



# 压缩空气 干燥与净化设备

黄虎 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 压缩空气干燥与净化设备

黄 虎 主编  
吴未立 沈国强 参编



机械工业出版社

压缩空气因其具有易储存、易控制、流动性好及安全、环保等特点,是仅次于电力的第二动力源,被广泛应用于国民经济的众多领域。本书介绍了压缩空气冷冻干燥设备的热工基础和设计方法;重点介绍了压缩空气冷冻干燥机主要设备的设计及应用计算机辅助设计的设计结果;全面介绍了吸附式干燥器的工作原理、设计方法;不同吸附方法的对比,以及复合式压缩空气干燥设备的特点;介绍了压缩空气净化流程中的各种过滤器和除油设备的原理;在此基础上,列举了压缩空气系统在不同领域中的应用。

本书可供从事压缩空气干燥与净化设备工作的专业技术人员参考,也可供高等院校制冷专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

压缩空气干燥与净化设备/黄虎主编. —北京:机械工业出版社, 2004.10

ISBN 7-111-15327-8

I. 压... II. 黄... III. ①压缩空气—干燥—设备  
②压缩空气—气体净化设备 IV. TH41

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第098335号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:蒋有彩 版式设计:冉晓华 责任校对:李汝庚

封面设计:王伟光 责任印制:石 冉

北京中兴印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第1版第1次印刷

850mm×1168mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·8.25印张·218千字

0 001—3 500册

定价:19.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

压缩空气因其具有易储存、易控制、流动性好及安全、环保等特点，是仅次于电力的第二动力源，被广泛地应用于电力、纺织、冶金、化工、建材、制药及机械制造等很多领域。随着各类用户对压缩空气气源质量要求的提高，各种压缩空气干燥及净化设备也被应用于使用压缩空气的各种场所，保证了用气设备高效、可靠地运行，以及用气产品的质量。国外自1952年就采用吸附式干燥器对压缩空气进行后处理。20世纪60年代中期，出现了采用冷冻的方法对压缩气体进行干燥的冷冻式压缩空气干燥器。我国自20世纪80年代中期和90年代初期，制订了一系列有关压缩空气质量的标准与规范，如：GB/T 4830—1984《工业自动化仪表气源压力范围和质量》、GB/T 10893—1989《压缩空气干燥规范与实验》、JB/T 5967—1991《气动元件及系统用空气介质质量等级》、GB/T 13277—1991《一般用压缩空气质量等级》、GB/T 12919—1991《船用控制气源净化装置》等，对于干燥净化气源的使用起到很大的规范与促进作用。国内压缩空气干燥与净化设备的制造，在20世纪90年代得到了很大的发展，其产品质量与生产水平已不断接近或赶上国外进口产品。

为了适应我国压缩空气干燥与净化设备生产及使用的需要，作者集多年从事压缩空气干燥与净化工作的实践和理论研究，编写了《压缩空气干燥与净化设备》一书。书中系统地介绍了压缩空气冷冻干燥机的工作原理与特点；压缩空气冷冻干燥机系统及各主要部件的设计与选型方法；提供了自行编写的冷冻干燥机热力计算，预冷器、蒸发器、冷凝器设计软件进行压缩空气冷冻干燥机设计的示例；系统地介绍了各类吸附式干燥的方法；压缩空气净化的方法；以及压缩空气后处理设备在工程上的应用。在附

录中，还列有湿空气性质表，以及 R22、R134a、R407C 的饱和性质表。

本书可供从事压缩空气干燥与净化设备的工程技术人员和压缩空气的使用人员阅读与参考，也可供高等院校制冷专业的师生参考。

本书由黄虎主编，吴未立、沈国强参编，全书由黄虎统稿。

感谢西安交通大学邢子文教授热情为本书作序！

压缩空气干燥与净化的技术在不断发展，由于作者水平与知识上的局限，书中难免存在不妥之处，期望广大读者予以指正。

黄 虎

2004年2月于  
南京师范大学

# 序

随着国民经济的持续发展和人民生活水平的不断提高，各种应用场合对压缩空气品质的要求也越来越高。然而，由各种压缩机提供的压缩空气中，都不可避免地存在着水分、润滑油及固体颗粒等各种污染物。因此，为了最终得到能满足要求的高品质压缩空气，就必须配置干燥和净化等压缩空气后处理设备。

近十年来，压缩空气干燥与净化设备的生产与使用，在我国获得了快速的发展。有关制造厂商和用户迫切需要相应的理论知识和实践经验，用于指导这类设备的设计和使用，《压缩空气干燥与净化设备》一书的出版，能很好地满足这一需求。

本书内容全面，书中不仅详细介绍了冷冻干燥机、吸附式干燥器及常用过滤设备的原理、设计方法、使用知识，还提供了湿空气物性、制冷循环及制冷剂替代等多方面的基础理论。另外，附录中给出的有关表格数据，也都十分方便于读者使用。

本书的另一个特点是实用性强，书中不仅提供了有关设备的设计步骤和选型原则，还给出了多种工程应用实例。读者按照书中的步骤和原则，即可设计出性能优越的产品和设备。此外，书中还介绍了这些设备使用过程中应注意的问题，对于设备的使用者也有很大的帮助。

另外，本书在系统总结有关经验和知识的同时，还有很多创新和发展，特别是自主开发的冷冻干燥机设计软件，对于提高我国这类产品的性能水平做出了独特的贡献，也为广大设计人员提供了一种高效快捷的设计工具。

本人与黄虎博士相识多年，并曾有过数次合作，对他认真负责和精益求精的工作作风印象十分深刻。在本书的写作中，黄虎等作者的这种作风也得到了充分的体现。我深信这本书的问世，

#### IV

必将对我国压缩空气干燥与净化设备行业的发展，起到巨大的促进作用，对相关设计和使用人员也会有很大帮助。

邢子文  
2004年2月于  
西安交通大学

## 本书主要符号、名称及单位

$A$	面积 ( $\text{m}^2$ )
$a$	热扩散率 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ); 动吸附量
$c$	比热容 [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
$d$	含湿量 [ $\text{g}/\text{kg}(\text{干})$ ]
$E$	能耗 ( $\text{kJ}$ )
$f$	沿程阻力系数、局部阻力系数
$g$	重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
$Gr$	格拉晓夫数
$h$	比焓 ( $\text{J}/\text{kg}$ ); 表面传热系数 [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]
$K$	传热系数 [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]
$M$	摩尔质量 ( $\text{kg}/\text{mol}$ )
$m$	质量 ( $\text{kg}$ )
$Nu$	努塞尔数
$Pr$	普朗特数
$P$	功率 ( $\text{W}$ )
$p$	压力 ( $\text{Pa}$ )
$Q$	热量 ( $\text{W}$ )
$q_m$	质量流量 ( $\text{kg}/\text{s}$ )
$q_v$	体积流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$R$	摩尔气体常数 [ $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ]
$Re$	雷诺数
$R_g$	气体常数 [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
$r_s$	热阻 ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ )
$s$	比熵 [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]



$T$	热力学温度 (K)
$t$	摄氏温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$u$	比热力学能 (J/kg); 流速 (m/s); 空塔线速 (m/s)
$V$	体积 ( $\text{m}^3$ )
$v$	比体积 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
$W$	功 (J)
$w$	比功 (J/kg)
$\alpha_V$	体胀系数 ( $\text{K}^{-1}$ )
$\beta$	斯-玻尔兹曼系数 [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]
$\epsilon$	制冷系数; 预冷器与蒸发器的负荷比
$\zeta$	析湿系数
$\eta$	效率; 热力学完善度
$\theta$	华氏温度 ( $^{\circ}\text{F}$ )
$\kappa$	等熵指数
$\lambda$	热导率 [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]; 输气系数
$\mu$	粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
$\rho$	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\nu$	运动粘度 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\varphi$	相对湿度
$\chi$	干度
$\Psi$	比相对湿度 ( $\text{Pa}^{-1}$ )

下角标:

a	大气; 空气中的干空气参数
c	冷凝
e	蒸发
g	表压
h	理论
v	真空; 湿空气中水蒸气的物理量
s	饱和状态; 标准状态; 实际状态

# 目 录

序

前言

本书主要符号、名称及单位

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 压缩空气干燥净化装置的发展 .....	1
1.2 压缩空气干燥净化的方法 .....	6
<b>第 2 章 压缩空气冷冻干燥机的热工基础</b> .....	9
2.1 热力学基础 .....	9
2.1.1 基本状态参数 .....	9
2.1.2 热力学第一定律 .....	11
2.1.3 热力学第二定律与熵 .....	12
2.1.4 理想气体 .....	13
2.1.5 蒸汽的基本知识 .....	15
2.1.6 热力过程与循环 .....	17
2.2 传热学基础 .....	20
2.2.1 稳态导热 .....	20
2.2.2 对流换热 .....	23
2.2.3 辐射换热 .....	26
2.2.4 传热过程与对数平均温差 .....	27
<b>第 3 章 湿空气的物理性质及计算</b> .....	29
3.1 湿空气的物理性质 .....	29
3.2 湿空气的焓湿图 .....	32
3.3 空气状态参数的计算 .....	33

<b>第 4 章 蒸气压缩制冷循环</b> .....	38
4.1 蒸气压缩制冷的理论循环 .....	38
4.1.1 理想的制冷循环——逆卡诺循环 .....	38
4.1.2 单级蒸气压缩制冷的理论循环 .....	40
4.2 单级蒸气压缩制冷的实际循环 .....	44
4.2.1 液体过冷 .....	44
4.2.2 吸入蒸气的过热 .....	45
4.2.3 回热 .....	46
4.2.4 制冷系统各环节热交换及压力降对制冷循环的影响 .....	47
4.3 蒸发和冷凝温度对制冷循环的影响及制冷系统的工况 .....	50
4.3.1 冷凝温度不变, 蒸发温度下降对制冷循环的影响 .....	50
4.3.2 蒸发温度不变, 冷凝温度上升对制冷循环的影响 .....	51
4.3.3 制冷系统的工况 .....	52
4.4 二级压缩制冷循环和复叠式制冷循环 .....	52
4.4.1 一级节流不完全中间冷却二级压缩制冷循环 .....	53
4.4.2 二级节流完全中间冷却二级压缩制冷循环 .....	53
4.4.3 复叠式制冷循环 .....	54
<b>第 5 章 制冷剂与工质替代</b> .....	55
5.1 制冷剂种类与表达 .....	55
5.2 CFCs 及 HCFCs 制冷剂的替代 .....	56
5.3 制冷剂的性质及对制冷剂的要求 .....	57
<b>第 6 章 压缩空气冷冻干燥机的工作原理与热力计算</b> .....	60
6.1 压缩空气冷冻干燥机的工作流程 .....	60
6.2 压力露点与压缩空气质量等级 .....	62
6.3 压缩空气冷冻干燥机的热力计算 .....	64
6.3.1 压缩空气处理过程的热力计算 .....	65
6.3.2 压缩空气冷冻干燥机制冷系统热力计算 .....	67

6.3.3	冷冻干燥机预冷器与蒸发器的负荷分配 .....	70
6.3.4	压缩空气冷冻干燥机变工况性能预测 .....	71
<b>第 7 章</b>	<b>压缩空气冷冻干燥机换热器设计 .....</b>	<b>75</b>
7.1	压缩空气冷冻干燥机预冷器的设计 .....	75
7.1.1	压缩空气冷冻干燥机预冷器概述 .....	75
7.1.2	壳管式预冷器设计计算 .....	80
7.2	压缩空气冷冻干燥机蒸发器的设计 .....	92
7.2.1	压缩空气冷冻干燥机蒸发器概述 .....	92
7.2.2	管壳翅片式蒸发器的设计计算 .....	94
7.3	压缩空气冷冻干燥机冷凝器的设计 .....	100
7.3.1	压缩空气冷冻干燥机冷凝器概述 .....	100
7.3.2	风冷冷凝器的设计计算 .....	102
7.3.3	卧式壳管式水冷冷凝器设计计算 .....	106
<b>第 8 章</b>	<b>制冷压缩机及其在冷冻干燥机上的应用 .....</b>	<b>112</b>
8.1	制冷压缩机简介 .....	112
8.2	活塞式制冷压缩机 .....	115
8.2.1	活塞式制冷压缩机的工作原理 .....	116
8.2.2	活塞式制冷压缩机的基本性能参数 .....	121
8.2.3	压缩机的运行范围 .....	127
8.2.4	活塞式制冷压缩机的能量调节 .....	129
8.2.5	活塞式压缩机的润滑 .....	131
8.2.6	活塞式压缩机的保护 .....	133
8.3	滚动转子压缩机 .....	138
8.3.1	滚动转子压缩机的工作原理及型式 .....	138
8.3.2	滚动转子压缩机的特点 .....	141
8.3.3	滚动转子压缩机的能量调节 .....	142
8.4	涡旋压缩机 .....	144
8.4.1	涡旋压缩机的结构与原理 .....	144
8.4.2	封闭涡旋压缩机的工况与性能要求 .....	146
8.4.3	“柔性”涡旋压缩机 .....	147

8.4.4	涡旋压缩机的特点 .....	148
8.4.5	涡旋压缩机的能量调节 .....	149
8.5	螺杆压缩机 .....	149
8.5.1	双螺杆压缩机的结构与工作原理 .....	149
8.5.2	双螺杆压缩机的经济器运行 .....	151
8.5.3	双螺杆制冷压缩机的工况与性能要求 .....	153
8.5.4	双螺杆制冷压缩机的特点 .....	155
8.5.5	双螺杆压缩机的能量调节 .....	155
8.6	离心压缩机 .....	156
8.6.1	离心压缩机的结构与工作原理 .....	156
8.6.2	离心压缩机的喘振及防喘振的措施 .....	157
8.6.3	离心压缩机的特点 .....	158
8.6.4	离心压缩机的能量调节 .....	158
<b>第 9 章</b>	<b>制冷系统的节流元件 .....</b>	<b>159</b>
9.1	毛细管 .....	159
9.2	热力膨胀阀 .....	160
9.3	电子膨胀阀 .....	168
<b>第 10 章</b>	<b>压缩空气冷冻干燥机的辅助设备 .....</b>	<b>171</b>
10.1	干燥过滤器 .....	171
10.2	高压储液器 .....	172
10.3	吸气压力调节阀 .....	173
10.4	冷凝压力调节装置 .....	177
10.5	气水分离器 .....	179
10.6	排水阀 .....	181
<b>第 11 章</b>	<b>吸附式压缩空气干燥器 .....</b>	<b>183</b>
11.1	吸附式干燥原理 .....	183
11.2	吸附剂 .....	187
11.2.1	硅胶 .....	187

11.2.2	活性氧化铝 .....	188
11.2.3	分子筛 .....	188
11.3	吸附式压缩空气干燥器 .....	190
11.3.1	吸附式压缩空气干燥器概述 .....	190
11.3.2	加热再生吸附式干燥器 .....	194
11.3.3	无热再生吸附式干燥器 .....	200
11.3.4	微热再生吸附式干燥器 .....	202
11.3.5	影响吸附式干燥器的因素及各种吸附式干燥器对比 .....	207
11.3.6	复合式压缩空气干燥器 .....	213
<b>第 12 章</b>	<b>压缩空气净化设备 .....</b>	<b>216</b>
12.1	压缩空气净化设备概述 .....	216
12.2	常用过滤器 .....	217
<b>第 13 章</b>	<b>压缩空气干燥净化设备的应用 .....</b>	<b>220</b>
<b>附录</b> .....		<b>230</b>
附录 A	湿空气性质表 .....	230
附录 B	R22 饱和性质表 .....	234
附录 C	R134a 饱和性质表 .....	237
附录 D	R407C 饱和性质表 .....	242
附录 E	压缩空气干燥与净化术语中英文对照表 .....	244
<b>参考文献</b> .....		<b>247</b>

# 第 1 章 概 述

## 1.1 压缩空气干燥净化装置的发展

压缩空气作为动力源，被广泛地应用于电力、纺织、冶金、化工、建材、机械制造等许多领域。压缩空气具有易储存、易控制、流动性好及安全、环保的特点。因此，压缩空气也被认为是仅次于电力的第二动力源。

空气压缩机是产生压缩空气的装置。通过压缩机中容积的不断变化，对吸入的空气进行压缩，从而产生具有一定压力的压缩空气。压缩机后配套的后冷却器和气液分离器被认为是最早的压缩空气干燥净化装置。一般活塞压缩机的排气温度在  $140^{\circ}\text{C}$  以上。如此高的压缩空气温度，一般用户都无法直接使用，同时，也由于活塞压缩机的工作方式，使得产生的压缩空气脉动很大。因此，如图 1-1 所示，在最初的压缩空气系统中，人们配套了储气罐、后冷却器及气液分离器。

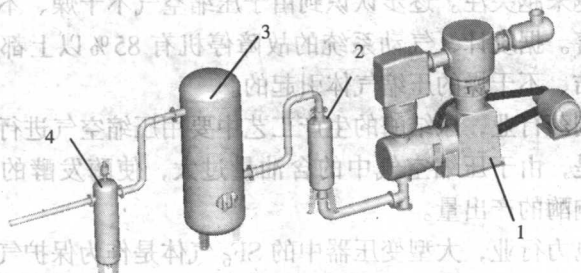


图 1-1 早期压缩机后配套装置

1—压缩机 2—后冷却器 3—储气罐 4—气液分离器

储气罐的作用是减少气流脉动和存储压缩气体。它的作用将在第 13 章中结合工程应用加以说明。后冷却器的作用是降低排气温度，将压缩机排出的  $140^{\circ}\text{C}$  左右的压缩空气冷却到  $40^{\circ}\text{C}$  左右。显然， $140^{\circ}\text{C}$  与  $40^{\circ}\text{C}$  有  $100^{\circ}\text{C}$  的温差，冷却后，有大量水分析出。这部分的水分将由后面的气液分离器分离，并被排出。气液分离器采用离心运动的原理，让压缩空气以一定的线速度沿桶体做旋转运动，将较大的油、水和固态微粒（大于  $20\mu\text{m}$ ）分离出来。线速度的选取值是一个实验值。后冷却器的冷却和气液分离器的分离，构成了最初的压缩空气冷却、净化过程。实际上除了大量的水分外，还有大量的油污、粉尘及其他固态杂质也被一起排放掉了。

20 世纪 80 年代以前，国内的压缩机制造厂通常采用图 1-1 流程作为其标准配置。当时的用户主要关心压缩空气的两个主要参数，即额定压力和额定流量。对压缩空气中含有的油污、冷凝水、铁锈、积炭、焊渣、粉尘杂质，以及这些杂质对下游设备造成的危害没有太多的认识，更有甚者认为压缩空气中的油污对气缸等执行元件的动作有润滑作用，对机械有好处。但是，对气动系统来说，压缩空气中的水分会造成部件锈蚀，冬季会结冰，造成冰堵；油污常常造成密封件老化、失效；粉尘则加快了运动机件的磨损。随着压缩空气应用范围的不断扩大，用户对压缩空气的品质越来越关注。逐步认识到由于压缩空气不干燥、不洁净带来的危害。据统计，气动系统的故障停机有 85% 以上都是由于使用不洁、不干燥的压缩气体引起的。

在制药行业，尿结酶的生产工艺中要用压缩空气进行气力搅拌。但是，由于压缩空气中的含油量过大，使酶发酵的效果不好，影响酶的产出量。

在电力行业，大型变压器中的  $\text{SF}_6$  气体是作为保护气体被使用的。但是，由于压缩过程中除尘效果不好，导电的粉尘混入  $\text{SF}_6$  气体中，会降低变压器的绝缘等级。

在气力输送时，密封式的管道输送具有安全、环保及节能的



特点。但是，由于压缩空气中的含水量过大，造成透气层堵塞，压降增加，影响输送效率。更有甚者，如果输送的是粉煤灰，水和飞灰结合，增加了单位长度的压力损失，受潮的粉煤灰还会产生颗粒间的互相凝结，最终导致管堵的事故。

不断出现的由于压缩空气品质低引起的损坏和事故，迫使人们开始寻找压缩气体干燥净化的方法。1952年德国 SABROE 公司成立，其最早的产品就是吸附式干燥器，与更早就开始使用的过滤器一起，开始对压缩空气进行专业意义上的净化。1965年，该公司开始生产冷冻式干燥机。1970年即生产出世界上最大的冷冻式干燥机（ $1\ 666\text{m}^3/\text{min}$ ）。

从时间发展来看，国外的压缩空气专业净化公司大多成立于20世纪60~70年代。如 DOMNICK HUNTER 公司成立于1976年；ULTRAFILTER 公司成立于1972年；比较年轻的公司，如 PIONEER AIR SYSTEM 成立于1980年。这些国外公司的主要特点如下：

1) 有比较完善的实验和测量手段，能为用户提供高品质的干燥器产品。如 DOMNICK HUNTER 公司可进行 DOP 实验（测过滤效率），含油量的测量也是按照 ISO8573 标准进行的。国外新干燥器产品的试验和研究常常与用户联合进行，许多设备的试验和验证都是在用户装置上进行的。这种联合开发的方式保证了试验的真实和实用性，最终保证产品 100% 地满足客户要求，同时缩短了试验研究周期。PIONEER AIR SYSTEM 公司研制的“城市垃圾沼气干燥器”，是世界上最大的垃圾处理厂设备之一，经过干燥净化后的沼气，被管道输送到隔壁的发电厂，驱动燃气发电机组。图 1-2 中的蛋型建筑即为沼气发酵罐，远处烟囱的位置就是发电厂。整个试验和验证过程花费了二年时间。

2) 注意环境保护。不论是 ULTRAFILTER，还是 DOMNICK HUNTER 公司，都有自己的环保型油/水分离器产品。净化过程中系统排放的凝结液往往是油、水乳化液，从环保角度出发，排放这种乳化液是非法的。油/水分离器可以使乳化剂中的