

文章编号: 0253-4339(2020) 06-0012-10
doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2020.06.012

除湿等级划分及深度除湿技术研究进展

曾瑞璇 颜承初 李 梅

(南京工业大学城市建设学院 南京 210000)

摘 要 由于不同领域对湿度的要求各不相同,对除湿等级的划分并没有统一的标准,因此本文对现有除湿技术进行了整理分析,介绍了舒适性空调、设备用气、工业生产等领域的除湿要求以及目前常用除湿技术的发展状况,并将除湿等级进行划分:除湿处理后露点大于-20℃为浅近除湿;露点在-65~-20℃之间为深度除湿;露点小于-65℃为极深除湿。同时介绍了深度除湿技术最新研究进展,冷冻除湿方面,直接蒸发制冷以及加压冷冻除湿可使出风露点降至-20~-10℃以下;溶液除湿方面,可通过对除湿液进行冷却或对湿空气进行压缩等方式使出风露点降至-20~-10℃甚至更低。

关键词 除湿等级;深度除湿;露点温度;除湿要求;干燥环境

中图分类号: TU834.9; TU831.5; TQ028.1

文献标识码: A

Dehumidification Classification and Advanced Research
in Deep Dehumidification Technology

Zeng Ruixuan Yan Chengchu Li Mei

(School of Urban Construction, Nanjing University of Technology, Nanjing, 210000, China)

Abstract At present, different fields have different requirements for humidity. The industry does not have a unified standard for the division of dehumidification levels, which is likely to cause confusion and inconvenience when multiple fields are crossed. To solve the above-mentioned problems, this study analyzes the existing dehumidification technology. It introduces the dehumidification requirements of comfort air conditioning, equipment air, industrial production and other fields. The dehumidification level is uniformly divided. After dehumidification treatment, a dew point $>-20^{\circ}\text{C}$ is considered as shallow dehumidification, a dew point between -20°C and -65°C is considered as deep dehumidification, and a dew point $<-65^{\circ}\text{C}$ is considered as extremely deep dehumidification. The latest research progress in deep dehumidification technology can be summarized as follows: for freezing dehumidification, direct evaporative refrigeration and pressurized freezing dehumidification can reduce the dew point of the outlet air to less than -10°C to -20°C ; for solution dehumidification, the dew point of the outlet air can reach -10°C to -20°C , or even lower, by cooling the dehumidifying liquid or compressing the humid air.

Keywords dehumidification level; deep dehumidification; dew point; dehumidification requirement; dry environment

除湿技术在生产、生活中具有广泛应用。在舒适性空调领域,满足人体舒适性要求的空气露点约为 14°C ^[1];而在仓储以及工业制造领域中则需根据产品要求控制环境湿度,例如胶囊生产车间需要保持露点在 $-4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 范围^[2],集成电路以及半导体制造车间则需将露点保持在 -70°C 左右。除了营造适宜的环境,除湿技术在原料气脱湿上也有着重要应用。例如在乙烯、甲烷等气体的生产中,一般需要将产品气的露点降至 -60°C 以下。在设备用气领域,一些测量仪表中的气体露点需达到 -17°C 。某些医疗器械需要露点为 -46°C 的干燥空气进行动力传递^[3]。而臭氧

发生装置、粉体输送用气则需要使用露点为 -60°C 的干燥空气^[4]。

除湿技术在众多领域已得到广泛应用,但在不同领域却存在不同要求。对于除湿要求较低的舒适性除湿,目前已采用统一的ASHRAE舒适标准,但对于除湿要求较高的深度除湿,至今没有一个统一的标准来对其进行准确定义和界定。不同领域对深度除湿的理解和等级划分仍存在较大差异,这一现象在近十年左右的文献中显而易见。郭涛^[5]在洁净手术室新风除湿的研究中认为将新风的绝对含湿量从 $19.4\text{ g}/(\text{kg 干空气})$ 降至 $8.5\text{ g}/(\text{kg 干空气})$ 属于深度除

湿。苏博生等^[6]在一种双级除湿溶液系统的研究中,将空气含湿量从 13.07 g/(kg 干空气)通过二级溶液除湿降至 7.53 g/(kg 干空气),并认为这一除湿水平属于深度除湿。张海强等^[7]通过对热泵驱动的三级溶液机组进行性能分析,认为机组送风含湿量达到 3.4~3.6 g/(kg 干空气)属于深度除湿范畴。郑宝军等^[8]通过压缩空气进行溶液除湿,将空气送风含湿量降至 1.5 g/(kg 干空气),并指明其属于深度除湿。袁艳等^[9]在热回收型转轮复合型除湿的研究中,将送风空气的含湿量降至 0.154 g/(kg 干空气)这一过程视为深度除湿。方玉堂^[10]在转轮除湿机吸附材料的研究进展中认为,利用分子筛转轮除湿法将空气的露点降至 -60℃、空气含湿量降至 0.007 g/(kg 干空气)属于深度除湿。傅祖显^[11]在研究聚酯切片干燥除湿系统时认为通过分子筛除湿将空气露点降至 -60℃属于深度除湿范畴。

综上所述,目前很多研究和应用都涉及到深度除湿,但由于其涵盖范围较广且缺乏统一标准进行界定,因此出现不同领域对于深度除湿等级划分不同的情况,极易造成混淆和误解。为了加深对深度除湿的理解和认知,特别是避免多领域交叉时的混淆,本文以文献综述的方式对常见除湿技术的最新研究进展进行总结,并对除湿等级进行初步划分。

1 常见除湿要求

1.1 舒适性空调中的除湿要求

空调除湿与人们的生活息息相关。以南京为例:南京市夏季空调室外计算干球温度为 34.8℃,露点

为 28.5℃。为使得室内达到适宜的湿度,需要将空气露点降至 10.5~18℃^[12]。在一些较为特殊的场合,如博物馆、图书馆,其露点最低要求达 7℃^[12]。针对这种较低的除湿要求,许多除湿方式均可满足,如冷冻除湿、溶液除湿、膜除湿等。因此在舒适性空调领域,更关心的问题是如何使用更少的能耗达到上述除湿要求。表 1 为多种除湿方式在相近工况下除去 1 kg 水所需的能耗。为便于比较,表中除湿能耗比根据对应文献给出的结果统一换算为电能。由表 1 可知,溶液除湿方式最节能。

表 1 除湿能耗对比
Tab.1 Comparison of dehumidification energy consumption

初-终湿度/ (g/(kg 干空气))	系统 类型	除湿能耗比/ (kWh/kg)	最终露点 /℃
21.3~7.86	常规冷冻除湿 ^[13]	0.78	10.3
21.3~7.86	全热回收冷冻除湿 ^[13]	0.69	10.3
23.5~12	膜除湿 ^[14]	0.46	16.7
21.3~7.86	溶液除湿 ^[13]	0.16	10.3

1.2 工业生产环境的除湿要求

为了满足产品的生产、运输、储存以及仪器仪表的使用条件,工艺性空调需要对环境湿度进行严格控制。工艺性空调除湿所要求的露点范围十分宽泛。如表 2 所示,其露点范围为 -70~5℃。根据大量的文献调研,-70℃的露点已经接近于目前低露点生产工艺环境的极限值,使用常规冷冻除湿、溶液除湿无法将空气的露点降低到这种程度,一般会采取特定吸附材质的转轮除湿技术。

表 2 工艺性除湿要求
Tab.2 Requirement of manufacturability dehumidification

相关领域	含湿量/(g/(kg 干空气))	露点/℃	除湿目的
档案母片库 ^[15]	5.46	5	保证存储环境
胶囊干燥车间 ^[16]	2.57~5.61	-4.1~5.4	产品生产
啤酒、蔬果、蛋类储藏 ^[2]	1.84~2.38	-8~-5	保证存储环境
锂电池生产车间 ^[17]	0.007~0.230	-60~-30	产品生产
聚酯切工艺 ^[18-19]	0.003	-65~-30	产品生产
低温制冷工业 ^[2]	0.002	-70	防止低温室结霜
电子工业生产 ^[2]	0.002	-70	产品生产

1.3 设备用气的除湿要求

对于工业生产中的某些设备用气,也需要进行除湿。例如在一些气动仪表、测量元件中含有水分就会导致其动作不良,影响使用效果。而在气缸、回转执

行元件中若含有水分,则会使元件生锈导致活塞杆固着,寿命下降^[4]。不同设备用气的露点要求也不同,工业自动化仪表用气的露点需要比仪表所处环境的最低干球温度低 10℃^[20]。例如,南京室外冬季通风

计算干球温度为-1.1℃,自动化仪表用气所要求的露点为-11.1℃。表3所示为一些设备用气的除湿要求。

表 3 设备用气湿度要求

Tab.3 Humidity requirements in equipment gas

相关领域	含湿量/ (g/(kg 干空气))	露点 /℃
精密部件清扫气 ^[4]	0.815	-17
高精喷涂用气 ^[3]	0.815	-17
医疗器械动力传递用气 ^[4]	0.038~0.614	-46~-20
臭氧发生装置 ^[4]	0.007	-60
化学分析、粉体输送用气 ^[4]	0.001	-72

1.4 原料气脱湿的除湿要求

在石油化工、气体制备等领域中,除湿技术被广泛应用于原料气的脱湿。表4所示为原料气脱湿领域中一些代表性的除湿要求。常规的除湿方法如冷冻除湿、溶液除湿、膜除湿等方法是无法达到这一要求的,必须采用吸附除湿的方式才能实现这一露点。

表 4 原料气湿度要求

Tab.4 Humidity requirements of raw material gas

相关领域	含湿量/(g/(kg 干空气))	露点/℃
二氧化碳脱水	0.071 9	-40
氧气脱水	0.006 1	-60
甲烷生产脱湿	0.002 8	-65
氢气脱水	0.002 8	-65
氯气脱水	0.002 8	-65
乙烯脱水	0.002 8 以下	-65 以下
丙烯脱水	0.002 8 以下	-65 以下
氩气脱水	0.001 5	-70

由表4可知,石油化工、原料气生产领域需要极低的露点,而且不同的原料气要求的湿度也不同,其中多种原料气的露点在-65℃左右,而氩气脱水要求的露点则达到-70℃^[2]。

2 除湿等级划分

深度除湿所涉及的领域较多,且不同领域对湿度的要求存在较大差异,采取的除湿方式也不尽相同。由于目前对除湿等级的划分没有一个统一的标准,导致人们对深度除湿的理解和界定存在争议。本文基于不同领域的除湿要求以及对当前主要除湿方式的

认识,将除湿等级划分为三类:浅近除湿、深度除湿以及极深除湿。其中浅近除湿指能满足舒适性空调以及常规生产工艺的除湿要求,通过使用溶液除湿、冷冻除湿等常见方式即可达到的除湿等级,其露点范围在-20℃以上。深度除湿指能满足一些精密工艺生产场合的除湿要求,采用常规除湿方式难以达到的除湿等级,其露点范围是-65~-20℃。极深除湿则为常规除湿根本无法达到且需要采取特殊除湿手段才可以达到要求的除湿等级,其露点范围在-65℃以下,适用于半导体行业、电子工业以及原料气脱湿等领域。

根据几个具有代表性的除湿领域的除湿等级以及当前主要的几种除湿方式,我们总结后得出如下图1所示的除湿等级划分图。图1中刻度左侧表示的为当前主要的几种除湿方式所常用的露点范围,以溶液除湿中“氯化锂溶液、二甘醇、三甘醇”一栏为例,其对应的露点刻度为-15~-4℃,说明该三种除湿液的常用露点区间为-15~-4℃。图中刻度右侧表示一些主要的除湿领域所要求的露点范围。以“医疗器械用气、压缩空气领域”一栏为例,其对应的露点刻度为-46~-20℃,说明该领域所要求的露点区间为-46~-20℃。

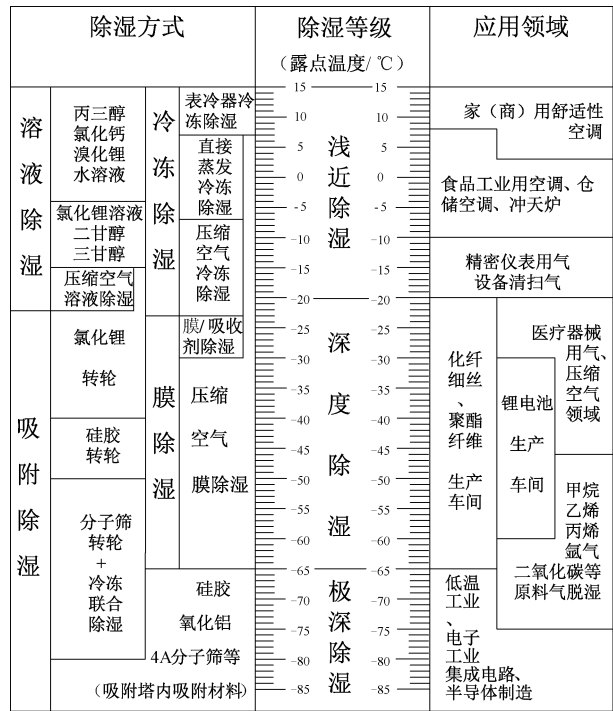


图 1 除湿等级划分图

Fig.1 Dehumidification level division

3 深度除湿研究进展

3.1 加压冷冻除湿

冷冻除湿的原理是利用湿空气被冷却到露点以下从而排除冷凝水的除湿方法^[2]。使用冷却盘管除湿,当处理空气出口露点<0℃时,盘管表面就会结冰,除湿就无法连续进行下去^[21],因此冷冻除湿处理空气出口的经济露点约为5℃^[2,22-23]。但经过加注不冻液、直接蒸发制冷、加压等处理后,冷冻除湿也能达到较低的露点。表5所示为常见冷冻除湿方式的性能参数。冷冻除湿法的出风露点范围约为-23~17℃,若要达到-10℃以下的出风露点,须对湿空气进行加压处理。

表 5 冷冻除湿方式的性能参数

Tab.5 Performance parameters of cooling dehumidification condition			
除湿方式	空气压力/MPa	进风露点/℃	出风露点/℃
喷水室除湿 ^[2]	0.1	20	>15
水冷式表冷器除湿 ^[25]	0.1	20	13~17
不冻液冷媒冷冻除湿 ^[23]	0.1	20	3.3
直接蒸发式除湿 ^[22,25]	0.1	20	-7.2~7.0
压缩空气除湿 ^[26]	0.2~0.8	20	-23~-12

采用冷冻除湿时,为获得更低的露点可以使用压力升降法^[2],其原理是先对空气加压,再对加压后的空气进行冷冻除湿。当湿空气压力上升时,其露点也会随之上升。露点上升表明冷冻除湿机的表冷器不需要过低的蒸发温度即可将湿空气中的水分除去。根据文献[3]可知,当压缩空气压力为8倍大气压、压力露点为0℃时,常压露点可达-23℃。所以,只需要将压缩空气通过冷冻除湿的方式将温度降至要求露点以下,就可以将湿空气中所含的大部分水分排出。加压冷冻除湿系统如图2所示。共分为两个模块,压缩空气除湿模块以及制冷剂循环模块。

采用加压冷冻除湿的方式可以实现较低的露点。但空气压缩机作为一种耗能较高的气动设备^[26],所以在使用时应充分考虑能耗问题。

3.2 溶液深度除湿

溶液除湿的原理是溶液表面的水蒸汽分压力低于空气中的水蒸汽分压力,空气中的水分被溶液吸收,从而实现除湿^[27]。在家用空调以及工业用空调中,一般可通过溶液除湿系统将空气的出风露点维持

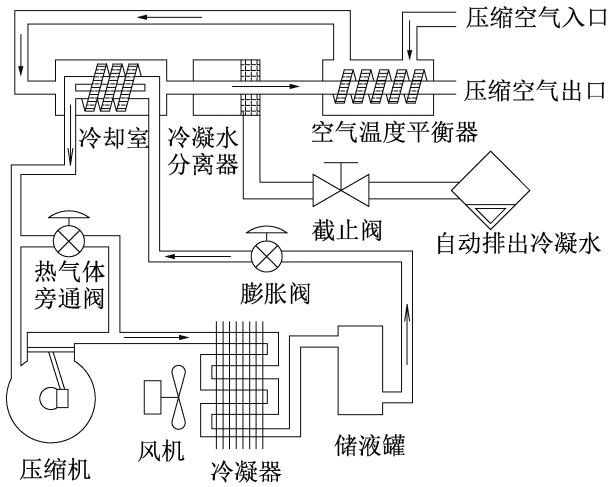


图 2 加压冷冻除湿系统^[2]

Fig.2 Compression cooling dehumidification system^[2]

在6~12.3℃之间^[6,28-30]。近年来,研究者们也采取了多种方式以降低溶液除湿的出风露点。如采用加压^[8,32]、多级溶液除湿^[6]、优化除湿溶液^[33]等方式,最低可以将出风露点降至-26℃。其中低温溶液除湿以及加压溶液除湿可以显著降低溶液除湿的出风露点。

1) 低温溶液除湿技术:溶液除湿的吸湿能力主要取决于溶液温度,利用较低温度的冷却媒介可以大幅降低溶液除湿机的出风露点。例如,某三甘醇液体除湿机,当冷却水温为32℃时,其出口空气的露点为12℃,当冷却水温为4.4℃时,出口露点可降低至-11℃^[31];氯化锂溶液除湿机,利用冷水机组降低氯化锂溶液的温度,可轻易将出口露点降至4℃以下^[31],若采用不冻液作为冷却媒介,则出口露点最低可达到-26℃^[2]。

2) 压缩空气溶液除湿:由于压缩空气具有比常压空气更高的水蒸汽分压,因此空气与溶液表面水蒸汽分压差增大,除湿过程的传质驱动力增大,除湿能力增强,从而能够获得含湿量更低的空气。当空气压力高于0.3MPa时,空气出口含湿量可<1.5g/(kg干空气),露点达到-10℃。当空气压力为0.5MPa时,露点可达-15℃^[8]。除湿溶液浓度为37%~55%。其中氯化锂溶液除湿在处理空气为6倍大气压时,出口含湿量为0.5g/(kg干空气),露点为-22.1℃^[32]。图3所示为加压溶液除湿系统图。

根据大量的文献调研,溶液除湿具有较为广泛的除湿范围,并可以将空气出风露点降至-20℃以下。各类溶液除湿剂特性如表6所示^[2]。

表 6 溶液除湿剂特性
Tab.6 Characteristics of liquid desiccant

吸收剂	常用露点/℃	浓度/%	毒性	腐蚀性	主要用途	备注
氯化钙水溶液	-3~-1	40~50	无	中	城市煤气的除湿	
二甘醇	-15~-10	70~95	无	小	一般气体的除湿	再生温度 150 ℃
丙三醇溶液无水丙三醇	3~6(-15)	70~80	无	小	工业气体干燥	低浓度仍具吸湿性
磷酸	-15~-4	80~95	有	强	实验室用吸湿剂	工业不常用
硫酸	-15~-4	60~70	有	强	化学装置的除湿	操作危险、效率极高
三甘醇	-15~-4	70~95	无	小	空调一般气体除湿	
氯化锂水溶液 ^[8]	-10~-4	30~40	无	中	空调,杀菌低温干燥	容易再生、吸湿性高
氯化锂水溶液(0.3 MPa) ^[32]	-15	34~40	无	中		
氯化锂水溶液(0.6 MPa) ^[32]	-22	37~55	无	中		

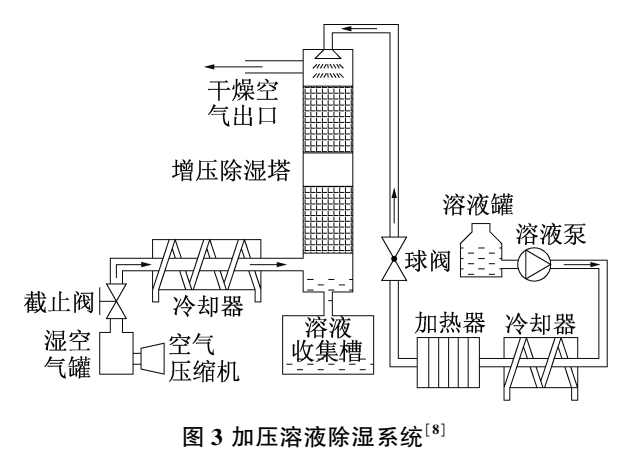


图 3 加压溶液除湿系统^[8]

Fig.3 Compression liquid desiccant system^[8]

由表 6 可知,溶液除湿时露点可以较容易地达到 -10 ℃ 以下,但难以达到 -20 ℃。溶液除湿技术可以与地源热泵^[34]、太阳能集热技术^[35] 等有效结合,便于解决传统冷冻除湿系统在湿工况下盘管中容易滋生霉菌的问题,且盐溶液具有除尘杀菌作用^[36]。但在溶液除湿系统中,溶液容易被带出或飞溅,同时要防止盐溶液的结晶现象以免造成循环泵毁损或喷嘴堵塞,还需要定期补充、更换除湿溶液^[37]。故溶液除湿的初投资以及运行维护费用都较高。

3.3 吸附与转轮除湿

采用吸附与转轮除湿方法可以较为容易地实现较低的出风露点。其核心部件是吸湿剂,根据吸湿机理的不同,可分为吸附和吸收两类。固体吸附式吸湿剂利用的是吸附剂和吸附质分子之间由范德华力引起的可逆吸附的原理。当固体表面对气体的引力大于气体分子之间相互的引力时,气体就会被浓缩在吸附剂表面,反之则脱附^[2]。而固体吸收式吸湿剂,如氯化钙、氯化锂等,吸收水分后,变成了含有更多结晶

水的水化物,其吸湿过程是物理化学作用,由于这种物理化学作用是依靠氢键来进行的,通常把通过氢键的吸收也归于物理吸附^[38]。转轮除湿是吸附除湿的一种常见形式,转轮除湿系统如图 3 所示。

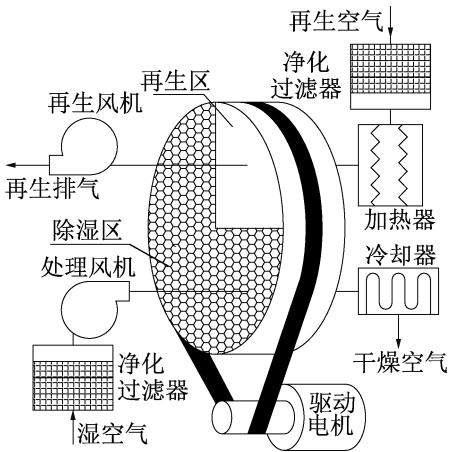


图 4 转轮除湿系统

Fig.4 Desiccant wheel dehumidification system

通过转轮的旋转,湿空气流经转轮除湿器扇形部分的除湿区进行除湿,而再生气流流过剩余扇形部分的再生区进行吸附剂的再生,湿空气气流和再生气流一起逆向流动,形成一个稳定、连续的除湿过程^[39]。

转轮除湿机组适合在低湿环境下运行,待处理空气按干球温度 39 ℃、湿球温度 29 ℃ 设计。经初、中效过滤器及表面冷却器后,露点降至 6~8 ℃,再经一级或二级氯化锂转轮脱湿,处理空气露点达 -40~-15 ℃^[19]。硅胶转轮除湿机与冷冻除湿结合后的出风露点可达 -50 ℃,而将分子筛转轮除湿剂与冷冻除湿结合则可达 -80 ℃ 的露点^[40]。

在除湿端使用合适的吸湿剂以及控制合适的吸

湿工况也十分重要。K. Yano 等^[41]成功地合成了孔径为 1.46 nm 的铝矽酸盐作为吸湿剂从而大大提升了吸湿量。Y. Tashiro 等^[42]研究了不同吸附剂的除湿性能,不同的吸附剂所能达到的出风极限露点是不同的,表 7 所示为本文统计的各种吸附剂所能达到的极限露点^[2]。

表 7 吸附除湿中吸附剂的极限露点

Tab.7 Limit dew point of adsorbent in adsorption
dehumidification

吸附剂	被干燥空气的残留水分/ (mg/L)	露点/℃
BaO	0.000 6	-91
沸石 4A 分子筛	0.000 8	-90
P ₂ O ₅	0.001	-89
Mg(CLO ₄) ₂	0.002	-85
CaO	0.003	-84
无水 CaSO ₄	0.005	-79
Al ₂ O ₃	0.005	-79
硅胶	0.03	-67

吸附与转轮除湿再生能耗较大,例如氯化锂转轮除湿的最佳再生温度为 60 ℃,硅胶转轮除湿的最佳再生温度为 100 ℃,分子筛转轮除湿的再生温度最高,达到 250 ℃^[10,43]。所以如何降低吸附剂再生时的能耗是当前吸附与转轮除湿的一个研究重点。

在当前对改进措施的研究中,杨长明等^[44]利用高压电、姚晔^[45]利用超声波代替能源消耗量较大的加热再生。张桂英等^[46]利用电渗再生的方法进行吸湿剂的再生。也可以将加压条件下饱和的吸附剂的压力迅速降低至大气压,则被吸附的部分水分就会脱附,再把常温下的出口干燥空气的一部分作为清扫气通入到大气压下的吸附剂中,使吸附剂再生,不需要加热。该方法称为压力升降法,其出口的露点可达-40 ℃以下^[2]。

同时,在除湿端,当处理空气的温度越低,那么除湿量也会越大^[38]。因此对湿空气进行预冷以及热回收^[47]也可提升转轮除湿机效率。由于转轮除湿在低湿环境下仍具备除湿的作用,且出风露点极低,所以转轮除湿的应用十分广泛。表 8 所示为转轮除湿系统可以达到的露点及对应的应用情况。可见转轮除湿的应用十分广泛,且转轮除湿的除湿范围较大,可满足多种生产场合的除湿要求。

表 8 转轮除湿露点及应用

Tab.8 The application and dew point of desiccant wheel
dehumidification

转轮类型	出风露点/℃	应用场合
氯化锂转轮除湿 ^[48]	-11	水库机房等
氯化锂转轮除湿 ^[16]	-15	软胶囊生产
氯化锂转轮除湿 ^[49]	-25	聚酯切片干燥
氯化锂转轮除湿 ^[50]	-40~-15	夹层玻璃、化纤
二级转轮除湿 ^[17]	-60~-30	锂电池生产
硅胶转轮除湿 ^[40]	-50	锂加工
分子筛转轮除湿 ^[11]	-70~-65	聚酯切片干燥

3.4 膜除湿

膜除湿技术是利用水蒸汽透过膜的速率比氮气、氧气等高出两个数量级以上这一特性,使得湿空气在通过膜表面时,水蒸汽透过膜进入渗透侧而其他气体不能透过,实现水蒸汽与干燥空气的分离^[51]。若想顺利进行该过程,就必须在膜的两侧维持水蒸汽浓度差,当前较为常见的方法有:压差法、吹扫气法、真空法、吹扫真空联合法以及膜/吸收剂法。

压差法:通过对膜的进气侧气体加压或在渗透侧抽真空,两侧气体形成压差,从而增加水蒸汽分压力差。使水蒸汽向膜侧渗透,达到除湿效果^[52]。AN-DREW 公司根据此原理的膜式电缆干燥机送风露点达到-45 ℃。压差法常与吹扫气法联合使用^[53]。

吹扫气法:又分外吹扫与自吹扫,该方法的出风露点随着进气压力的变化而变化,常温状态下,随着进气压力从 0.03 MPa 增至 0.1 MPa,出风相对湿度从 50%降至 30%^[53-54]。

膜/吸收剂法:如图 5 所示,膜/吸收剂法实际上是采用一个膜/液接触器,将膜空气除湿和传统的液体干燥剂直接接触除湿结合起来。空气中只有水蒸

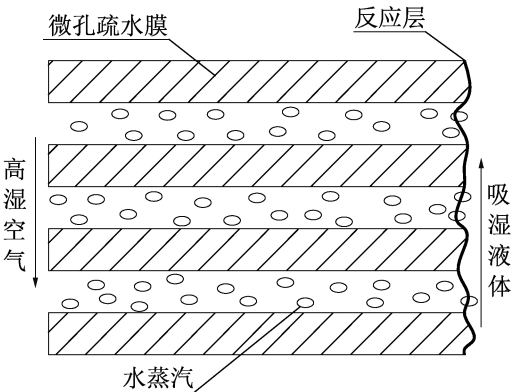


图 5 膜/吸收剂法示意图

Fig.5 The membrane/absorbent method

汽能够通过膜,与膜渗透侧逆流或与流过的液体干燥剂接触,然后经液体干燥剂吸收,使膜两侧的空气产生湿度差。

该方法既能达到除湿的目的,又避免了水蒸汽直接与液体干燥剂接触而造成不必要的液体夹带,也增大了水蒸汽与液体干燥剂的接触面积,提高了液体干燥剂的除湿效率,但该方式对接触器

的密封性要求很高^[55]。V. Usachov 等^[56]开发出一种基于膜/吸收剂法的再循环换热空调系统,除湿后的空气露点可达-30℃。若要利用膜除湿法将空气露点降至更低(如-40℃)则须配合加压才能达到。当前膜除湿的研究方向主要集中在膜材料的选择及合成上,表 9 所示为膜除湿的部分实验及应用情况。

表 9 膜除湿应用统计
Tab.9 The application of membrane dehumidification

统计来源	压力露点/℃	常压露点/℃	应用场合
Usachov 等 ^[56]		-30	再循环膜换热器空调
李国民等 ^[57]	-26(8 MPa)	-46	某中空纤维膜的压缩空气除湿
Separex 公司 ^[58]		-48	海上油井天然气除湿
严万程等 ^[59]	-40	-65	卡斯特膜法压缩气体除湿
ANDREW 公司 ^[53]	-45		膜干燥设备充气机
Perma Pure Products ^[60]		-60	气体前处理用膜式干燥装置

4 结论

本文对舒适性空调、工业生产、设备用气以及原料气脱湿等领域环境湿度的一般要求进行总结,并介绍了冷冻除湿、溶液除湿、吸附除湿以及膜除湿等常见除湿方式所能实现的露点范围,讨论了要达到深度/极深除湿要求所需要采取的技术措施,并对深度除湿技术的最新研究进展进行汇总。主要结论如下:

1)舒适性空调的环境露点要求通常约为 14℃,原料气脱湿、低温等领域的露点则要求低至-65℃及以下,而工业生产以及设备用气的露点要求范围较为广泛,可从 5℃低至-70℃。

2)为避免因各领域对除湿等级划分标准不一致带来的混淆,本文提出了一种新的除湿等级划分标准:将除湿处理后露点大于-20℃的除湿划定为浅近除湿;露点在-65~-20℃范围的划定为深度除湿;而露点小于-65℃的除湿称之为极深除湿。

3)冷冻除湿方面,直接蒸发制冷以及加压冷冻除湿可使出风露点降至-20~-10℃以下。溶液除湿方面,可通过对除湿液进行冷却或对湿空气进行压缩等方式使出风露点达到-20~-10℃甚至更低。关于膜除湿,当前的研究主要集中在膜材料的选择及优化上,根据进气侧的压力大小以及膜材料的选用,膜法除湿的出风露点可从-65~7℃。吸附除湿有多种形式,包括转轮、吸附塔、吸附床等,当前相关研究主要集中在吸附材料再生及节能等方面。吸附除湿配合

冷冻除湿等复合除湿方式可实现较广和较低的露点,其范围在-80~-15℃。

本文受江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20171003)资助。(The research was financially supported by a grant of the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20171003).)

参考文献

[1] 室内空气质量标准: GB/T 18883—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003. (Indoor air quality standard: GB/T 18883—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.)

[2] 铃木谦一郎, 大矢信男. 除湿设计[M]. 北京: 北京建筑工业出版社, 1980. (SUZUKI K, OYA S. Dehumidification design [M]. Beijing: Beijing Construction Industry Press, 1980.)

[3] 陈秉焕, 钟俊亮, 洪清展, 等. 吸附法是医用空气去除水分的惟一选择吗? [J]. 医用气体工程, 2017, 2(3): 9-13. (CHEN Binghuan, ZHONG Junliang, HONG Qingzhan, et al. Is the adsorption method the only choice for removing air from medical air? [J]. Medical Gases Engineering, 2017, 2(3): 9-13.)

[4] 《气动工程手册》编委会. 气动工程手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. (Editorial board of the manual. Pneumatic engineering handbook [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.)

[5] 郭涛. 洁净手术室新风深度除湿与变新风量系统节能设计探讨 [J]. 工程建设与设计, 2013(2): 123-126.

- (GUO Tao. Discussion on energy-saving design of fresh air dehumidification and fresh air volume system in clean operating room [J]. Construction and Design for Engineering, 2013(2): 123-126.)
- [6] 苏博生, 韩巍. 低温余热/电联合驱动的双级溶液除湿系统热力性能研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(11): 2296-2302. (SU Bosheng, HAN Wei. Study on thermal performance of two-stage solution dehumidification system driven by low temperature waste heat/electric combined drive [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(11): 2296-2302.)
- [7] 张海强, 刘晓华, 江亿. 热泵驱动的三级溶液深度除湿机组的性能分析 [J]. 东南大学学报(英文版), 2010, 26(2): 217-221. (ZHANG Haiqiang, LIU Xiaohua, JIANG Yi. Performance analysis of a three-stage solution deep dehumidification unit driven by a heat pump [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2010, 26(2): 217-221.)
- [8] 郑宝军, 殷勇高, 张小松. 压缩空气溶液深度除湿干燥方法及实验验证 [J]. 化工学报, 2014, 65(增刊2): 52-57. (ZHENG Baojun, YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong. Deep dehumidification drying method and experimental verification of compressed air solution [J]. CIESC Journal, 2014, 65(Suppl. 2): 52-57.)
- [9] 袁艳, 欧阳惕, 林创辉, 等. 热回收型转轮复合型除湿系统的实验研究 [J]. 制冷, 2013, 32(2): 5-9. (YUAN Yan, OUYANG zhen, LIN Chuanghui, et al. Experimental study on heat recovery type regenerator dehumidification system [J]. Refrigeration, 2013, 32(2): 5-9.)
- [10] 方玉堂, 蒋赣. 转轮除湿机吸附材料的研究进展 [J]. 化工进展, 2005, 24(10): 1131-1135. (FANG Yutang, JIANG Wei. Research progress on adsorbent materials for rotary dehumidifiers [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, 24(10): 1131-1135.)
- [11] 傅祖显. 聚酯切片干燥除湿系统 [J]. 合成纤维工业, 2001, 24(2): 61-63. (FU Zuxian. Polyester slice drying dehumidification system [J]. China Synthetic Fiber Industry, 2001, 24(2): 61-63.)
- [12] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册二版 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (LU Yaoqing. Practical heating and air conditioning design manual second edition [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007.)
- [13] 唐艺丹, 刘晓华. 溶液除湿空调系统在工业厂房应用的能耗分析 [J]. 暖通空调, 2010, 40(4): 131-135. (TANG Yidan, LIU Xiaohua. Energy consumption analysis of solution dehumidification air conditioning system in industrial plant [J]. Journal of HV & AC, 2010, 40(4): 131-135.)
- [14] 梁才航. 膜法全热回收制冷除湿系统的数值模拟与实验研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (LIANG Caihang. Numerical simulation and experimental study of membrane heat recovery and dehumidification system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.)
- [15] 范俊宁. 档案馆母片库低温低湿环境的实现 [J]. 制冷与空调(四川), 2010, 24(4): 81-82, 100. (FAN Junning. Realization of low temperature and low humidity environment of archives master library [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2010, 24(4): 81-82, 100.)
- [16] 郭雨谷. 转轮除湿技术在软胶囊制剂净化厂房设计中的探讨 [J]. 化工与医药工程, 2016, 37(3): 32-37. (GUO Yugu. Discussion on the technology of rotary dehumidification technology in the design of soft capsule preparation purification plant [J]. Chemical and Pharmaceutical Engineering, 2016, 37(3): 32-37.)
- [17] 李铁南. 锂电池生产露点控制 [J]. 内江科技, 2010, 31(10): 113-116. (LI Tienan. Dew point control of lithium battery production [J]. Neijiang Science and Technology, 2010, 31(10): 113, 116.)
- [18] 王江, 戴亚明, 李荣年, 等. DDC 常压分子筛干燥装置的开发及应用 [J]. 合成纤维工业. 1998, 21(4): 56. (Wang Jiang, DAI Yaming, LI Rongnian, et al. Development and application of DDC atmospheric molecular sieve drying device [J]. China Synthetic Fiber Industry. 1998, 21(4): 56.)
- [19] 陈宇成. 氯化锂转轮除湿机在干燥工艺中的应用 [J]. 武汉化工学院学报, 1992(21): 164-168. (CHEN Yucheng. Application of lithium chloride rotary dehumidifier in drying process [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 1992(21): 164-168.)
- [20] 工业自动化仪表气源压力范围和质量: GB/T 4830—2015 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2015. (Industrial automation instrumentation source pressure range and quality: GB/T 4830—2015 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2015.)
- [21] 张立志. 除湿技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. (ZHANG Lizhi. Dehumidification technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.)
- [22] 丁颂. 冷冻除湿在药厂低湿洁净空调系统中的应用 [J]. 化工与医药工程, 2000, 21(6): 272-275, 281. (DING Song. Application of freezing and dehumidification in low-humidity clean air conditioning system of pharmaceutical factory [J]. Chemical and Pharmaceutical Engineering, 2000, 21(6): 272-275, 281.)
- [23] 李百军, 邓玲黎. 冷冻极限除湿空调系统的设计与实践 [J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(6): 50-52. (LI Baijun, DENG Lingli. Design and practice of refrigeration limit dehumidification air conditioning system [J]. Building Energy & Environment, 2008, 27(6): 50-52.)
- [24] 房小军, 朱志平. 常用除湿机比较 [J]. 流体机械, 2003, 31(增刊1): 191-193. (FANG Xiaojun, ZHU Zhiping. Comparison of common dehumidifiers [J]. Fluid Machinery, 2003, 31(Suppl. 1): 191-193.)

- [25] 孟杰. 直接蒸发式冷却在温湿度独立控制系统中的应用[J]. 制冷, 2015, 33(1): 46–50. (MENG Jie. Application of direct evaporative cooling in temperature and humidity independent control system [J]. Refrigeration, 2015, 33(1): 46–50.)
- [26] 吴云滔, 赵军, 贾海亮, 等. 空气压缩机吸气端除湿系统研究[J]. 能源工程, 2017(6): 72–75. (WU Yunwei, ZHAO Jun, JIA Hailiang, et al. Research on the dehumidification system of air compressor ends [J]. Energy Engineering, 2017(6): 72–75.)
- [27] 侯小兵, 邹同华, 韩雨松. LiCl 溶液除湿系统的试验研究[J]. 化工进展, 2017, 36(增刊1): 92–100. (HOU Xiaobing, ZOU Tonghua, HAN Yusong. Experimental study on dehumidification system of LiCl solution [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(Suppl. 1): 92–100.)
- [28] 张涛, 刘晓华, 赵康, 等. 温湿度独立控制空调系统应用性能分析[J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 146–150. (ZHANG Tao, LIU Xiaohua, ZHAO Kang, et al. Analysis of application performance of temperature and humidity independent control air conditioning system [J]. Building Science, 2010, 26(10): 146–150.)
- [29] 刘晓华, 易晓勤, 谢晓云, 等. 基于溶液除湿方式的温湿度独立控制空调系统性能分析[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(7): 469–476. (LIU Xiaohua, YI Xiaoqin, XIE Xiaoyun, et al. Performance analysis of temperature and humidity independent control air conditioning system based on solution dehumidification method [J]. China Sciencepaper, 2008, 3(7): 469–476.)
- [30] 卢军, 刘雨曦. 蒸发冷却与溶液除湿复合空调系统的应用[J]. 煤气与热力, 2012, 32(4): 26–30. (LU Jun, LIU Yuxi. Application of evaporative cooling and solution dehumidification composite air conditioning system [J]. Gas & Heat, 2012, 32(4): 26–30.)
- [31] 《地下建筑暖通空调设计手册》编写组. 地下建筑暖通空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. (Editorial board of the manual. HVAC design manual for underground buildings [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1983.)
- [32] 邵彬, 殷勇高, 张小松. 压缩空气溶液除湿中不同除湿剂除湿性能比较[J]. 化工学报, 2016, 67(9): 3566–3573. (SHAO Bin, YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong. Comparison of dehumidification performance of different desiccants in compressed air solution dehumidification [J]. CIESC Journal, 2016, 67(9): 3566–3573.)
- [33] 李秀伟, 张小松, 王庚, 等. 溶液除湿能力强化[J]. 化工学报, 2008, 59(10): 2442–2447. (LI Xiuwei, ZHANG Xiaosong, WANG Geng, et al. Strengthening of dehumidification capacity of solution [J]. CIESC Journal, 2008, 59(10): 2442–2447.)
- [34] 蔡新国, 王强, 张迎迎. 基于溶液除湿的地源热泵空调系统能效分析[J]. 节能, 2015, 34(1): 50–52. (CAI Xinguo, WANG Qiang, ZHANG Yingying. Energy efficiency analysis of ground source heat pump air conditioning system based on solution dehumidification [J]. Energy Conservation, 2015, 34(1): 50–52.)
- [35] 周君明, 张小松, 孙博. 太阳能溶液除湿空调系统再生技术的研究进展与能耗分析[J]. 制冷学报, 2019, 40(2): 154–160, 166. (ZHOU Junming, ZHANG Xiaosong, SUN Bo. Research progress and energy consumption analysis of solar energy solution dehumidification air conditioning system regeneration technology [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(2): 154–160, 166.)
- [36] 安海鹏, 崔萍, 方亮, 等. 溶液除湿空调在工业厂房应用的能耗分析[J]. 节能, 2017, 36(8): 51–54. (AN Haipeng, CUI Ping, FANG Liang, et al. Energy consumption analysis of solution dehumidification air conditioner in industrial plants [J]. Energy Conservation, 2017, 36(8): 51–54.)
- [37] 朱冬生, 尉晔, 李鑫, 等. 除湿器研究进展[J]. 暖通空调, 2007, 37(4): 35–40, 23. (ZHU Dongsheng, JU Fei, LI Xin, et al. Research progress of dehumidifiers [J]. Journal of HV & AC, 2007, 37(4): 35–40, 23.)
- [38] 杨俊杰, 徐吉浣. 燃气转轮除湿器的原理及应用[J]. 煤气与热力, 2001, 21(4): 321–323, 325. (YANG Junjie, XU Jihuan. Principle and application of gas turbine dehumidifier [J]. Gas & Heat, 2001, 21(4): 321–323, 325.)
- [39] 邵伟. 转轮除湿器的工作原理与性能分析[J]. 家电科技, 2005(4): 14–15. (SHAO Wei. Working principle and performance analysis of rotary dehumidifier [J]. Journal of Appliance Science and Technology, 2005(4): 14–15.)
- [40] 柴续斌, 刘庆利. 低湿度环境空调设计方案的确定[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2004, 25(3): 78–82. (CHAI Xubin, LIU Qingli. Determination of design scheme for low humidity environment air conditioning [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 25(3): 78–82.)
- [41] YANO K, FUKUSHIMA Y. Synthesis of super-microporous aluminosilicate having excellent water vapor adsorption property as an adsorbent for an adsorption heat-pump [J]. Journal of Porous Materials. 2003, 10(4): 223–229.
- [42] TASHIRO Y, KUBO M, KATSUMI Y, et al. Assessment of adsorption-desorption characteristics of adsorbents for adsorptive desiccant cooling system [J]. Journal of Materials Science. 2004, 39(4): 1315–1319.
- [43] 贾春霞, 吴静怡, 代彦军. 干燥剂转轮除湿性能实验研究[J]. 化学工程, 2006, 34(6): 4–7. (JIA Chunxia, WU Jingyi, DAI Yanjun. Experimental study on dehumidification performance of desiccant runner [J]. Chemical Engineering(China), 2006, 34(6): 4–7.)
- [44] 杨长明, 李平. 转轮除湿技术的应用与研究进展[J].

- 浙江建筑, 2012, 29(6):63-66. (YANG Changming, LI Ping. Application and research progress of rotary dehumidification technology [J]. Zhejiang Construction, 2012, 29(6):63-66.)
- [45] 姚晔. 超声波技术在空调除湿剂强化再生中的应用研究进展 [J]. 制冷学报, 2012, 33(6):12-18. (YAO Wei. Research progress in the application of ultrasonic technology in enhanced regeneration of air conditioning dehumidifiers [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(6):12-18.)
- [46] 张桂英, 邵双全, 楼向明, 等. 常用固体除湿剂吸附机理与电渗再生效果研究 [J]. 制冷学报, 2014, 35(1):8-13. (ZHANG Guiying, SHAO Shuangquan, LOU Xiangming, et al. Study on adsorption mechanism and electroosmotic regeneration effect of common solid dehumidifiers [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(1):8-13.)
- [47] 陈思豪, 陈柳. 转轮除湿空调系统能耗分析及节能措施研究 [J]. 低温与超导, 2018, 46(4):72-76, 82. (CHEN Sihao, CHEN Liu. Study on energy consumption analysis and energy saving measures of rotary dehumidification air conditioning system [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2018, 46(4):72-76, 82.)
- [48] 王立新, 喻忻, 刘伟, 等. 转轮除湿在水电站的设计应用 [J]. 西北水电, 2012(增刊1):162-165, 171. (WANG Lixin, YU Wei, LIU Wei, et al. Design and application of rotary dehumidification in hydropower station [J]. Northwest Hydropower, 2012(Suppl.1):162-165, 171.)
- [49] 吴丽旋. 提高聚酯切片干燥效果的几点措施 [J]. 化纤与纺织技术, 2003(Z1):13-16. (WU Lixuan. Several measures to improve the drying effect of polyester chips [J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2003(Z1):13-16.)
- [50] 欧阳坤泽, 邹道忠, 徐选才, 等. 某玻璃合片室常温低湿净化空调系统的节能设计 [J]. 暖通空调, 1997, 27(增刊1):62-65. (OUYANG Kunze, ZOU Daozhong, et al. Energy-saving design of a room temperature and low humidity purification air conditioning system in a glass-splining room [J]. Journal of HV & AC, 1997, 27(Suppl.1):62-65.)
- [51] 王倩. 膜除湿技术在压缩空气干燥及空调领域的应用 [J]. 煤气与热力, 2014, 34(3):31-36. (WANG Qian. Application of membrane dehumidification technology in compressed air drying and air conditioning [J]. Gas & Heat, 2014, 34(3):31-36.)
- [52] VALLIERES C, FAVRE E. Vacuum versus sweeping gas operation for binary mixtures separation by dense membrane processes [J]. Journal of Membrane Science, 2004, 244(1):17-23.
- [53] 张琪, 汤卫华, 张龙龙. 膜除湿技术在气体干燥中的应用 [J]. 舰船防化, 2011(3):40-45. (ZHANG Qi, TANG Weihua, ZHANG Longlong. Application of membrane dehumidification technology in gas drying [J]. Chemical Defence on Ships, 2011(3):40-45.)
- [54] 张琪. 膜除湿技术用于空气除湿的研究进展 [J]. 舰船防化, 2013(2):26-32. (ZHANG Qi. Research progress of membrane dehumidification technology for air dehumidification [J]. Chemical Defence on Ships, 2013(2):26-32.)
- [55] 董军涛, 张立志. 膜法空调除湿的原理与研究进展 [J]. 暖通空调, 2008, 38(5):22-28. (DONG Juntao, ZHANG Lizhi. Principles and research progress of membrane air conditioning dehumidification [J]. Journal of HV & AC, 2008, 38(5):22-28.)
- [56] USACHOV V, TEPLYAKOVA V, OKUNEVA A Y, et al. Membrane contactor air conditioning system: experience and prospects [J]. Separation and Purification Technology, 2007, 57(3):502-506.
- [57] 李国民, 冯春生, 李俊凤, 等. 共混改性聚酰亚胺中空纤维膜的压缩空气除湿性能研究 [J]. 功能高分子学报, 2005, 18(2):194-197. (LI Guomin, FENG Chunsheng, LI Junfeng, et al. Study on compressed air dehumidification performance of blended modified polyimide hollow fiber membranes [J]. Journal of Functional Polymers, 2005, 18(2):194-197.)
- [58] SCHELL W J. Commercial applications for gas permeation membrane systems [J]. Journal of Membrane Science, 1985, 22(2/3):217-224.
- [59] 严万程. 卡特斯膜空气除湿新工艺 [J]. 石油与天然气化工, 2001, 30(6):281-282, 286. (YAN Wancheng. New process for air dehumidification of cartes membrane [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2001, 30(6):281-282, 286.)
- [60] 徐晓峰, 贾连达, 徐纪平. 高分子除湿膜的进展 [J]. 高分子通报, 1993(4):226-229. (XU Xiaofeng, JIA Lianda, XU Jiping. Progress in polymer dehumidification film [J]. Polymer Bulletin, 1993(4):226-229.)

通信作者简介

颜承初, 男, 教授, 南京工业大学城市建设学院, 13655173145, E-mail: chengchu.yan@njtech.edu.cn. 研究方向: 除湿制冷、建筑节能、可再生能源应用及特殊环境营造。

About the corresponding author

Yan Chengchu, male, professor, School of Urban Construction, Nanjing University of Technology, +86 13655173145, E-mail: chengchu.yan@njtech.edu.cn. Research fields: dehumidification refrigeration, building energy conservation, renewable energy applications and special environment construction.