

编号: 0167

内部

科学技术成果报告

膏状物喷雾干燥

科学技术文献出版社

10
19

刊登国内、外广告启事

我社出版的科技刊物，学科较全，专业较广。为给国内、外各厂矿、企业、科研单位、大专院校等刊登广告提供方便，决定从即日起开辟广告栏，欢迎选用。

有关刊登广告的具体手续、价目及刊物，详见我社的“承办国内广告业务暂行办法”及“承办国外广告业务暂行办法”。此项业务请直接与我社广告组联系，统一办理。

(社址：北京和平街北口 电话：46局4504)

科学技术文献出版社

一九八〇年四月十日

科学技术成果报告

膏状物喷雾干燥

(内部发行)

编辑者：中国科学技术情报研究所

出版者：科学技术文献出版社

印刷者：中国科学技术情报研究所印刷厂
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

※

开本：787×1092¹/₁₆。印张·1.5 字数：38.4千字

1980年9月北京第一版第一次印刷

印数 1—2,020册

科技新书目：171—25

统一书号：15176·480

定价：0.26元

目 录

前言	(1)
一、工艺流程及主要设备简述	(2)
(一) 工艺流程	(2)
(二) 主要设备	(2)
(三) 主要操作数据	(3)
二、膏状物喷雾干燥与其它干燥工艺比较	(3)
(一) 与稀浆喷雾干燥比较	(3)
(二) 与其它膏状物干燥比较	(5)
三、新工艺基本特点及主要组成部分	(6)
(一) 膏状物的输送	(6)
(二) 膏状物的雾化	(8)
(三) 喷嘴的操作	(15)
(四) 喷嘴的检验	(16)
(五) 干燥塔	(16)
(六) 除尘器	(17)
四、工艺参数选择	(18)
(一) 进出塔温度	(18)
(二) 物料含水量	(19)
(三) 雾化用压缩空气压力	(19)
(四) 气体在塔内流速	(19)
五、结束语	(21)

膏状物喷雾干燥

天津油漆总厂 曹冠华

前 言

干燥作业是化工、轻工等部门一种重要的单元操作。而膏状物干燥是染料、颜料、无机盐、制药、催化剂、轻工、冶金等行业最常见的操作，在整个干燥作业中占相当大的比例。因膏状物是一种非牛顿流体，其物理性能差异较大，同溶液状物料及散粒状物料相比，给干燥作业增加了许多困难，所以长期以来膏状物干燥作业是干燥作业中的薄弱环节。研究一种生产能力大，能源消耗少，操作简便的干燥膏状物的新型技术，对实现四个现代化有着重要的现实意义。

长期以来，我国膏状物干燥作业的主要设备仍以烘箱为主。以天津染化公司1978年的统计数字为例，烘箱在整个干燥设备中的比例达59.7%。这种工艺不但生产能力低，而且干燥成本高，粉尘飞扬严重，操作环境恶劣，已严重阻碍了这些单位生产的进一步发展。近十多年来，国内许多单位开展了新干燥工艺技术的试验研究，先后出现了薄膜流化干燥，强化沸腾干燥，惰性粒子沸腾干燥，膏状物加水打浆喷雾干燥等一批新型干燥技术，使我国膏状物干燥作业向前推进了一步。但是，由于上述各项干燥技术有的对热敏性物料不能适应，有的各项经济指标不够先进，有些则因林彪、“四人帮”错误路线的破坏干扰未进一步完善提高就中途而废，致使这些技术没能得到更好的推广应用，我国膏状物干燥的落后面貌仍未得到根本改变，目前仍一致认为膏状物干燥是一个比较落后的薄弱环节^[1,2]。

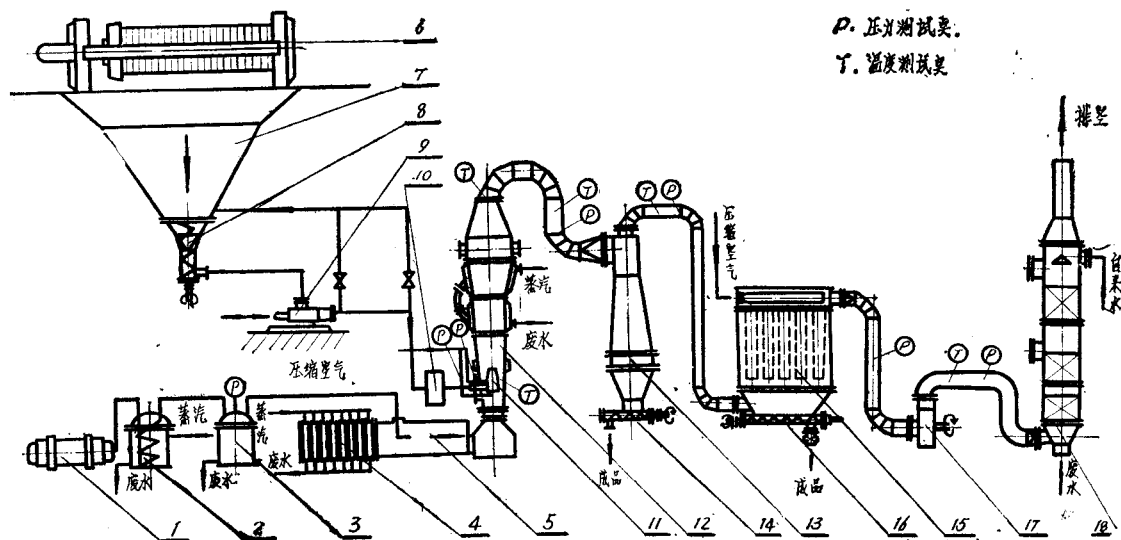
在国外，在膏状物干燥作业中，现在许多企业仍采用膏状物加水打浆喷雾的工艺路线。从国际化工设备展览会展出的产品分析，以干燥粉碎联合作业（原理同强化沸腾干燥技术）及糊状物喷雾装置为主^[3]。其基本情况如有关资料介绍的那样，对膏状物的干燥，带搅拌的沸腾床干燥可以处理不太稠粘而最后产品是颗粒状的物料，特别粘的物料则用带刮式搅拌器的接触式干燥器较为合适，对比较热敏的物料来说这二类方法仍不能满足要求^[4]。膏状物干燥亦仍处研究发展阶段。而喷雾干燥技术在化工干燥作业上的应用，充分显示了这种技术的优越性。膏状物直接喷雾干燥技术的应用，无疑将填补热敏性膏状物干燥的空白，并进一步丰富提高膏状物干燥技术。因而从六十年代开始国外就进行了有关的探索及试验研究，曾有一些工业生产的报导及专刊发表^[5,6,7,8]。但从资料分析，技术上还不够成熟，应用还不够普遍。近年来，因能源危机的到来，在干燥作业中如何减少能量消耗^[9]，提高被处理物料的含固量成了共同关心的问题，因而含固量高的膏状物料的直接喷雾干燥已排在国外喷雾干燥发展方向的首位^[10]。

本试验的目的是研制一种生产能力大，干燥成本低，设备容积生产能力大，适应范围广，操作简便，防止粉尘污染，适用于膏状物直接干燥的喷雾干燥技术。

一、工艺流程及主要设备简述

(一) 工艺流程

膏状物喷雾干燥的工艺流程如图一所示。



图一 流程示意图

悬浮液料浆经板框式过滤机6过滤、水洗，弃去洗液及母液，滤饼落入方锥形储料槽7，经立式锥形螺旋送料器8将物料送至灰浆泵9，由灰浆泵加压通过输送管路经橡胶球储能器（隔离缓冲器）10输送至三流式喷嘴11，与来自空气压缩机的压缩空气在喷嘴内接触，在干燥塔12内把物料喷成细小的颗粒。液化石油气储瓶1内的液化石油气，经蒸汽加热器2成为气体后，进入缓压储存器3，然后输入燃烧室5燃烧，将来自翅片加热器4的热空气进一步加热后进入干燥塔12，与喷嘴11喷出的雾流接触，使物料干燥。物料被热空气干燥后，进入旋风分离器13进行第一次气固分离，92~95%的物料沉降至旋风分离器的底部，由螺旋送料器14排出，包装成品，由旋风分离器顶部排出的尾气经脉冲式布袋除尘器15进行第二次气固分离，布袋除尘器的捕集效率在98%以上，被捕集的物质由布袋除尘器底部的螺旋送料器16排出，包装成品。含有0.05~0.08%固体的布袋除尘器的尾气经鼓风机17抽送至湍流塔18，进行水洗除尘，净化后排入大气。

(二) 主要设备

1. 500升液化石油气储瓶；
2. $\phi 1000 \times 1000$ 蛇管蒸汽加热器；
3. $\phi 1000 \times 1000$ 液化石油气缓压储存器；
4. $F = 20 \text{米}^2$ 翅片加热器；
5. $\phi 1000 \times 2500$ 液化石油气燃烧室；
6. BMY60/810—25板框式过滤机
7. 10米^3 方锥型储料槽；

8. 立式锥形螺旋送料器;
9. HSB-3 型灰浆泵 (天津二建机械站生产);
10. $\phi 159 \times 400$ 橡胶球储能器 (隔离缓冲器);
11. 三流式喷嘴;
12. $\phi 350/700 L = 6650$ 蒸汽夹套锥形干燥塔;
13. $\phi 585$ 扩散式旋风分离器;
14. 螺旋送料器;
15. LDMJ-60 布袋除尘器;
16. 螺旋送料器;
17. 8—18—1 10# 鼓风机, 配 28 千瓦电机;
18. $\phi 800 \times 700$ 湍流塔。

(三) 主要操作数据

以颜料深铬黄、锌铬黄为例, 其主要操作数据如表 1 所示。

表 1

物 料 名 称		深 铬 黄	锌 铬 黄
水 份	初 (%)	50	53
	终 (%)	1	1.5
产 量 (公斤/小时)		500	650
进塔温度 (°C)		500	450
塔顶温度 (°C)		90—100	70—80
尾气温度 (°C)		80—90	60—70
系统阻力 (毫米水柱)		400	400
尾气含尘量 (毫克/米 ³)		0.12—0.43	—

二、膏状物喷雾干燥与其它干燥工艺比较

(一) 与稀浆喷雾干燥比较

因许多喷雾干燥设备只能处理含固量为 20% 左右的物料, 为了适应工艺要求, 很多物料经过滤后, 仍需加入大量水份, 把滤饼调配成稀浆后进行喷雾, 通常把这种工艺称为稀浆喷雾。这种欲干燥反而加水的工艺显然是很不合理的, 同时亦不经济。而膏状物直接喷雾干燥, 可以直接用于干燥滤饼, 这样不但砍掉了加水调配稀浆这一工序, 而且带来了一系列优点。

1. 设备生产能力大

表 2 综合了目前采用的各种类型喷雾干燥的数据⁽¹¹⁾。因膏状物喷雾干燥能处理含固量高的物料及采取了一些有利干燥的措施, 其容积蒸发能力, 容积生产能力均较其他类型喷雾干燥器提高了几倍到几十倍。

表 2

干燥形式	物料名称	含水量		生产能力 (公斤/小时)	设备容积 (米 ³)	容积蒸发强度 (公斤/米 ³ ·小时)	容积生产能力 (公斤/米 ³ ·小时)
		初 (%)	终 (%)				
膏状喷雾	深铬黄	50	1	500	2.14	234	234
膏状喷雾	锌铬黄	53	1	650	2.14	336	304
稀浆喷雾	深铬黄	65	1	80	2.14	70	37.2
稀浆喷雾	还原兰	80	1	50	11.25	18	4.45
稀浆喷雾	钛白	60	1	100	1.41	106	71
压力式喷雾	蛋液	70	5	600	24	53	25
离心喷雾	染料	75	3	125	102	28	1.22
日本离心喷雾	—	—	—	—	202	—	处理量 500立升/小时

2. 耗热量低

对于热力干燥,其热量消耗约占整个干燥作业能量总消耗量的80%以上,因而降低热量消耗是降低干燥作业能耗的主要手段,而降低物料含水量又是降低热耗的关键,例如:把被干燥物料水份含量由60%降至50%(干燥后的产品含水量1%)其热量消耗降低33%,表3是不同含水量的实际操作数据。由表中的数据可以看出,用膏状物喷雾干燥工艺生产其热量消耗可降低68%。

表 3

工 艺	物 料	含水量 (%)	耗热量 (千卡/公斤产品)
稀浆喷雾	深 铬 黄	65	2500
膏状物喷雾	深 铬 黄	50	1150

3. 动力消耗

稀浆“气流”喷雾干燥器,其最大缺点是动力消耗大,通常是离心式、压力式喷雾干燥动力消耗的6—8倍,所以目前国外在大生产上很少采用气流喷雾干燥。

表4是膏状物喷雾干燥同各种型式稀浆喷雾干燥操作在动力消耗方面的对比。由表4可以看出,因膏状物气流喷雾干燥可以适应含水量小的物料,物料被雾化成细小的颗粒,减少了

表 4

干燥型式	物料名称	物料含水 (%)	生产能力 (公斤/小时)	动力消耗 (千瓦)	单 耗 (千瓦/公斤产品)
膏状物喷雾干燥	深 铬 黄	50	500	50	0.1
膏状物喷雾干燥	锌 铬 黄	53	650	50	0.077
稀浆气流式喷雾	深 铬 黄	65	80	50	0.625
压力式喷雾	无 机 盐	75	1224	146	0.12
离心喷雾(丹麦) ^[11]			蒸发量500公斤/时	10—20	约0.08—0.16
离心喷雾(日本)			料液500升/时	33	0.066千瓦/时

颗粒表面水份的干燥时间，加快了干燥速度，所以其动力消耗比稀浆气流喷雾干燥可节省85%左右，达到甚至超过丹麦、日本等国压力式及离心式喷雾干燥的动力消耗指标。

4. 其他方面的比较

表5是膏状物喷雾干燥与稀浆喷雾干燥两种工艺干燥同一产品时的对比结果。由表5可见膏状物喷雾干燥因其干燥负荷小、干燥速度快，具有产品质量好，尾气温度低，不易粘壁及劳动生产率高等特点。

表 5

干燥型式	物料含水 (%)	生产能力 (公斤/小时)	进塔温度 (°C)	出塔温度 (°C)	操作人员 (人)	产品质量 (色光)
膏状物喷雾	50	400—500	400—500	70—80	2	符合标样
稀浆喷雾	60~70	60~70	200	90—100	2	微 暗

综上所述，膏状物喷雾干燥工艺提高了生产效率，降低了能源消耗，实现了小设备大生产，使喷雾干燥这一工艺达到了一个新水平。为气流式喷嘴在工艺生产上的应用闯出一条新路。

所以，膏状物喷雾干燥是现有喷雾干燥工艺挖掘生产潜力，节约能源消耗的好途径。

(二) 与其它膏状物干燥比较

目前国内应用于膏状物干燥的工艺有箱式、洞道式、耙式、返料沸腾、强化沸腾等干燥设备，其中以强化沸腾干燥器最为先进，在1975年淮南会议上认为此工艺已达到了当时国内外先进水平，为我国膏状物干燥赶超世界先进水平作出了一定的贡献。

这一工艺对于干燥物料的分散主要靠机械破碎来完成，除部分易分散物料外，大多数干燥

表 6

干燥型式		强化沸腾	膏状物喷雾
产品名称		直接日晒兰	铬 黄
生产能力 (公斤/小时)		45	500
物料含水	初 (%)	55	50
	终 (%)	4	1
干燥器容积 (米 ³)		0.3	2.14
蒸发强度 (公斤/米 ³ ·时)		133	233
产品细度 (目)		80	325
动力消耗 (度电/吨成品)		380	60
温 度	进塔 (°C)	300~350	500
	出塔 (°C)	<150	<110
适用范围		热敏性不太强的滤饼	适用于热敏性滤饼及稀浆

后的成品颗粒大于气流喷雾干燥颗粒。而颗粒愈大，愈不利于传热传质，所以操作时必须掌握较高的尾气温度，同时颗粒直径大亦导致塔内停留时间长。这样，不但影响干燥作业热效率，而且影响热敏性物料的产品质量。

膏状物喷雾干燥，基本上克服了上述工艺不足，表6就是两种工艺操作数据的对比。

表6表明，膏状物喷雾干燥具有对含水量低的膏状物可直接进行喷雾干燥的特点，而且生产能力大，产品细度好，节约能源，适用范围广。由于在塔内停留时间短，适用于热敏性物料的干燥。

三、新工艺基本特点及主要组成部分

影响干燥作业效果的因素有许多，对膏状物喷雾干燥，虽也采用了一些有利于提高干燥效果的措施，如：提高进塔温度等，但最主要的是把膏状物通过送料系统，送至膏状物雾化器（气流喷嘴）喷成细小的颗粒进行干燥。在干燥过程中，把喷雾干燥同气流干燥相结合，使用了较高气速。下面就这几个问题谈谈我们的粗浅看法。

（一）膏状物的输送

实现膏状物直接喷雾干燥工艺，首先必须解决膏状物的输送。因膏状物本身特点决定了膏状物输送时阻力大，不易连续、稳定、安全地供料，为此必须采取相应措施加以解决。

1. 阻力

我们所要处理的是经板框过滤机过滤后得到的一种含水量为45—50%的滤饼。这种物料既无流动性，又无触变性，即使经过搅拌或捏合仍能保持其原来状态，在料仓内其堆积角可超过90°，甚至粘在垂直表面上也不流堕。

这种粘度很大的物料是非牛顿流体，从非牛顿流体在管道内流动时阻力计算公式得知，

$$h = \frac{32LV_a}{D^2} \mu_a \quad (1) \quad (12)$$

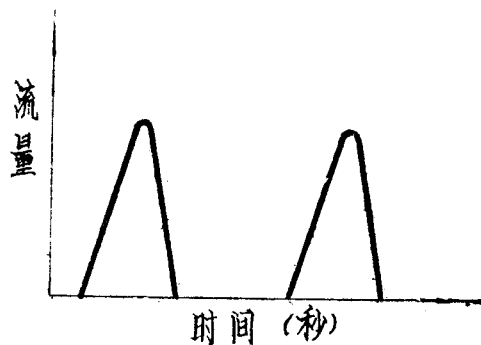
式中 μ_a 为表现粘度。

从式（1）可知，随物料粘度升高，输送阻力急剧上升。从实际测定亦证实了这点；例：在铁管内以0.2~0.3米/秒速度输送深铬黄滤饼，阻力高达3—4公斤/厘米²·米，其阻力相当于水在相同流速下流动阻力损失的1万倍以上。

根据这一特点，目前稀浆喷雾工艺中使用的几种送料方式，在膏状物喷雾干燥工艺中根本无法采用。通过对无机盐，牙膏，陶瓷工业，建筑施工部门应用的膏糊状物料输送设备的调查、分析，建筑业广泛应用的HSB-3型灰浆泵具有压力高，运动稳定可靠，适应能力强的特点，在应用时选用了功率较大的电机，在结构上作了必要改进，使泵输出压力可达30公斤/厘米²以上，初步满足了膏状物输送的工艺要求。

2. 喷料脉冲

HSB-3型灰浆泵属于往复式柱塞泵，其流量同时间变化可用图二表示。从图二可知，当柱塞向给料方向运动时，要滞后一段时间喷



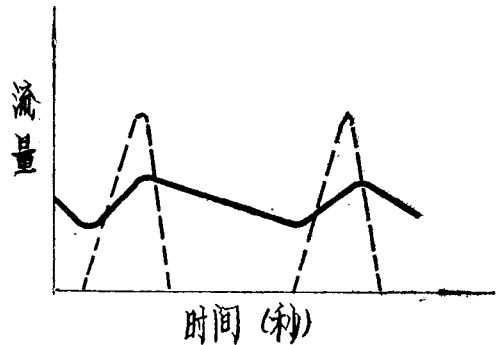
图二 流量与时间变化关系

头处才喷料，因而实际操作中50%以上时间是处于断料阶段。设备只有30%左右时间是有效的，这一严重脉冲现象给操作带来了许多不利。

从图二还可见，有一最大流量存在。在操作时为防止粘壁，必须采用与最大流量相适应的进塔温度与尾气温度。而实际操作中能维持最大流量的时间约为总时间的10%左右，而且50%以上时间是断料时间，这样大部分时间是在给热量、给料量极不平衡的情况下运行，这必然导致耗热量大幅度上升。以铬黄为例：在这种情况下操作，其耗热量竟高达2400千卡/公斤产品。在操作时断料还会导致塔顶温度、尾气温度升高，这显然不利于热敏性物料的生产。考虑上述原因，在生产热敏性物料时不得降低进塔温度，这样使生产能力及操作经济指标大大下降。断料还使喷嘴失去料封，致使大量压缩空气跑空，压缩空气压力下降，导致雾化恶化，雾化质量下降。因脉冲存在，对流量操作控制困难，操作稳定性差，易造成塔内粘壁而影响操作正常进行；同时使干燥系统不能充分发挥其作用，亦导致单位产品的热风用量及动力消耗上升。

众所周知，缓冲是消除脉冲的有效措施，但因膏状物无固定料面，所以采用气料直接接触的缓冲装置均不能取得满意的效果。

我们经过多次试验改进，最后在输送管路上距喷嘴较近的位置上串联了一个 $\phi 159 \times 400$ 的密闭缸(隔离缓冲器)，缸内填有 $\phi 50\text{m/m}$ 橡皮球(玩具皮球)30个。利用橡皮球弹性的特点，通过皮球缓冲大大改善了喷嘴处的脉冲，使流量随时间的变化成图三三曲线所示。这样喷料脉冲在一定程度上得到了解决，生产能力提高了50%，使我们在膏状物输送问题上又迈出了一步。

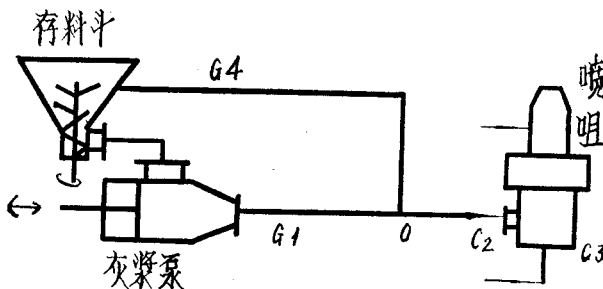


图三 缓冲后流量与时间变化关系

3. 安全送料

HSB-3型灰浆泵属正位移泵，因此在整个输送系统中，一旦有异物堵塞，必然造成系统内压力骤然增加，导致泵的损坏或管路崩裂，所以必须设有安全装置。

根据膏状物在管路内流动阻力大的特点，选择在距喷嘴较近的位置安装一条长回流管路，通过管路阻力的适当配置，解决上述问题。如图四所示，在送料管路上0点开孔，接一



图四 送料系统示意图

长回流管路引回存料斗。设泵至0点管路阻力为 G_1 ，0点至喷嘴处阻力为 G_2 ，喷嘴本身阻力为 G_3 ，回流阻力是从0点至存料斗的阻力，其值为 G_4 。应使回流阻力 G_4 大于 G_2 和 G_3 之和，这样既不影响物料的输送，而且当喷嘴阻力 G_3 因阻塞而急剧增大，致使 $G_4 < G_2 + G_3$ 时，物料可通过长回流管返回料槽而确保安全。考虑到

泵动力消耗及泵强度， G_4 选择还应注意 $G_1 + G_4 - G_3$ ，应大于灰浆泵最大压力，根据我厂生产的物料性能，我们选择 G_4 比 $G_2 + G_3$ 大2—4公斤/厘米²。

4. 流量控制

在喷雾干燥工艺中，精确的调整流量是十分重要的，这不仅可以确保产量、质量，而且可保证干燥作业各项经济指标的完成。

由于条件所限，我们只能采用回流控制法作流量控制。在输送管路上，在靠近泵出口处接一旁路支管，用阀门控制支管流量，从而达到调节主管流量的目的。试验证明这种方法操作简便，给料稳定，设备简单，初步满足了喷雾干燥，对流量控制的要求。

通过上述措施，基本构成了一套适用于输送膏状物的送料系统，并基本做到了连续稳定安全送料，为实现膏状物雾化创造了条件。

(二) 膏状物的雾化

膏状物雾化是整个工艺的关键。从气流喷雾中热传递速率计算公式得知：

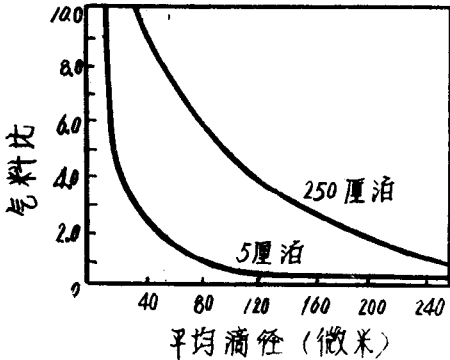
$$q = \frac{6.38k_f S^{2/3} \Delta t_f}{(D_{\max})^2} \cdot \frac{w_s}{\rho_s} \sqrt{\left(\frac{\rho_a}{w_a v_a}\right) \left(\frac{w_a + w_s}{w_a}\right)} \quad (2) \quad (13)$$

式中 q ——传热速率；

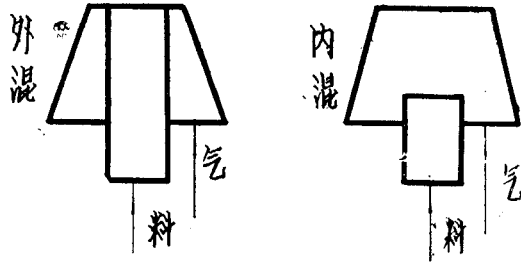
D_{\max} ——最大颗粒直径。

由式(2)可知，传热速度同颗粒直径平方成反比。对于颜料颗粒，均是粒径为几个微米的结晶物，物料水份大都为表面水份，颗粒之间的结合导致颗粒之间水份成为内部水份，使干燥速度下降。因此设计雾化器的目的是把物料雾化成细小的颗粒。

在雾化过程中物料物化性能对雾化后颗粒大小影响很大，图五就是不同粘度物料对雾化后粒径的影响。从中可见，粘度愈大愈不利于雾化。因而对膏状物而言，设计雾化器的关键是如何把粘度很高的物料喷成细小的颗粒。



图五 物料粘度与雾化粒径的关系



图六 外混与内混喷嘴示意图

从资料介绍，国内外广泛采用的雾化器有离心式、压力式、气流式，而只有气流式能处理粘度高的物料^[14]。而气流式又分图六所示的外混式及内混式两种。对气流式喷嘴的雾化机理许多资料均认为：高速气流同物料之间存在相对速度，由此产生摩擦，使物料被拉成细长的丝或液膜，而细丝的断裂或液膜的分裂便成了雾滴^{[15][16]}。从雾化机理可知，物料的粘度是影响雾化质量的重要因素。式(3)是用这种雾化机理雾化物料时用来估算颗粒直径的计算公式，用它可定量说明物料粘度同雾化后颗粒直径的关系：

$$\bar{D} = \frac{585\sqrt{\sigma}}{V\sqrt{Q}} + 597\left(\frac{\mu_L}{\sqrt{\sigma\rho}}\right)^{0.45} \times \left(1000\frac{Q_L}{Q_a}\right)^{1.5} \quad (3) \quad (17)$$

式中： \bar{D} —液滴体积面积平均直径(微米)

σ —溶液表面张力(达因/厘米)

μ_1 —溶液粘度 (泊)

ρ —溶液重度 (克/毫升)

Q_L —喷出口液体体积流量

Q_a —喷出口气体体积流量

V —气体与液流之间相对速度(米/秒)

因粘度对雾化质量影响大，所以利用这种雾化原理设计的喷嘴不适用于高粘度物料的雾化。而许多实践亦证实了这点，用现在应用于稀浆喷雾的气流式喷嘴(二流式、外混)，在雾化高粘度物料时，物料无法雾化。

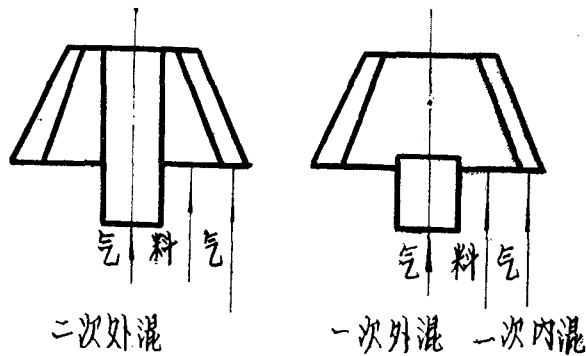
通过上面提及的二种雾化器(内混、外混)实际应用表明，在雾化相同物料时内混式的耗气量只有外混式耗气量的10%左右。在雾化高粘度物料时内混式雾化效果明显优于外混式喷嘴。从雾化机理分析，内混式不但亦存在气料摩擦，而且由于气流同物料在混合管内部接触，一方面气体能量集中，同时气流速度大(200—300米/秒)，物料由于气流强烈的撞击及剪切而被雾化成细小的颗粒。

从分析得到启示，膏状物雾化应使气流能量最大限度的用于撞击及剪切物料。因气料接触是气体同物料充分撞击的必要条件，为此还必须使气料有足够大的接触面积。上述就是设计膏状物雾化器的依据。

按上面理论设计的二流式喷嘴，虽可用于粘度较高物料的雾化，但雾化效果仍不够理想。其主要原因是，气流在混合管内流动时有边界层存在，在管壁处物料不能得到良好的雾化，所以物料在雾流里浓度分布规律是，离管中心愈远浓度愈高，雾化质量愈差，在雾流中大颗粒物料均出现在雾流的最外层。

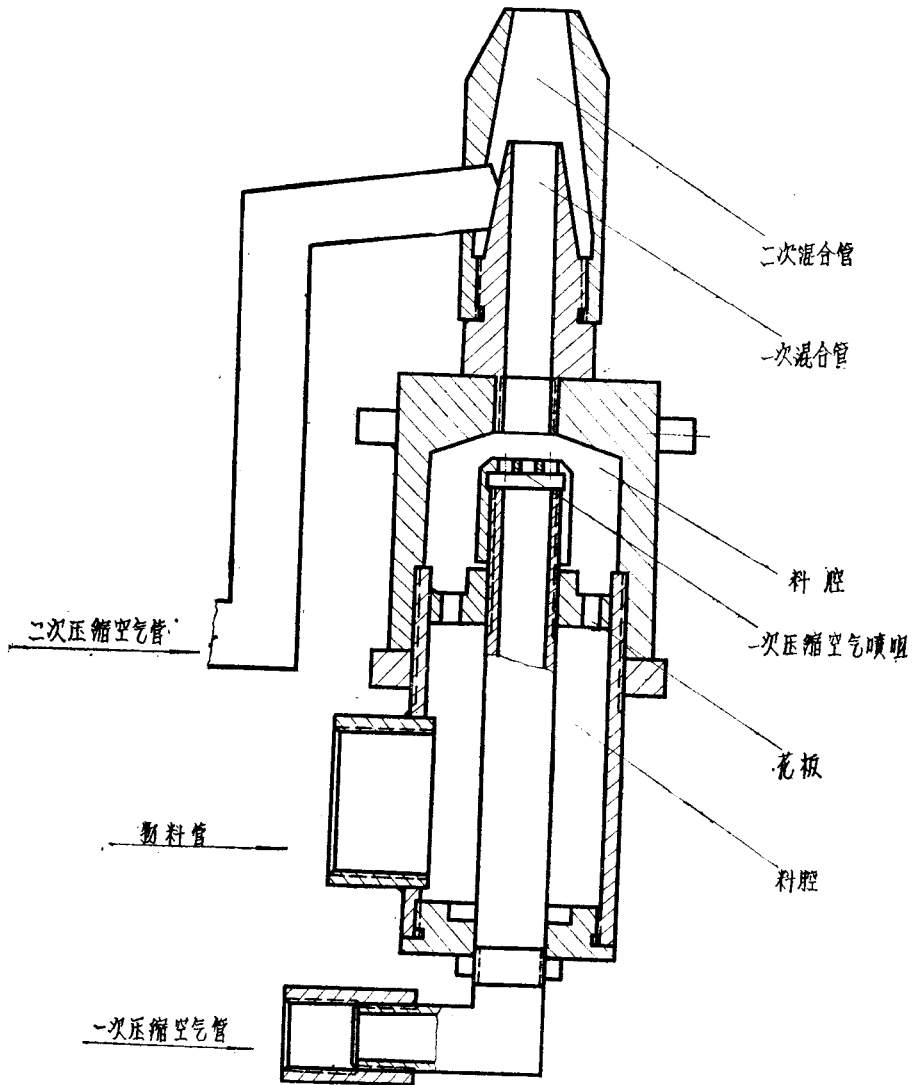
针对外层雾化质量差的缺点，必须给予再次雾化的机会，而三流式喷嘴，因其二次气流首先接触的是一次雾流的外层，所以可满足上述要求。

从资料介绍，三流式喷嘴有图七所示的两种：二次外混和一次内混、一次外混^[18]。即使是一次内混一次外混的喷嘴在雾化粘度大的物料时不但生产能力提高不大，而且雾流外层仍有大颗粒物料存在。



图七 三流式喷嘴示意图

因内混式喷嘴易被未干的粉团阻塞喷嘴，同时气流之间易发生相互制约，三流式喷嘴中还未见二次内混的应用报导。考虑内混式雾化效果好的特点，本试验采用了如图八所示的二次切向内混三流式喷嘴。



图八 二次切向内混三流式喷嘴示意图

表 7 是几种气流式喷嘴的操作数据。

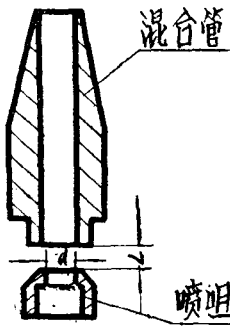
由表 7 可知，二次内混的三流式喷嘴不但雾化能力大，而且雾化效果好。这种喷嘴先后用于颜料铬黄、锌黄、铁红等物料的喷雾，兄弟厂曾用于染料中间体，染料及其它高粘度物料的雾化，均取得了满意的结果，实践证明其适应能力较强。

1. 喷嘴进料环隙直径

从膏状物输送可知：因物料粘度大，送料的阻力损失比水以相同流速流动时的阻力损失大一万倍以上，而送料的阻力又随进料速度的增加而急剧上升。为此必须采取相应措施降低喷头处阻力损失。从图九可知其进料速度 V 可用下式表示：

表 7

喷嘴形式	物料	状态	含水量 (%)	气料比	细度 (目)	现象
二流式 (内混)	铬黄	膏状	50	1.18	325	不良
二流式 (外混)	染料	稀浆		0.4		
三流式一次内混 一次外混	铬黄	膏状	50	0.98	325	尚可
三流式一次内混 一次外混	钛白	糊状	60		60—100	
三流式二次内混	铬黄	膏状	50	0.14	325	较好



图九 一次内混喷嘴示意图

$$V = Q / \pi d L \quad (3)$$

式中 Q ——进料量 (米³/秒);

V ——进料速度 (米/秒);

L ——多喷嘴同混合管的距离 (米);

d ——进料环隙直径 (米) (亦是压缩空气喷嘴有效截面直径)。

由式 (3) 可知, 在 Q 、 L 不变的情况下, 进料速度 V 同环隙直径 d 成反比, 所以增大直径 d 是降低阻力的好途径。

从图九可知, 气料开始接触的表面其面积为 $A = \pi d L$, 增大 d 还有利于气料接触。

通过上述分析说明, 应采用较大的环隙直径 d 。

2. 喷嘴截面风速

增大环隙直径虽可以达到降低送料阻力及增大气料接触表面的目的, 但随着环隙直径 d 的增加, 因喷嘴截面增大, 这样必导致出口截面处风速急剧下降或耗气量急剧上升。

下式是喷嘴中气流同物料撞击能量的计算公式。

$$E = \frac{1}{2} \frac{G_P G_H}{G_P + G_H} (W_{P_1} - W_{H_1})^2 \quad (4)^{(19)}$$

式中 E ——撞击能力;

G_P ——气体质量流量 (公斤/秒);

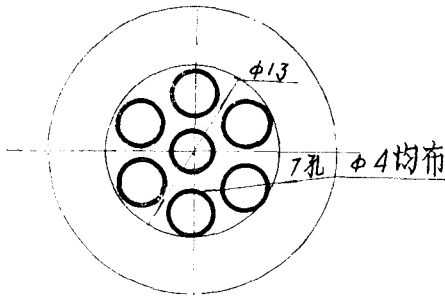
G_H ——物料质量流量 (公斤/秒);

W_{P_1} ——混合管入口截面处气体速度 (米/秒);

W_{H_1} ——混合管入口截面处物料速度 (米/秒)。

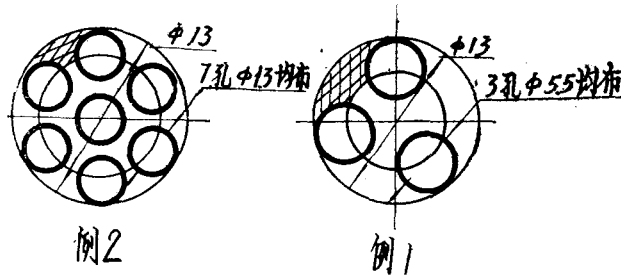
由式 (4) 可见, E 同混合管入口处气料流速差的平方成正比, 用增大气流速度 W_{P_1} 可得到较大的 E , 从而得到良好的雾化效果。很显然, 用增大喷嘴出口截面直径 d 的办法, 会导致 W_{P_1} 下降, 不可能得到良好的雾化效果。而实际操作亦证实了这点。当喷嘴出口直径 $d = 13$ 毫米, 雾化用压缩空气流量为 3 米³/分, 压力 4 公斤/厘米², 则喷嘴出口出现大量大颗粒, 边缘出现拉料。

为解决上述矛盾, 在喷嘴出口截面上分布了 7 个 $\phi 4$ 的小孔 (如图十所示), 使气流喷嘴出口截面开孔率减少了 34%, 使 W_{P_1} 有了较大提高, 这样不但有较大的进料环隙直径, 而且还



图十 一次喷嘴出口截面示意图

(1) 孔径：图十一表示不同孔径开孔情况，在图中喷嘴有效截面四周均存在未被气孔占有的部分（图中网线部分）。空气从喷嘴喷出，因这部分的存在，气流不会布满整个喷嘴周边，因而降低了气料接触面积，同时使混合管入口截面气体分布不均匀。很明显，随着这个区域面积的扩大，雾化效果会随之变坏。从实际操作观察易发生黑线（有几股物料浓度高，雾化质量差的雾流）及拉料（物料象挤牙膏似的从喷嘴口被气流带出）。为此，把这个区域称为雾化死角。



图十一 一次喷嘴不同开孔截面示意图

通过计算得出图十一中例1每块死角的面积为 18.2×10^{-2} 厘米²，而例2则为 4.85×10^{-2} 厘米²。这清楚表明缩小小孔直径即可达到缩小雾化死角的目的。而实践亦证实了这点。例如生产深铬黄，开始采用圆孔径4毫米、7孔均布的喷嘴，在喷嘴出口明显存在6条黑线，后喷嘴改为圆孔径2.2毫米、19孔均布的喷嘴时，雾化质量明显提高，黑线消除。虽然小孔可得到良好的雾化效果，但过小的孔径不但给加工制造带来一定困难，而且小孔易被杂质阻塞，从而严重影响气流分布。所以在实际应用中，对雾化较困难的物料我们采用孔径1.5—2毫米的小孔均布，对较容易雾化的物料则采用孔径3—4毫米的小孔均布。

(2) 孔分布：从图十一可想象，为增大气料接触面积，尽量减小雾化死角及提高气料开始接触阶段的气料比，就必须使小孔内切于有效截面的外圆，使小孔最大限度的均布在有效截面的边缘。例：孔径4毫米、7孔均布的喷嘴，使85%开孔面积均布于喷嘴四周。

(3) 孔间距：从缩小雾化死角考虑，气孔之间的距离愈小愈好，但一方面考虑过小的孔距给加工带来一定困难，同时因孔间距的存在，使物料可通过几股气流之间的空隙进入气流内部，这样不但增加了气料接触表面，而且使气体得到充分利用。根据上述原因，又通过试验证实孔间距选0.5—1毫米较好。

有较大的气速 W_{P1} 。

在喷嘴出口截面开孔，使混合管入口处有7股高速气流同时进入混合管，同时外层小孔均是向中心倾斜 1° ，这样促使气流之间相互撞击，进一步增强了雾化效果。

3. 压缩空气喷嘴孔径，孔分布、孔间距、开孔方式

喷嘴截面开孔，虽可提高气速，但其孔径大小，孔分布、孔间距对雾化效果有着相当大的影响。

(4) 开孔倾斜角: 如前所述, 膏状物雾化应使气体能量最大限度用于对物料的撞击及剪切。一次雾化的压缩空气气流, 如同喷嘴小孔中心联线方向成一定角度喷出, 使气流有一定径向分速度, 有利于径向剪切、撞击及物料均匀散开。因一次气流旋转方向同二次气流旋转方向相反, 不但增大了一、二次气流之间径向相对速度, 有利于雾化效果的提高, 同时, 因旋转能力相互抵消, 起到了缩小扩散角的作用。因一次气流旋转可以大大提高雾化后颗粒细度及均匀度, 较小的扩散角有利于防止粘壁, 这一切导致生产能力大幅度提高。以中铬黄生产为例, 在其它条件不变情况下, 采用一次气流旋转其生产能力可以从400—500公斤/小时提高到550—650公斤/小时。所以, 现使用的喷嘴采用向右倾斜, 向中心倾斜的开孔方式。

4. 喷嘴有效截面直径的确定

根据上面的分析可知, 为提高雾化效果, 必须提高 W_{P_1} , 为此设: $W_{P_1} = W_{\text{临}}$ (临界速度)。根据现有设备情况, 实际采用的压缩空气压力为5公斤/厘米², 一次雾化空气流量为2.5米³/分 (标准状况), 一次空气温度为27°C。

下式是临界状态计算公式:

$$L_{\text{临}} = 2.145 A_t C P_1 \sqrt{\frac{1}{RT_1}} \quad (\text{公斤/秒}) \quad (5) \quad (20)$$

式中 $L_{\text{临}}$ ——气体在临界截面上的重量流量(公斤/秒);

A_t ——临界断面面积;

C ——系数0.85—0.95;

P_1 ——压缩空气压力 (公斤/厘米²);

R ——气体常数 (公斤·米/°C);

T_1 ——压缩空气绝对温度273+t°C。

由式(5)可得:

$$A_t = \frac{L_{\text{临}} \times \sqrt{RT_1}}{2.145 C P_1} \quad (6)$$

由查表得空气在标准状态下重度为1.252公斤/米³,

$$\text{则 } L_{\text{临}} = \frac{2.5 \times 1.252}{60} = 0.0521 \quad (\text{公斤/秒})$$

取 $C=0.9$, $P_1=5$ 公斤/厘米², $T_1=273+27=300$ (°K)。把这些数字代入式(6)得:

$$A_t = \frac{5.21 \times 10^{-2} \times \sqrt{300 \times 29.3}}{2.145 \times 0.9 \times 5} = 0.498 \quad (\text{厘米}^2)$$

按上述喷嘴孔径、孔分布、孔间距分析, 喷嘴截面开孔率为40—60%。对于难雾化的物料取较小的开孔率, 为此取开孔率为40%进行计算, 则喷嘴的临界有效截面积 $A_{\text{临}}$ 为:

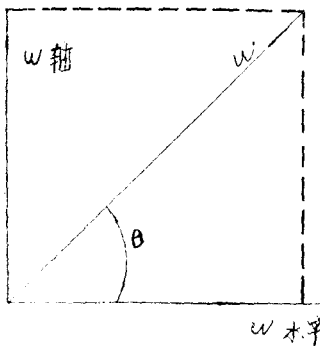
$$A_{\text{临}} = 0.498 / 0.4 = 1.245 \quad (\text{厘米}^2)$$

$$\text{则临界截面直径 } d_{\text{临}} = \sqrt{\frac{1.245 \times 4}{\pi}} = 1.26 \quad (\text{厘米})$$

考虑喷嘴小孔大部分分布于喷嘴四周, 送料是强制给料, 对压缩空气流有影响, 因此取 $d=1.3$ 厘米。

5. 进料方向

从式(4)亦可知, 降低进料的轴向速度, 亦是提高 E 的有效措施。但从喷嘴进料方式



图十二 速度分解图

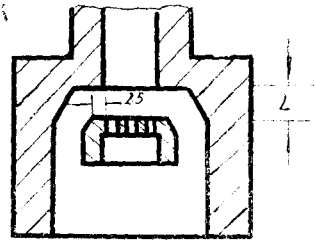
分析，通常均采用与水平方向成一定夹角的方向进料。在这种情况下，其速度分解可用图十二表示。

$$W_{H1} = W_{轴} = \omega \sin \theta \quad (7)$$

式中 θ ——进料方向同水平方向的夹角。

由式(7)可见，当 $\theta = 0^\circ$ ，则 $\sin \theta = 0$ ， $W_{H1} = 0$ ，使E有较大值，因而从水平方向进料亦是提高雾化质量的措施之一。

在喷头设计中，为使物料从水平方向进入混合管入口截面，我们使物料在强制给料设备的作用下，通过如图十三所示的宽为



图十三 料腔示意图

2.5毫米的导向通道进入混合管入口截面。

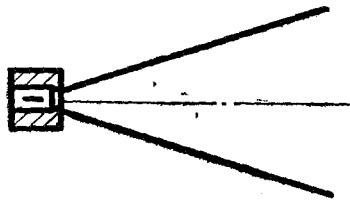
6. 料腔与花板

在喷嘴送料部分设有花板及料腔，这样较大的杂质被花板阻留而不会造成喷嘴阻塞。足够大的料腔一方面可降低送料阻力，同时可以确保物料充满整个喷嘴环隙及均匀分布。

7. 压缩空气喷嘴与混合管之间距离L

增大气料接触面积是提高雾化效果的关键，用增大环隙直径的办法可满足上述要求，而进料时狭窄的出口缝隙亦可满足上述要求，由于存在图十三所示的出口缝隙，物料可在挤压泵产生的压力作用下，通过进料缝隙把物料挤成环形薄片，从而增加了气料接触面积。

从图十三可看出，在理论上L值愈小，雾化效果应该愈好。但过小的L一方面使进料截面缩小，导致进料阻力急剧上升，同时过小的L亦易引起杂质堵塞进料环隙。选用过大的L则导致雾化质量下降。例如：在生产铬黄时，当L为10毫米时即可发现雾化不良现象，当增至20毫米时则严重恶化并出现脉冲喷料及大颗粒物料。根据上述原因，对铬黄、锌黄这类物料，我们选用L值为5—10毫米。

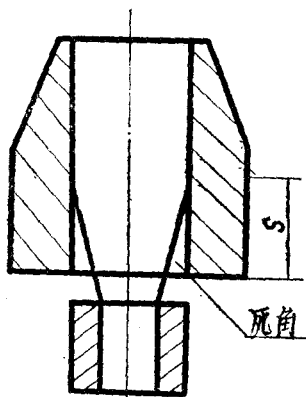


图十四 雾流扩散示意图

8. 混合管长度及内径
供物料同气流充分接触、混合的通道称为混合管，物料在管内被高速流动的气流再次粉碎。

从增加接触时间考虑，必须增加混合管长度。但过长的混合管不但给加工制造带来一定困难，同时当长度增至一定程度时，雾化效果已无明显好转。因而，我们根据实验，选用混合管长度为(5—10) $d_{混}$ (混合管内径)。

混合管内径是同喷嘴有效截面直径有关的，从喷嘴喷出的射流在空间根据自由流束扩散规律，如图十四那样依一定扩散角向四周扩散。随气流离喷嘴距离增大，射流扩散面积也愈大。若在混合管入口处射流扩散面积大于混合管入口截面，则部分气流就会同混合管外的器壁相撞，这样，导致一部分气体发生倒流而进入进料系统，使进料管



图十五 雾流在一次混合管内扩散情况示意图