



基于全面质量管理的喷涂技术应用与创新

魏绍军、张开开、储昭宝、范进、李雷

重庆海尔滚筒洗衣机有限公司：重庆市江北区港城南路 1 号

联系作者电邮: lilei.cq@haier.com

摘要：喷粉过程是制造型企业在产品生产过程中的重要生产过程，也是制造业持续改善的研究领域，喷粉线生产过程主要涉及三大化学过程和一个物理过程。以实现质量和效率双提升为目的开展讨论，通过对喷粉制程改善的探索与研究，进而降低过程不良，提高过程生产的稳定性，减少生产浪费。本文主要介绍了海尔基于全面管理模式，喷粉技术应用与创新在生产线上的实践

关键词：喷粉过程；脱脂处理；硅烷化；静电喷涂；固化；过程控制；

1 导语

喷涂技术是传统制造工业生产过程的一项重要的技术应用，其工艺流程主要涉及脱脂处理、硅烷化和固化三个化学过程，以及静电喷涂一个物理过程。在生产过程中几大关键工序的过程控制至关重要，提高工序能力和制程质量保障能力，进而提高产品生产效率和制造质量。制造性企业的核心就是质量和效率。只有全员参与，围绕质量为中心，对喷粉制程进行管理运营，实现成本降低，效率和质量提升，最终实现用户满意。所以只有在海尔的全面质量管理模式下，以“三化一物”为核心控制点，从控制改善的实施再到技术应用与创新的管理。

在全面 5G 时代，重庆海尔滚筒洗衣机有限公司基于全面质量管理模式，在 2020 年开展喷粉制程的技术应用与创新，取得了令人瞩目的成果。

2 研究背景

家用电器的离不开喷涂制造过程，喷涂的质量在传统的白电行业显得十分重要，因为这直接影响家电的外观，能在感官上给消费者带来直接的视觉体验。从滚筒洗衣机的角度而言滚筒洗衣机的作用不再只限于洗衣服，同时也是一件装饰品，而这件装饰品上喷涂的面积占比一半以上。作为洗衣机市场占有率最高的品牌-海尔，秉承着零缺陷的质量追求，在喷涂质量管理上不断创新和改善，寻求新的引领迭代。

3 全面质量管理下的设备迭代创新

前处理工序的作用是喷涂前消除被涂装工件表面上的各种油污和尘埃,使被涂面洁净,同时对工件表面进行化学处理,使得底材及表面状态有利于静电喷涂。前处理的设备主要由水槽(槽体和过滤网)、喷嘴、水管等构成。相关设备的维护保养对前处理工序效果起着决定性的作用,设备维保时需要使用到使用工具:高压水枪、雨衣、雨靴、橡胶手套、除渣剂等;维保方法:先将所有槽子上的喷嘴都取下(同时排放槽液、纯水、自来水),用除渣剂浸泡 30min;同时进行清理喷嘴,清理管路上被堵塞的出水口,清理内部的垃圾,清理水槽;先安装预脱脂和脱脂的喷嘴,然后加除渣剂循环管路 20min,循环完成后,放掉槽液,在加水循环 30min,在放掉水后就可以配槽;所有槽子清理完成后,开始往槽内加水建槽,预脱脂和脱脂用自来水建槽,陶化(硅烷)用纯水建槽;

创新案例:喷嘴开口方向创新改善

原来:喷嘴开口朝向没有标准规定,当开口水平方向时,表面清洗不能覆盖面,且易造成串液。如图 4-2a 所示

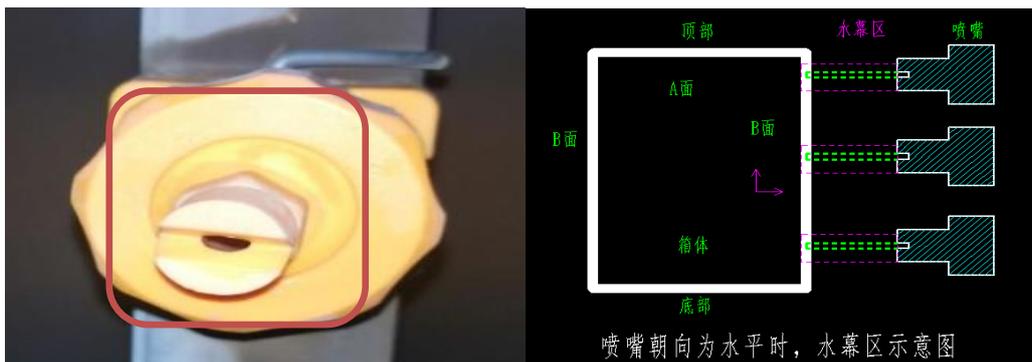


图 1

现在:喷嘴开口朝向竖直方向,可以形成水幕,清洗面积较大,并且不容易串液。如图 5-4 所示

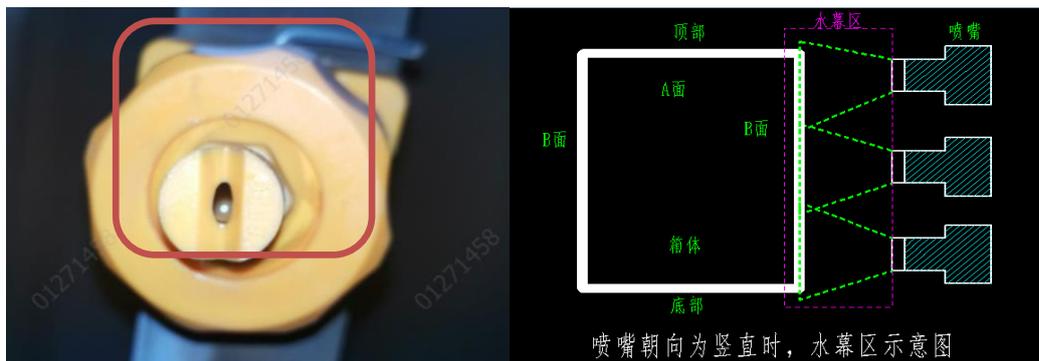


图 2

效果提升: 解决箱体发黑,喷头角度不良,喷不到箱体,清洗不到油质,喷涂后出现箱体发黑通过喷嘴的角度优化,箱体 B 面发黑问题降低至 0。

创新案例：脱脂过程过滤净化升级

原来：前处理槽槽液通过双层过滤网过滤油污、渣子，过滤网需要人工清理 1 次/2 小时，且过滤效果差：

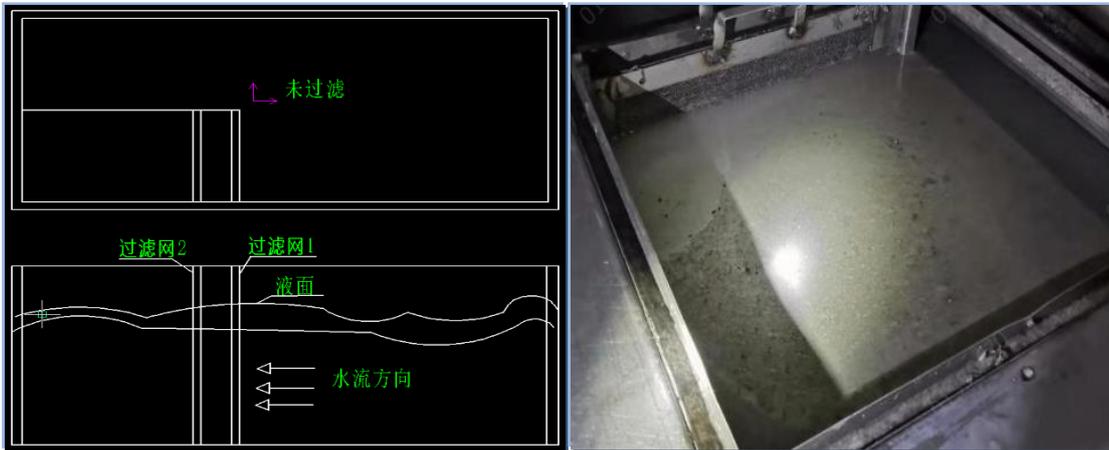


图 3

现在：对过滤网进行结构优化，通过油污、水、沉渣物理密度不同，制作了专用过滤结构。实现上部挡油污，下部挡沉沙。人工清理 1 次/天，过滤效果好；

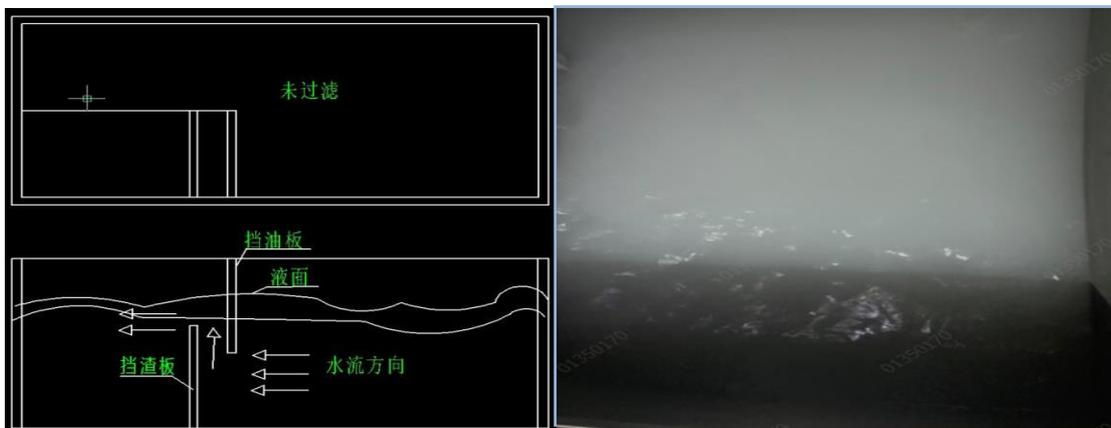


图 4

改善后降低前处理员工劳动强度：由 1 次/2 小时降低至 1 次/天；改善后前处理操作工、化验员合并，节省一个岗位，人工成本降低 8 万元/班*3 班次=24 万元；

静电喷涂工序是整个喷涂车间设备最多的工序，主要包含高压静电粉枪、粉泵、供粉桶、旋转筛、粉末回收设备等，这些设备都与喷涂质量息息相关。

电晕放电式静电粉末喷枪： 它是由高压静电发生器（由高频变压器和升压回路组成）、电晕放电电极（针电极和环状电极）、喷束调节器、枪体、高压电缆、压缩空气和粉末涂料调节阀及输送管子等组成。这种装置是利用静电发生器在喷枪和接地工件之间产生静电场，粉末涂料经喷涂进入电场后带上静电荷，然后被吸引到工件表面上。



图 5

拆下喷嘴和耐磨套，用压缩气吹净；检查是否过度磨损和撞击熔融，检查喷嘴上的 O 型圈。部件表面积聚的干硬粉末，几乎已被部分固化，这必须用木条或其他软木条工具去除。避免使用尖锐工具，他们会划伤部件材料及加重撞击熔融现象，粉末进口一头吹净喷枪枪套内表面，检查静电针；然后校直弯曲的静电针，更换断的静电针，重新装上耐磨套和喷嘴。

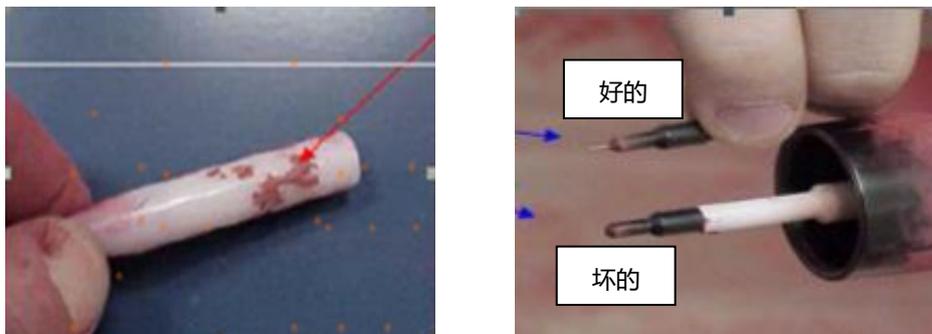


图 6 耐磨套，外壁上的粉末熔融 静电针，检查是否断

喷枪粉管的维保同样至关重要，需要首先把喷枪的粉管取出来，再把连接在粉柜的粉管取出来，检查粉管并更换破损粉管。把无尘布塞进粉柜那头的粉管中，用气管对着塞入无尘布的粉管吹气，直到把无尘布吹出粉管为止。

粉泵的的工作原理是，当风吹过阻挡物时，在阻挡物的背风面上方端口附近气压相对较低，从而产生吸附作用并导致空气的流动。当在三通管中喷射高压气流时，在侧管产生负压，可以抽吸粉末涂料，并可以输送粉末涂料至喷枪。小心清理输粉泵的部件，部件品磨损且有撞击熔融现象，尖锐部件可刮伤部件加速撞击熔融



图 7

特别注意“碗形孔区域”，特别容易产生撞击熔融现象。清理时注意不要刮伤“碗孔”区域；确认喷嘴都已安装定位并连对应粉泵。粉管编号和喷嘴编号一致。出粉量空气管为黑色，而雾化空管为透明色。

在供粉装置中，粉末处在一种流化的状态，这是通过压缩空气的作用而实现的，之后粉末通过文丘里作用被高速流动的气流带着，形成粉气混合，经过文丘里粉泵、输粉管，最终到达喷枪上。供粉桶维保时清理所有的粉末，清扫干净，检查流化板是否受到污染。发现流化板被污染呈红色(油污染)或棕色(水污染)，立即更换流化板。在清理粉末时，不能用硬物刮擦流化板，否则将使流化板失去作用。

旋转筛是通过利用在电机轴上、下两端安装的两个不同相位的不平衡重锤，由于高速旋转的离心作用而产生一复合惯性力，将电机的旋转运动转变为一种复杂的水平、垂直、倾斜的三次元运动，再把这个三次元运动传递给筛面，使物料在筛面上作螺旋状由里向外的渐开线外扩散运动。保养时打开振动筛或旋转筛，清除筛网上的粉末结块和杂质等。发现筛网破裂及时更换。检查筛网接地，确保接地良好。

粉末回收设备系统这一装置可分为吸入段、分离段、过滤段和排出段四部分。维护保养除必须做清理工作外，需要检查空气压缩机、空气干燥器工作是否正常，工件接地电阻是否正常(正常小于1兆欧)。

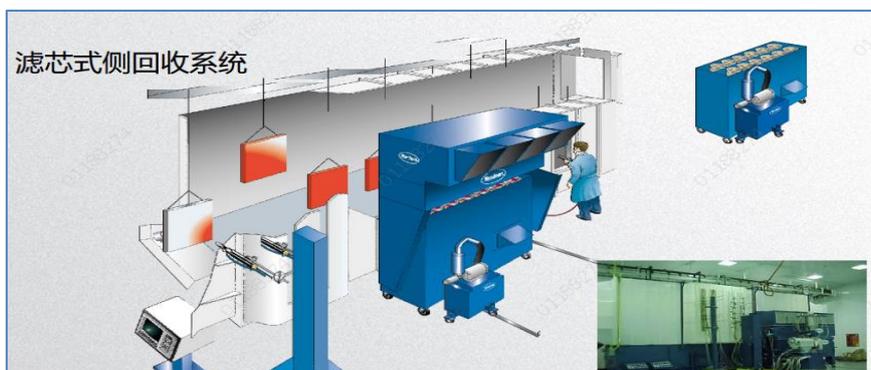


图 8



综上所述, 海尔全面质量管理模式下, 设备的日常管理也是质量管理的重要组成部分, 也是预防质量的重要体现, 根据设备的特性制定设备的日常维保计划和维保要求, 做好设备的日常维护保养, 能保证喷粉工序的正常进行, 提前规避喷粉质量问题。同时以海尔的创新体系为基础, 打破设备与生产线之间的创新壁垒, 整合全流程资源对设备进行创新升级, 最终将创新成果实践起来, 实现质量提升、成本降低目标。

4 喷涂制程的关键工艺分析

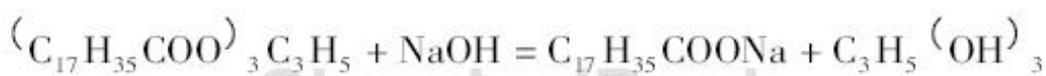
前处理工艺质量好坏直接影响粉末涂膜质量, 前处理不好, 造成涂膜易脱落, 鼓泡等现象。因此, 前处理工作必须予以重视。对于板金冲压件可采用化学前处理法。即: 热水洗→脱脂→水洗→硅烷化等。大部份锈蚀或者表面较厚的工件, 采用喷砂, 抛丸等机械方法去锈, 但机械除锈后应确保工件表面清洁, 无污垢。

工件通过输送链进入喷粉房的喷枪位置准备喷涂作业。静电发生器通过喷枪枪口的电极针向工件方向的空间释放高压静电(负极), 该高压静电使从喷枪口喷出的粉末和压缩空气的混合物以及电极周围空气电离(带负电荷)。工件经过挂具通过输送链接地(接地极), 这样就在喷枪和工件之间形成一个电场, 粉末在电场力和压缩空气压力的双重推动下到达工件表面, 依靠静电吸引在工件表面形成一层均匀的涂层。

喷涂后的工件通过输送链送入 180~220℃的烘房内加热, 并保温相应的时间, (15-20 分钟) 使之熔化、流平、固化, 从而得到我们想要的工件表面效果。(不同的粉末在烘烤温度和时间上是各不相同的)。固化后的工件, 日常主要检查外观(是否平整光亮、有无颗粒、缩孔等缺陷)和厚度(控制 40~100 μm)。对被检出的有漏喷、针孔、碰伤、气泡等缺陷的工件, 进行返修或重喷。

化学脱脂的机理主要是发生皂化反应和溶解、乳化、分散作用。发挥脱脂剂的皂化作用、乳化作用和络合作用, 通过润湿、渗透、卷离、分散和增溶的方式, 将工件表面的油脂去除。

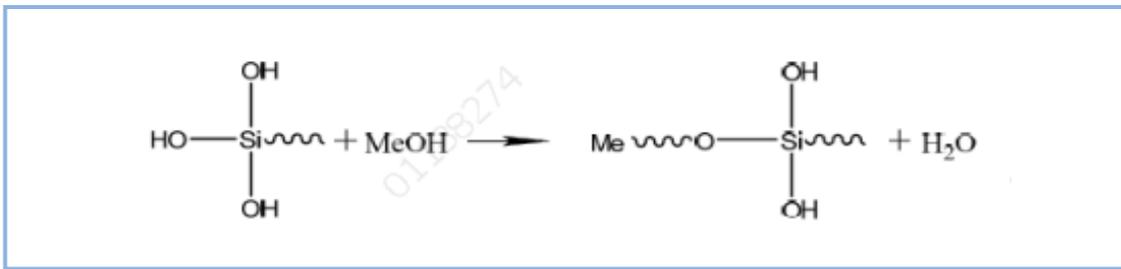
脱脂剂中的碱或碱性盐如氢氧化钠、磷酸三钠等发生皂化反应生成硬脂酸钠和甘油, 硬脂酸钠能溶解于水, 达到除油目的; 且硬脂酸钠由于带有亲水性的羟基和憎水性的烃基, 又可作为具有表面活性作用的乳化剂, 通过乳化作用使未起皂化反应的残留油乳化、分散悬浮于水中。



多种表面活性剂都是理想的乳化剂, 能降低油水界面的张力, 增大接触面积。当工件进入脱脂工序时, 其表面的油膜被喷射的碱液击穿, 通过这种机械作用使完整的油膜破裂成为不连续的小油珠, 这样就能使表面活性剂中分子的亲油基团和小油珠充分发生亲和作用, 形成水包油的乳液小微粒, 使得油污脱离金属表面, 达到油污溶解和除油的效果, 通过渗透、卷离、分散和增溶把油除掉。

成膜反应是影响硅烷质量的关键步骤, 成膜反应进行的好坏直接关系到涂膜耐蚀性及附着力。因此, 硅烷化前的工件表面应除油完全, 硅烷化前处理最好采用去离子水, 进入硅烷槽的工件不能带有金属碎屑

或其他杂质，处理剂的 pH 等参数控制也十分重要。成膜反应如图 3-8 所示



水洗后沥水的工件进入水分干燥室，使工件表面上的水分彻底去除并干燥处理，为粉末喷涂做准备，去除工件所有部位上的水分，特别是工件凹坑处的水分，一般操作人员手持压缩空气吹气枪吹扫工件凹坑处的存水。

粉末涂料是用气流通过管道输送至喷枪管内，从喷枪管前面喷出。由于喷枪内部针电极的电晕放电，喷出的粉末涂都带上负电荷，带负电荷的粉末涂料粒子离开喷枪管出口，即向工件方向前进，由于粉末涂料带负电荷，粉末涂料被吸附到工件上面完成了喷涂任务。如图 3-21 所示

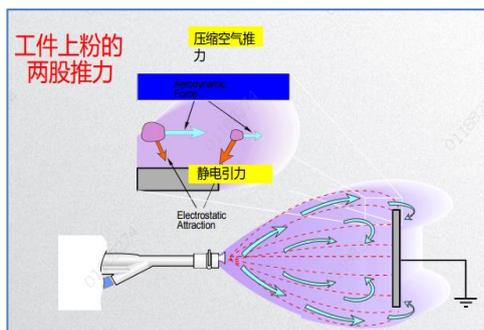


图 9-a)

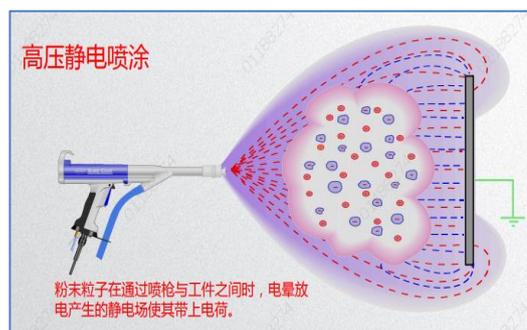


图 9-b

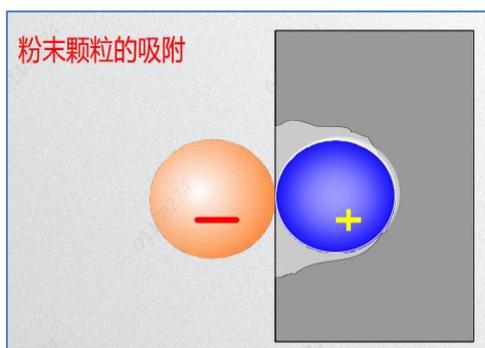


图 9-c

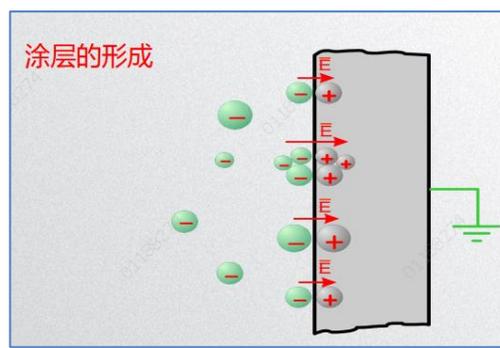


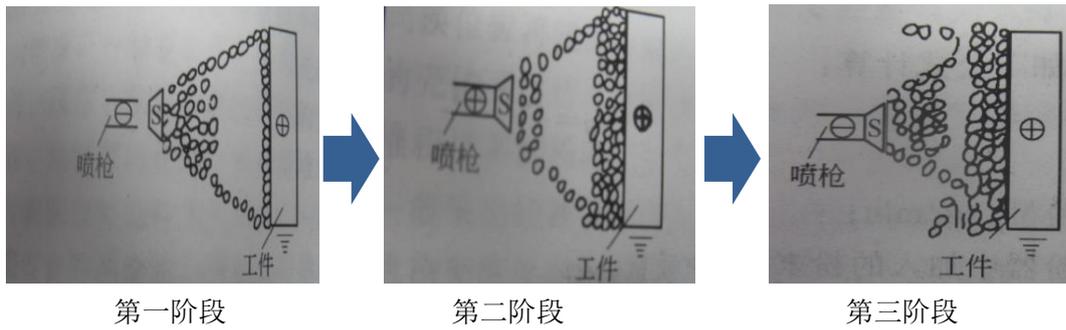
图 9-d

静电喷涂的三个阶段

第一阶段：粉末从喷枪喷出后，在电场和气流的双重作用下吸附在工件上

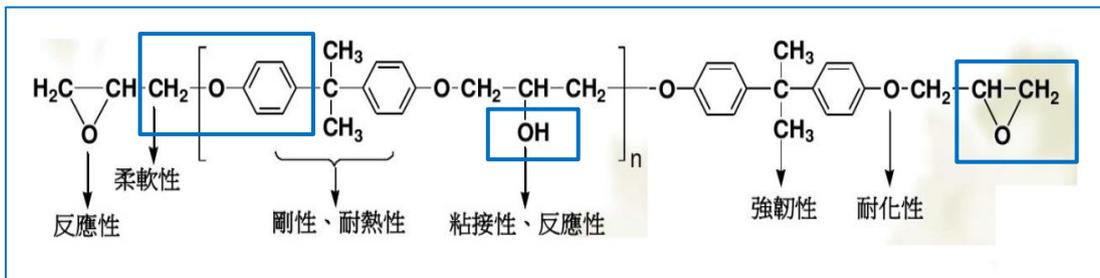
第二阶段：静电吸附作用膜厚继续增长

第三阶段：厚度增加到一定程度，由于静电隔绝，膜厚停止增长



一般静电粉末冷喷涂的涂膜厚度适用于 $150\ \mu\text{m}$ 以下， $> 150\ \mu\text{m}$ 易产生电离排斥，且外观不好。电离排斥的涂膜厚度，受涂料树脂品种、涂料组成、涂装电压、被涂物材质等多方面影响，只能通过实际试验和生产操作才能确定它的范围

粉末固化过程成分一般包含树脂、颜填料、固化剂、流平剂、促进剂等；



双酚 A 环氧树脂：由双酚 A 和环氧氯丙烷聚合得到；环氧基团提供固化交联基团，醚键具有优异的柔韧性和耐水解性、羟基与基材的粘接性。

固化时温度升高到熔点后工件上的表层粉末开始融化，并逐渐与内部粉末形成漩涡直至全部融化。粉末全部融化后开始缓慢流动，在工件表面形成薄而平整的一层。温度继续升高到达胶点后有几分短暂的胶化状态(温度保持不变)，之后温度继续升高粉末发生化学反应而固化。

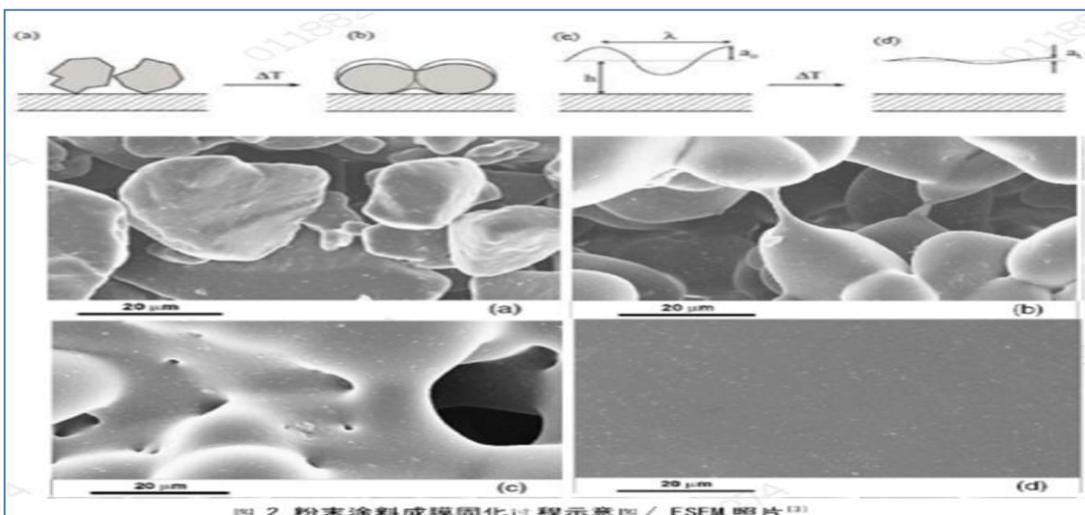


图 10

第一阶段：熔融结聚（1min-3min 40-60℃）随着温度的升高，粉末涂料颗粒表面开始熔融，熔融的周界相互聚集。

第二阶段：熔融铺展及流平（3-7min 80-100℃）

第三阶段：胶化及固化（7-15min 130-200℃）

5 喷涂技术过程控制能力提升

脱脂过程中，碱洗是依靠皂化、乳化等多种作用，不能用某一单独的碱来达到上述性能。通常使用多种组分，添加表面活性剂等助剂，在适当匹配的情况下，达到最佳的综合性能。

较高的温度有利于皂化反应的进行，并且由于温度较高，可以使熔点高的油污软化，有利于浸润乳化作用。碱度的高低决定了皂化反应进行的程度，并且碱度高能使油污与溶液之间的表面张力降低，使油污易于乳化。在清洗过程中加入搅拌（包括槽液循环或机械刷洗），有助于油污的去除，可以使乳化液均匀分布，从而提高乳化效果。

水分干燥工艺参数设定以水分干燥的时间、温度是以滞留在工件表面上的水量为基准。工件干燥后进入喷粉前工件温度应冷却到相应的温度，以保证喷粉涂装条件要求。工件表面水分未除尽会导致涂膜起泡、针孔，将工件凹坑等存水处水吹扫干净，适当延长干燥的时间，提高干燥温度可避免次现象发生

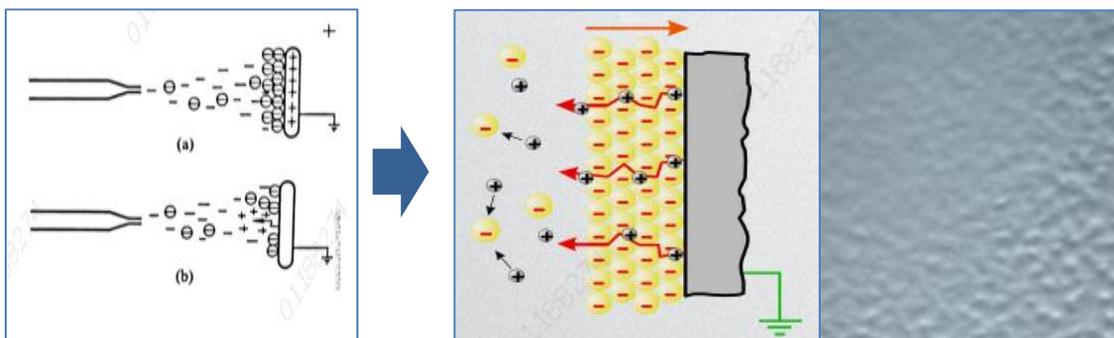


图 12-a 背电离

图 12-b 涂膜表面橘皮

如何防止背电离（背电离如图 12 所示）：①限定到达工件表面的电荷量

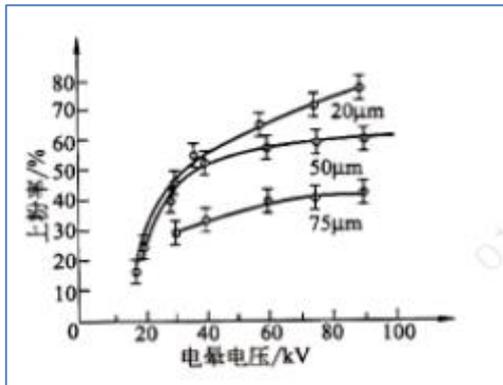
- ✧ 喷枪与工件间的距离维持在 20~30cm 之间
- ✧ 限定工件在喷枪电场中的充电持续时间
- ✧ 控制粉末的充电和喷枪产生的自由离子数量
- ✧ 防止自由离子抵达工作

②控制粉末的特性

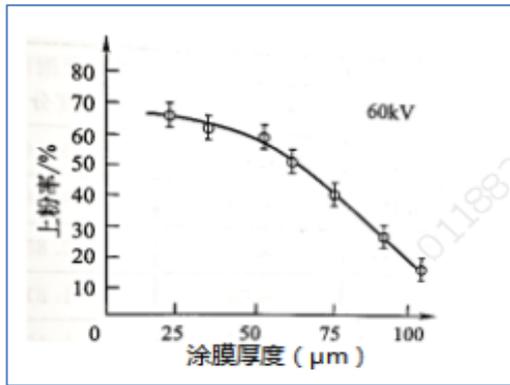
- ✧ 粉末的电阻系数控制在 $10^{12} \sim 10^{13} \Omega / \text{cm}$ 之间
- ✧ 控制粉末的粒径分布

③喷涂后的粉末厚度不要超过所需的膜厚

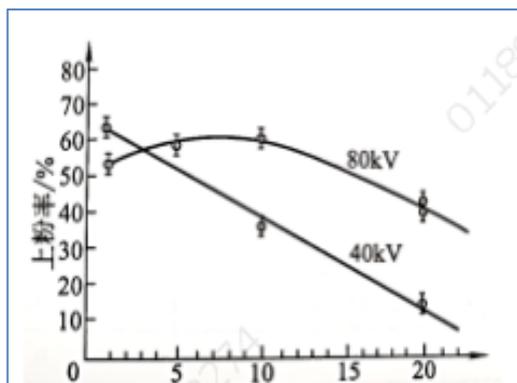
上粉率的影响因素



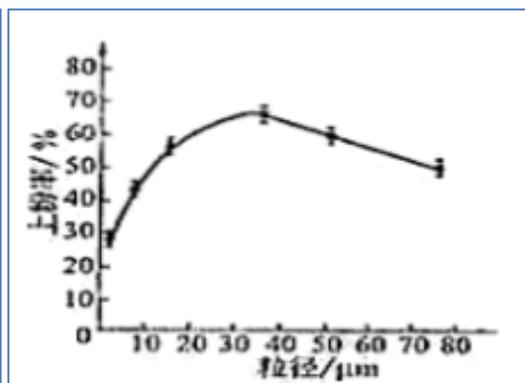
a: 同电压, 不同涂膜厚度的上粉率



b: 不同电压, 不同涂膜厚度的上粉率



c: 不同电压, 不同喷枪距离的上粉率



d: 不同粉末粒径的上粉率

粉末涂料粒子表面所带电荷量与静电场强度和粉末涂料粒子在电场中停留时间有关, 电场强度与电极电压成正比, 与被涂物和喷枪之间的距离成反比; 提高粉末涂料的带电能力可以提高上粉率, 粉末涂料的带电能力与粉末涂料颗粒的带电量有关; 粉末的带电量与粉末粒径的平方成正比, 增大粉末的粒径可以提高粉末的带电量; 选择介电常数高的粉末可以增加粉末带电量; 提高粉末的静电电压, 可以增强电场强度, 也可以提高粉末涂料的带电量

4 结论

喷涂技术的应用与创新是家电行业的重要技术环节, 在实行全面质量管理的时代下, 从喷粉的制程管理着手喷粉技术的创新, 提升喷粉一次合格率, 降低喷粉成本, 提高喷粉效率等是当代家电企业重要的竞争力展现, 海尔顺应全面质量管理时代, 持续改善和引领创新, 最终实现效率、质量、成本等多项共赢。