

压敏电阻器电极制备方法

Varistor Electrode Preparation Method

孙丹峰¹ 季幼章^{1,2}

Sun Danfeng¹, Ji Youzhang^{1,2}

1. 苏州市电通电力电子有限公司 (苏州, 215011)

2. 中国科学院等离子体物理研究所 (合肥, 230031)

1. Suzhou Eleston Power Electronics Co., Ltd (Suzhou, 215011)

2. Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences (Hefei, 230031)

摘要: 压敏电阻器常用的电极材料有导电浆料、无机盐和金属材料。基于各种电极材料的特性, 出现了许多制备压敏电阻器电极的方法。本文综述了浆料法、化学镀, 热喷涂和冷喷涂的制备工艺。

关键词: 压敏电阻器 电极 制备方法

Abstract: The common electrode materials of varistor are conductive paste, inorganic salts and metal material. Many methods of preparing the varistor electrode appeared based on the performances of every electrode material. This paper introduces the preparation process of paste method, chemical plating, thermal spraying and cold spraying.

Key words: Varistor, Electrode, Preparation method

[中图分类号] T N304.93 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2015) 07-0045-08

1 引言

压敏电阻器常用的电极材料有导电浆料、无机盐和金属材料。导电浆料有贵金属浆料和贱金属浆料; 无机盐有氯化物和硫酸盐; 金属材料有线材和粉末。

基于各种电极材料的特性, 出现了许多制备压敏电阻器电极的方法, 主要有料浆法、化学镀、热喷涂和冷喷涂。

本文详细综述了压敏电阻器电极的制备方法。

2 浆料法

由于银的导电能力强, 抗氧化性能好, 在银表面可以直接焊接金属, 所以压敏电阻器通常采用银浆制备电极^[1,2]。

采用铝浆制备电极, 也显现出低的接触电阻^[3]。

铜浆制备电极已用在钛酸铈环形压敏电阻器、氧化锌压敏电阻器和片式陶瓷电容器^[4-6]。

镍浆、锌浆制备电极见诸报导, 目前尚处实验室研究过程中^[7]。

2.1 被银法

被银法又名烧渗银法^[1]。

烧渗是在高温及还原性气氛的作用下, 一部分金属氧化

物将被还原成金属, 另一部分则可能熔融并添加到陶瓷玻璃相中, 或与陶瓷中之某些晶态物质通过化学反应而生成一种新的化合物, 形成一种粘稠的过渡层, 并对陶瓷表面完全润湿。而且, 在冷却过程中这粘稠的过渡层, 凝固为玻璃相, 填充于陶瓷表面与金属粉粒之间。

(1) 被银法的工艺过程步骤

① 瓷件预处理

瓷件被银之前必须预先进行净化处理。

② 银浆配制

银浆的配方, 主要是由含银原料、溶剂及粘合剂组成。

③ 银电极浆料的制备

将制备好的含银原料、溶剂和粘合剂按一定配比配料后, 在刚玉或玛瑙罐中球磨 40h~90h, 使粉体粒度 $< 5 \mu\text{m}$ 并混合均匀。

④ 涂敷工艺

涂敷工艺有手工、机械、浸涂、喷涂或丝网印刷等。

⑤ 烧银

烧银的目的, 是在高温作用下使瓷件表面上形成连续、致密、附着牢固、导电性良好的银层。

（2）银浆制备电极存在的缺陷

- ① 对某些陶瓷材料，银电极层的附着强度不好、易脱落，元件的废品率较高。
- ② 银离子的迁移将可能影响性能的长期稳定性。
- ③ 虽然银的价格没有金、铂高，但银也在贵金属之列，生产成本仍然比较高。

2.2 被铜法

（1）铜浆含铜量

铜浆含铜量在 70%~75% 间，烧渗温度为 520℃~600℃ 的低温^[5]。

（2）涂敷工艺为丝网印刷

用 200 目丝网在压敏陶瓷体上印 8μm~10μm 厚度的铜浆。

（3）烘干

链带式烘干炉，普通大气环境下，最高温度为 150℃~200℃，烘干周期为 5min~10min。

（4）烧渗

将烘干的压敏电阻用筛网装好后，放入专用的链带式氮气气氛保护隧道电炉中烧渗铜电极。整个烧渗过程必须在几乎无氧的气氛环境下进行。

① 升温区

在温度为 200℃~450℃ 的升温区，为了更有利地排走铜浆料中的溶剂和粘结剂等有机物，通入的高纯氮混有微量空气，其中氧气的混合比例控制在

50ppm~500ppm。

② 高温区

最高铜电极烧渗温度为 500℃~600℃，恒温时间为 1min~10min，该温区段必须通入 99.999% 纯度的高纯氮，氧含量控制在 < 20ppm。

③ 降温区

通入 99.999% 纯度的高纯氮，氧含量控制在 < 20ppm。靠进出口的位置使用水冷降温，确保出炉产品的温度低于 60℃。

3 化学镀

化学镀是一种不需要通电、依据氧化还原反应原理、利用强还原剂在含有金属离子的溶液中，将金属离子还原成金属而沉积在各种材料表面形成致密镀层的方法^[8-10]。化学镀的工艺流程图见图 1。

3.1 化学镀镍

（1）敏化

敏化是使非金属表面形成一层具有还原作用的还原液膜。这种具有还原作用的处理液就是敏化剂^[8]。

好的敏化效果，要求具有还原作用的离子在一定条件下能较长时间保持其还原能力，并且能控制其还原反应的速度，

重点是敏化所要还原出来的不是连续镀层，而只是活化点。目前最合适的敏化剂只有氧化亚锡。

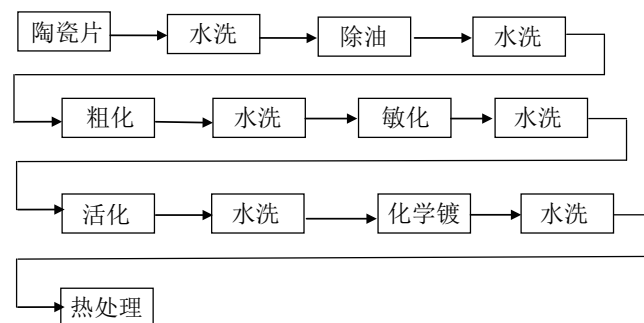


图 1 化学镀的工艺流程

目前，对于非金属化学镀镍用得最多的是 Pd 活化工艺。当吸附有 Sn 的非金属表面接触到 Pd 敏化剂时，Pd 会被 Sn 还原而沉积到非金属表面形成活化中心，从而顺利进行化学镀。

（2）化学镀镍镀液的组成

化学镀镍装置示意图如图 2 所示。

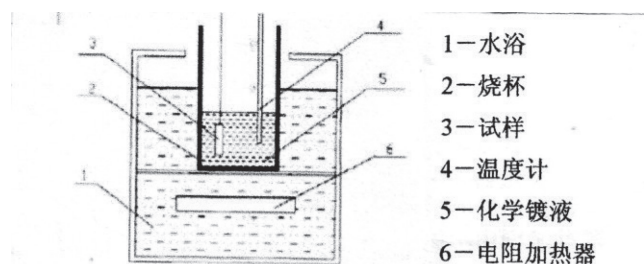


图 2 化学镀镍装置示意图

① 主盐

化学镀镍溶液中的主盐就是镍盐，一般采用氯化镍或硫酸镍，有时也采用氨基磺酸镍、醋酸镍等无机盐^[8]。

② 还原剂

化学镀镍的反应过程是一个自催化的氧化还原过程，镀镍中可应用的还原剂有次亚磷酸钠、硼氢化钠、烷基胺硼烷及肼等。

③ 络合剂

化学镀镍溶液中的络合剂，除了能控制可供反应的游离镍离子浓度外，还能抑制亚磷酸镍的沉淀，提高镀液的稳定性，延长镀液的使用寿命。化学镀镍的络合剂一般含有羟基、羧基、氨基等，常用的络合剂有柠檬酸钠、酒石酸钠等。

④ 缓冲剂

由于在化学镀镍反应过程中副产物氢离子的产生，导致镀液 pH 值下降。为了稳定镀速和保证镀层质量，镀液必须具备缓冲能力。一般用作 pH 值缓冲剂的有强碱弱酸盐，如醋酸钠、硼砂、焦磷酸钾等。

⑤ 稳定剂

在溶液中加入一定量吸附性强的无机或有机化合物，他们能优先吸附在微粒表面抑制催化反应，从而稳定镀液，使镍离子的还原只发生在被镀表面上。

⑥ 加速剂

在化学镀溶液中加入一些加速催化剂，能提高化学镀镍的沉积速率。常用的加速剂有：丙二酸、丁二酸、氨基乙酸、丙酸、氧化钠等。

⑦ 其他添加剂

在化学镀镍溶液中，加入一些表面活性剂有助于工件表面气体的逸出，降低镀层的孔隙率。常用的表面活性剂有：十二烷基硫酸盐、十二烷基磺酸盐和正辛基硫酸盐和正辛基硫酸钠等。

少量的稀土元素能加快化学沉积速率，提高镀液稳定性，镀层耐磨性和腐蚀性能。

3.2 电子陶瓷化学镀铜

(1) 化学镀铜前处理

① 粗化

为了使瓷片微观粗糙，增大亲水性，达到自催化的投锚效果，确保镀层和瓷片结合力，要对瓷片进行预处理^[9]。

粗化方法采用化学粗化。一般是用 10%~20% 的氢氟酸或者氢氟酸与其他酸的配比混合。将除油后的瓷片置于化学粗化液中粗化，是溶解陶瓷中的二氧化硅，造成表面的凹凸不平，使瓷片表面获得瓶颈型的微孔，提高镀层与陶瓷基片的结合强度。

② 敏化

敏化机理是：在某些非金属或难镀基材表面进行化学镀，基体表面必须要有具备还原能力的催化中心，通常称为活化中心。实际上就是以化学方法使基体表面形成生长金属结晶的晶核。

形成活化中心的过程是一个微观的金属还原过程：

- 先在基体表面形成一层具有还原作用的还原性液体膜；
- 再在含有活化金属离子的处理液中还原出金属晶核。

这种具有还原性作用的处理液就是敏化剂，目前最适用的敏化剂只有氯化亚锡。

③ 活化

活化液主要由贵金属离子，如金、银、钯等金属盐配制而成。活化的机理如下所述。

a) 当表面吸附有敏化液的基体材料进入含有活化金属盐的活化液时，这些活化金属离子与吸附在表面的还原剂锡离子发生电子交换，二价锡离子将 2 个电子供给 1 个钯离子，从而还原出金属钯。

b) 这些金属分布在基体表面，成为基体表面的活化中心。

c) 当这种具有活化中心的材料进入化学镀液时，就会在表面催化化学膜而形成镀层。

在化学镀的开始阶段，先是个别催化中心开始由晶核成长为晶格，然后逐步增大形成连续的金属膜。从结晶开始成长到出现可以肉眼看见的金属膜的这段时间，称为化学镀的诱导期。

(2) 化学镀铜镀液的组成

① 主盐

化学镀铜镀液的主盐大多采用硫酸铜，在镀液中的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 14g/L 时，镀速达到最大值。化学镀铜液中铜盐含量越高，镀速越快。

② 还原剂

还原剂主要提供还原铜离子所需要的电子，有甲醛、次磷酸盐、肼、硼烷等，普通采用的是还原能力强的甲醛。化学镀铜液的 pH 值控制在 12 左右。

③ 络合剂

络合剂与化学镀铜镀液中铜离子进行络合，降低游离铜离子的浓度，提高镀液的稳定性，也有利于细化晶粒及提高沉积速度。常用的络合剂有：EDTA、酒石酸钾钠、乙二胺等，广泛应用的是酒石酸钾钠。

④ 稳定剂

在镀液受到污染、pH 值异常、有催化活性的颗粒、装载量的变化等异常情况下，化学镀铜镀液会自发分解，导致失效。加入稳定剂可以阻止或推迟化学镀铜液的自发分解，稳定镀液。常用的稳定剂有： α ， α' —联吡啶、氰化钾、硫化钠、硫脲、甲硫基丁氨酸等。

⑤ pH 值

化学镀铜液的 pH 通常控制在 12.5 左右，一般采用氢氧化钠、碳酸钠或硫酸调节镀液 pH 值。

⑥ 温度

化学镀铜属于碱性镀液，通常温度在 20℃~60℃。

⑦ 少量稀土元素

将稀土 Ce 以硫酸盐的形式加入到配方的镀液中，化学沉积 Cu 速度有所提高；以某一种形态与 Cu 共沉积，细化了晶粒，使得涂层均匀、光滑。

3.3 化学镀的优点与不足

(1) 化学镀优点

① 镀层厚度均匀，能使瓷件表面形成厚度基本一致的镀层。

② 沉积层具有独特的化学、物理和机械性能，如抗腐蚀、表面光洁、硬度高、耐磨良好等。

③ 投资少，简便易行。化学镀不需要电源，施镀时只需直接把镀件浸入镀液即可。

(2) 化学镀不足

① 化学镀工艺过程复杂，电极制备工艺过程控制的难度较大。

② 化学镀过程中引入了有毒的 Cl^- , 镀液废液的处理不符合环保要求。

4 热喷涂

热喷涂是: ① 采用各种热源, 将粉状或丝状固体材料加热到熔融或半熔融状态; ② 通过高速气流使其雾化成微小熔滴, 然后高速喷射; ③ 在高速气流的带动下粒子撞击经过预处理的基材表面后发生变形; ④ 冷凝后沉积形成附着牢固的表面层, 成为具有导电功能的涂层^[11~13]。

热喷涂采用的金属材料, 一般为熔点较低的铝、锡、锌、铜、镍等金属。图 3 示出热喷涂技术涂层形成原理。

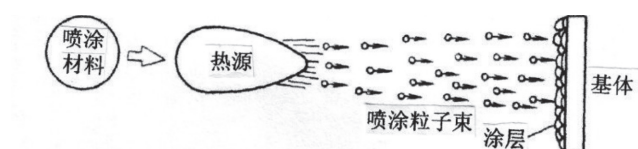


图 3 热喷涂技术涂层形成原理

4.1 热喷涂的原理

(1) 喷涂层形成过程

① 喷涂过程

a) 喷涂材料的加热熔化

熔化或软化。

b) 熔滴的雾化

线材, 外加压缩气流或热源自身射流。

c) 粒子的飞行

先加速、后减速。

d) 粒子的喷涂

尺寸: 几 $10\mu\text{m}$ ~ 几 $100\mu\text{m}$; 速度: 几 10m/s ~ 几 100m/s ;

温度: 熔点; 碰撞: 动能变热能; 变形成扁平状粒子, 凝固。

② 涂层形成过程

a) 由不断飞向基体表面的粒子撞击基体或涂层表面堆积而成: 即粒子的碰撞、变形、冷凝收缩。

冷却速度极高: 金属: 10^6°C/s ~ 10^8°C/s ; 陶瓷: 10^4°C/s ~ 10^6°C/s , 在 10^{-7} ~ 10^{-6}s 内完成。两粒子撞击时间间隔为 0.1s 左右。

图 4 示出涂层形成过程示意图, 图 5 示出两粒子撞击时间间隔示意图。

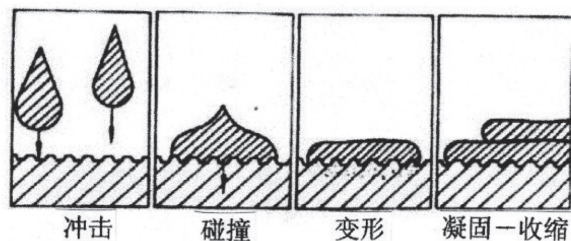


图 4 涂层形成过程示意图

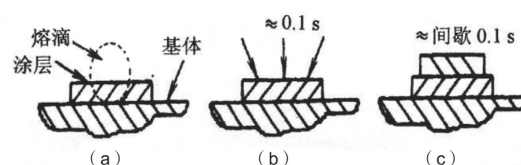


图 5 两粒子撞击时间间隔示意图

b) 涂层材料的加热、加速、凝固是 3 个最主要方面: 希望涂层材料完全熔化, 并保持到撞击基体前; 喷涂速度由焰流速度决定, 与材料粒径有关;

凝固成薄饼状, 部分未熔、引起反弹, 形成空洞或夹杂; 过热引起喷溅。

(2) 飞行中的粒子流

① 粒子的飞行速度

a) 由快到慢。

b) 影响碰撞时转换能量的大小、变形程度及结合强度。

② 粒子的表面反应

a) 与 O_2 、 N_2 反应生成氧化物、氮化物夹杂。

b) 电弧喷涂、粒子速度、温度、尺寸及表面发生的反应影响涂层质量、结合强度。

(3) 涂层的成分和结构

① 涂层的成分

喷涂材料成分经氧化烧损, 变成涂层的成分。这与粒子和喷涂气氛之间的化学反应有关。例如: 电弧喷涂, 因温度高、气氛为空气而氧化烧损严重。

② 涂层的结构

a) 涂层是由无数变形粒子互相交错堆叠在一起, 形成一层堆积而成的层状组织结构。

b) 涂层的性能具有方向性, 垂直和平行涂层方向上的性能不一致。

c) 涂层的组成: 扁平颗粒、伴有氧化物等夹杂, 不完全熔融粒子、存在部分孔隙, 孔隙率为 4% ~ 20% 。

d) 涂层经常适当处理后, 结构会发生变化。例如: 重熔、层状结构变成均质结构。

图 6 示出涂层的结构。

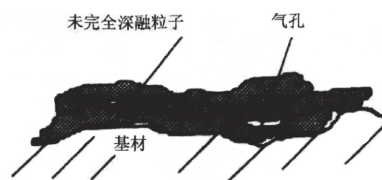


图 6 涂层的结构

(4) 涂层结合机理

① 涂层与基体的结合

a) 机械结合

抛锚效应: 粒子碰撞, 变成扁平状的颗粒, 并随基体表

面的凹凸不平而起伏，这些覆盖并紧贴基体表面的液体薄片，在冷却凝固时收缩咬住凸出点而形成机械结合（见图4）。

b) 扩散结合

变形和高温，足够能量原子间相互扩散生成金属化合物或固溶体。

c) 物理结合

熔融粒子的原子与基材表面原子之间距离达到晶格常数范围时，产生范德华力，形成物理结合。

d) 冶金—化学结合

熔融粒子撞击基材表面时释放出的能量，使喷涂材料与基材之间发生局部扩散和焊合，形成冶金结合。如喷镍包铝复合粉末时的放热效应。

化学结合是指涂层分子与基材表面原子生成化学键而形成的结合。

热喷涂的涂层与基材的结合主要以机械结合为主，结合强度较差（ $< 70\text{MPa}$ ）。

② 涂层间的结合

机械结合为主，扩散结合、物理结合、冶金结合等也起一定作用。

（5）涂层残余应力

① 涂层冷凝收缩时，涂层外层受拉应力收缩受阻。

② 基体涂层的内侧则产生压应力。

③ 由喷涂热条件及物理性质造成差异，影响涂层质量，限制涂层厚度。

涂层残余应力大小与涂层厚度成正比，当张应力超过涂层与基材之间结合强度时，涂层就会发生破坏。

④ 预热及粗化表面能消除和减少残余应力。

图7示出涂层中的残余应力。

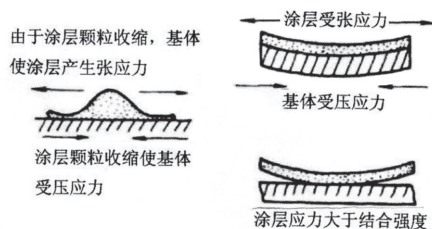


图7 涂层中的残余应力

（6）热喷涂预处理

热喷涂预处理是喷涂工艺中一个重要工序。

① 清洗、脱脂

碱洗法、溶剂洗涤法、蒸汽清洗法、加热。

② 去除氧化膜、表面粗糙化

机械法（喷砂、滚压、车削、车螺纹），酸洗。

③ 预热基体

$200^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 热喷涂技术特点

（1）可在各种基材上制备各种涂层。

（2）基材温度低（ $30^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ ），热影响区浅，变形小。

（3）涂层厚度范围宽（ $0.5\text{mm} \sim 5\text{mm}$ ）。

（4）操作灵活，可在不同尺寸和形状的工件上喷涂。

（5）加热效率低，喷涂材料利用率低。

（6）涂层与基体结合强度低。

4.3 热喷涂材料

（1）热喷涂材料分类和要求

① 热喷涂材料分类

a) 根据热喷涂材料的不同形状，可以分为丝材、棒材、软线和粉末4类，其中丝材和粉末材料使用较多。

b) 根据喷涂材料的成分，可分为金属、合金、陶瓷和塑料喷涂材料4大类。

② 对热喷涂材料的要求

a) 热稳定性好，在高温焰流中不升华，不分解（复合粉末）。

b) 有较宽的液相区，使熔滴在较长时间内保持液相。

c) 与基材有相称的热膨胀系数，以防止因膨胀系数相差过大产生较大热应力。

d) 喷涂材料在熔融状态下应和基材有良好的浸润性，以保证涂层与基材之间有良好的结合性能。

（2）热喷涂线材

① 铝喷涂丝

a) 铝和氧有很强的亲和力，铝在室温下大气中就能形成致密而坚固的 Al_2O_3 氧化膜，能防止铝进一步氧化。

b) 一般铝丝纯度（质量分数）应大于99.7%。铝丝直径 $2\text{mm} \sim 3\text{mm}$ ，喷涂时表面不得有油污和氧化膜。

② 铜喷涂丝

铜主要用于电器的导电涂层。

4.4 电弧喷涂

（1）电弧喷涂原理

在两根金属丝之间产生电弧，因电弧产生的热使金属逐渐熔化，用压缩空气把熔化的金属雾化，并对雾化的金属细滴加速，使之喷向基体表面形成涂层。图8示出电弧喷涂原理图。

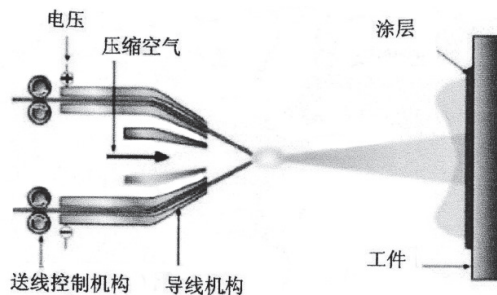


图8 电弧喷涂原理图

电弧喷涂是一个不断重复进行，熔化—雾化—喷射—沉积的过程。

图 9 示出电弧喷涂的过程图。

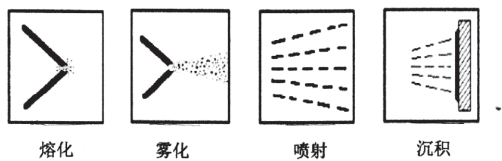


图 9 电弧喷涂过程图

- ① 电弧温度：5000℃ ~ 6000℃。
- ② 优点：含热量更大，粒子速度更快；结合强度高（1.5 ~ 2.0）倍；喷涂效率高。
- ③ 应用：大型金属构件，成本低，一次性投资少，使用方便。
- ④ 不足：喷涂材料是导电的金属丝，氧化烧损严重。采取措施：降低雾化气含氧量。

（2）电弧喷涂材料

电弧喷涂材料包括两类：实芯丝材，粉芯丝材。

① 实芯丝材

有色金属丝材：主要包括铝、锌、铜、钼、镍等金属及其合金；黑色金属丝材：碳钢、不锈钢等。

② 粉芯丝材

包括外皮和粉芯两部分。

（3）电弧喷涂工艺

- ① 预处理工艺：表面清洁、预加工、粗糙化。
- ② 喷涂工艺：电流、电压、压缩空气压力、喷涂距离。

表 1 列出电弧喷涂技术的工艺特性。

表 1 电弧喷涂技术的工艺特性

项目	技术参数
热源	电弧加热
电弧电压（V）	≤ 15 ~ 25
焰流温度（℃）	电弧 5000
熔滴温度（℃）	600 ~ 3800
焰流速度（m/s）	30~500
颗粒速度（m/s）	150 ~ 250
热效率（/%）	90
沉积效率（%）	70~90
喷涂材料状态	线材
结合强度（MPa）	20~40
最小孔隙率（%）	< 10
最大涂层厚度（nm）	0.1~0.3
喷涂距离（mm）	100~200
喷涂角（°）	≤ 15
喷涂效率（kg.h ⁻¹ ）	10~25
设备特点	简单，可现场施工
喷涂成本	低

5 冷喷涂

5.1 冷喷涂工作原理

冷喷涂，又称冷空气动力学喷涂，它是由热喷涂技术拓展而来的一种新型、先进的表面涂层技术。冷喷涂过程通常通过低温（室温 ~ 600℃）、高速（300 m/s ~ 1200m/s）的固态粒子与基体发生塑性碰撞，通过产生较大的塑性变形而沉积于基体表面，从而实现涂层的沉积。因为离子沉积主要靠粒子的动能来实现，所以冷喷涂又称为动能喷涂^[14~17]。

冷喷涂的具体工作原理，是将高压压缩气体（压力一般为 0.7MPa ~ 3.5MPa 的空气、N₂、He 或者它们的混合气体）导入收缩—扩张型拉伐儿喷嘴，气流经过喷嘴喉部后产生超音速流动，然后将喷涂粒子（粒度一般为 5μm ~ 50μm）沿轴向从喷嘴上游送入，其速度经过喷嘴后被加速到约 300 m/s ~ 1200m/s，形成高速粒子射流，在喷涂距离（约 5mm ~ 50mm）内，与基体碰撞发生剧烈的塑性变形而沉积形成涂层。

图 10 示出冷气动力喷涂原理图。表 2 列出冷喷涂的主要工艺参数。

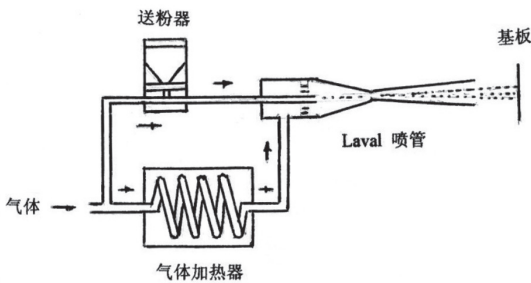


图 10 冷气动力喷涂原理图

表 2 冷喷涂的主要工艺参数

加工参数	选择范围
工作气体	空气、氮气、氦气
喷射压力（MPa）	1 ~ 3
喷射温度（K）	0 ~ 873
气体速度（m ³ .min ⁻¹ ）	1 ~ 2
粉末输送速度（kg.h ⁻¹ ）	5 ~ 15
喷射距离（mm）	10 ~ 50
消耗功率（kW）	5 ~ 25
粉末粒度（μm）	1 ~ 5

5.2 冷喷涂技术优缺点

（1）冷喷涂技术优点

- ① 可以避免喷涂粉末的氧化、分解、相变、晶粒长大等。
- ② 对基体几乎没有热影响。
- ③ 可以用来喷涂对温度敏感的材料，如易氧化材料，纳米结构材料等。

- ④ 涂层组织致密，可以保证良好的导电、导热等性能。
- ⑤ 涂层内残余应力小，且为压应力，有利于沉积涂层。
- ⑥ 粉末可以回收利用。
- ⑦ 送粉率高，可以实现较高的沉积效率和生产率。
- ⑧ 如果利用压缩空气，喷涂成本低。
- ⑨ 噪声小，操作安全。

(2) 冷喷涂技术缺点

- ① 陶瓷或者类似陶瓷类的硬质材料无法制备厚涂层，除非与塑性金属粉末混合。
- ② 并非任何基体均可制备涂层。
- ③ 耗气量大。
- ④ He 价格昂贵。

5.3 用冷喷涂法制备 PTC 陶瓷的铝电极

冷喷涂铝电极在远低于熔点的温度下进行，因此从根本上避免了电极的氧化，使铝能够有效地消除界面吸附氧层，形成欧姆接触^[20]。

(1) 实验方法

① 欧姆接触电极材料选用

500 目纯度为 99% 的铝粉，PTC 瓷片 20mm × 15mm × 2mm。

② 冷喷涂工艺参数

气体压力为 1.5 MPa ~ 2.5MPa、气体温度 180℃ ~ 550℃，送粉电压 15V ~ 25V。

③ 实验方法

采用冷喷涂的方法在 PTC 瓷片表面制备欧姆接触铝电极（双面），测量其电阻值，并与涂覆 In-Ga 电极的试样进行比较。取少量试片做有关特性试验，以确定本方法制备的 Al 电极的运用性和结果。

(2) 实验结果

① 涂层厚度 50 μm。

② 压力影响

a) 铝粉的临界速度为 680 m/s ~ 700m/s。在冷喷涂工艺过程中，粉末颗粒的速度决定了涂层的沉积率和结合强度。

b) 温度一定时，送粉电压 20V、喷涂压力在 1.8MPa ~ 2.0MPa 范围，涂层表面呈片状均匀致密连接，颗粒分布均匀，涂层质量良好。

③ 气体温度对含气量的影响

冷喷涂工艺在远低于铝熔点的温度下进行，可以避免涂层氧化。

④ 送粉电压

20V ~ 22V 电压表面形成涂层较好。

⑤ 欧姆电极的性能

铝电极的接触电阻为 4Ω，达到欧姆接触要求。

⑥ 冷喷涂铝与 PTC 陶瓷的接触

半导体功函数大于金属的功函数，铝能够有效地清除界面吸附气层。

采用冷气动力喷涂方法制备铝电极，涂层均匀，氧含量极低，铝电极电阻值接近 In-Ga 电极，与 PTC 瓷片表面能形成良好的欧姆接触。

6 小结

压敏电阻器电极材料及制备方法发展方向：

(1) 电极材料的贱金属化

电极材料的贱金属化不仅有利于降低器件的生产成本，而且能够促进压敏电阻器的规模化生产。

(2) 按性能要求选择电极制备方法

压敏电阻器电极制备方法，将根据器件性能要求来选择哪一种制备方法。

(3) 生产工艺的自动化

压敏电阻器的规模化生产，又始终离不开生产工艺的自动化。采用自动化生产工艺流程，以提高产品的质量和生产效率。

参考文献

- [1] 电子陶瓷的烧结原理与工艺，第四章，电子陶瓷的表面及烧结后加工处理。http://www.docin.com/p-734181604.html
- [2] 陆广广. 新型电子元器件电极浆料组成与性能的研究[学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2009 年 2 月
- [3] 华南理工大学, 广州凯立达电子有限公司. 金属铝电极压电陶瓷元件及其制备方法. 中国专利, CN101714607B. 2011-06-22
- [4] 广东风华高科技集团有限公司. 铜电极钛酸锶环形压敏电阻器及其制备方法. 中国专利, CN16229986A. 2005-06-22
- [5] 广东风华高新科技股份有限公司. 铜电极氧化锌压敏电阻器及其制造方法. 中国专利, CN102324290A. 2012-01-18
- [6] 合肥工业大学. 一种片式陶瓷电容器表层电极用导电铜浆料及其制备方法. 中国专利, CN102664057A. 2012-09-12
- [7] 黄国勇, 徐盛明, 徐刚, 李林燕, 陈崧哲. 导电浆料用镍粉的制备方法与发展趋势. 稀有金属. 第 31 卷增刊, 2007 年 12 月, 66 ~ 71 页
- [8] 化学镀. http://baike.baidu.com/view/539782.htm?fr=aladdin
- [9] 张敏. 电子陶瓷化学镀铜工艺与性能的研究[学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2011 年 4 月
- [10] 天津大学, 鞍山市中普仪表电子设备有限公司. 热敏电

(下转第 44 页)