

HUANJINGGONGCHENG

SHEJISHOUCE



环境工程 设计手册

(修订版)

主 编：魏先勋

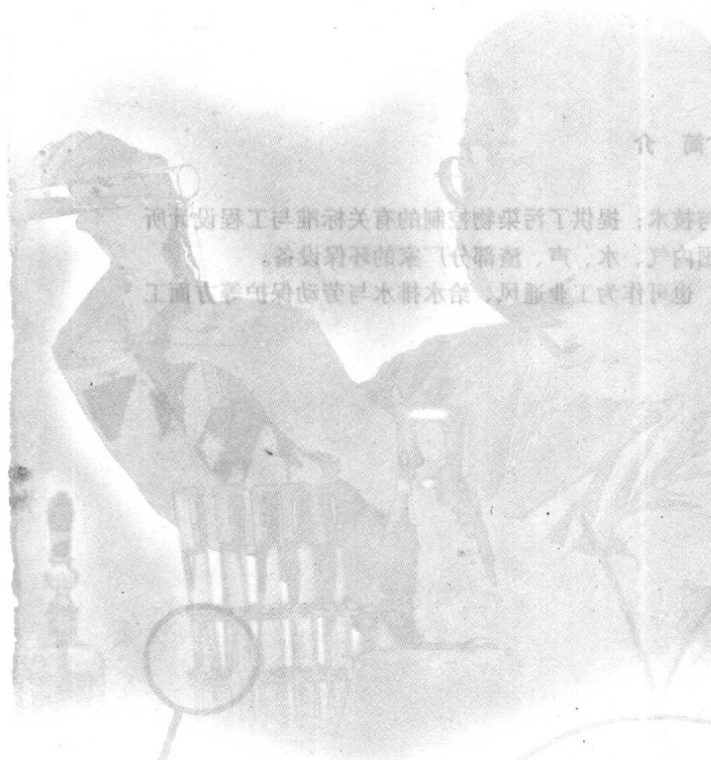
副主编：陈信常 马菊元 韩绍昌



湖 南 科 学 技 术 出 版 社

HUANJINGGONGCHENG

SHEJISHOUCE



环境工程 设计手册

(修订版)

132758/14

主 编：魏先勋
副主编：陈信常 马菊元 韩绍昌



湖 南 科 学 技 术 出 版 社

内 容 简 介

本手册阐述了环境污染治理工程设计的基本理论与技术；提供了污染物控制的有关标准与工程设计所需的基本参数、工程设计的计算方法与实例；介绍了国内气、水、声、渣部分厂家的环保设备。

本书可供环境工程设计、施工与管理等人员使用，也可作为工业通风、给水排水与劳动保护等方面工作人员与大专院校师生的参考书。

环境工程设计手册 (修订版)

主 编:魏先勋

副 主 编:陈信常 马菊元 韩绍昌

责任编辑:肖和国

出版发行:湖南科学技术出版社

社 址:长沙市湘雅路 280 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系:本社直销科 0731-4375808

印 刷:核工业中南 306 印刷厂

(印装质量问题请直接与原厂联系)

厂 址:湖南省衡阳市黄茶岭光明路 12 号

邮 编:421008

经 销:湖南省新华书店

出版日期:2002 年 7 月第 1 版第 1 次

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:61.75

插 页:5

字 数:193000

书 号:ISBN 7-5357-1020-4/X·22

定 价:120.00 元

(版权所有·翻印必究)

再版说明

《环境工程设计手册》一书自 1992 年出版以来，由于该书内容精练、综合性强、适用面广而深受广大环保工作者的欢迎，同时许多读者也给我们提出了若干宝贵的建议，在此深表谢意。

近几年来很多读者与湖南科学技术出版社和我们联系欲购此书，均未能满足要求。这是因为初版时受多方条件的限制，印刷数量有限，早已于五年前销售一空。为此，湖南科学技术出版社几年前就要求我们修订再版，但由于时间关系等诸多原因未能实施。在此深表歉意。

今天，世界已跨入了崭新的 21 世纪，人类对环境保护愈渐重视。为促进新世纪的环境保护工作，我们经多方努力，筹集资金，本着增添高新的技术内容、最新的典型实例及国家新的环境标准的宗旨，对 1992 年版《环境工程设计手册》进行了修订，将原收编的环境保护标准修订成了新标准，增加了硫氧化物脱除、城市生活污水和城市生活垃圾处理等典型实例，介绍了国内部分环保厂家生产的最新优秀产品，以更加丰富的内容和更加完美的形式与读者见面。

本手册的修订工作主要由魏先勋、刘建仁、李彩亭、李仲英、马菊元、韩绍昌、袁兴中、胡天觉等完成。其中第一编第四、第五章由刘建仁修订编写，第五章中新增的硫氧化物净化部分由李彩亭编写，其余各章由魏先勋修订编写；第二编由李仲英修订编写；第三编由马菊元修订编写；第四编由韩绍昌、袁兴中、胡天觉修订编写。

编者水平有限，不足之处，敬请各位读者批评指正。

《环境工程设计手册》修订编写组

2002 年 6 月

长沙市消声器厂



注册 商标



本厂是集科研、设计、设备制造、设备安装、售后服务为一体的生产噪声控制设备的专业厂家。拥有一批高科技人才从事噪声控制设备研究,并与同济大学声学所、中国建科院物理所等单位进行密切的技术合作。在产品研发和工艺技术方面作到精益求精,产品多次荣获部、省、市科技成果奖。

本企业主要产品

- SF 型烧结风机出口消声器
- KF 型空压机放空消声器
- KP3 型空压机进气消声器
- GGF 型高炉鼓风机放风阀消声器
- GJS 型高炉均压放散阀消声器
- CW 型除尘风机消声器
- EG(KG)型氧(空)压机隔声罩
- ϕ 2KXP 型蒸汽排放消声器
- 中、高、低压离心风机消声器
- ZR 型助燃风机消声器
- ZG 型宽频带消声器
- ZP 型片式消声器



湖南省电力局大楼热泵机组噪声治理工程

完成的典型工程实例

- 安阳钢铁公司 100t 电炉车间噪声治理
- 上海宝钢空压机和氧压机噪声治理
- 长沙神龙大酒店(五星级)风机房噪声治理
- 湖南经济电视台演播大厅空调系统消声器
- 北京香山饭店冷却塔排风机消声器

厂址:长沙市井圭路 75 号 邮编:410004

厂长:姜定国

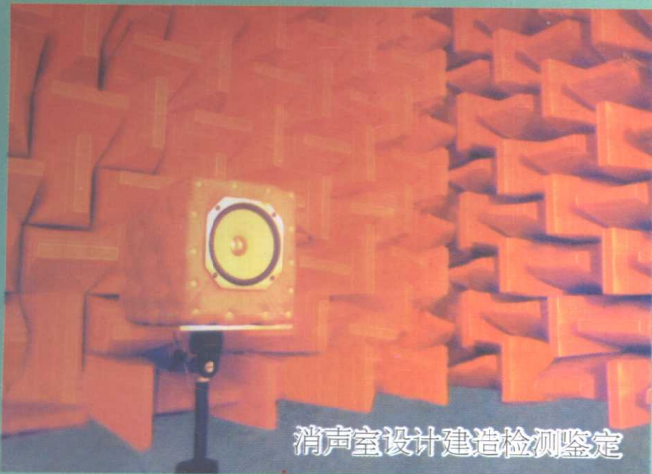
电话:0731-5583284 5583227

传真:0731-5587094

测试结束,需要全本请在线购买: www.cnroushan.com

长沙三湘空调环保有限公司

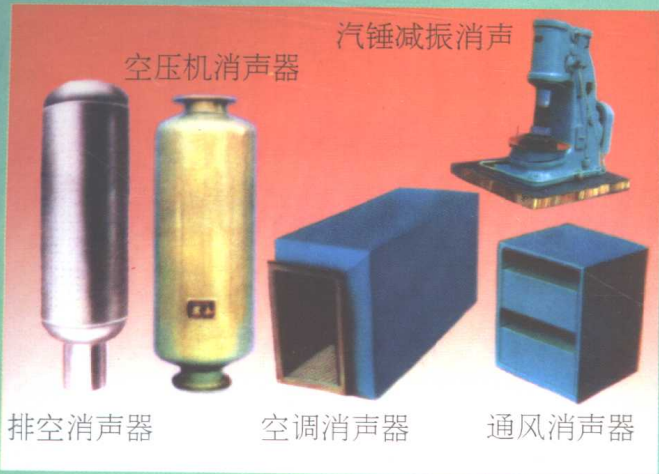
在行业领域里,别处能解决的,本公司定能解决,
别处不能解决的,本公司未必不能解决!



消声室设计建造检测鉴定



厅堂音质设计改造测试鉴定



排废系统净化减振消声装置



三湘公司总经理与环保局长在昔日火山爆发遗址考察制订湘湖生态环境规划



长沙三湘空调环保有限公司

地址:湖南大学天马新村 11 栋 201 号

邮编:410082

电话、电传:0731-8823503

总经理:马菊元

目 录

第一编 大气污染控制设计

| | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1.1 基础知识 (1) | 1.5.4 燃烧法及装置 (119) |
| 1.1.1 几个物理参数的计算 (1) | 1.5.5 催化转化法及装置 (122) |
| 1.1.2 流体力学基础知识 (4) | 1.5.6 硫氧化物的脱除 (125) |
| 1.1.3 颗粒的运动 (6) | 1.6 含尘气流的净化 (137) |
| 1.1.4 污染物与污染物的散发量 (9) | 1.6.1 净化基础知识 (137) |
| 1.2 大气污染控制与标准 (21) | 1.6.2 机械式除尘器 (145) |
| 1.2.1 控制的主要方式 (21) | 1.6.3 过滤式除尘器 (155) |
| 1.2.2 控制的措施 (22) | 1.6.4 电除尘器 (173) |
| 1.2.3 控制的标准 (23) | 1.6.5 湿式除尘器 (182) |
| 1.3 排气罩设计 (42) | 1.7 污染物的高空排放 (186) |
| 1.3.1 设计基础知识 (42) | 1.7.1 烟囱设计计算 (187) |
| 1.3.2 排气罩的类型及结构形式 (43) | 1.7.2 烟囱设计注意事项 (202) |
| 1.3.3 排气罩的设计计算 (46) | 1.8 通风机和电动机 (203) |
| 1.3.4 排气罩设计注意事项 (61) | 1.8.1 通风机 (203) |
| 1.4 净化系统的风管设计 (62) | 1.8.2 电动机 (228) |
| 1.4.1 风管设计的基础知识 (62) | 1.8.3 三角胶带传动计算及基础槽孔的确定 (238) |
| 1.4.2 风管内气流流动参数的确定 (65) | 1.9 气体净化系统的调试与运行管理 (241) |
| 1.4.3 风管的水力计算 (95) | 1.9.1 净化系统常用测试技术 (241) |
| 1.5 有害气体的净化 (107) | 1.9.2 净化系统的调试 (248) |
| 1.5.1 冷凝法及装置 (107) | 1.9.3 净化系统的运行管理 (249) |
| 1.5.2 吸收法及装置 (109) | |
| 1.5.3 吸附法及装置 (112) | |

第二编 废水治理设计

| | |
|-----------------------------|---|
| 2.1 排水管渠 (251) | 2.4.3 竖流式沉砂池 (284) |
| 2.1.1 管渠水力计算 (251) | 2.4.4 曝气沉砂池 (285) |
| 2.1.2 管道设计 (253) | 2.5 沉淀池 (286) |
| 2.1.3 管渠设计计算举例 (258) | 2.5.1 设计一般规定 (287) |
| 2.2 污水泵站 (261) | 2.5.2 平流式沉淀池 (288) |
| 2.2.1 设计一般规定 (261) | 2.5.3 竖流式沉淀池 (293) |
| 2.2.2 选泵 (261) | 2.5.4 辐流式沉淀池 (296) |
| 2.2.3 泵房布置 (267) | 2.5.5 斜板(管)沉淀池 (299) |
| 2.2.4 污水泵站计算举例 (273) | 2.6 有机废水好氧生物处理设计——活性污 泥法 (301) |
| 2.3 格栅 (277) | 2.6.1 鼓风曝气活性污泥法 (301) |
| 2.3.1 设计数据 (277) | 2.6.2 机械曝气活性污泥法 (317) |
| 2.3.2 计算举例 (278) | 2.7 污泥脱水 (326) |
| 2.3.3 格栅清污机 (280) | 2.7.1 污泥干化场 (326) |
| 2.4 沉砂池 (280) | 2.7.2 污泥机械脱水 (326) |
| 2.4.1 设计一般规定 (281) | 2.7.3 污泥烘干与焚化 (331) |
| 2.4.2 平流式沉砂池 (281) | |

| | | | |
|--------------------------------|-------|---|-------|
| 2.7.4 城市污水处理实例 | (331) | 2.17.3 离子交换设备 | (438) |
| 2.8 工业废水预处理方法 | (335) | 2.17.4 离子交换器设计举例 | (440) |
| 2.8.1 细固体杂质的去除 | (335) | 2.18 膜分离法 | (442) |
| 2.8.2 均化 | (339) | 2.18.1 电渗析 | (442) |
| 2.9 气浮法 | (343) | 2.18.2 反渗透 | (451) |
| 2.9.1 充气气浮 | (343) | 2.18.3 超过滤 | (459) |
| 2.9.2 加压溶气气浮 | (347) | 2.19 生物膜法 | (461) |
| 2.10 废水中和处理法 | (356) | 2.19.1 高负荷生物滤池 | (461) |
| 2.10.1 常用中和方法的比较及中和法常用药剂 | (356) | 2.19.2 塔式生物滤池 | (465) |
| 2.10.2 酸性废水中和处理 | (358) | 2.19.3 淹没式生物滤池(接触氧化法) | (467) |
| 2.10.3 碱性废水的中和处理 | (365) | 2.19.4 生物流化床 | (471) |
| 2.10.4 中和处理法应用举例 | (366) | 2.20 活性污泥法的新进展 | (479) |
| 2.11 吹脱、汽提法 | (368) | 2.20.1 纯氧活性污泥法 | (479) |
| 2.11.1 吹脱法 | (368) | 2.20.2 间歇活性污泥法 | (481) |
| 2.11.2 汽提法 | (376) | 2.20.3 投料活性污泥法 | (482) |
| 2.12 萃取法 | (382) | 2.20.4 深井曝气法 | (484) |
| 2.12.1 萃取剂的选择与再生 | (382) | 2.20.5 A-B 活性污泥法 | (486) |
| 2.12.2 萃取工艺及计算 | (383) | 2.20.6 氧化沟 | (488) |
| 2.12.3 萃取设备及其设计计算 | (385) | 2.20.7 一体化生活污水净化装置 | (491) |
| 2.12.4 萃取法应用举例 | (391) | 2.21 有机废水厌氧生物处理法 | (493) |
| 2.13 化学沉淀法 | (392) | 2.21.1 普通消化池 | (493) |
| 2.13.1 基本原理 | (392) | 2.21.2 上流式厌氧污泥床(UASB) | (497) |
| 2.13.2 主要设备及设计计算 | (392) | 2.21.3 厌氧流化床(UFB) | (499) |
| 2.13.3 氢氧化物沉淀法 | (396) | 2.22 水质标准 | (507) |
| 2.13.4 硫化物沉淀法 | (398) | 2.22.1 生活饮用水卫生标准(GB 5749-85) | (507) |
| 2.13.5 铁氧体法及其他化学沉淀法 | (399) | 2.22.2 农村生活饮用水量卫生标准(GB 11730-89) | (512) |
| 2.14 氧化法 | (402) | 2.22.3 生活饮用水水源水质标准(CJ 3020-93) | (513) |
| 2.14.1 氧化剂的选择及常用氧化剂 | (403) | 2.22.4 城市用水分类标准(CJ/T 3070-1999) | (513) |
| 2.14.2 化学氧化法 | (403) | 2.22.5 地下水质量标准(GB/T 14848-93) | (517) |
| 2.14.3 臭氧氧化 | (406) | 2.22.6 渔业水质标准(GB 11607-89)及渔业水质分析方法 | (518) |
| 2.14.4 电化学氧化法 | (411) | 2.22.7 农田灌溉水质标准(GB 5084-92) | (519) |
| 2.15 还原法 | (412) | 2.22.8 景观娱乐用水水质标准(GB 12941-91) | (521) |
| 2.15.1 常用的还原剂 | (412) | 2.22.9 污水综合排放标准(GB 8978-1996) | (522) |
| 2.15.2 药剂还原法 | (412) | 2.22.10 污水排入城市下水道水质标准(CJ 3082-1999) | (530) |
| 2.15.3 电解还原法 | (414) | 2.22.11 城市污水处理厂污水排放标准(CJ 3025-93) | (531) |
| 2.15.4 主要设备及设计计算 | (415) | 2.22.12 造纸工业水污染物排放标准(GWPB 2-1999) | (531) |
| 2.16 活性炭吸附法 | (419) | 2.22.13 合成氨工业水污染物排放标准 | (531) |
| 2.16.1 活性炭吸附法的基本原理 | (419) | | |
| 2.16.2 活性炭的规格、性能 | (420) | | |
| 2.16.3 活性炭吸附法在污水处理中的应用 | (420) | | |
| 2.16.4 吸附装置及其操作方式 | (422) | | |
| 2.16.5 吸附装置的设计 | (425) | | |
| 2.16.6 活性炭的再生 | (428) | | |
| 2.17 离子交换法 | (430) | | |
| 2.17.1 离子交换法处理工业废水的特点 | (430) | | |
| 2.17.2 离子交换法在处理工业废水中的应用 | (432) | | |

| | | | | | |
|---------|--|-------|---------|---|-------|
| | (GWPB 4-1999) | (532) | 2.22.20 | 纺织染整工业水污染物排放标准 (GB 4287-92) | (537) |
| 2.22.14 | 船舶污染物排放标准 (GB 3552-83) | (532) | 2.22.21 | 钢铁工业水污染物排放标准 (GB 13456-92) | (539) |
| 2.22.15 | 梯恩梯工业水污染物排放标准 (GB 4274-84) | (533) | 2.22.22 | 肉类加工工业水污染物排放标准 (GB 13457-92) | (541) |
| 2.22.16 | 黑索金工业水污染物排放标准 (GB 4275-84) | (534) | 2.22.23 | 兵器工业污染物排放标准·火炸药 (GB 14470.1-93) | (543) |
| 2.22.17 | 二硝基重氮酚工业水污染物排放标准 (GB 4278-84) | (535) | 2.22.24 | 兵器工业水污染物排放标准·火工品 (GB 14470.2-93) | (544) |
| 2.22.18 | 叠氮化铅、三硝基间苯二酚铅、D·S共 晶工业水污染物排放标准 (GB 4279- 84) | (536) | 2.22.25 | 兵器工业水污染物排放标准·弹药装 药 (GB 14470.3-93) | (546) |
| 2.22.19 | 普钙工业水污染物排放标准 (GB 4917-85) | (537) | 2.22.26 | 苛性钠、聚氯乙烯工业水污染物排 放标准 (GB 15581-95) | (547) |

第三编 噪声控制设计

| | | | | | |
|----------------------------------|-------|------------------------------|------------------------|-------|-------|
| 3.1 噪声的量度评价及测量方法 | (551) | 3.3.8 | 隔声门的结构与计 | | (622) |
| 3.1.1 噪声的量度及其评价 | (551) | 3.3.9 | 隔声窗的结构与计 | | (627) |
| 3.1.2 噪声允许标准 | (555) | 3.3.10 | 观察隔声窗和通风隔声窗 | (629) | |
| 3.1.3 噪声测量常用仪表 | (561) | 3.3.11 | XB型隔声消声百叶窗 | (631) | |
| 3.1.4 标准声源 | (577) | 3.3.12 | 隔声罩 | (631) | |
| 3.1.5 声学测试环境 | (578) | 3.3.13 | 隔声室 | (635) | |
| 3.1.6 消声室与吸声尖劈 | (580) | 3.3.14 | 高层建筑轻质隔墙板 | (636) | |
| 3.1.7 工业噪声测量方法 | (581) | 3.4 消声降噪 | | (647) | |
| 3.1.8 工业噪声测量项目 | (583) | 3.4.1 | 消声器的种类和评价 | (647) | |
| 3.1.9 环境噪声测量 | (584) | 3.4.2 | 阻性消声器 | (650) | |
| 3.2 吸声降噪 | (585) | 3.4.3 | 扩张式消声器的设计 | (653) | |
| 3.2.1 吸声原理与吸声减噪计算 | (585) | 3.4.4 | 共振消声器 | (657) | |
| 3.2.2 吸声材料的要求与分类 | (587) | 3.4.5 | 微穿孔板消声器 | (660) | |
| 3.2.3 多孔吸声材料 | (588) | 3.4.6 | 节流减压、小孔喷注消声器 | (665) | |
| 3.2.4 聚氨基甲酸酯等高分子材料和膜状材料 | (594) | 3.4.7 | 缓冲式消声器 | (667) | |
| 3.2.5 影响吸声性能的因素 | (596) | 3.4.8 | 阻抗复合消声器 | (668) | |
| 3.2.6 薄板振动吸声结构 | (597) | 3.5 常用机电设备适配消声器 | | (669) | |
| 3.2.7 亥姆霍兹共振吸声器 | (599) | 3.5.1 | 消声器的选用与安装 | (669) | |
| 3.2.8 穿孔板共振吸声结构 | (599) | 3.5.2 | 锅炉噪声及其控制 | (670) | |
| 3.2.9 微穿孔板吸声结构 | (601) | 3.5.3 | 燃油燃气锅炉房噪声及其降低方法 | (673) | |
| 3.2.10 穿孔板、微穿孔板专业生产 | (603) | 3.5.4 | D系列罗茨鼓风机消声器及消声管道 | (675) | |
| 3.2.11 吸声体 | (604) | 3.5.5 | 内燃机噪声与适配消声器 | (678) | |
| 3.2.12 JD型铝合金吊顶 | (606) | 3.5.6 | 空压机噪声及其适配消声器 | (680) | |
| 3.2.13 吸声屏 | (607) | 3.5.7 | 中低压离心风机消声器 | (685) | |
| 3.2.14 吸声砖 | (608) | 3.5.8 | 高中压离心风机适配消声器 | (688) | |
| 3.3 隔声降噪 | (609) | 3.5.9 | 轴流风机消声器 | (690) | |
| 3.3.1 隔声性能的评价 | (610) | 3.5.10 | 电机噪声及消声器 | (691) | |
| 3.3.2 单层结构的隔声性能 | (611) | 3.5.11 | 排汽(气)放空消声器 | (695) | |
| 3.3.3 双层隔声结构 | (615) | 3.5.12 | QJ型汽车尾气净化消声器 | (702) | |
| 3.3.4 复合隔声结构 | (616) | 3.5.13 | GZF型电站锅炉送风机消声器 | (703) | |
| 3.3.5 楼板和屋顶结构与隔声 | (619) | 3.5.14 | 高炉相关设备适配消声器 | (703) | |
| 3.3.6 孔、洞、缝的透声 | (620) | 3.5.15 | 空气锤噪声及其适配消声器 | (707) | |
| 3.3.7 室内隔声量计算 | (621) | 3.5.16 | 通风空调消声器 | (708) | |
| | | 3.5.17 | ZDS型隧道通风组合式消声器 | (711) | |

| | | | |
|-----------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| 3.5.18 ZDJ型垂直风井组合式消声器 | (711) | 3.6.8 管道隔振 | (729) |
| 3.6 隔振降噪 | (712) | 3.6.9 阻尼减振降噪 | (734) |
| 3.6.1 振动的产生和量度 | (712) | 3.7 常用低噪声机电设备 | (736) |
| 3.6.2 振动的危害和允许标准 | (714) | 3.7.1 低噪声空气、气体压缩机 | (736) |
| 3.6.3 隔振原理 | (718) | 3.7.2 低噪声低振动复合阻尼钢板及其部分制品 | (737) |
| 3.6.4 隔振弹性支承设计 | (720) | 3.7.3 风机噪声降低途径 | (738) |
| 3.6.5 金属弹簧隔振器 | (723) | 3.7.4 电机噪声降低途径 | (743) |
| 3.6.6 橡胶隔振器 | (725) | | |
| 3.6.7 橡胶隔振垫 | (727) | | |

第四编 固体废物处理设计及其他

| | | | |
|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| 4.1 固体废物的基础知识 | (747) | 4.4.1 黑色冶金工业固体废物 | (780) |
| 4.1.1 固体废物的概念 | (747) | 4.4.2 有色冶金渣 | (805) |
| 4.1.2 固体废物的来源及分类 | (747) | 4.4.3 电力工业固体废物 | (810) |
| 4.1.3 固体废物的污染及其危害 | (749) | 4.4.4 煤矸石的利用 | (823) |
| 4.1.4 控制固体废物污染的技术政策 | (750) | 4.4.5 化工渣 | (831) |
| 4.2 固体废物处理技术与设备 | (751) | 4.4.6 石油化学工业固体废物 | (837) |
| 4.2.1 固体废物的压实处理 | (751) | 4.4.7 工业放射性固体废物 | (843) |
| 4.2.2 固体废物的破碎 | (753) | 4.4.8 水处理污泥 | (852) |
| 4.2.3 固体废物分选 | (759) | 4.5 城市生活垃圾的处理与处置 | (872) |
| 4.2.4 固体废物固化 | (769) | 4.5.1 城市垃圾的收集与运输 | (872) |
| 4.3 固体废物的最终处置 | (772) | 4.5.2 堆肥处理工程 | (877) |
| 4.3.1 土地填埋 | (772) | 4.5.3 城市生活垃圾热解 | (899) |
| 4.3.2 深井灌注 | (779) | 4.5.4 城市生活垃圾焚烧技术 | (902) |
| 4.4 工业固体废物的处理与利用 | (780) | | |

第五编 工程中的常用材料与防腐

| | | | |
|---------------------------|-------|-----------------------|-------|
| 5.1 工程中的常用材料 | (936) | 5.3.1 涂刷防腐蚀涂料 | (955) |
| 5.1.1 金属材料 | (936) | 5.3.2 喷镀防腐蚀材料 | (956) |
| 5.1.2 非金属材料 | (946) | 5.3.3 金属电镀与化学镀 | (957) |
| 5.2 材料的耐蚀性能 | (952) | 5.3.4 非金属材料衬里 | (958) |
| 5.2.1 金属材料的耐蚀性能 | (952) | 5.3.5 使用复合材料 | (959) |
| 5.2.2 非金属材料的耐蚀性能 | (953) | 5.3.6 选用耐腐蚀材料 | (961) |
| 5.3 常用的防腐蚀措施 | (955) | 5.3.7 推荐使用非金属材料 | (963) |

附 录

| | | | |
|----------------------|-------|----------------------|-------|
| 附录一 单位换算 | (964) | 附录六 液体的物理特性 | (972) |
| 附录二 空气的物理参数 | (969) | 附录七 某些固体的热物理特性 | (974) |
| 附录三 气体的物理特性 | (970) | 附录八 常用的物理常数值 | (976) |
| 附录四 饱和水蒸气的物理参数 | (971) | 附录九 原子量表 | (976) |
| 附录五 水的物理参数 | (971) | | |

第一编 大气污染控制设计

1.1 基础知识

1.1.1 几个物理参数的计算

一、气体的湿度

(一) 绝对湿度 ρ_w

ρ_w 为湿气体中含有的水蒸气质量与湿气体体积的比值, 即在水蒸气分压力下的水蒸气密度, 按式 1.1.1 计算。

$$\rho_w = \frac{p_w}{R_w T} \quad (1.1.1)$$

式中: ρ_w 为绝对湿度, kg/m^3 (湿气体); p_w 为湿气体中水蒸气分压力, Pa; R_w 为水蒸气的气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为湿气体的温度, K。

(二) 相对湿度 φ

φ 为湿气体的绝对湿度与同温度下的饱和绝对湿度比值的百分数, 亦称饱和度, 如式 1.1.2 所示。式中 φ 愈小, 水蒸气距离饱和状态愈远, 湿气体吸收水分的能力愈大。

$$\varphi = \frac{\rho_w}{\rho_v} = \frac{p_w}{p_v} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

式中: φ ——相对湿度, %; ρ_v ——饱和绝对湿度, kg/m^3 (湿气体); p_v ——饱和水蒸气压力, Pa。

(三) 含湿量 d

d 为气体中所含水蒸气的质量 m_w 与干气体质量 m_d 的比值; d_0 为湿气体中所含水蒸气的质量 m_w 与所含干气体在标准状态下的体积 V_{Nd} 的比值。

$$d = 0.622 \varphi p_v / (p - \varphi p_v) \quad (1.1.3)$$

$$d_0 = 0.804 \varphi p_v / (p - \varphi p_v) \quad (1.1.4)$$

$$d \text{ 与 } d_0 \text{ 的关系为 } d = d_0 \rho_{Nd} \quad (1.1.5)$$

式中: d ——含湿量, kg/kg 干空气; p ——大气压, Pa; ρ_{Nd} ——标准状态下 (0°C , 101.325kPa) 干气体的密度。

(四) 水蒸气的体积分数 γ_w

若以湿气体中水蒸气所占体积分数 γ_w 或摩尔分数 χ_w 表示气体的湿度时, 则对任一种湿气体都有:

$$\gamma_w = \chi_w = \frac{d_0}{0.804 + d_0} = \frac{d \rho_{Nd}}{0.804 + d \rho_{Nd}} \quad (1.1.6)$$

或 $d_0 = 0.804 \chi_w / (1 - \chi_w) \quad (1.1.6a)$

$$d = 0.804 \chi_w / [(1 - \chi_w) \cdot \rho_{Nd}] \quad (1.1.6b)$$

以上, d_0 单位为: kg/m^3 (干气体), d 单位为: kg/kg (干气体)

二、黏度的计算

(一) 黏度的定义和单位

在作相对运动的流体中, 单位面积的剪应力与速度梯度的比值, 称为流体的动力黏度或黏度, 亦称绝对黏度; 动力黏度 μ 与流体密度 ρ 之比称为运动黏度 ν 。

$$\mu = \frac{F}{\frac{du}{dz}} \quad (1.1.7)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.1.8)$$

式中: F ——单位面积上的剪应力, N/m^2 ; $\frac{du}{dz}$ ——速度梯度, $1/\text{s}$ 。

黏度单位在工程中常用泊 (P)、厘泊 (cP) 或微泊 (μP), 它们之间的换算关系为

$$1\text{P} = 10^2\text{cP} = 10^6\mu\text{P} = 0.1\text{Pa}\cdot\text{s} \quad (1.1.9)$$

(二) 气体黏度与温度的关系

气体黏度随气体温度升高而增大, 其关系多为经验公式。在常压下气体黏度与温度之间的关系可用下列幂函数表示:

$$\mu_T = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^m \quad (1.1.10)$$

表 1.1.1 部分气体的经验指数

| 物 质 | 化学式 | μ_0 (Pa·s) | m | 物 质 | 化学式 | μ_0 (Pa·s) | m |
|-------|-----------------------------------|------------------------|-------|------|-----------------------------------|------------------------|-------|
| 氮 气 | N_2 | 1.667×10^{-5} | 0.68 | 氙 气 | Xe | 2.108×10^{-5} | 0.89 |
| 氨 | NH_3 | 0.936×10^{-5} | 1.06 | 甲 烷 | CH_4 | 1.040×10^{-5} | 0.76 |
| 戊 醇 | $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$ | 0.620×10^{-5} | 0.96 | 甲 醇 | CH_3O | 0.884×10^{-5} | 1.04 |
| 氩 | Ar | 2.118×10^{-5} | 0.72 | 氖 气 | Ne | 2.971×10^{-5} | 0.65 |
| 丙 酮 | $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ | 0.686×10^{-5} | 1.03 | 一氧化碳 | CO | 1.657×10^{-5} | 0.695 |
| 苯 | C_6H_6 | 0.698×10^{-5} | 1.00 | 辛 烷 | C_8H_{18} | 0.483×10^{-5} | 1.02 |
| 溴 甲 烷 | CH_3Br | 1.226×10^{-5} | 1.05 | 戊 烷 | C_5H_{12} | 0.635×10^{-5} | 0.99 |
| 丁 烷 | C_4H_{10} | 0.635×10^{-5} | 0.97 | 丙 烷 | C_3H_8 | 0.750×10^{-5} | 0.92 |
| 丁 醇 | $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ | 0.660×10^{-5} | 0.98 | 丙 醇 | $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ | 0.717×10^{-5} | 1.00 |
| 氢 | H_2 | 0.836×10^{-5} | 0.678 | 甲 苯 | C_7H_8 | 0.661×10^{-5} | 0.89 |
| 水蒸气 | H_2O | 0.824×10^{-5} | 1.20 | 氯化甲烷 | CH_3Cl | 0.981×10^{-5} | 1.02 |
| 空 气 | - | 1.716×10^{-5} | 0.683 | 氯 仿 | CHCl_3 | 0.962×10^{-5} | 0.94 |
| 己 烷 | C_6H_{14} | 0.590×10^{-5} | 1.03 | 环己烷 | C_6H_{12} | 0.638×10^{-5} | 0.907 |
| 氦 气 | He | 1.844×10^{-5} | 0.68 | 四氯化碳 | CCl_4 | 0.924×10^{-5} | 0.92 |
| 庚 烷 | C_7H_{16} | 0.525×10^{-5} | 1.05 | 乙 烷 | C_2H_6 | 0.877×10^{-5} | 0.90 |
| 二氧化硫 | SO_2 | 1.206×10^{-5} | 0.912 | 乙酸乙酯 | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ | 0.691×10^{-5} | 1.01 |
| 二氧化碳 | CO_2 | 1.402×10^{-5} | 0.82 | 乙 醇 | $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ | 0.784×10^{-5} | 1.02 |
| 氧 气 | O_2 | 1.942×10^{-5} | 0.692 | 乙 醚 | $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ | 0.685×10^{-5} | 0.97 |

式中: μ_T ——温度 T (K) 时气体的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; μ_0 ——温度 $T_0 = 273.15\text{K}$ 时的气体黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; m ——经验指数, 可从表 1.1.1 查到。

(三) 混合气体的黏度

低压混合气体的黏度计算式多为经验公式, 式 1.1.11 为平方根法公式。

$$\mu = \frac{\sum \chi_i \mu_i M_i^{0.5}}{\sum \chi_i M_i^{0.5}} \quad (1.1.11)$$

式中： χ_i 为混合气体中 i 组分的摩尔分数； μ_i 为混合气体中 i 组分的黏度，Pa·s； M_i 为混合气体中 i 组分的分子量。

三、气体密度的计算

(一) 标准状态下气体密度的计算

任一种气体标准状态下的密度 ρ_N 可由其摩尔质量 M 按下式确定：

$$\rho_N = M/22.414 \quad (1.1.12)$$

混合气体标准状态下的密度 ρ_N 可按式 1.1.13 计算：

$$\rho_N = \sum_{i=1}^n \rho_{Ni} \cdot \chi_i \quad (1.1.13)$$

式中： ρ_{Ni} ——混合气体中 i 组分气体在标准状态下的密度，kg/Nm³； χ_i ——混合气体中 i 组分气体的摩尔分数或体积分。

(二) 不同状态的气体密度

由于气体的密度具有随温度、湿度和压力变化的性质，所以在空气污染控制工程中，常用式 1.1.14 计算不同状态下的气体密度。

$$\rho = \rho_{Ni} \frac{p - \varphi p_v}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T} \cdot \frac{Z_N}{Z} + \varphi p_v \quad (1.1.14)$$

式中： ρ 为工况密度，kg/m³； p 为工况压力，Pa； Z 为工况状态下的压缩因子； ρ_{Ni} 为标准状态下干气体的密度，kg/Nm³； p_N 为标准压力，Pa； Z_N 为标准状态下的压缩因子； p_v 为干空气分压力，Pa； φ 为相对湿度，%。

四、气体体积的换算

在环境工程设计中，常有将工况气体体积换算成标态体积或其相反的情况。任一状态下任一种气体的体积换算可用式 1.1.15 计算。

$$V = 371 V_{Ni} \frac{T}{p - \varphi p_v} = 371 V_{Ni} \frac{1}{1 - \chi_w} \cdot \frac{T}{p} = 371 V_{Ni} \left(1 + \frac{d_0}{0.804}\right) \frac{T}{p} = 371 V_{Ni} \left(1 + \frac{\rho_{Ni} \cdot d}{0.804}\right) \cdot \frac{T}{p} \quad (1.1.15)$$

因干气体的 $\varphi=0$ ， $\chi_w=0$ ， $d_0=0$ ， $d=0$ ，则式 1.1.15 式为：

$$V = V_N \frac{p_N T}{p T_N} = 371 V_N \frac{T}{p} \quad (1.1.16)$$

式中： V 为工况体积，m³； V_{Ni} 为标态体积，m³； p 为绝对大气压，Pa； T 为工况温度，K； p_v 为干空气分压力，Pa； d_0 为含湿量，kg/kg 干空气； ρ_{Ni} 为标态密度，kg/Nm³； χ_w 为水蒸气摩尔分数； φ 为相对湿度，%。

[例] 某锅炉烟气成分（体积百分数）为：CO：65%；CO₂：18%；N₂：16.5%；O₂：4.5%，经湿式除尘后达到饱和状态，其温度为 70℃，饱和含湿量 $d_w=0.164$ kg/Nm³，试求烟气的黏度。

[解] ①查分子量：H₂O=18；CO=28；CO₂=44；N₂=28；O₂=32。

$$\text{②水蒸气的摩尔分数 } \chi_w = \frac{d_w}{0.804 + d_w} = \frac{0.164}{0.804 + 0.164} = 0.169$$

$$\text{③干烟气的摩尔分数 } \chi_d = 1 - \chi_w = 1 - 0.169 = 0.831$$

④湿烟气中各组分的摩尔分数

$$\chi_{CO} = 0.831 \times 0.65 = 0.540 \quad \chi_{CO_2} = 0.831 \times 0.18 = 0.150$$

$$\chi_{N_2} = 0.831 \times 0.165 = 0.137 \quad \chi_{O_2} = 0.831 \times 0.045 = 0.037$$

⑤由表 1.1.1 查标准状态下物质的黏度 μ_0 与 m 值

| | CO | CO ₂ | N ₂ | O ₂ | H ₂ O |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| μ_0 (Pa·s) | 1.657×10^{-5} | 1.402×10^{-5} | 1.667×10^{-5} | 1.942×10^{-5} | 0.824×10^{-5} |
| m | 0.695 | 0.82 | 0.68 | 0.692 | 1.20 |

⑥由式 1.1.10 计算烟气各组分的黏度

$$\begin{aligned} \mu_{\text{H}_2\text{O}} &= 0.824 \times 10^{-5} \left(\frac{343}{273}\right)^{1.2} = 1.084 \times 10^{-5} & \mu_{\text{CO}} &= 1.657 \times 10^{-5} \left(\frac{343}{273}\right)^{0.695} = 1.942 \times 10^{-5} \\ \mu_{\text{CO}_2} &= 1.402 \times 10^{-5} \left(\frac{343}{273}\right)^{0.82} = 1.691 \times 10^{-5} & \mu_{\text{N}_2} &= 1.667 \times 10^{-5} \left(\frac{343}{273}\right)^{0.68} = 1.947 \times 10^{-5} \\ \mu_{\text{O}_2} &= 1.942 \times 10^{-5} \left(\frac{343}{273}\right)^{0.692} = 2.274 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

⑦由式 1.1.11 计算烟气黏度

$$\begin{aligned} \mu &= 0.169 \times 1.084 \times 10^{-5} \times 18^{0.5} + 0.54 \times 1.942 \times 10^{-5} \times 28^{0.5} + 0.15 \times 1.691 \times 10^{-5} \times 44^{0.5} \\ &\quad + 0.137 \times 1.947 \times 10^{-5} \times 28^{0.5} + 0.037 \times 2.274 \times 10^{-5} \times 32^{0.5} / 0.169 \times 18^{0.5} + 0.54 \times \\ &\quad 28^{0.5} + 0.15 \times 44^{0.5} + 0.137 \times 28^{0.5} + 0.037 \times 32^{0.5} = 1.798 \times 10^{-5} \text{ (Pa·s)} \end{aligned}$$

1.1.2 流体力学基础知识

一、连续性原理、连续性方程式

(一) 连续性原理

对于封闭流管(图 1.1.1)中流体连续恒定流动,且流体为不可压缩时,任意选取的过流断面 1、2 之间空间体积不变,依据质量守恒定律,则进入断面 1 与流出断面 2 的质量流量是相等的,故体积流量 Q_1 与 Q_2 亦相等,即:

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad (1.1.17)$$

或

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = Av$$

式中: Q 为封闭流管总流的体积流量, m^3/s ; Q_1 、 Q_2 分别为断面 1、2 处的体积流量, m^3/s ; A 为总流的过流断面面积, m^2 ; A_1 、 A_2 分别为断面 1、2 处的过流断面面积, m^2 ; v 为总流过流断面的平均流速, m/s ; v_1 、 v_2 分别为断面 1、2 处的平均流速, m/s 。

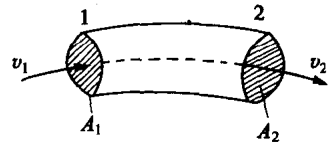


图 1.1.1

对于可压缩流体,密度 ρ 发生了变化,关系式应为:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 = \rho Av \quad (1.1.18)$$

式中: ρ ——总流流体的密度, kg/m^3 ; ρ_1 、 ρ_2 ——分别为断面 1、2 处流体的密度, kg/m^3 。

(二) 连续性方程式

取单元体 dx 、 dy 、 dz (图 1.1.2), 速度 u 的分量为 u_x 、 u_y 、 u_z , 密度为 ρ , 时间为 t 。

不可压缩流体的连续方程式为:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1.1.19)$$

可压缩流体的连续方程式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} = 0 \quad (1.1.20)$$

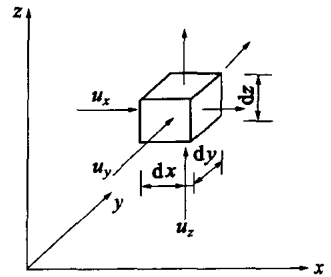


图 1.1.2

二、流体运动方程式

根据动量守恒定律推出:

$$\left. \begin{aligned} u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + X \\ u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_y}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + Y \\ u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + Z \end{aligned} \right\} \quad (1.1.21)$$

式中： u_x 、 u_y 、 u_z 为沿 x 、 y 、 z 轴方向流速，m/s； p 为作用在单元体分面 1 上的压力，Pa； X 、 Y 、 Z 为作用在单元体上的其他外力在 x 、 y 、 z 轴方向上的分量； ρ 为流体的密度， kg/m^3 ； ν 为流体的运动黏度， m^2/s 。

三、能量方程式

表示随着流体流动而产生的热传递的一般表达式：

$$u_x \frac{\partial t}{\partial x} + u_y \frac{\partial t}{\partial y} + u_z \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1.1.22)$$

式中： u_x 、 u_y 、 u_z 为单元体沿 x 、 y 、 z 方向的流速，m/s； t 为流体的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； α 为流体的热扩散率。

四、伯努利定律

伯努利定律是表示流体运动中能量守恒定律的定理。当理想流体（无黏滞性，不可压缩的）进行恒定流动时（图 1.1.3），在断面 1 处的总能量恒等于流体在断面 2 处所有的总能量，即流管内的任意一点，其全压不变，表达式为

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 + \rho g z_2 \quad (1.1.23)$$

式中： p_1 、 p_2 ——断面 1、2 处的压强，Pa；

v_1 、 v_2 ——断面 1、2 处的平均流速，m/s；

z_1 、 z_2 ——断面 1、2 中心相对于基准面的高度，m；

ρ ——流体的密度， kg/m^3 ； g ——重力加速度， m/s^2 。

当流体为空气时，因 ρ 很小， z_1 与 z_2 之差可以忽略不计，则有

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = \text{常数} \quad (1.1.24)$$

实际上，空气流动时会由于摩擦而产生能量损失，则有

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 + \Delta p_{1-2} \quad (1.1.25)$$

式中： Δp_{1-2} ——流体流动时，从断面 1 至断面 2 之间的压力损失。

五、托理拆利定理

流体自容器下部孔口流出（图 1.1.4）时，流出速度与水位差的平方根成正比。即

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (1.1.26)$$

式中： v_2 ——孔口流出速度，m/s； h ——容器水面与孔口之间的水位差，m。

六、管内摩擦定律

（一）哈根-泊肃叶定律

表示流体在光滑管内为层流（雷诺数 $Re < 2320$ ）流动时的流量 Q 、管径 d 、管长 l 、流体的动力黏度 μ 与压强损失之间关系的定律。

$$\Delta p = \frac{128\mu l}{\pi d^4} Q = \frac{32\mu l}{d^2} v \quad (1.1.27)$$

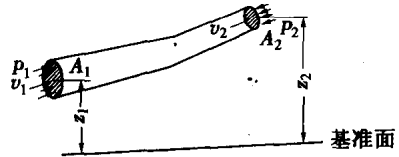


图 1.1.3

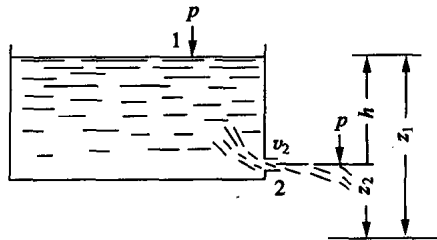


图 1.1.4

在层流情况下 ($Re < 2320$) 的摩擦阻力系数 λ 值仅取决于雷诺数 Re 值。

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1.1.28)$$

(二) 卡尔曼-尼古拉兹式

卡尔曼-尼古拉兹式表明, 当 $Re > 900d/k$ 时, λ 与 Re 无关, 只与粗糙度 k/d 有关。

$$\lambda = \frac{1}{\left(1.74 - 2 \lg \frac{2k}{d}\right)^2} \quad (1.1.29)$$

式中: k ——绝对粗糙度, mm; d ——管道内径, mm; k/d ——相对粗糙度。

(三) 柯尔布鲁克式

柯尔布鲁克式表达了在过渡区 ($Re = 2000 \sim 4000$) 摩擦阻力系数 λ 与雷诺数 Re 及相对粗糙度 k/d 之间的关系。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (1.1.30)$$

(四) 莫迪线图

为了简化计算, 莫迪以柯尔布鲁克公式为基础, 综合前人试验结果, 绘制了表示整个层流和紊流区内 $Re \cdot k/d$ 与 λ 之间的对应关系图 (图 1.1.5)。图中可根据 Re 与 k/d 直接查出 λ 值。

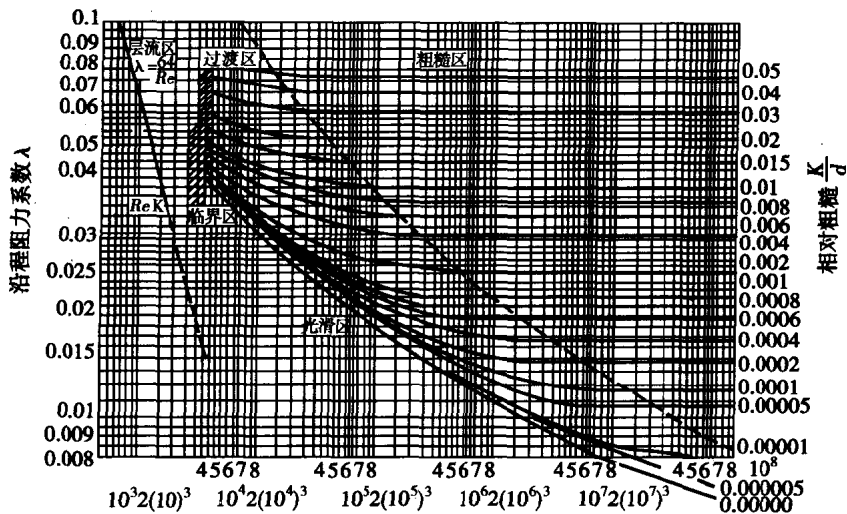


图 1.1.5 莫迪图

1.1.3 颗粒的运动

颗粒的运动与颗粒的动量、惯量及作用其上的重力和其他体积力等有关, 在流体中运动的颗粒, 由于与围绕颗粒的流体之间产生相对运动, 受有迎面阻力的作用等, 导致了颗粒错综复杂的运动。

一、布朗运动

布朗运动是指悬浮在流体 (液体或气体) 中的颗粒与原子或分子碰撞而做的无规则运动。一个典型的布朗颗粒 ($d_p < 0.5 \mu m$), 每秒钟可发生 10^{21} 次碰撞, 产生一种很不规则的轨迹 (图 1.1.6)。

做布朗运动的颗粒, 在一给定的运动时间内, 位移的均方值 $\overline{\Delta X^2}$ 为:

$$\overline{\Delta X^2} = \frac{2RTt}{3N\pi\mu d} \quad (1.1.31)$$

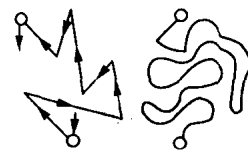


图 1.1.6

式中： d ——球形颗粒的直径； R ——气体常数； μ ——介质的黏度； N ——阿伏伽德罗常数； T ——绝对温度； t ——运动的时间。

当颗粒很小（相当于周围气体介质分子的大小）时，必须考虑分子之间的滑动，其滑动系数为：

$$1 + \frac{2A\lambda}{d} \quad (1.1.32)$$

$$\text{则 } \overline{\Delta X^2} \text{ 为: } \overline{\Delta X^2} = \frac{2RT(1+2A\lambda/d)t}{3\pi N\mu d} \quad (1.1.33)$$

式中： λ ——气体分子的平均自由路程； A ——系数，球形颗粒为 1。

爱因斯坦发现，做布朗运动的颗粒，除了直线运动外，还发生旋转运动，并导出了 1.1.34 式。

$$\overline{\Delta r^2} = \frac{2RT}{N\pi d^3 \mu} \quad (1.1.34)$$

式中： $\overline{\Delta r^2}$ ——在时间 t 内环绕一轴线旋转角分量的均方值。

二、颗粒的聚集

颗粒的聚集由颗粒的碰撞所致，而颗粒的碰撞主要是由布朗运动、紊流、重力、静电力以及电泳等因素引起的。

(一) 布朗运动引起的聚集

假设半径为 r 的一个球形颗粒，做布朗运动时，与单位体积内碰撞的每一个颗粒都相粘结，则在单位时间内与原始颗粒碰撞而减少的颗粒数为 $4\pi D r C$ ，若所有颗粒都充当碰撞中心时，那么颗粒的减少率为

$$\frac{dC}{dt} = -2\pi D C^2 \quad (1.1.35)$$

式中： C ——单位体积内的颗粒数； t ——时间间隔； D ——布朗运动的扩散系数。

实际上，布朗过程的整个范围就是所有颗粒对这种运动响应的总和，该总和 (D_1 和 D_2) 为两个相碰撞颗粒的扩散系数，并可用 D 取代，半径 r 由 $(r_1 + r_2)/2$ 代替，其中 r_1 和 r_2 为两个颗粒的作用半径。

$$\frac{-dC}{dt} = \pi(D_1 + D_2)(r_1 + r_2)C^2 \quad (1.1.36)$$

根据很多资料的推导，使我们得到在聚集过程中颗粒体积与时间的线性关系式

$$\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} = \frac{2}{3} \frac{RT}{CN} S t \quad (1.1.37)$$

式中： C_0 ——颗粒的初始浓度； $S = \frac{\text{颗粒的作用半径}}{\text{颗粒半径}}$ （设所有颗粒都相同）。

颗粒的大小不同，聚集速率也不同，而且由于颗粒的相互碰撞和黏附变得越来越大，最后重力成为主要因素，于是颗粒便从介质中凝聚出来。在任何情况下，每一特定的颗粒群都有各自的特性，并因此具有不同的聚集速率，其聚集方程式为：

$$\frac{-dC}{dt} = kC^2 \quad (1.1.38)$$

式中： k ——溶胶的聚集常数，表 1.1.2 列出了各种气溶胶的聚集常数。

还有气体介质的温度、压力、黏度以及颗粒电荷、机械或声波搅动引起的紊动也影响聚集速率。

表 1.1.2 气溶胶的聚集常数

| 物质名称 | 聚集常数 ($k \times 10^9$ cm^3/s) | 物质名称 | 聚集常数 ($k \times 10^9$ cm^3/s) |
|------|---|------|---|
| 氯化铵 | 0.60 | 油酸 | 0.51 |
| 氧化铁 | 0.66 | 树脂 | 0.49 |
| 氧化镁 | 0.83 | 石蜡 | 0.50 |
| 氧化铜 | 0.80 | 硬脂酸 | 0.51 |

(二) 紊动聚集

增加颗粒运动和相互作用可加速聚集，高强度声波也能增强颗粒的活动能力，使颗粒的聚集发生得更快，式 1.1.39 为声波振幅与颗粒运动振幅的关系式：

$$\frac{a}{\chi} = \left\{ \left[\frac{4\pi r^2 \rho F}{9\mu} \left(1 + \frac{4\lambda}{r} \right) \right]^2 + 1 \right\}^{1/2} \quad (1.1.39)$$

式中： a 为声波振幅； λ 为气体分子的平均自由路程； χ 为颗粒振幅； F 为声频； ρ 为颗粒密度。