

全国第二次 干燥技术交流会 文集

中国化工学会化学工程学会
上海市化学化工学会

一九八六年 上海

前 言

三十七年来，我国干燥技术有很大的进展，为了集中交流干燥技术，全国第二次干燥技术交流会上海召开。会上将有论文进行交流，这些论文基本上反映了目前干燥技术在理论上、应用上的水平。为了推广已有的干燥技术，特将论文汇编成册，供有关方面参考。

我国干燥技术在解放前基本是空白，只有烘房、烘箱和滚筒干燥器。三十七年来随着国民经济的发展，干燥技术越来越被人们重视。干燥技术关系到节能、节约原材料提高收得率，改善职工劳动保护，控制成品质量以及改善环境的问题。干燥技术在化工、医药、轻工业某些方面等行业尤其为人们关心。现在我国在干燥器的类型品种方面已基本齐全，理论上也有一定研究；但同国外比较，在干燥设备大型化，电子计算机的应用，热效率的提高和理论研究方面尚存在较大差距，为此，今后一方面在干燥器类型方面要继续进行开发，以完备干燥器类型，并采用新结构，新能源，另一方面，对已开发的干燥器进一步提高，有计划推广应用，同时应加强干燥技术的理论基础研究，以指导干燥技术的发展。

全国第二次干燥技术交流会，在中国化工学会的领导下，得到了对干燥技术有研究的大学、设计院、研究所、企业的大力支持，我谨代表上海市化学化工学会表示感谢，并希全国同行共同努力，争取在二〇〇〇年内干燥技术有更大的发展，以适应四化建设的需要。

中国化工学会理事

上海市化学化工学会理事长 张耀祥

一九八六年十月

前 言

干燥过程是化工生产中的一个重要环节。它直接影响到许多产品的性能,质量和能耗。干燥技术由于物流中涉及固相物料,因此在研究及设计工作中又带来许多复杂性。

我国近二十多年来,化工技术工作者对干燥技术作出了贡献。早在五十年代,国内自己设计和建设了气流干燥装置,在生产中取得良好效益。六十年代后,国内对喷雾干燥,造粒、干燥理论等,取得了许多进展和成果。又如上海的梅卜顺等同志创制的膏糊状物料连续流化干燥系统在技术上达到国际先进水平。1985年,上海又成立了国内第一家干燥技术的专业公司。

在干燥技术交流方面,1963年上海化学化工学会组织了华东六省一市干燥讨论会。1975年在南京,举行了第一届全国干燥技术交流会议,至今已逾十年,这期间,干燥技术又有了不少新的进展,国际交流亦有开展,各方面迫切要求举行新的干燥技术交流会。为此,由中国化工学会化学工程学会与上海化工学会发起组织第二次全国干燥技术交流会,并委托上海华元干燥技术工程公司负责筹备。筹备期间得到各方面的热烈响应和支持。现将会议的论文报告,汇印成集,供有关科技工作者参考。相信通过这次会议,我国的干燥技术将会有新的进展,为我国化学工业的现代化及赶超世界先进水平,作出新的贡献。

中国化工学会 化学工程学会副理事长 萧成基

一九八六年十月

本届筹备委员会组成名单如下

主任委员: 张耀祥 中国化工学会理事 上海市化学化工学会理事长

首席顾问: 王 箴 上海市化学化工学会名誉理事长

副主任委员: 萧成基 中国化工学会化学工程学会副理事长

苏元复 华东化工学院教授 上海市化学化工学会副理事长

蒋 华 上海市化学化工学会秘书长

委员: 林珍安 琚定一 顾其威 施力田 郑 帜 马宝娇 王守恒 邓培鑫

高家驹 王承明 潘韵民 杨植夫 梅卞顺 李 桢 金裕生

下 设: 论文评论组:

组 长: 琚定一 华东化工学院教授

副组长: 肖成基 北京化工研究院总工程师

顾其威 华东化工学院副教授

组 员: 高家驹 顾其威 顾里之 孙继商 琚定一 郑 帜 苏元复

邓佩鑫 王守恒 马宝娇 杨庆贤 陈敏恒 梅卞顺 童海宝

蔡国谟 王承明 朱礼通 冯允恭 徐鸿基 金经真 金裕生

李 桢 高矢昌 丁惠华 石炎福 夏诚意 施力地 郭加宁

竺基梅 王喜忠

会务组:

组 长: 林珍安 上海市化学化工学会副秘书长

副组长: 李 桢 上海医药工业研究院工程师 上海市化学化工学会化学工程学组秘书

金裕生 上海市化学化工学会干燥技术咨询服务部主任

组 员: 高矢昌 潘韵民 翁颐庆 杨植夫 胡绍文 闵滋远

全国第二次干燥技术交流会代表名册

(按报到先后排列)

编号	姓名	编号	姓名	编号	姓名	编号	姓名	编号	姓名
1	刘世恩	37	周娟贞	73	李文法	109	章满昌	145	甄建平
2	罗栋泉	38	田林根	74	陈锦飞	110	屠国光	146	沈本度
3	王振权	39	王惠良	75	杨葆琳	111	赵顺兰	147	萧成基
4	王喜忠	40	李卓	76	周荣权	112	唐钰成	148	钦士业
5	南海军	41	郑克酥	77	陈炎霖	113	张元哲	149	刘治文
6	虞子云	42	叶宏仁	78	张维敏	114	徐江民	150	陈朝翰
7	艾同林	43	翁绍琳	79	杜满河	115	夏诚意	151	胡伯勤
8	吕玉和	44	曹志元	80	钱家鹏	116	赵崇德	152	蔡亚林
9	佛明义	45	洪玉飞	81	顾廷安	117	张春生	153	黄虹
10	奕文琦	46	周丰伟	82	马志龙	118	仲金福	154	蒋中俊
11	沈祖清	47	赵德明	83	钱筱琪	119	李克永	155	张增炎
12	张平安	48	陆智江	84	吴明深	120	陈国恒	156	徐基璇
13	苏鹤祥	49	夏季发	85	吴叙美	121	顾芳珍	157	徐昂千
14	饶钦泽	50	黄耀初	86	王文玉	122	朱克	158	余国和
15	张永根	51	施惠明	87	岳凤娟	123	王伟民	159	黄正宇
16	杨秉椿	52	马克承	88	李正旦	124	张裔果	160	周钊
17	王谷川	53	张崇华	89	史久华	125	同效男	161	左振文
18	贾世铎	54	张书春	90	陈大容	126	于春林	162	石炎福
19	陈軼民	55	江宝枢	91	侯春楼	127	张如意	163	李全爱
20	朱秉文	56	陈荣国	92	彭瑞洪	128	张来林	164	李耀光
21	钱圣础	57	王子信	93	林金平	129	王墨林	165	吴康新
22	潘永康	58	李文革	94	梁家康	130	杨建民	166	
23	林云	59	邱亚方	95	黄启萍	131	宁培栋	167	
24	奚波春	60	刘训诚	96	吴薇	132	庄礼秋	168	黄建中
25	范友琳	61	张心耳	97	刘嘉智	133	林钧致	169	王路超
26	徐一竺	62	黄再培	98	乐慧蓓	134	堵虎荣	170	高培尧
27	屠德荣	63	孙宝娣	99	杨绪锦	135	王宗濂	171	猴崇武
28	张纫秋	64	徐蔚明	100	伍沅	136	潘邵雍	172	王文周
29	王剑秋	65	喻柯乐	101	刘惠知	137	丁树容	173	李楨
30	傅一飞	66	胡波鸡	102	王红	138	褚明祥	174	王箴
31	朱泉根	67	冯静波	103	孙卫东	139	蔡鉴明	175	苏元复
32	蒋晓重	68	徐财发	104	陈培军	140	屠德容	176	张耀祥
33	顾洪海	69	薛铎	105	管达观	141	吴持兰	177	蒋华
34	王稼书	70	王维钧	106	筱海芳	142	郑克诚	178	马宝姣
35	袁冕	71	郑秋海	107	章仲良	143	曾耀先	179	王守恒
36	葛肇嘉	72	许崇仁	108	刘步顺	144	王志洁	180	高家驹
								181	王承明
								182	潘韵民
								183	梅卞顺
								184	金裕生
								185	顾里之
								186	孙继商
								187	杨庆贤
								188	童海宝
								189	朱礼通
								190	冯允恭
								191	高矢昌
								192	竺基梅
								193	翁颐庆
								194	闵滋源
								195	陈学雷
								196	董蓓华
								197	郭志伟
								198	陆凤祥
								199	谢厚生
								200	朱建中
								201	洪家宝
								202	杨秉祥
								203	李红
								204	韩俊芳
								205	成时伟
								206	周国良
								207	孙象兴
								208	何胜良
								209	陈春馨
								210	邵家明
								211	王承鸿
								212	焦祖义
								213	殷荣忠
								214	孙宏道
								215	黄志庆
								216	许惠民

全国第二次干燥技术交流会会议领导小组

王箴 苏元复 张耀祥 萧成基 钦士业 蒋华 施惠明 石炎福 夏诚意
翁绍琳 李克永 李楨 王喜忠 金裕生 童海宝 马克承

目 录

喷雾干燥在中药生产中的应用	(1)
用电子计算机设计计算喷雾干燥塔	(5)
喷雾干燥的节能效果和节能潜力	(12)
论湿度势系数	(17)
过热高浓度磷酸一铵溶液逆流喷雾干燥的数学模型	(30)
茂名颗粒页岩的干燥与崩碎	(43)
干燥过程节能技术	(51)
滚筒干燥机在磷铵工程中的放大设计与应用	(59)
磷铵料浆旋转喷雾干燥的设计	(66)
槽形搅拌——气流干燥器	(74)
迴转筒干燥机的干燥机理分析	(78)
低温喷雾干燥的计算模型及其在磷酸铵干燥中的应用	(86)
喷雾流化干燥在磷铵干燥中的应用	(91)
一种新型的料浆烘干机装置	(96)
采用锥形气流烘干机烘干氢氧化铝的实践	(101)
间接加热封闭循环回转干燥设备的分析与探讨	(104)
气流干燥管的设计计算方法	(111)
喷雾干燥在磷铵生产上的应用	(119)
内热式卧式多室流化床干燥器	(123)
利用 PC—1500 计算机对气流干燥器的工艺计算	(128)
氟化铝干燥脱水	(136)
干燥机械与装置	(140)
日本带式干燥机的调试及应用	(148)
干纺甬道中纤维干燥机理的探讨	(155)
流化床干燥造粒的研究	(162)
二级干燥技术	(165)
难干物料干燥速度的实验研究	(171)
干燥过程节能的几点措施	(177)
喷雾干燥中气流式喷咀的设计计算	(182)
生物质膏糊状物料(土霉素滤饼)的干燥机理及其数学模型的研究	(189)
振动流化床中颗粒物料的干燥	(200)
干燥操作性能指标的合理选择及计算	(210)



喷雾干燥在中药生产中的应用

上海医药设计院 王士俊 陈美珍 石荣华

一、概 述

喷雾干燥是将物料通过雾化器分散成雾状液滴，在干燥介质(热风)作用下进行热交换，使雾状液滴中的溶剂(水)迅速蒸发，获得粉状或颗粒状成品的干燥过程。由于喷雾干燥技术比其它干燥技术具有更多优点，近年来我国中成药生产中也在逐渐推广应用。

二、喷雾干燥的特点

1. 干燥迅速快：料液经喷雾后，被雾化成几十微米大小的液滴，每一公升料液经喷雾后表面积可达 300米^2 左右，因此热交换非常迅速，水分蒸发极快，干燥时间仅为数秒至数十秒，是一种瞬间干燥。喷雾干燥获得的产品质量好，能保持原来的色泽和香味，具有很好的溶解性，因而很适用于中成药及其它热敏性物料的干燥。

2. 通过改变工艺条件能方便地控制和调整产品的粒径大小，松密度，含水量等质量指标。

3. 可使物料溶液直接获得均匀的干燥产品，替代结晶、干燥、粉碎、过筛等多道工序，简化了生产工艺流程。

4. 产品纯度高，操作环境条件优越：喷雾干燥是在密闭的容器内进行的，杂质不会混入产品，获得的产品纯度高，采取适当措施后可获得无菌成品。

但喷雾干燥也存在缺点，在进风温度较低时，热效率较低(约30—40%)；更换品种时，清洗较麻烦，回收装置比较复杂等。

尽管如此，喷雾干燥的许多独特之处是其它干燥形式所不能比拟的。目前喷雾干燥已获得广泛的应用。如食品工业的奶粉、蛋粉、酵母粉、可溶性鱼粉、速溶咖啡等，制药工业的维生素、酶制剂、抗菌素、葡萄糖等，再如塑料、洗涤剂、染料、农药、陶瓷生产等也有应用。

三、喷雾干燥的流程和设备

喷雾干燥的流程由空气加热系统、干燥系统(包括塔身和雾化器)和干粉收集及气固分离系统组成。见图1。

1. 空气加热系统包括空气过滤器和空气加热设备。对于药品生产，空气必须经过过滤。空气过滤器有钢丝网、多孔陶瓷管、电除尘、棉花活性炭和超细过滤纤维等形式，可根据各种产品的需要进行选择。

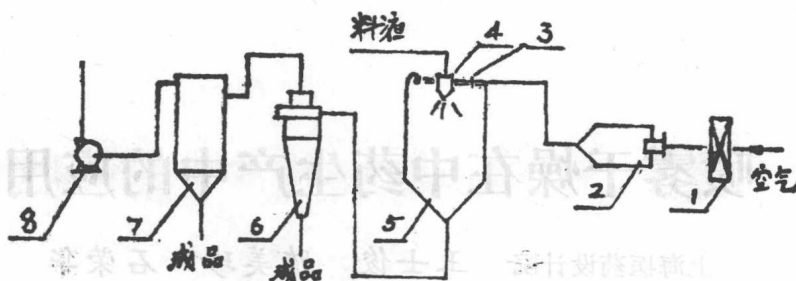


图1 喷雾干燥示意流程图

1. 空气过滤器 2. 空气加热器 3. 空气分布器 4. 雾化器 5. 干燥塔
6. 旋风分离器 7. 袋滤器 8. 风机

空气加热设备一般采用蒸汽加热和电加热。采用电加热一方面是由于工厂蒸汽压力不高，不能满足进风温度要求，另一方面是为了精确调节进风温度，保证产品的质量。对于卫生要求不高的产品，干燥所用的热空气可采用明火直接加热。

2. 干燥系统主要包括雾化器和干燥塔。雾化器的形式有气流式、机械压力式和离心式三种。

气流式雾化器是依赖于压缩空气的动能将液体雾化，机械压力式雾化器中液体雾化的能量由溶液本身的压头提供，离心式雾化器则依靠高速旋转提供料液雾化的动能。在喷雾干燥技术中，溶液雾化的好坏对技术经济指标、产品质量等起重要作用。喷雾分散度愈高，干燥效能愈高。若喷雾不均匀，粗大的颗粒不易干燥，造成粉子干燥不均，而且还可能造成粘塔和沾壁现象。

干燥塔是物料干燥成产品的设备。新型的喷雾干燥设备几乎都采用塔式结构，塔底为锥形。

3. 气固分离系统：气固分离设备的选择主要根据物料的物理性能、贵重程度和对环境的污染程度来决定。通常采用旋风分离器和袋式过滤器。湿法除尘因得到的回收粉子处理较麻烦，使用并不普遍。一级旋风分离器可达到以上的分离效率，并且经久耐用，压力损失小，结构简单，制造容易，因此得到广泛应用。

旋风分离器形式有切线型、蜗壳型和扩散型等。蜗壳型虽制造稍困难，但对细粉分离效率高，阻力降也较小，性能较佳。

选择最佳的气流入口速度乃是决定旋风分离器分离效率的关键。切线型旋风分离器的入口速度为15—20米/秒，蜗壳型为10—20米/秒。

袋式除尘器能捕集极细的粉尘，其效率可达99%以上。但是清洗较麻烦，阻力降也较大，在能满足分离效率的前提下，不一定设置袋式除尘器。

四、田七浸膏的喷雾干燥

云南白药厂生产的田七浸膏粉原生产工艺为田七浸膏液经浓缩熬膏后倒入盆内，置于烘房内干燥24小时，然后进行分碎、过筛得成品。操作步骤长，粉尘飞扬严重，物料刺激性强，操作环境极差。现采用武汉制药机械厂生产的PZ 2.8~3.5喷雾干燥机组进行浸膏液喷雾干燥，经试喷，证明该机适组用于田七浸膏的干燥，可以获得满意的干燥成品。

干燥塔直径 ϕ 1270mm, 设备总高3600mm, 采用气流式喷嘴进行喷雾, 试验的工艺流程如下:

空气经过滤器(3)除尘后, 至蒸汽加热器(4)和电加热器(5)升温至 150—200℃ 后, 经干燥塔(1)顶部空气分布器进入塔内, 物料借喷头压缩空气喷入塔内, 雾状的液滴与热空气接触, 完成了瞬间干燥。干粉和尾气从塔底抽出进旋风分离器(6), 干粉收集于底部桶内, 尾气经抽风机(7)排至系统外。为避免塔内干粉沾壁, 塔内设置了气刷, 定时用压缩空气喷吹。

试验采用了20%浓度的田七浸膏液(比重1.08), 以 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 压力压缩空气为动力喷入塔内, 热空气进风温度为 170°C , 操作的主要参数列下:

进料浓度	20%
进料速度	30公斤/时
进风温度	170°C
出风温度	92°C
风量*	$1740\text{米}^3/\text{时}$
喷头压缩空气量*	$1.2\text{米}^3/\text{分}$
喷头压缩空气压力	$3\text{kg}/\text{cm}^2$
干燥水分	$22.5/\text{公斤}/\text{时}$
干粉生产能力	$7.5\text{公斤}/\text{时}$
成品含水量	低于5%

*按设备铭牌标量

获得的田七浸膏粉经检验细度(120目以下)和水分含量合格, 且成品色泽比原箱式干燥为好。喷雾干燥避免了原工艺中熬膏和烘房干燥造成的结焦现象。

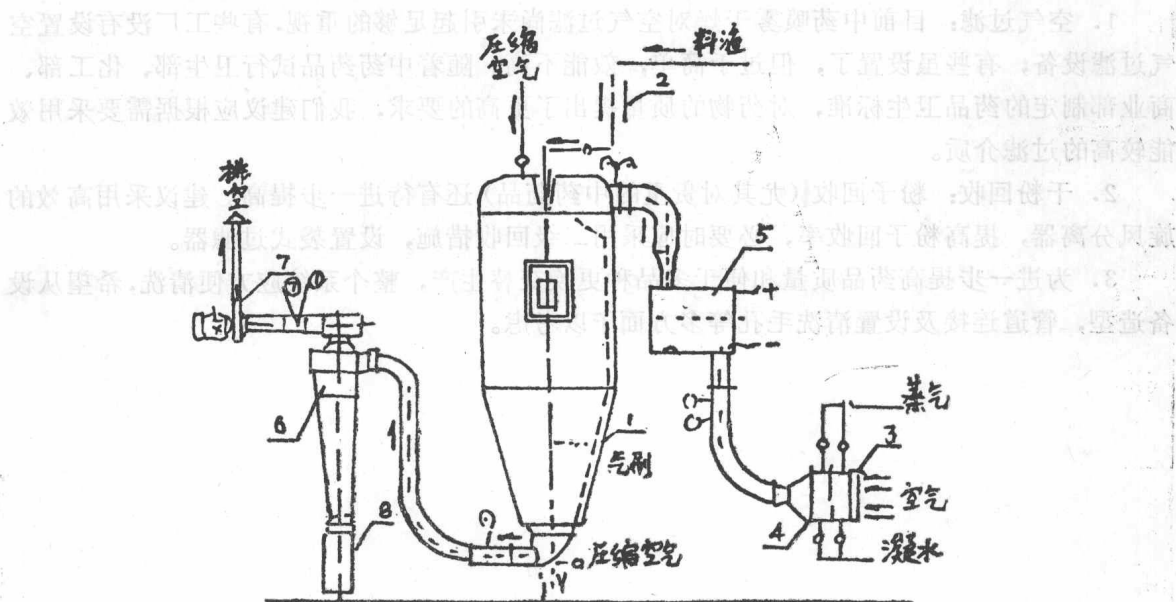


图2 田七浸膏粉喷雾干燥流程

1. 干燥塔 2. 油水分离器 3. 过滤器 4. 蒸汽加热器 5. 电加热器
6. 旋风分离器 7. 抽风机 8. 料桶

五、国内中成药喷雾干燥使用实例

中成药的干燥是保证药品产量、质量的重要工序。目前国内已有不少中药厂采用了喷雾干燥，获得了满意的效果。现举几例于下：

使用厂 项目	武汉中联 制药厂	佛山第二 制药厂	肇 庆 制药厂
物料名称	银翘	紫花杜鹃	紫花杜鹃
喷雾形式	气流式	离心式	气流式
干燥塔尺寸	$\phi 1270$	$\phi 3000$	$\phi 9000$
进料浓度	$d=1.18$	$d=1.16$	$d=1.20$
进风温度	180℃	180—210℃	165—220℃
出风温度	90—100℃	90—130℃	90—130℃
设备能力 (以成品计)	18/公斤/时	18 公斤/时	15 公斤/时
成品含水量	4%以下	3%	3%

六、建 议

喷雾干燥在中药药品干燥的应用方兴未艾，取得了一定的效果。但我们觉得目前国内中药厂使用的喷雾干燥装置存在如下问题，需进一步提高，以使机组更加完善。

1. 空气过滤：目前中药喷雾干燥对空气过滤尚未引起足够的重视，有些工厂没有设置空气过滤设备，有些虽设置了，但过于简单，效能不高。随着中药药品试行卫生部、化工部、商业部制定的药品卫生标准，对药物的质量提出了更高的要求，我们建议应根据需要采用效能较高的过滤介质。

2. 干粉回收：粉子回收（尤其对贵重的中药药品）还有待进一步提高。建议采用高效的旋风分离器，提高粉子回收率，必要时应采用二级回收措施，设置袋式过滤器。

3. 为进一步提高药品质量和便于多品种更换交替生产，整个系统应方便清洗，希望从设备造型，管道连接及设置清洗毛孔等多方面予以考虑。



图 5 中药喷雾干燥设备示意图

1. 干燥塔 2. 旋风分离器 3. 袋式过滤器 4. 风机 5. 加热器 6. 除尘器 7. 旋风分离器 8. 袋式过滤器 9. 风机

用电子计算机设计计算喷雾干燥塔

上海市化工局 陈 春 馨

上海化工设计院 王 文 玉

喷雾干燥是溶液或液固混合物通过雾化器喷洒成很细小的雾状粒滴,并使粒滴与干燥介质接触进行湿热交换的过程。

干燥过程的计算必须先求出干燥介质的性质及其变化,在原设计计算中是从 I-X 图来查取,而本方法根据干燥介质的基本性质关系式和有关数据回归经验方程式,采用一元函数方程求根的计算方法,用电算程序来计算。

干燥塔的大小由干燥时间来确定,从传质角度考虑,干燥时间的计算需要物料干燥速率的实验数据,在设计工作中这些经常是缺乏的,由于干燥过程既是一个传质过程又是一个传热过程,所以我们从干燥的传热过程的分析,计算出传热所需要的时间,就可以确定干燥塔的工艺尺寸。

在干燥塔内根据物料干燥速率可分成为恒速干燥阶段和降速干燥阶段,两个阶段以物料的临界含水量为分界点,计算分界点处相应干燥介质的基本性质,分两段求出传热所需的时间 τ_{Dcon} 和 τ_{Ddis} ,两者之和即是干燥所需的时间 τ_D 。当其值小于或等于物料在干燥塔内停留的时间 τ_s 时,就可以根据此来确定干燥塔的大小。

本文介绍了气流式喷雾干燥塔设计计算的数学模型、电算程序框图及程序使用说明,对设计实例进行核算,并作出对本设计计算方法的分析评价,另附有电算程序。

一、数 学 模 型

(一) 干燥介质基本性质关系式:

$$\varphi = \frac{p}{p_s}$$

$$X = \frac{M_w}{M_g} \times \frac{p}{p_o - p}$$

$$H = (C_g + C_{w0}x)t + R_o x$$

$$U_o = \left(\frac{22.4}{M_g} + \frac{22.4}{M_w} x \right) \frac{273.15 + t}{273.15}$$

$$t_w = \frac{H - R_o \frac{M_w}{M_g} \cdot \frac{p_w}{p_o - p_w}}{C_g + C_{w0} \frac{M_w}{M_g} \cdot \frac{p_w}{p_o - p_w}}$$

$$p_s = f_1(t) = 4.58833 + 0.329304t + 0.0109986t^2 + 0.193295 \times 10^{-3}t^3 \\ + 0.2145 \times 10^{-5}t^4 + 0.204719 \times 10^{-7}t^5 \quad 0 \leq t \leq 100^\circ\text{C}$$

$$t_{DP} = f_2(t) = 93.4131 + 22.9559 \ln(p) + 0.8894(\ln(p))^2 \quad 0.01 < p < 0.1 \text{ kg/cm}^2 \\ = 99.0992 + 27.5520 \ln(p) + 1.8577(\ln(p))^2 \quad 0.1 \leq p \leq 1.4 \text{ kg/cm}^2$$

以上干燥介质饱和蒸汽压 P_s 与干球温度 t 关系式, 露点温度 t_{DP} 与蒸汽分压 P 关系式是根据有关数据回归成经验公式。

(二) 物料热量衡算:

$$G_d = G_1(1 - W_1) = G_2(1 - W_2)$$

$$W = G_d \left(\frac{W_1}{1 - W_1} - \frac{W_2}{1 - W_2} \right) = L(x_1 - x_2)$$

$$Q_e = Q_{e_1} + Q_{e_2} + Q_{e_3} \quad Q_{e_3c} = (8.1 + 0.045(t_{sw} - t_0))\pi D_{sw}H(t_{sw} - t_0)$$

$$L = \frac{Q_e}{(C_g + C_{wg}x_1)(t_1 - t_2)}$$

(三) 物料在干燥塔内停留时间

$$D_c = \left(\frac{W}{\frac{\pi}{4} V_s \left(\frac{H_D}{D_D} \right)} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{6.2}{4.5} \cdot \frac{v_{nf}}{v} D_e$$

$$V_D = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{H_D}{D_D} \times D_c^3$$

$$\tau_s = 0.532 V_D^{\frac{1}{3}} \left(\frac{r_{pa} \times 3600}{M_{pa} \times v_{nf}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(四) 分界点干燥介质状态:

$$x_c = \frac{Lx_1 + Gd \left(\frac{w_1}{1 - w_1} - \frac{w_c}{1 - w_c} \right)}{L}$$

$$H_c = \left(TF_1 - \frac{Q_{e_2} + Q_{e_3}}{W} \right) (x_c - x_1) + H_1$$

$$t_c = \frac{H_c - R_0 x_c}{C_g + C_{wg} x_c}$$

$$TF_c = t_{wc}$$

(五) 物料干燥所需时间

$$Q_{co} = G_e \left(\frac{w_1}{1 - w_1} - \frac{w_c}{1 - w_c} \right) (R_0 + C_{wg} t_c - C_w TF_1)$$

$$+ G_d \left(C_s + C_w \frac{w_c}{1 - w_c} \right) (TF_c - TF_1)$$

$$Q_{di} = G_d \left(\frac{w_c}{1 - w_c} - \frac{w_2}{1 - w_2} \right) (R_0 + C_{wg} t_2 - C_w TF_c)$$

$$+ G_d \left(C_s + C_w \frac{w_2}{1 - w_2} \right) (TF_2 - TF_c)$$

$$A_{con} = \frac{3(G_1 + G_d)}{d_p} \left(\frac{w_1}{r_{w_1}} + \frac{1 - w_1}{r_s} \right)$$

$$A_{dis} = \frac{3(G_d + G_2)}{d_p} \left(\frac{w_2}{r_{w_2}} + \frac{1 - w_2}{r_s} \right)$$

$$\Delta t_{mcon} = \frac{(t_1 - TF_1) - (t_c - TF_c)}{\ln \left(\frac{t_1 - TF_1}{t_c - TF_c} \right)}$$

$$\Delta t_{dis} = \frac{(t_c - TF_c) - (t_2 - TF_2)}{\ln \left(\frac{t_c - TF_c}{t_2 - TF_2} \right)}$$

$$\alpha = \frac{\lambda g}{d_p} (2 + 0.54 R_{er}^{0.5})$$

$$\text{式中 } R_{er} = \frac{d_p u_t}{Vg}$$

$$V_g = f_3(t_{cp}) = (13.2921 + 0.08718 t_{cp} + 0.119 \times 10^{-3} t_{cp}^2) \times 10^{-6} \quad 0 \leq t_{cp} < 100^\circ\text{C}$$

$$= (11.4511 + 0.11675 t_{cp}) \times 10^{-6} \quad 100 \leq t_{cp} < 250^\circ\text{C}$$

$$= (-12.9825 + 1.8468 t_{cp}^{\frac{1}{2}} + 0.0975 t_{cp}) \times 10^{-6} \quad 250 \leq t_{cp} < 400^\circ\text{C}$$

$$\lambda_g = f_4(t_{cp}) = (2.0986 + 6.928 \times 10^{-3} t_{cp} - 3 \times 10^{-6} t_{cp}^2) \times 10^{-2} \quad 0 \leq t_{cp} < 350^\circ\text{C}$$

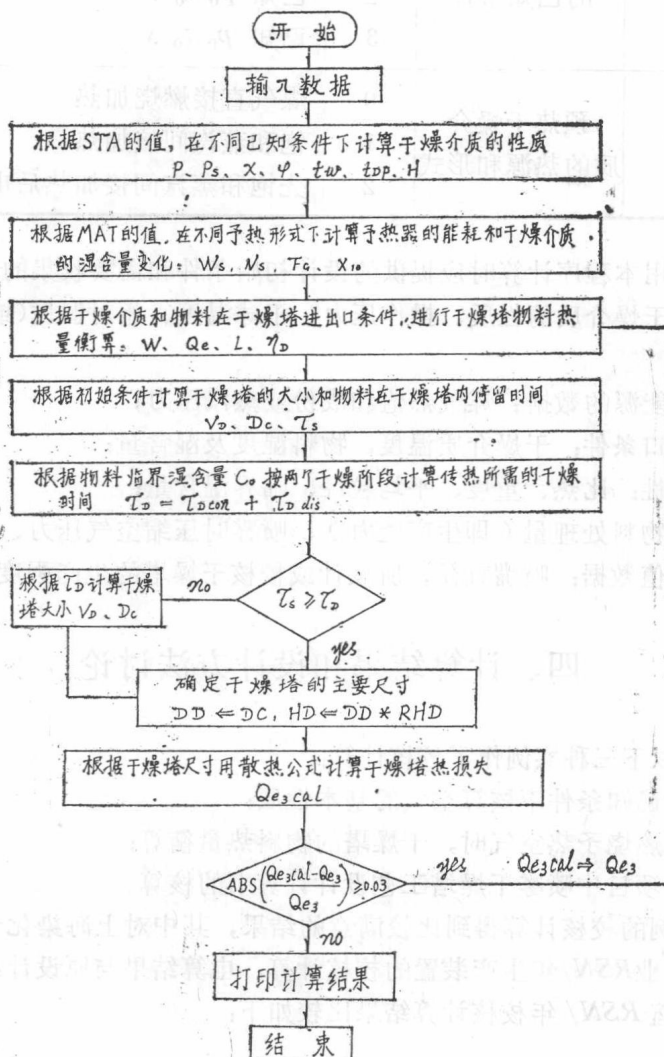
以上干燥介质的动力粘度 V_g 、导热系数 λ_g 与共性温度 t_{cp} 的关系式是根据有关数据回归的经验公式。

$$\tau_{Dcon} = \frac{Q_{con} \times 3600}{\alpha_{con} \times A_{con} \times \Delta t_{mco, s}}$$

$$\tau_{Ddis} = \frac{Q_{dis} \times 3600}{\alpha_{dis} \times A_{dis} \times \Delta t_{mdis}}$$

$$\tau_D = \tau_{Dcon} + \tau_{Ddis}$$

二、电算程序执行框图



三、程序使用说明

为了便于用户了解本电算程序的使用，对程序的输入信息和计算时，需提供的数据作如下说明。

(一) 输入信息有两种

STA: 干燥介质不同已知条件信息

MAT: 干燥介质予热的热源及加热形式信息

它们的输入数值及其表示含义见下表:

信息符号	含 义	数值	内 容
STA	干燥介质的已知条件	0	已知 p_0 t_0 t_{Dp}
		1	已知 p_0 t_0 t_w
		2	已知 p_0 t_0 φ
		3	已知 p_0 t_0 x
MAT	预热干燥介质的热源和形式	0	煤气直接燃烧加热
		1	饱和蒸汽间接加热
		2	先饱和蒸汽间接加热后电加热

(二) 用户在使用本程序计算时应提供的设计初始条件和需要收集的数据:

1. 予热器进口干燥介质的性质、操作压力、干球温度、相对湿度(或湿含量、或湿球温度、或露点温度);
2. 予热形式和能源的数据: 煤气热值和成份或蒸汽压力;
3. 干燥塔进出口条件: 干燥介质温度, 物料湿度及湿含量;
4. 干燥物料物性: 比热、重度、平均粒径、临界湿含量;
5. 设计要求: 物料处理量(即生产能力)、喷雾时压缩空气压力、温度及气液比;
6. 计算时的初值数据: 喷嘴直径, 所设计或校核干燥塔的生产强度。

四、计算结果和设计方法讨论

本电算程序对以下三种实例作了校核计算:

1. 在四种不同已知条件下核算空气的基本性质;
2. 用煤气直接燃烧予热空气时, 干燥塔的物料热量衡算;
3. 对若干设计项目中喷雾干燥塔工艺设计计算书的核算。

通过对大量实例的校核计算得到比较满意的结果, 其中对上海染化十厂原设计的300吨/年及目前500吨还原蓝RSN/年生产装置的校核计算, 电算结果与原设计结果相符合, 现将染化十厂300吨还原蓝RSN/年校核计算结果比较如下:

项目及符号	蒸发水量 W	空气用量 L	予热器进口空气量 V_{in}	干燥塔出口空气量 V_{out}	干燥塔出口空气湿含量 x_2
单 位	公斤水/时	公斤干空气/时	米 ³ 空气/时	米 ³ 空气/时	公斤水/公斤干空气
原设计结果	200	2740		3370	0.098
电 算 结 果	199.0	2721.2	2301.2	3335.6	0.0998

项目及符号	蒸发水份所需的热量 Q_{e1}	物料温升所需的热量 Q_{e2}	干燥塔的热损失 Q_{e3}	予热后空气的湿含量 x_1	予热器煤气用量 F_{VG}
单 位	千卡/时	千卡/时	千卡/时	公斤水/公斤干空气	米 ³ 煤气/公斤空气
原设计结果	128000		12800	0.025	0.023
电 算 结 果	123566.3	1249.6	12481.6	0.0267	0.0215

项目及符号	分界点空气温度 t_c	分界点空气湿含量 x_c	分界点物料温度 TF_c	恒速干燥阶段对数平均温差 $\Delta t_{m_{con}}$	降速干燥阶段对数平均温度 $\Delta t_{m_{dis}}$
单 位	℃	公斤水/公斤干空气	℃	℃	℃
原设计结果	132	0.0858	58	136.2	20
电 算 结 果	129.2	0.0879	56.0	141.9	19.8

项目及符号	恒速阶段传热表面积 A_{con}	恒速阶段传热量 Q_{con}	恒速阶段给热系数 α_{con}	降速阶段传热表面积 A_{dis}	降速阶段传热差 Q_{dis}	降速阶段给热系数 α_{dis}
单 位	米 ²	千卡/时	千卡/米 ² 时℃	米 ²	千卡/时	千卡/米 ² 时℃
原设计结果	13600	83800	400	13600	44200	400
电 算 结 果	9029.3	107479.4	689.4	3374.4	17336.6	571.1

项目及符号	恒速阶段所需时间 $\tau_{D_{con}}$	降速阶段所需时间 $\tau_{D_{dis}}$	物料干燥所需时间 τ_D	物料在干燥塔内停留时间 τ_s	干燥塔计算体积 V_D	干燥塔计算直径 D_c	干燥塔设计直径 D_D	干燥塔设计高度 H_D
单 位	秒	秒	秒	秒	米 ³	米	米	米
原设计结果	0.3	1.1	1.4	2.41	12.1	1.6	1.6	6
电 算 结 果	0.438	1.637	2.075	2.185	12.86	1.57	1.6	6.4

由以上计算结果的比较, 我们对本设计方法作如下讨论:

(1) 原设计中两个干燥阶段的传热面积、给热系数均按干燥塔进出口为定性条件下求得, 使 $A_{con}=A_{dis}$, $\alpha_{con}=\alpha_{dis}$, 这样就使等速干燥阶段传热所需时间 $T_{D_{con}}$ 偏大而 $T_{D_{dis}}$ 偏小, 有时甚至会出现 $\tau_{D_{con}}>\tau_{D_{dis}}$, 一般情况下这种现象是不合理的, 而本方法以物料临界湿含量为分界点, 分成两段来分别计算两个干燥阶段的传热面积 ($A_{con}>A_{dis}$) 和给热系数 ($\alpha_{con}>\alpha_{dis}$) 这样计算结果就比较正确、合理。

(2) 原设计中干燥塔的热损失用下式来估算。

$$Q_{e3}=(Q_{e1}+Q_{e2})\times 5\sim 10\%$$

但是实际上干燥塔热损失的大小并不简单地取决于干燥塔中水份蒸发量和干燥过程中物料的温升, 而是干燥塔对环境的散热损失与干燥塔的直径、高度、保温层厚度, 壁温以及环境温度有关。本方法在初算出干燥塔尺寸以后, 根据干燥塔对外界环境的散热公式计算热损失 Q_{e3c} , 并重复计算。所以本方法电算结果比原设计结果更符合实际情况。

(3) 本方法按两个干燥阶段传热所需时间来计算干燥所需要的时间 τ_D , 对现有生产装置由干燥塔生产强度 V , 或喷嘴直径 d_e 以及干燥塔高度与直径的比值 R_{HD} , 可计算物料在干燥塔内的停留时间 τ , 一般 $\tau_s>\tau_{D1}\tau_s\geq\tau_D$ 当时说明干燥塔生产能力有较大裕度。对新设计的干燥塔可以给出 V , 或 D_e 的初值和选择合适的 R_{HD} 计算, 当 $\tau_s<\tau_D$ 时按 τ_D 计算干燥塔的尺寸。

(4) 使用本程序设计一个气流式喷雾干燥塔, 包括干燥介质性质、予热器的能耗, 进入干燥塔的干燥介质的状态, 干燥塔的物料热量衡算以及干燥塔的主要工艺尺寸的确定, 需要计算时间为 2—3 分钟。

通过以上计算结果的比较和讨论, 说明本设计计算方法能够迅速、正确、合理地对气流式喷雾干燥塔作出工艺设计计算也可以适用于现有生产装置的校核计算。

符号说明

A — 干燥的传热表面积	米 ²
C — 比热	千卡/公斤℃
D — 干燥塔直径	米
D_D — 干燥塔设计直径	米
d_e — 气流式喷嘴孔径	毫米
d_p — 物料颗粒平均直径	微米
G — 干燥塔内物料重量	公斤/时
H — 干燥介质的含值	千卡/公斤、干气
H_D — 干燥塔设计高度	米
L — 干燥介质消耗量	公斤干气/时
M — 分子量	公斤/公斤分子
p — 湿份蒸汽分压	帕斯卡
p_s — 干燥介质中湿份饱和蒸汽分压	帕斯卡
p_0 — 干燥塔操作压力(当地大气压)	帕斯卡
p_t — 予热器中加热用饱和蒸汽压	公斤/厘米 ²
Q_e — 干燥塔内传热量(包括热损失)	千卡/时