



职业技能鉴定培训教程

干燥工

化学工业职业技能鉴定指导中心 组织编写
刘同卷 主编

● 依据 **国家职业标准** 编写

● 面向 **国家职业资格** 培训



化学工业出版社



职业技能鉴定培训教程

干燥工

化学工业职业技能鉴定指导中心 组织编写

刘同卷 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以岗位操作技能为主线,在概述干燥基础知识和基本原理的基础上,分别以初级、中级以及高级工的职业需要展开表述。

全书着重介绍了干燥工及密切相关岗位操作必须掌握的基本知识、基本理论、操作规范、设备保养和维护、安全生产、环境保护等知识。为了帮助读者检验学习效果,在最后还编入了一些思考题、填空题、问答题等供参考使用。

本书可供石油化工及相关行业的一线干燥操作工上岗培训和考工取证使用。

图书在版编目(CIP)数据

干燥工/刘同卷主编;化学工业职业技能鉴定指导中心组织编写. —北京:化学工业出版社,2008.2

职业技能鉴定培训教程

ISBN 978-7-122-02124-3

I. 干… II. ①刘…②化… III. 化学干燥-职业技能鉴定-教材 IV. TQ028.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 020932 号

责任编辑:李玉晖 辛 田

文字编辑:向 东

责任校对:宋 夏

装帧设计:于 兵

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:北京市兴顺印刷厂

720mm×1000mm 1/16 印张 11¼ 字数 203 千字 2008 年 4 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:24.00 元

版权所有 违者必究

前言

伴随着我国制造业的高速发展和持证上岗的职业资格准入制的不断实施和推进,对石油化工行业的生产操作人员进行职业技能培训与鉴定变得尤为重要。为尽快适应社会经济与石油化工行业的发展需求,进一步巩固和提升石油化工行业一线操作人员的理论知识水平与实际操作技能,依据中华人民共和国劳动和社会保障部制定的《国家职业标准·干燥工》,化学工业职业技能鉴定指导中心组织编写了这本《干燥工》操作培训教材。

本教材以岗位操作技能为主线,着重介绍了干燥工岗位操作必须掌握的基本知识、基本理论,操作规范和设备保养、维护,安全生产、环境保护等知识;本教材重视实际操作,力求理论联系实际,注重理论性与实用性的紧密结合,力求体现本行业的技术发展趋势。

本教材的编写由浅入深、由易到难,先定性再定量地提出问题,然后介绍分析问题和解决问题的方法。在书的最后编入了一些思考题、判断题和计算题,以帮助读者检验学习效果并巩固所学知识。

由于干燥过程所处理的物料品种繁多,性质差异极大,干燥设备的种类也很多,很难面面俱到。因此我们只能对于干燥过程中普遍存在的共性问题进行讨论。读者在处理具体物料的干燥问题时还是应该按照因产品制宜、因地制宜的原则,切勿机械照搬书中的方法和结论,它们都是在特定的设备和特定的物料以及特定干燥要求时才是适用的。

本教材的第1章和第2章的部分内容由柳鹤老师编写,其它部分主要由刘同卷编写并对全书统稿。在本教材的编写过程中,北京市化工学校刘佩田、刘向东、朱宝轩、李庆新老师给予了极大的支持并提供了资料;于红军等同志提出了许多宝贵的意见和建议。本教材的编写和出版还得到了北京市化工学校潘茂椿校长等有关领导以及相关化工企业工程技术人员的大力支持和鼓励,在此一并表示感谢。

本教材中参考和借鉴了国内外大、中专院校的一些教材和文献资料、公开出版物,这些参考文献已在书末列出。在此,也向这些文献的作者表示由衷的感谢和崇高的敬意。

由于编者水平有限,实践经验不足,出于为化工职业技术教育事业和职工培训工作尽绵薄之力的考虑而编写,教材中不可避免地会存在一些疏漏,敬请广大读者批评指正。

编者

2008年2月

目录

1 干燥基础	1
1.1 干燥定义	1
1.1.1 去湿的方法	1
1.1.2 干燥工职业定义	2
1.1.3 干燥的目的	2
1.2 干燥原理	3
1.2.1 国际制 (SI) 单位及其与物理制 (CGS) 单位间的换算	3
1.2.2 基本干燥过程	6
1.2.3 湿分与物料的结合形式	7
1.2.4 干燥介质的特性	9
1.2.5 空气湿度图及其应用	18
2 初级、中级干燥工	23
2.1 设备检查	23
2.1.1 静设备的检查	23
2.1.2 动设备检查、电器确认	23
2.1.3 管线检查	23
2.1.4 设备、管线的预热	23
2.2 常见仪表知识	24
2.2.1 常见仪表分类	24
2.2.2 仪表使用常识	24
2.2.3 仪表确认	25
2.3 化工机械的单机试车	25
2.3.1 单机试车的目的	25
2.3.2 单机试车的原则	25
2.3.3 单机试车的检查	26
2.3.4 单机试车可能出现的故障	26
2.4 换热器操作使用与维护	26
2.4.1 列管式换热器的操作使用与维护	26
2.4.2 板式换热器的操作使用与维护	27
2.4.3 加热器的操作与维护	29

2.4.4 常见蒸汽的压力等级及参数	29
2.5 干燥装置开车条件与准备	29
2.5.1 开车条件	29
2.5.2 开车准备	29
2.6 气体输送设备使用知识	30
2.6.1 离心式压缩机基本概念	30
2.6.2 离心式压缩机操作要点	31
2.6.3 离心式压缩机的开、停车操作与维护	33
2.7 离心机的使用	34
2.7.1 离心机基本知识	34
2.7.2 离心机的操作	40
2.7.3 离心机的使用与维护	42
2.7.4 转鼓离心机的开车、正常操作和停车	46
2.8 对流干燥过程分析	48
2.9 水分在空气与物料间的平衡关系	48
2.9.1 物料中所含水分的性质	48
2.9.2 恒定干燥条件下的干燥速度	49
2.9.3 恒定干燥情况下干燥时间的计算	54
2.10 湿物料的含水量	57
2.11 干燥过程的物料衡算	58
2.11.1 物料衡算的基础	58
2.11.2 物料衡算的应用	58
2.12 干燥过程的热量衡算	60
2.12.1 过程流程图	60
2.12.2 干燥器的热量衡算	60
2.13 干燥器的热效率	62
2.13.1 干燥器空气出口状态的确定	62
2.13.2 干燥器的热效率计算	64
2.14 设备维护与保养	67
2.14.1 设备静密封基本知识	67
2.14.2 设备安全检修基本知识	79

2.15 干燥器概述	82
2.15.1 对干燥器的要求	82
2.15.2 干燥器的分类	82
2.16 厢式干燥器	83
2.16.1 工作原理和特点	83
2.16.2 厢式干燥器的形式	83
2.16.3 厢式干燥器的应用	85
2.17 带式干燥器	88
2.17.1 水平气流带式干燥器	88
2.17.2 穿流气流带式干燥器	88
2.17.3 带式干燥器的工作原理	89
2.17.4 带式干燥器的形式	89
2.18 流化床干燥器	91
2.18.1 基本概念和原理	91
2.18.2 操作流化速度的确定	94
2.18.3 流化床中常见的异常现象	98
2.18.4 流化床干燥器的形式	99
2.18.5 流化床干燥器使用与维护	102
2.19 喷雾干燥器	103
2.19.1 工作原理和工艺流程	103
2.19.2 雾化器的结构形式	104
2.19.3 喷雾干燥系统的形式	107
2.19.4 雾滴与热风的接触方式	109
2.19.5 喷雾干燥器的特点	110
2.19.6 喷雾干燥设备的使用与维护	111
2.20 气流干燥器	113
2.20.1 气流干燥器的概况	113
2.20.2 气流干燥器的特点	114
2.20.3 气流干燥器的形式	116
2.20.4 气流干燥装置的分类及结构	118
2.21 转鼓干燥器	119

2.21.1	转鼓干燥器的工作原理和特点	119
2.21.2	转鼓干燥器的形式	120
2.21.3	转鼓干燥器的应用	124
3	高级干燥工	125
3.1	转筒干燥器	125
3.1.1	转筒干燥器的工作原理和形式	125
3.1.2	转筒干燥器的应用	127
3.2	干燥器的工艺计算	130
3.2.1	转筒干燥器的计算	130
3.2.2	气流干燥器的计算	133
3.2.3	连续式单室和多室沸腾干燥器的计算	135
3.2.4	喷雾干燥器的计算	138
3.2.5	物料搅拌式干燥器的计算	140
3.3	除尘分离器	140
3.3.1	除尘系统的选择	140
3.3.2	旋风除尘器	141
3.3.3	袋式除尘器	143
3.3.4	湿式除尘器	144
3.4	干燥设备的使用与维护	146
3.4.1	回转干燥炉的使用与维护	146
3.4.2	滚筒干燥器的使用与维护	149
3.4.3	干燥操作的安全技术	151
3.5	设备检修安全技术	151
3.6	设备的防腐保温知识	152
3.6.1	金属的腐蚀	152
3.6.2	设备的防腐蚀	152
3.6.3	设备的保温知识	153
3.7	干燥新工艺简介	157
3.7.1	红外干燥器	157
3.7.2	高频及微波干燥器	158
	本书符号意义	161

1 干燥基础

1.1 干燥定义

本书中提及的“干燥”主要是指通过热质传递过程的蒸发现象去除湿物质中湿组分的“热力干燥”过程。它主要包括对流干燥、导热干燥、辐射干燥等过程。除了热力干燥外，还有介电干燥、冷冻干燥、溶媒干燥、置换干燥、渗透干燥等许多种干燥方式，用于不同的干燥对象和干燥目的，在此主要讨论热力干燥过程的原理和应用。

1.1.1 去湿的方法

在化学工业中，常常需要从湿固体物料中除去湿分（水或其他液体），这种过程简称为“去湿”。去湿的方法颇多，例如机械去湿法，即通过压榨、过滤和离心分离等方法去湿；这是一种能耗少的去湿方法，但往往达不到去湿要求。又如热能去湿法，即借热能使物料中的湿分汽化，并将产生的蒸汽排除，这种去湿方法通常称为干燥。按照热能供给湿物料的方式，干燥可分为以下几种。

(1) 对流干燥 使干燥介质直接与湿物料接触，热能以对流方式传给物料，使湿分汽化后产生的蒸气为干燥介质所带走。

(2) 传导干燥 热能通过传热壁面以传导方式加热物料，产生的蒸气被干燥介质带走，或是用真空泵排走（真空干燥）。

(3) 辐射干燥 辐射器产生的辐射能以电磁波形式达到物料表面，为后者所吸收而重新转变为热能，从而使湿分汽化。

(4) 介电加热干燥 将需要干燥的物料置于高频电场中，依靠电能加热物料并使湿分汽化。

在化学工业中通常采用的是对流干燥，所用的干燥介质常为加热后的空气。加热后的空气在干燥过程中将热能传给被干燥物料，使其中的水分汽化，并将水蒸气带走，它既是干燥过程中的载热体，又是载湿体。本书所讨论的主要是以空气为干燥介质，而以水为被除去的湿分的干燥。上述空气，实际上是水蒸气与空气的混合物，故有时也称为湿空气。显然，干燥介质除空气外，还可以为烟道气或其他惰性气体，被除去的湿分也可以是水以外的其他液体。

干燥是一种能耗较大的过程,生产上为了节省能量,一般尽量先用机械去湿法除去湿物料中大部分湿分,然后再通过干燥的方法制得要求的产品。

1.1.2 干燥工职业定义

根据干燥工国家职业标准,干燥工的职业定义是:操作干燥器及辅助设备,加热湿物料使水分或溶剂汽化得到湿度合格产品的人员。

1.1.3 干燥的目的

物料进行干燥的目的,是使物料便于加工、贮存、使用、运输和提高产品质量。为了满足生产工艺对原料中含水量的要求,就必须进行干燥处理,否则会影响产品质量或化学反应的进行。例如聚氯乙烯的含水量必须低于0.2%,否则在它的制品中将会有气泡产生;抗生素的含水量对于它的使用期限有决定性的作用。

干燥技术在国民经济具有重要的意义,在工、农业各个部门都有广泛的应用。要进行干燥的物料是多种多样的,有粮食、药品、食品、饲料、燃料、肥料、矿物、陶瓷制品、纺织物及化工产品等。要进行干燥的既有年产数千万吨的大批量物料也有年产仅几十公斤的贵重物品。许多产品生产中,干燥都是重要的工艺环节,而正确地设计和进行干燥操作,是保持和改善产品质量的重要手段之一。

在饲料加工部门,如采用人工干燥方法,那么饲料中所含的养料和维生素几乎可以全部保持下来,而用自然干燥,一般要损失60%~80%。所以近年来国内外逐渐重视饲料干燥的研究,以便提高饲料的产量和质量。

在化学和建材等工业中,干燥的对象有块状、粒状、溶液、膏状物料等,最为广泛的是颗粒状物料,特别是结晶物料,它们可能是有机的、也可能是无机的。干燥方法也是多种多样的,如带式干燥器、涡旋式干燥器以及气流式、流化床、喷动床等干燥装置。

在制药工业中,干燥在生产过程中所占比例很大,制剂质量在一定程度上受干燥过程的控制。国外最近研制出的供热流化床和脉冲流化床联合干燥装置,可大大强化传热传质过程,从根本上改善了劳动条件,也改进了产品的质量。

在建筑陶瓷生产部门,厢式干燥装置应用较普遍,装置中混合上升和下降的气流可以强化干燥过程。此外一些新型的干燥设备,特别是喷射式干燥热流态化干燥器等也逐渐推广应用,代替一些老式的干燥器,从而使产品质量、劳动条件、经济价值等均有较大的提高。

对农业而言,干燥过程的工程意义也很大。在这里干燥不仅是保证长时间贮

藏农产品的手段，而且也是提高粮食质量的重要方法。

在其他一些工业部门，如燃料工业部门，随着固体燃料量的增加，干燥操作的地位也相应地得到提高。流态化干燥技术获得了相当规模的推广和应用。

对干燥设备的基本要求是保证获得必需的质量指标（如含湿量、物料结构、机械性能等）以及保证最好的单位能耗指标。因此，能够应用相应于现代科学技术水平的，低费用、高生产效率的干燥设备乃具有巨大的经济意义。

综上所述，干燥在国民经济中的意义是很大的，但是，目前这个领域的研究工作还远远不够，远远不能满足需要。特别是对一些低能耗、高效率的干燥方法、操作方法的研究更为欠缺。因此必须采取切实可行的措施把干燥过程的研究提高一步，以适应国民经济的飞速发展。

1.2 干燥原理

1.2.1 国际制（SI）单位及其与物理制（CGS）单位间的换算

在我国国际制（SI）单位虽已公布推行，但工程制单位在生产、设计中使用仍较普遍，而且化学工程中常用的一些物理、化学数据有些仍以物理制（CGS）单位表示。因此，本书虽然基本上采用 SI 制，但也兼顾其他单位制，并在此专门讨论一下单位换算。

（1）单位制度 单位制度的不同，在于所采用的基本单位不同以及对基本单位大小的规定不一。物理制的基本单位是：长度单位厘米（cm），质量单位克（g），时间单位秒（s）。国际制的基本单位共有 7 个，但化工中常用的只有下面 5 个：长度单位米（m），质量单位千克（kg），时间单位秒（s），温度单位开尔文（K），物质的量单位摩尔（mol）。这两种单位制都以质量为基本单位，属于绝对单位制系统。工程制的基本单位是：长度单位米（m），力或重量单位千克（力）（kgf），时间单位秒（s）。这种单位制的特点是，以力而不以质量作为基本单位，属于重力单位制系统。千克（工业上亦称为公斤）在 SI 制里指质量，在工程制里指力，容易混淆，本书在工程制的千克之后加注力字（用符号表示则写成 kgf），以资区别。文中 SI 单位都用国际计量会议所颁布的单位符号表示，而工程单位则用我国规定的中文代号或用拉丁字母表示。

（2）质量、重量、力 要在化工计算中正确地运用单位，并弄清楚 SI 单位与工程单位的关系，首先应了解质量、重量、力三者的意义及其单位。

质量和重量（或力）是两个截然不同的概念。一个物体的质量是它所包含物质的多少；它的重量则是它所受地球吸引力（重力）的大小。一件物体的质量是

固定的，它的重量却随着距离地球的远近而变化。通常所谓重量是指在地球表面附近的重量而言。

质量和力的关系可以用牛顿第二定律表示：

$$f = kma \quad (1-1)$$

式中 f ——作用于物体上的力；

m ——物体的质量；

a ——物体在力所作用的方向上的加速度；

k ——比例常数，其数值取决于各物理量所用的单位，若各物理量所用的单位都属于同一单位制度，则 $k=1$ 。

绝对单位制以质量单位 g 或 kg 作基本单位，令 $k=1$ 便可从式(1-1)导出力的单位。若对式(1-1)中的物理量只考虑其单位而不考虑其数值大小，可导出力的单位（以 $[f]$ 表示）如下：

CGS 制 $[f] = [ma] = g \cdot cm/s^2 = dyn$ (达因)

SI 制 $[f] = [ma] = kg \cdot m/s^2 = N$ (牛顿)

工程制以力的单位 kgf 作基本单位，令式(1-1)中的 $k=1$ ，可导出质量的单位如下：

$$\text{工程制 } [m] = \left[\frac{f}{a} \right] = \frac{kgf}{m/s^2} = kgf \cdot s^2 / m$$

由此可见，1N 是作用于 1kg 的物体上能够产生 $1m/s^2$ 的加速度所需的力。
1 “工程单位质量” 是在 1kgf 的作用之下其加速度为 $1m/s^2$ 的那个物体的质量。

至于 kg 和 kgf 即千克（力）的关系，可用下法导出：物体在地面附近受重力作用所产生的加速度 $a = 9.81m/s^2$ ，故作用于质量 $m = 1kg$ 的物体上的重力为

$$f = ma = 1kg \times 9.81m/s^2 = 9.81kg \cdot m/s^2 \text{ (即 } 1N) \quad (1-2)$$

物体所受的重力即为其重量，而质量为 1kg 的物体在地面附近的重量为 1kgf，故得

$$1kgf = 9.81kg \cdot m/s^2 = 9.81N \quad (1-3)$$

式(1-3)表示了 kg 与 kgf 的关系，它也是工程制与 SI 制之间换算的桥梁。

工程制中很少采用质量，在可能的场合都改用重量，例如不用密度而用重度，后者的单位是 kgf/m^3 ，其意义为单位体积物体的重量。

(3) 单位的正确运用 化工计算中所用的公式可分两类。

一类公式是根据物理规律建立的，称为理论公式，例如前面的式(1-1)。式中的符号除比例系数 k 以外，各代表一个物理量，因此又称为物理量方程。一个物理量的大小必须由数字与单位二者相结合才能表示出来，所以物理量实际上是数字与单位的乘积。将物理量数据代入这一类公式时，严格的做法是将数字与单

位一起代进去,式(1-2)中的运算就是这样做的。将某一单位制的数据代入理论公式中,解出的结果总是属于同一单位制。这就是说,理论公式在单位上总是一致的,任何同属一个制度的一致单位都可以用,但中途不能更改。初学者遇到复杂公式时,比较稳妥的办法是将数据预先换算成符合于所选用单位制的数据数值,然后将数据数值与单位一起代入,对数值与单位分别进行运算或整理。若求得的结果不能保持单位的一致或得出不合理的单位,便表明计算中混进了不一致的单位,否则就是公式本身的单位不一致,有必要检查它是否正确。

另一类公式是根据实验结果整理出来的,称为经验公式。这类公式的每一个符号都要用指定单位的数值代入,所得结果属于什么单位也是指定了的。对于此类公式,代入以前要逐一核实数据的单位是否合乎规定,只需将数字代入算出结果,然后附上规定的单位即可。

(4) 单位换算 从各种来源得到的数据,其单位不一定符合要求,必须预先进行单位换算。如在运算当中临时进行换算极易发生错漏,以预先作好换算为宜。

化学工程中常用单位的换算因数可从相关换算表格查得。复杂单位的换算因数没有必要记住,无表可查时,可以将其分解成简单的单位逐个换算。现举例说明单位换算的方法。

【例 1-1】 一标准大气压 (1atm) 的压力等于 $1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$, 将其换算成 SI 单位。

解 要用 SI 单位表示大气压,则工程单位 kgf/cm^2 中的 kgf 须转换为 N , cm^2 须转换为 m^2 , 其转换关系为

$$1\text{kgf}=9.81\text{N}$$

$$1\text{cm}=(1/100)\text{m}$$

要令 $1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$ 中的 kgf 从分子中消去而维持原值不变,可将此量乘以一个分母中含有 kgf 而且等于 1 之值。根据上述换算关系,可知应乘以 $9.81\text{N}/\text{kgf}$ 。同理,将 1 以一个分子中含有 cm^2 而且等于 1 之值,即 $(100\text{cm}/1\text{m})^2$ 代替,则其分母中的 cm^2 亦可消去而转换为 m^2 。

$$\begin{aligned}\text{故得 } 1\text{atm} &= 1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \times \frac{9.81\text{N}}{1\text{kgf}} \left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}} \right)^2 \\ &= 1.033 \times 9.81 \times 100^2 \times \frac{\text{kgf} \times \text{N} \times \text{cm}^2}{\text{cm}^2 \times \text{kgf} \times \text{m}^2} \\ &= 1.013 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2\end{aligned}$$

上法的特点是将单位也和数值一样纳入运算,分子分母中的单位符号相消以后,剩下的必须与所要求者相符,有错立刻可以发现。对单位换算未熟练者采用

此法比较稳妥。

【例 1-2】 通用气体常数 $R=82.06\text{atm}\cdot\text{cm}^3/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ，将其换算成下列单位表示：

(a) 工程单位， $\text{kgf}\cdot\text{m}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ ；(b) 国际单位， $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。

解 (a) 工程单位：

$$R=82.06\frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{K}}=82.06\times\frac{10330\text{kgf}}{\text{m}^2}\times(0.01\text{m})^3\times\frac{1}{0.001\text{kmol}}\times\frac{1}{\text{K}}\\=848\text{kgf}\cdot\text{m}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$$

(b) 国际单位：

$$R=82.06\frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{K}}=82.06\times\frac{1.013\times 10^5\text{N}}{\text{m}^2}\times(0.01\text{m})^3\times\frac{1}{0.001\text{kmol}}\times\frac{1}{\text{K}}\\=8314\text{N}\cdot\text{m}/(\text{kmol}\cdot\text{K})=8.314\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$$

1.2.2 基本干燥过程

干燥过程原理主要涉及湿物料和干燥介质在热力干燥过程中所表现的热力学及物理特性及其变化规律；湿物料内部以及与干燥介质间的热量和质量传递过程机理；干燥过程动力学原理；干燥过程的模型、模拟等内容。

简单地讲，湿物料在热力干燥时通常会相继经历以下两个主要阶段。

① 能量（主要为热量）从周围环境传递至物料表面使其表面湿分蒸发。液体以近似不变的速率从物料表面排除，而物料温度则维持在湿球温度左右。此过程的干燥速率主要取决于干燥介质的温度、湿度、流速、作用表面积以及压力等外部条件。此过程称为外部条件控制过程，也称恒速干燥过程。

② 当物料表面不再有充足的水分供表面蒸发后，多余的热量会通过热传导传递到湿物料内部，使物料温度上升，并在其内部形成温度梯度。而湿分则由内部向表面迁移，至物料表面后，进而被不饱和的干燥介质带走，显然，此时的干燥速率会低于恒速干燥阶段的干燥速率。湿物料内部的热量和质量传递速率主要取决于物料的性质（如热导率、质量传递系数等）以及其自身的温度和湿含量等因素。此过程称之为内部条件控制过程，也称降速干燥过程。

干燥理论的任务就是要搞清楚上述干燥过程中所涉及的诸多参数，如被干燥物质与干燥介质的物性参数、干燥器的结构参数、干燥过程的操作参数等，与干燥时间的关系以及它们所遵循的规律；干燥过程中含湿物质内部以及外部的湿分与热量的传递机理以及它们的分布规律；干燥器内部被干燥物质与干燥介质的流体动力学特性等问题。

所有上述现象即便是在很简单的一个干燥过程中亦会普遍存在，相互关联，

纠结在一起，构成了一个非常复杂的体系。

1.2.3 湿分与物料的结合形式

湿物料性质在很大程度上取决于物料中所含水分与之结合的形式。表征此种结合形式的唯一正确方法是看其结合能的大小，也即确定 1mol 湿分从物料中脱离时所需的功。

在同一湿度下结合水分的蒸气压小于自由水分的压力时，根据吉布斯-赫姆霍茨方程是可导出结合水之蒸气压与温度和蒸发热之间的关系。

1.2.3.1 湿分与物料的结合形式

根据结合能的大小和性质通常可将水分与体系（物料）结合的形式分为四种。

(1) 化学结合水 可分为离子结合水和结晶体的分子化合形式（如 $\text{CaCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）的水分。水结合的自由能和脱离的“脱离能”，是可以根据自由水饱和蒸气压与温度的关系来进行计算，此种水分的除去，多半不属于干燥的范畴。

(2) 吸附结合水 水在多孔物体毛细管表面上主要是以单分子层形式存在。单分子层水处于大气压下，此压力决定着分子力场，由于此原因液体密度增加。

(3) 毛细管结合水 在毛细管内的水，除了在毛细管壁上薄薄的一层吸附结合水外，都是自由水。但毛细管内的蒸气压与平面上的蒸气压不同，在完全润湿的条件下，毛细管结合能与壁面性质及毛细管内水量无关。在大毛细管（直径大于 10^{-5}cm ）的弯月面上，液体蒸气压实际上等于液体自由面之上的饱和蒸气压。实验表明，水之表面张力和黏度在半径达 $3.8 \times 10^{-6}\text{cm}$ 时，是与自由水一样的。

(4) 渗透结合水 渗透结合水最明显的特性是表现在稀溶液中。根据拉乌尔定律，在溶质的作用下稀溶液中溶剂饱和蒸气压的相对降低，等于该物质的摩尔分数组成。溶液蒸气压的降低表明有结合水存在。

除了上述的湿分与物料的结合形式外，还必须要考虑到处于分散状态的自由结合水，此处也将它看作是物料吸收的水分。

根据被吸收物质的数量和结合的形式可将湿物料分成如下几类。

毛细多孔性物体、胶体和毛细多孔胶性物体。如果液体在物体中主要以毛细力结合，则此种物体称为毛细多孔物体（如二氧化硅、沙土、活性炭、焙烧黏土等）。这样的物体当其除去湿分后，即成为松脆的、非弹性的物体，能吸收任何可使之湿润的液体。

当湿分与物体以渗透形式结合时，此物料称为胶体（如精制胶、面团等）。当这种物料除去液体以后其本身尺寸便大大地改变了。

毛细多孔胶性物体，具有毛细多孔物体和胶体之性质。

1.2.3.2 湿物料的干燥特性

湿物料不但能通过汽化的方法将水分散失到周围的介质中，在一定条件下，湿物料还能从周围介质中吸收水分。因此进行干燥时必须知道能够释放出水分的条件。

若 $p_{\text{物}}$ 为湿物料的表面上水分的蒸气压时，下列条件是进行干燥所必需的：

$$p_{\text{物}} > p_{\text{水}} \quad (1-4)$$

式中 $p_{\text{水}}$ ——空气中的水蒸气分压；

$p_{\text{物}}$ ——湿物料表面上水分的蒸气压。

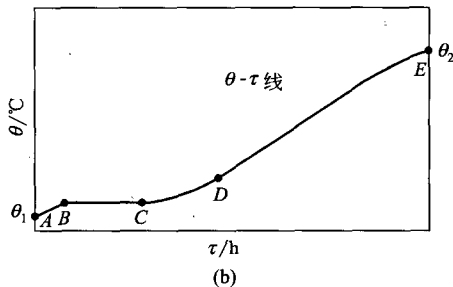
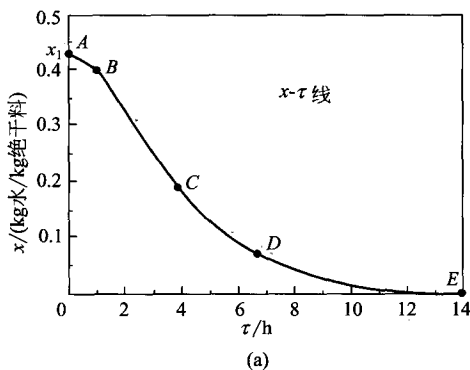
由式(1-4)可知，压力 $p_{\text{物}}$ 越大干燥就越易进行。 $p_{\text{物}}$ 大小与物料的湿度和干燥的温度有关，并与物料水分之结合形式有关。物料的湿度越大，干燥的温度越高， $p_{\text{物}}$ 值越大。

干燥进行了一定时间后，空气中的 $p_{\text{水}}$ 增加，式(1-4)变为

$$p_{\text{物}} = p_{\text{水}} \quad (1-5)$$

此式表明物料和干燥介质之间的水分交换过程达到平衡。此时物料所具有的某一湿度，称为“平衡湿度”（或称平衡湿含量），干燥过程于此时停止下来，见

图 1-1。



平衡湿度以及干燥所进行的过程是与被干燥物料的性质，与物料相结合的水分的性质以及与周围的介质有关。

表面水分是由于物料湿润的结果而充满在粗大毛细管当中的水分，是按照机械方式与物料相结合的，其结合的牢固程度是最差的，因而也是最容易从物料当中除去的。

吸附水分是被细小毛细管的表面所吸附的水分，或者是由于扩散作用而渗透到物料细胞内部的水分（称为结构水分或渗透水分）。此种水分与物料的结合程度较为牢固，与以化学方式结合的水分一样，较难从物料中除去。

图 1-1 恒定干燥条件下某物料的干燥曲线

收湿水分是与物料结合较为牢

固的水分，这种水分是不能用一般干燥方法将其除去的。在干燥过程中首先除去的是表面水分，然后是一部分在此空气温度和湿度下可被除去的收湿水分。在一般干燥条件下所有能从物料除去的水分称之为“自由水分”。

如果提高空气温度和降低空气相对湿度，还可以除去若干收湿水分，这部分水分称之为“结合水分”。

在其他条件相同的情况下，若湿物料周围介质中的水蒸气的压力越大，则平衡湿度就越高。平衡湿度的数值可以用实验方法测定。按照平衡湿度曲线可以判断物料是进行干燥还是增湿，以及确定在一定条件下干燥过程可达到的程度。

1.2.4 干燥介质的特性

1.2.4.1 湿空气

在计算干燥过程中所需空气用量、预热器中消耗的热量以及干燥时间等问题时，都涉及干燥介质的性质。因此，必须先对湿空气（空气中一般都含有一定量的水分，称为湿空气）的性质了解清楚。此外，熟悉湿空气性质对化工生产中的增湿和减湿过程及设备也是必不可少的。

在干燥作业中大多以空气作为干燥介质（即干燥剂）。对于不含水蒸气的空气，我们称之为“绝干空气”。如前所述，通常的大气中或多或少会含有水蒸气，不过含量很少，不为人们所注意。但是对诸如干燥、调湿等作业，空气中水蒸气含量多少，就不能不予以充分注意了，而且必须进行仔细的分析和研究。

绝干空气和水蒸气的混合物，称为“湿空气”。

根据道尔顿分压定律，湿空气之总压力 P 等于绝干空气的分压力 $p_{\text{气}}$ 和水蒸气分压 $p_{\text{水}}$ 之和，即

$$P = p_{\text{气}} + p_{\text{水}} \quad (1-6)$$

总压力一定时，空气中水蒸气的分压 $p_{\text{水}}$ 越大，则空气中水蒸气的含量也越大。由于湿空气中水蒸气和绝干空气的物质的量之比等于其分压之比，所以

$$n_{\text{蒸}}/n_{\text{气}} = p_{\text{水}}/p_{\text{气}} = p_{\text{水}}/(P - p_{\text{水}}) \quad (1-7)$$

通常大气中的水蒸气含量毕竟比较少，水蒸气分压又很低，所以湿空气可以作为理想气体来处理。故有关理想气体的一些基本定律和基础数据在这里均可以使用。

根据空气中所含水蒸气的多少和温度高低，空气中水蒸气可以是饱和状态，也可以是非饱和状态（过热状态）。

干空气和过热蒸汽所组成的湿空气，称为“非饱和湿空气”。

1.2.4.2 湿空气的湿热特性参数

大多数工业干燥过程均是采用预热后的空气作为干燥介质的。环境空气在上