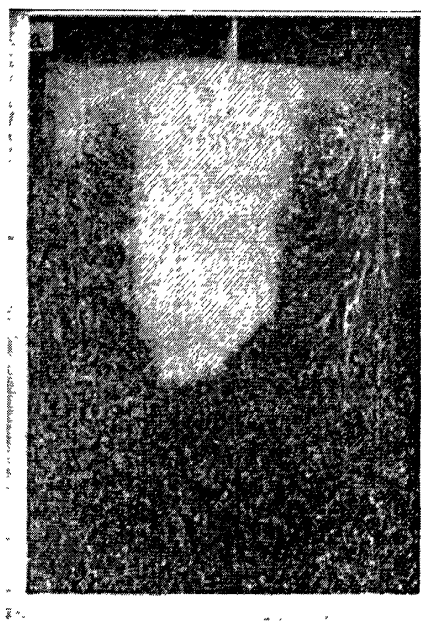


图 3.63 敞开流

Figure 3.63 Open flow

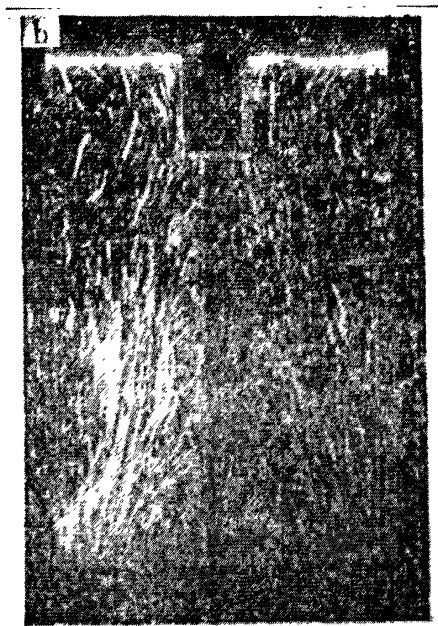


图 3.64 直管水口

Figure 3.64 Straight pipe outlet

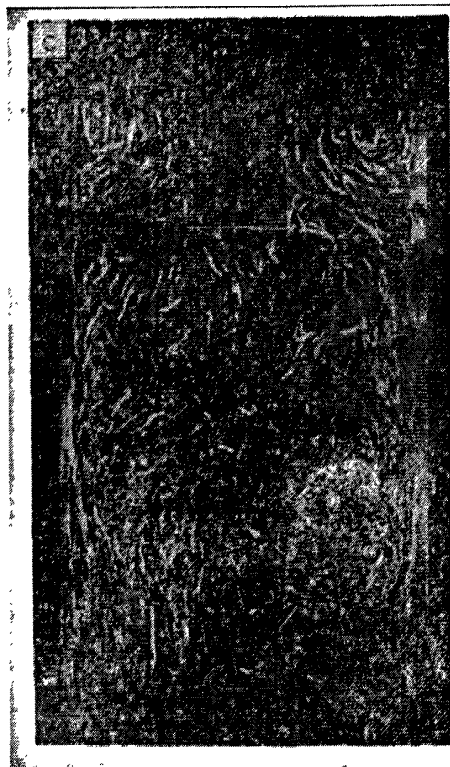


图 3.65 二孔水口

Figure 3.65 The two-hole outlet

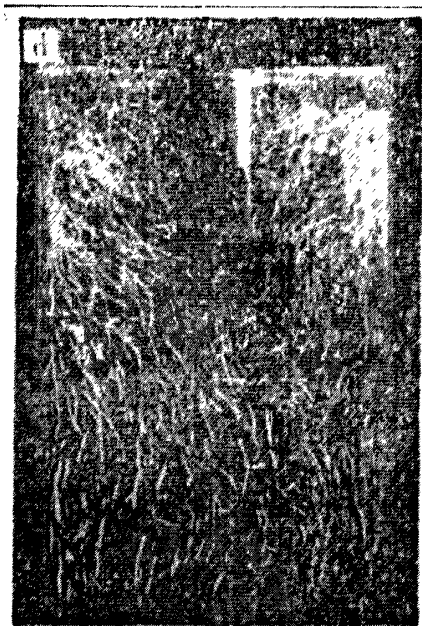


图 3.66 四孔水口

Figure 3.66 outlet hole

图 3.63 的敞开流流动模型是由循环流组成，从照片可以清楚的看到，流股穿过熔池表面后，夹带着大量空气气泡，并形成一个两相流区，在其周围是水的循环流动。图 3.64 的直管水口的流动模式是由混返流、死水区和旁路击穿流组成的混合型流动模式。图 3.65 的二孔水口流动模式由活塞流、混返流和死水区组成，流股从水口流出后，撞到结晶器的窄边，然后分成两股流动，一股向上，一股向下，由于向上那股流体的作用，在结晶器的两个顶角形成漩涡区，向下那股流体沿着结晶器的窄边往下流动，并与中间的流体不断混合，一直到形成活塞流水口下面区域的水看上去滞止不动。图 3.66 的四孔水口会形成弥散型流动模式，可以认为弥散型流动模式，本质上是活塞流，在其顶端有一定程度混合，从照片上可以看到，在结晶器的上部有激烈的混合，而在水口下面形成了活塞流。

水口形状的不同会影响流动模型的改变，同时会引起夹杂物上浮方式的改变。流动模型对于具有上浮速度为  $U_r$  的夹杂物的影响。在死水区，所有的夹杂物都可能上浮；相反，在旁路击穿流里，所有夹杂物都可能被流股带走；对活塞流来说，可以估计当  $U_r > U$  ( $U$  是拉速) 夹杂物才会上浮。在有搅拌的系统里，情况多少有点复杂，对上浮速度  $U_r$  小于拉速的夹杂物来说，本来是不会上浮到表面的，可是由于漩涡扩散作用而被带到表面。相反，如果夹杂物的上浮速度大于拉速，在没有搅拌的场合，它可以上浮至表面；但在有搅拌的情况下，也可能

由于漩涡扩散的作用，被卷到固液二相，反而被带走。

Szekely 建议：整个系统可视为连续介质，而夹杂物的运动问题能够用扩散方程来处理。因此，从流动模型得到的资料有可能被用来预算最终产品的夹杂物的含量。设  $c$  表示为无因次夹杂物的浓度，质量恒方程可以写成：

$$\frac{d^2 c}{dz^2} - \frac{U - U_R}{D} L \frac{dc}{dZ} = 0 \quad (3-4)$$

对上述的方程进行积分可以得到：

$$c = K_1 \exp\left(\frac{U - U_R}{D} L_2\right) + K_2 \quad (3-5)$$

式中  $K_1$  和  $K_2$  是积分常数。

Szekely 定义  $\eta$  为

$$\eta = \frac{\text{上浮到结晶器表面夹杂物的数量}}{\text{被带走的夹杂物的数量}} \quad (3-6)$$

并且分别考虑了两种不同情况。

在第一种情况  $U > U_R$  时， $\eta$  可按式计算：

$$\eta = \exp\left(-\frac{U - U_R}{D} L_{2B}\right) \quad (3-7)$$

在第二种情况  $U < U_R$  时， $\eta$  可按式计算：

$$\eta = \exp\left(\frac{U_R - U}{D} L_{(2L-2B)}\right) + \frac{U_R}{U} - 2 \quad (3-8)$$

式中， $L_{2B}$  和  $L_{(2L-2B)}$  分别为夹杂物的位置到表面或结晶器底部的距离。

为了比较不同水口的  $\eta$  值，考虑在试验中盐溶液的扩散方程：

$$\frac{d^2 C}{dZ^2} - \frac{UL}{D} \frac{dC}{dZ} = 0 \quad (3-9)$$

式中漩涡扩散系数  $D$  不是流体分子的扩散系数，而是与系统流动条件有关的表观扩散系数。事实上，可以用漩涡扩散系数定量的表示一个流动系统的特点。无因次数群  $D/UL$  称之为容器的弥散数，他是贝克列数的倒数。积分式 (3-9) 可得到：

$$c = K_1 \exp\left(\frac{UL}{D}Z\right) + K_2 \tag{3-10}$$

对稳定流来说，流线与流团的轨迹线是重合的，所以无因次时间  $d\theta$  可用无因次距离来代替：

$$d\theta = \frac{dt}{dt} = d\left(\frac{Z}{U}\right) = d\frac{Z}{L} \tag{3-11}$$

从图 3.62 曲线可以得到，式（3-9）在特定试验条件下的解有如下情况。

对直管水口：  $Pe^{-1} = \frac{D}{UL} = 1.068$

对二孔水口：  $Pe^{-1} = \frac{D}{UL} = 0.665$

对四孔水口：  $Pe^{-1} = \frac{D}{UL} = 0.1562$

夹杂物的上浮速度与其当量直径的关系可以用 Stokes 公式来表示。对不同水口，各个尺寸的夹杂物的  $\eta$  值可以计算出来。假设条件如下：

- (a) 在旁路击穿流中所有夹杂物都被夹带走；
- (b) 在死水区内的夹杂物都上浮；
- (c) 以下参数将被引用

液体钢水的运动粘度系数  $\nu = 0.01cm^2/s$ ，液体钢水的密度  $\rho = 7g/cm^3$ ，夹杂物的密度  $\rho = 3g/cm^3$ ，重力加速度  $g = 981cm/s^2$ ， $L_{2B} = L_{(2L-2B)} = 1/2L$ ，熔池弯月面到结晶器的长度  $L = 0.6m$ ，拉速  $U = 0.7m/min = 1.17cm/s$ ，计算结果列于表 3.1 和图 3.67。

表 3.1 夹杂物上浮可能性的计算值

Table 3.1 Inclusion of the possibility of calculating the value of float

夹 杂 物		$\eta$		
直 径 $\mu m$	上 浮 速 度 $cm/s$	4 孔 水 口 $Pe^{-1} = 0.1562$	2 孔 水 口 $Pe^{-1} = 0.665$	直 管 水 口 $Pe^{-1} = 1.068$
50	0.07	0.05	0.59	0.61
100	0.25	0.08	0.65	0.65
200	0.81	0.38	0.90	0.78
250	1.17	1.00	1.13	0.87
300	1.53	2.02	0.68	0.48
400	2.34	24.97	2.33	1.25
500	3.2	765	4.80	1.93
1000	7.55	$4 \times 10^3$		4.26
2000	15.11		$8.5 \times 10^3$	5.63

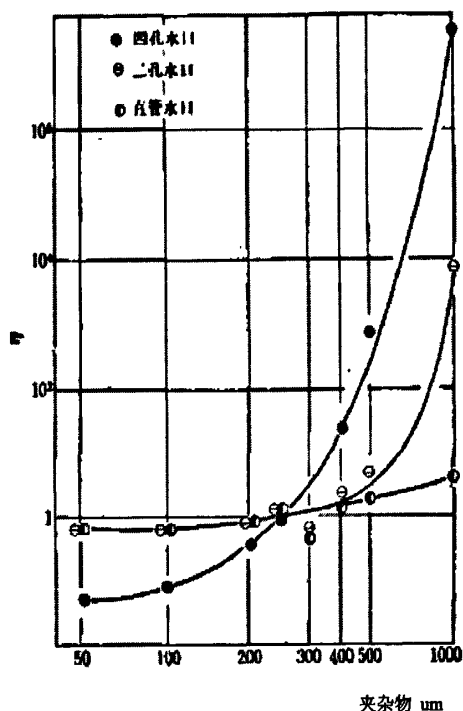


图 3.67 夹杂物上浮可能性 ( $\eta$ ) 与其大小的关系

Figure 3.67 the relationship between the possibility of floating and the size of floating

从图 3.70 的试验结果可以得到以下几点结论:

- (a) 对上浮速度小于拉速 ( $U_R < U$ ) 的小颗粒夹杂物, 直水口的效率比四孔和二孔的效率好;
- (b) 对上浮速度大于拉速 ( $U_R > U$ ) 的小颗粒夹杂物, 四孔水口、二孔水口的效率比直水口的效率大得多;
- (c) 总的来说, 由于直水口有一部分流体旁路, 因而它的去除夹杂物效率低。

从图 3.67 的曲线可以得到如何选择水口型式的启示, 如仅从在连铸结晶器内去除夹杂物的观点出发, 水口型式的选择应该根据夹杂物颗粒大小的分布情况和拉速。例如, 大颗粒的夹杂物比较多, 则应该选择  $Pe^{-1}$  数小的水口。反之, 如无大颗粒的夹杂物, 则应选用  $Pe^{-1}$  数大的水口。当然, 在选择水口时, 还应考虑它对钢水凝固的影响, 及对结晶器模子的浸蚀情况等<sup>[12]</sup>。

### (3) 水口的插入深度对于浓度分布的影响

由于双水口结晶器内的高锰酸钾溶液从短水口流出, 所以影响结晶器内浓度场分布的另一个因素即为短水口插入结晶器的深度。在本实验开始进行之时, 短水口伸入结晶器内部液面以下大约 30mm 左右, 实验过程中没有很明显的冲击作



用表现出来, 所以将结晶器底部用其他建筑用品垫高, 使得短水口伸入结晶器液面以下 113mm, 然后开始实验, 发现短水口出来的高锰酸钾溶液可以强有力的冲击到长水口的玻璃管上, 进而使得浓度扩散的现象能比较明显的观察到。此外, 从实验中可以观察到, 插入深度增加, 可以缩短短水口流出的高锰酸钾溶液向着长水口隔板缝隙扩散的时间。

### 3.3.3.2 各组实验之间的对比和分析

为了具体的观测和研究双水口结晶器内部的浓度混合现象, 本论文实验总共进行了四组实验。第一组实验为短水口出口为水平方向、长水口为竖直方向的结晶器正前方观测实验, 第二组实验为短水口出口为向下倾斜, 长水口出口为竖直向下的结晶器正前方观测实验, 第三组实验为长水口玻璃管隔板前后两侧流动的结晶器侧面观测实验, 第四组实验为长水口玻璃管隔板里侧流动的结晶器侧面观测实验。

#### (1) 第一组与第二组实验的对比

前两组实验都是为了观测短水口出来的液体向着隔板窄面两侧缝隙流下来的浓度扩散现象, 唯一不同的是第一组实验和第二组实验的短水口出流方向不同。总体上来看, 第一组实验的流动现象更加明显, 但是由于其持续时间短, 且在后期高锰酸钾溶液扩散的过程中已经出现了明显的混合现象; 第二组实验的流动现象相对第一组实验要稳定一些, 并且有稳定现象的持续时间比较长, 符合预想的结果, 也和以前所做的流场实验的情况十分接近, 所以在前两组的实验结果中, 第二组实验可以作为一个比较好的结果进行进一步研究和应用。从实际复合钢板的生产的过程来看, 更希望得到厚度比较均匀的外芯, 使得材料的性能比较稳定, 而在第二组实验中, 高锰酸钾溶液从隔板窄面的扩散也是比较对称比较稳定, 扩散的厚度也比较均匀, 呈现出微梯度的分布, 在实际生产中也有比较好的指导意义。

综上所述, 在前两组实验中还是选择第二组实验作为一个比较合适的实验结果来进行以后研究的基准。

#### (2) 第三组与第四组实验的对比

第三组实验和第四组实验都是为了观测短水口出来的液体向着隔板宽面缝隙流出时高锰酸钾溶液的扩散现象。第三组实验对隔板的两个窄面进行了密封, 观测高锰酸钾溶液从隔板宽面的两侧缝隙流出时的现象, 结果发现, 本组实验只能观测实验前 5s 之内的现象, 实验继续进行的话, 现象已经不能清晰观测。这

个情况是由于第三组实验中长水口隔板宽面的缝隙过大,从而引起流量过大,使得实验进行的现象只能在短暂时间进行。因此,为了能在较长的时间里面观测高锰酸钾溶液流过隔板里侧宽面缝隙的扩散现象,准备了第四组实验。第四组实验将长水口玻璃管隔板的窄面缝隙和外侧宽面缝隙密封,只留下隔板宽面里侧的缝隙,并且将里侧缝隙通过泡沫塑料进一步变窄,使得实验进行时只有微量的高锰酸钾溶液从缝隙流出,这样实验大约可以持续35s。从第四组实验中可以看到,高锰酸钾溶液向缝隙扩散的同时也在向着隔板窄面以下的位置扩散,这样刚好和实际生产需要的条件是一致的。

综上所述,在双水口结晶器的水模型实验中,对长水口隔板的窄面和宽面缝隙分别作了扩散实验,更加全面的分析了浓度扩散的位置、到达时间和扩散后期的分布状况。这些对于实际生产都会有很大的指导意义。

### (3) 前两组实验与后两组实验之间的对比

前两组实验观测的是长水口隔板的窄面缝隙的高锰酸钾溶液扩散情况,后两组实验观测的是长水口隔板的宽面缝隙的高锰酸钾溶液扩散情况,虽然不在同一位置观测,并且在实验中密封的位置不同,但是这四组实验是相关联的。在进行任何一组实验的时候,都会伴随着另一组实验现象的发生,只是为了实验能清晰准确的观测,才对不同的位置进行了密封。具体来说,当进行第一组实验的时候,想要得到的是隔板窄面缝隙的流动情况,故密封了隔板宽面的两侧,当高锰酸钾溶液通过窄面扩散时,宽面原本也会伴随这溶液扩散,但是为了防止其扩散影响窄面扩散的现象,所以对其进行密封,这样就只能看到窄面的扩散情况。前两组实验和后两组实验都反映了双水口连铸结晶器内流体的流动与混合情况,只不过分别是从不同的部位反映出来的。

综合四组实验,第二组实验和第四组实验结合的方式是一个比较合理的结合方式,可以作为继续研究复合钢板生产中水模型实验的基准。

## 3.4 本章小结

本章通过具体的实验和理论观测并分析了双水口结晶器窄面和宽面不同位置下的高锰酸钾溶液扩散现象,为复合钢板生产的水模型实验研究多增加了一些理论实验上的数据,并且获得了以下结论:

(1) 短水口的出水口向下倾斜能更好的模拟实际生产过程,并且可以获得更加长久、稳定和对称的高锰酸钾溶液扩散分布;

(2) 在模拟结晶器宽面流动扩散现象时, 为了得到更加清楚和稳定的现象, 需要把长水口隔板的两个窄面和一个宽面密封住, 并用泡沫塑料处理剩余的一个宽面, 使得其缝隙足够小 (大约为 2.5mm 左右), 这样才能观测到比较持续的、稳定的实验现象;

(3) 从实验现象可以发现, 无论高锰酸钾溶液通过的是结晶器窄面还是宽面, 缝隙下面两侧都可以得到比较对称的浓度扩散现象, 也间接地说明了这种方式有生产复合钢板的基础;

(4) 结晶器单侧宽面流动的实验中, 从宽面缝隙流下的液体能比较迅速的扩散到宽面缝隙以下的部位, 进一步说明了这个模型对于实际生产十分有用, 复合理想的复合钢板生产的过程。

## 第四章 双水口结晶器壁湍流扩散

### 4.1 结晶器窄面壁湍流

层流过渡为湍流的主要原因是的不稳定性。在多数情况下，剪切流中的扰动会逐渐增长，使流动失去稳定性而形成湍流斑，扰动继续增强，最后导致湍流。这一类湍流称为剪切湍流<sup>[13]</sup>。结晶器窄面缝隙壁侧的流动属于典型的剪切壁湍流状态。第三章中通过实验获得了双水口连铸结晶器内部的浓度扩散和分布情况，本章主要从理论模型的角度来具体阐述上一章中产生的现象。

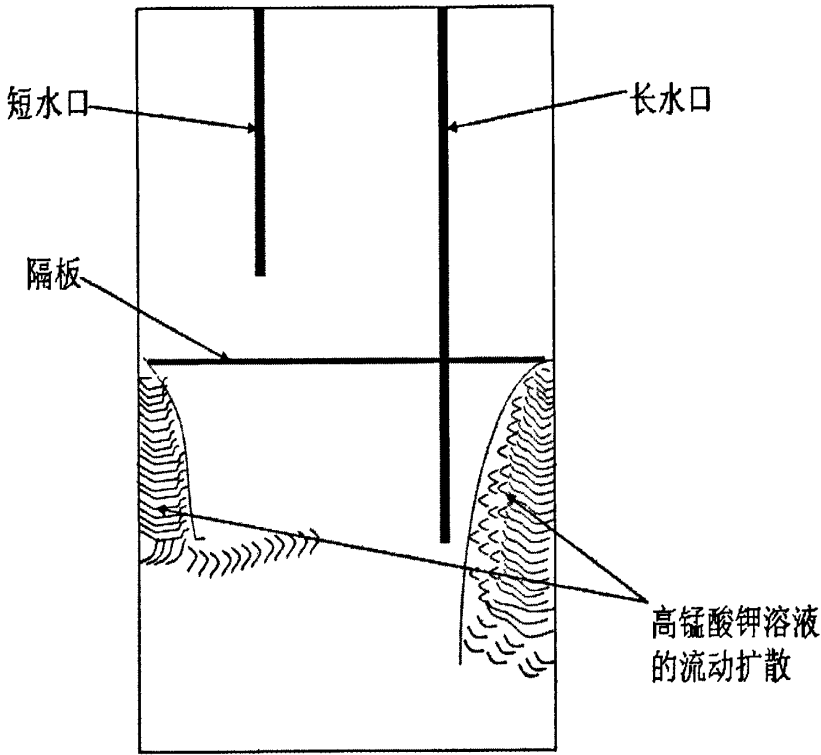


图 4.1 结晶器窄面壁湍流示意图

Figure 4.1 Schematic diagram of wall turbulence of mold narrow face

#### 4.1.1 结晶器窄面壁湍流扩散模型理论

实验表明，对流传质系数在大多数情况下，并不像膜理论所确定的那样，与扩散系数呈线性关系。因为在靠近壁面的流体薄层中，并不是单纯的分子扩散过

程,而扩散的浓度也不是线性分布。同时,就流过的流体来说,也并非单纯的稳态传质过程。基于上述分析,随之就提出了另一种说明对流传质过程的设想,即传质系数的渗透理论。

渗透理论认为,当流体流过表面时,有流体质点不断地穿过流体附壁薄层向表面迁移并与之接触,流体质点在与表面接触之际则进行质量的转移过程,此后流体质点再回到主流核心中去。当壁面上的浓度大于主流区的浓度时,流体质点经历上述过程又回到主流时,组分浓度增加。流体质点在很短的接触时间内,接受表面传递的组分过程表现为不稳态特征。从统计的观点,则可将由无数质点群与表面之间的质量转移,视为流体靠壁薄层对表面的不稳态扩散传质过程。

在流体质点不断地投向表面并在表面接触后又不断的离去的过程中,随时有新的指点补充离去的位置,这样就形成了表面上的质点不断更新的现象。因此,渗透理论又称为表面更新理论。

#### 4.1.1.1 对流传质过程的相关准则数

对流传质与动量传输密切相关。多数情况是流体在强制流动下的对流传质过程,其质传递强度必然与雷诺准则数 ( $Re$ ) 有关。

对流传质与对流传热相类似,表征对流传质过程的相似准则数,与对流传热有相类似的组成形式。根据对流传热的相关准则数,改换组成准则数的各相应物理及几何参数,则可导出对流传质的相关准则数。

(1) 施密特准则数 ( $Sc$ ) 对应于对流传热中的普朗特准则数 ( $Pr$ )

$Pr$  准则数为联系动量传输与热量传输的一种相似准则,由流体的运动粘度(即动量传输系数)  $\nu$ , 与物体的导温系数(即热量传输系数)  $\alpha$  之比构成,即  $Pr = \nu/\alpha$ 。

与  $Pr$  准则数相对应的  $Sc$  准则数则相应为联系动量传输与质量传输的相似准则,其值由流体的运动粘度( $\nu$ )与物体的扩散系数( $D_l$ )之比构成,即  $Sc = \nu/D_l$ 。

(2) 舍伍德准则数 ( $Sh$ ) 对应于对流传热中的努谢尔特准则数 ( $Nu$ )

$Nu$  准则数由对流传热系数( $\alpha$ ), 物体的导热系数( $\lambda$ )和定型尺寸系数( $l$ )组成,即  $Nu = \alpha l/\lambda$ , 它是以边界导热热阻与对流换热热阻之比来标志过程的相似特征。

与  $Nu$  准则数相对应的  $Sh$  准则数则相应为,以流体的边界扩散阻力与对流传质阻力之比来标志过程的相似特征,其值由对流传质系数( $h_m$ ), 物体的互扩散系

数( $D_i$ )和定型尺寸( $l$ )组成, 即  $Sh = \frac{h_m l}{D_i}$ 。

(3) 传质的斯坦顿准则数( $St_m$ )对应于对流传热中的斯坦顿准则数  $St$

$St$  准则数是对流换热的  $Nu$  数、 $Pr$  数以及  $Re$  数的三者的综合准则, 即  $St = Nu/(Re \cdot Pr)$ , 将各准则数的定义代入, 就可得到  $St = h/(\rho c_p u_1)$ 。

与  $St$  准则数相对应的  $St_m$  数为  $St_m = h_m/u$ , 是对流传质的无量纲度量参数。

#### 4.1.2 结晶器窄面壁湍流扩散求解

从短水口出来的高锰酸钾溶液流经结晶器窄面的缝隙后, 由于缝隙下面长水口的流场作用, 高锰酸钾溶液贴壁流动的同时向着长水口方向扩散, 并有少部分流体沿着壁面竖直向下扩散。图 4.1 给出了结晶器窄面壁湍流过程中高锰酸钾溶液的流动方向和扩散方向。

以结晶器窄面右侧缝隙以下的壁面流动为基准, 来分析其具体的壁湍流中扩散情况。高锰酸钾溶液扩散的示意图如图 4.2 所示。

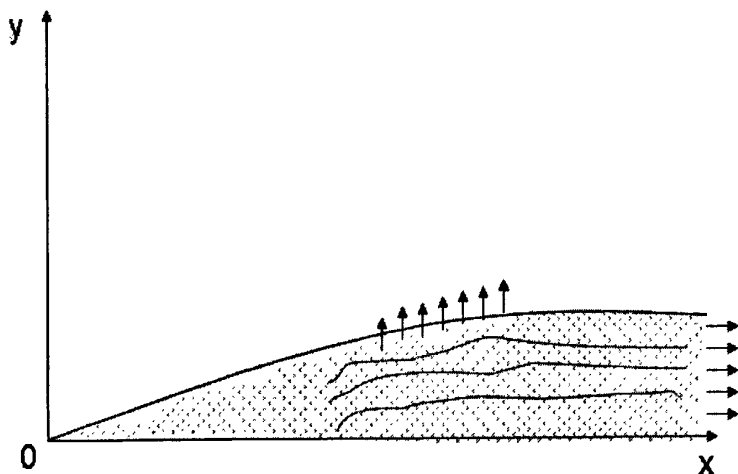


图 4.2 直角坐标系下的湍流

Figure 4.2 Turbulence in cartesian coordinate system

根据质量守恒定律可以推导出二维传质微分方程为

$$\frac{Dc_i}{Dt} = D_{ij} \left( \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial c_i v_x}{\partial x} - \frac{\partial c_i v_y}{\partial y} - \kappa c_i c_j \quad (4-1)$$

浓度  $c_i$  随时间的总变化率为

$$\frac{Dc_i}{Dt} \equiv \frac{\partial c_i}{\partial t} + v_x \frac{\partial c_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial c_i}{\partial y} \quad (4-2)$$

可简写成直角坐标、柱坐标或者球坐标的下式:

$$\frac{Dc_i}{Dt} = D_{ij} \nabla^2 c_i \quad (4-3)$$

$c$ ——扩散物质的浓度;

$D_{ij}$ ——向介质的质扩散系数, 在这里指高锰酸钾溶液与水之间的流动扩散,

所以此处的下标可以省略不写。

式(4-3)与无内热源时常物性的导热微分方程具有相同的型式, 只是以浓度  $c$  和质量扩散系数  $D$  分别置换了导热微分方程式中的温度  $t$  和热扩散系数  $a$ 。

湍流中, 速度和浓度都有涨落<sup>[14]</sup>。为将这些涨落包含在以上方程中, 我们定义

$$c_i = \bar{c}_i + c'_i \quad (4-4)$$

式中,  $c'_i$  为涨落值,  $\bar{c}_i$  为平均值。

$$\bar{c}_i = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau c_i dt \quad (4-5)$$

$c'_i$  的时间平均值为零。同样可以定义:

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i \quad (4-6)$$

其中,  $v'_i$  为速度涨落, 速度涨落的时间平均值也为零, 而平均速度为

$$\bar{v}_i = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau v_i dt \quad (4-7)$$

对于其他方向上的速度定义与上述定义方式相同。

将上述定义式带入式(4-1)中, 并对此式在小时间间隔  $\tau$  内取平均值, 有

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left( D \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \right) dt = \frac{D}{\tau} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^\tau c_i dt = D \frac{\partial^2 \bar{c}_i}{\partial x^2} \quad (4-8)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \kappa c_i c_j dt &= \frac{\kappa}{\tau} \int_0^{\tau} (\bar{c}_i + c'_i)(\bar{c}_j + c'_j) dt \\
 &= \frac{\kappa}{\tau} \int_0^{\tau} (\bar{c}_i \bar{c}_j + \bar{c}_j c'_i + \bar{c}_i c'_j + c'_i c'_j) dt \\
 &= \frac{\kappa}{\tau} \left[ \bar{c}_i \bar{c}_j \tau + 0 + 0 + \int_0^{\tau} (c'_i c'_j) dt \right] \\
 &= \kappa (\bar{c}_i \bar{c}_j + \overline{c'_i c'_j})
 \end{aligned} \tag{4-9}$$

其中新项  $\overline{c'_i c'_j}$  代表涨落乘积的时间平均值。在实际情况下, 此新项的值可以与  $\bar{c}_i \bar{c}_j$  项一样大, 但符号相反。同样地,

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{\partial \bar{v}_x c_i}{\partial x} dt = \frac{\partial \bar{v}_x c_i}{\partial x} + \frac{1}{\tau} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\tau} v'_x c'_i dt = \frac{\partial}{\partial x} \bar{v}_x \bar{c}_i + \frac{\partial}{\partial x} \overline{v'_x c'_i} \tag{4-10}$$

将这些平均项带入原方程, 即可得到质量平衡式:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} &= D \left( \frac{\partial^2 \bar{c}_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}_i}{\partial y^2} \right) - \left( \frac{\partial \bar{v}_x \bar{c}_i}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_y \bar{c}_i}{\partial y} \right) - \\
 &\quad \left( \frac{\partial \overline{v'_x c'_i}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'_y c'_i}}{\partial y} \right) - \kappa \bar{c}_i \bar{c}_j - \kappa \overline{c'_i c'_j}
 \end{aligned} \tag{4-11}$$

式 (4-11) 即为结晶器窄面壁湍流的质量平衡式, 此方程可以较好的描述第三章中贴近结晶器壁面处的浓度扩散问题。

在求解式 (4-11) 之前, 有必要对斯托克斯-爱因斯坦公式 (Stokes-Einstein Equation) <sup>[15]</sup> 进行简单说明。斯托克斯-爱因斯坦公式是最早的一个描述稀溶液扩散的基本理论公式。它是由巨大圆球颗粒溶质 (A) 通过微小颗粒溶剂 (B) 的扩散模型推导出来的。该公式为,

$$D_{AB} = \frac{kT}{6\pi\mu_B r_A} \tag{4-12}$$

式中,  $r_A$  ——溶质 (A) 分子的半径;

$\mu_B$  ——溶剂 (B) 的粘度;

$T$  ——系统温度;

$k$  ——比例常数。



尽管公式 (4-12) 是在特定条件下导出来的, 但此公式反映了影响液体扩散系数的基本因素。式 (4-12) 可改写为

$$\frac{D_{AB}\mu_B}{T} = f \quad (\text{溶质尺寸}) \quad (4-13)$$

在本实验中的扩散方式为高锰酸钾溶液从隔板以上的瞬变平面源的扩散。 $M$  摩尔的高锰酸钾溶液突然释放到结晶器窄面缝隙以下部位的壁面上。 $t=0$  时,  $M$  摩尔在此壁面上是均匀分布的, 并同时沿着  $x$  轴扩散到周围介质中。对式 (4-11) 作出以下简化:

- (1) 忽略图 4.2 中  $x$  轴方向的扩散作用和流动, 仅研究缝隙壁面以下有限范围内的沿  $y$  轴的扩散;
- (2) 由于涨落项的时间平均值为零, 所以暂不考虑涨落项。
- (3) 扩散过程中  $y$  轴方向的速度十分小, 可以忽略不计。
- (4) 在本实验中, 是高锰酸钾溶液在水中扩散, 所以水自身的扩散不计, 即  $c_j = 0$ 。

经过简化后, 相应的 Fick 定律<sup>[16]</sup>形式为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (4-14)$$

式 (4-14) 的解为

$$c = \frac{A}{\sqrt{t}} e^{\frac{-y^2}{4Dt}} \quad (4-15)$$

常数  $A$  可以通过下面的计算求得:

$$M = \int_{-\infty}^{\infty} c dy = 2 \int_0^{\infty} c dy = \frac{2A}{\sqrt{t}} \int_0^{\infty} e^{\frac{-y^2}{4Dt}} dy = 2A\sqrt{\pi D} \quad (4-16)$$

因此有

$$c = \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{\frac{-y^2}{4Dt}} \quad (4-17)$$

鉴于  $\frac{1}{2}M$  在每个方向上从壁面向外扩散, 平均平方位移可以从下式算出,

$$\bar{y}^2 = \frac{\int_0^\infty y^2 c dy}{\frac{1}{2}M} = \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \int_0^\infty y^2 e^{\frac{-y^2}{4Dt}} dy = 2Dt \tag{4-18}$$

从式（4-18）可以看出，随着时间的不断增加，许多质点的平均平方位移会不断增大。在第三章的实验中可以看到，当高锰酸钾溶液流经结晶器窄面缝隙后，随着时间的推移，高锰酸钾质点在壁面附近开始减少，即表现为远离壁面，向结晶器内部扩散，这个结论和实验中的结论是完全吻合的。

由式（4-17）可以画出浓度  $c$  与扩散方向  $y$  的曲线图。 $y$  只能为正值，因为以壁面位置的  $y$  值为零。图 4.3 给出了分析的结果。曲线 1 到 3 分别为窄面缝隙宽度为 5mm, 7mm, 10mm 的情况。图 4.4 为实验过程中观测到的浓度扩散示意图。

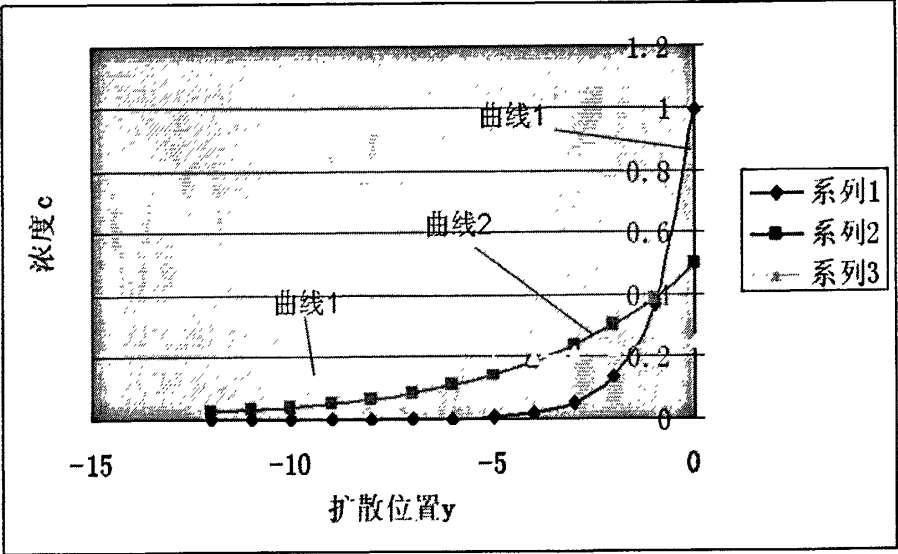


图 4.3 浓度与扩散位置曲线图

Figure 4.3 Location and spread of the concentration curve

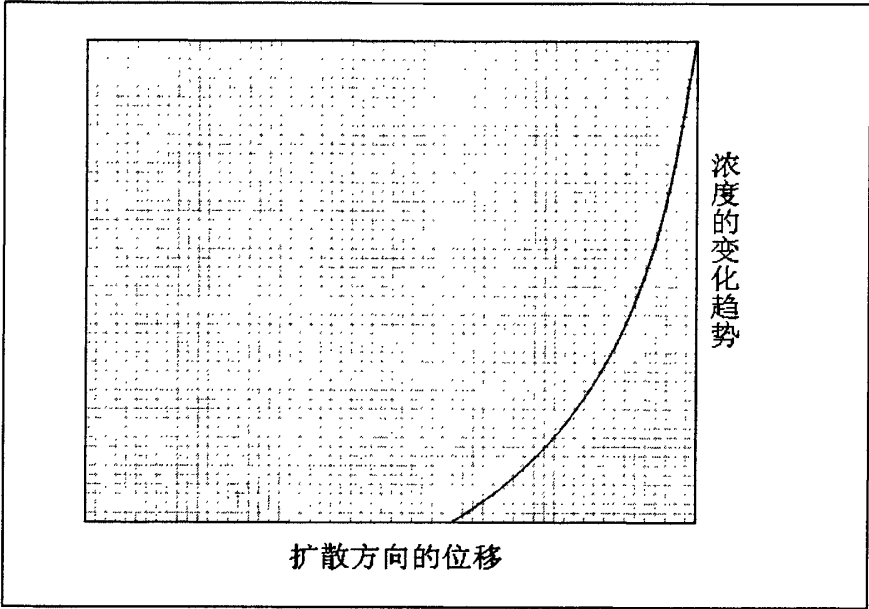


图 4.4 实验观测到的浓度扩散示意图

Figure 4.4 Experimental observation of the the spread of concentration

4.2 本章小结

本章通过对于第三章的实验结果中的结晶器窄面缝隙流动进行建模分析，导出了结晶器窄面壁湍流扩散的质量平衡式，并通过对其质量平衡方程进行简化求解，得出的平均平方位移在理论上较好的描述了第三章中出现的实验现象。

## 第五章 结论与展望

本论文用有机玻璃容器模拟结晶器,用有机玻璃管模拟实际中的水口,用红色高锰酸钾溶液和水溶液分别模拟复合钢板的不锈钢溶液和普碳钢溶液,通过不同的水口组合和对结晶器不同位置缝隙扩散现象的观测,分析了复合钢板生产中的两相流液体浓度扩散情况,在此基础上给出了一个比较贴近实际生产的模型组合,并且得出以下主要结论:

(1) 复合钢板代替不锈钢板将成为未来钢材发展的必然趋势之一,对于连铸连轧复合钢板工艺技术的基础研究将会成为一个不断升温的课题,尤其是对于复合钢板生产中水模型实验研究,是一个可靠性和经济性比较高的研究方法。

(2) 通过实验观测结晶器窄面的高锰酸钾溶液浓度扩散现象可以知道,双水口连铸结晶器内的液体会呈现出一个在结晶器窄面两侧的贴壁流动,这个流动现象呈现出比较持久、稳定、连续和对称的特性,是浓度扩散现象最直接的反映,也是实际生产复合钢板希望看到的现象。

(3) 通过观测结晶器宽面缝隙的高锰酸钾溶液浓度扩散现象可以知道,双水口连铸结晶器内的不锈钢溶液要想在结晶器宽面出现对称的、持久的、连续的和稳定的流动现象,必须对结晶器宽面的隔板缝隙进行缩减。本文中密封了结晶器三面的缝隙,并且使得剩余宽面的缝隙只有 2.5mm。

(4) 通过对前两组实验的对比,推断出短水口的出水口向下倾斜  $15^\circ$  时可以得到一个比较理想的实验结果。所以在实际生产中可以考虑对双水口的结晶器中短水口进行改进,使其与水模型实验中的数据一致。

(5) 利用质量平衡方程对结晶器壁湍流进行计算后发现,实验结果和理论计算的结果是一致的,进一步证明了此实验对于复合钢板基础研究的指导意义。通过最终结果发现,结晶器窄面缝隙为 5mm 时的浓度扩散位移曲线与实验观测到的曲线示意图最接近。



## 参考文献

1. 张国礼, 徐芳泓,世界不锈钢发展概况.山西冶金, 2000(03).
2. 王辰, 2005 年全球不锈钢产量将超过 2500 万 t.山东冶金,2005(02).
3. 不锈钢生产技术的发展趋势.重型机械科技,2004(02).
4. 吴海瀛,世界不锈钢生产稳定增长.中国金属通报,2008(30).
5. 清风,世界不锈钢生产现状与发展特点.冶金管理,2001(04).
6. 苏植权,不锈钢产业全球竞争态势及广东集群化发展.广东科技,2007(02).
7. 耿炳玺,中国不锈钢的现状和发展. 特殊钢, 1999(01).
8. 倪红卫, 高娟,唐利民, 不锈钢复合板制备技术的发展. 特殊钢, 2002(03).
9. 秦建平,田雅琴,陈惠, 复合钢板的发展现状. 中国稀土学报,2005(S2).
10. 范洁川, 流动显示与测量[M], 北京: 机械工业出版社, 1997
11. 范洁川, 近代流动显示技术[M], 北京: 国防工业出版社, 2002
12. 魏天秀,水口形状对连铸结晶器内流动状态的影响.钢铁,1984(07).
13. 梁在潮, 工程湍流[M], 武汉: 华中理工大学出版社, 1999: 50-51
14. E.L.柯斯乐, 扩散流体系统中的传质[M], 北京: 化学工业出版社, 2002: 57
15. 李汝辉, 传质学基础[M], 北京: 北京航空学院出版社, 1987: 111
16. 修武德, 时钧, 传质学[M], 北京: 化学工业出版社, 1988: 131



## 致谢

本研究及学位论文是在我的导师李宝宽教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。李老师严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。从课题确立到完成的整个过程中，他无时无刻地给予了我细心的指导和不懈的支持。在课题遇到困难的时候，他总是能帮我走出困境，使我少走了很多弯路。两年多来，李教授不仅在学业上给我以精心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀。我从李老师那里不仅学到了受益终身的学术知识，还明白了许多做人的道理。在此，谨向李老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

其次，感谢刘中秋师弟在我做实验的那些天里面作为我的助手默默无闻所做的一切。我还要特别感谢本实验室的齐凤升老师，齐老师在这两年来不厌其烦的指出我研究中的缺失，且总能在我迷惘时为我答疑解惑，为我完成这篇论文提供了巨大的帮助，在此表示深深的感谢。

感谢实验室的王芳师姐，张刚刚、魏国顺、吴子尧等师弟师妹和张妍、陆秋敏等同学。两年多来，实验室里共同的生活点滴，学术上的讨论、言不及义的闲扯，都使我历历在目，铭记于心，感谢你们的相伴，使我度过充实的研究生生活。

我的父亲、母亲和所有的家人对我的学业也给予了莫大的鼓舞和支持，是他们对我的关爱、理解和支持陪伴我度过生命中许多难忘的日子，他们是我学习和生活的精神支柱。谢谢你们！

总之，在我人生奋斗的历程上，我惶恐的接受着一份份恩惠，饮水思源，真的谢谢一路有你们，我必将再接再厉铸辉煌！



