

电雕制版打针故障原因分析

作者：王庆浩

【内容提要】暗调电流值过小，说明电雕针过于靠近铁辊，较小的振荡频率容易引起打针现象；而暗调电流值过大，则说明电雕针离铁辊太远，较大的振荡频率容易造成雕针的快速磨损。而最佳的电流值应该是暗调可控制范围的中间值。

在凹印制版行业，电雕制版仍然是主流制版工艺。电雕工艺对铜层的要求非常苛刻，但电镀过程中的控制工作十分复杂，铜层很难达到尽善尽美的品质。再加上版辊的机加工精度和电雕工艺本身的原因，电雕过程中的打针（也称为“损针”）故障也难以避免，这使得电雕制版的生产成本成倍增加，且产品交货期难以保证。如今，对制版行业来说，降低生产成本就是提高利润，保证产品质量和交货期就是保证企业生命，所以各凹印制版厂对打针故障都给予了高度重视。本文将对引起电雕制版打针故障的因素加以分析。

铁辊

1.铁辊同心度超标

在凹印制版行业，铁辊的同心度一般控制在 0.03mm 以内，同心度超标会影响车、研磨加工后的铜层厚度。现在各家制版厂铜层厚度的余量一般都在 0.06~0.08mm（普通包装版），铁辊同心度稍有不好，就会使铜层厚度低于雕刻深度，造成电雕过程中打针。同时，同心度超标也会影响雕刻精度版式设计，特别是对高速电雕机而言，会使雕刻头在工作过程中大幅跳动，造成打针。

2.铁辊壁整体过薄或局部过薄

国内凹印制版厂起初都采用无缝钢管制作铁辊。随着产品利润的降低，厂家为了降低成本，除了生产高端版辊外分切，大多数情况下都使用 3~4.5mm 的厚钢板卷制铁辊，薄壁铁辊已经成为发展趋势。但是由于卷制铁辊的加工余量较大，辊壁整体过薄或局部过薄的现象很常见。过薄的辊壁一方面会影响机械加工精度，另一方面也会使铁辊在雕刻过程中产生共振现象，造成打针。

3.铁辊动平衡超标

要求铁辊达到动平衡无非是为了提高铁辊在雕刻过程中的平稳度。一般高速电雕机对铁辊的动平衡要求比较严格网络出版，如果铁辊动平衡超标过大，高速电雕过程中造成打针的几率也会比较大。

4.焊接应力影响铜层硬度

卷制铁辊在生产过程中必须使用焊接工艺，条件好的凹印制版厂使用二氧化碳保护焊、埋弧焊，条件差的制版厂则一般使用普通电焊。不管采用哪种焊接方式，焊接处都会产生焊接应力。制版厂一般没有应力热失效或振动失效设备糊盒，指望焊接应力自然失效更是不可能，从铁辊焊接到入电镀槽通常只有几个小时，因此焊接处的内应力非常大，晶格结构也是非常规的。在电镀镍、铜的过程中，只有沉积物-衬底界面能的降低，镀层晶格才能匹配，如果沉积物-衬底属于不同晶系或衬底晶格畸变，沉积物将发生晶格转变或扭曲，并在界面处生长非常规的晶格结构（错配孪晶），以降低界面能。这种生长方式因电镀工艺和焊接应力的不同一般延续 2~15 μm。铁辊电镀镍层的厚度一般为 2~4 μm，因此是不能消除铁辊应力影响的（电镀操作人员经常会发现铁辊焊缝处镍层的颜色、粗糙程度与非焊缝处



有明显不同)。镀铜时,初始阶段铜层的晶格生长方式同样受到镍层非常规晶格的不良影响,会发生晶格结构异常,这时铜层的内应力是很大的,焊缝处的铜层硬度也比较高。一般铜层厚度超过 $10\mu\text{m}$ 才能消除铁辊焊接应力对铜层硬度的影响,所以铜层厚度必须比雕刻深度多 $10\mu\text{m}$ 以上才不会影响电雕质量,可见铁辊焊接应力对打针有较大的不利影响,这也是我们发现焊缝处打针比较多的主要原因之一。同时由于铁辊焊接处的砂眼、气孔等缺陷较多,也会造成打针故障。

5.其他影响因素

除上述因素之外,与铁辊相关的打针影响因素还有很多,比如:铁辊尺寸过大,造成铜层厚度不够;铁辊表面粘有铁质毛刺,车、磨后露出铜层等,这些都是造成打针的原因。

在电镀铜层环节,影响打针的主要因素有铜层硬度、晶粒大小、内应力、铜层中的颗粒夹杂、针孔等,现将影响机理、控制及维护要点介绍如下。

1.铜层硬度对打针的影响

铜层硬度是衡量铜层质量最重要的指标之一,一般在 $190\sim 230\text{HV}$ 才能满足电雕制版的需要。硬度过低或过高都不利于电雕制版,过低会使电雕的网穴形状不规矩、网穴边沿产生毛刺、网墙破裂等,影响色彩还原,且对版辊的使用寿命有不利影响;铜层硬度过高会导致电雕打针,因为电雕机的雕刻频率一般都比较高,电雕针冲击铜层的速度非常大,同时铁辊旋转又会对电雕针产生侧面冲击力,因此电雕针的受力非常大。铜层越硬电雕针受力越大,显然铜层过硬会缩短电雕针使用寿命,打针现象不可避免,严重时还会出现断针。

(1) 镀液成分对铜层硬度的影响

酸性镀铜工艺的镀液成分主要由硫酸铜、硫酸、氯离子组成。硫酸铜的含量对铜层硬度影响不大;氯离子的含量对铜层硬度及硬度的保质期也几乎没有影响,仅会影响铜层的光亮度和平整性;硫酸的含量对铜层硬度和保质期有较大影响,升高硫酸浓度能提高阴极的电化学极化度,使晶核的形成速度大于晶核的生长速度橡胶制品,结晶细腻、紧密,晶格内原子间力也较大,铜层硬度提高,同时对铜层硬度的保质期也有一定的延长作用。

(2) 添加剂对铜层硬度的影响

铜层硬度主要受添加剂的影响科印精品调研,目前凹印制版镀硬铜所用添加剂包括3种物质:开缸剂、光亮硬化剂和整平剂。开缸剂的作用是在开缸时一次性使镀液中各种中间体的含量达到工艺范围。由于各种中间体在电镀过程中的消耗量受电流密度、温度等因素的影响很大,且各种中间体的消耗量并非与其在镀液中的含量成正比,所以光亮硬化剂和整平剂的成分比例与开缸剂是不能一样的。

。这类硬化剂提高铜层硬度的机理有两个,一是由于提高了阴极极化作用,细化了结晶测评,提高了光亮亮度,而且能使金属离子还原后在结晶过程中的相互作用力增大,改变了晶格参数、晶粒尺寸,所以可以提高铜层硬度;二是这类硬化剂中含有小分子无机物,在电沉积过程中能够分解出轻元素,如 B、C、N、S 等,分解产物多数会形成金属结晶的点缺陷(类似间隙固溶体),在铜层内部较均匀地产生夹杂应力,从而使铜层的硬度提高,同时夹杂现象也促使结晶细化 CTP,并产生光亮的铜层。需要指出的是,在铜层的晶界处,晶格畸变相对严重,更容易夹杂轻元素(形成金属结晶的面缺陷),此处的硬度将会更大。

如果光亮硬化剂在镀液中含量过少,刚刚镀好的铜层硬度不会明显降低,但硬度维持的时间会明显缩短,亮度也会不理想,这种现象在低电流密度区尤其严重;如光亮硬化剂含量过高会抑制整平剂的效果,出现表面缺陷的几率升高设备操作,高电流密度区会有焦



斑产生，铜层硬度也会升高，容易造成打针故障。

整平剂的主要成分是大分子量的有机表面活性剂，其作用是改善镀层的平整性。整平剂的使用范围比较窄，整平剂含量过低会影响平整效果原稿，高电流密度区容易烧焦；整平剂含量过高会抑制硬化剂的效果，使镀层的光亮效果变差，硬度有所降低。

(3) 工艺条件对铜层硬度的影响

酸性光亮电镀硬铜的工艺控制条件包括温度、阴极电流密度、阴极转动线速度(搅拌力度)、过滤、阴阳极面积比、阴极浸入程度等。每一工艺条件对铜层质量、镀液稳定性，以及日常维护都非常重要，但影响铜层硬度的因素主要为温度、阴极电流密度以及阴极转动线速度。

低 CTP，不利于传质，同时还会降低反应物粒子的自由能，使电化学极化、浓差极化作用相应提高，使吸附原子在结晶过程中排列得更加紧密、细致，致使铜层的硬度得到提高、硬度保质期也相应延长。但温度降低时油墨，电流密度的上限也会降低，硫酸铜容易结晶析出，造成质量隐患。温度升高，能提高镀液的电导率，加快传质速度打样，降低阴极极化作用，使镀层硬度、光亮度降低。如果温度过高，会分解部分不耐高温的添加剂中间体，增加添加剂的消耗量，降低其正常的效果。因该工艺使用的电流密度较大耗材，要特别注意铁辊装夹时的导电性，预防局部因导电不良、温度过高，使铜层局部硬度下降。

电流密度是控制铜层硬度的另外一个重要因素。电流密度低，阴极电化学极化度小，结晶粗大电子监管码，铜层粗糙，硬度也较低，而且铜层硬度的保质期也会缩短。提高电流密度，可以提高阴极极化度，使结晶细致、结合紧密，获得光亮的镀层，同时可以提高结晶原子的相互作用力，促使硬化剂中的成分在铜层中夹杂，从而提高铜层硬度。

为使铜层在铁辊圆周方向覆盖均匀，一般采用铁辊旋转方式检测系统及仪器，适当的铁辊转速，可有效的降低浓差极化度，有利于提高电流密度的上限，从而缩短电镀时间，提高生产效率。在其他工艺条件不变的情况下，降低铁辊转动的线速度，会使铜层变硬，超过电流密度的上限时，会降低阴极的电流效率，甚至使镀层中夹杂氢氧化物，这种情况非常容易造成打针，所以为保证铜层的硬度，必须在生产中根据不同铁辊的直径调整转动线速度，实践经验表明线速度在 1m/s 为宜。

(4) 阳极纯度对铜层硬度的影响

在凹印制版行业中，由于生产效率极高印刷配件，一个 1200L 的普通镀铜槽每月就能消耗 300kg 的铜阳极，如果阳极的金属杂质（Zn、Sn、Ni 等）含量过高，就会造成金属杂质在镀液中迅速累积。当杂质的浓度超过一定值时，在特定温度、电流密度下杂质就会与铜共同沉积下来，从而使铜层硬度升高，因此阳极纯度也是影响打针的一个较重要的因素。

2. 晶粒大小对打针的影响

金属的电镀结晶过程与热力学结晶过程相似，电镀结晶过程中会形成结晶缺陷。如前文所述，在铜层的晶界处会产生严重的晶格畸变，同时晶界处更容易夹杂硬化剂中的一些轻元素原子，造成晶界处的内应力非常大耗材，硬度也会增大。如果铜层的晶粒在 $1\mu\text{m}$ 以下，晶界密度相对于电雕针雕刻深度（ $5\sim 80\mu\text{m}$ ）而言，在铜层的分布中也是相对均匀的，但如果晶粒的尺寸较大，晶界分布就很不均匀标签，这反映出硬度在铜层中的分布是不均匀的，一旦超过电雕针刀刃薄弱点所能承受的硬度极限，电雕过程中必然会造成打针或磨损。所以为保证电雕质量，需要保持铜层的晶粒细化。



过程和成长过程,这两个过程的速度决定了金属结晶的粗细程度。在电镀过程中当晶核的生成速度大于晶核的成长速度时,就能获得结晶细致、排列紧密的铜层。晶核的生成速度大于晶核成长速度的程度越大,铜层结晶就越细致、紧密;否则,结晶粗大。影响铜层晶粒大小的因素有以下几个。

(1) Cu^{2+} 浓度的影响

在镀液中,电极表面的 Cu^{2+} 并非都参与电极反应,只有活化离子才参与反应。但是增加 Cu^{2+} 的浓度,也会增加活化 Cu^{2+} 的数目,反应速率自然增快,电化学极化度会降低。所以随着主盐浓度的增大,阴极电化学极化度下降,晶核的生成速度变慢,所得铜层的结晶晶粒变粗。但过低的 Cu^{2+} 浓度又会增大阴极的浓差极化,降低阴极电流密度的上限。

(2) 硫酸浓度的影响

在硫酸含量不影响硫酸铜溶解度的情况下,硫酸含量升高后,受 H^+ 的影响, Cu^{2+} 在电极上的反应速率会减慢,活化 Cu^{2+} 转变为非活化状态,从而使阴极的电化学极化度升高,晶核形成的速度加快,所以能细化镀层晶粒。

(3) 温度的影响

如前文所述,在电极表面并非所有 Cu^{2+} 都参与电极反应,只有活度系数(活度离子数/总离子数)高的 Cu^{2+} 才能在电极上得到电子整合,完成新相的生成。在溶液中 Cu^{2+} 的活度系数与溶液的温度直接相关,温度升高会使非活化的 Cu^{2+} 转变为活化状态,提高 Cu^{2+} 的活度系数,使电化学极化度降低,从而导致晶核的生成速度降低,使铜层的晶粒粗化。

(4) 添加剂的影响

在电镀工艺中印刷检测,由于电极的电化学极化度很小,为了得到优良的电镀层,必须提高电化学极化度,才能使铜层结晶细密。当镀液中加入相应的有机添加剂后,由于它们在电极表面具有吸附性,增大了电化学反应的阻力,使电化学极化度增大,因而有利于晶核的形成,能获得细小的晶粒。

(5) 阴极电流密度

阴极电流密度对铜层结晶晶粒的大小有较大影响。当阴极电流密度过低时,阴极极化作用小,镀层的结晶晶粒较粗,因此在生产上很少使用过低的电流密度。随着阴极电流密度的增大,阴极极化作用也随之增大,镀层结晶也随之变得细致紧密,但电流密度的增加亦受电流密度上限的限制。

(6) 铁辊转动线速度

铁辊转动线速度对阴极电化学极化度不会有直接的影响,但增大铁辊转动线速度能有效降低阴极的浓差极化度,提高电流密度上限,间接增加阴极的电化学极化度,得到细致紧密的镀层。

(7) 换向电流

有条件的制版厂已经尝试使用周期换向电流,换向电流实际是变形的交流电,波形呈矩形,能有效提高阴极的电化学极化度。周期性地改变电流方向,使镀层在每个周期内的一瞬间变成阳极,从而控制了结晶长大的时间,使之不能长得很粗大。同时还能溶解镀层上的凸出部分,具有整平作用。因而采用换向电流,可以使用较高的阴极电流密度,强化电镀过程,提高生产率,并可使镀层结晶组织排列得更为密实。



3.残余应力对打针的影响

镀层中的内应力分两类：电镀过程中产生的内应力和电镀后保留在镀层内的残余应力，前者可以转化为后者。产生镀层残余应力的主要因素为：沉积层与衬底之间的晶格错配；晶体生长中由三维晶粒之间的相互吸引力而产生的压力；氢氧化物类杂质夹杂引起的应力；氢夹杂引起的应力等。

属的机械性能有较大影响版式设计，会使金属脆性增大、硬度提高、强度降低。对于电镀铜层而言，镀层中过高的残余应力在很大程度上会引起电雕打针。由于测试手段和测试仪器的限制，笔者没能对铜层内残余应力进行检测，也就无法全面掌握减小镀层应力的措施，只能根据相关理论对影响打针的因素进行以上的推理。

4.铜层中的颗粒夹杂对打针的影响

铜层中夹杂颗粒容易造成打针展会，这是比较容易理解的。铜层中的夹杂大致可以分为：主盐结晶体夹杂、氢氧化物夹杂、阳极渣夹杂、铜粉夹杂等。控制夹杂颗粒的经验总结如下。

(1) 主盐结晶体夹杂

主盐结晶体的夹杂主要是由 4 个原因造成的。一是铁辊温度过低，入电镀槽后预热时间不够。在北方，冬季时电镀车间一般没有热水洗版的条件，铁辊入电镀槽后表面会迅速形成微小的硫酸铜结晶，如果过早通电，而没有足够的时间让铁辊预热并使表面的硫酸铜结晶彻底溶解，就会使结晶体夹杂入铜层当中，同时还会在一定程度上影响铜层的结合力，出现铜层缺陷的几率也会大幅提高。二是镀液中硫酸铜的含量过高，或硫酸的含量过高。硫酸铜的溶解度很大程度上受硫酸含量的影响，如果生产工艺控制不是很严谨，就会造成成分失调。在硫酸铜和硫酸的含量都较高的情况下，硫酸铜结晶析出，黏附到铁辊上形成夹杂。三是实际工艺温度达不到正常需要。四是工艺维护人员操作不当，比如在往镀槽中补充硫酸时，直接将硫酸加到正在施镀的铁辊附近分切，就会使此处的硫酸浓度迅速升高，硫酸铜的溶解度迅速降低至正常含量以下，从而造成夹杂。

(2) 氢氧化物夹杂

氢氧化物夹杂主要是由于电流密度过高、 Cu^{2+} 含量过低、温度过低、搅拌力度小（铁辊转速低）等原因造成的。这些因素会导致阴极表面的浓差层过厚， Cu^{2+} 供给不足，阴极极化度升高，当达到 H^{+} 的析出电位后， H^{+} 就会析出，使铁辊表面的 pH 值迅速升高，产生 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 沉淀夹杂于铜层中，造成打针。

(3) 阳极渣夹杂

阳极渣夹杂主要是由于镀液过滤不当或阳极不加防护措施造成的。阳极渣中存在大量导电（如磷粉）或非导电的固体颗粒色彩管理，如果镀液过滤不良，非常容易在铜层中造成夹杂或形成麻点、毛刺点等缺陷，造成打针。

(4) 铜粉夹杂

镀铜过程中，阳极会产生 Cu^{+} ， Cu^{+} 又会发生歧化反应生成 Cu^{2+} 和铜粉，铜粉非常细小，极易夹杂在铜层中。目前仍没有好的方法去除铜粉，一般经过一定时间的等待，铜粉会自行溶解。控制铜粉生成的关键是要控制 Cu^{+} 的产生：一方面要选择含磷量适当的阳极（磷含量在 0.030%~0.075%，一般以 0.035%~0.070% 为佳）高宝，在生产过程中会使阳极表面形成厚度适中的 Cu_3P_4 黑色磷膜，能有效防止 Cu^{+} 的产生。另一方面，要及时将镀



液中产生的 Cu^+ 氧化成 Cu^{2+} 。采用空气搅拌法可以起到较好的效果，但是凹印制版电镀设备一般没有空气搅拌装置，简便有效的方法是经常向镀槽中补加双氧水。添加原则是将双氧水稀释 20 倍以上当纳利，少量勤加，添加量以 10~20ml/KAH 为宜，添加量过少起不到良好的效果，添加量过多则会分解添加剂。

1. 电雕工艺对打针的影响

(1) 雕刻线数

雕刻线数是轴向单位长度内网点排列的个数，常用的雕刻线数为 50~120 线/厘米。雕刻线数越低，雕刻深度越大，对铜层厚度、硬度、结晶结构等综合指标要求越严格，造成打针故障的可能性也就越大。

(2) 电雕针角

常用的电雕针角为 110° 、 120° 、 130° 和 140° 。在雕刻线数一定的情况下，雕刻同样面积率的网点， 110° 电雕针雕刻的深度是 140° 电雕针的 1.9 倍连线加工，所以电雕针角小的雕刻针容易造成打针或针磨损。

(3) 雕刻网角

网角是网点排列方向连线与水平线之间的夹角，常用的雕刻网角为 30° 、 38° 、 45° 和 60° 。雕刻网角越大，雕刻过程中铁辊旋转线速度越快，版面对雕刻针产生的冲击力越大，造成打针或针磨损的几率也会增加。

(4) 雕刻频率

高速电雕机相对于低速电雕机更容易出现打针故障。电雕针在工作过程中做前后振荡，可以简单地认为是匀变速直线运动（前半部分为匀加速直线运动，后半部分为匀减速直线运动），振荡的中间位置速度最大，我们可以做个简单的计算，假设雕刻深度为 0.06mm 检测系统及仪器，雕刻频率为 8400Hz，电雕针运动的最高速度将超过 2m/s。可见高速电雕过程中，电雕针对铜层的冲击力是非常大的。

2. 电雕针质量对打针的影响

(1) 钻石成色

有不同级别。①质量越好的金刚石，其色泽越透明，硬度等综合指标越高，而色泽浑浊的金刚石质量就会差很多；②表面裂痕，一个合格的电雕针，表面绝不可以有任何瑕疵，因为在电雕针高速雕刻实地图案时，任何一点瑕疵都可能引起金刚石破损，造成打针故障。

(2) 雕刻角度

这里提到的雕刻角度是指电雕针底面与雕刻点切线方向的夹角知识产权，一般小于 90° 。如果电雕针在装配过程中不够标准（金刚石针体与针架的装配），使此角偏大，就会使电雕针在工作过程中受力过大，造成打针。

(3) 修磨质量

一般电雕针出现磨损或打针之后会被送到制针厂家进行修磨，修磨完毕再用特殊黏合剂装配装订，装配不当就会出现上述雕刻角度不合适的现象。电雕针底面与斜面的角度不合适也会造成打针，此角度宜在 60° 左右，角度过小容易造成针尖的强度不够，造成打针。



电雕针在损坏的过程中会在断裂处形成很多裂纹，修磨时应把所有裂纹全部磨掉，否则会影响使用寿命。

3.电雕人员操作因素

雕针寿命的影响。电流值对电雕针的影响有两个：一是暗调电流值，二是振荡频率电流值。两个电流值相辅相成。暗调电流值过小，说明电雕针过于靠近铁辊，较小的振荡频率容易引起打针现象；而暗调电流值过大，则说明电雕针离铁辊太远喷绘机，较大的振荡频率容易造成雕针的快速磨损。而最佳的电流值应该是暗调可控制范围的中间值。

