

干燥技术进展

第一分册 综述

上海科学技术情报研究所编

已阅二年五月十二日

上海科学技术情报研究所

28.6

1

干燥技术进展

第一分册 综 述

上海科学技术情报研究所编

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

上海新华印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 4.5 字数: 110,000

1976年8月第1版 1976年8月第1次印刷

印数: 1—4,900

代号: 151634·000 定价: 0.60 元

(限国内发行)

TQ28.6

I

毛主席语录

自力更生,艰苦奋斗,破除迷信,解放思想。

我们不能走世界各国技术发展的老路,跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规,尽量采用先进技术,在一个不太长的历史时期内,把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

鼓足干劲,力争上游,多快好省地建设社会主义。

FLD 67-15

目 录

前言

第一章 概述.....(1)

- 一、干燥在国民经济中的意义.....(1)
- 二、干燥的进展.....(2)
- 三、发展干燥技术的途径.....(6)

第二章 干燥技术的选择.....(9)

- 一、概况.....(9)
- 二、干燥介质的选择.....(10)
- 三、干燥规范的选择.....(10)
- 四、干燥方法的选择.....(11)
- 五、气体物料的干燥方法.....(16)
- 六、液体物料的干燥方法.....(18)

第三章 干燥方法的进展.....(20)

- 一、隧道式干燥.....(20)
- 二、厢式干燥.....(21)
- 三、套网干燥.....(21)
- 四、圆筒式干燥.....(22)
- 五、涡轮式干燥.....(22)
- 六、耙式干燥.....(23)
- 七、带式干燥.....(23)
- 八、立式干燥.....(24)
- 九、滚筒式干燥.....(25)
- 十、转筒式干燥.....(26)
- 十一、喷雾干燥.....(29)
- 十二、气流干燥.....(32)

十三、沸腾干燥.....(35)

十四、流动层干燥.....(39)

十五、振动干燥.....(41)

十六、喷动床干燥.....(42)

十七、射流式干燥.....(43)

十八、卷曲流干燥.....(43)

十九、冻结干燥.....(45)

二十、微波干燥.....(45)

二十一、高频干燥.....(47)

二十二、近红外和紫外线干燥.....(47)

二十三、远红外干燥.....(48)

二十四、辐射干燥.....(49)

二十五、表面活性剂干燥.....(49)

二十六、声学干燥.....(50)

二十七、过热蒸汽干燥.....(50)

二十八、减压干燥.....(51)

二十九、真空干燥.....(52)

三十、接触干燥.....(52)

三十一、结合各种干燥方法的
联合干燥.....(53)

三十二、结合各种热过程的
联合干燥.....(57)

三十三、结合其他过程的
联合干燥.....(58)

三十四、其他干燥方法.....(63)

第一章 概述

干燥过程虽然尽人皆知,但并不十分简单,它是热现象、扩散现象、生物和化学现象的复杂综合体。

干燥是过程工业中费用最大的单元操作之一。据英国化学工程协会调查^[1],英国各种干燥器所耗用的燃料计每年500万吨煤当量,即占过程工业耗能总数的25~30%,占英国工业总耗电量的5~6%,占英国全国总耗电量的2~3%,为英国铁路运输耗电量的两倍。据苏联报道^[2],干燥物料用的耗能量,在全国热量总平衡中占到10~15%。

产品的性能不同,要求采用的合适干燥方法也不同,如化工产品就有二十万种以上,需应用各种各样的干燥方法。

一、干燥在国民经济中的意义

干燥过程具有重要的国民经济意义,在工农业各个部门获得了广泛应用。要进行干燥的物料是多种多样的,如粮食、燃料、矿物肥料、木材、药品、食品、牧草、纸张、橡皮、建筑材料、电工制品、陶瓷制品、织物、合成化学产品、绝缘材料等。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料。被干燥物料的规格,从电工工业中的微型零件起,直至象机床、车厢、农机等大型设备。

几乎在生产每一件产品时,干燥都是最重要的工艺环节之一,而正确组织和完成干燥,不仅可保持且可改善产品质量。

对干燥设备的基本要求,是保证获得必需的质量指标(如规定的含湿量范围,保存维生素及其他珍贵物质,保存被干燥物料的结

构、机械性能等),保证最好的单位耗热耗能指标。因此,建立相应于现代科技水平的低费用高生产率干燥设备,具有巨大的经济意义。

在一系列工业部门中,干燥过程起着重要作用。例如,在燃料工业中,随着所开采固体燃料量的不断增加,干燥方法和为此目的使用的装置的作用也在增加,悬浮状态颗粒燃料的干燥装置获得了相当规模的推广。据苏联报道,煤炭工业部系统已投产有100多台干燥能力为40~100吨/小时的管式干燥器,而电站上获得广泛应用的是滚筒式干燥器。

在化学工业中,必须干燥块状、粒状、液体、膏糊状物料,最为广泛的是颗粒物料,特别是结晶物料。这些物料中可能是有机的,也可能是无机的。干燥颗粒物料时,广泛采用滚筒式、带式、螺旋式、流动层、悬浮层和振动液化层干燥装置。

在微生物工业中,细菌制剂脱水问题具有决定性意义。在这种企业的工艺过程中,干燥费用占到一半左右。该行业一般采用高效喷雾干燥设备。

在制药工业中,对于制剂厂而言,干燥在生产过程中占到很大比重,制剂质量在一定程度上取决于干燥强度。国外最近研制了供热-沸腾层和脉冲流动层联合干燥方法,可大大强化传热传质过程,从根本上改变了劳动条件,改进物料质量。

在建筑陶瓷生产中,得到广泛应用的是厢式干燥装置(多次循环)。在这种装置中混合上升和下降的气流,可强化干燥过程。在这个行业中,还研制了不少新型干燥器。如喷射式干燥器,可保证干燥的高度均匀性;逆流隧道式干燥器,特别是能分区调节规定参

数的结构,可加速制品干燥过程;喷射隧道式干燥器,安有喷射装置后可建立热载体的内部循环。此外,当陶瓷制品务必在短期内干燥时,一般采用传送带式干燥器,它做成两个平行移动的链,并在其上吊挂盛有被干燥物料的吊框。在干燥陶瓷原料时,用得最广的是回转式干燥鼓,有的也用喷射式干燥装置和喷雾干燥器。

在造纸工业中,干燥是主要工艺过程之一。目前纸张的主要干燥方法是接触干燥。现代造纸机的干燥部分,乃是一个笨重设备,使用不便,难于自动化。为了提高过程效率,还采用了供热至物料表面的联合干燥方法。

干燥木材是个耗能量大的工艺过程,一般采用对流供热的连续作业室,室中载热体是蒸汽、水或烟气。木材通过其中把湿分降至运输时要求的水平。

最近十余年中,金属用量不大的无线电仪表制造业及其相关部门发展很快,其发展特点是各种工艺过程的机械化和自动化水平高,因而也必须在崭新的基础上研制干燥设备,保证迅速而连续地完成各种物料,特别是聚合物覆层或细薄物料的干燥。

对农业生产而言,干燥过程具有极大的意义。在这里,干燥不仅是保证长时间保存产品的手段,目前还成了提高物料味道质量和商品质量的极重要方法。对于粮食作物的干燥,国内基本上采用翻晒,但国外已投产有小时生产率50吨的大功率再循环干燥器。必须引起注意的是,在研究新的干燥方法时,应特别要防止落入致癌化合物。

国外有资料报道,人工干燥饲料草几乎可全部保存其中所含的养料和维生素,而在普通自然干燥时一般要损失60~80%。此外,采用草粉不仅可大大减少精饲料的消耗,而且能使牲畜的饲料成分更为完全。草的干燥一般使用鼓形干燥器,但生产能力有限,不会超过每小时500公斤,所以近来也采用更大功率的干燥器。

综上所述,干燥在国民经济中的意义是很大的,但目前这个环节比较薄弱,必须采取切实措施,以满足国民经济飞速发展而对于干燥提出的要求。

二、干燥的进展

随着我国工农业生产的飞跃发展,国内干燥技术和干燥设备也获得很大发展。在散粒状物料干燥方面,近几年来流态化技术获得了更为广泛的应用和新的发展。流态化干燥充分改善了气固相接触条件(蒸发表面积增大),物料的剧烈搅动,大大减少了气膜阻力,给传热介质创造了极为有利的条件。除了使用较早的气流干燥近来获得较快发展外,这几年又迅速发展了沸腾床、喷动床以及沸腾与移动组合床,其中以沸腾床发展得最快。

据有关资料介绍^[8],直管气流干燥是国内使用较早的流化干燥设备。数年来的生产实践认为,气流干燥对散粒状物料,特别是热敏性物料的干燥,还是比较理想的,它无论在产量、占地面积等方面均比烘箱干燥优越,因此,目前在制药、塑料、食品、化肥等工业部门使用得更加广泛。但气流干燥还存在热利用率较低、设备较高、气固相相对速度较低等缺点。近年来,又创制了脉冲气流、旋风气流、短管气流等新型气流设备,克服了直管气流干燥的缺点。短管气流干燥设备,除可降低设备高度外,还扩大了气流干燥器的使用范围,使易氧化的物料能用空气作为干燥介质,既降低了干燥动力消耗,又提高了产品的数量和质量,此外,还采用了多级气流干燥流程和组合气流干燥流程,如上海药用辅料厂的二级流程使载体热利用率提高到75%左右。

沸腾干燥是最近几年发展起来的。几年来的生产实践证明,它有很多优越性,能实现小设备大生产,由于热容系数较大,以及停留时间可任意调节,故对含表面水和需经减速

干燥阶段的物料均适用,特别适用于散粒物料。目前已工业化的型式,大体有单层圆筒型、多层圆筒型、振动沸腾床,卧式多室沸腾干燥器,其中以卧式多室沸腾干燥器发展比较迅速,已广泛应用于制药、化肥、食品、塑料、石油化工等工业部门。经过数年的实践,沸腾干燥无论在操作还是设备结构方面都已比较成熟。从使用情况看,卧式多室沸腾干燥器由于结构简单,操作方便而稳定,物料适应性强,即可获得干燥程度均匀的产品,动力消耗又少,是流态化干燥散粒状物料的较理想设备。

根据不同的操作方法,国内锥形流化床分为三种。一种是浓相溢流出料,较多的用途是在沸腾造粒方面。另一种是喷动床干燥,即由床顶出料,产品在旋风分离器内收集,或间歇操作床底出料,这种结构比沸腾床简单,可进行小设备大生产,干燥强度高,床层等温性强,不发生局部过热,以前仅适用于干燥大颗粒物料如聚氯乙烯,近来已发展至干燥细粒物料如工业青霉素。但由于动力消耗大,妨碍其广泛应用。

在溶液状或淤浆状物料的干燥方面,也获得了不少发展,除用得较多的喷雾干燥有所发展外,还成功地采用了锥形流化床进行造粒生产。沸腾造粒干燥器首先用于化肥行业,目前已应用至医药和食品等工业部门。喷雾干燥在国内已使用了十多年,在设计 and 操作等方面都比较成熟,近来的发展大致有以下四个方面:首先是干燥室向高大发展,对喷头雾化性能作了不少试验研究工作。第二是喷雾干燥除用于热敏性溶液外,成功地应用于淤浆料液。第三是喷雾干燥和其他干燥方法相结合,以达到干燥或干燥造粒同时进行的目的。第四是正在试验低温干燥,它是将含湿量极低而温度不高的空气作为载体,空气预先经过氯化锂或氯化钙溶液进行干燥,在干燥过程中产品温度不超过 35°C ,因此,适用于热敏性物料如医药和食品的干燥

或脱水。

膏糊状物料的干燥,国内目前以烘房为主。如染料、颜料、中间体、无机盐等,采用烘房干燥的还很多。烘房干燥膏糊状物料的缺点,主要是物料系静止状态,物料与干燥介质接触面积小,接触状况不良,干燥时间长,在干燥过程中需要人工翻动,否则产品质量不均匀,以及在高温下装卸、翻动物料,粉尘飞扬,致使操作环境恶劣,严重影响工人身体健康,而且物料产量越大,上述矛盾就越突出。可以这样说,目前膏糊状物料的干燥还是比较落后的。但近几年来,这种物料的干燥向前推进了一大步。

真空耙式对大多数膏糊状物料都是适用的,它在这种物料的干燥中起着相当大的作用,因为它易于操作,所需操作人员不多,在产量和劳动条件方面都比烘房优越,但当产量大时,采用真空耙式存在占地面积大,造价贵的缺点。为了解决这种情况下出现的矛盾,国内已成功地采用流态化技术进行干燥作业,如薄膜流化、螺旋气流及沸腾气流干燥器。事实证明,这些干燥设备可将膏糊状的氧化铁红和氢氧化铝干燥后成为粉状料,干燥和粉碎结合在一起,具有产量大、设备结构紧凑、占地面积小、劳动强度低、易于制造等优点,目前已在染料、颜料、无机盐等工业部门推广使用。此外,沈阳化工研究院试验用惰性粒子沸腾干燥器干燥膏糊状物料,天津化工研究院则对返料沸腾干燥器进行了干燥膏糊状物料的中试。

转筒干燥,由于处理量大,适应性好,操作费用少,有些成品单价较低、产量又大的产品如碳酸钙、谷物、化肥等均普遍采用。目前转筒干燥已成功地用于溶液物料的造粒干燥中。

自动翻板带式干燥器,对于解决难于干燥和干燥过程中有刺激性气体逸出的物料的干燥问题,具有不少优点,但尚存在热空气与物料接触机会少、热利用率不高的缺点。

新技术在干燥过程中的应用,国内也十

分重视,如微波干燥已开始用于食品、医药、化工、印刷、木材、制革、胶卷、文教用品等工业部门,远红外线干燥也在上海某些行业试验成功。

但是对于干燥理论的研究,始终是个薄弱环节,也影响了新型干燥设备的推广和提高。干燥技术的水平,和国外相比大部分还有一段距离。

就国外的情况来看,吊式和长环式干燥机是用得较早的。目前,吊式干燥机的用途已大大扩大,其带上不仅可装待干燥物料,而且可装经过初步处理的糊状物料。

近年来,辊带式干燥机在各种糊状物料方面用得很多。棒形物料用热的槽纹辊成型,而槽纹辊装有梳刀。

随着干燥新方法例如喷动床和卷曲流干燥方法的出现,带式干燥机特别是辊带式干燥机失去了竞争能力。但之前已用于干燥薄膜材料的喷嘴喷吹这种新的强化方法,使它摆脱了困境。国外研究了一种新型密闭辊带式干燥机,可成功地对糊状物料进行喷嘴喷吹。

该装置具有较高的技术经济指标和广泛的应用范围,装有一组给料器,可经干燥或不经干燥而使任何稠度的糊状物料成型。该干燥器的生产率,按干料算每小时200~400公斤,而按蒸发水算每小时800公斤,空气消耗量为每小时9吨,每平方米带上的单位脱水量达每小时50公斤,而蒸发每公斤水要消耗12~14公斤空气,电动机的功率为75瓩,六室式干燥器的热风机加热面积为700米²,可用于干燥糊状有机染料、中间产品、矿物颜料及氯气工业的糊状物料等。

喷嘴喷吹用于长环式干燥机也是有效果的。国外研究成功了用于干燥冷冻法胶乳所制备氯丁橡胶的长环式干燥机。该干燥器的生产率,按干料为每小时500~750公斤(橡胶的起始温度为22~25%,最终湿度为0.4~0.8%),热风机加热面积为2,315平方

米,空气消耗量为每小时1000立方米,电动机功率为70瓩,传送带移动速度为66~31.2米/分钟,干燥时间(115~120°C)为8~12分钟。

据1973年国际化工设备展览会上展出的各种干燥装置,表明近几年来国外各种干燥装置和不同物料干燥方法,都有了一定程度的发展^[4]。

如瑞士罗瓦公司改进了水平式回转-刷式干燥机。为了输送湿料,在干燥机起始区段安有螺旋,主要工作区段安有搅拌和输送物料的斜叶片以及破坏粒块用的冲击杆。安放斜叶片和冲击杆的区段,其长度可加改变。叶片由哈斯特合金制成,位于离壁0.3~0.5毫米处。

该装置在真空下工作时,为了卸料而采用气流传动的双闸阀。西德特拉伊斯公司制造了作用原理类似的装置,其特点是壳体上有纵向接头,可观察和净化干燥机。载热体分别送入每一半壳体的套中。

转子的圆周速度为20~25米/秒。叶片和壳体间的间隙可加调节。转子上还安有供送在同时造粒和干燥粉料时所要求的液体的喷嘴。

瑞士工程师公司展出了用于干燥各种产品,其中包括5万泊以下糊状物的干燥机。它安有缓慢转动的两个自动净化转子。装置的工作表面积为4.8米²,容积125升,最大壁温300°C,余压0.1毫米汞柱以下。该公司的另一类干燥机,具有水平槽形或圆锥形壳体,其中旋转有带径向叶片的空心轴。叶片略倾斜于轴线,这样就可搅拌,且顺着干燥机输送被干燥物料,同时净化装置表面。壳体、轴和径向叶片,用温度达350°C,压力达12大气压的蒸汽加热。该干燥机用于干燥粉体和悬浮体。

挪威斯托尔特·巴尔茨工业公司展出了带转子的连续干燥机,而该转子的形状为空心环,安在空心轴上,且用蒸汽加热。空心环

的周边,安有倾斜的叶片和刀片。装置的总加热面积中,85%为转子,15%为壳体。该干燥机用于干燥散粒物料、液体和糊状物料,近来还用于干燥鱼粉、肉粉和骨粉、啤酒糟、胶粘剂及其他粘性产品。在干燥要求大量加热的化学产品时,可利用高温液态热载体。该装置的轴可安有单独两组空心垫圈,以供送保证振动操作的各种温度的载热体。

丹麦尼罗公司展出了聚合物主要是聚合物溶液的连续干燥装置新结构。物料分送至缓慢转动的盘上,之后喷雾,并均匀分布在顶板表面,于此进行预干燥,并保存流动性。最终干燥在螺旋形的第二塔板上进行。在塔板的长宽比例大的情况下,出现了窄的停留时间谱线。塔板可进行补充加热。

展览会还展出了流动层干燥医药品和化学品的间歇式装置。如西德威纳·葛拉特公司研究了流动层中混合和造粒,特别注意固体粒子的搅拌。

丹麦尼罗公司有台干燥农药的闭式和半闭式设备,提出了防爆、废气除尘净化及消除臭味的办法,而部分废气用于预热液体燃料和天然气。

西德罗瓦公司展出了改进的薄膜接触干燥装置。它用于粘性溶液脱水,系水平式,安有转子,其前部为螺旋运输机,中部为叶片,端部为径向布置的料流循环构件。

西德赛茨公司研制成功了过滤、洗涤、干燥和机械卸下沉淀物的装置,其底部安有过滤用隔板。过滤和洗涤过程于余压下进行。在干燥物料时,装置沿水平轴转动 45° 。干燥在真空中进行,其时蒸汽送入套中。如果在惰性气体条件下,也能在常压下干燥。出料时,装置可向另一方向转动 90° 。上述过程,都可用程控装置自动进行。加热面积超过 2.5米^2 时,装置容量可超过400升。

西德皮特纳尔·希特·哈斯公司研制成功带面积为 240米^2 的带式真空干燥机,热量由被加热带和其上的辐射器传至物料。

西德克拉埃真空技术公司展出了长时间干燥颗粒状聚合物材料的真空干燥机,该装置是由重叠的并用管接头连接的若干加热管组成的。待干燥物料不断通过所有管子,而管内为移动和输送物料安有螺旋头。该装置的工作条件为:余压0.1毫米汞柱以下,温度达 300°C 。

为了使颗粒状或粉状聚合物材料在送入挤出机之前直接进行脱气和干燥,西德列保尔特·海拉伊斯公司展出了一种干燥机,它由重迭布置的、通过自动工作的管闸板连接的带加热套之两个圆柱-圆锥形壳体组成。每一壳体中都安有干燥机,这样由于产品脱气而得以提高质量,此外,尚可提高挤出机的生产率,因为被处理产品中没有气体,能使挤出机在高温下就于第一区段进行工作。

丹麦尼罗公司用于干燥颗粒状和粉末状产品的干燥机,安有盘式撒布机,以使该机上部均匀分布湿料。上部干燥的物料,沿中心管送至下部补充干燥。这种结构的工业化装置,其抄板面积为 $2\sim 28\text{米}^2$ 。在一级抄板下,安有借压缩气体净化孔的回转装置。

在干燥悬浮体或溶液时,用喷雾器将其喷至物料层表面。

西德埃尔斯特·基尔希纳尔公司陈列了液态产品造粒和干燥用流动层装置。原料用气流喷雾器喷至粒子表面,使其增大并生成颗粒。大的结块落到装置底部,用喷嘴中出来的热气流(速度为每秒100米以上)破碎。该装置主要用于耐热无机物。这种结构的工业化造粒器(边长2米),每小时可处理3.3吨原液,而每小时要求由此蒸发2.3吨水。

西德克劳求斯·彼得斯公司提出,用流动层多级装置干燥要求长期处于热状态的颗粒物料。它由直径 $200\sim 1500$ 毫米的塔组成,塔板是重迭穿孔的。孔的尺寸和位置,视物料粒度、生产能力、必需的停留时间来变化。塔板在非工作状态是空的。待干燥物料进入装置上部,而热空气从下面送至物料。

丹麦阿希特洛公司研制成功对流式干燥机来干燥溶液、悬浮体、糊状物及散粒料。该干燥机由圆柱-锥形装置组成,其下部安有框形搅拌机,在搅拌机框架下的轴上固定有实心垫圈。垫圈上面有一层从上送入装置的待干燥物料。干燥悬浮体或液体时,它们喷至惰性物料层上(氟塑料片或刚玉粒子)。被干燥产品在用搅拌机搅拌时从惰性物料表面分出,并用废气流送入除尘器或过滤器。

英国霍索卡瓦·固洛贝公司为了干燥和破碎很湿的粘性产品,提出了一种研磨干燥机。湿料从上面装入水平布置的破碎机转子,而热气体从下面通过转子。被干燥和细碎的物料,被载热体带入分级机,此时小粒同气体一起进入除尘器,而粗粒返回层中。装置入口处气体温度达 450°C 。

西德阿尔吞布尔葛机器公司制造了带两个研磨架的新型研磨干燥机。装置壳体内覆盖有活波纹板。

西德克劳斯·马弗伊公司研制成功干燥含水70%的糊状碳酸锌的喷雾装置,每分钟转速为2100转时,每小时可干燥15吨粘性物料,所需功率为200瓩。

另一方面,国外对干燥基本理论也进行了不少研究。大家都清楚,液体蒸发所需的热必须由外源供给被干燥的物料,然而在干燥吸湿性的毛细管多孔性固体时,传热和传质同时发生,因此,有些干燥的理论研究文章假定湿分是从固体通过扩散或毛细管作用传至外部干燥介质的。有人注意到^[6],由于毛细管及蒸汽扩散联合作用,经物料孔隙而发生内部湿分的传递,为此,考虑了热的联合传递问题。他们认为内部传递是经固体基体由热传导控制的,而且在物料的孔隙内由相变化的潜热控制的。在湿固体内,相变化的速率大大超过传热或传质速率。他们假定,对于温度变化小的情况,蒸汽分压差与蒸汽密度差成比例,之后,便在液体常数、蒸汽密度和绝对温度三个因变量之间采用了两个联立方

程,对系统联立了热平衡及物质平衡方程,即 clausius-clapeyron 方程和吸着等温曲线方程。由此得出下列认识,即干燥速率的开始增加或减少,随着有一恒速期而最后成为降速期。虽然这里提供的理论近似值产生了可从物理观点来解释的合理判断,但他们仍阐明了用实验方法来测试模型的可靠性。

有人还研究了传热的 Nusselt 数与干燥动力学之间的关系。由实验数据得出,供各种毛细管多孔性物料用的在第一第二干燥期的 Nu 数之间的关系,采用了无因次干燥速度,由此关系可计算被干燥物料的表面温度。

关于吸湿性物体的扩散问题,国外也有人提出了解决办法。他们认为,物料传送是与固体的内部表面吸着现象联系起来的。物料从气体传送至固体,是用非线性二阶偏微分方程模型来说明的。分子筛的吸着动力学计算,指出表面扩散作用可忽略不计,而务必考虑阿努特逊或斯坦发型扩散。模型令人满意地表明,多孔性物体内的扩散是用计算值及试验值来比较判断的。在固体扩散的过渡区中,表面扩散是主要的,但吸附剂不在此例。

尽管如此,关于干燥理论仍是一个亟待解决的薄弱环节。

三、发展干燥技术的途径

在前一个阶段,干燥合成树脂、合成橡胶等石油化学制品觉得是个老大难问题,难以解决,但近来基本上已获解决。如,对于合成树脂,除要求极低而均匀的含水(或溶剂)率以外,还有30微米甚至更微小的粉末的干燥问题,以及颗粒状树脂需达到万分之几含水量的干燥问题,甚至对于极稠粘状态的合成橡胶的脱水(或溶剂)干燥问题,近来也提到了议事日程,且已有不少进展。在食品工业方面,干燥制品必须保持天然的色香味,而且物料的热敏性非常高,加之,干燥物料的吸湿

性又极大,所以它们的干燥方法和装置甚至于贮藏方式都是大问题。

对于具有一定形状的食品,以采用通风干燥为主,例如,谷物干燥中最为重要的是均匀的停留时间,因而问题就集中在通风移动床干燥器的均匀进料和卸料。干燥滤渣时,采用安有机械破碎机的气流干燥器;而在处理吸附水分相当多的物料时,则采用二段式气流干燥器或者在后面附设流化床干燥器,将其干燥至规定的含水率。当以液状物料出发进行粉末化时,由于处理量增大,所以专门采用喷雾干燥器,且为了改善这些粉末的溶解性,也很重视所谓速溶化操作。曾经轰动一时的冻结干燥法,由于其干燥费用较其他方法高出一、二十倍,目前只适用于一些特殊的用途,如用此法干燥极小部分物料后,将其掺入其他方法干燥的大部分物料中,以增进食品的香味。

随着工业发展规模日益扩大,干燥装置也趋向于大型化。有些类型的干燥机,已不再适用以前的计算式或小型装置的实验结果,而务必提供新的计算式。

以干燥装置而言,喷雾干燥的进展最为显著,其次在流化床干燥方面。气流干燥法在粒粉体干燥方面已确立占主流地位。作为连续的片状材料干燥法,主要有喷射干燥器,这是由喷嘴向物料表面喷送高速气流的一种方法,已获得多方面的应用。通气干燥已成为有整形可能的泥状物料,粒状物料层和通气性物料层的干燥方面的主力,其结构也在不断改进。

除干燥装置本身部件外,附属设备也是极为重要的。湿物料的进料均匀和干燥制品的排出是特别重要的,粉尘处理和热风的密封问题等,所有干燥上容易发生故障的问题,几乎都可归结为附属设备问题。

一般是,进行干燥操作时,即使其效率稍微差些,特别由于物料移送的困难,在整个干燥工序中始终使用一个干燥器,但随着干燥

器向专用化方向发展,把不同类型的干燥器组合起来成为一个干燥单元,即使处理同一种物料,在含水率高时的干燥器和达到低含水率以后的干燥器,也属于不同类型,这种方式已在推广开来。在合成树脂粉末干燥中所使用的气流和沸腾干燥器的组合,就是一个例子。

干燥技术的发展,同主要工业部门的发展密切相关。据国外报道,并按照国内近几年的实际情况,强化和提高各种不同物料的经济性,总的说来依下列方向发展:

第一,增加单机功率,建立配套的大型高生产率设备,例如小时生产能力200吨的管式干燥器和沸腾层干燥器,每小时蒸发水分50吨的喷雾干燥器。

第二,通过采用载热体最佳参数,以及改进设备的流体动力学规范,来强化传热传质过程。

第三,在干燥前使物料细碎,可明显增加传热传质表面,以此来强化各种物料的干燥过程。为了干燥分散性物料,越来越多地应用沸腾和悬浮层干燥设备,它可大大加速过程,而这样做不仅对于提高干燥设备的技术经济指标,并且对于改进许多热敏性物料的质量都是很重要的。

第四,采用新型干燥方法和供热联合干燥方法。如在振动条件下干燥热敏性物料的装置,引起了人们的很大实际兴趣。一系列研究表明,采用振动方法不仅可保存食物(粮食和蔬菜)的质量,而且甚至可提高其商品价值。在食品和其他工业部门采用升华干燥即冷冻干燥装置,虽然费用贵,但是极有发展前途的,因为该法干燥的产品可长期保存本身的味道质量。此外,还有沸腾干燥、高频干燥、微波干燥、远红外干燥以及种种联合干燥方法。

第五,合理设计干燥装置时,必须规定干燥的连续性,从而保证整个工艺过程的连贯性和综合自动化。研制和采用自动化干燥设

备后,同时可采用合理的干燥规范,增加产量,改进产品质量,以及改善生产劳动条件。例如,象谷物这样的大批量产品,改用自动连续干燥和净化后,对谷物净化、干燥设备及其电气设备的需要量可减少50%以上。安设自动化谷物净化-干燥设备的费用,经2~3个收获季节即可回收。自动化干燥蔬菜,可使其最终含湿量由12%降至6%,从而使产品贮存期限延长四倍左右。

第六,在设计干燥装置时,一个极为重要的问题是减少热损失,提高热效率,节约能源,利用二次能源。减少耗能量的方法很多,除正确操作干燥装置外,主要有两个途径:一是物料在进入干燥装置之前通过有效的离心分离、过滤或压滤器除去尽量多的水分;二是改进干燥装置所用燃料的效率,主要是热效率,目前连续式干燥器的热效率已达75%。造成热损失的主要原因,通常是热量被离开干燥器的热空气带走。为了解决这一问题,应使进气温度尽量高,保持在产品热敏范围内,如果待干燥物料不是热敏性的,那么

温度在650°C以上也是可行的,而扩散型干燥器如气流干燥器、喷雾干燥器和沸腾干燥器,对于待干燥热敏性物料仅在高温区停留数秒钟,也可采用高温进气。与此同时,还应使排气温度尽可能低,把放空后含有固体的部分排气再循环,也把排气的部分热量送至进入废热交换器中的空气,使排气温度由137°C冷却至87°C。此外,还可用各种不同的干燥装置进行两步法干燥,第一步是快速除去表面湿分,第二步是除去结合水。它们包含着不同的干燥机理,而一个普通的干燥装置往往不能经济地达到此一目的的。

参 考 资 料

- [1] process Engng (英国) 1974年7月69页
- [2] инженерно-физический журнал 1974年26卷5期 775~780页
- [3] 上海染化十厂:我国干燥设备使用概况及发展趋势
- [4] Chem-Ing-Technik 1973年45卷23期 1330~1336页
- [5] 吉林化学工业公司设计院:干燥译丛

第二章 干燥技术的选择

一、概况

干燥方法种类很多,但主要有下面几种:

1. 通风干燥

先把粉状、粒状、块状及片状物料加工成层状物料,然后通以热风进行干燥。此法干燥效率比下面提到的表面干燥高20倍。如将湿粉先行造粒,可提高与热风的表面接触效果;如物料为滤饼或胶状时,则先在滚筒成型机上预热干燥成形,以防堵塞通风孔。

2. 表面干燥

在物料干燥期间,一般不加任何外力,仅将热风通过物料表面进行干燥。此法的干燥速度一般较低,干燥效率也较差。

3. 搅拌干燥

这种方法是指,一面搅拌物料以不断更换干燥表面,一面进行干燥。该法适用于干燥粉状、颗粒状及块状物料。

4. 沸腾干燥

这种方法是将热风通入粉状或粒状物料层,使之流态化,一面悬浮混合并分散流动,一面进行干燥。此法可任意调节物料与热风的接触时间。如较大粒子的低温干燥,用气流干燥法是不行的,也可通过调节风速而采用本法。

5. 气流干燥

此法是把粉状或粒状物料浮游至高温热风中,一面用热风移送,一面进行干燥。干燥速度很快,故又名快速干燥。如与湿块状物料破碎装置并用,则可同时粉碎和干燥。

6. 喷雾干燥

此法是将液状或膏糊状物料喷雾到热风中,在高温热风中一面接触并移送,一面进

行快速干燥,获得粉状制品。

7. 真空干燥

此法是在低于大气压的真空中进行干燥。它适用于低温干燥热敏物料,或者用于回收有机溶剂时。

8. 冻结干燥

此法是在高度真空减压下冷冻应从物料中除去的水分或其他液体,并将其保持在冰点以下,再通过传导或辐射进行加热,因而是种升华干燥方法。它特别适用于必须进行低温干燥而又不能耐热的物料。

9. 红外干燥

此法所用的热源是红外线辐射源,而红外线源是利用电或煤气。利用电时,使用红外线灯或电阻发热体;利用煤气时,则使用耐火材料或金属板、金属管来灼热,然后发生辐射热。此法的特点是,加热热量容易调节,并能选择性地集中地加热,装置结构也较简单。

10. 高频干燥

此法是把物料插入适当的电极间,并给以强高频交流电压,以物料中介电损失所产生的内部热作为热源进行干燥。此法的特点是,物料内部加热均匀,将物料的电容量和频率适当组合后,即能进行选择性地加热。

11. 超声干燥

此法是在物料表面碰到超声波时,促进了气体的分子运动,同时产生激烈的气穴作用,使物料中的液体成分放出,完成干燥作业。此法适用于热敏性物料,特别是医药品和食品。

12. 微粉碎干燥

此法也可称为气流干燥的改进,其不同点在于重点放在原料微粒化方面,做到微粉碎、分级、输送、干燥一条龙。此法适合于由

湿料制造微粉末的干燥制品。

其他干燥方法还有很多，这里就不一一介绍了。

干燥方法的合理选择，取决于待干燥的具体物料及其生产条件，否则是无法选择到最合理的干燥方法和干燥装置的。所以，在选择干燥方法之前，应该了解所蒸发的是什么液体，例如，是水还是有机溶剂，它的化学成分和化学性质(酸碱性)如何，以及它的分散性、粘附性能、湿态及干态的热敏性(着火点、软化点、熔点、分解温度、升华温度等)、粘性、表面张力、含湿量、防爆性、热物理常数等等，还应确定对成品的基本要求(分散性、纯度、强度等)以及干燥过程和其他过程(如煅烧、分选、造粒、破碎等)的结合必要性。影响干燥方法选择的，有干燥前过程的性质、干燥后进行的过程以及热源等。

二、干燥介质的选择

干燥介质的选择，决定于该过程的工艺以及所用的热源。基本热源是液态或气态燃料、蒸汽、电能，有时也利用太阳辐射能。为了评价干燥费用，应了解蒸汽的来源。辐射干燥和传导干燥基本上用于有韧性的细薄物料。对流干燥的应用，在干燥介质为热空气或氮气、烟道气、过热蒸汽或有机液体蒸汽时最为广泛。空气用于干燥温度不高，且干燥介质中存在氧气不影响被干燥物料的性能。

应指出，采用耐热钢制的换热器，可把空气加热至 500°C ，而在具有中间固体热载体的系统中可加热至 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，但此种换热器尚未广泛用于工业部门。

烟道气一般用于高温干燥时，即物料在以重油或煤做燃料的情况下不同其中所生成的二氧化碳或二氧化硫相互作用时。氮气主要用于下列场合，即物料会受氧化，或者物料中蒸发出的液体是易爆的。用氮作干燥介质时，干燥装置是密闭操作的。如果温度在 130

$^{\circ}\text{C}$ 以上时物料不会改变性质，则可用过热蒸汽来干燥。在干燥悬浮或半悬浮状态的某几种聚合物(如聚乙烯、苯乙烯共聚体)时，干燥装置中会积聚大量静电荷。在此场合，为防止干燥设备爆炸，除将其壳体接地外，利用氮气或过热蒸汽来干燥是合理的。

对于极其热敏的物料，可采用所谓冻结干燥，即利用在 40°C 以下预干燥的空气，因为在低温下氧化过程大大减慢。空气的深度干燥用硅胶进行，而且布置有两只干燥装置，其中一只工作，另一只再生硅胶。作为干燥吸附剂的，可以是五氧化二磷和氯化钙。空气不作深度干燥时，一般采用以乙二醇装置中预冷却的水来喷洒的调节器。干燥化学纯物料时，务必在专门过滤装置中除去空气中的尘分。

三、干燥规范的选择

最佳的干燥规范，是指在耗热、耗能量最少情况下保证获得最好的产品质量。干燥的温度规范，取决于被干燥物料的性质及生产流程条件。为了强化干燥过程，且保证具有经济性，干燥介质的起始温度可保持在物料性质容许的最大范围内。废气温度主要根据经济性及产品规定最终含湿量来确定。废气的温度和湿度也决定于气体系统和集尘系统工作的可靠性。烟道壁温应高于废气的露点。

在对流干燥时，通常采用物料和干燥介质并行运动的原理，此时操作可用起始温度较高的气体，因为在干燥的第一阶段物料温度等于湿球温度计温度。平行流装置中的干燥过程，其强度和经济性均优于物料和干燥介质逆流运动的干燥装置。逆流主要用于一些特殊情况，例如干燥过程和煅烧过程结合时，吸湿物料干燥至很小的最终含湿量时，或者湿料在较高温度下熔化时。

多室式干燥室主要应用于下列场合，即

被干燥物料性能随含湿量下降而急剧变化时,或者干燥过程和其他热过程或化学过程结合在一起时。为了选择干燥室数目及干燥规范(气体速度、温度等),务必预先获得被干燥物料的热力图,因为在一定的湿度变化范围内,被干燥物料会出现各种不同的软化点、熔点或分解温度。了解了每个温度范围内过程的这些特点,就可采用各自最强化的干燥规范。

分析热力图以后,就可确定保证获得所需物料质量的干燥规范(干燥、脱水等过程)。根据热力图,还可找到允许的或必需的物料温度,或者按此确定最佳的干燥室数目和干燥装置工作原理。

应该指出,在干燥时,脱水动力学和化学变化动力学主要决定于物料的温度,即物料的加热时间,例如磷酸钠脱水时间在层中为一小时,而在同一温度下以细粒悬浮状态脱水时仅需几秒钟。

四、干燥方法的选择

合理的干燥方法和干燥规范的确定,应根据每种具体物料,并考虑到它的物理化学性质或生物学性质、生产工艺等。在选择合理的干燥方法,务必能满足下列要求:

1. 所得产品必须具有一定的质量指标,如化学成分的稳定性、强度、湿度等。

2. 必须保证最低限度的单位耗热量或耗能量(即蒸发一公斤水或一吨成品所消耗的热量或能量)。所选干燥方法的经济性,仅可通过和适用于该物料的其他干燥方法比较才看得出。

3. 干燥过程达到高度强化,装置尺寸相应说来达到最小,而价格不贵。干燥强度的表示方法是每立方米干燥装置容积或每平方米生产面积上除去的水分或产品,此时还务必考虑辅助设备的价格和规格。

4. 为了在保持产品高质量情况下强化

干燥过程,干燥装置尽可能实现全自动,这样才有可能实现整个生产流水线的综合自动化。例如环形干燥机不可能实现强化操作,因为它实际上不能做到全自动,但就经济指标来看,它也不亚于其他型式的干燥器。

5. 单个干燥设备要达到最大生产能力。特别是在干燥大吨位物料时,务必考虑到这一指标。例如,滚筒干燥机,虽然就耗热量说是比较经济的,但产量小,对于大吨位物料就不宜加以推广,而应以喷雾干燥器来代替。

6. 要注意被干燥物料的价格及单位时间处理的物料数量。例如,在干燥少量贵重物料时,对于选择合理干燥方法和干燥装置结构,单位耗热量或耗能量没有决定性意义。

7. 还应考虑当地的生产条件,如全厂的运输、物料在干燥机前后流程中的处理情况,以及有毒物料、化学侵蚀性物料、会析出有毒或易爆物质的物料的干燥特点。在干燥时会析出有毒气体的场合,要优先考虑采用无回转部件的密闭设备,例如,沸腾干燥器、喷雾干燥器等。此外,在选择干燥方法时,务必保证干燥装置可靠工作、车间内清洁卫生、装置检测维护方便。

因此,在根据上述要求比较具体物料的可能干燥方法后,即可正确地选择干燥器。如果不用各种不同方法来考虑干燥过程的所有指标,则不能正确得出结论。例如,为了干燥液体物料,可采用喷雾干燥器和沸腾干燥器。采用喷雾干燥器时,单位耗热量和耗能量一般较小;而采用沸腾干燥器时,干燥过程要强化好几倍。喷雾干燥热敏性物料时,可采用起始温度较高的气体,所以,此时集尘装置和燃烧室的尺寸将小于沸腾干燥时。

比如说浆料的干燥,采用喷雾干燥器和惰性填料(石英砂)沸腾干燥器的结果比较如下(沸腾层高度1米,系统液压阻力2000毫米水柱):

	沸腾干燥	喷雾干燥
含湿量, %		
原料	66.6	66.6
产品	1.0	1.0
气体温度, °C		
进口	500	700
出口	150	80
气体系统阻力, 毫米水柱	2000	300
单位耗热量, 公斤/吨产品	372	275
单位耗能量, 千瓦时		
用于喷雾1吨产品	12	36
用于通风	145	125

如果是年产10万吨的装置,此时采用喷雾干燥较合理;而在沸腾层干燥耐热溶液,且同时将干燥物料造粒时,采用沸腾干燥装置具有较好的经济指标。

在处理不必深度干燥的细散物料时,在很多情况下宜用气流干燥代替沸腾干燥,因为此时采用气流干燥效率较高,经济又合算,因为气流干燥器可使气体达到较高温度,而不会损害产品质量。

干燥硅藻土时,当每小时产量为150公斤,采用沸腾干燥不妥当,因这种干燥器的尺寸小,而包括旋风除尘器和袋滤器在内的除尘设备系统尺寸很大。此时较宜采用传导性盘式干燥机,因为这种装置实际上不会带走灰分。

苏联有人错误地认为^[1],在干燥硫酸铵时,沸腾干燥器的耗电量低于转筒干燥机。也有人不正确地得出结论^[2],认为在沸腾层干

燥砂粒时,耗电量比转筒干燥机少66~80%,燃料耗量也较少,而沸腾干燥器的价格比管式气流干燥器低75%。这些数据与上述所列干燥器的特性不相符合。应该指出,各种干燥方法只有在可比条件下和最佳干燥规范下才能进行比较。只有在这种情况下,方可获得合理选择各该具体物料的干燥方法的正确概念。

国外工业中用得最多的是连续式干燥装置。间歇式干燥器仅用于特殊条件下,例如,在小批量情况下,干燥规范要求很严格变化的场合,宜采用间歇式干燥器。

据苏联有关资料报道^[3],从选择湿料的合理干燥方法观点出发,物料分为四类,而每一类物料的物理性能都有某种程度的相似之处。每一类物料,有可能推荐采用不同的干燥方法。例如第一类物料,包括所有液体物料,如真溶液、胶状溶液、乳浊液、悬浮液,它们都可用泵浦唧送,但有机物料乳浊液和胶状溶液的干燥过程,大大不同于无机物料的真溶液和疏水悬浮液。属于第二类的物料是不可用泵唧送的膏糊状物料,而这样物料往往是在悬浮液于过滤器或离心机机械脱水后获得的。属于第三类的物料有颗粒状、块状、灰尘状物料,它们在湿态具有一定的松散性。第四类物料则是薄薄的韧性物料,如织物、纸、薄膜、胶卷等。各种物料的较好干燥方法及典型指标如下:

干燥器	干燥规范	干燥强度, A_{r1} 公斤/(米 ² ·小时); A_{r1} 公斤/(米 ² ·小时); K , 千卡/(米 ² ·小时·度)	干燥1公斤水的消耗量	
			耗热量, 千卡	耗电量, 度
滚筒常压干燥器	液体物料 蒸汽压 $P = 2 \sim 5$ 大气压	$A_r = 7 \sim 60$; $K = 45 \sim 250$	1.3~2.5公斤蒸汽	$N \approx 0.05nF$ (N -转数, F -滚筒面积)
真空滚筒干燥器		$A_r = 4 \sim 15$; $K = 25 \sim 170$ (清洁壁); $K = 5 \sim 28$	1.3~1.8公斤蒸汽	—

干燥器	干燥规范	干燥强度, A_F 公斤/(米 ² ·小时); A_F 公斤/(米 ² ·小时); K 千卡/(米 ² ·小时·度)	干燥 1 公斤水的消耗量	
			耗热量, 千卡	耗电量, 度
喷雾干燥器	$t_1 = 120 \sim 900^\circ\text{C}$ $W_1 = 20 \sim 98\%$	$A_F = 1.5 \sim 25$ $a_F = 25 \sim 70$ 千卡 (米 ² ·小时·度)	850~1200 1200~2800	0.06 —
沸腾干燥器 (对耐热溶液)	$t_1 = 500 \sim 750^\circ\text{C}$; $u = 1.5 \sim 2.5$ 米/秒,	$A_F = 100 \sim 600$	900~1200	—
膏糊状物料				
槽式干燥室	—	$A_F = 4 \sim 15$ (高湿度) $A_F = 0.3 \sim 2.0$ (低湿度)	2~4 公斤蒸汽	—
环形干燥机	$t_1 = 100 \sim 135^\circ\text{C}$, 负荷 7 公斤/米 ²	$A_F = 1 \sim 2$	2,000~7,000	0.02~0.04
带搅拌机的环形干燥机	$t_1 = 150 \sim 500^\circ\text{C}$	$A_F = 35 \sim 60$	1,000~2,500	0.01~0.05
固体分散物料				
带式干燥机	$t_1 = 100 \sim 200^\circ\text{C}$, $u = 0.1 \sim 0.5$ 米/秒	$A_F = 5 \sim 18$	900~1,500	—
螺旋刮板式干燥机	蒸汽压 $P = 2 \sim 6$ 大气压	$A_F = 5 \sim 20$ (高湿度) $K = 10 \sim 150$	1.5~2.5 公斤蒸汽	—
蒸汽管式干燥器	蒸汽压 $P = 1.5 \sim 4.5$ 大气压	$A_F = 3.5 \sim 8$ $K = 10 \sim 60$	730~850	$N = (0.8 \sim 1.0) F$ 瓦 (F —加热面积, 米 ²)
盘式干燥机	—	$A_F = 1.5 \sim 12$ $K = 30 \sim 60$	750~850	—
涡轮式干燥机	$t_1 = 200 \sim 500^\circ\text{C}$	$A_F = 1 \sim 10$	860~2,500	—
立式干燥机	$t_1 = 100 \sim 250^\circ\text{C}$ $u = 0.1 \sim 0.3$ 米/秒	$A_F = 20 \sim 50$		
转筒干燥机	$t_1 = 150 \sim 700^\circ\text{C}$ $n = 1.5 \sim 5$ 转/分	$A_F = 3 \sim 150$ A_F 平均 = 24~50	975~1950	—
气流管式干燥机	$t_1 = 150 \sim 1000^\circ\text{C}$ $u = 10 \sim 60$ 米/秒	$A_F = 200 \sim 800$	850~1100	—
沸腾干燥器	$t_1 = 120 \sim 700^\circ\text{C}$ $u = 0.8 \sim 3.5$ 米/秒	$A_F = 10 \sim 1000$	950~1400	—
薄片物料				
环形干燥机	$t_1 = 28 \sim 120^\circ\text{C}$ $W_1 = 50 \sim 90\%$	$A_F = 0.8 \sim 20$	2~3 公斤蒸汽	—
柱形干燥机	蒸汽压 $p = 1.5 \sim 3.0$ 大气压 $W_1 = 60 \sim 70\%$	$A_F = 8 \sim 14$ $K = 200 \sim 400$	2~2.5 公斤蒸汽	0.01~0.03