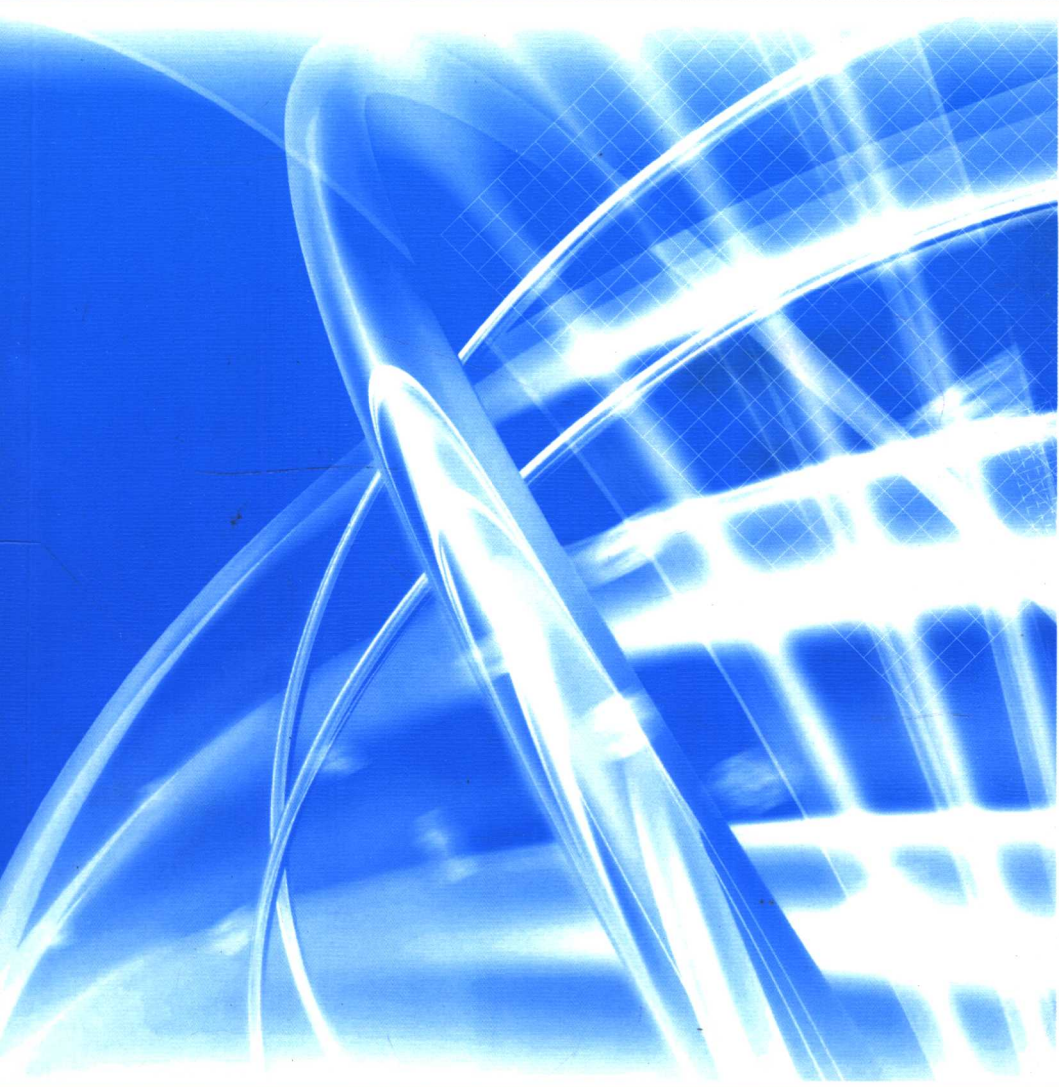


REBENG GANZAO
ZHUANGZHI

热泵干燥装置

陈东 谢继红 编著



化学工业出版社

热泵干燥装置

陈 东 谢继红 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

热泵干燥装置/陈东, 谢继红编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 12

ISBN 978-7-5025-9808-2

I. 热… II. ①陈…②谢… III. 热泵-干燥-化工设备 IV. ①TH3②TQ051.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 161379 号

责任编辑: 周 红

装帧设计: 张 辉

责任校对: 陶燕华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京市彩桥印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 300 千字 2007 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

前 言

干燥装置在生活和生产中都有着广泛的应用。如衣物、织物等家庭及宾馆用品干燥，洗衣粉、塑料、颜料、肥料、催化剂、纸张等化工制品干燥，粮食、水果、蔬菜、茶叶、木耳、人参、蘑菇等农副产品干燥，奶粉、食盐、饮料、香料、方便食品及其调料等食品干燥，中药原材料、药物制剂等药品干燥，血浆、生物组织、酶、酵母、抗生素、维生素、疫苗等生物制品干燥，蛋清、蛋黄、肉类等动物产品干燥，藻类、海带、鱼类、虾类、扇贝、海参等水产品及海产品干燥，陶瓷、隔热材料、过滤材料、吸附材料等材料制品干燥，木材等林产品干燥，煤炭等能源产品干燥，以及污泥、生活与工业废弃品干燥等。随着人民生活水平的提高和工业、农业、商业、服务业及新兴产业的快速发展，干燥装置的应用领域会越来越广泛，对干燥产品的要求也越来越高。

热泵干燥装置是一种新型的干燥装置。热泵吸收干燥器废气中的低温热能，将热能温度提升后，再用来加热进入干燥器的干燥介质，并同时干燥器废气中的水分降温凝结为液态水排出。与常规干燥装置相比，热泵干燥装置具有如下几个突出的优点。

- 节能。热泵干燥装置的能源消耗比普通干燥装置可降低40%以上。
- 低温。易于在常压下实现0~100℃的低温干燥，可获得高的干燥产品质量。
- 安全。便于用惰性干燥介质全封闭循环对易燃易爆产品、易氧化变质产品进行安全干燥。

- 环保。干燥时可不向环境排放粉尘、异味，并可回收产品中的香气成分、溶剂等。

因此，热泵干燥装置可为诸多物料的低成本、高质量干燥提供一种全新的解决方案，具有很强的市场竞争力。但热泵干燥装置又是一种技术集成型装置，涉及热泵、干燥、物料、测控等多领域的知识，其技术潜力的充分发挥及在工程实际中的成功应用与推广，均有赖于对上述知识的综合把握。

在当前节约能源与保护环境日益受到重视、用户对物料干燥质量要求越来越高的环境下，热泵干燥装置这一节能高效、干燥质量好的新型干燥装置获得了极好的发展机遇。让更多的用户了解热泵干燥装置，让更多的企业掌握热泵干燥装置，让更多的同行共同发展热泵干燥装置，让更多的力量共同开拓热泵干燥装置的应用领域，是编写本书的主要目的，希望本书能对我国热泵干燥事业的发展起到抛砖引玉的作用。

全书的主要内容分为6章：第1章介绍了热泵干燥装置的基础知识；第2章介绍了干燥器的基础知识及典型干燥器的特点；第3章介绍了热泵的基础知识和典型热泵的特点；第4章介绍了热泵干燥装置的多种结构与流程；第5章介绍了热泵干燥装置的特性与调控；第6章介绍了热泵干燥装置的设计，包括设计的基本步骤和典型热泵干燥装置的设计示例，并对热泵干燥装置和常规干燥装置的技术、经济、环境特性进行了对比。书末附录中还给出了R22、R717、R134a、R124、R123共5种常用热泵工质饱和气、饱和液及过热气的全套热力数据。本书基本反映了热泵干燥装置的概貌，为工程技术人员掌握和应用热泵干燥装置提

供了丰富的参考资料和数据，本书也可作为大学本科高年级学生和研究生的选修课教材。

本书第1章、第3章、第5章由天津科技大学陈东教授编写，第2章、第4章、第6章由天津科技大学谢继红副教授编写，全书由陈东统稿。编写过程中周修茹、苏立娟、尹海蛟、刘冬雪、胡涛、侯艳辉、曲敬儒、董昆、胡娅君、王丽焕、杨明川、滕小军等也做了大量的文稿整理和录入工作。

由于编者水平和经验有限，不妥之处在所难免，敬请广大读者斧正。

编者
2007年1月

目 录

第 1 章 热泵干燥装置基础	1
1.1 热泵干燥装置简介	1
1.1.1 干燥目的	1
1.1.2 热泵干燥装置与常规干燥装置的对比	1
1.1.3 热泵干燥装置的发展历史和现状	2
1.1.4 热泵干燥装置的工作原理	3
1.1.5 热泵干燥装置的性能指标	4
1.1.6 热泵干燥装置的特点	5
1.1.7 热泵干燥装置的分类	7
1.1.8 热泵干燥装置的市场定位	8
1.1.9 热泵干燥装置应用与推广的主要问题及解决思路	9
1.1.10 热泵干燥装置的技术发展	10
1.2 热泵干燥介质	12
1.2.1 热泵干燥介质的基本要求	12
1.2.2 热泵干燥介质的基本性质	12
1.2.3 热泵干燥介质的热物性数据	14
1.2.4 热泵干燥介质与水蒸气混合物的性质	16
1.3 物料的基本性质	23
1.3.1 物料的湿含量	23
1.3.2 物料的湿分扩散率	26
1.3.3 物料的热导率	27
1.4 干燥过程的基本特性	28
1.4.1 干燥曲线	28
1.4.2 干燥速率曲线	29
1.4.3 物料的温度曲线	29
第 2 章 典型干燥器简介	31
2.1 干燥器基础	31
2.1.1 干燥器的分类	31
2.1.2 干燥器的选择	31
2.1.3 干燥器容积的估算	36
2.2 厢式洞道式及带式干燥器	38
2.2.1 干燥介质对物料的一种流动形式	38

2.2.2	厢式干燥器	38
2.2.3	带式干燥器	40
2.3	气流干燥器	41
2.3.1	气流干燥简介	41
2.3.2	气流干燥器的特点	42
2.3.3	气流干燥器的适用范围	42
2.3.4	气流干燥器的类型	42
2.3.5	气流干燥器的应用	44
2.4	流化床干燥器	44
2.4.1	流化床干燥器的工作原理	44
2.4.2	流化床干燥器的特点	45
2.4.3	流化床干燥器的类型	45
2.4.4	流化床干燥器的运行数据	48
2.5	喷雾干燥器	49
2.5.1	喷雾干燥器的工作原理	49
2.5.2	喷雾干燥的特点	50
2.5.3	喷雾干燥器的应用	51
2.6	转鼓干燥器	52
2.6.1	转鼓干燥器的工作原理	52
2.6.2	转鼓干燥器的特点	52
2.6.3	转鼓干燥器的类型	52
2.6.4	转鼓干燥器的典型运行数据	53

第3章	热泵简介	55
3.1	热泵基础	55
3.1.1	热泵的含义及特点	55
3.1.2	热泵的相关术语	55
3.1.3	热泵的分类	56
3.1.4	热泵的设计步骤	56
3.2	蒸汽压缩式热泵	58
3.2.1	蒸汽压缩式热泵的工作原理	58
3.2.2	蒸汽压缩式热泵的循环	58
3.2.3	蒸汽压缩式热泵的工质	63
3.2.4	蒸汽压缩式热泵的基本部件	68
3.2.5	蒸汽压缩式热泵的工况与性能	73
3.3	吸收式热泵	75
3.3.1	吸收式热泵的工作原理	75
3.3.2	吸收式热泵的性能指标	76
3.3.3	吸收式热泵的分类	77

3.3.4	吸收式热泵的理想循环	78
3.3.5	典型吸收式热泵简介	79
3.4	吸附式热泵	84
3.4.1	吸附式热泵基础	84
3.4.2	典型吸附式热泵简介	85
3.4.3	吸附式热泵的性能指标	87
3.4.4	吸附式热泵的特点	88
第4章	热泵干燥装置的结构与流程	90
4.1	开式、半开式与封闭式热泵干燥装置	90
4.1.1	开式热泵干燥装置	90
4.1.2	半开式热泵干燥装置	92
4.1.3	封闭式热泵干燥装置	94
4.2	直接式与间接式热泵干燥装置	97
4.2.1	间接式热泵干燥装置的结构和工作原理	98
4.2.2	间接式与直接式热泵干燥装置能源效率的比较	99
4.2.3	间接式与直接式热泵干燥装置其他特性的比较	100
4.2.4	采用相变蓄热与蓄冷材料的间接式热泵干燥装置	101
4.3	带干燥介质旁通结构的封闭式热泵干燥装置	102
4.4	采用导热传热的热泵干燥装置	103
4.4.1	直接耦合的导热式热泵干燥装置	103
4.4.2	间接耦合的导热式热泵干燥装置	104
4.4.3	导热式热泵干燥装置的特点	104
4.4.4	常压下低温干燥的导热式热泵干燥装置	104
4.4.5	导热式热泵干燥装置的技术经济指标估算	105
4.5	对流与导热联合传热的热泵干燥装置	106
4.5.1	对流与导热联合传热的热泵干燥装置的工作原理	107
4.5.2	对流与导热联合传热的热泵干燥装置的启动时间	107
4.5.3	对流与导热联合传热的热泵干燥装置的干燥时间	108
4.6	带蓄湿器的热泵干燥装置	109
4.7	热泵与常规加热器组合的热泵干燥装置	110
第5章	热泵干燥装置的特性	111
5.1	热泵干燥装置的理想循环	111
5.2	不同结构热泵干燥装置的性能	112
5.2.1	带辅助冷凝器的封闭式热泵干燥装置的理想循环性能	112
5.2.2	带辅助冷却器的封闭式热泵干燥装置的理想循环性能	114
5.2.3	带辅助冷凝器且有干燥介质回热的热泵干燥装置的理想循环性能	115
5.2.4	三种典型结构热泵干燥装置的 SMER 计算与分析	116

5.2.5	热泵干燥装置的结构优化原则	117
5.3	操作参数对热泵干燥装置性能的影响	117
5.3.1	热泵工质的冷凝温度对热泵干燥装置性能的影响	117
5.3.2	热泵工质的蒸发温度对热泵干燥装置性能的影响	118
5.3.3	热泵干燥装置操作参数的选取原则	118
5.4	干燥介质对热泵干燥装置性能的影响	119
5.4.1	对流加热物料的热泵干燥装置中干燥介质的影响	119
5.4.2	对流与导热联合加热物料的热泵干燥装置中干燥介质的影响	120
5.4.3	导热加热物料的热泵干燥装置中干燥介质的影响	121
5.4.4	热泵干燥装置中干燥介质的选取原则	122
5.5	热泵干燥装置的实际循环特性	122
5.5.1	热泵干燥装置的实际循环	122
5.5.2	蒸发器的冷量有效利用率与干燥工艺参数的关系	124
5.5.3	蒸发器的冷量有效利用率与热泵干燥装置 <i>SMER</i> 的关系	125
5.6	热泵干燥装置的调控	125
5.6.1	热泵干燥装置调控的目标	125
5.6.2	热泵干燥装置调控的方法	126
第 6 章	热泵干燥装置的设计	129
6.1	热泵干燥装置设计的基本步骤	129
6.2	热泵式流化床干燥装置的设计	130
6.2.1	设计条件与要求	130
6.2.2	装置的结构流程图	130
6.2.3	流化床干燥器部分的设计计算	130
6.2.4	热泵部分的设计计算	132
6.2.5	分析与讨论	134
6.3	热泵式气流干燥装置的设计	134
6.3.1	设计条件与要求	134
6.3.2	装置的结构流程图	135
6.3.3	气流干燥器部分的设计计算	135
6.3.4	热泵部分的设计计算	138
6.3.5	分析与讨论	141
6.4	热泵式喷雾干燥装置的设计	142
6.4.1	设计条件与要求	142
6.4.2	装置的结构流程图	142
6.4.3	喷雾干燥器部分的设计计算	142
6.4.4	热泵部分的设计计算	144
6.4.5	分析与讨论	148
6.5	热泵式转鼓干燥装置的设计	148

6.5.1	设计条件与要求	148
6.5.2	装置的结构流程图	149
6.5.3	热泵部分的设计计算	149
6.5.4	转鼓干燥器部分的设计计算	151
6.5.5	分析与讨论	151
6.6	热泵干燥装置与常规干燥装置的技术经济环境分析	152
6.6.1	分析基础	152
6.6.2	常规干燥装置的计算分析	153
6.6.3	热泵干燥装置的计算分析	154
6.6.4	经济性对比	155
6.6.5	环境负荷对比	157
6.6.6	分析与讨论	158
附录	159
附录一	R22 的热力性质	159
附录二	R717 的热力性质	165
附录三	R134a 的热力性质	171
附录四	R124 的热力性质	178
附录五	R123 的热力性质	185
参考文献	192

第1章 热泵干燥装置基础

1.1 热泵干燥装置简介

1.1.1 干燥目的

干燥的目的是除去某些原料、半成品中的水分或溶剂，以便于物料的包装、运输、贮藏、加工和使用。具体如下。

① 以便于包装和运输为目的。如悬浮液和滤饼状的食品、药品、化工原料及产品等，经干燥成为固体后，包装和运输均较方便。

② 以贮藏为目的。某些食品、药品、化工原料及产品，当其中水分较多时，会有利于微生物的繁殖，易霉烂、虫蛀或变质，这类物料在贮藏前一般需经过干燥环节。尤其如生物化学制品、抗生素及食品等，含水量超过规定标准则易于变质而影响使用期限，经干燥后贮藏时间较长。

③ 以使用方便为目的。如食盐、尿素、硫铵等，当干燥到含水率为0.2%~0.5%时，物料不易结块，使用较方便；牛奶干燥成为奶粉后，可保存较长时间且可随时冲饮；衣物只有干燥后，穿用才比较舒适。

④ 以便于加工为目的。某些农副产品、药材、化工原料等，出于加工要求，需粉碎（或造粒）到一定的粒度范围和含水率，才便于再加工和利用。如小麦、玉米等进行加工前均需干燥处理；磷矿石经粉碎干燥可提高化学反应速度；催化剂半成品的造料干燥，可使其保持一定含水率和粒度范围，有利于压片成形等。

⑤ 以提高产品质量为目的。某些产品的质量高低与含水量有关，物料经干燥处理后，其有效成分相应增加，使产品品质提高。如煤炭在燃烧前需控制其含水量，以提高燃烧过程的效率；涤纶切片在纺丝前，干燥到含水率为0.02%以下时，可防止在抽丝时产生气泡，提高丝的质量。

1.1.2 热泵干燥装置与常规干燥装置的对比

工程上将物料中的水分除去的方法包括机械法（如离心力、压榨力等将水以液态形式排出）、加热方法（将水分变为蒸汽排出）、化学吸附方法（利用吸附剂将物料中的水分除去）等。干燥一般是指利用加热方法除去物料中水分的过程。

用加热方法将物料中水分汽化的具体实现形式有如下几种。

① 利用热空气等干燥介质通过对流换热方式加热物料及其中的水分。

② 利用固体热表面通过导热方式加热物料及其中的水分。

③ 利用红外线、微波等加热物料及其中的水分。

1.1.2.1 常规干燥装置

常规干燥装置通常直接用电加热或燃料燃烧来获得干燥所需的热能。以利用热空气干燥

2 热泵干燥装置

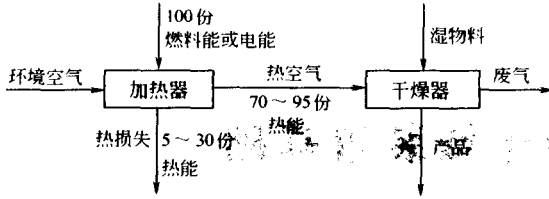


图 1-1 常规热空气干燥装置示意

设输入加热器中的燃料能或电能为 100 份，考虑到加热器的热能损失，出加热器的热空气得到的热能仅约为 70~95 份。

常规干燥装置中，进入干燥器空气的湿含量等于环境空气的湿含量，当环境空气的温度高、湿含量大且物料又要求低温干燥时，图 1-1 所示干燥装置的应用会受到一定限制。

1.1.2.2 热泵干燥装置

热泵是一种高效制热装置（产出的热能/消耗的能量 $>100\%$ ）。热泵干燥装置是热泵和干燥器的有机结合，一种典型的热泵干燥装置的示意如图 1-2 所示。

由图 1-2 可见，在热泵干燥装置中，干燥器排出的废气不再排入环境，而是进入热泵。热泵将干燥器排出的废气先降温除湿，再加热升温后进入干燥器循环利用。

热泵消耗 100 份燃料能或电能，通常可产出 140~800 份热能。

热泵干燥装置中，进入干燥器空气的湿含量取决于热泵蒸发器对干燥器废气的冷却程度（与环境无关），可根据物料的干燥要求方便地控制干燥器进气湿含量和温度，易于在常压下进行物料的低温干燥。

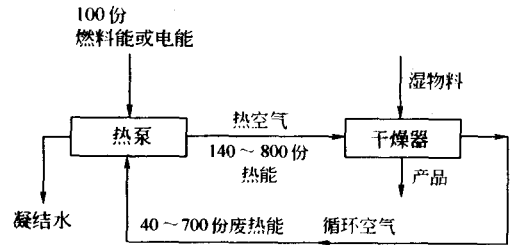


图 1-2 热泵干燥装置示意

1.1.3 热泵干燥装置的发展历史和现状

热泵干燥技术 1950 年在美国获得专利权，之后以其明显的节能优势在工业领域获得了迅速的应用，如日本在 20 世纪 90 年代已有超过 10% 的干燥装置采用热泵干燥技术。采用热泵干燥装置处理的物料也由早期的木材干燥扩展到食品加工、茶叶烘干、蔬菜脱水、鱼类干燥、陶瓷烘焙、药物及生物制品的灭菌与干燥、污泥处理、化工原料及肥料干燥等诸多领域。

热泵干燥装置的典型应用情况如表 1-1 所示。

表 1-1 热泵干燥装置的典型应用

物 料	热泵工质	干燥装置形式	干燥介质进口温度/℃	工质冷凝温度/℃	工质蒸发温度/℃	干燥时间/h	$COP_{H}^{(2)}$	$SMER^{(3)}/kg \cdot (kW \cdot h)^{-1}$
木耳	R22	全封闭	40~60			3.4		1.68~1.9
鱿鱼	R142b	全封闭、旁通、辅助冷却器、辅助电加热	30~75			6		
食用菌			15~35					
香菇			40~70					

续表

物 料	热泵工质	干燥装置形式	干燥介质进口温度/℃	工质冷凝温度/℃	工质蒸发温度/℃	干燥时间/h	$COP_H^{②}$	$SMER^{③}/kg \cdot (kW \cdot h)^{-1}$
泡沫橡胶	R142b	全封闭、旁通、微波	70				3.42	1.33
谷物	R22	全封闭、回热	54			24		
木材 1	R134a	全封闭、回热	60	70	10		4.97	
木材 2	R142b			80	50			
种子	R12	全封闭、旁通、辅助冷凝器	30~60					1.62~1.8
鱼类			32.9	28.5~32	-12~-8.5			1.15~1.7
苜蓿			30~45					0.5~1.02
番木瓜果 ^①	R22	半封闭、旁通	55			40		
芒果 ^①	R22	半封闭、旁通	55					
酸果蔓的果实	CO ₂	全封闭、辅助冷凝器	30			2.2	4	1.19~2.73

① 番木瓜果和芒果干燥时的环境温度为 27℃。

② COP_H 为热泵的制热系数，为热泵的制热量与耗功量之比。

③ $SMER$ 为热泵干燥装置的综合性能指标（除湿能耗比），为消耗单位能量时从物料中除去的水分质量。

1.1.4 热泵干燥装置的工作原理

热泵干燥装置可根据物料特性具有不同的流程和结构，以基于蒸气压缩式热泵的基本型封闭式热泵干燥装置为例，其工作原理如图 1-3 所示。

由图 1-3 可见，热泵干燥装置由两个子系统组成：热泵子系统和干燥子系统。热泵子系统中，热泵工质（也称热泵制冷剂）沿 1→2→3→4→1 循环；干燥子系统中，干燥介质（图 1-3 中为空气）沿 5→6→7→5 循环。热泵子系统和干燥子系统通过干燥介质有机地耦合为一个总体。

热泵是消耗少量高品位能来制取大量热能的装置。热泵子系统由压缩机、冷凝器（热泵工质侧）、节流阀和蒸发器（热泵工质侧）等组成封闭回路，热泵工质在其中循环流动。热泵按理论循环工作时，工质在热泵中的状态变化如图 1-4 所示（图 1-4 中 1、2、3、4 各状态点与图 1-3 中的 1、2、3、4 各点相对应）。

图 1-4 中，1→2 为等熵压缩过程，2→3 为等压冷凝放热过程，3→4 为节流过程（节流前后焓相等），4→1 为等压蒸发吸热过程。工质在热泵中的循环过程为：低压低温的饱和气（状态点 1）进入压缩机，在压缩机中被压缩为高温高压的过热气（状态点 2）进入冷凝器，在冷凝器中工质放热给冷干空气而自身变为高压中温饱和液（状态点 3）并进入节流阀，经节流阀后变为低温低压的饱和气与饱和液的混合物（状态点 4，混合物中饱和

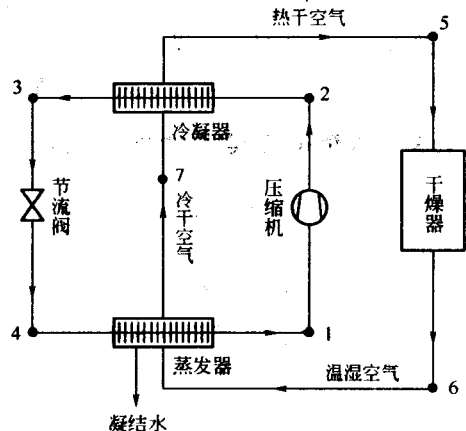


图 1-3 热泵干燥装置的工作原理

4 热泵干燥装置

液的质量分数一般在 60% 以上), 并进入蒸发器, 在蒸发器中工质吸收温湿空气的热量而自身变为低压低温的饱和气 (状态点 1), 再进入压缩机开始下一个循环, 从而实现热泵的连续工作。

干燥子系统由干燥器、蒸发器 (空气侧)、冷凝器 (空气侧) 组成封闭回路, 空气 (或其他干燥介质) 在其中循环流动。理论循环时, 空气的状态变化如图 1-5 所示 (图 1-5 中 5、6、7 各点与图 1-3 中 5、6、7 各点相对应。此外, 工程用的焓-湿图中等焓线是斜线, 此处为便于说明, 等焓线为水平线)。

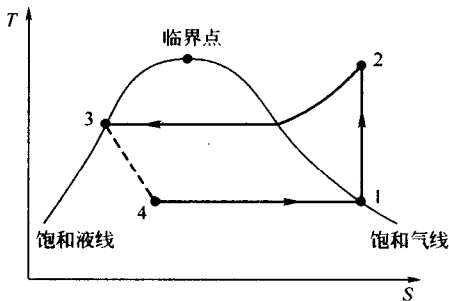


图 1-4 工质在热泵中的状态变化

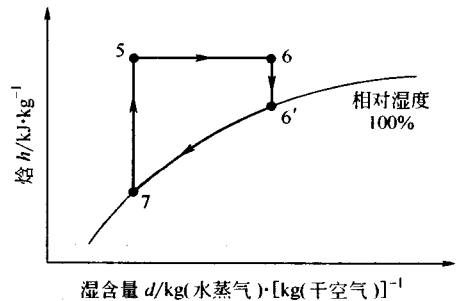


图 1-5 空气在热泵干燥装置中的状态变化

图 1-5 中, 5→6 为热干空气在干燥器中的等焓吸收物料水分过程; 6→7 为温湿空气在流经蒸发器时的水分凝结除湿过程, 其中 6→6' 是先变为饱和湿空气, 6'→7 是在饱和湿空气状态下再降温除湿; 7→5 是冷却除湿后的冷干空气在流经冷凝器时的等湿加热过程。空气在干燥子系统中的具体工作过程为: 热干空气 (状态点 5) 进入干燥器, 加热物料并使物料中的水分变为蒸汽进入空气中, 空气自身降温加湿, 出干燥器时变为温湿空气 (当忽略干燥器及干燥过程的热损失时, 该过程中进干燥器前热干空气的焓约等于出干燥器的温湿空气的焓); 出干燥器的温湿空气 (状态点 6) 进入蒸发器, 在蒸发器中首先被等湿冷却至饱和湿空气 6' 状态, 再沿饱和湿空气线 (图中相对湿度 100% 线) 进一步被降温, 空气中的水蒸气不断凝结为液态水析出并除去, 直至变为 7 点温度较低、含水量极少的冷干空气状态 (当空气被冷却到 0°C 时, 含水仅为约 4g 水蒸气/kg 干空气), 进入冷凝器; 在冷凝器中, 冷干空气被加热为满足干燥要求的热干空气, 再进入干燥器开始下一个循环。如此空气在干燥器中不断把湿物料中的水分汽化带走, 在蒸发器中不断把水蒸气凝结排出, 从而实现对湿物料的不断干燥。

1.1.5 热泵干燥装置的性能指标

热泵干燥装置的性能指标主要包括: 热泵的制热系数 COP_H 、干燥器的热效率 η_t 、干燥装置的能源效率 η_e 、热泵干燥装置的除湿能耗比 $SMER$ 。

(1) 热泵的制热系数 COP_H

热泵的制热系数定义为热泵制取的热量与所消耗的驱动能量 (压缩机或燃烧器等热泵驱动部件消耗的燃料能或电能等) 之比, 一般用 COP_H 表示, 写成公式形式为

$$COP_H = \frac{Q_c}{W_c} \quad (1-1)$$

式中, Q_c 为热泵的制热量, kW; W_c 为热泵的消耗功率, kW。

热泵的 COP_H 一般在 1.4~8.0 之间, 即热泵消耗 1J 的燃料能或电能时, 通常可制取 1.4~8.0J 的热能。

(2) 干燥器的热效率 η_t

干燥器热效率定义为干燥过程中物料内水分汽化所需的热量与提供给物料的总热量之比(如对流式干燥装置, 该总热量是指加热干燥介质所需的热能; 导热式干燥装置, 该总热量是指通过导热面传递给物料的热能; 微波干燥装置, 该总热量则相当于提供给物料的总微波能), 一般用 η_t 表示, 写成公式形式为

$$\eta_t = \frac{Q_{de}}{Q_t} \quad (1-2)$$

式中, Q_{de} 为物料中水分汽化所需的热量, kW; Q_t 为热源提供的热量, kW。

常规干燥器热效率大致数据为: 热风式对流干燥器的热效率一般为 30%~60%, 当采用部分废气循环时, 约为 50%~75%; 导热式干燥器的热效率一般为 70%~80%; 辐射式干燥器热效率一般为 30%。

(3) 干燥装置的能源效率 η_e

干燥装置的能源效率定义为脱去水分所需的能量与提供给干燥装置的总能量之比, 可用 η_e 表示。对热力干燥装置, 写成公式形式为

$$\eta_e = \frac{Q_{de}}{E_t} \quad (1-3)$$

式中, E_t 为提供给干燥装置的总能量, kW; 通常 E_t 为热源提供的热量 Q_t 与风机、料液泵、进出料装置等辅助装置的功率消耗 W_f 之和。

(4) 热泵干燥装置的除湿能耗比 SMER

热泵干燥装置的除湿能耗比定义为消耗单位能量所除去物料中的水分量(即物料中的水分去除量与热泵干燥装置消耗的能量之比)。该指标是反映热泵干燥装置综合性能的主要指标, 一般用 SMER 表示, 写成公式形式为

$$SMER = \frac{M_{de}}{W_{tot}\tau} = \frac{W_{de}}{W_{tot}} \quad (1-4)$$

式中, SMER 为除湿能耗比, kg/(kW·h); M_{de} 为从物料中除去的水分的重量, kg; τ 为干燥时间, h; W_{de} 为热泵干燥装置的水分蒸发速率, kg/h; W_{tot} 为总耗能功率, kW。

热泵干燥装置的 SMER 一般在 1.0~4.0kg/(kW·h) 之间。

常规干燥装置的理论 SMER 约为 1.6kg/(kW·h), 实际的 SMER 为理论值的 20%~80%。当连续式对流干燥器的热效率为 50% 时, 其实际 SMER 约为 0.8kg/(kW·h)。

1.1.6 热泵干燥装置的特点

根据热泵干燥装置的工作过程和热泵的特性, 热泵干燥装置具有如下一些特点。

(1) 高效节能

热泵干燥装置中加热干燥介质的热量主要来自回收干燥器排出的温湿空气中所含的显热(图 1-5 中 6—6' 段)和潜热(图 1-5 中 6'—7 段), 需要用户输入的能量只有热泵压缩机的耗能(以及风机等辅助器件的少量耗能), 而热泵又有消耗少量能量可制取大量热能的优点。因此, 与常规干燥装置相比, 热泵干燥装置的能源效率高, 具有明显的节能优势。应用实践表明, 其节能幅度一般在 30% 以上, 综合干燥成本可降低 10%~30%。

6 热泵干燥装置

(2) 常压下低温干燥

通过控制热泵的蒸发温度和冷凝温度,可对干燥器进气的温度和湿含量根据物料要求进行调节,可在常压下实现 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 之间的干燥温度,为热敏物料提供了一种新的低成本高效干燥装置。

(3) 干燥介质可封闭循环

干燥介质可在干燥器、热泵蒸发器(干燥介质侧)、热泵冷凝器(干燥介质侧)组成的封闭通道中循环利用,通过其能量与状态变化将物料中的水分连续除去。以工程中应用最广泛的干燥介质空气为例,当采用封闭循环方式干燥物料时,由于不需从环境引入新鲜空气,可防止外界空气进入干燥装置时引入杂质污染物料(这对食品、药品或生物制品等卫生要求的物料尤其重要),并省去空气过滤、净化等附属设备,使热泵干燥装置的工作不受周围环境(温度、相对湿度、空气污染程度、风向及风速等)因素的影响。

(4) 易于采用惰性干燥介质

当物料中含有对空气中的氧气敏感的成分(如物料中含有易氧化成分,或物料具有可燃性或可爆炸性等)或需改进干燥过程的传热传质速率时,可采用惰性介质(如氮气、二氧化碳、氩气、氦气、氢气等)代替空气作为干燥介质,实现无氧干燥。由于热泵干燥装置的干燥介质可在干燥系统中封闭循环,干燥介质采用惰性介质极为方便(对热泵干燥装置密封良好时,惰性介质在干燥过程中的损耗很小)。

(5) 易于回收物料中的易挥发成分

对含有易挥发性成分的物料(如香味及其他风味成分),利用热泵干燥装置进行干燥时,在干燥器内,易挥发性成分和水蒸气一同汽化进入干燥介质;随后,含易挥发性成分的干燥介质经过热泵蒸发器被冷却时,其中的易挥发性成分和水蒸气同时液化并随凝结水一同排出,收集含易挥发性成分的凝结水,并用适当方法将有用的易挥发性成分进行提取即可。

(6) 结构形式多样

热泵干燥装置可根据物料的特性设计成各种各样的结构形式,仅以与干燥器的组合方式为例,热泵可与各种对流型干燥器组合形成热泵式对流干燥装置(热泵厢式干燥装置、热泵式流化床干燥装置等),也可与各种导热型干燥器组合形成热泵式导热干燥装置(热泵盘式干燥装置、热泵式转鼓干燥装置、热泵转筒式干燥装置等),热泵还可与真空、微波、红外等干燥技术相结合形成热泵式真空干燥装置、热泵式微波干燥装置、热泵式红外干燥装置等。

(7) 易于实现干燥装置的多功能化

热泵干燥装置中的热泵同时具有制冷与制热功能,可方便地开发以干燥为主的多功能装置,使干燥任务较少时设备也得到充分得用。如夏季干燥任务较少时,可利用其制冷功能进行物料的低温加工(如速冻、冷藏)或保鲜加工;如冬季干燥任务较少时,可利用其制热功能为种植场所(如温室)、养鱼池、养殖场等供热。这一特点使热泵干燥装置在城郊区域及农副产品加工中具有突出的优势。

(8) 环境友好

热泵干燥装置中干燥介质可在其中封闭循环,没有粉尘、挥发性物质及异味随干燥废气向环境排放而带来的污染;干燥器排气中的余热被热泵回收来加热干燥介质,对环境的热污染很小。

(9) 市场空间广阔

热泵干燥装置适用的物料广泛,如木材类(橡木等)、谷物类、种子类、菇菌类(木耳、凤尾菇、香菇等)、中药材(人参等)、水产品类(鲜蚝、扇贝等)、饲料类(苜蓿等)、生物活性制品类(细胞、酶等)、饮用品类(茶叶、麦芽等)、纺织品类(衣物、丝等)、水果类(香蕉等)、纸张类、颜料类等,以及含易燃易爆成分的物料等。

根据热泵干燥装置的技术特性,热泵干燥装置在如下几个领域具有较强的市场竞争力:干燥温度为 $0\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的低温干燥领域;干燥温度在 $60\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的小型中温干燥领域(替代直接电加热式常规干燥装置);需采用惰性介质干燥的物料;对干燥温度和湿含量要求严格、干燥时间长的特殊物料。

1.1.7 热泵干燥装置的分类

热泵干燥装置的类型多样,可根据不同的依据进行类型划分。

(1) 按干燥介质的循环方式划分

热泵干燥装置可分为开式、半开式和封闭式。

开式热泵干燥装置的干燥介质(空气)从环境中吸入,经热泵升温后进入干燥器干燥物料后再排入环境。

半开式热泵干燥装置的干燥介质(空气)则部分从环境中吸入,与干燥器的部分排气混合并经热泵升温后进入干燥器,出干燥器的废气部分排入环境,部分再循环进入热泵重新加热。

封闭式热泵干燥装置的干燥介质全部在装置中循环,不从环境中吸入干燥介质,也不向环境中排放废气。

工程实际中,封闭式热泵干燥装置的应用最为广泛,且可根据物料特性发展出许多改进形式。

(2) 按热泵子系统与干燥子系统的耦合方式划分

直接耦合式热泵干燥装置:热泵子系统和干燥子系统通过干燥介质直接耦合。

间接耦合式热泵干燥装置:热泵子系统和干燥子系统通过载热剂和载冷剂循环进行耦合。

(3) 按干燥介质划分

可分为以空气为干燥介质的热泵干燥装置、以氮气为干燥介质的热泵干燥装置、以二氧化碳为干燥介质的热泵干燥装置、以氩气为干燥介质的热泵干燥装置、以氢气为干燥介质的热泵干燥装置等。

(4) 按物料特性划分

工程实际中需干燥的物料特性千差万别。从形态上,有溶液状、泥浆状、膏糊状、粉粒状、块状、条状、片状、纤维状等;从化学性质上,有热敏性、毒性、可燃性、氧化性、吸水性等;从物理性质上,其含水率、密度、比热容、热导率、粒度、黏度、表面张力、黏附性、触变性、物料中水分的结合特性均不同。

广义而言,每一种物料或每一类物料,都可为其开发专用的热泵干燥装置。如膏状物料热泵干燥装置、可燃性物料热泵干燥装置、胡萝卜热泵干燥装置等。

(5) 按热泵特性划分

热泵本身也有多种类型,根据热泵特性可将热泵干燥装置划分为蒸汽压缩式热泵干燥装置、吸收式热泵干燥装置、化学热泵干燥装置等。