

前 言

本书是在1981年出版的高等学校试用教材《制冷及低温技术》的基础上,根据高等学校流体动力机械教材分编审委员会1984年6月制定的“制冷设备与低温技术”专业教学计划及审定的修订大纲重新组织编写的。

本书主要阐述低温技术的基本原理和主要低温设备与装置的特性及设计计算方法,以使读者能以理论同实践相结合的方式领会并掌握这门技术。本书取材立足于国内,但也介绍了国外的新成就。本书内容比较广泛,在教学中可以根据专业侧重点的不同而加以选择取舍。

本书由西安交通大学张祉祐同志和华中工学院石秉三同志任主编,西安交通大学钱鸿章同志任主审,审稿的还有上海机械学院韩鸿兴同志和杭州制氧机研究所李永康同志。

本书共计十八章,分上、下两册出版。上册讲述低温技术的基本原理、精馏设备和换热设备,下册讲述几种常用的低温装置。下册的编写分工是:西安交通大学陈芹元同志编写第十一章、第十二章的第八节和第十三章的第四至六节;西安交通大学谢鸿济同志编写第十二章(不包括第八节);西安交通大学谢志镜同志编写第十三章的第一至三节和第十四章;石秉三同志编写第十五章;张祉祐同志编写第十六章和第十七章;西安交通大学高香院同志编写第十八章。

本书是高等工业学校“制冷设备与低温技术”专业的基本教材,也可供有一定基础的工程技术人员自学或参考之用。

作者在编写过程中虽然尽了最大的努力,但限于水平,缺点和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

1985年12月

下 册 通 用 符 号

符 号	量 的 名 称	单 位	
		中文符号	符 号
A	截 面 积	米 ²	m ²
a_0	声 速	米/秒	m/s
c_p	定压比热	千焦/(千克·开)	kJ/(kg·K)
D	直 径	米	m
e_r	焓	千焦/千克	kJ/kg
F	表 面 积	米 ²	m ²
f	回 流 数		
G	质量流量	千克/秒	kg/s
G_s	低温容器的气化损失	千克/秒	kg/s
G_v	低温容器的逃逸气体流量	千克/秒	kg/s
h	1. 高度	米	m
	2. 焓	千焦/千克	kJ/kg
k	传热系数	瓦/(米 ² ·开)	W/(m ² ·K)
k_L	单位管长的传热系数	瓦/(米·开)	W/(m·K)
L	1. 长度	米	m
	2. 液体量	千克	kg
M	分 子 量		
m	质 量	千克	kg
N	功 率	千瓦	kW
n	转 速	转/秒	r/s
p	压 力	千帕	kPa
Q	1. 热量	千焦	kJ
	2. 热流量、制冷量	瓦	W
Q_2	复热不足冷损	千焦/千摩尔	kJ/kmol
Q_3	跑冷损失	千焦/千摩尔	kJ/kmol
$Q_{i,s}$	绝热结构的传热量	瓦	W
$Q_{s,s}$	支撑物、管道的传热量	瓦	W
q	1. 单位面积热流量	瓦/米 ²	W/m ²
	2. 单位制冷量	千焦/千克	kJ/kg
R	气体常数	千焦/(千克·开)	kJ/(kg·K)
r	1. 半径	米	m
	2. 气化潜热	千焦/千克	kJ/kg
S	相对余隙容积		
s	熵	千焦/(千克·开)	kJ/(kg·K)
T	热力学温度	开	K

(续)

符 号	量 的 名 称	单 位	
		中文符号	符 号
t	摄氏温度		$^{\circ}\text{C}$
u	内 能	千焦/千克	kJ/kg
V	1. 体积、容积	米 ³	m^3
V_0	2. 容积流量	米 ³ /时	m^3/h
W	有效容积	米 ³	m^3
w	功	千焦	kJ
x	流 速	米/秒	m/s
y	液相摩尔浓度		
γ	气相摩尔浓度		
α	1. 换热系数	瓦/(米 ² ·开)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	2. 热适应系数		
α_0	低温容器的日气化率		$\%$
α_s	微分节流效应	开/千帕	K/kPa
δ	厚 度	米	m
ε	1. 黑度		
	2. 制冷系数		
η	效 率		
ρ	密 度	千克/米 ³	kg/m^3
下 角 标			
Ar	氩 的	m	平 均 的
c	低 温 的	max	最 大 的
e	有 效 的	min	最 小 的
f	精馏的、馏份的	N_2	氮 的
h	高 温 的	O_2	氧 的
i	内部的、进口的	PK	膨胀空气的
in	绝热结构的	pr	实 际 的
K	空 气 的	th	理 论 的
L	液 体 的	W	污 的
上 角 标			
Ar	氩 中 的	LO	液氧中的
K	空气中的	N	氮 中 的
L	液体中的	O	氧 中 的
LK	液空中的	'	液 体 的
LN	液氮中的	"	蒸 气 的

注：在本书下册中，凡物理量符号不另作说明的，其意义及单位均同此表。

目 录

前言

下册通用符号

第四篇 气体液化与分离装置..... 1

第十一章 空气的净化..... 1

第一节 概述..... 1

第二节 除尘..... 1

一、除尘装置的种类..... 2

二、过滤除尘装置..... 2

第三节 空气的干燥..... 6

一、化学法干燥空气..... 9

二、吸附法干燥空气..... 9

第四节 空气中 CO_2 与 C_2H_2 的净除..... 14

一、化学法净除 CO_2 14

二、硅胶吸附净除法..... 17

三、分子筛吸附净除法..... 17

四、实际使用的分子筛吸附器的计算..... 18

参考文献..... 22

第十二章 空气分离装置..... 23

第一节 空气分离装置及其在国民经济中的作用..... 23

第二节 典型空分装置工艺流程..... 23

一、KZD-50型空分装置..... 23

二、小型制氮装置及小型液氮装置..... 27

三、带中压制冷循环系统的低压液氧装置..... 28

四、用非利浦斯制冷机制取液氮的装置..... 30

五、KDON-6000/13000型空分装置..... 31

六、KFS-21000型空分装置..... 34

七、KDON-10000/10000型空分装置..... 36

八、用分子筛净化空气的大型空分装置..... 38

第三节 空分装置工艺流程制冷系统的组织..... 39

一、冷量生产..... 39

二、低压流程制冷系统..... 40

三、中压流程制冷系统..... 47

四、高压流程制冷系统..... 49

第四节 空分装置工艺流程精馏系统

及换热系统的组织..... 50

一、精馏系统的组织..... 50

二、换热系统的组织..... 52

第五节 空分装置工艺流程的设计..... 54

一、空分装置工艺流程的拟定..... 54

二、空分装置工艺流程的设计程序及设计参数的选定..... 55

三、空分装置工艺流程的计算方法..... 59

第六节 空分装置工艺流程计算举例..... 64

一、设计参数..... 64

二、计算各主要点的状态参数..... 66

三、装置总物料平衡..... 67

四、装置总热量平衡..... 68

五、可逆式换热器的热平衡计算..... 69

六、膨胀换热器的热平衡计算..... 70

七、液化器的热平衡计算..... 71

八、下塔物料平衡和热量平衡计算..... 72

九、液空过冷器的热平衡计算..... 73

十、液氮过冷器的热平衡计算..... 74

十一、上塔的热平衡计算..... 76

十二、技术经济指标计算..... 76

第七节 空分装置的安全防爆..... 77

一、精馏塔的爆炸及其原因..... 77

二、爆炸危险杂质及其性质..... 73

三、精馏塔安全防爆的主要措施..... 79

第八节 空分装置的自动调节系统..... 82

一、压缩机的自动调节系统..... 82

二、可逆式换热器的自动控制..... 85

三、分离设备的自动调节系统..... 87

四、空分装置的自动调节系统举例..... 88

参考文献..... 90

第十三章 稀有气体提取装置..... 92

第一节 概述..... 92

一、稀有气体的性质及用途..... 92

二、提取稀有气体的主要方法..... 93

三、稀有气体在空分塔中的分布规律及其对精馏过程的影响..... 93

第二节 从空分装置中提取粗氩	94	二、小型氦液化装置	158
一、典型制氩流程	94	三、中型及大型氦液化装置	164
二、用高压和中压空分装置制取粗氩	96	第四节 低温液化装置的设计基础	168
三、用全低压空分装置制取粗氩	99	一、流程的组织	168
第三节 纯氩的制取	100	二、设计参数的选择	169
一、化学除氧和低温精馏制取纯氩	100	三、液化装置流程设计计算	171
二、用分子筛低温吸附法制取纯氩	104	第五节 低温液化装置的真空系统	177
第四节 从合成氨尾气中提取氩	105	第六节 低温液化装置的安全技术	179
一、从合成氨尾气中提氩的方法	105	第七节 低温液化装置的自动控制	180
二、从合成氨尾气中提氩的流程	108	一、自动控制压缩机各级的压力	
第五节 氮、氙的提取	109	与温度	180
一、从空分装置中提取氮和氙	109	二、自动调节低温液体液位	181
二、从合成氨尾气中提取氮和氙	116	三、液化系统自动充气	182
第六节 氮、氙的提取	116	参考文献	183
一、从空分装置中提取氮和氙	117	第十六章 低温液体的贮运	185
二、从天然气中提取氮	121	第一节 前言	185
参考文献	125	第二节 低温液体的贮运容器	185
第十四章 多组分气体的液化		一、低温容器的种类	185
及分离装置	126	二、低温容器典型结构介绍	186
第一节 概述	126	三、低温容器设计要点	190
第二节 天然气液化装置	126	第三节 低温容器的特性及计算	194
一、天然气液化前的预处理	127	一、跑冷损失及气化损失	194
二、天然气液化装置的工艺流程	128	二、预冷及加热	195
三、液化天然气的气化及冷量利用	133	三、高压容器的某些特性	197
第三节 石油气分离为馏分的装置	135	第四节 低温液体的管道输送	200
一、概述	135	一、低温液体管道输送的方法	200
二、分离装置的流程组织	135	二、低温液体输送管道	201
三、分离装置的典型流程	136	三、低温液体的输送泵	205
第四节 石油气分离为纯组分的装置	137	第五节 低温液体贮运中的安全问题	207
第五节 焦炉气及水煤气的分离装置	140	参考文献	208
一、焦炉气分离装置	140	第十七章 低温装置的绝热技术	209
二、水煤气分离装置	141	第一节 绝热的目的和方法	209
参考文献	143	第二节 低温装置用的绝热材料	211
第十五章 氢、氦液化装置	144	一、绝热材料的种类及一般特性	211
第一节 概述	144	二、绝热材料的热物理性质	212
第二节 氢液化装置	145	三、绝热材料的选择	214
一、氢原料气及其纯化	145	第三节 普通绝热	215
二、氢的正-仲转化	146	一、绝热结构	215
三、中、小型氢液化装置	148	二、绝热结构性能的计算	215
四、大型氢液化装置	151	三、绝热层厚度的确定	216
第三节 氦液化装置	153	第四节 高真空绝热	217
一、氦原料气及其纯化	153	一、辐射换热	217

二、气体导热	218	三、G-M制冷机的结构及特性	254
第五节 真空粉末绝热及真空多层绝热	220	第五节 苏尔威制冷机	256
一、真空粉末绝热	221	一、苏尔威制冷机的工作过程	256
二、真空多层绝热	222	二、实际制冷量及主要参数的确定	258
参考文献	224	三、SV制冷机的结构和特性	259
第十八章 低温制冷机	226	第六节 低温制冷机装置及应用	260
第一节 概述	226	一、用于液化气体的装置	260
第二节 斯特林制冷机	227	二、低温泵装置	264
一、斯特林制冷机的工作过程	227	三、用于电子器件的冷却	265
二、斯特林制冷机的热力计算 及参数选择	232	第七节 脉管制冷	265
三、斯特林制冷机的结构及特性	239	第八节 氦稀释制冷机	267
第三节 维勒米尔制冷机	244	一、 ^3He - ^4He 溶液的性质 和稀释制冷机原理	267
一、VM制冷机的工作过程	244	二、稀释制冷机的流程	269
二、VM制冷机的计算	246	三、稀释制冷机的结构及设备	269
三、VM制冷机的结构及特性	248	参考文献	271
第四节 吉福特-麦克马洪制冷机	249	法定计量单位及其与工程制 单位的换算	274
一、G-M制冷机的工作过程	249		
二、G-M制冷机实际循环的分析	252		

第四篇 气体液化与分离装置

第十一章 空气的净化

第一节 概 述

低温装置中原料气内一般都含有杂质，这些杂质必须尽可能地除去。净除杂质的目的是：（1）防止杂质在局部部位集结，致使设备、管路堵塞，装置不能正常运行；（2）除去危险的爆炸物；（3）提高原料气的纯度；（4）防止杂质腐蚀设备。因此，气体的净化设备是低温装置中不可缺少的一个组成部分。

气体的净化主要采用下列几种方法：

1. 吸收法 吸收法是以溶液吸收为基础，使气体与吸收溶液相接触，气体中的杂质被吸收剂吸收。被吸收的物质可以溶解于液体中，或者与液体起化学反应。

2. 吸附法 利用固体表面对气体的吸附特性将杂质气体去除掉。

3. 冷凝法 是将气体转变成液体的一种方法。由于多组分混合气体中各组分的冷凝温度不同，在冷凝过程中高沸点组分先凝结出来，混合气体的组成也就发生了变化，得到一定的分离。用冷凝法可脱除沸点高的杂质，冷却温度越低，这些杂质被清除的程度就越高，但消耗的费用也就越大。

4. 催化法 通过某种适当的化学反应，使杂质或者转化成无害的化合物，因而可留在气体内；或者转化成比原来的杂质更易去除的化合物，以便达到脱除的目的。

杂质的化学催化都是使用固体催化剂，由非均相催化反应实现的。

5. 薄膜渗透法 利用有些薄膜对各种气体组分具有选择性扩散的特点来除去杂质。

上述方法都可用来清除气体杂质。如果气体内含有固体尘粒，它能引起设备的磨损、堵塞和密封不良，此时需设置固体尘粒的净除装置。

在这一章中，主要介绍空气的净化，即空气中固体尘粒、水蒸汽和二氧化碳的净除。

第二节 除 尘

从气体与微粒混合物中分离粒子的操作称除尘。从气体中分离、捕集微粒的装置称除尘装置。

在不同地区空气含尘浓度如表11-1所示，

表11-1 在不同地区空气的含尘量

地 区	农 业 区	海 岸 区	工 业 区	大 城 市	荒 野 区
灰尘量(mg/m ³)	0.05~0.2	0.05~0.5	0.5~5	0.1~1	1(~500)①
颗粒大小(μm)	1~5	0.1~5	0.5~20(40)①	0.5~3(20)①	5(~500)①

① 短期高峰值。

一般直径为100μm以上的粒子由于重力作用会很快地降落殆尽，不存在分离问题。另一方面0.1μm以下的粒子不致引起严重问题。目前作为除尘对象的粒径在100μm~0.1μm之间，其中10μm以上的粒子易于分离，困难的是10~0.1μm特别是1μm以下的粒子。

除尘装置性能包括流量、压力损失以及除尘效率 η ，此外还包括除尘装置的耐用年限以及保养难易等。

除尘效率 η 用来表示除尘装置的除尘性能。除尘效率 η 的定义可用下式表示

$$\eta = \frac{G_2}{G_1} \times 100\% = \frac{c_i - c_o}{c_i} \times 100\% \quad (11-1)$$

式中 G_1 ——进入除尘装置的粉尘总重量(g/h)；

G_2 ——除尘装置所捕集的粉尘重量(g/h)；

c_i ——进入除尘装置的空气含尘浓度(g/Nm³)；

c_o ——排出除尘装置的空气含尘浓度(g/Nm³)。

有时采用通过率 $P [=100 - \eta(\%)]$ 来表示装置的除尘性能。

对于一定的除尘装置，除尘效率随着需捕集的尘粒种类、粒度、浓度和操作条件的不同而变化。

一、除尘装置的种类

除尘装置是利用作用于粒子的重力、惯性力、离心力、扩散粘附力和库仑力等作用力中的一种或几种进行除尘，其主要型式有：

1. 惯性除尘装置 是使气流进行急剧的方向转变，借尘粒本身的惯性力作用而将其分离的装置。

2. 过滤除尘装置 是使含尘气体通过滤料，将尘粒分离捕集的装置。

3. 离心力除尘装置 是使含尘气体作旋转运动，借作用于尘粒上的离心力，把尘粒从气体中分离出来的装置。

4. 洗涤除尘装置 是用液滴、液膜、气泡等洗涤含尘的气体，使尘粒粘附和相互凝集，而将尘粒进行分离的装置。

5. 电除尘装置 是用高压直流电源造成适当的不均匀电场，利用该电场中的电晕放电，使气体中的尘粒带上电荷，然后，借助于库仑力把这些带电尘粒分离捕集于集尘极上的装置。

上述几种除尘装置的主要参数如表11-2所示。它们的结构示例如图11-1所示。

二、过滤除尘装置

根据过滤精度的高低，气体过滤器分为粗过滤器、中效过滤器和高效过滤器。

一般来说，粗过滤器主要用于除去粒径5μm以上的大颗粒尘埃，容尘量大，阻力小，过滤效率差。中效过滤器用于除去粒径1μm左右的尘埃颗粒，容尘量和过滤效率中等。高效过滤器可除去大于0.3μm的尘埃颗粒，容尘量较小，阻力较大，但是过滤效率高。

表11-2 各种除尘装置的主要参数

形 式	可能的捕集粒度 (μm)	压力损失 (Pa)	最适宜风速 (m/s)	设备费用
惯 性 除 尘	20~50	300~1000	5~10	小
离 心 除 尘	5~15	1000~2000	15~20	小
袋 式 过 滤 器	0.1~1	1000~2500	0.01~0.1	大
充填式过滤器	0.1~10	10~1000	0.1~3	中
洗 涤 除 尘	0.1~10	500~10000	5~100	中
电 除 尘	0.1~1	200~500	1~3	大

过滤除尘装置如图11-2所示，它有内部过滤和表面过滤两种方式。

(一) 内部过滤的过滤装置

把松散的滤料填充在框架内，作为过滤层，对含尘气体进行净化。尘粒是在过滤层内部被捕集的。通常这种过滤采用干式法，但也有在滤料上涂粘性油的湿式法。滤料上涂以薄层粘性油可增加其除尘效果。采用这种过滤方式时清除粘附的尘粒比较困难，所以当粘附的尘粒达到一定量时，要换上新的过滤材料。因此，这种方法主要用于净化含尘浓度低的气体。

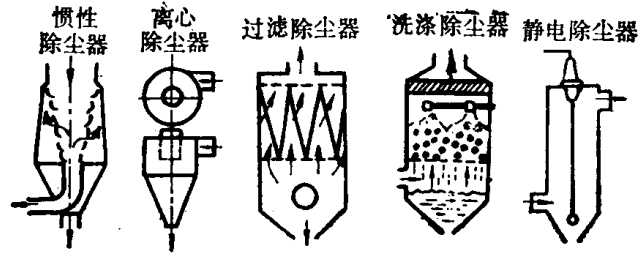


图11-1 几种除尘装置示例

下面介绍几种空压机使用的空气过滤器。

1. 拉西环过滤器 如图11-3所示，在钢制壳体内插入装有拉西环的盒，拉西环层的高度为60~70mm，环上涂过滤油。如果进入过滤器的空气中的固体尘粒含量在 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，净化后空气中固体尘粒含量能低于 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 。

空气速度应不超过 $0.3\sim 0.5\text{m/s}$ ，过滤器初始阻力为 $100\sim 150\text{Pa}$ ，当阻力达 $300\sim 400\text{Pa}$ 时，拉西环应用煤油清洗。

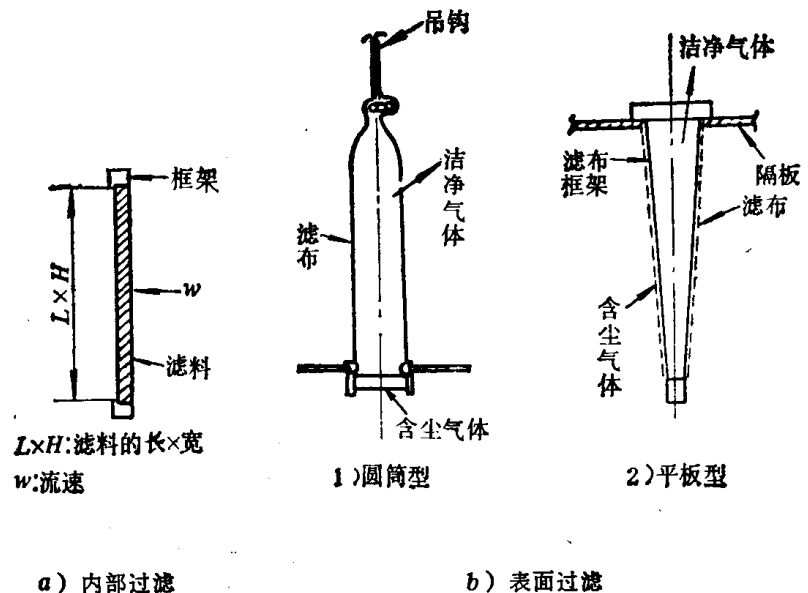


图11-2 过滤除尘的过滤方式

2. 干带式过滤器 结构如图11-4所示。在干带上下两端装有滚筒，当阻力超过设定值时，通过联锁装置使两只滚筒转动，将下滚筒的新带转入工作状态，脏带存入上滚筒，用完后卸下上滚筒进行清洗。

(二) 表面过滤的过滤装置

用滤布或滤纸等较薄的滤料，将最初粘附在表面的尘粒层（初层）作为过滤层，进行微

粒的捕集。当尘粒的粘附达到一定量时,要进行清除。被清除的是集尘层,而初层大部分仍残留下来,所以待初层形成之后,能捕集 $1\mu\text{m}$ 以下的微粒。

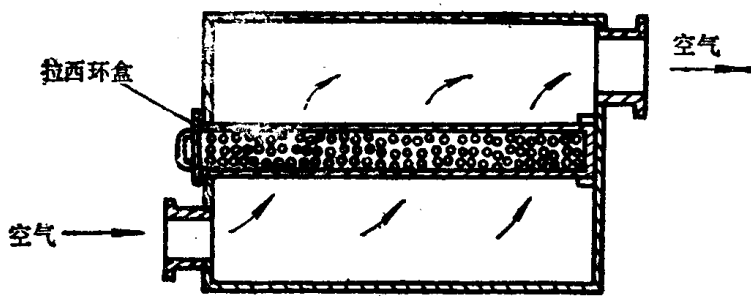


图11-3 拉西环过滤器

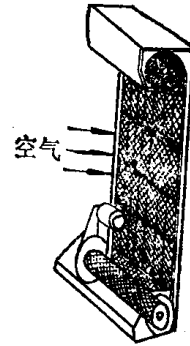


图11-4 干带式过滤器

普通化学纤维布的网孔为 $20\sim 50\mu\text{m}$, 用这样的滤布, 只要设计得当, 就是 $0.1\mu\text{m}$ 的尘粒, 也能获得接近100%的除尘效率。如采用织物滤布作表面过滤, 过滤速度一般取在 $0.3\sim 10\text{cm/s}$ 范围内。愈是微细的尘粒, 愈要取小值。

袋式过滤器是属于表面过滤方式的一种装置, 是应用最广的过滤除尘装置。如图11-5所示, 它是用除尘室内悬吊的许多滤袋来净化含尘气体。滤布、清灰机构、过滤速度等都会影响除尘性能。目前用于常温的滤布材质有棉、羊毛、维尼龙、涤纶等, 用于高温 (达 523K) 的有玻璃纤维, 其平均寿命一般为1~2年左右。

滤袋的形状可做成各种各样, 随除尘器的结构型式而定, 目前常用的是圆袋形。但平板形滤袋排列紧凑, 体积小, 近来应用愈来愈多。

在袋式过滤器中, 随着滤布上捕集的尘粒层变厚, 压力损失逐渐增加, 除尘效率逐渐下降。当压力损失达 1500Pa 左右时, 便要对捕集的尘粒层进行清灰。清灰机构有振动型、逆气流型、气环反吹型、脉冲喷吹型等型式, 如图11-6所示, 它们或者间歇操作, 或者连续清灰。在气环反吹型中, 喷射压缩空气的隙缝气环沿圆筒形滤袋外侧上、下移动, 把捕集的尘粒清除下来。在脉冲喷吹型中, 其圆筒形滤袋的上端设置文丘里管, 每隔一定时间按顺序从喷嘴喷出压缩空气, 以清除捕集的尘粒。

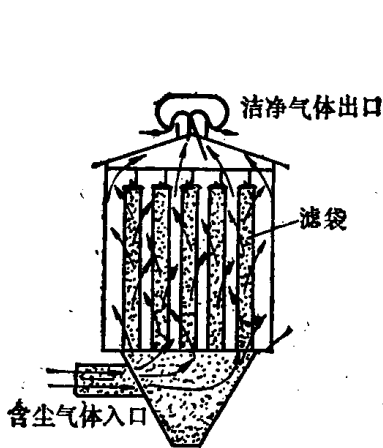


图11-5 袋式过滤器

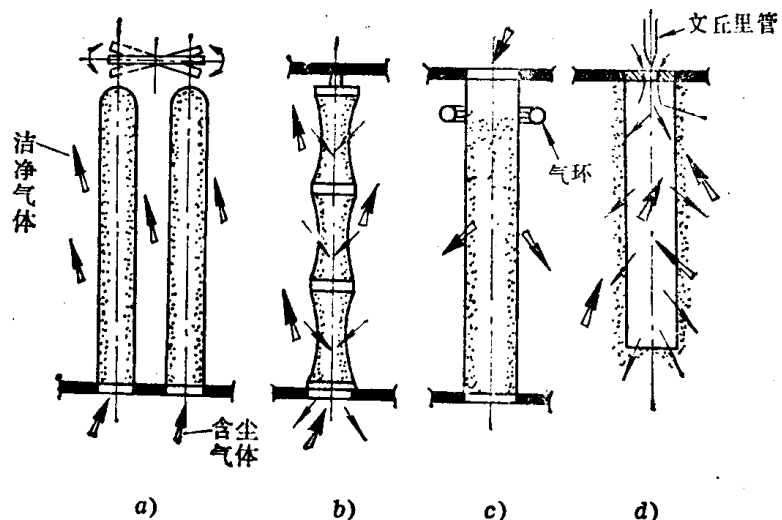


图11-6 清灰机构

a) 振动型 b) 逆气流型 c) 气环反吹型 d) 脉冲喷吹型

(三) 中效过滤器

中效过滤器的过滤材料主要有：多孔陶瓷、微孔玻璃、普通粉末冶金、合成纤维滤芯、普通滤膜和滤纸等。

1. 多孔陶瓷过滤器 多孔陶瓷的化学稳定性好，比表面积大，透气能力强，而且既耐高温，又耐低温，可以清洗再生，反复使用，但易损坏，抗震能力较差，有的还有“掉粉”现象，在滤料较厚时，阻力较大。多孔陶瓷的过滤能力和过滤效率取决于气孔的大小和气孔率的多少。

陶瓷管过滤器的结构如图11-7所示，此类陶瓷管过滤器的工作压力为1000kPa，气体处理量为120m³/h。

2. 粉末冶金多孔管 粉末冶金多孔材料具有优良的透过性能，过滤速度大；孔径和孔隙度可以控制，过滤精度可以达到很高的程度；比表面积大；既耐高温，又耐低温；选择合适材质可以耐腐蚀，便于加工，结构上可变性大。

粉末冶金多孔材料的过滤精度，是以气体中固体尘粒透过多孔材料的最大尺寸表示之，粉末冶金可以制作过滤精度为100Å到100μm的过滤元件。目前国产的铜、镍、蒙乃尔、不锈钢、钛……等粉末冶金过滤元件，过滤精度通常为1~70μm，也能制作孔径小于1μm的多孔体。通常可以按气体中尘粒直径的10倍左右选用过滤元件的微孔直径。

粉末冶金过滤元件应定期进行再生，常用的再生方法是反吹法，一般反吹气体压力高于过滤时工作压力50~100kPa，反吹时间30~60s。经过若干次反吹后，透气能力降低15~20%。必要时应对过滤元件进行化学清洗。

镍粉末冶金过滤材料的技术性能示于表11-3中。

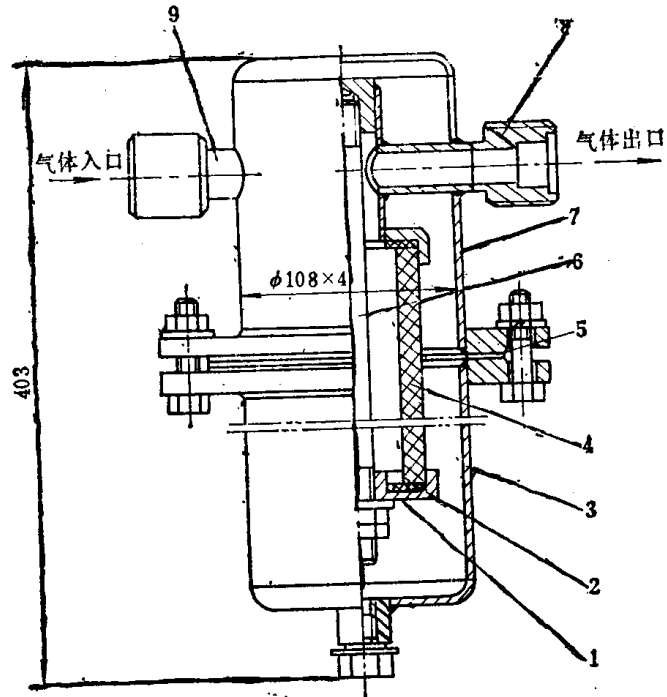


图11-7 陶瓷管过滤器

1—管座 2、5—密封垫圈 3—下筒体 4—陶瓷过滤管
6—拉杆 7—上筒体 8—出气孔 9—进气管

表11-3 多孔镍管技术性能

粉末颗粒 大 小 (μm)	相对透气率 $L/(\text{min} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mmHg})$	平均孔径 (μm)	最大孔径 (μm)	耐压强度 $10^3(\text{kPa})$	孔隙率 (%)	壁厚 (mm)
6~12	1.0×10^{-5}	2~3	3.0~3.4	2.5	10~30	1.0~1.5
12~18	5.0×10^{-5}	2~5	4.3~4.9	2.5	10~30	1.0~1.5
18~25	1.0×10^{-4}	3~8	10.1~16.5	2.5	25~30	1.0~1.5
25~50	3.0×10^{-4}	5~10	10.8~13.9	2.5	25~30	1.0~1.5
50~100	1.0×10^{-3}	10~20	22.5~27.9	2.5	25~30	2.0~2.5

(续)

粉末颗粒 大 小 (μm)	相对透气率 $L/(\text{min} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mmHg})$	平均孔径 (μm)	最大孔径 (μm)	耐压强度 $10^3(\text{kPa})$	孔隙率 (%)	壁厚 (mm)
100~150	5.0×10^{-3}	20 24	42.9~55.2	1.5	25~30	2.0~2.5
150~200	7.0×10^{-3}	30~50	55.4~68.4	1.5	25~30	2.0~2.5
200~250	1.0×10^{-2}	40~60	77.5~85.3	1.0	25~30	2.5~3.0
250~300	1.4×10^{-2}	50~70	—	1.0	25~30	2.5~3.0

注 1mmHg=133.3Pa.

粉末冶金管过滤器的结构如图 11-8 所示。其主要技术性能为：过滤面积： $\sim 0.5\text{m}^2$ ；工作压力：800kPa；处理气量：700 m^3/h 。

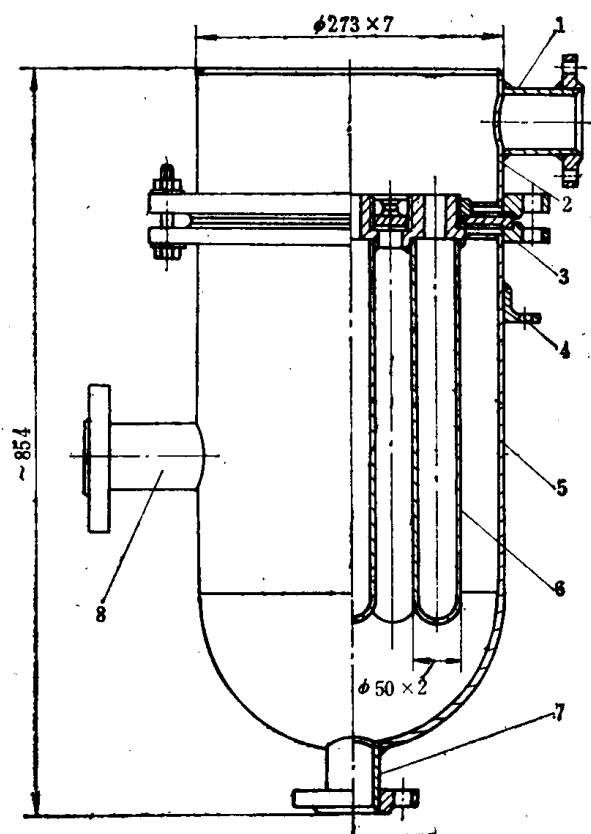


图11-8 粉末冶金管过滤器

1—出气管 2—筒盖 3—密封垫圈 4—支架 5—筒体
6—粉末冶金管 7—排污管 8—进气管

第三节 空气的干燥

空气的干燥，即去除空气中的水蒸汽。空气中所含的水分量、与空气的温度及相对湿度有关。经冷却后的压缩空气中所含的水蒸汽量常常呈饱和状态。

常压下空气中水蒸汽含量与露点温度的关系见表11-4。

表11-4 常压下空气含湿量表 ($p=101.3\text{kPa}=760\text{mmHg}$)

露点 (K)	饱和蒸汽压, Pa (mmHg)	水汽量 (g/m ³)	含湿量 (ppm, 体积)	含湿量 (ppm, 重量)	相对含湿量 φ (%)(293K)
203	0.259 (1.94×10^{-3})	2.8×10^{-3}	2.55	1.64	1.12×10^{-2}
205	0.347 (2.6×10^{-3})	3.7×10^{-3}	3.44	2.13	1.46×10^{-2}
207	0.465 (3.49×10^{-3})	4.8×10^{-3}	4.6	2.84	1.95×10^{-2}
209	0.619 (4.64×10^{-3})	6.5×10^{-3}	6.1	3.71	2.54×10^{-2}
211	0.818 (6.14×10^{-3})	8.5×10^{-3}	8.07	5.01	3.43×10^{-2}
213	1.08 (8.1×10^{-3})	1.1×10^{-2}	0.6*	6.69	4.58×10^{-2}
215	1.41 (1.06×10^{-2})	1.4×10^{-2}	14.0	8.67	5.61×10^{-2}
217	1.84 (1.38×10^{-2})	1.86×10^{-2}	18.3	11.6	7.94×10^{-2}
219	2.37 (1.78×10^{-2})	2.37×10^{-2}	23.4	14.5	9.92×10^{-2}
221	3.07 (2.3×10^{-2})	3.1×10^{-2}	31.1	18.8	1.29×10^{-1}
223	4.00 (3.0×10^{-2})	4.0×10^{-2}	39.4	24.2	1.66×10^{-1}
225	5.04 (3.78×10^{-2})	5.0×10^{-2}	49.7	30.7	2.1×10^{-1}
227	6.41 (4.81×10^{-2})	6.25×10^{-2}	63.2	39.3	2.69×10^{-1}
229	8.18 (6.09×10^{-2})	7.87×10^{-2}	80	49.2	3.37×10^{-1}
231	10.2 (7.68×10^{-2})	9.6×10^{-2}	10	62.7	4.29×10^{-1}
233	12.9 (9.66×10^{-2})	1.23×10^{-1}	127	79.1	5.41×10^{-1}
235	16.1 (1.21×10^{-1})	1.5×10^{-1}	159	98.6	6.75×10^{-1}
237	20.1 (1.51×10^{-1})	1.86×10^{-1}	198	123	8.4×10^{-1}
239	24.9 (1.87×10^{-1})	2.3×10^{-1}	246	156	1.067
241	30.9 (2.32×10^{-1})	2.84×10^{-1}	340	189	1.33
243	38.1 (2.86×10^{-1})	3.45×10^{-1}	376	234	1.60
245	46.7 (3.51×10^{-1})	4.2×10^{-1}	462	287	1.96
247	57.3 (4.3×10^{-1})	5.1×10^{-1}	566	351	2.40
249	70.1 (5.26×10^{-1})	6.22×10^{-1}	691	431	2.95
251	85.3 (6.4×10^{-1})	7.4×10^{-1}	841	524	3.58
253	104 (7.78×10^{-1})	9.0×10^{-1}	1020	635	4.34
255	125 (9.29×10^{-1})	1.08	1230	756	5.17
257	151 (1.132)	1.3	1490	925	6.33

(续)

露 点 (K)	饱和蒸气压, Pa (mmHg)	水汽量 (g/m ³)	含 湿 量 (ppm, 体积)	含 湿 量 (ppm, 重量)	相对含湿量 φ (%)(293K)
259	181 (1.361)	1.54	1790	1110	7.635
261	218 (1.632)	1.84	2140	1340	9.17
263	260 (1.95)	2.27	2560	1600	10.95
265	311 (2.33)	2.58	3060	1910	13.07
267	361 (2.705)	3.05	3640	2260	15.19
269	437 (3.28)	3.6	4320	2696	18.44
271	517 (3.88)	4.23	5100	3198	21.88
273	610 (4.579)	4.8	6020	3770	25.79
275	708 (5.294)	5.6	6960	4363	29.85
277	813 (6.101)	6.3	8026	5036	34.45
279	935 (7.013)	7.26	9230	5793	39.63
281	1072 (8.045)	8.2	11327	6655	45.53
283	1228 (9.209)	9.4	12117	7629	52.19
285	1402 (10.52)	10.6	13842	8730	59.72
287	1598 (11.99)	12.06	15776	9970	68.20
289	1817 (13.63)	13.6	17934	11359	77.71
291	2063 (15.48)	15.36	20368	12933	88.48
293	2338 (17.54)	17.3	23079	14617	100
295	2643 (19.83)	19.4	26092		
297	2983 (22.38)	21.77	29447		
299	3360 (25.21)	24.4	33171		
301	3779 (28.35)	27.2	37304		
303	4242 (31.82)	30.4	41868		
305	4754 (35.66)	33.8	46921		
307	5319 (39.9)	37.6	52500		
309	5940 (44.56)	41.7	58631		
311	6624 (49.69)	46.2	65381		
313	7374 (55.32)	51.5	77789		

低温一

(续)

露点 (K)	饱和蒸气压, Pa (mmHg)	水汽量 (g/m³)	含湿量 (ppm, 体积)	含湿量 (ppm, 重量)	相对含湿量 φ(%) (293K)
315	8198 (61.5)	56.5	80921		
317	9091 (68.2)	62.3	89736		
319	10084 (75.65)	68.7	99539		
321	11158 (83.71)	75.6	110144		
323	12332 (92.51)	83.06	121723		

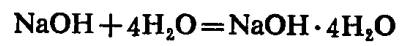
不同温度时，压力100kPa~1×10⁵kPa空气中水分的含量示于图11-9上。

工业上，压缩空气的干燥方法有：

1. 化学法
氯化钙 259 K
苛性钠 254 K
苛性钾 215 K
2. 吸附法
硅胶 221 K
活性氧化铝 209 K
分子筛 203 K
3. 冻结法
氨液冷冻 233 K
蓄冷器内冻结 195 K
- 已干燥空气的露点

一、化学法干燥空气

化学干燥空气的方法是以固体苛性钠（主要应用的化学吸收剂）、苛性钾、氯化钙等能从空气中有效地吸收水分的特性为基础的。以苛性钠为例，这个过程的方式进行如下



理论上吸收1kg水分需要0.56kgNaOH。实际上由于苛性钠不能完全利用,故它的单位消耗量约为0.9~1.0kg/kg水分。

空气的干燥是在钢质的干燥瓶中进行，图11-10为干燥瓶的剖面图。瓶1中插入具有可拆卸的栅格3的钢制套筒2。套筒内的栅格上装有粒度为25~40mm的苛性钠块。盖4下面的空间装有棉花过滤层11。吹除阀门10用来定期地将积聚于瓶下部的碱溶液吹出。

视进气量的多少，干燥器组可由一个干燥瓶或若干个干燥瓶组成。

二、吸附法干燥空气

空气吸附干燥系利用具有吸湿性能的吸附剂来吸收空气中的水蒸汽,以达到干燥的目的。常用的吸附剂有硅胶、5A和13X型分子筛、活性氧化铝。

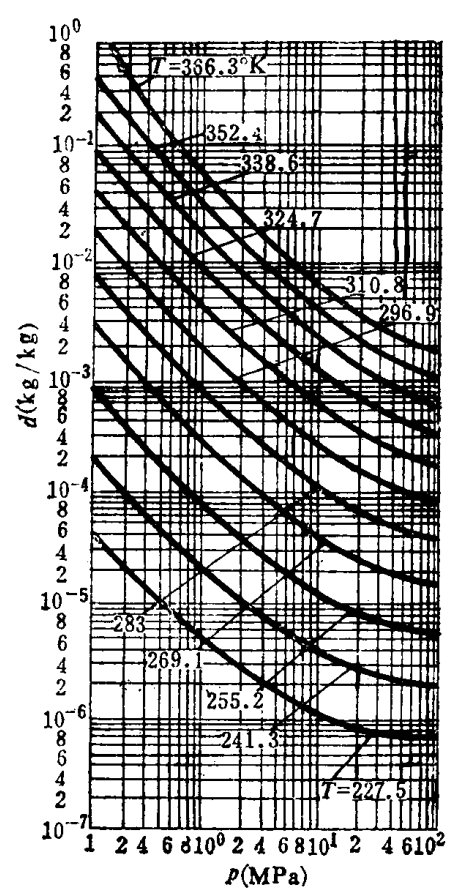


图11-9 不同压力下压缩空气
中饱和含湿量

空气经过吸附剂层时,被吸附剂吸附的水蒸汽量与许多因素有关,主要的因素是:空气的温度和湿度,空气的流动速度,吸附剂层的高度以及吸附剂再生的完善程度。

空气的温度对吸附剂的吸附能力有重大影响,温度升高,吸附剂吸附容量减少。图11-11表示了温度对各种吸附剂吸水量的影响。

图11-12是几种吸附剂的吸附等温线。从图可知,在相对湿度小于30%时,分子筛的吸水量比硅胶和活性氧化铝都高;随着相对湿度的下降,分子筛的优越性越显著。但在相对湿度超过40%时最好用硅胶。

干燥吸附器内气流速度增加时吸附剂的吸水量要降低,如表11-5所示。

空气通过干燥器的线速度 w_v (空塔速度) 推荐如下:

分子筛	$w_v < 0.05 \text{ m/s}$
硅胶	$w_v = 0.08 \sim 0.25 \text{ m/s}$
活性氧化铝	$w_v = 0.03 \text{ m/s}$

吸附剂使用到一定时间之后,再生效果的好坏对吸附器的工作性能有很大影响。吸附剂的再生程度,主要决定于再生气体的干燥度和再生温度。图11-13是分子筛、硅胶和活性氧化铝的再生气温度及含水量与干燥度的关系。如以露点为273 K的再生气体在573 K温度下再生分子筛时,残余水分为2%,然后在298 K下进行吸附干燥,在理论上可以得到193 K露点的干燥气体。再生温度为423 K时,则残余水分为5%,以同样的原料气通入后,仅可获得露点为218 K的干燥气体。

再生气体的速度换算到温度为293 K时,常采用 $1 \sim 2 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ 值。

吸附干燥装置中的吸附剂的再生方法以往常用加热再生,目前则用变压吸附技术的无热再生。此外,还发展了微热再生,用加热设备提高逆向冲洗再生气的温度,然后去再生吸附剂,这样可以延长工作周期,在同样干燥度下,再生气耗量可以降低。微热再生方法综合运用了变温吸附和变压吸附的长处,有明显的优越性。表11-6是三种再生方法的比较。

经过反复加热再生,吸附剂会产生变劣现象,其原因是:(1) 吸附剂的表面被碳、聚合物、化合物所覆盖;(2) 由于半熔融使部分细孔破坏而消失;(3) 由于化学反应使结晶细粒遭到破坏。分子筛随再生次数增加吸附能力的下降情况如图11-14所示。

设计上长期使用的吸附剂因变劣引起吸附能力的降低为初期吸附量的10~30%。

常用的吸附干燥剂的设计容量的经验数据如表11-7所示。

图11-15为960 m³/h中压空气干燥吸附器。它是一圆柱形容器,内装5A球形分子筛625 kg,上、下进出口处设置过滤网,用来清除气流中的吸附剂细粒。吸附器外有冷却水套,

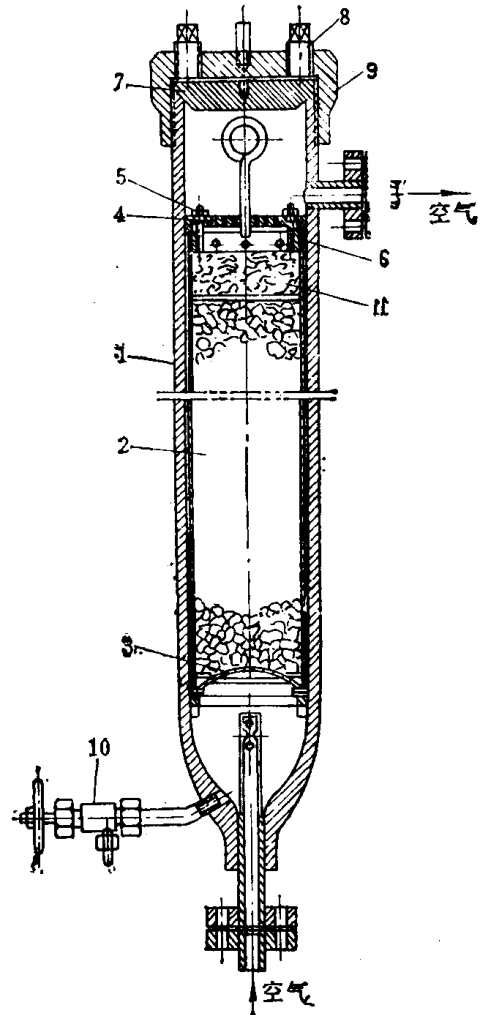


图11-10 干燥瓶的剖面图

- 1—瓶 2—钢套筒 3—栅格 4—套筒盖
5—螺栓 6—气密橡胶环 7—瓶底 8—螺栓
9—外盖 10—吹除阀门 11—棉花过滤层

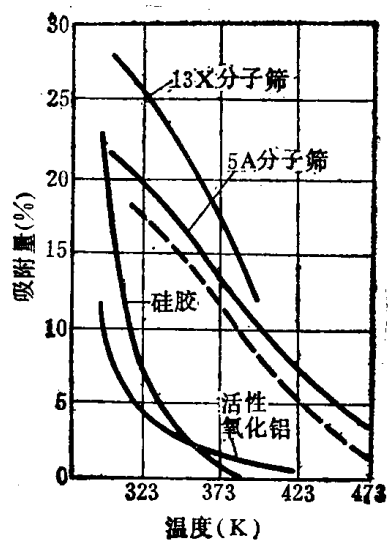


图11-11 10mmHg (1.33kPa) 压力下各种吸附剂的吸附等压线 (虚线表示5A分子筛在含2%残留水分时的吸附情况)

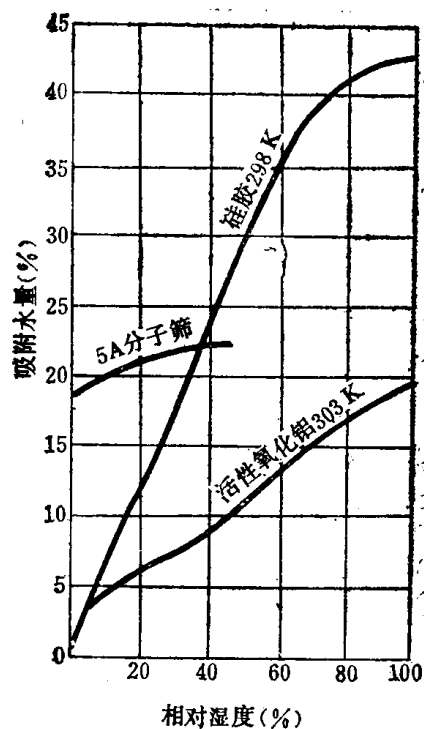


图11-12 几种吸附剂在不同相对湿度下的平衡吸附量

表11-5 线速度对吸附剂吸水量的影响 (重量%)

吸 附 剂	线 速 度 (m/min)				
	15	20	25	30	35
分子筛(绝热)	17.6	17.2	17.1	16.7	16.5
硅胶(恒温)	15.2	13.0	11.6	10.4	9.6

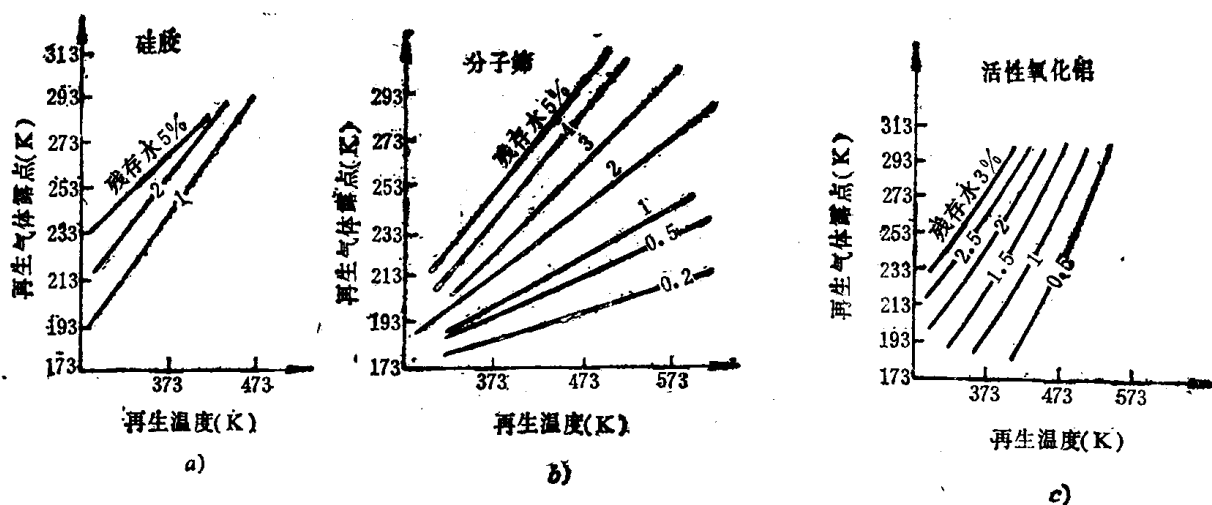


图11-13 再生温度和再生气露点对残留水量的影响