

第一部分 干燥设备选型技术

概 述

同其他工业技术一样，干燥技术在应用过程中也得到长足的进步。目前已开发出的干燥机的种类已达 400 多种，而且有约 200 多种干燥机已应用于工业化生产，其中出现了许多新型干燥机，它们有的是对普通干燥机进行结构上的改进，有的借鉴吸收了其他干燥机的优点，有的完全是一种新想法。

干燥又是工业耗能相当大的一个单元操作，据资料记载，发达国家工业耗能的 14% 被用于干燥，有些行业的干燥耗能甚至占到生产总耗能的 35%，而且这个数字在不断地增大。同时，运用矿物燃料作为热源进行干燥操作产生大量的二氧化碳等气体。干燥设备的尾气（这些气体中夹带一些粉尘）对大气环境有不良的影响，这对于日益引起全球关注的“环境保护”是一个极大的挑战。

几乎所有的工业都离不开干燥操作，虽然正确地了解干燥及干燥设备的工作机理有助于成功地完成干燥过程，但是仍然需要我们不断地投入人力和物力去进一步进行干燥技术的研究和开发，以使其在生产高质量产品的同时，有效地利用能源，减少对环境的不良影响，并且更易于实现过程操作和控制。

一、干燥技术的特点

干燥技术有很宽的应用领域，面对众多的产业、理化性质各不相同的物料、产品质量及其他方面千差万别的要求，干燥技术是一门跨行业、跨学科、具有实验科学性质的技术。通常，在干燥技术的开发及应用中需要具备三个方面的知识和技术。第一是需要了解被干燥物料的理化性质和产品的使用特点；第二是要熟悉传递工程的原理，即传质、传热、流体力学和空气动力学等能量传递的原理；第三要有实施的手段，即能够进行干燥流程、主要设备、电气仪表控制等方面的工程设计。显然，这三方面的知识和技术不属于一个学科领域。而在实践中，这三方面的知识和技术又缺一不可。所以干燥技术是一门跨行业、跨学科的技术。

现代干燥技术虽已有一百多年的发展史，但至今还属于实验科学的范畴。大部分干燥技术目前还缺乏能够精准指导实践的科学理论和设计方法。实际应用中，依靠经验和小规模实验的数据来指导工业设计还是主要的方式，造成这一局面的原因有以下几方面：

原因之一是干燥技术所依托的一些基础学科，（主要是隶属于传递工程范畴的学科）本身就具有实验科学的特点。例如，空气动力学的研究发展还要靠“风洞”实验来推动，就说明它还没有脱离实验科学的范畴，而这些基础学科自身的发展水平直接影响和决定了干燥技术的发展水平。

原因之二是很多干燥过程是多种学科技术交汇进行的过程，牵涉面广、变化因素多、机理复杂。例如在喷雾干燥技术领域里，被雾化的液滴在干燥塔内的运行轨迹是工程设计的關鍵。液滴的轨迹与自身的体积、质量、初始速度和方向及周围其他液滴和热空气的流向、流速有关。但这些参数由于传质、传热过程的进行，无时无刻不在发生着变化。而且初始状态时，无论是液滴的大小还是热空气的分布都不可能是均匀的。显然，对于如此复杂、多变的过程只凭借理论计算来进行工程设计是不可靠的。

原因之三是被干燥物料的种类是多种多样的，其理化性质也是各不相同。不同的物料即使在相同的干燥条件下，其传质、传热的速率也可能有较大的差异。如果不加以区别对待，就有可能造成不尽人意的后果。例如某些中草药的干燥，虽然同属一种药材，只因为药材产地或收获期存在区别就须改变干燥条件，否则产品质量就会受到影响。

以上三方面的原因决定了干燥技术的开发与应用要以实验为基础。但干燥技术的这些特点往往被人有意或无意地忽视。制造厂商由于实验装置缺乏或机型不全（这在我国是一个普遍存在的现象）经常回避应做的干燥实验，而用户由于不了解干燥技术的特点，也经常放弃进行必要实验的要求。其结局是装置使用效果不佳，甚至于造成方案设计失败。在我国，这样的事例屡见不鲜，曾有过一套价值 2000 万元人民币的工业干燥装置因达不到使用要求而被闲置的教训。因此，建设工业干燥装置尤其是较大的装置之前，一定要进行充分的、有说服力的实验，并以实验结果作为工业装置设计的依据。这是干燥技术应用的显著特点。

此外，干燥设备种类繁多、各具用途也是干燥技术的一个特点。每一种技术都有自己适宜应用的领域。在工程实践中，要根据具体情况选择适用的干燥技术种类。这对投资费用、操作成本、产品质量、环保要求等方都会产生重大的影响。例如某一企业，在白炭黑滤饼干燥上曾经分别选用过箱式干燥、喷雾干燥、旋转气流快速干燥三种型式。最终结果证明这三种技术各有所长。箱式干燥生产白炭黑虽然生产效率低、人员劳动强度大，但产品质量好。与橡胶混炼后所生成的制品扯断强度值较高。旋转气流快速干燥设备紧凑、投资少、生产效率高，但所生成的橡胶制品的强度指标却是三者间最差的。喷雾干燥生产白炭黑，产品各项指标在三者间居中，但具有产品流动性好、粉尘污染小，深受用户及操作者欢迎的特点。在 20 世纪 90 年代，为白炭黑生产中采用哪种干燥方式更为先进的问题，曾在我国干燥界引发过争论。其实，三种设备各有特点，选用哪种机型要看用户自身的条件和产品要求。不存在哪种技术更为先进的结论。类似的例子有很多，都表明了干燥设备种类繁多、各具用途的特点。所以在应用中要仔细比较、慎重选择技术方案，而通过干燥实验来考核技术方案也是必不可少的步骤。

二、工业干燥装置的发展现状

干燥在许多生产中是一个十分重要的单元操作，因为干燥在这里不仅是简单的固液分离过程，更重要的常常是生产过程的最后一道工序，产品的质量、剂型在很大程度上取决于干燥技术和设备的综合运用情况。从经济角度考虑，干燥器价格昂贵，工程投资较大。另一方面，干燥又是高耗能过程，热效率在 15% ~ 80% 这样大的范围内波动，而设备的运转费用与干燥器的设计选型有非常密切的关系，所以企业的决策者对此历来都比较重视。被干燥物料的品种有许多，它们的理化性质又有很大差异。甚至同一品种不同的生产工艺、同一品种不同的产品要求，导致干燥条件可能都有区别，所以就决定了干燥工程的复杂性。由此可见，干燥过程较其他的单元操作具有更高的技术性。

我国干燥设备在解放前基本是空白，只有烘房、烘箱和滚筒干燥机，干燥技术落后、生产设备原始。到 1957 年才出现了真空耙式干燥机，1964 年以后干燥技术有了较快的发展。纵观我国干燥技术及设备的发展史，在几十年间经历由简到繁、由低级到高级的发展阶段，现在常用于生产的干燥设备有十余类三十多个系列，加上组合干燥设备约有五十几种，再加上专用干燥设备就更难于统计，合理地选用这些干燥设备也不是一件易事，选型的前提是了解这些设备的基本工作原理、结构特点以及适用物料范围，这样在选型时才避免走弯路。

近些年来，由于干燥技术的发展，给筛选设备带来了更多的复杂因素。即使是干燥设备的设计、制造或使用者也常常弄不清如何去选择合适的设备。由于干燥设备的推销者在市场上只是对他们推销的干燥机种类感兴趣，而对其他种类则并不介绍，这样，用户就只得借助于有关的现代干燥技术参考资料决定对设备的最后选择。毫无疑问，用户很需要由推销者提供的实验室，实验范围及技术经济方面的资料。因此，就必须熟悉大多数干燥设备，才有可能选出合理的设备。应该强调的

是，在特定的生产运行状态中，很有可能有很多较适用的干燥机，但也必须知道，在特定的工作状态中，没有一个严格的规则规定出极精确的最佳干燥设备，每一种产品都有自己独特的生产方式。影响最佳干燥装置选择的因素很多，如选择间歇干燥还是连续干燥、矿物燃料的消耗、电耗、地方环境法或噪音污染限制等。产品产量对干燥机的选择更是一个主要因素。

三、干燥设备使用概况

前面提到，干燥设备是在许多工业生产中大量应用。多年来已有多种机型用于工业化生产中，如气流干燥器、流化床干燥器、喷雾干燥器、滚筒干燥机、耙式干燥器、冷冻干燥机、红外线干燥及组合式干燥等达几十种之多。为什么干燥设备类型很多呢？这主要是由于干燥物料形态、性质各不相同，处理的物料有各种不同的具体要求所致。

随着我国各行业的生产技术的飞跃发展，国内干燥技术和设备也得到了迅速发展。在散粒状物料的干燥方面，近几年来流态化技术获得了更加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。除了国内在干燥技术中使用较早的气流干燥获得较迅速发展外，近年来流化干燥设备发展得最快。主要表现在利用流态化技术结合各种被干燥物料特性和要求创制了很多新型高效的流态化干燥器，分述如下。

直管气流干燥器是国内使用较早的流化干燥设备，经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，还是比较理想的干燥设备。它无论生产量，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、化肥等工业中使用的更加广泛。但气流干燥还存在热利用率较低、设备高、气固两相相对速度较低等缺点。近年来创制了脉冲气流干燥器、旋风气流干燥器、粉碎气流干燥器等新型气流设备，克服了直管气流干燥的缺点。粉碎气流除降低高度外，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，又提高了产品的产量和质量，此外还采用了多级气流干燥流程和组合气流干燥流程，在气流干燥器的应用上，许多工程采用了二级串联方式，在有些物料的干燥上更加合理，也提高了热效率。直管气流干燥在生产操作方面已很成熟。脉冲气流、旋风气流干燥已工业化多年，操作已较成熟，但理论设计方面还很缺少。在今后的实践发展中还需进一步完善。

大部分热敏性较强和易氧化的物料，均采用气流干燥。一般能将初湿为 10%~25% 的物料干燥至 1%~0.05%，被干燥的物料粒度一般在 60~100 目，产量一般在 100~200kg/h。目前国内在制药、食品、塑料等工业中广泛使用。随着我国生产技术的飞速发展，气流干燥在今后的工业生产中必定应用得更加广泛。

流化干燥是最近年发展起来的又一干燥技术。经过生产实践证明它有很多优越性，·能实现小设备大生产，由于热容系数较大和停留时间可任意调节，故对含表面水和需经过降速干燥阶段的物料均适用，特别适用于散粒物料的干燥。最近发展起来并已工业化的有下列几种型式：单层圆筒型、多层圆管型、振动流化床、卧式多室流化床干燥器、搅拌流化床以及内藏热管流化床等，其中以后者发展得较迅速。目前已在制药、化肥、食品、塑料、石油化工等工业中广泛使用。经过几年的实践，国内流化干燥无论在操作、设备结构等方面均已发展到较成熟阶段。从使用情况看，卧式多室流化干燥器由于结构简单、操作方便而稳定、物料适应性广，既能获得含水均匀的产品，动力消耗又少，是流态化干燥散粒状物料较理想的设备，今后值得推广与发展。内藏热管是流化床对流传热和传导传热相结合的产物，具有较高的热效率，干燥效果也效好，是近年来很受推荐的新机型。

国内锥形流化床按操作分有三种型式：一种是浓相溢流出料，近年来国内较多在流化造粒方面使用；另一种即喷动床干燥，是由床顶出料，产品在旋风分离器内收集或间歇操作床底出料。这种结构比流化床结构简单，设备小，产量大，干燥强度高、床层等温性强、不发生局部过热。过去仅适用于大颗粒物料（聚氯乙烯），近年来已发展至能应用于细粒物料的干燥。目前在塑料、谷物、制

药等部门使用。但因动力消耗较大，使用受到一定限制。

在溶液状或浆状物料的干燥方面也获得了较新的发展，除使用得较多的喷雾干燥有了新的发展外，近年来已成功地采用了锥形流化床进行喷雾造粒生产并已逐步在发展和完善中。喷雾流化造粒干燥器首先在化肥上采用，目前已在医药、食品等工业中采用。喷雾干燥在国内使用已有二十几年，在设计和操作等方面都已较成熟。近年来喷雾干燥有以下几方面的进展：

(1)干燥室除向大型化发展外，喷头雾化器性能方面有关单位也作较多的实验研究工作，并取得了显著效果；

(2)除热敏性溶液更加广泛采用喷雾干燥外，近年浆液也成功地采用了喷雾干燥；

(3)喷雾干燥与其他干燥技术结合以达到干燥或干燥造粒同时进行的目的，这也是我国干燥技术水平进一步发展的体现；

(4)目前正在进行低温喷雾干燥的实验，它是将含湿量极低而温度不高的空气作载体，空气经过预先脱水干燥，在干燥过程中产品温度不超过 35℃，因此适用于热敏性物料的干燥，如医药、食品脱水等。

目前已工业化的与喷雾技术综合应用的有喷雾气流干燥，喷雾流化造粒，喷雾转筒造粒。随着我国工农业的大发展，喷雾干燥技术必将越来越广泛运用。

从现在工业应用情况来看，膏状物料使用烘房干燥所占比例还很大，其中产量大的也很多，如染料、颜料、中间体、无机盐等。烘房干燥膏状物料的缺点是：物料是静止的，物料与干燥介质接触面积小，接触状况不良，干燥时间长；热效率低，在干燥过程中需要人工翻动，否则产品质量不均匀；在高温下装卸、翻动物料，不可避免的产生粉尘飞扬，操作环境很恶劣，严重地影响工人身体健康。经箱式干燥后的许多物料还需要再粉碎而产生二次污染。物料产量越大，上述矛盾就越突出。现在许多设备可以代替箱式干燥，因此，膏状物料的干燥目前主要以闪蒸干燥机和粉碎气流干燥机、耙式干燥机、桨叶式干燥机为主。最近几年来，国内膏状物料干燥技术已大大前进了一步，其表现如下：

真空耙式干燥机对大多数膏状物都能适用。近年来在膏状物的干燥中起了很大作用，采用也较普遍，它无论在产量及劳动环境等方面都较烘房改善了，具有易操作，劳动强度等优点。但产量大时采用真空耙式干燥机则占地面积和造价大的矛盾较突出。为了解决大产量膏状物料的干燥问题，国内近年来已成功地采用了流态化技术进行干燥生产。目前已工业化的有下列几种设备：薄膜流化干燥机、螺旋气流干燥器、流化气流干燥器、闪蒸干燥机、粉碎气流干燥器。这些设备具有产量大，设备结构紧凑，占地面积小，劳动强度低，易制造等优点。目前已在染料、颜料、无机盐等工业中推广使用。对膏状物料的干燥作用较好，多数膏状物料都能适应。但这些设备还远不能完全满足生产的要求，有些新设备目前还存在一些缺点，需进一步完善。

转筒干燥器，由于它的处理量大，操作费用低，适应性好。如碳酸钙、谷物、化肥等均普遍采用。虽然它存在耗金属多，制造周期长等缺点，但对上述物料还是比较适用的。最近转筒干燥有了新的发展，已成功地溶液物料的造粒干燥中使用，通气式转筒干燥机的开发成功使这一设备又有了新的功能。

四、我国干燥设备发展趋势

经过多年的发展，我国的干燥设备行业已形成了一定的企业数量和生产规模。直接从事各类干燥设备专业制造厂家约 400 家之多，与干燥设备配套的企业有 100 多家，还有部分各类机械厂也在制造干燥设备，主要分布在制药机械、化工机械、食品机械、农产品加工机械、矿山冶金、林产品、轻工陶瓷等设备加工行业，这些行业的干燥设备生产企业占全行业总数的 80% 以上，行业总产值约 20 亿元以上。行业中产值在 1000 万元以上的企业占总数的 48% 左右；500 万元以上的企业占总数的 70%。许多企业是在早期企业的基础上逐渐派生出来的，地理位置相对集中，人员结构存在

严重的不合理。到目前为止，企业主要分布在江、浙、沪、辽、黑，这几个地区的企业几乎占到全行业总数的 50%，我国还有部分省没有干燥设备生产企业。行业内竞争激烈，一些企业注重眼前利益，缺乏系统发展思路，整体素质提高缓慢，严重地阻碍了行业的正常发展。

我国干燥技术与世界发达国家的同行业相比还存在着一定的差距，市场中、低技术产品占主导地位。目前在华的外国干燥设备公司约有 40~50 家，今后将会有更多的国际同行进入国内市场，随着国际竞争的不断加剧，我国将面临巨大的竞争压力。日益激烈的竞争要求我们的企业必须通过技术进步、吸收国外先进技术、自主创新来提升产品技术含量和装备水平。产品发展的思路要在设备的大型化、控制的自动化程度、设备表面处理质量、耐腐蚀材料的选用上下功夫，开发多功能组合干燥器，促进产品的生命周期不断延长。要多组织企业参加国际间技术交流，吸收最新技术成果，加速提高全行业技术水平。

我国干燥行业特点是企业不大、不强、不专、不精，数量多而整体素质不高，多数企业管理落后，未达到规模经济，应通过行业协会进行指导和协调，改变盲目发展的状况。江、浙、沪三地相对集中的企业，可以考虑利用合资、合作、收购的方式向中西部地区迁移，寻找更广阔的企业生存和发展空间。行业内企业间要走强强联合的道路，在行业内培育一些技术实力雄厚、拥有著名品牌和自主知识产权的大公司、企业集团。企业应积极调整产品结构，培育核心竞争能力，形成自己的特色产品和特色服务。

我国干燥设备生产企业中，有 50%左右是家族式企业，在管理模式上多采取家族式管理，无法与国际同行相比，市场经济体制下的企业管理必须遵循经济规律和价值规律，管理水平跟不上是我国干燥设备企业不大、不强、不精的根源之一。市场经济的发展要求我们的企业必须重新审视企业的组织结构和管理模式。建立现代企业制度是摆在面前的又一重大课题。按现代企业的要求，对现有企业进行改造，制定长远的发展战略，借助企业外的资金壮大企业实力，用先进的管理思想指导企业，使之在较短的时间内有较大的发展。

我国干燥设备生产企业的创新能力较低，能够推出自主知识产权的新技术、新产品的企业寥寥无几，这是我国干燥设备发展缓慢的重要原因。目前，我国有几十所高校、科研单位从事干燥技术的开发研究，分布在我国各地，但大部分知识成果没有有效地转化为现实生产力。企业要成为技术创新的主体，应直接与这些高校和科研单位以多种形式联合，使资源得到合理的配置与利用，有效地培育和发展企业的创新能力。对提高我国干燥设备的制造水平将起到重要作用。

纵观行业的发展情况，在众多的干燥设备制造企业中，发展较好的有四种类型。首先是建厂时间较长的老厂，这些厂在用户中有较广的影响面，机型齐全，适应用户的能力较强，产值较高。其次是在某一行业知名度较高，同行业用户口耳相传，设备厂对被处理料的各种性质较熟悉，容易获得用户的信任，在某些行业中有垄断能力。第三种企业是对某种机型有较深入的研究，一旦物料必须采用这种机型，设备厂就有可能获得该工程的制造机会。第四种企业是成套设备制造企业，将干燥设备纳入到单元设备之中，这种企业往往大型企业，各类工程技术人员都有，技术能力较强，是以高技术含量、高附加值、成套化设备争取市场。

从行业发展角度分析，随着制药厂设备改造的完成，制药行业对干燥设备的需求量将要减少，干燥设备的竞争将更加激烈。我国的干燥设备如不能走出国门，很难有更大的发展。

五、干燥技术的进展

干燥设备不仅是石油化工、医药、染料、化肥、农药、催化剂等行业中的重要生产装置，而且在其他工业体系来说，如食品、纺织、冶金、机电、木材、造纸行业中也是必不可少的常用设备，充分说明了“干燥”这一工业技术在整个国民经济中的作用。通过调研，也看到了我国在干燥技术方面还存在着一些问题。例如，很多使用比较广泛的新型高效干燥设备，已经使用多年还没有定型化（基本定型）、系列化、通用化。影响了发展速度，增加了基本建设和技术改造的投资费用。

目前干燥技术的进展主要表现在以下几方面：

1. 干燥设备研制向专业化方向发展

由前所述，干燥设备应用极广，遍及国民经济各部门，而且需要量也很大，因此为干燥设备向专业化方向发展，今后可能出现更多的专用干燥设备。

2. 干燥设备的大型化、系列化和自动化

从干燥技术经济的观点来看，大型化的装置，具有原材料消耗低（与相同产量相比）、能量消耗少、自动化水平高、生产成本低的特点。设备系列化，可对不同生产规模的工厂及时提供成套设备和部件，具有投产快和维修容易的特点。例如，喷雾干燥装置，最大生产能力为 200t/h；流化床干燥器干燥煤的生产能力可达到 350t/h 产品。

3. 改进干燥设备，强化干燥过程

近年来，常用的干燥设备（喷雾、流态化、气流干燥等），仍在原有的基础上改进和发展。

(1) 改善设备内物料的流动状况（或干燥介质的流体力学状况），强化和改善干燥过程。例如气流干燥器，从直管气流干燥，改成脉冲气流干燥器，使被干燥粒子在脉冲气流的作用下多次的加速，强化传热传质过程。又如，改进喷雾干燥器的进风装置，达到控制雾滴的运动状况等目的。

(2) 增添附属装置，改善干燥器的操作，扩大干燥设备的使用范围。在气流干燥器的装置中增添分散器，使气流干燥器用于分散性差的湿物料的干燥；增添破碎机，使气流干燥器用于块状物料的干燥；增添混合器，使气流干燥器用于含水率很高的物料；增添分级机，以解决产品粒度的均匀化等。

在喷雾干燥方面，研制了高黏度物料的雾化器；研制各种喷雾干燥器的进气分布装置，使干燥塔中心与塔壁的气速基本一致，减少物料粘壁的机会；安装电磁自动振动装置，防止物料粘壁等。

在流化床干燥器中，增添附属装置，改善其操作性能。例如在单层圆筒形流化床中，添加旋转分隔板，分隔板从流化床中部开始旋转分隔直至出料口。湿物料从流化床中部加入，在旋转分隔板的控制下，物料从进口至出口一边流化一边运动，而不会“短路”，因此，物料在流化床中的停留时间均匀。在双层流化床中的上层，增添摆动的物料松动器，当流化床操作时，松动器不停摆动，松动物料，避免形成死床层，以改善流化床的特性。在卧式多室流化床中的第一室，增添搅拌装置，使凝聚的湿物料分散，同时排除不能流化的大颗粒。此外，在卧式多室流化床中，把固定隔板改成悬挂在回转链上的运动隔板，在运动隔板的作用下，物料从加料端均匀地移到出料端，实现了物料的“活塞流”，可使被干燥物料停留时间均匀，产品含水率也均匀。

4. 采用新的干燥方法及组合干燥方法

近年来高频干燥、微波干燥、红外线干燥以及组合干燥发展较快。另外，如利用弹性振动能强化固体物料的干燥。弹性振动能—声波对固体物料表面作用，可使湿固体表面流体边界层破坏，减小传热和传质的阻力，故能强化干燥，但声强不能低于 143~145dB，这也是技术难题。

5. 降低干燥过程中能量的消耗

干燥是消耗热量很大的化工单元装置。在干燥过程中，热效率变化很大，如药片包衣干燥时，热效率为 7%；食品添加剂的流态化干燥，热效率为 20% 左右；一般化学工业中干燥热效率为 20%~50%。提高干燥过程热效率的主要措施如下：

(1) 对现有干燥设备，加强热管理。如防止干燥介质的泄漏，使燃烧炉中的完全燃烧，对带有热空气循环的干燥设备，尽可能保持最大的循环风量等。

(2) 改善设备的保温。一般干燥器损失热量为 3%~30%。在对干燥器散热量进行测定的基础上，采取措施，改善设备的保温，减少热损失。

(3) 防止产品的过度干燥。干燥过程中，应严格地把产品控制在要求的含水率范围内，避免造成产品的过度干燥而增加能量消耗。例如纸张干燥，是为了保证纸张的强度，要求其含水率为 7%，而多滚筒干燥机可能将纸过度干燥到含水率为 4%。为了防止过度干燥，可以减少最后几个滚筒，

改为高频加热等。

(4) 减少被干燥物料的初水含量。如果被干燥的物料是溶液，可用薄膜蒸发器浓缩后，再进行喷雾干燥或其他方法干燥；如果被干燥的物料是悬浮液，可用过滤除去大部分水分后，再进行干燥。这样可以降低单位产品的热能消耗。例如，某厂把铬黄干燥改成过滤后，把滤饼用往复泵输送至喷嘴，再用气流雾化，进行喷雾干燥，产品质量好，并降低了热能消耗。

(5) 回收尾气带走的热量。对流干燥器在进口温度不太高的情况下，尾气带走的热量与总热量之比是很大的，有的可占总热量的 40%。采用热交换器回收尾气带走的热，已在工业上实施。例如，用 10 的空气，通过废热回收换热器加热到 84.8℃，尾气可从 150 降到 70℃，回收了尾气中热量的 25%，节约燃料 23%，在两年内即可收回废热回收换热器所用的投资。用“热管”回收尾气中的热量也是很有前途的方法。

(6) 提高干燥器的空气进口温度。被干燥的物料若是非热敏性的，进入干燥器的空气温度，可以提高到 650℃ 以上；对于热敏性的物料，也可在保证产品质量的前提下，尽可能地采用较高的气体进口温度。因为，使用的气体温度越高，干燥器的热效率越高。例如，把 20 绝对湿含量为 0.01 的空气加热到 500 用于干燥，在干燥器中空气放热而降温的极限是使之绝热饱和到这种状态空气的湿球温度 65.8℃，其理论热效率可达到 90.5%。如果，这种空气只加热到 120℃，用同样的方法计算，其理论热效率为 82%。可见，提高干燥器的进口空气温度，可以提高干燥器的理论热效率，实际热效率亦是如此。

(7) 采用过热蒸汽干燥。用过热蒸汽作干燥介质，利用蒸汽显热下降的干燥方法，叫做过热蒸汽干燥。干燥用的蒸汽，可以循环使用，以减少热损失，提高干燥过程的热效率。除外，蒸汽的定压比热比空气约大一倍，在相同的干燥热负荷下，水蒸汽的用量，仅为空气用量一半，因此，提高了干燥装置的生产能力。它适于干燥时发臭的物料、有爆炸危险的物料、含有机溶剂的物料以及放射性废物的干燥等。

6. 闭路循环干燥流程的开发和应用

例如用惰性气体作干燥介质的闭路循环流程。主要用于易燃、易爆、易氧化物料的干燥。某石油化工厂用氮气作干燥介质，干燥聚丙烯树脂，生产能力可达 5t/h，产品质量也高。

7. 消除干燥操作造成的公害问题

在粉尘回收方面，用湿式除尘器洗涤尾气，可使排放尾气中含粉尘量降到 15 ~ 35mg/m³，此值的大小还取决于洗水用量。现代化的空气喷吹自动清除粉尘的袋滤器，处理后气体含尘量可以达到 20mg/m³ 还可采用尾气洗涤和热回收组合的方式来净化尾气，它既可减少粉尘又降低了热耗。为了减少干燥中风机产生的噪声，应选用加工精度高、动平衡好的风机。其次，在安装上应采取隔振和减振等措施，务使风机噪声控制在 90dB 以下。

第一章 干燥设备选型基础

如前所述，目前，已研制出的干燥机有 400 余种，其中 200 余种已经实现了工业化，我国常用的工业型干燥机也近 100 种，从这些干燥机中选择合适的机型确有一定的难度。

我国干燥设备厂众多，而且都能在市场上占有一席之地。应该说在众多的干燥设备厂中，所生产的设备不论是技术含量还是产品质量都有一定差异，但为什么各种规模的干燥企业都能生存下来，这与国内用户群体识别能力有很大关系。干燥设备与其他通用型设备不同，除机械质量等外表可见的因素外，其中的技术含量、使用效果并不能被用户所发现。由于用户对干燥机的鉴别能力较差，客观上给一些水平较低的干燥设备厂提供了生存的空间。培养市场，普及干燥知识，对净化、整合干燥设备市场能起到积极作用。只有这样，才能通过市场的优胜劣汰，使具有发展潜力的厂家得以生存和发展。

干燥机的选择要考虑许多条件，受多种因素的制约，对干燥装置的选择既有科学性又有技艺性。过去，干燥机的选择常常靠经验或者考虑产品的通用性来决定。近年来，由于干燥技术的发展，给选择设备带来了更多的复杂因素。干燥设备的设计、制造或选用者常常弄不清如何去选择合适的干燥设备。由于干燥设备的推销者或提供的实验数据，实验范围及技术方面的资料不一定获得满意的结果，因此，必须制造各种不同类型的实验设备，做大量的实验才能选择出合理的设备。应该强调的是，在特定生产运行状态中，很有可能有很多适宜的干燥机。人们必须知道，在特定的工作状态中，没有一个严格的规则规定出最佳干燥设备，但每一种产品却都有自己独特的生产方式和干燥条件。

许多工程设计人员和工厂的工程技术人员常涉及到干燥设备的选型问题，从繁多的干燥设备中选择最合适机型也不是易事，对各类干燥设备有一个初步的了解，对它们的优缺点及适用范围有初步的掌握，会对自己所需要的干燥设备及生产规模有一个基本估计，这些知识对选用干燥设备会有很大帮助。

干燥过程是耗能较大的操作之一。由于干燥前物料性质状态及对干燥成品各项指标的限制，诸如产品的外观、各项物理、化学、生物指标等要求的不同，还有物料在干燥过程中可能发生的变化等都会形成对干燥过程的不同要求。

干燥器的选择，实质上是干燥装置如何满足被干燥物料在干燥过程中各阶段的要求，并尽量提高干燥过程的热效率。因此，首先要对被干燥物料与干燥有关性状和要求的了解，同时将已有干燥器进行对比，分析干燥器的主要工作原理及能否与之适应。结合投资、产品质量、操作、运转费用及维修等权衡比较，择其优点最多者。

可以这样说，没有一种干燥设备是万能的，每一种干燥机都有一定的适用范围，同时也都有本身的局限性。不论是使用者还是干燥设备厂，了解各种干燥机的基本性能和对物料的适应范围对干燥机的设计和选用都有益处。因干燥操作的工艺性很强，对物料的适应性都有一定范围。总之，成功地选择干燥设备最主要有两条，一是对所干燥物料的物性要非常清楚，二是对干燥设备的工作原理、结构特点也要熟知。

干燥装置的选择，实质上是在对所有干燥器的类型及其功能了解的基础上，考虑设计对待干燥物料诸项特点及要求是否能够适应及满足要求。当然，如何能满足这些要求是选择干燥装置所必须考虑的依据。以下将简要介绍若干工业上较常用的干燥器，以及所适用的物料。

第一节 干燥设备的分类

目前，已经工业化的干燥器有多种型式，为了叙述的方便，人们总是将干燥器分成若干类别干燥器的分类方法有许多，规纳起来有以下几种分类方法：

一、按干燥器操作压力分类

可分为常压式和真空式两类干燥器。常压干燥设备的传热可以采用任何一种或几种型式同时传热，而真空干燥设备的特点是以传导传热和辐射传热居多，而且多数以间歇生产方式为主，真空干燥设备主要处理热敏性物料和有溶剂回收的物料。表 1-1 是常见的真空干燥设备及适用范围。

表 1-1 真空干燥设备及适用范围

序号	干燥器类型	生产能力	生产方式	物料状态					物料停留时间	干燥时物料状态	造 价
				粉粒状	块 状	片 状	膏糊状	黏稠液状			
1	箱 式	小	间歇	适	适	适	适	适	长	静止	廉
2	圆筒箱式	小	间歇	适	适	适	适	适	长	静止	廉
3	圆筒搅拌型	中	间歇或连续	适	否	否	适	适	较长	搅动	较廉
4	双锥回转式	中、小	间歇	适	否	适	否	否	较短	翻动	较廉
5	小型回转型	小	间歇	适	否	适	否	否	短	翻动	较廉
6	刮板薄膜	中、小	连续	否	否	否	适	最适	最短	薄膜	贵
7	双滚筒式	中、小	连续	否	否	否	适	适	短	翻动	较贵
8	叶片式	大	连续	否	否	否	适	适	较长	翻动	贵
9	立式多层圆盘式	大、中	连续	适	否	适	否	否	短	翻动	较廉
10	中空轴耙式	中	间歇	适	否	适	适	否	较长	搅动	廉
11	带 式	中	连续	适	否	否	适	最适	长	移动	较贵
12	FV 型立式	小	间歇	适	否	否	适	适	较长	振动	贵
13	VU 型立式	中、小	间歇	适	否	适	最适	否	较长	振动	较贵
14	微 波	小	间歇	适	适	适	否	否	短	静止	贵
15	回转式列管	中、小	间歇	否	否	否	适	适	较短	翻动	较贵
16	斜桶回转	小	间歇	适	否	适	否	否	较短	翻动	较廉

二、按干燥器操作方式分类

按干燥器操作方式可分为间歇操作和连续操作两类。这里应该说明的是有些干燥器可有间歇和连续两种操作方式，而有些干燥器只能有一种操作方式，表 1-2 是部分干燥器的操作方式。

表 1-2 部分干燥器的操作方式

物料输送方式	干燥操作方式	装置的种类
静 置	间歇	各种箱式、微波加热式、真空冻结式
台车输送	间歇、连续	风道型
材料(自身)输送	连续	立式、红外线加热式
传导输送	连续	并行流、通气型、泡沫层式
下落输送	连续	多段型、涡轮型、通气型

续表

物料输送方式	干燥操作方式	装置的种类
转动输送	间歇、连续	各种转动型、超声波式、转筒型
搅拌输送	间歇、连续	搅拌式
振动输送	连续	振动型
流化床输送	间歇、连续	流化床式
空气输送	连续	气流式
喷雾化输送	连续	喷雾式

三、按被干燥物料的状态分类

可以分为块状物料、带状物料、粒状物料、膏状物料、溶液或浆状物料干燥等，在许多情况下，物料的原始状态决定选择干燥器的型式。表 1-3 是部分干燥器的适应的典型物料。

表 1-3 适用于不同颗粒特性的干燥机

被干燥颗粒的物理形态、 粒度及形状	适合使用的干燥机类型 (常用类型)	被干燥颗粒的物理形态、 粒度及形状	适合使用的干燥机类型 (常用类型)
很细 可与空气接触	盘式、带式、穿流循环式	多分散性颗粒物料	振动床干燥机 托盘式或带式干燥机
发泡型	流化床 盘式、带式干燥机 塔式	叶片状、大片状物料	振动床干燥机 间接传热回转圆筒干燥机
黏性	盘式、带式		
可喷动的	喷动床 振动床 涡轮/盘式干燥机 回转圆筒干燥机 带式干燥机 喷射流干燥机	有毒、细粉、欲脱去非水溶剂	间接真空干燥机
		易燃、易氧化损伤、易爆炸	用惰性介质的对流干燥，如氮气、过热蒸汽
形状不规则、多分散性、 不易流化	振动床 带式干燥机 回转圆筒干燥机 喷射流干燥机	只有表面水的分散性好的 细粉、干燥时间短	闪蒸干燥机/无间接加热 可自动分级，使较湿或较大的 颗粒停留时间延长
湿时较黏、很难流化	振动床 混合性好的流化床 带搅拌装置的流化床 回转圆筒干燥机 返料型干燥机	易碎的、晶体物料	带式干燥机、穿流循环式、 塔式干燥机 振动床

四、按干燥器给热量方式分类

按干燥器给热方式可以分为对流加热干燥器、传导加热干燥器、其他（辐射加热、高频加热）以及多种传热方式的干燥器等，表 1-4 根据加热方式不同干燥装置的分类。

表 1-4 根据加热方式不同干燥装置的分类

加热方式	物料装入方法	装置分类
对流加热	间歇	箱式干燥器(并流干燥器、通气流干燥器、流化床干燥器、喷流层式干燥器、蒸汽加热式干燥器)
	连续	风道型干燥器、(并流干燥器、通气流干燥器、混、通气型干燥器、转动型(含通气)干燥器、气流式干燥器、流化床式干燥器、喷雾式干燥器、振动型干燥器、蒸汽加热式干燥器)
传导加热	间歇	真空箱型干燥器、板型干燥器、搅拌式干燥器、真空冻洁式干燥器
	连续	转动型(传导受热)干燥器、转筒型干燥器、搅拌式干燥器、加热管内干燥器
其他	间歇、连续	红外线加热式干燥器、高频加热式干燥器、超声波式干燥器
多传热方式	间歇、连续	桨叶干燥机、耙式干燥机、盘式干燥机、列管式干燥机

五、按使用干燥介质的种类分类

对流换热可以分为空气、烟道气、过热蒸汽、惰性气体为干燥介质的干燥器。传导传热可分为导热油、热水、蒸汽等。

六、按干燥器的传热过程分类

一种较新的分类方法，把干燥器分为两大类、五小类。两大类是绝热干燥过程和非绝热干燥过程。绝热干燥过程又可分为两类：一是小颗粒物料干燥器，例如喷雾干燥器、气流干燥器、流化床干燥器、移动床干燥器及回转圆筒干燥机等。二是块状物料干燥器，例如箱式干燥器中的洞道式干燥器、多带式及带式干燥机等。非绝热干燥过程又分为三小类：真空干燥、传导传热干燥、辐射传热干燥，其特点是非绝热系统。

七、按干燥器的结构分类

按干燥器的结构可以分为喷雾干燥器、流化床干燥器、气流干燥器、回转圆筒干燥机、滚筒干燥机、各种箱式干燥器、带式干燥机等。表 1-5 是按干燥器的结构分类情况。

表 1-5 按干燥器的结构分类

物料分类：(1)液、浆状物料；(2)膏状物料；(3)粉粒状物料；(4)块状物料；(5)棒状物料；(6)短纤维物料；(7)成型物料；(8)连续片状物料；(9)涂布物料；(10)冻结物料

	物料状态	干燥器类型	操作方式	热空气流动方式	处理量	所适应物料	
						优	良
热空气加热	静置	箱式干燥器	间歇	平行流	小	7	2, 4
				通风		2, 5, 6	3, 4, 7
	传送式	隧道式干燥器	连续	平行流	大	2, 7, 8	4, 5, 9
		喷嘴式干燥器	连续	冲击流动	大	8, 9	
		带式干燥机	连续	通风	大	2, 5, 6	3, 4, 7
		涡轮干燥器	连续	通风	大	3	
		立式干燥器			大	3, 4	
	搅拌式	转动、通风转动干燥器	连续	平行、通风、分散	大	3, 4, 5	
		槽型搅拌干燥器	连续	平行、通风	大	3	
		流动床	间歇连续	分散	大	3	
		多段圆盘干燥器	连续	平行流	大		3
	热空气传送	喷雾干燥器	连续	分散	大	1, 2	
		气流干燥器	连续	分散		2, 3	

续表

物料分类：(1)液、浆状物料；(2)膏状物料；(3)粉粒状物料；(4)块状物料；(5)棒状物料；(6)短纤维物料；(7)成型物料；(8)连续片状物料；(9)涂布物料；(10)冻结物料

传导加热	静置	真空、冻结箱式干燥器	间歇		小	10	2, 3	
	传送	塔式干燥器	连续		小	1, 2		
		多圆筒干燥机	连续			8		
	搅拌	槽型、圆筒搅拌干燥器 (常压、真空)	间歇连续				2, 3	
		水蒸汽加热管束转动干燥器	连续				3, 4, 5	
其他	红外干燥器		间歇连续			9	8	
	高频干燥器		间歇连续				7	

虽然干燥器有多种分类方法，但多数情况下，人们习惯于按其结构进行分类，专用干燥器单独列出，本文将以结构分类结合传热方式进行介绍。

第二节 干燥设备的适用范围

所谓干燥就是通过给物料施加一定的能量使湿分（通常指水分）汽化、蒸发，从而除去湿分。干燥是一种传热与传质同时发生的分离过程。

被干燥物料及物料的状态、物理特性各不相同，至今还没有能够适应所有物料的干燥装置。因此选择干燥装置时重要的一点是要根据具体条件综合考虑选择相对合适的干燥设备，选取最有利且可行的型式与运转条件。

目前，工业用的干燥机按传热方法分类有对流、传导、辐射等型式。

一、对流传热干燥设备的适用范围

现有的干燥设备中，最多的是对流传热干燥。如热空气干燥，热空气和被干燥物料接触进行热交换以蒸发水分。对流干燥机代表性的设备常见类型有空气悬浮干燥机，如流化床干燥机、闪蒸干燥机、气流干燥机、喷雾干燥器、通风干燥机、流动干燥机、气旋转干燥机、搅拌干燥机、平行流动干燥机、回转干燥机等。

实际应用时，有单机使用，也有组合机使用，还有变形机型等。气流干燥机、流化床干燥机、喷雾干燥器等都是以热空气为载热体，在干燥的同时，也完成了物料的转移。此类干燥机的特征主要是没有传动部件。

干燥粉、粒、片状物料，最普通的方式就是在颗粒表面施加热空气或气体流。通过的气流对物料进行传热，使水分蒸发。蒸发后的水蒸汽直接进入空气中被带走，对干燥系统中常用的干燥介质有空气、惰性气体、直接燃烧气体或过热蒸汽。

该方法使热空气与物料直接接触，边加热边除去水分。关键是要提高物料与热空气的接触面积，防止热空气偏流。恒速干燥期间的物料温度几乎与热空气的湿球温度相同，所以使用高温热空气也可以干燥热敏性物料。这种干燥方法干燥速率高，设备投资少，但热效率较低，下面是各类对流传热干燥设备的基本情况。

(1) 箱式干燥器

是最老的干燥器之一。物料用盘盛装，料盘摆在架车上逐层逐排放入，用蒸汽或电作为热源，箱内热空气可循环及部分排放，以使干燥较均匀。虽热效率低，但仍在大量的使用，也在继续制造，原因是结构简单，操作不经常照管也无明显问题。但不少物料干燥时须翻盘、翻粉，热敏性物料常易变色，

亦不适用于带溶媒物料的干燥。由于物料堆积，其内层传热、传质差，因而干燥速率低。

(2) 隧道式烘房

系将料盘分置于特制小车上，可逐车间歇进、出隧道，以增加产量及提高热效率。其他结构与箱式干燥器相似。

(3) 网带式干燥机

可用于干燥玉米、谷物、蔬菜等。此机装有不锈钢丝网制的传动带，物料随带移动，可分段加热。该装置以每段 1.8~2m 长为一单元，最长可连接至 40m，每小时处理量可高至 4t。恒率干燥阶段热空气温度可达 130℃，排气相对湿度可达 85%。

(4) 多层涡轮干燥器

其结构为一立式圆筒，内设有若干层转盘，物料可由顶部加入，逐层落下至底部放出。热空气自底部引入，由设于圆筒中心的数个鼓风涡轮叶轮分段循环空气，并于器内壁相应高度设加热器，以补充空气的热量，提高热效率及干燥速率。但该设备不易清洗，对多品种生产及要求洁净的物料较困难。

(5) 转筒式或转窑式干燥器

干燥器为略带倾斜的水平圆筒，物料与热空气对流经过干燥器，是一种出现较早的机型。虽然结构比较简单，但热效率高，允许高温操作。现矿山或无机化工行业应用仍较多。若干年来，对筒内扬料板（抄板）结构的改进，增设供热管和内套筒等，都使这种干燥器的性能不断提高，应用范围仍有扩大。

(6) 气流式干燥器

系将热空气并流携带颗粒，使之受热干燥。为使气流与颗粒有较高相对速度，提高传热传质速率，在直管基础上增加了变径，制成脉冲气流干燥器，脉冲气流干燥器的干燥效率较原来直管气流干燥器要高一些。此外还有将干燥空间制成夹套圆筒，于筒上部切线进热空气及物料，中心管导出的旋风气流干燥器，以在干燥过程中持续加热空气及物料。现在有不少延长停留时间的改进，如螺旋式、套管式等。这类干燥器主要适应散粒、带表面水分的物料。

(7) 喷雾干燥器

将料液或悬浮液经雾化后，直接用热空气使液滴干成粉粒状产品的装置。雾化方法有离心式喷雾、压力式喷雾、气流式喷雾。干燥室设计中，热空气的引入方式对干燥过程的影响很大。另外，进口热空气的温度与热效率有很大关系，温度越高，热效率也越高。一般进风 150℃，热效率约为 30%。

(8) 闪蒸干燥机

装置系于锥形底部进热空气，并设搅拌，使落下的滤饼受强烈搅拌而分散。干燥后细粉则可随气流送至旋风或袋滤器收集。适应处理可分散滤饼或有一定黏度的颗粒物料。

(9) 粉碎气流干燥器

其原理大致相同，锥底部系切线进风，筒中部加料，底部设搅拌，可不断打散滤饼或略带黏性的颗粒。较细的颗粒随气流旋上，通过器顶的骤缩口可使与风速相应的颗粒排出。其最大产量可达 8t/h，据称已广泛应用于颗粒至若干滤饼状物料的干燥。与闪蒸干燥器的区别主要在于底部结构及进风型式。

(10) 流化床干燥器

系利用气流在对被干燥物料颗粒群的临界速度与带出速度之间作用时，使颗粒形成流化状运动，从而加强两者的传热与传质，常用于精细化工及医药产品。

(11) 振动流化干燥器

此装置系对流化床干燥器增设使空气分布板或整机振动功能的振动源。由于可以降低操作气速，特别对粒度分布不均的物料，可使干燥速率及热效率均有提高，现已大量应用。

(12) 惰性粒子流化干燥器

系在流化床干燥器中预先放入惰性粒子，使之流化并加热。然后喷入料液，先以惰性粒子为载体，附于表面，经干燥并因粒子流化时的撞击，而使干物料呈粉状剥落随气流逸出，再由旋风分离器或袋式过滤器捕集获得干燥产品。可以将溶液，悬浮液或浆液直接干燥成粉。

(13) 喷动床干燥器

系利用底部中心射入的气流，使园筒内中心物料随气流向上移动，在离开料面时仍有上喷作用，而周围颗粒则相对向下移动，形成规则的循环运动，此类干燥装置首先用于谷物干燥。其中心进气速度较快，可以对结团物料有一定的撕裂、分散作用。也可随气流同时喷入溶液作为颗粒包衣或造粒装置。

(14) 流化造粒干燥器

系将细粉状物料先置于流化床中，在流化时喷入料液，并散布于初置细粉的表面使之逐步干燥。雾滴与粉料的粘结逐步增大颗粒至所需直径，这种装置在尿素造粒等方面已工业规模应用。

二、传导传热干燥设备的适用范围

传导干燥也称接触干燥，对于潮湿颗粒非常适应，而传导干燥机热效率较高。蒸发的水蒸汽或有机溶剂由真空抽出或用少量气流排出，气流是湿分的主要载体，对于热敏性颗粒状物料建议用真空操作。在传导干燥机中，桨叶干燥机用于干燥膏状物料。具有内流管的旋转式干燥机现已设计出来并已投入使用。

真空干燥的操作费用昂贵，只是物料必须要在低温或缺氧状态下干燥时，或物料在加热介质和高温下干燥会变质时，才推荐用真空干燥。对于一定的蒸发效率，采用高温操作更有效，这样可以降低气体流速，减小设备体积。对于低温干燥操作，可以选择适当的低温废热或太阳能收集器作为热源，但干燥机的体积比较大。

冷冻干燥是真空条件下干燥的一个特例。在这里，温度在水的三态点之下，水（或冰）直接升华为水蒸汽。尽管升华所需要的热量比蒸发低几倍，其他方面的动力消耗较大，故真空干燥费用还是昂贵的。

传导传热中，由夹套、搅拌、传热管等将热量供给干燥物料，用热媒而不用热空气。代表性的设备是槽型的圆筒干燥机。圆锥搅拌干燥机、夹套和内置加热管回转干燥机、鼓式干燥机、耙式干燥机、真空带式干燥机、真空冷冻干燥机等。在热空气干燥中，恒速干燥时期的温度相当于湿球温度。而在传导传热干燥中，需要人为地创造加热面，使传热面积小而传热系数增加。这样，结构就比较复杂，设备投资比热空气干燥机大。

传导干燥法通过金属等蜀面间接传递干燥所需要的热量。干燥速率比直接干燥法低。恒速干燥期间产品温度与加热源的温度没有关系，大体与装置内气体压力的饱和温度相同。为了提高干燥速率和防止干燥不均，通常用机械搅拌或使容器本身旋转，以增加或不断更新物料的传热面，因此有必要深入研究传热机构的附着问题。干燥装置本身价格昂贵，但其特点是集尘系统的负荷小，热效率高，溶剂容易回收，总的费用比直接干燥法便宜得多。

(1) 真空干燥机

真空干燥就是在真空条件下加热物料或给物料旋加一定的能量，使湿分内部扩散、内部蒸发、升华、表面蒸发，从而进行低温低压干燥的工艺。具有加热温度低、抗氧化性能好，产品含水率均匀，质量优越、工艺容易控制、应用广泛等优点。

(2) 附着干燥机

附着干燥机又称转鼓干燥机。主要结构为内部加热的水平转鼓，部分浸入料槽，旋转时借鼓的加热将沾附于鼓壁的料液边转边干，干物料被刮刀铲下。其热效率较高，也可在真空下操作，对不易破坏的、可重溶的物料比较适宜。这种方法是使溶液、泥浆状或糊状物料附着在加热的滚筒上

进行干燥。加热时间短，热效率高，适合中等以下的处理量。

(3) 冷冻干燥机

系将料液先冷却冻结，随后减压使冰升华而获得干物料。由于整个过程在冰点以下进行，常用于热敏物品的干燥。因真空下对冻结物料的给热比较困难，以及在减压下冷凝升华的水蒸汽需要较大的制冷系统，因此干燥费用较大。冷冻高热敏性物料中的水分，并将在高真空下保持到冰点以下温度。使水分升华而与物料分离。物料中有效成分损失少，但干燥速率低。

(4) 真空烘箱

由于减压以后，物料蒸发所含挥发物的蒸发温度可以降低，适用于各种热敏、易氧化物料的干燥。此装置常为圆筒或其他可承真空操作的外壳，内以电热或热水、导热油通过加热板或加热管进行供热，适用于小批量间歇生产。

(5) 双锥形回转真空干燥器

其器身略如橄榄状，两端有盖，中间设两轴以支承器身。器身有夹套以加热，干燥时器身可回转，使物料与器壁经常更换接触，克服了真空烘箱中物料主要依靠加热筒传导而热效率低的缺点。回转真空干燥器在精细化工、医药等方面已应用较广，对黏度大或在回转过程中附着性强的物料不适用。

以上为若干常见干燥装置的基本类型，还有很多变型机以及新近开发的机型在后面的内容中将进一步介绍。

三、辐射传热干燥设备的适用范围

辐射干燥机主要有远红外干燥机、高频干燥机、超声波干燥机等。

各种电磁辐射源波长在太阳光谱到微波范围内，太阳光辐射只能穿透物料的表面。根据太阳辐射的波长，物料只能够吸收一部分入辐射。在粉粒包衣、片状、胶膜等物料的干燥中常使用红外线辐射。尽管大多数潮湿物料在 50 ~ 60Hz 频率的电流中是不良导体，但在高频中阻抗会急剧下降。这种辐射可以用来加热颗粒，减少对内部传热的阻力。吸收的能量由水分子来选择，物料的干燥过程达到节能作用。但因这种干燥方式运行费用高，所以只有贵重物料才可采用。

辐射传热干燥是依靠加热板的热辐射能量达到干燥物料的过程。这类装置的关键是辐射能强的辐射加热板 and 选择物料容易吸收的波长。相当一段时期，都是用 $3\mu\text{m}$ 以下的近红外波段，但近年来，改为用有机物吸收能较高的远红外（大于 $4\mu\text{m}$ ）陶瓷加热板。远红外加热表面吸收较好，所以作为涂膜的干燥效果较好。实验表明，离表面 1mm 之内的物料可以吸收大部分远红外能，再厚就很难做到均匀传热。

微波干燥近年来也得到了越来越多的应用，它是用微波作为电磁波直接进入导体内，使物料中的极性分子和极性基团振动回转，经分子间的内部摩擦，在内部产生热量，达到干燥的目的。这是由电能转变为热能的过程，热效率可达到 60% ~ 70%。纯粹用微波干燥运转成本很高，但在减速干燥期间，当水分很难用热空气干燥和传导传热除去时，微波干燥可以作为辅助手段提高干燥速率。在冷冻干燥中，残留的冰也可以用微波干燥法除去。

(1) 远红外干燥机

用电能产生的红外线，就会产生从表面向内部吸收渗透的效果。因此干燥速率较高，热效率也较高。但其性质与光相同，所以照射时不能留有阴影。

(2) 高频干燥机

物料置于高频高电压的电场时就会随着水分子运动在物料内部产生均匀摩擦热。这种方法适用于厚板及导热性能差的物料，主要用于木材加工业。

(3) 超声波干燥机

以适当频率的声波撞击物料，随着激烈的分子运动使空穴作用得以充分发挥，加快了干燥速

率，适用于不耐热物料的干燥。

四、组合干燥设备的适用范围

组合干燥机是两种或两种以上干燥形式的组合，对物料而言，主要以串联为主，也就是工作时物料先后通过干燥机两台或两台以上干燥机，组合干燥主要是满足某种干燥工艺的需要。众所周知，每种干燥器都存在一定不足之处，通过同种或两种以上机型串联工作，利用各自的优点，常会起到单台设备所不能实现的目的。最近广泛采用不同干燥方法、不同干燥原理的组合，能发挥各自特长而弥补各自缺点的干燥装置。例如直接干燥与间接干燥法并用，用间接干燥法提供干燥所需要的绝大部分热量。这样就可以提高干燥速率，得到装置体积小，热效率高的直接与间接干燥法并用的干燥装置。

组合式干燥机使用也越来越广泛，如喷雾干燥器和振动流化床干燥机的组合，耙式干燥机和振动流化床干燥机相结合，回转搅拌干燥机、传导搅拌干燥机、气流干燥机和流化床干燥机相结合，目的是获得较低的水分。单用喷雾干燥器可以获得 1% ~ 3% 水分含量的产品，如要求水分含量在 0.3% 以下，排气温度往往需要 120 以上，热能的损失很大。同样，如对水分有进一步要求，水分含量低于 0.1%，则排气温度要求在 130 以上。为了节省热能，在设计上，一般用 90 排气温度的喷雾干燥器，使水分达到 2%，热回收产生的 60 热空气可以用于串联的卧式流化床干燥机，最终水分可以达到 0.1% 以下，而热能可以节约 20%。

五、不同加热方法的干燥设备的适用范围

使微量热空气通过搅拌型间接干燥机与物料剧烈接触，所需热量的 90% 用间接干燥法提供。该方法适合大批量处理热敏性物料。

利用直接干燥法的流化床干燥机设有间接的热交换器进行床内加热干燥，所需热量的 70% 用间接加热提供。这样可以更好地发挥直接干燥法的特点。这种方法特别适合大批量处理粉粒体物料。

六、物料的特征

在选择干燥机之前，应认真研究物料的特征，包括干燥前、干燥过程中和干燥后物料的各种情况有应做到心中有数，有时还要附以实验求取必要的的数据。选择干燥装置时必须研究以下各项：

1. 物料的特性

(1) 物理特性和化学特性：耐热性、允许温度、热影响（软化、熔化）、密度、比热容、爆炸性、毒性。

(2) 物料的状态：水分、形状、黏性、流动性。

(3) 干燥特性：干燥速率、干燥条件（温度、湿度、气体压力与分压）、极限水分、所含水分性质（附着水、内部水、结晶水）。

2. 产品的质量要求

(1) 颗粒规格及分布。

(6) 色、味。

(2) 松密度。

(7) 黏结性。

(3) 硬度、脆性。

(8) 分离性。

(4) 流动性。

(9) 含尘量。

(5) 速溶性。

3. 操作方式的选择

(1) 工作方式：连续式、间歇式。

(2) 变动幅度：原料水分与处理量的均匀性。

4. 产品的回收要求

- (1) 粉尘：产生量、回收方法、再处理方法。
- (2) 溶剂：是否回收、回收的方法及条件、回收率。

5. 设备的安装地点

- (1) 设备安装地点：室外还是室内、地面还是楼上。
- (2) 气体情况：温度、湿度、爆炸性、工作环境。
- (3) 公害问题：污染、噪声、振动。

6. 设备的建设经费

- (1) 设备费用。
- (2) 基础设施费用。
- (3) 运转费用：辅助物料及人工费。
- (4) 其他：维修费、折旧费、利率。

第三节 干燥设备的选择方法

一、干燥物料目的

在生产中进行干燥的意义在于怎样干燥才能使所需经费降为最低。物料的形态千差万别，原始形态主要有液状、浆状、糊状、滤饼、湿粉粒状、各种条状和块状等。所以，干燥机也有许多种型式，有与材料状态、处理量等相适应的各种各样的干燥机，因此，怎样选定一个与物料相适应的干燥机是一个非常重要的问题。如果选错干燥机型的话，即使干燥机本身设计合理，也会在装置大小，热效率及干燥时间上产生很大的差异，以致于得不到所希望的产品。换言之，就是不存在万能的干燥机。在选择干燥设备时一定要考虑到上述内容。

二、干燥装置的选择

干燥装置的型式多种多样，但在工业化大生产中，一般运转费用，特别是燃料费往往比设备费高。因此，即使设备一次投资在某种程度上高一些，也还是选择运转费低的装置更为有利。选择干燥装置时，除装置本身的适应性外，还要综合考虑材料的物理特性、附属机器、辅助材料、公害及经费（设备费、运转费）等，选择合适的附属装置，最后通过实验确定。总结起来对干燥器的选择应注意以下指标：

- (1) 生产能力、型式（间歇、半连续、连续）；
- (2) 初始，终端含湿量；
- (3) 颗粒规格，尺寸分布（固体颗粒）；
- (4) 干燥能动性、减吸作用；
- (5) 最佳期工作温度；
- (6) 易燃性（蒸汽 / 空气、尘 / 气）；
- (7) 毒性（有关部位）；
- (8) 干燥介质（指对流干燥时用空气、蒸汽、惰性介质等）；
- (9) 腐蚀状况；
- (10) 物理、化学数据；
- (11) 物理处理特性；
- (12) 环境和安全规定；
- (13) 占地面积要求；