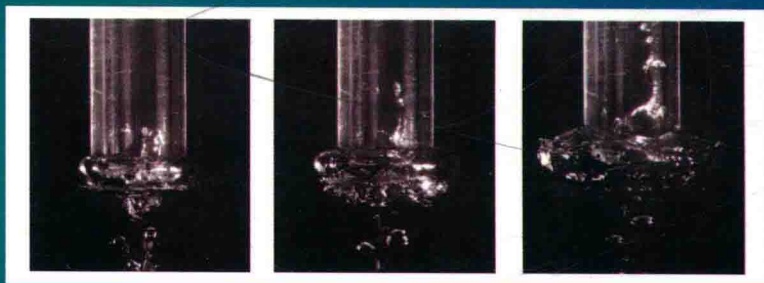


The multiphase flow & heat and mass transfer in the process of
gas-solid flow passing through a liquid pool

气固两相穿越液池过程中的

多相流动与 传热传质

吴暄◎著



气固两相穿越液池过程中的

多相流动与 传热传质

—— 吴暄◎著 ——

图书在版编目 (CIP) 数据

气固两相穿越液池过程中的多相流动与传热传质 /

吴暄著. —长春: 吉林大学出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5677-8467-3

I. ①气… II. ①吴… III. ①两相流动-传热传质学

IV. ①O359

中国版本图书馆CIP数据核字 (2016) 第323971号

书 名: 气固两相穿越液池过程中的多相流动与传热传质

作 者: 吴暄 著

责任编辑: 邵宇彤 责任校对: 姚正德

吉林大学出版社出版、发行

开本: 710 × 1000毫米 1/16

印张: 18 字数: 286千字

ISBN 978-7-5677-8467-3

封面设计: 中尚图

北京天宇万达印刷有限公司 印刷

2016年12月 第1版

2016年12月 第1次印刷

定价: 49.00元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路501号 邮编: 130021

发行部电话: 0431-89580028/29

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

前 言

持续、安全和可靠的能源供应越来越受到全世界的广泛关注，并已成为全球经济稳定与发展的基础。而能源消费所造成的能源短缺和环境问题使人类的发展面临巨大挑战。在能源的高效利用领域，气固两相穿越液池的工业过程广泛存在于气流床煤气化工艺、冲击式水浴除尘工艺、气体洗涤冷却工艺等工艺流程中。该“穿越”过程存在着气液、气固和气液固等多相流动、分离和热质传递等多个复杂物理过程，其中包含着气泡-液体、气体-固体、液体-固体、气体-液滴、液滴-固体等多相流基础科学问题，所呈现出的多相体系伴随着复杂的相间耦合作用机制、内部条件与外部条件的相互影响等因素，其中蕴含了极其复杂而丰富的机理和规律。此外，实际工业运行也表明，在穿越液池的过程中，气体洗涤冷却的好坏将直接影响到工艺后续设备的稳定运行。然而不论是从提高工艺效率的角度，还是从改进设备结构和优化的角度，都有必要从深入、系统地认识该过程中的多相流动规律、相间分离特性以及相间热质传递等基础工程热物理科学问题开始。

为此，作者依托内蒙古科技大学内蒙古自治区高效洁净燃烧重点实验室，针对在能源高效利用领域广泛存在于煤气化工艺、除尘工艺中的“气固两相穿越液池的多相产物净化处理过程”所涉及的气液、气固和气液固等多相间相互作用、相间分离以及相间热质传递进行了长期而系统的研究，取得了一些实质性的进展和成果，发现了穿越液池工业净化过程中的多相流动及相间分离特征规律，开发了研究多相流问题的新模型和新方法，为实际工艺过程及设备优化提供了理论指导和借鉴。基于这些研究成果，作者正在开展“穿越”过程中固液两相液池内气泡动力学行为特征的研究工作。

本书围绕能源与环境领域中广泛存在的气固两相穿越液池工业过程所涉及的

复杂气液、气液固等多相体系中的流动分离和传热传质等多个关键基础问题展开研究,揭示其内在机理。本书内容共分为6章:第1章绪论,概要介绍了“穿越”这一工业过程及其工业应用背景,并提出了该过程所涉及的关键的工程热物理科学问题,对相关科学问题的研究和应用现状进行了综述。从而系统地提出了该工业工程中的多相流动、分离与传热等基本科学问题以及撰写本书的宗旨;第2章液池中顶部浸没平口管口处气泡行为特性,针对穿越液池过程中的气泡行为特性开展相关实验和数值研究,获得顶部浸没布置的平口管口处气泡生成、长大、脱离等行为特征,提出了顶部浸没管口气泡长大-脱离模型;第3章气体穿越液池过程中气液两相流动特性,建立了气液两相湍流流动数学模型,并针对气液流动过程及其特性进行分析,提出了穿越液池工艺过程的运行建议;第4章气固两相流穿越液池过程中气液固三相流动特性,结合气液两相流动的研究成果,建立气液固三相流动实验平台和数值模拟平台,针对气固两相流穿越液池过程中的气液固三相流动及其特性进行分析,获得离散颗粒运动轨迹及其浓度分布规律;第5章气固两相流穿越液池过程中的相间分离特性,针对气固两相流穿越液池过程中的气固分离和气液分离特性进行分析,得到了气固、气液分离机理,获得相间分离效率及其影响因素;第6章高温气体穿越液池过程中的相间传热传质特性,建立气液间直接接触传热传质流动数学模型,揭示在“穿越”过程中的单气泡和气泡群与液体间直接接触热质传递特性。

本书大纲的拟定和全书的统稿、撰写及编排等工作均由内蒙古科技大学吴晷负责。首先由衷感谢东南大学袁竹林教授、内蒙古科技大学武文斐教授对本书著者在该领域长期而系统研究的一贯支持和宝贵意见。本书中的工作是著者长期对该领域的科学探索所取得的研究成果的系统总结。本书中的研究工作得到了本书著者所主持的两个国家自然科学基金项目“气固两相流穿越液池过程中的气固分离及规律研究”(NO.51166010)和“气体穿越固液两相液池过程气泡动力学行为及其对颗粒运动分离影响机制”(NO.51666015)的资助。同时本书中的研究工作还得到了内蒙古科技大学创新基金项目“冲击水浴除尘器内气液固三相流动数值模拟”(NO.2011NCL020)的资助。

感谢国家自然科学基金委、内蒙古科技大学对本书研究内容以及最终完稿的支持。

本书中的研究工作也得到了著者所在研究团队研究生的协助,他们是李松

洋、马俊、秦梦竹、梁盼龙、焦晶晶和高慧杰，在此对他们表示由衷地感谢。

由于本书著者的水平和知识范围有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者与同行批评指正，以便在以后的科学研究中改进。

著者电子邮箱：wxgif@163.com。

吴 晔

2016年9月于内蒙古科技大学

目 录

第 1 章 绪 论 /1

1.1 气固两相流穿越液池过程的工业应用背景	2
1.1.1 冲击式水浴除尘器中的气固两相流穿越液池过程	2
1.1.2 多喷嘴对置式水煤浆气化炉中的气固两相流穿越液池过程 ...	3
1.2 气固两相流穿越液池工业过程的基础研究与应用	5
1.2.1 穿越液池过程中气液流动特性的研究	6
1.2.2 穿越液池过程中固相运动分布规律及气固分离的研究	11
1.2.3 穿越液池过程中气体带水问题及气液分离的研究	14
1.2.4 液池内相间直接接触热质同时传递的研究	15
1.3 气固两相流穿越液池工业过程中的关键工程热物理科学问题 ...	16
参考文献	19

第 2 章 液池中顶部浸没平口管口处气泡行为特性 /31

2.1 液池中顶部浸没平口管口处气泡膨胀及脱离行为特性	32
2.1.1 气泡可视化测量实验系统	32
2.1.2 实验测量方法与数据提取	36
2.1.3 顶部浸没平口管口处气泡膨胀及脱离演变过程	37
2.1.4 平口管管径对气泡脱离直径的影响	39

2.1.5	顶部浸没平口管口处膨胀气泡位置随时间变化分布特性	41
2.1.6	平口管管径对单个气泡膨胀及脱离时间的影响	44
2.1.7	脱离阶段气泡圆度分布特性	45
2.2	液池中顶部浸没管口处气泡受力分析与数值计算	46
2.2.1	顶部浸没管口气泡长大-脱离模型	46
2.2.2	气泡的受力分析	47
2.2.3	静止液体中顶部浸没管口处气泡尺寸变化规律	50
2.3	液池中顶部浸没管口处气体射流冲坑特性	53
2.3.1	顶部浸没气体射流冲坑及气液交界面运动特性	53
2.3.2	顶部浸没管口处气体冲坑特性数值模拟	58
2.4	小 结	70
	参考文献	72

第3章 气体穿越液池过程中的气液两相流动特性 /75

3.1	气液两相湍流流动数学模型及数值求解	75
3.1.1	气液两相湍流流动模型的建立	76
3.1.2	CFD-ABND耦合计算模型的建立	79
3.1.3	数学模型的数值求解及计算条件	84
3.2	气体穿越液池过程中气液两相湍流流动特性	86
3.2.1	气体穿越液池过程中气液两相流动及相分布特性	86
3.2.2	液池内气泡及气液界面浓度分布特性	100
3.3	气体穿越液池过程中的压力波动特性	110
3.3.1	数值模拟平台的建立	111
3.3.2	不同操作参数对压力波动特性的影响	114
3.3.3	快速傅里叶变换分析	117
3.3.4	不同气速下的功率谱密度函数分析	119
3.3.5	不同静态液位下的功率谱密度函数分析	120
3.4	液池内分隔板布置对气液流动特性的影响	121
3.4.1	数值模拟平台的建立	121

3.4.2	分隔板对气液流动形态的影响	122
3.4.3	分隔板对气泡湿周轴向分布的影响	124
3.4.4	分隔板对气泡湿周径向分布的影响	125
3.4.5	分隔板不同布置对气液流动形态的影响	126
3.5	小 结	127
	参考文献	129

第4章 气固两相流穿越液池过程中气液固三相流动特性 /133

4.1	气固两相流穿越液池过程颗粒运动及其分布特性	134
4.1.1	实验台的搭建及实验条件	134
4.1.2	气固两相流穿越液池的三相流动过程	137
4.1.3	液池内颗粒浓度分布的实验测量	140
4.2	气固两相流穿越液池过程中液固流场空间结构与特性	143
4.2.1	可视化实验系统组成	144
4.2.2	固体颗粒沉降、悬浮、飞溅及分离演变过程	145
4.2.3	液池内颗粒运动变化分布特性	147
4.2.4	管口气泡尾流拖曳作用下颗粒运动的演变过程	150
4.2.5	气固两相穿越液池过程固体颗粒浓度分布特性	153
4.2.6	液固流场空间结构及流动特性 PIV 实验研究	155
4.2.7	气固两相流穿越液池过程中的颗粒运动分离过程可视化实验	163
4.3	气固两相流穿越液池过程气液固三相流动数学模型	167
4.3.1	欧拉框架下的气液连续相数学模型	168
4.3.2	拉格朗日框架下的离散颗粒相数学模型	170
4.3.3	数学模型的求解及计算条件	175
4.4	气固两相流穿越液池过程气液固三相流动及相分布特性	178
4.4.1	数值模拟与实验结果的对比及分析	178
4.4.2	气液连续相流动及其分布特性	181
4.4.3	固体颗粒运动轨迹及其浓度分布特性	192

4.5 小 结	197
参考文献	199

第5章 气固两相流穿越液池过程中的三相分离特性 /201

5.1 气固两相流穿越液池过程中的气固分离机理	201
5.2 气固分离特性数学模型	203
5.2.1 数学模型的确定	203
5.2.2 计算方法和条件	203
5.3 气固分离特性及其表征	204
5.3.1 气液固三相流动分离过程数值模拟结果与分析	204
5.3.2 入口气速对气固分离性能的影响规律	206
5.3.3 不同粒径颗粒的分离特性	208
5.3.4 下降管浸没深度对气固分离性能的影响规律	210
5.4 气固两相流穿越液池过程中气固两相运动分离过程分析	212
5.4.1 颗粒的冲击分离	212
5.4.2 颗粒的沉降分离	212
5.4.3 颗粒被气泡尾流拖曳的运动	213
5.4.4 颗粒被气泡包裹的运动	215
5.4.5 颗粒在液体中的扩散运动	216
5.4.6 液滴对颗粒的捕获和携带	218
5.5 气液分离空间内气体-液滴两相分离特性	218
5.5.1 液滴形成、夹带机理及过程	220
5.5.2 气体-液滴两相分离运动数学模型	222
5.5.3 气液分离空间内气体-液滴两相分离特性	227
5.6 小 结	232
参考文献	234

第6章 穿越液池过程中气液两相流动直接接触传热传质特性 /237

6.1 单个高温气泡在液池内上升过程中的传热传质理论模型	238
6.1.1 气液相间直接接触热质传递过程分析	238
6.1.2 计算问题的简化和假定	240
6.1.3 液池内气液直接接触热质同时传递理论模型	240
6.1.4 数值计算方法及计算条件	243
6.2 气体穿越液池过程中气泡群-液体直接接触三传模型	243
6.2.1 高温气体穿越液池过程气液间动量、热量及质量同时传递	244
6.2.2 非等温条件下的气液两相湍流流动模型	245
6.2.3 数学模型计算方法及条件	251
6.3 单个高温气泡穿越液池过程气泡-液体间直接接触热质传递特性	253
6.3.1 气泡半径的变化规律	253
6.3.2 水蒸汽浓度对气泡尺寸的影响规律	254
6.3.3 气泡温度随气液接触时间的变化规律	254
6.3.4 冷却水蒸发速率随时间的变化规律	255
6.3.5 冷却水蒸发量随时间的变化规律	256
6.4 气体穿越液池过程中气泡群-液体直接接触传热传质特性	257
6.4.1 表观气速对液池内气体温度分布的影响规律	257
6.4.2 下降管出口气体温度对液池内气体温度分布的影响规律 ...	259
6.4.3 气泡尺寸对液池内气体温度分布的影响规律	259
6.4.4 液池内气体温度的径向分布规律	261
6.4.5 液池内平均冷却水温度的变化规律	262
6.4.6 液池内冷却水蒸发速率的分布规律	264
6.4.7 液池体积传热系数的影响因素分析	265
6.5 小 结	268
参考文献	271

第1章 绪论

自然界中雾霾天气是一种大气污染状态，雾霾是对大气中各种悬浮颗粒物含量超标的笼统表述。自然界每次暴雨或大雪过后，空气都会变得清新，这是自然界通过雨水清洗低层大气层实现污染物控制的结果。减少大气中可悬浮颗粒物的聚集是解决雾霾的根本之道^[1]。因此，我们应着眼于大气可悬浮颗粒物来源，减少可悬浮物排放。随着工业的发展及人们生活水平的提高，一方面，工业生产过程中的可悬浮颗粒物的排放现象日趋严重，使环境不断恶化；另一方面，随着生活水平的不断提高，人们不再盲目追求经济建设、效益最大化，健康问题逐渐进入了人们的视野，人们的环保意识日益增强。环境保护问题也逐渐进入了人类的视野，并制订了一系列的粉尘排放标准，这些都促进了各种除尘工艺和相应设备的发展。实际上，自然界清洗大气层是通过雨滴的作用，将气体携带的固体颗粒物予以分离的过程，这是一个典型的多相流动分离的过程。在工业设备中，例如冲击水浴除尘器、激冷室气流床气化炉等，都存在含尘气体经顶部浸没平口管口穿越液池的过程。而该工艺过程存在着相互耦合作用的复杂非稳态多尺度多相流动，该多相流动过程的好坏直接影响工业设备运行的稳定性和利用的高效性。本书将以在工业设备中广泛存在的气固两相流穿越液池的气体净化冷却工艺过程为对象，详细介绍该工艺过程及其在工业中的应用情况，阐述目前气固两相流穿越液池过程中内在作用机理及其规律的研究和应用状况，提出并分析该过程中所涉及的工程热物理领域关键科学问题。

1.1 气固两相流穿越液池过程的工业应用背景

1.1.1 冲击式水浴除尘器中的气固两相流穿越液池过程

大气中悬浮颗粒物聚集是雾霾天气的形成原因。汽车尾气排放、地面扬尘、化石燃料燃烧、垃圾焚烧,甚至火山喷发等都会造成空气中悬浮颗粒物的聚集。减少可悬浮颗粒物排放,最有效手段就是除尘。除尘技术就是将气体所携带颗粒物予以分离的技术。燃煤锅炉烟气的排放是空气中悬浮颗粒物含量增加的主要元凶之一,人们一直致力于减少烟气含尘量的研究。冲击水浴式除尘器^{[2][3]}作为烟气除尘系统的第一级设备,其结构简单、造价低、运行费用低,水还可以循环利用。其在冶金、建筑、环保、石油化工等领域都有广泛的应用。

冲击水浴除尘器中的气体洗涤净化方式是一种使夹裹着固相颗粒的气体依靠冲击并在水中进行充分水浴作用的分离技术。在该分离技术中,含尘气体高速冲击液池与水充分接触,并在穿越液池的过程中完成对气体的水浴除尘。如图 1-1 所示,其工作原理是,除尘器运行时水箱内要储存一定量的水,淹没进气管管口。当具有一定进口速度的含有固体颗粒的气体经过进气管,在出口处以一定速度射入液池内。气体对液池中的水层产生冲击作用后,在负压力和负浮力梯度的双重作用下其速度越来越小直至改变运动方向反折向上流动,并鼓泡穿越液池。在气体的运动方向发生改变时,气体中夹裹的颗粒由于其惯性较大将继续按照原来方向运动,其中粗大的尘粒因惯性较大直接沉降到水箱内,细小尘粒有的依靠惯性和水的黏附作用被水捕集,更加细小的尘粒则跟随气体钻出液面,从而气体得到一次净化。其中,有一部分细小颗粒随气体运动并与大量的冲击水滴和泡沫混合在一起,在液池内形成一抛物线形的水滴和泡沫区域,气体在此又得到二次净化。冲击水浴式除尘技术是湿法除尘技术的一种。

实际上,不难看出冲击水浴除尘器运行所涉及的物理过程就是由尘颗粒和气体共同组成的气固两相流冲击并穿越液池的多相流动过程。在穿越液池的过程中气体与颗粒分离,从而完成气体的除尘工艺。该过程是一个复杂的

三相湍流流动过程，其中的多相流动规律及特性的研究和揭示，对冲击水浴除尘器设计和优化改造具有重要的参考价值 and 理论指导。冲击水浴除尘器作为除尘系统的第一级除尘设备，它的作用就是对含尘气体进行粗洗涤，去除含尘气体中大部分的尘粒。提高冲击水浴式除尘器除尘效率可以降低后续除尘设备的除尘负荷。但冲击水浴式洗涤净化过程中所涉及的多相流动特性、气固分离规律的研究相对较少，可查阅的文献较为匮乏。

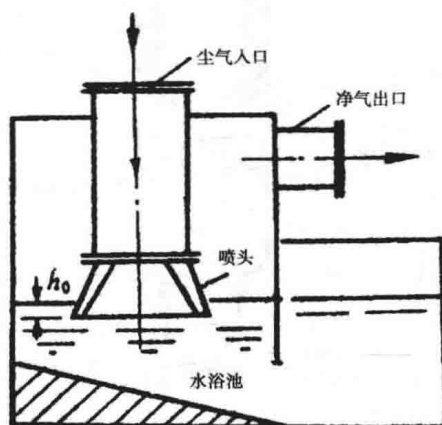


图 1-1 冲击水浴式气体洗涤净化设备示意图

1.1.2 多喷嘴对置式水煤浆气化炉中的气固两相流穿越液池过程

气固两相流穿越液池的冲击水浴式三相流动分离技术除了广泛应用在工业烟气除尘领域中之外，该类似过程也在煤气化工艺流程中得到应用。在洁净煤技术体系中，煤气化技术是其中最为重要的技术之一。而气化炉又是整个煤气化技术体系中最为关键的核心所在。在激冷式水煤浆气化技术中，气化炉主要是由气化室和激冷室组成。整个炉壳为一整体结构，内部由激冷环和托砖盘分开。激冷室内有激冷环、下降管、上升管、液池、激冷水弯管、折流挡板等内件组成。激冷水经过激冷水弯管进入激冷环，激冷环将水均布沿下降管内壁向下流动形成水膜，高温合成气夹带着熔渣出气化室后经过激冷环进入下降管，在下降管内与激冷水剧烈换热降温，同时水膜有效的隔绝了高温合成气与下降管间的直接接触，保护下降管免受高温加热而变形。下降管下端浸没在液池中的黑水中。下降管将高温合成气引至激冷室水浴，完成高温合成气的降温、饱和及除渣的任务。上升管将激冷后鼓泡上升的合成

气引到激冷室液面上部，避免气流鼓泡时对整个液面产生过大的波动。从目前国内几套 Texaco 水煤浆气化装置来看，激冷室依然存在气化炉激冷室带灰带水问题、激冷环堵塞以及反应气在激冷室内偏流等问题。

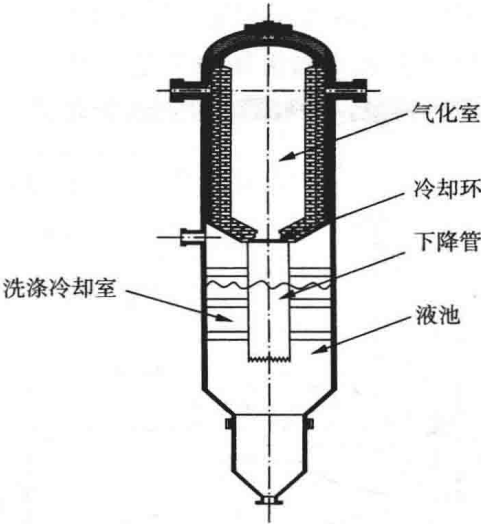


图 1-2 多喷嘴对置式水煤浆气化炉示意图

为了解决原激冷室中存在的问题，具有我国自主知识产权的多喷嘴对置式水煤浆气化炉内，采用了喷淋床与鼓泡床相结合的复合床洗涤冷却技术。其中包括冷却环、下降管、液池和内部构件等主要部分^[4-6]，如图 1-2 所示。洗涤冷却水在冷却环的作用下，一方面在下降管内壁形成降膜流动，另一方面在下降管内产生喷淋效果，形成喷淋床，高温合成气进入下降管内，首先经冷却水的喷淋作用，初步降温，同时喷淋水气化，产生增湿效果，并减轻了下下降管顶部液膜的热负荷。在下降管顶端处的液膜，最先与气化炉内的高温气体接触，由于喷淋水的存在，使高温气体在与液膜换热前就进行了初步的降温。从气化炉气化室出来的熔融态灰渣在洗涤冷却室的冷却环和下降管的激冷下，凝固为固态灰渣。经过下降管的降温和增湿，气体和灰渣经下降管进入液池，夹带着固态灰渣的合成气在穿越液池的过程中实现气液固三相的分离。其中的分离过程为：在气体与液体充分掺混接触的过程中，气体所含的绝大部分灰渣被液体捕获而进入液池中，从而实现气固分离，其中只有少数细小的灰渣跟随气体一起穿越液池；被液体捕获的灰渣在液池内完成悬浮、沉降、堆积等运动，堆积到液池底部的颗粒间隙排出池外，从而最终实

现液固分离；与此同时，气体在与液体充分接触洗涤，流经气液分离空间时，绝大部分飞溅液滴依靠自身重力作用与气体分离，以实现减少气体带水量之目的。目前针对煤气化炉洗涤冷却室内所涉及的复杂多相反应产物处理等诸多基础性科学问题还尚待进一步认识，这在一定程度上也制约了洗涤冷却技术在煤气化工业上进一步的开发和利用。

总地说来，正如 Mycock^[7]在其著作中所指出的，气体穿越液池所形成的冲击水浴式的多相分离技术在工业、环保、医疗卫生等领域存在可观的应用前景。但该过程中的气液固三相体系伴随着复杂的相间耦合作用机制、内部条件与外部条件的相互影响等，其蕴含着极其复杂而丰富的机理和规律，还远未被认识和掌握。三相体系中各种湍流流动特性、相与相之间相互作用，有的有利于强化相间分离，有的不利于强化相间分离，而这最终要取决于哪个方面因素占优，这些都需要从机理上研究清楚，掌握各个因素的影响规律。因此，不论从指导工程应用方面，还是从发展和丰富多相流理论、分离理论来说，开展气固两相流穿越液池过程中的气液固三相流动、分离行为及其规律研究都具有重要的科学意义和应用价值。

1.2 气固两相流穿越液池工业过程的基础研究与应用

在本书前一节所提到的气化炉洗涤冷却室内，由气化室产生的高温气体主要通过与冷却环和下降管中的激冷水之间强烈的热质交换来实现激冷降温^[8-10]。与此同时，气体中的熔融态灰渣在下降管内冷却相变为固态渣。随后经激冷降温的气体与固态渣一同沿着下降管进入液池，在穿越液池的过程中完成洗涤净化工艺。从而满足后续工序的需要。此外，在冲击式水浴除尘器中，从锅炉出来的高温烟气夹裹着灰渣在穿越液池的过程中完成的洗涤净化。在穿越过程中存在着复杂的多相体系，其中涉及多相流动、多相分离以及多相间直接接触热质传递、相变等多个方面的基础科学问题。可以说，对其的探索是一个非常复杂而且任务艰巨的庞大系统工程，其中涉及多方面的机理研究。针对气体夹带颗粒穿越液池过程中涉及的气液固三相流动、分离以及热质传递等多个关键性问题的研究进展进行综述，并以此为基础提出本书的主要内容。

1.2.1 穿越液池过程中气液流动特性的研究

在化工、能源以及冶金等领域,气体经浸没的管口进入液体中的现象十分普遍。根据管口的浸没方式的不同,一般可以分为管口向上的底部浸没(bottom-submerged)、管口水平布置的侧面浸没(side-submerged)和管口向下的顶部浸没(top-submerged)三种方式^[11]。其中,前两种浸没方式的应用最为广泛,因此该方面的文献报道已屡见不鲜。对于顶部浸没方式也有许多应用,但该方面的研究报道却非常少。在本书所涉及的穿越液池工艺过程中,下降管多以顶部浸没方式布置。这是一种气体从淹没在水中的喷口射入静止水介质中的运动模式。对气体穿越液池过程中的气液流动特性(如气液含率分布、气液速度分布、湍动能分布、气泡尺寸以及气液界面浓度分布等)的掌握,是进一步研究洗涤过程中的气液固三相分离特性、气体穿越液池过程中的气液间传热传质特性、气体带水问题以及保证设备稳定运行的前提和基础。

1. 气体穿越液池过程中的气液两相流动规律研究

许杰^[12]采用双平行电导探针实验测定了洗涤冷却室内气液泡状流,总结了洗涤冷却室内局部气含率、界面浓度、气泡直径的分布规律。并运用多普勒粒子动态分析仪对不同形式降膜运动进行测定,比较了旋流式、对置式洗涤冷却环的优劣。卢瑞华^[13]以洗涤冷却室的气液两相流动为研究对象,在所建立的热模实验装置上对下降管的中心温度分布进行了实验测试。并以气液鼓泡状态下的相关参数为优化依据,对洗涤冷却室内部结构进行了优化实验研究。同时还对下降管的振动进行了实验测试并运用小波分析了下降管振动特性。贺必云^[14]通过双平行电导探针对洗涤冷却室鼓泡床内气液两相泡状流中的局部气含率和气泡直径进行了测量。并对洗涤冷却室鼓泡床内的压力波动信号进行混沌分析,确定该系统的混沌特征,计算相关统计学特征量和混沌动力学特征量。吴宏涛^[15]采用双头电导探针测定了在使用三种不同内部构件条件下的气液两相流中局部气含率、界面浓度和气泡尺寸等参数。采用防水型加速度传感器测定了不同工况下的下降管振动加速度,分析了下降管的振动特性。王树太^[16]实验研究了下降管内的降膜流动,对比分析了对置式降膜和旋流式降膜的液膜流动。实验研究了分离空间对气体带水的影响,分析了气流对液珠携带的影响。付碧华^[17]采用压差传感器和高清摄像仪对下降管