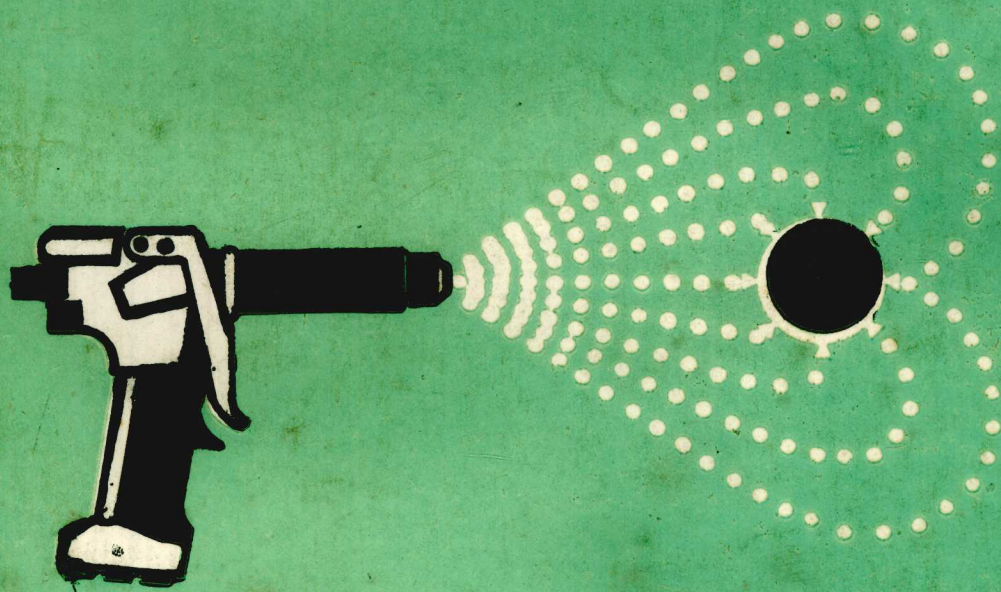


粉末静电喷涂 技术及其应用



机械工业部第十一设计研究院

前 言

粉末静电喷涂技术，具有一系列优点，应用极其广泛，为了尽快在我国得到发展和推广，我院根据1985年机械工业部仪器仪表工业局情报室下达的任务、编写了这本《粉末静电喷涂技术及其应用》资料。

本资料总结了作者多年来从事喷涂技术工作的经验，并收集了近期英、日、德等国有价值的文章编写而成。

本资料比较系统的介绍了粉末静电喷涂的工艺过程、设备的结构，并对设备设计提供了大量的经验数据，内容丰富。

本资料图文并茂、通俗易懂，在叙述上理论联系实际。对从事设备设计、制造、使用部门的人员有一定的实用价值。

由于编者水平有限，本资料难免存在不足之处，望读者予以指正。

机械工业部第十一设计研究院技术情报室

一九八六年三月

目 录

一、概 述.....	(1)
二、粉末涂料.....	(7)
(一)粉末涂料与溶剂型涂料.....	(7)
(二)粉末涂料的种类.....	(7)
(三)粉末涂料的制造方法.....	(7)
(四)粉末涂料涂膜的形成.....	(11)
(五)粉末涂料的特征.....	(13)
(六)粉末涂料的技术要求.....	(15)
(七)粉末涂料的试验项目和方法及其物性.....	(16)
(八)粉末涂料的优缺点.....	(26)
(九)粉末涂料的贮存及运输.....	(27)
三、粉末静电喷涂工程.....	(27)
(一)粉末静电喷涂系统和型式.....	(48)
(二)对被涂覆零件几何形状及材质要求、零件尺寸的划分.....	(48)
(三)粉末静电喷涂工艺设备.....	(48)
1 粉末静电喷涂前处理系统.....	(48)
2 输粉系统.....	(56)
3 喷粉系统.....	(65)
4 加热固化系统.....	(81)
5 传动系统.....	(104)
6 回收系统.....	(133)
7 电源及气源.....	(145)
8 粉末静电喷涂其他事项.....	(151)
四、粉末静电喷涂经济比较.....	(152)
五、粉末静电喷涂今后展望.....	(155)

一、概 述

(一) 粉末静电喷涂新工艺的发展概况

粉末涂料、粉末静电喷涂新工艺是继水溶性电泳涂料之后，在五十年代开始发展的涂复工艺，由于它能达到环境保护技术要求，完全不含有机溶剂，涂料损失很少，涂膜质量好，涂装效率高，工艺流程及工艺设备简单，易于用于生产线生产等优点，所以近几年来应用越来越广泛。

一九六二年开始原始性的流化床涂覆法是由西德格利斯海姆氏在一九五二年提出，一九五三年登记专利开始应用，由于此法易于流水生产作业，工艺设备简单，一次可涂覆较厚的涂膜，所以应用也比较广泛。

一九六三年法国沙曼斯公司的粉末静电喷涂工艺开始应用后，粉末涂覆有了进一步的改善和提高，克服了流化床的缺点（涂层厚，不均匀，局限于电器绝缘和耐腐蚀性涂覆），发展到喷涂装饰性涂层。

从一九六二年日本开始生产粉末涂料后，一九六七年才开始应用粉末静电喷涂新工艺，首先应用在农业机械上，一九七二年开始生产丙烯酸粉末涂料，一九七四年开始生产聚脂粉末涂料。

我国生产粉末涂料起步比较晚，一九六五年一机部广州科学电器研究所试制出环氧树脂电气绝缘用粉末涂料，一九七四年化工部西北涂料研究所研制出环氧树脂粉末涂料（装饰用涂料），一九七四年～一九七八年以来国内已有多家企业应用此工艺，如上海无线电二十四厂、北京七三八厂、南京分析仪器厂。一九七九年我院设计、制造、安装、调试完成西安光学测量仪器厂粉末静电喷涂生产线；一九八二年我院设计、制造、安装、调试完成河南驻马店地区电表厂的粉末静电喷涂生产线；一九八四年我院设计、制造、安装、调试完成北京电表厂的粉末静电喷涂生产线。这是在仪器仪表行业应用粉末静电喷涂新工艺的开端。

(二) 粉末静电喷涂新工艺应用范围

粉末静电喷涂，最初是用于金属防腐蚀，电器绝缘方面，但随着粉末静电喷涂工艺发展及新粉末涂料不断出现，到六十年代后期，开始用于装饰性涂装，今后粉末静电喷涂新工艺在整个涂装行业中所占的比例将会越来越大，尤其在仪器仪表行业、家用电器、电工、机械、车辆、管道等方面广泛的应用。

粉末涂料与溶剂型涂料技术经济比较和应用范围：

我国粉末涂料生产由于起步晚，基础薄弱，边研究，边生产，边提高致使产量上不去，用户得不到物美价廉的产品，因此推广粉末静电喷涂新工艺受到一定的影响。

为了进一步提高对粉末涂料与溶剂型涂料的认识，在技术和经济作一比较。详见表 1—1。

粉末涂料和粉末静电喷涂尽管有一定的优点，但它也有局限性的，不是万能的，我

粉末涂料与溶剂型涂料技术经济比较 表1-1

序号	涂料项目	粉末涂料	溶剂型涂料
1	成膜材料	选择范围广有些有机溶剂不能溶解的成膜物质亦可使用	局限于有机溶剂能溶解的成膜物质
2	生产设备	需专用设备要增加部分投资	可使用通用设备
3	生产成本	按单位重量比, 成本较高	按单位重量比, 成本较低
4	生产操作环境	产生粉尘, 可采取措施解决	溶剂大量挥发影响工人健康
5	防火防爆	不易燃烧, 但如不加注意能引起粉尘爆炸	容易着火、燃烧甚至发生爆炸
6	涂料利用率	采用闭路循环粉末回收装置, 利用率可达99%以上	利用率仅50~60%
7	溶剂及稀释剂消耗	无消耗	至少50%以上
8	涂装效率	可一次涂装成膜, 适于流水线自动化生产	需进行多次涂装, 如采用流水线生产, 则需多条操作线
9	更换颜色	较麻烦	较方便
10	涂膜厚度	一次可达50~200微米, 达到均匀度困难	一次仅15~20微米, 均匀性好
11	成膜固化过程	需加热使粉末熔融流平后才能固化	常温或加热固化
12	贮存运输	不会渗漏、挥发, 但必须封闭防止受潮	容易渗漏、挥发, 甚至燃烧
13	涂装后总成本	较低	较高
14	涂层外观	流平较差, 影响外观	较好
15	涂层缺陷	不会产生针孔气泡	由于溶剂挥发, 表面出现针孔气泡
16	机械性能	所用树脂分子量高因此附着力强坚固耐磨	所用树脂的分子量低, 涂膜性能较差, 易被碰撞脱落
17	光泽	光亮	光亮
18	防腐蚀性能	优良	较差
19	涂装修补性	较差	较好
20	户外耐候性	热固性粉末涂料的户外耐候性良好	相对比较略差

热 固 性 粉 末 涂 料 的 应 用

表1—2

分 类	用 途	环氧树 脂粉末	聚脂树 脂粉末	丙 烯 酸 树脂粉末	使用工艺方法
防腐蚀及装饰					
	仪器仪表行业				
1、	仪器仪表、表箱 (壳)	○	◎		粉末静电喷涂工艺
2、	经纬仪一罩	○	◎		" " "
3、	三角架—地脚	○	◎		" "
4、	电表—表壳	○	◎、	◎	" "
5、	电度表—表壳	○	◎	◎	" "
6、	水表—表壳	○	◎		(1)底层(底漆)粉末电泳工艺 (2)面层(面漆)粉末静电喷涂工艺
7、	仪表控制柜(台)	○	◎	◎	粉末静电喷涂工艺
					
	电工				
1、	电动机—外壳	○	◎		粉末静电喷涂工艺
	家用电器				
1、	电冰箱—箱体	○	◎	◎	(1)底层(底漆)粉末电泳工艺 (2)面层粉末静电喷涂工艺
2、	洗衣机—箱体	○	◎	◎	" "
3、	空调机—箱体	○	◎	◎	(1)底层(底漆)粉末电泳工艺 (2)面层(面漆)粉末静电喷涂工艺
4、	灯具—灯罩(个)	○	◎	◎	粉末静电喷涂工艺
5、	电风扇—机壳、叶片	○	◎		" "
6、	缝纫机—机身	○	◎		" "

表 1—2 (续)

分 类	用 途	环氧树 脂粉末	聚酯树 脂粉末	丙 烯 酸 树脂粉末	使用工艺方法
7、	缝纫机—机头	○	◎		粉末静电喷涂工艺
	车辆				
1、	轿车车身		◎	◎	" "
2、	轮圈	◎			" "
3、	摩托车—车身	○	◎		" "
4、	摩托车—油箱	○	◎		" "
5、	摩托车—挡泥板	○	◎		" "
6、	摩托车—前叉	○	◎		" "
7、	摩托车—汽缸	○	◎		" "
	通用机械				
1、	空压机—底座	○	◎		粉末静电喷涂工艺
2、	空压机—罩	○	◎		" "
3、	空压机—汽缸	○	◎		" "
4、	水泵—外壳	○	◎		" "
5、	水泵—底座	○	◎		" "
6、	鼓风机—外壳	○	◎		" "
7、	鼓风机—叶片	○	◎		" "
绝 缘					
	电工				
1、	微电机—外壳	○	◎		粉末静电喷涂工艺
2、	微电机—转子	◎			静电流化床工艺

表 1—2 (续)

分 类	用 途	环氧树 脂粉末	聚脂树 脂粉末	丙 烯 酸 树脂粉末	使用工艺方法
3、	微电机一定子	◎			静电流化床工艺
	无线电				
1、	电容—密封绝缘体	◎			流化床工艺
2、	录音钢丝(磁导线)—绝缘	◎			静电流化床工艺
防 腐 蚀					
	石油工业				
1、	输油管—内壁	◎			粉末静电喷涂工艺
2、	输油管—外表面	(埋设)◎	(地上)◎	(地上)◎	" "
3、	输油管—接头	◎			" "
装 饰					
	其他				
1、	钢制家具—椅	○	◎	◎	粉末静电喷涂工艺
2、	钢制家具—桌	○	◎	◎	" "
3、	文具—圆珠笔杆	○	◎	◎	" "
4、	钢制玩具—小汽车	○	◎	◎	" "
5、	钢制玩具—汽艇	○	◎	◎	" "

注：1、◎优○良 2、以上粉末喷涂零部件，根据材质不同要求先进行前处理及后处理工序。

们应该从社会和本单位的经济效益去研究考虑，要因地制宜，扬长补短，实事求是，如对表面涂层机械性能和防腐性能要求高或不高的，对装饰性要求高或不太高，对涂层厚度要求高或不高（包括零件精度），对零部件大的或小的，零部件几何形状复杂的和不太复杂的等等。根据以上这些技术要求应考虑采用什么涂料和什么工艺是最有经济效益，如一般涂装小形电气零件可采用流化床工艺，如果防腐蚀要求高的产品零部件，底漆可采用粉末电泳工艺，喷涂比较大形的零部件，可采用粉末静电喷涂新工艺，为了便于今后采用表面新工艺，请参阅表 1—2、1—3。

二、粉末涂料

（一）粉末涂料与溶剂型涂料

粉末涂料是指不含有机溶剂或水作分散介质的一类粉末涂料品种，粉末涂料是以空气作为分散介质，涂覆在物体表面上，然后再进行熔融（固化）形成均匀的涂膜。溶剂型涂料它是以有机溶剂为媒介（用苯稀释）的一种涂料。溶剂型涂料在形成涂膜过程中溶剂要挥发掉，造成环境污染，易发生火灾，对人体健康有损害，从节省资源，经济效益来说是一种不理想的涂料。目前在涂料工业中虽然仍以油性涂料和各种纤维素衍生物的溶剂性涂料为主，但水性涂料，高固体份涂料，电沉积涂料及粉末涂料等新型合成树脂涂料的品种不断的增加，与溶剂型涂料相比，这些新型涂料的共同点是节省资源，简化工艺，减少对大气的污染和对人体的损害，其中粉末涂料是最受欢迎的一个涂料品种，它是一种经济效益好，有发展前途的新型涂料。

（二）粉末涂料的种类

粉末涂料主要分为两大类，热固性粉末涂料和热塑性粉末涂料。这两种涂料性质是不一样的，热固性粉末涂料一般分子量小，熔点低，粉碎及颜料分散容易，大多数不需要底漆，涂膜耐溶剂性能好，不易污染，粉末涂料种类及特性详见表 2—1。

粉末涂料水性化在国外也处于试用阶段，由于粉末涂料所用的树脂具有优越的性能，因而将树脂粉末水性化，可用溶剂型的喷枪喷涂或用粉末电泳涂覆工艺达到无公害涂料的目的，这样不需要一套喷粉设备，这种涂料在日本发展很快，据国外资料报导，已用于汽车，家用电气产品和钢制品上，我国也在开始试制此种新型涂料。随着涂料稳定性好，改进提高涂料的外观，湿法制粉的发展粉末涂料水性化将很快在生产上得到应用。

（三）粉末涂料的制造方法

粉末涂料的制造方法，分为干法和湿法两种：干法是用固体粉末作原料，不用有机溶剂或水作分散介质，将原料均匀混合以及颜料分散的方法。目前生产的粉末涂料基本都是用挤压机进行混炼的。湿法是指粉末涂料在制造过程中使用有机溶剂或水作分散介

表2—1

分 类	涂 料 名 称	特 性
热固性粉末涂料 (主要用于粉末 静电喷涂工艺)	环氧树脂粉末涂料	耐腐蚀、耐药品、电气性能好,耐气候 性差、易粉化
	聚酯树脂粉末涂料	耐气候性好,涂膜外观好
	丙烯酸树脂粉末涂料	耐气候性好,涂膜外观好,耐污染性好。
热塑性粉末涂料 (主要用于流化 床工艺)	氯乙烯树脂粉末涂料	耐候性好、柔韧性好,耐腐蚀性好(需 要底漆)
	聚酰胺树脂粉末涂料	耐磨性、耐寒性、耐溶剂性好(需要底漆)
	聚乙烯树脂粉末涂料	柔韧性、耐溶剂性、耐水性好(需预热)
	聚酯树脂粉末涂料	耐候性、涂膜外观好(不需底漆)

质的方法,如聚乙烯等热塑性粉末涂料可用湿法生产,一些高级装饰用粉末涂料也是采用湿法制造。详见图2—1。

1、干法:

(1)干混合法:此法是将粉末涂料用各种原料以粉末状态均匀混合进行制备,用此法生产的粉末涂料,缺点是光泽较差,物理性也不太好,因此热塑性粉末涂料大多不用此法生产,主要用于生产热固性粉末涂料。详见图2—2。

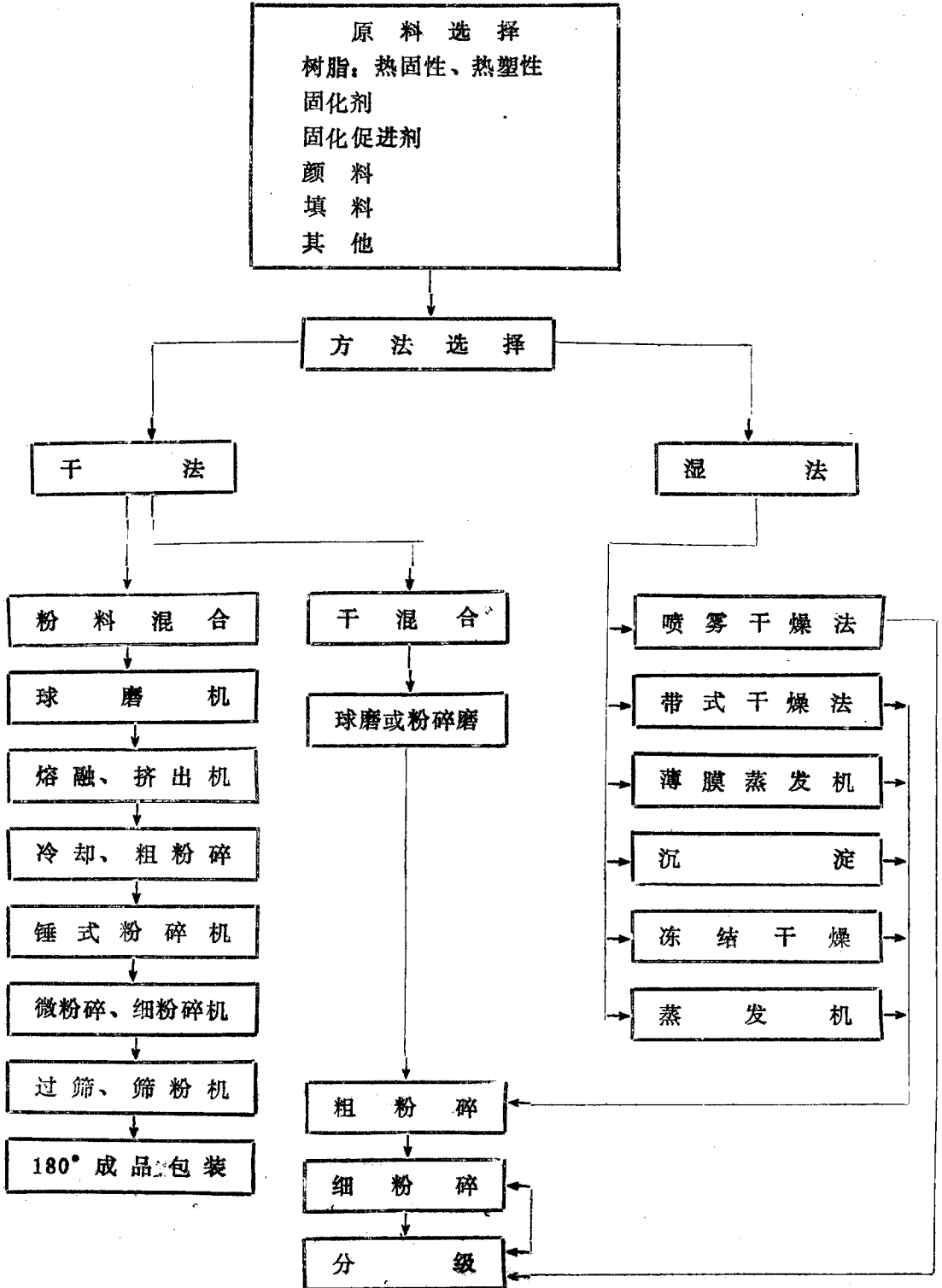
(2)熔融混合法:此法是将各种原料用搅拌机均匀混合后,用挤压机作热混炼机进行熔融混炼,然后冷却,粉碎,分级成粉末涂料。另外也可用滚筒或加压捏合机作热混炼机,但用挤压机可以连续生产,是制粉末涂料主要方式。热塑性树脂,热固性树脂均可用此方法制备。但有的热塑性树脂有弹性,不易粉碎或者熔点过低,在粉碎过程中因发热而熔融,可采用液氮进行边冷却边粉碎进行制备。

2、湿法:

(1)喷雾干燥法:是将液态物质,在气流中进行喷雾(雾化)通过与气流的热交换,使喷雾粒子干燥的方法,称喷雾干燥法。经溶剂溶解的粉末涂料与溶剂型涂料一样,进行颜料分散与调色,用惰性气体作循环气体,溶剂冷凝可回收,所得粉末通常呈球形,粉粒分布狭窄,松比重(松装比重)小。

(2)沉淀法:是将涂料与水相互溶解的有机溶剂进行调制再投入水中呈微粒状,于水中除去有机溶剂得到粉末粒子的水悬浊液。再从水的悬浊液中将粒子,水,溶剂进行分离,干燥,得到粉末涂料。此法由于在整个生产过程中没有加热,所以适合于热固

图 2—1 粉末涂料生产流程图



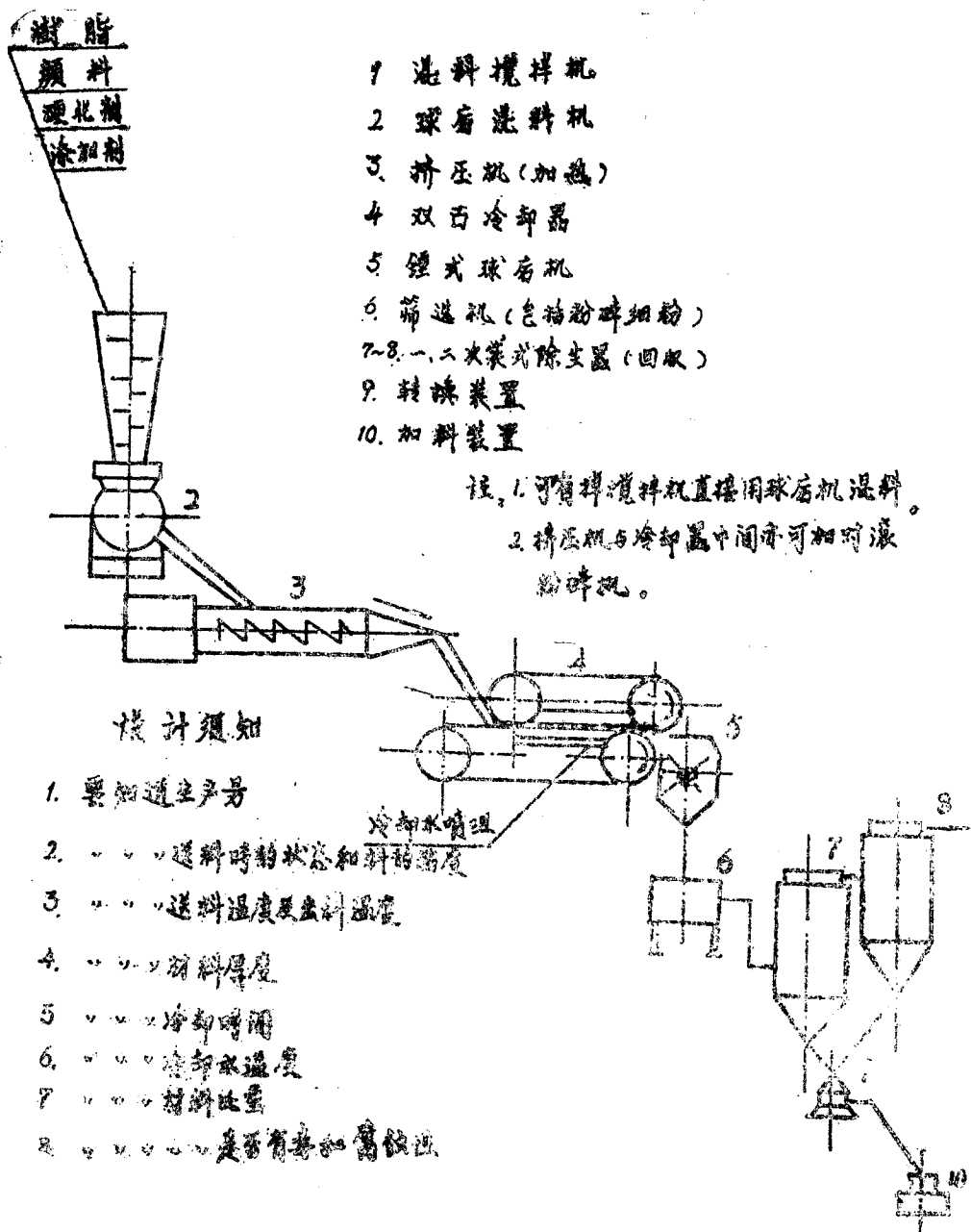


图 2—2 干法粉末涂料生产系统图

性粉末涂料的生产。

(3) 相分离法: 此法是利用溶剂对树脂的溶解度的差别来制备粉末粒子。如将颗粒状树脂投入到常温下不溶解, 升高温度, 溶解度增加的有机溶剂中, 加热使之溶解, 然后在搅拌下慢慢冷却, 析出的树脂粒子进行分离, 干燥, 即得到树脂粉末, 此法适用于聚乙烯, 尼龙等机械粉碎比较困难的热塑性树脂。

(四) 粉末涂料涂膜的形成

粉末涂料涂膜形成的过程，主要是粉末涂料均匀的涂覆在被涂物的表面上，然后进行热处理（固化），使粉末粒子熔融成均匀的涂膜。为了理解粉末粒子形成涂膜的简单过程，将粒子假设为大小均匀的球状颗粒。其模型见图2—3。

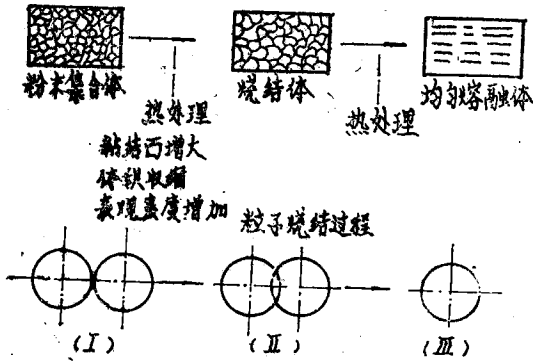


图2—3 涂膜形成示意图

粉末粒子受热首先发生凝聚作用

(I)；凝聚作用的发生导致自由能降低，体系趋于稳定化，同时使凝聚面积(II)增加最后两个粒子合并成1个球状粒子(III)。

这种凝聚面积的增大是由于在加热时受热软化的粉末表面张力降低，产生粘性流动的原因。粘结面半径R与熔融时间T之间存在着如下关系

$$R^2 = 3rdT/2\eta$$

式中 η ：粘性系数 r ：表面张力 d ：粒子直径

由R与d的关系求时间T得： $T \rightarrow \eta d/r$

这说明粉末粒子的熔融粘度是涂膜形成的重要因素，在凝聚表面上杂质的存在与否，粒子体积收缩，粒子大小，形状以及粒度分布都对涂膜的形成影响很大。如果要从涂膜厚度与粒子直径的关系将球形粒子放在一个直径与长、高、宽相等的立方体中则：

$$\text{球的体积} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{1}{6}\pi d^3 = 0.5236d^3$$

$$\text{立方体的体积} = d \times d \times d = d^3$$

加热时，粒子发生凝聚、熔融、沉积在立方体的底部，因此，固体的高度应比原有的球形直径要小。

$$\text{固体的体积} = d^2 \times h = 0.5236d^3 \quad h = 0.5236d$$

h数值恰好相当于熔融一个粒子的涂膜厚度，这与涂覆一层球形粒子厚度的膜厚是相等的。见图2—4

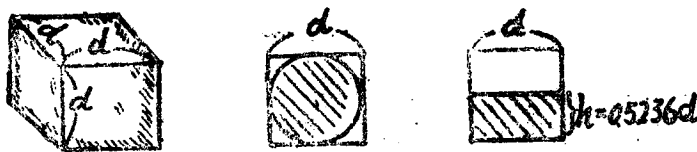


图2—4

粉末粒度对涂膜性能的影响：粉末粒度对涂料的流平性有着密切的关系，当粉末粒子在熔融成膜过程中（假设粒子呈球形涂面起伏成正弦波形），其流平所需时间T为

$$T = 9.3 \times 10^{-3} \times \frac{f^4 \cdot D \cdot \eta}{h^3 \cdot \delta}$$

式中 f : 平均波长的波纹系数

D : 粒子平均直径

η : 熔融粘度

h : 粒子平均涂覆层数

δ : 表面张力

由上式可以知道,涂膜流平性与粒子平均涂复层数的3次方、表面张力成正比;与平均波长的波纹系数的4次方、粒子的平均直径和熔融粘度成反比。从粉末的物性来看,粒径越小涂装效果(静电特征)、涂复表面流平性(薄膜性)越好,但缺点是粉尘容易爆炸;反之,粒径越大,厚膜的附着力、涂料流动性(输送性)以及贮藏的安定性越好。另外涂膜的厚度与粒度直径也存在一定的关系,如前将球形粒子放在一个直径为长、高、宽相等的立方体中,则球的体积及立方体的体积见前公式,当粒子被加热时,粒子便发生凝聚熔融,沉积在立方体的底部,因此固体高度应比原有的球形直径要小,固体的体积见前公式, h 数值恰好相当于熔融一个粉末粒子的涂膜厚度等于直径的0.52倍。这与涂复一层球形粒子的膜厚是相等的,实际上粉末静电喷涂时,不是只涂覆一层粉末粒子,由于它是连续喷涂和成膜,最少也要喷上两层以上才有良好的涂膜效果,详见表2—2。

粉末粒子大小与熔融时的厚度

表2—2

粒 径		熔融时的厚度 (μ)			备 注
筛网 (目)	μ	附着 1 层	附着 二层	附着 三层	
100	149	75	149	224	涂膜厚度: 标准60~100 μ 薄膜25~50 μ 厚膜100~180 μ
170	88	44	88	132	
200	74	37	74	111	
280	54	27	54	81	喷涂量: 标准100克/米 ²
350	44	22	44	66	
400	37	18	37	55	
625	24	12	24	36	

注:粉末涂料比重、一般(20℃)1.3~1.7

上表可以看出,要达到37 μ 以下的涂膜厚度,需要400目的粉末涂料,从薄膜化喷涂的要求,粉末粒子越细越好,但从粉末涂料的流动性(输送性)及安全性方面的要求,就难解决了。这个矛盾还有待今后进一步研究的课题。表2—3为环氧树脂粉末涂料的粒度分析。

表2—3

粒 度	粒 径 (μ)	%
120目以上	100以上	5
150目	80~100	15
180目	60~80	15
	40~60	20
	20~40	20
	0~20	25

(五) 粉末涂料的特征

由于粉末涂料与溶剂型涂料不同，因此在喷涂工艺，粉末涂料贮藏，输送以及回收等方面，都应从粉末涂料所具有的特性进行考虑。一般粉末涂料具有以下特性。

1、粉末粒度：粉末的粒度直径是粉末粒子的基本性质，大小均匀的球形粒子，其直径即等于粒径，单个粒子的粒径叫单一粒径，粒子群的粒径叫平均粒径，严格来说粉末粒子的大小，形状是不规则的。粒度分布的测定方法有显微镜法、过筛法、沉淀法、离心法和惯性力法等，其中以过筛法最简单。但在 30μ 以下就难测定，这时要用光透过式沉淀法等其他方法。

2、不连续性：气体，液体是一种完全的连续体，而涂料粉末则是一个个的独立粒子集合体，因此不是连续体，而在喷涂过程中易产生阻塞，急流，凝聚等现象，尤其细粉末占的比例大时，这个问题更加突出，因此，在制粉时，要特别注意要找出细粉末应占总粉量最合适的百分比。

3、粘附性：粉末粒子在容器表面形成粘附层的性质叫粘附性，粒径小，含水量多，或者带电的粉粒，其粘附性都会增大。

4破坏性：粉末粒度受到碰撞，摩擦，剪切，压缩和拉伸等外力作用下，会发生破碎，另外受热应力和电力作用也会造成破碎。

5、粉末的流动性：喷涂工艺的喷枪出粉量及输粉桶的出粉量，都要求能连续的，均匀的，稳定的出粉，这除设备的影响外，很重要与粉末流动性有很大密切关系。准确的表示（测定）粉末流动性是比较困难，一般采用休止角，压缩角，凝聚度等来测定而得的综合评价法。休止角的测定法，是多数采用的方法，见图2—5

由于各种测定法不一样，在测定时要特别注意，但在具体使用时，要适合实际情况进行测定是很重要的。

(I) 注入法，从上部装料或用振动形成休止角，采用贮槽容积耗损方法，从装料和细管供给叫做注入法与采用振动（筛网）方法是有区别的。在很平的平板上形成的休止角时叫自由堆积法，使用已确定好直径的园板时这叫底面限定法，由底面直径测

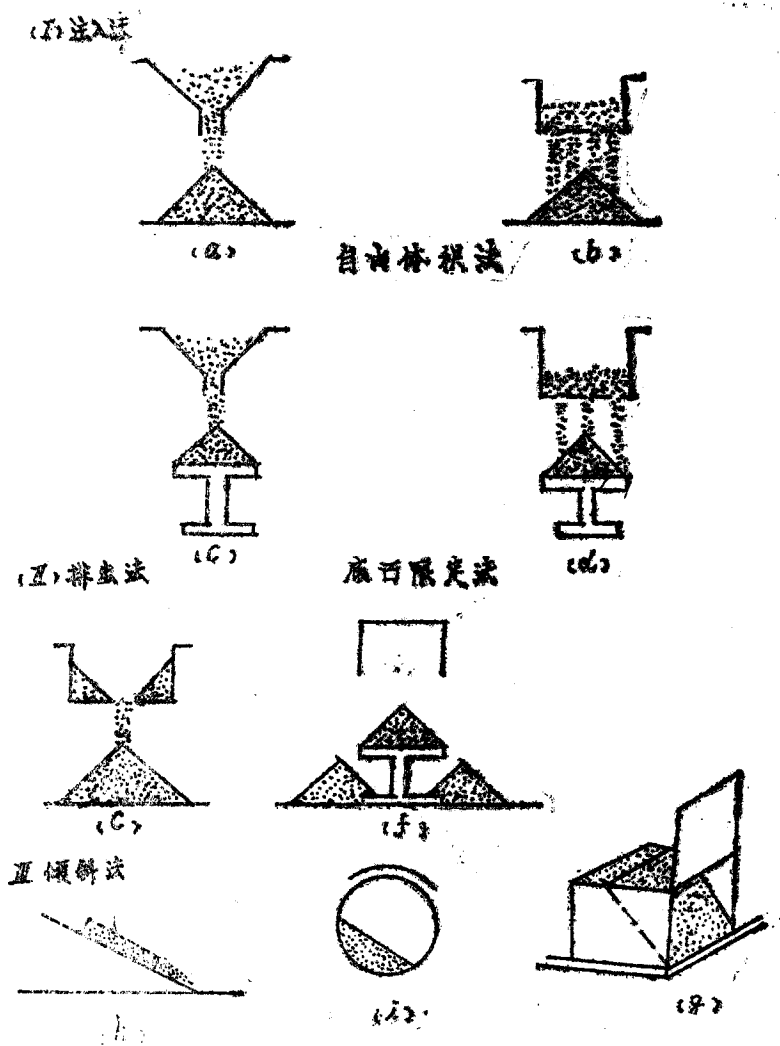


图 2—5 休止角测定法

定的休止角的测定值要注意是不一样的。

(Ⅱ) 排出法，容器里装满了粉粒，粉粒流出时测定滑面水平形成角方法。贮槽的设计和排出时流动变化相对应测定，注入法测定的休止角叫注入角，用排出法测定的角度叫排出角。

(Ⅲ) 倾斜法，用容器倾斜度或回转，来求休止角的方法，h 是倾斜容器，测定粉粒表面层，滑动的倾斜角，i 是根据每分钟回转数，来测定旋转内筒容器内装入的粉末形成自由表面水平角度。此法可采用密闭容器，因为周围的空气容易变化。市面销售的测定仪器采用 c、d、i 的方法但用 a、b、f 来测定也比较容易进行测定。

休止角的角度与测定性能关系如表 2—4。