

# 环境工程设计手册

---

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

# 环境工程设计手册

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

湘新登字 004 号

**环境工程设计手册**

魏先勋主编

责任编辑：肖和国

\*

湖南科学技术出版社出版发行

(长沙市展览馆路3号)

湖南省新华印刷二厂印刷

\*

1992年11月第1版第1次印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：61.75 插页：4 字数：1,565,000

印数：1—3,600

ISBN 7-5357-1020-6  
N·15 定价：30.00元

## 前 言

随着工业的迅猛发展,各类有害物大量增加,治理各类有害物,保护好环境的工作日趋重要。包括大气污染控制、废水治理、废弃物的处理与利用等内容的环境工程学科也随之产生。

为了促进环境工程学科的发展,搞好我国的环境保护工作,满足广大环保人员的需求,我们在机械电子工业部环境保护办公室等单位的大力支持下,编写了这本含有气、水、声、渣等内容的《环境工程设计手册》。

本手册阐述了污染治理的基本理论、技术及设计计算方法;提供了环境工程设计所需的标准、参数与有关实例;收集了国内气、水、声、渣部分厂家的环保设备。本书可供环境工程工作人员和大专院校师生参考使用。

本手册分大气污染控制、废水治理、噪声控制、固体废弃物处理以及其它、工程中的常用材料与防腐五篇,共四十八章,由魏先勋、陈信常、马菊元、韩绍昌等十人编写。其中第一篇第一、六章由魏先勋编写;第四、五、八、九章由刘建仁、李海燕编写;第二、七章由利光裕编写;第三章由杨昌志编写;第二篇第一~九章由陈信常编写;第十~十五章由李仲英编写;第十六~十八章由王国生编写;第十九~二十二章由陈信常和王国生合编。第三篇由马菊元编写。第四篇第一~五章由韩绍昌编写;第六、七章由杨昌志编写。第五篇与附录由魏先勋编写。

由于时间仓促,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》编委会**

1990. 4. 30

# 目 录

## 第一篇 大气污染控制设计

1.1 基础知识	(1)	1.5.4 燃烧法及装置	(129)
1.1.1 几个物理参数的计算	(1)	1.5.5 催化转化法及装置	(135)
1.1.2 流体力学基础知识	(4)	1.6 含尘气流的净化	(137)
1.1.3 颗粒的运动	(7)	1.6.1 净化基础知识	(137)
1.1.4 污染物与污染物的散发量	(11)	1.6.2 机械式除尘器	(145)
1.2 大气污染控制与标准	(23)	1.6.3 过滤式除尘器	(157)
1.2.1 控制的主要方式	(23)	1.6.4 电除尘器	(182)
1.2.2 控制的措施	(24)	1.6.5 湿式除尘器	(192)
1.2.3 控制的标准	(25)	1.7 污染物的高空排放	(199)
1.3 排气罩设计	(42)	1.7.1 烟囱设计计算	(199)
1.3.1 设计基础知识	(42)	1.7.2 烟囱设计注意事项	(216)
1.3.2 排气罩的类型及结构型式	(43)	1.8 通风机和电动机	(217)
1.3.3 排气罩的设计计算	(47)	1.8.1 通风机	(217)
1.3.4 排气罩设计注意事项	(66)	1.8.2 电动机	(243)
1.4 净化系统的风管设计	(66)	1.8.3 三角胶带传动计算与基础槽孔尺寸的确 定	(255)
1.4.1 风管设计的基础知识	(66)	1.9 气体净化系统的调试与运行管理	(258)
1.4.2 风管内气流流动参数的确定	(69)	1.9.1 净化系统常用测试技术	(258)
1.4.3 风管的水力计算	(99)	1.9.2 净化系统的调试	(265)
1.5 有害气体的净化	(112)	1.9.3 净化系统的运行管理	(267)
1.5.1 冷凝法及装置	(112)		
1.5.2 吸收法及装置	(115)		
1.5.3 吸附法及装置	(120)		

## 第二篇 废水治理设计

2.1 排水管渠	(268)	2.3.2 计算举例	(297)
2.1.1 管渠水力计算	(268)	2.3.3 格栅清污机	(299)
2.1.2 管道设计	(270)	2.4 沉砂池	(300)
2.1.3 管渠设计计算举例	(276)	2.4.1 设计一般规定	(301)
2.2 污水泵站	(279)	2.4.2 平流式沉砂池	(301)
2.2.1 设计一般规定	(279)	2.4.3 竖流式沉砂池	(304)
2.2.2 选泵	(280)	2.4.4 曝气沉砂池	(306)
2.2.3 泵房布置	(287)	2.5 沉淀池	(307)
2.2.4 污水泵站计算举例	(294)	2.5.1 设计一般规定	(307)
2.3 格栅	(296)	2.5.2 平流式沉淀池	(309)
2.3.1 设计数据	(296)	2.5.3 竖流式沉淀池	(314)

2.5.4	辐流式沉淀池	(317)	2.15.2	药剂还原法	(457)
2.5.5	斜板(管)沉淀池	(333)	2.15.3	电解还原法	(460)
<b>2.6</b>	<b>有机废水好氧生物处理设计——活性污泥法</b>	(336)	2.15.4	主要设备及设计计算	(461)
2.6.1	鼓风曝气活性污泥法	(338)	<b>2.16</b>	<b>活性炭吸附法</b>	(466)
2.6.2	机械曝气活性污泥法	(360)	2.16.1	活性炭吸附法的基本原理	(466)
<b>2.7</b>	<b>污泥脱水</b>	(368)	2.16.2	活性炭的规格、性能	(467)
2.7.1	污泥干化场	(368)	2.16.3	活性炭吸附法在污水处理中的应用	(468)
2.7.2	污泥机械脱水	(369)	2.16.4	吸附装置及其操作方式	(470)
2.7.3	污泥烘干与焚化	(374)	2.16.5	吸附装置的设计	(474)
<b>2.8</b>	<b>工业废水预处理方法</b>	(374)	2.16.6	活性炭的再生	(477)
2.8.1	细固体杂质的去除	(374)	<b>2.17</b>	<b>离子交换法</b>	(479)
2.8.2	均化	(378)	2.17.1	离子交换法处理工业废水的特点	(479)
<b>2.9</b>	<b>气浮法</b>	(384)	2.17.2	离子交换法在处理工业废水中的应用	(482)
2.9.1	充气气浮	(384)	2.17.3	离子交换设备	(488)
2.9.2	加压溶气气浮	(388)	2.17.4	离子交换器设计举例	(491)
<b>2.10</b>	<b>废水中和处理法</b>	(394)	<b>2.18</b>	<b>膜分离法</b>	(494)
2.10.1	常用中和方法的比较及中和法常用药剂	(394)	2.18.1	电渗析	(494)
2.10.2	酸性废水的中和处理	(396)	2.18.2	反渗透	(505)
2.10.3	碱性废水的中和处理	(404)	2.18.3	超过滤	(513)
2.10.4	中和处理法应用举例	(405)	<b>2.19</b>	<b>生物膜法</b>	(515)
<b>2.11</b>	<b>吹脱、汽提法</b>	(406)	2.19.1	高负荷生物滤池	(516)
2.11.1	吹脱法	(406)	2.19.2	塔式生物滤池	(520)
2.11.2	汽提法	(416)	2.19.3	淹没式生物滤池(接触氧化法)	(524)
<b>2.12</b>	<b>萃取法</b>	(423)	2.19.4	生物流化床	(528)
2.12.1	萃取剂的选择与再生	(423)	<b>2.20</b>	<b>活性污泥法的新进展</b>	(532)
2.12.2	萃取工艺及计算	(424)	2.20.1	纯氧活性污泥法	(532)
2.12.3	萃取设备及其设计计算	(426)	2.20.2	间歇活性污泥法	(535)
2.12.4	萃取法应用举例	(433)	2.20.3	投料活性污泥法	(536)
<b>2.13</b>	<b>化学沉淀法</b>	(434)	2.20.4	深井曝气法	(539)
2.13.1	基本原理	(434)	2.20.5	A—B 活性污泥法	(541)
2.13.2	主要设备及设计计算	(435)	2.20.6	氧化沟	(543)
2.13.3	氢氧化物沉淀池	(440)	2.20.7	一体化生活污水净化装置	(546)
2.13.4	硫化物沉淀池	(442)	<b>2.21</b>	<b>有机废水厌氧生物处理法</b>	(548)
2.13.5	铁氧体法及其化学沉淀法	(444)	2.21.1	普通消化池	(548)
<b>2.14</b>	<b>氧化法</b>	(446)	2.21.2	上流式厌氧污泥床(UASB)	(552)
2.14.1	氧化剂的选择及常用氧化剂	(446)	2.21.3	厌氧流化床(UFB)	(555)
2.14.2	化学氧化法	(446)	<b>2.22</b>	<b>水质标准</b>	(558)
2.14.3	臭氧氧化	(450)	2.22.1	地面水环境质量标准(GB3838—88)	(558)
2.14.4	电化学氧化	(457)	2.22.2	污水综合排放标准(GB8978—88)	(562)
<b>2.15</b>	<b>还原法</b>	(457)			
2.15.1	常用的还原剂	(457)			

2.22.3 渔业水质标准(GB11607—89) … (571)	2.22.5 其它水质标准索引 …………… (573)
2.22.4 农田灌溉水质标准(GB5084—85) …… …………… (572)	

### 第三篇 噪声控制设计

<b>3.1 噪声的量度评价及测量方法</b> …… (575)	3.4.1 消声器的种类和评价 …………… (657)
3.1.1 噪声的量度及评价 …………… (575)	3.4.2 阻性消声器 …………… (661)
3.1.2 噪声容许标准 …………… (580)	3.4.3 扩张式消声器的设计 …………… (664)
3.1.3 噪声测量常用仪表 …………… (581)	3.4.4 共振消声器 …………… (669)
3.1.4 标准声源 …………… (592)	3.4.5 微穿孔板消声器 …………… (672)
3.1.5 声学测试环境 …………… (593)	3.4.6 节流减压、小孔喷注消声器 …… (677)
3.1.6 消声室与吸声尖劈 …………… (595)	3.4.7 缓冲式消声器 …………… (679)
3.1.7 工业噪声测量方法 …………… (596)	3.4.8 阻抗复合消声器 …………… (679)
3.1.8 工业噪声测量项目 …………… (598)	<b>3.5 常用机电设备适配消声器</b> …… (681)
3.1.9 环境噪声测量 …………… (600)	3.5.1 消声器的选用与安装 …………… (681)
<b>3.2 吸声降噪</b> …………… (601)	3.5.2 锅炉噪声及其控制 …………… (683)
3.2.1 吸声原理与吸声减噪计算 …… (601)	3.5.3 罗茨鼓风机消声器 …………… (687)
3.2.2 吸声材料的要求与分类 …… (603)	3.5.4 D系列罗茨鼓风机消声器及消声管道 …… …………… (691)
3.2.3 多孔吸声材料 …………… (604)	3.5.5 内燃机噪声与适配消声器 …… (694)
3.2.4 聚氨酯甲酸酯等高分子材料和膜状材料 …………… (610)	3.5.6 空压机噪声及其适配消声器 …… (696)
3.2.5 影响吸声性能的因素 …………… (611)	3.5.7 中低压离心风机消声器 …… (702)
3.2.6 薄板振动吸声结构 …………… (613)	3.5.8 高中压离心通风机适配消声器 …… (705)
3.2.7 亥姆霍兹共振吸声器 …………… (614)	3.5.9 轴流风机消声器 …………… (708)
3.2.8 穿孔板共振吸声结构 …………… (615)	3.5.10 电机噪声及消声器 …………… (709)
3.2.9 微穿孔板吸声结构 …………… (617)	3.5.11 排气(气)放空消声器 …………… (713)
3.2.10 穿孔板、微穿孔板的专业生产线 …… (619)	3.5.12 QJ型汽车尾气净化消声器 …… (717)
3.2.11 吸声体 …………… (621)	3.5.13 GZF型电站锅炉送风机消声器 …… (718)
3.2.12 JD型铝合金吊顶 …………… (623)	3.5.14 ZHZ55型冲天炉鼓风机消声器 …… (719)
3.2.13 吸声屏 …………… (624)	3.5.15 空气锤噪声及其适配消声器 …… (720)
3.2.14 吸声砖 …………… (626)	3.5.16 通风空调消声器 …………… (721)
<b>3.3 隔声降噪</b> …………… (627)	<b>3.6 隔振降噪</b> …………… (723)
3.3.1 隔声性能的评价 …………… (627)	3.6.1 振动的产生和量度 …………… (723)
3.3.2 单层结构的隔声性能 …………… (629)	3.6.2 振动的危害和容许标准 …… (725)
3.3.3 双层隔声结构 …………… (634)	3.6.3 隔振原理 …………… (729)
3.3.4 复合隔声结构 …………… (637)	3.6.4 隔振弹性支承设计 …………… (731)
3.3.5 楼板和屋顶结构与隔声 …… (638)	3.6.5 金属弹簧隔振器 …………… (734)
3.3.6 孔、洞、缝的透声 …………… (639)	3.6.6 橡胶隔振器 …………… (737)
3.3.7 室内隔声量计算 …………… (641)	3.6.7 橡胶隔振垫 …………… (740)
3.3.8 隔声门的结构与设计 …… (642)	3.6.8 管道隔振 …………… (742)
3.3.9 隔声窗的结构与设计 …… (646)	3.6.9 阻尼减振降噪 …………… (748)
3.3.10 观察隔声窗和通风隔声窗 …… (649)	<b>3.7 常用低噪声机电设备</b> …… (750)
3.3.11 隔声罩 …………… (651)	3.7.1 TS型低噪声罗茨鼓风机 …… (751)
3.3.12 隔声室 …………… (655)	3.7.2 低噪声空气、气体压缩机 …… (752)
<b>3.4 消声降噪</b> …………… (657)	3.7.3 低噪声风机 …………… (753)

3.7.4 低噪声离心式屋顶通风机 .....	(756)	3.7.6 风机噪声降低途径 .....	(759)
3.7.5 低噪声低振动阻尼复合钢板及其部分制品 .....	(758)	3.7.7 电机噪声降低途径 .....	(764)

#### 第四篇 固体废物处理设计及其它

<b>4.1 固体废物的基础知识</b> .....	(769)	<b>4.4 固体废物的最终处置</b> .....	(873)
4.1.1 固体废物的产生与分类 .....	(769)	4.4.1 海洋处置 .....	(874)
4.1.2 固体废物的特点与危害 .....	(771)	4.4.2 土地填埋 .....	(875)
4.1.3 固体废物的资源化及管理 .....	(772)	4.4.3 深井灌注 .....	(885)
<b>4.2 固体废物的预处理</b> .....	(774)	<b>4.5 固体废物处理设备及固体废物污染控制、利用标准</b> .....	(885)
4.2.1 分选 .....	(775)	4.5.1 分选设备 .....	(885)
4.2.2 破碎 .....	(781)	4.5.2 破碎设备 .....	(895)
4.2.3 压实 .....	(784)	4.5.3 压实设备 .....	(898)
4.2.4 固化 .....	(785)	4.5.4 其它专用设备 .....	(899)
<b>4.3 固体废物的处理与利用</b> .....	(788)	4.5.5 固体废物利用及污染监测控制标准 .....	(900)
4.3.1 概述 .....	(788)	<b>4.6 辐射防护</b> .....	(912)
4.3.2 高炉矿渣 .....	(789)	4.6.1 辐射源 .....	(912)
4.3.3 钢渣 .....	(800)	4.6.2 辐射对人体的影响 .....	(914)
4.3.4 铁合金渣 .....	(813)	4.6.3 辐射防护 .....	(918)
4.3.5 有色冶金渣 .....	(817)	4.6.4 辐射监测 .....	(924)
4.3.6 粉煤灰 .....	(825)	<b>4.7 城市环境规划与城市环境</b> .....	(927)
4.3.7 煤矸石 .....	(842)	4.7.1 城市规划与城市环境 .....	(927)
4.3.8 废旧金属 .....	(853)	4.7.2 城市环境的综合治理与改善 .....	(933)
4.3.9 化工渣 .....	(856)		
4.3.10 城市垃圾 .....	(863)		

#### 第五篇 工程中的常用材料与防腐

<b>5.1 工程中的常用材料</b> .....	(935)	5.3.1 涂刷防腐蚀涂料 .....	(956)
5.1.1 金属材料 .....	(935)	5.3.2 喷镀防腐蚀材料 .....	(957)
5.1.2 非金属材料 .....	(946)	5.3.3 金属电镀和化学镀 .....	(958)
<b>5.2 材料的耐腐蚀性能</b> .....	(952)	5.3.4 非金属材料衬里 .....	(959)
5.2.1 金属材料的耐腐蚀性能 .....	(952)	5.3.5 使用复合材料 .....	(961)
5.2.2 非金属材料的耐腐蚀性能 .....	(954)	5.3.6 选用耐腐蚀金属材料 .....	(962)
<b>5.3 常用的防腐蚀措施</b> .....	(956)	5.3.7 推荐使用非金属材料 .....	(965)

#### 附 录

附录一 单位换算 .....	(966)
附录二 空气的物理参数 .....	(971)
附录三 气体的物理特性 .....	(972)
附录四 饱和水蒸汽的物理参数 .....	(973)
附录五 水的物理参数 .....	(973)
附录六 液体的物理特性 .....	(974)
附录七 某些固体的热物理特性 .....	(976)
附录八 常用的物理常数 .....	(978)
附录九 原子量表 .....	(978)



# 第一篇 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 $\rho_w$

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

##### (二) 相对湿度 $\varphi$

$\varphi$  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  $\varphi$  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:  $\varphi$ ——相对湿度, %;  $\rho_v$ ——饱和绝对湿度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ (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。

$$d = 0.622 \varphi P_v / (P - \varphi P_v) \quad (1.1.3)$$

$$d_0 = 0.804 \varphi P_v / (P - \varphi P_v) \quad (1.1.4)$$

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

式中:  $d$ ——含湿量,  $\text{kg}/\text{kg}$  干空气;  $P$ ——大气压, Pa;  $\rho_{Nd}$ ——标准状态下 ( $0^\circ\text{C}$ , 1atm) 干气体的密度。

##### (四) 水蒸气的体积分数 $\gamma_w$

若以湿气体中水蒸气所占体积分数  $\gamma_w$  或摩尔分数  $\chi_w$  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:  $\text{kg}/\text{m}^3$  (干气体)

$d$  单位为:  $\text{kg}/\text{kg}$  (干气体)

## 二、粘度的计算

### (一) 粘度的定义和单位

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, 称为流体的动力粘度或粘度, 亦称绝对粘度; 动力粘度  $\mu$  与流体密度  $\rho$  之比称为运动粘度  $\nu$ 。

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

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

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

粘度单位在工程中常用泊(p)、厘泊(cp)或微泊( $\mu\text{p}$ ), 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) 气体粘度与温度的关系

气体粘度随气体温度升高而增大, 其关系多为经验公式。在常压下气体粘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	$\mu_0 (\text{Pa} \cdot \text{s})$	m	物 质	化学式	$\mu_0 (\text{Pa} \cdot \text{s})$	m
氮 气	$\text{N}_2$	$1.667 \times 10^{-5}$	0.68	氙 气	$\text{Xe}$	$2.108 \times 10^{-5}$	0.89
氨	$\text{NH}_3$	$0.936 \times 10^{-5}$	1.06	甲 烷	$\text{CH}_4$	$1.040 \times 10^{-5}$	0.76
戊 醇	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	$0.620 \times 10^{-5}$	0.96	甲 醇	$\text{CH}_3\text{O}$	$0.884 \times 10^{-5}$	1.04
氩	$\text{Ar}$	$2.118 \times 10^{-5}$	0.72	氖 气	$\text{Ne}$	$2.971 \times 10^{-5}$	0.65
丙 酮	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	$0.686 \times 10^{-5}$	1.03	一氧化碳	$\text{CO}$	$1.657 \times 10^{-5}$	0.695
苯	$\text{C}_6\text{H}_6$	$0.698 \times 10^{-5}$	1.00	辛 烷	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	$0.483 \times 10^{-5}$	1.02
溴 甲 烷	$\text{CH}_3\text{Br}$	$1.226 \times 10^{-5}$	1.05	戊 烷	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	$0.635 \times 10^{-5}$	0.99
丁 烷	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$0.635 \times 10^{-5}$	0.97	丙 烷	$\text{C}_3\text{H}_8$	$0.750 \times 10^{-5}$	0.92
丁 醇	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	$0.660 \times 10^{-5}$	0.98	丙 醇	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$	$0.717 \times 10^{-5}$	1.00
氢	$\text{H}_2$	$0.836 \times 10^{-5}$	0.678	甲 苯	$\text{C}_7\text{H}_8$	$0.661 \times 10^{-5}$	0.89
水 蒸 气	$\text{H}_2\text{O}$	$0.824 \times 10^{-5}$	1.20	氯化甲烷	$\text{CH}_3\text{Cl}$	$0.981 \times 10^{-5}$	1.02
空 气	—	$1.716 \times 10^{-5}$	0.683	氯 仿	$\text{CHCl}_3$	$0.962 \times 10^{-5}$	0.94
己 烷	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	$0.590 \times 10^{-5}$	1.03	环 己 烷	$\text{C}_6\text{H}_{12}$	$0.638 \times 10^{-5}$	0.907
氦 气	$\text{He}$	$1.844 \times 10^{-5}$	0.68	四氯化碳	$\text{CCl}_4$	$0.924 \times 10^{-5}$	0.92
庚 烷	$\text{C}_7\text{H}_{16}$	$0.525 \times 10^{-5}$	1.05	乙 烷	$\text{C}_2\text{H}_6$	$0.877 \times 10^{-5}$	0.90
二氧化硫	$\text{SO}_2$	$1.206 \times 10^{-5}$	0.912	醋酸乙酯	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	$0.691 \times 10^{-5}$	1.01
二氧化碳	$\text{CO}_2$	$1.402 \times 10^{-5}$	0.82	乙 醇	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$	$0.784 \times 10^{-5}$	1.02
氧 气	$\text{O}_2$	$1.942 \times 10^{-5}$	0.692	乙 醚	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	$0.685 \times 10^{-5}$	0.97

式中： $\mu_T$ ——温度  $T(K)$  时气体的粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； $\mu_0$ ——温度  $T_0=273.15\text{K}$  时的气体粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； $m$ ——经验指数，可从表 1.1.1 查到。

### (三) 混合气体的粘度

低压混合气体的粘度计算式多为经验公式，式 1.1.11 为平方根法。

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

式中： $\chi_i$ ——混合气体中  $i$  组分的摩尔分数； $\mu_i$ ——混合气体中  $i$  组分的粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； $M_i$ ——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  $\rho_N$  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  $\rho_N$  可按式 1.1.13 计算：

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

式中： $\rho_{Ni}$ ——混合气体中  $i$  组分气体在标准状态下的密度， $\text{kg}/\text{Nm}^3$ ； $X_i$ ——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。

$$\rho = \rho_{Nd} \frac{P - \varphi P_v}{P_N} \cdot \frac{T_N}{T} \cdot \frac{Z_N}{Z} + \varphi P_v \quad (1.1.14)$$

式中： $\rho$ ——工况密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $P$ ——工况压力， $\text{Pa}$ ； $Z$ ——工况状态下的压缩因子； $\rho_{Nd}$ ——标准状态下干气体的密度， $\text{kg}/\text{Nm}^3$ ； $P_N$ ——标准压力， $\text{Pa}$ ； $Z_N$ ——标准状态下的压缩因子； $P_v$ ——干空气分压力， $\text{Pa}$ ； $\varphi$ ——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。

$$\begin{aligned} V &= 371 V_{Nd} \frac{T}{P - \varphi P_v} = 371 V_{Nd} \frac{1}{1 - \chi_w} \cdot \frac{T}{P} = 371 V_{Nd} \left( 1 + \frac{d_0}{0.804} \right) \frac{T}{P} \\ &= 371 V_{Nd} \left( 1 + \frac{\rho_{Nd} \cdot d}{0.804} \right) \cdot \frac{T}{P} \end{aligned} \quad (1.1.15)$$

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： $V$ ——工况体积， $\text{m}^3$ ； $V_{Nd}$ ——标态体积， $\text{m}^3$ ； $P$ ——绝对大气压， $\text{Pa}$ ； $T$ ——工况温度， $^\circ\text{K}$ ； $P_v$ ——干空气分压力， $\text{Pa}$ ； $d_0$ ——含湿量， $\text{kg}/\text{kg}$  干空气； $P_{Nd}$ ——标态密度， $\text{kg}/\text{Nm}^3$ ； $\chi_w$ ——水蒸气摩尔分数； $\varphi$ ——相对湿度， $\%$ 。

**例** 某锅炉烟气成分(体积百分数)为： $\text{CO}$ ：65%； $\text{CO}_2$ ：18%； $\text{N}_2$ ：16.5%； $\text{O}_2$ ：4.5%，经湿式除尘后达到饱和状态，其温度为  $70^\circ\text{C}$ ，饱和含湿量  $d_s=0.164\text{kg}/\text{Nm}^3$ ，试求烟气的粘度。

**解**：①查分子量： $\text{H}_2\text{O}=18$ ； $\text{CO}=28$ ； $\text{CO}_2=44$ ； $\text{N}_2=28$ ； $\text{O}_2=32$ 。

②水蒸气的摩尔分数

$$\chi_w = \frac{d_v}{0.804 + d_v} = \frac{0.164}{0.804 + 0.164} = 0.169$$

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

$$\chi_{CO} = 0.831 \times 0.65 = 0.540$$

$$\chi_{CO_2} = 0.831 \times 0.18 = 0.150$$

$$\chi_{N_2} = 0.831 \times 0.165 = 0.137$$

$$\chi_{O_2} = 0.831 \times 0.045 = 0.037$$

⑤由表 1.1.1 查标准状态下物质的粘度  $\mu_0$  与  $m$  值

	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$\mu_0$ (Pa·s)	$1.657 \times 10^{-5}$	$1.402 \times 10^{-5}$	$1.667 \times 10^{-5}$	$1.942 \times 10^{-5}$	$0.824 \times 10^{-5}$
$m$	0.695	0.82	0.68	0.692	1.20

⑥由式 1.1.10 计算烟气各组分的粘度

$$\mu_{H_2O} = 0.824 \times 10^{-5} \left( \frac{343}{273} \right)^{1.2} = 1.084 \times 10^{-5}$$

$$\mu_{CO} = 1.657 \times 10^{-5} \left( \frac{343}{273} \right)^{0.695} = 1.942 \times 10^{-5}$$

$$\mu_{CO_2} = 1.402 \times 10^{-5} \left( \frac{343}{273} \right)^{0.82} = 1.691 \times 10^{-5}$$

$$\mu_{N_2} = 1.667 \times 10^{-5} \left( \frac{343}{273} \right)^{0.68} = 1.947 \times 10^{-5}$$

$$\mu_{O_2} = 1.942 \times 10^{-5} \left( \frac{343}{273} \right)^{0.692} = 2.274 \times 10^{-5}$$

⑦由式 1.1.11 计算烟气粘度

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

## 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:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= Q_2 = Q \\ \text{或} \quad A_1 v_1 &= A_2 v_2 = Av \end{aligned} \right\} \quad (1.1.17)$$

式中:  $Q$ ——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,  $m^3/s$ ;  $A$ ——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,  $m^2$ ;  $v$ ——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。

对于可压缩流体, 密度  $\rho$  发生了变化, 关系式应为:

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

式中:  $\rho$ ——总流流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_1, \rho_2$ ——分别为断面 1、2 处流体的密度, kg/m<sup>3</sup>。

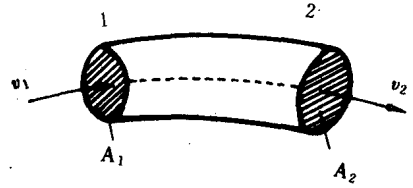


图 1.1.1

## (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  $\rho$ , 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:

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

## 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:  $u_x, u_y, u_z$ ——沿  $x, y, z$  轴方向流速, m/s;  $P$ ——作用在单元体分面 1 上的压力, Pa;  $X, Y, Z$ ——作用在单元体上的其它外力在  $x, y, z$  轴方向上的分量;  $\rho$ ——流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\nu$ ——流体的运动粘度, m<sup>2</sup>/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:  $u_x, u_y, u_z$ ——单元体沿  $x, y, z$  方向的流速, m/s;  $t$ ——流体的温度, °C;  $\alpha$ ——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(无粘滞性, 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;  $\rho$ ——流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$ ——重

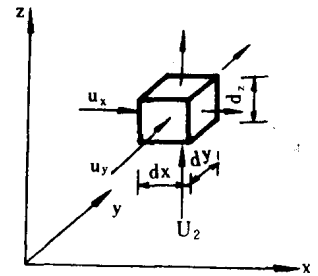


图 1.1.2

力加速度,  $m/s^2$ 。

当流体为空气时, 因  $\rho$  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:  $\Delta P_{1-2}$ ——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( $R_e < 2320$ )流动时的流量  $Q$ 、管径  $d$ 、管长  $l$ 、流体的动力粘度  $\mu$  与压强损失之间关系的定律。

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

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

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

#### (二) 卡尔曼—尼古拉兹式

卡尔曼—尼古拉兹式表明, 当  $R_e > 900d/k$  时,  $\lambda$  与  $R_e$  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( $R_e = 2000 \sim 4000$ )摩擦阻力系数  $\lambda$  与雷诺数  $R_e$  及相对粗糙度  $k/d$  之间的关系。

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

#### (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  $R_e \cdot k/d$  与  $\lambda$  之间的对应关系图(图 1.1.5)。图中可根据  $R_e$  与  $k/d$  直接查出  $\lambda$  值。

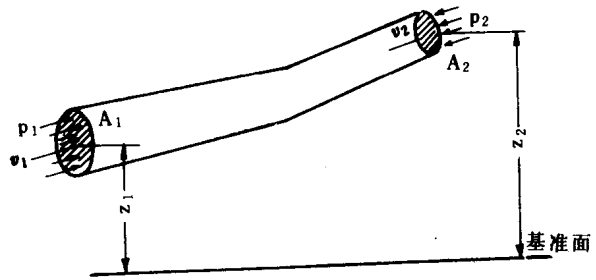


图 1.1.3

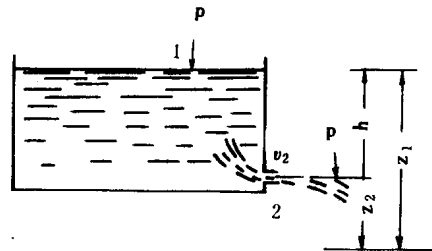


图 1.1.4

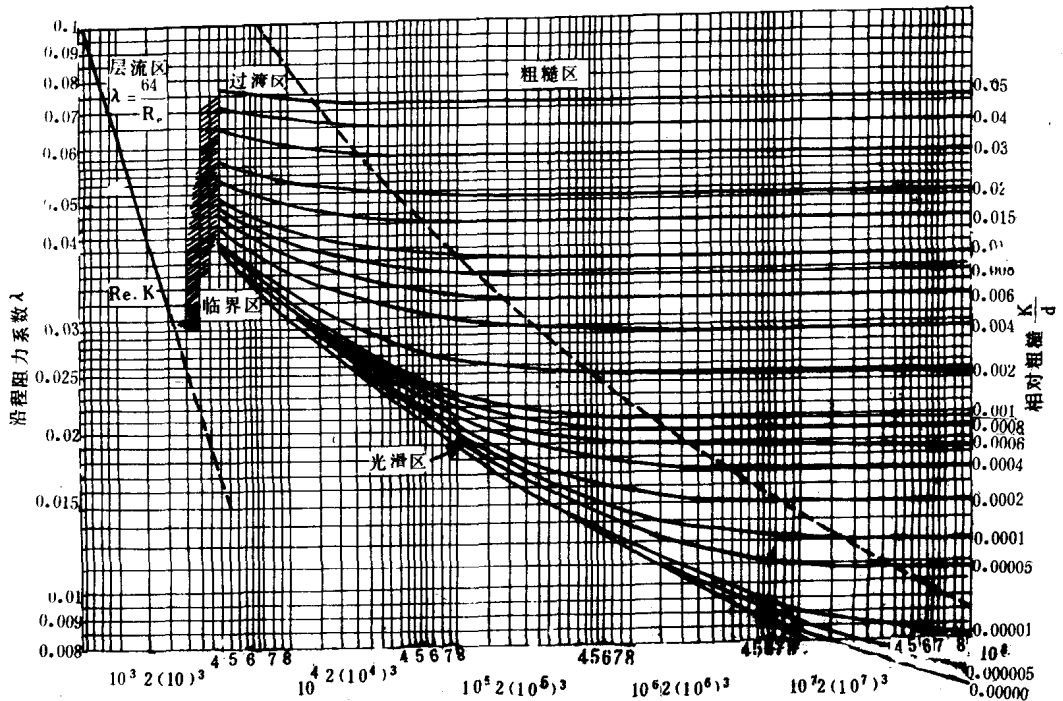


图 1.1.5 莫迪图

### 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它体积力等有关,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作的无规则运动。一个典型的布朗颗粒( $d_p < 0.5 \mu\text{m}$ ),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)。

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

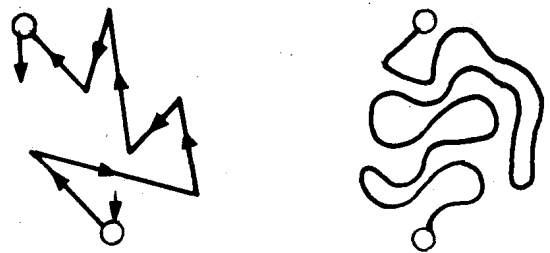


图 1.1.6

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

式中：  $d$ ——球形颗粒的直径；  $R$ ——气体常数；  $\mu$ ——介质的粘度；  $N$ ——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:

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

则  $\overline{\Delta X^2}$  为:

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

式中：  $\lambda$ ——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,作布朗运动的颗粒,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,作布朗运动时,与单位体积内碰撞的每一个颗粒都相粘,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

$$dC/dt = -2\pi D C^2 \quad (1.1.35)$$

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粘附变得越来越大,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、粘度以及颗粒电荷、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 $k \times 10^9$ $\text{cm}^3/\text{s}$	物质名称	聚集常数 $k \times 10^9$ $\text{cm}^3/\text{s}$
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
氧化镉	0.80	硬脂酸	0.51

## (二) 紊动聚集

增加颗粒运动和互相作用可加速聚集, 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:  $a$ ——声波振幅;  $\lambda$ ——气体分子的平均自由路程;  $\chi$ ——颗粒振幅;  $F$ ——声频;  $\rho$ ——颗粒密度。

在利用声波聚集过程中, 由于高尘浓时颗粒密度会干扰声能, 低尘浓时颗粒间只发生极少的碰撞, 都只有很低的聚集速率。异质蒸气也可引起聚集速率的提高或降低。因此在应用中受到限制。

## (三) 电荷对颗粒聚集的影响

带相同电荷的颗粒被认为是单级性的, 它们处于较大距离时具有的力以排斥力为主; 但如果靠得很近, 且大小不同或大小相同而电荷量不等, 或电荷在颗粒上分布不均匀的颗粒, 彼此给予相反的电荷, 使引力占支配地位, 会互相吸引。随着每个颗粒上电荷数  $q$  的增加, 聚集速率会大大提高, 其聚集速率方程式如式 1.1.40 所示:

$$-\frac{dC}{dt} = 8\pi DC^2 \left[ \frac{\lambda}{\exp(\lambda-1)} + \lambda \right] \quad (1.1.40)$$

具有两种相反电荷的颗粒为偶极性的, 颗粒间强烈的吸引力使颗粒靠拢, 产生聚集, 其聚集速率方程式为:

$$\frac{dC}{dt} = 8\pi r D \left[ \frac{C_+^2 + C_- \lambda + 2C_+ C_- \lambda \exp \lambda}{\exp(\lambda-1)} + \frac{4\pi q^2 DC(C_+ - C_-)^2}{kT} \right] \quad (1.1.41)$$

式中:  $C_+$ ——带正电荷的颗粒数;  $C_-$ ——带负电荷的颗粒数;  $k$ ——普朗克常数。

## 三、颗粒的沉降

### (一) 颗粒的自由沉降

在任何情况下, 悬浮状态的颗粒都受重力与介质浮力的影响, 使颗粒在沉降过程中达到力的平衡, 以一定的沉降速度(斯托克斯沉降速度)沉降。

$$V_i = \frac{d^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{18\mu} \quad (1.1.42)$$

式中:  $d$ ——颗粒直径;  $\rho_1$ ——颗粒密度;  $\rho_2$ ——气体介质密度;  $\mu$ ——介质的动力粘度。

对极小的颗粒而言, 其大小相当于周围气体分子, 并且在这些分子之间会产生滑动, 因此, 计算直径  $d_c \leq 5\mu\text{m}$  颗粒的沉降速度时必须用坎宁哈姆修正系数进行修正。

$$V_i = k_c \frac{\rho_1 g d^2}{18\mu} \quad (1.1.43)$$

式中:  $k_c$ ——坎宁哈姆修正系数(当空气温度  $t = 20^\circ\text{C}$ , 压力  $P = 1\text{atm}$  时,  $k_c = 1 + \frac{0.172}{d}$ )。

球形颗粒的速度始终大于其它形状颗粒的速度, 其速度差可高达 50%, 对于椭圆长短轴