

第3章 零件电镀修复技术

柳台夫

第1节 镀 铬

镀铬是用电解法修复零件的最有效方法之一。镀铬不仅能修复机器零件的摩擦表面的尺寸，而且在相当大程度上能改善零件的质量，特别是提高表面耐磨性。

(一) 镀铬层的特性及其使用范围

根据不同的电解条件，可获得不同的物理-力学性能的镀铬层，见表3-1-1。

表3-1-1 镀铬层的物理-力学性能

铬镀层的类别	电镀工艺条件	镀层的物理力学性能
无光泽铬镀层	电解液温度低 电流密度较高	硬度高、脆性大、结晶组织粗大，有稠密的网状裂纹、表面呈暗灰色
光泽铬镀层	中等的电流密度和电解液温度	脆性小、较高的硬度（约为HV800~1200），结晶组织细致，有网状裂纹，表面光亮
乳白色铬镀层	较高的温度和较低的电流密度	孔隙率小，硬度低（约为HV400~700）、脆性小，而韧性好，能承受较大的变形而镀层不致剥落，表面为烟雾状的乳白色，经抛光后可达到镜面般的光泽

铬镀层的硬度随着电解规范的不同而在较大的范围内变动（400~1200HV）。当加热到300~500°C时，铬镀层的硬度几乎没有变化。当加热到500~800°C时，它的硬度才能较大的变化。

在适当条件下，铬镀层硬度高于渗碳钢和氮化

钢，见表3-1-2。与渗碳钢和氮化钢的硬度不同，铬的硬度不因镀层深度增加而有所改变，而基体金属的硬度对铬镀层的硬度也没有显著的影响。

表3-1-2 铬与钢的硬度

金 层	硬 度 (HV)	金 层	硬 度 (HV)
铬镀层	800~1200	渗碳钢	625
未经热处理的钢	225~345	氮化钢	650~750

铬的滑动摩擦系数只有钢和铸铁的50%左右。由于铬镀层的摩擦系数低、硬度高和抗氧化的化学稳定性高，在摩擦工作条件下铬具有较高的抗磨性。与无铬镀层的零件相比较，镀铬零件的抗磨性要高2~50倍。

铬具有较高的化学稳定性，在大气中能长时间保持光泽。铬镀层的导热率比钢和铸铁的导热率约高40%。

镀铬的重要特性就是铬与基体金属有很好的结合强度。实践表明：铬镀层与零件表面的结合强度较高于它自己的结晶间的结合强度。

铬镀层的主要缺点是性脆。它只能承受均匀分布在其表面上的载荷，在集中的冲击力作用下将易遭到破裂。而且，随着铬镀层厚度的增加，镀层的强度也就降低，而疲劳强度也随着降低。由于铬镀层有网状裂纹，对保护基体金属不受腐蚀也是不可靠的。

铬镀层的一般允许厚度为0.2~0.3mm。但当受冲击负荷或比压大时，铬镀层厚度应尽量选得小一些。

铬镀层可分为平滑铬镀层和多孔性铬镀层两类。

平滑铬镀层具有很高的密实性和较高的反射能力，但其表面不易贮存润滑油，而多孔性铬镀层的

外表面形成无数网状沟纹和点状孔隙，能保存足够的润滑油以改善摩擦条件。根据它们的性能的不同，决定了两种铬镀层的使用范围，见表3-1-3。

表3-1-3 平滑铬镀层和多孔性铬
镀层的使用范围

铬镀层 名 称	使 用 范 围	实 例
平滑 铬镀层	1. 修复静配合的零件的尺寸 2. 用于提高模子的工作面的光滑度，并且降低工作时的摩擦力 3. 用于延长在较低压力的磨损条件下工作的零件的使用寿命	镀模 冲压模 测量工具（塞规、量规、卡规）
多孔 性铬镀层	修复在相当大的比压下、温度高、滑动速度大和润滑供油不能充分的条件下工作的零件 修复切削机床的主轴（大磨床砂轮轴慎用）泵轴及其他机器零件	内燃机曲轴、主轴、汽缸套筒、排气调杆、活塞销、活塞环（活塞环圈）及其他零件 车床主轴、镗床镗杆

(二) 镀铬工艺

1. 镀铬的一般工艺

(1) 镀铬前的表面处理

1) 机械准备加工。为了取得正确的几何外形，工件要进行准备加工和消除锈蚀，以获得均匀的镀层。例如，对机床主轴，电镀前一般要加以磨削。

2) 护屏和绝缘处理。对于锐边和尖角的零件，由于铬的边缘效应大，在边缘处铬沉积得快，会产生粗糙颗粒，因此锐边要倒圆。除此之外，还应采用特别的护屏（用线材或金属箔制成的辅助阴极）。在局部电镀时，不需镀覆的表面部分要加以绝缘处理。通常采用的绝缘材料有赛璐珞、硝化纤维素清漆、过氯乙烯清漆、乙烯塑胶管、乙烯塑胶带等。镀铬零件的孔眼则用铅堵孔。镀铬的阳极材料为铅板。

3) 除去油脂和氧化皮。为了使镀层与零件表面有良好的结合强度，必须在电镀前或化学表面处理前，用有机溶剂（苯、丙酮等），碱溶液等将零件表面上的油脂、氧化皮、锈迹及其它的脏物仔细地清除。零件在除油及清洗后还要进行弱酸蚀，以清除零件表面上的极薄的氧化膜，同时使表面受到

轻微的浸蚀，呈现出金属的结晶组织，增强镀层与基体金属间的结合性。

(2) 常用的电解液 在设备修理中，常用的镀铬电解液的成分是 $\text{CrO}_3 150\sim250 \text{ g/L}$, $\text{H}_2\text{SO}_4 0.75\sim2.5 \text{ g/L}$ 。工作温度（温差 $\pm 1^\circ\text{C}$ ）为 $55\sim60^\circ\text{C}$ 。

(3) 镀铬零件的热处理 对镀铬厚度超过 0.1 mm 的较重要的零件应进行热处理，以提高铬镀层的韧性和结合强度。镀铬零件的热处理是在热的矿物油或空气中进行。温度一般采用 $180\sim250^\circ\text{C}$ ，时间是 $2\sim3 \text{ h}$ 。

2. 镀铬新工艺

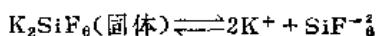
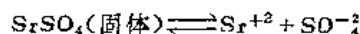
一般来说，镀铬所使用的电解液为普通硫酸镀铬电解液，这有一些缺点，如电流效率低，沉积速度慢，工作稳定性小等。尤其电解液中铬酸与硫酸之比值，在电镀过程中会逐渐发生变化，因而必须经常地分析和校正电解液。近年来，用有限溶解盐硫酸锶 SrSO_4 和氟硅酸钾 K_2SiF_6 替代硫酸，加入铬酸溶液而配成自动调节电解液，可以解决普通硫酸镀铬的缺点。

该镀铬新工艺的原理是，在一定温度、一定浓度的 CrO_3 溶液中， SrSO_4 和 K_2SiF_6 的溶解度积为常数。

$$L_{\text{SrSO}_4} = [\text{Sr}^{+2}] \cdot [\text{SO}^{-2}] = K_1 \text{ (常数)}$$

$$L_{\text{K}_2\text{SiF}_6} = [2\text{K}^+] \cdot [\text{SiF}^{-3}] = K_2 \text{ (常数)}$$

如由于某因素使电解液中的 SO^{-2} 或 SiF^{-3} 离子浓度改变时，就打破了下面的公式的动态平衡，而使方程向左进行，产生盐的沉淀，或使方程向右进行，沉积槽底的盐加速溶解，恢复原有的平衡。保持 K_1 、 K_2 值不变。



快速自调镀铬规范推荐如下：

铬酐 CrO_3 250 g/L (工业用)

硫酸锶 SrSO_4 7.5 g/L (工业用)

氟硅酸钾 K_2SiF_6 20 g/L (工业用)

蒸馏水 H_2O 1 L

温度 $55\sim65^\circ\text{C}$

电流密度 $30\sim100 \text{ A/dm}^2$

该新工艺优点如下：

1) 生产率高，电流效率可达 $17\%\sim24\%$ 。

2) 在镀液比例变化时，有自动保持硫酸锶和氟硅酸钾浓度的能力。

3) 镀层厚达1mm或更大时，物理力学性能仍很高。

4) 镀液成分改变，电流密度和温度有很大波动时，镀槽工作稳定，仍能获得高质量的铬镀层。

5) 成本低。

第2节 不对称交流-直流低温镀铁

(一) 不对称交流-直流镀铁的特点及性能

一般的工业用交流电，两个半波是相等的，用这种电是不能镀出镀层的，因为通电后一个半波使工件呈阴极极性，镀上一层镀层，相等的另一个半波使工件呈阳极极性，把镀层(甚至基体金属)电解掉，这样的电流不能用于电镀。不对称交流电是通过一定手段，使两个半波不相等，通电后较大的半波使工件呈阴极极性，镀上一层镀层，较小的另一个半波使工件呈阳极极性，只把一部分镀层电解掉。为与一般交流电相区别，把它叫做不对称交流电。

不对称交流-直流低温镀铁有以下特点：

1) 不对称交流-直流镀铁由于在开始镀前10~20min里，采用的是不对称交流，使得镀层的颗粒较均匀，表面较平滑，因此它的内应力比同电流密度下的直流电镀层小，在同样的外力作用下，不脱落，结合强度比直流电镀层高得多(结合力可达 450N/mm^2)。

2) 不对称交流-直流低温镀铁是在较低温度下进行的(4°C 即可开始镀)，所以不需特殊的加热设备，镀液的温度低了，酸的蒸发也就慢了，pH值变化就少，镀层质量易保证。

3) 由于不对称交流-直流镀是在较低的温度条件下，用较大的电流密度进行的，因而有利于提高镀层的硬度(最高可达HRC63~65，所需硬度可控制)和耐磨性，有利于提高生产率(沉积速度约每小时 $0.60\sim1.00\text{mm}$)。

4) 不对称交流-直流镀铁与镀铬比较，还有原料便宜，镀层厚(可达2mm)，镀的过程无毒气产生，简便易行，节省电力(电流利用率达95%)等优点。因而是一种很有发展前途的修复工艺。

(二) 镀铁工艺

1. 准备工作

(1) 清除油锈 零件虽经清洗，仍不合电镀要求，镀前必须除油，以免带入电解液造成镀层局部脱落。除油可用有机溶剂擦洗，或用10%~30%碱溶液煮洗，或用废电石浆水刷洗。不易除油的油孔、油道，可用绝缘物(木棍、胶塞等)堵死，使油渗不出来。锈迹可用砂纸打磨，点蚀较深要用磨床磨平。

(2) 装挂具绝缘 镀件挂具要有足够的导电截面积、保证易于排氢、不兜带电解液，与极杠、镀件导电的接触面要够用(可溶性电极，极板面积应为被镀面的2.5倍)，每个极板要保证与被镀表面距离基本均等、位置适中、导电良好，挂具的铜质部分不得浸入电解液。

安装好后，把浸入电解液的不镀部分和非工作面，应用挂腊、涂绝缘漆、包塑料布等方法可靠地绝缘好。

(3) 阳极刻蚀 在30%工业硫酸中，以铅板为阴极。阴、阳极面积比为4~8:1。按表3-2-1通入直流电，以除去表面的氧化层并生成钝化膜，保护纯净的金属表面在空气中不被氧化。刻蚀后低碳钢工件呈银白色，中碳钢、铸铁件呈灰色。工件取出后，应立即用净水冲去残留在表面的硫酸。

表3-2-1 阳极刻蚀电流选择表

被镀表面 材 质	钢、 铸铁	20钢 渗碳	45钢 正火	45钢 高频淬火	40Cr 高 频淬火	18CrMnTi 渗 碳	12CrNi 渗 碳
电流密度 (A/ dm^2)	10(70)	40	20	60	70	50	40
刻蚀时间 (min)	2(0.5)	2	2	2	2	2	2

(4) 退钝化膜(浸渍) 把镀件浸入电解液，先不通电浸0.5~4min，以溶解掉钝化膜，确保铁离子能在纯净的活化表面放电沉积。在一般情况下，退钝化膜时间按表3-2-2所列数值掌握。

表3-2-2 退钝化膜时间

材 质	阳极刻蚀		不同电解液温度所需时间(s)					
	电流密度 (A/ dm^2)	时间 (min)	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C	75°C
钢、铸铁	70	0.5	12	11	10	9	7	7
45#高频淬火	60	2	50	45	40	35	30	30

退钝化膜是纯化学过程，所需时间除受刻蚀电流密度和时间影响之外，也受盐酸浓度和电解液温度的影响，还受镀件体积、笨重程度、操作条件和操作习惯的影响（氯化亚铁浓度的影响不大，变化又很小，可不考虑）。刻蚀电流密度大、时间长、电解液温度低、盐酸浓度小、镀件体积大、能迅速冲击硫酸溶液，所需时间应适当长些，有时达4min，反之应适当短些，甚至立即通电起镀。据了解，绝大多数单位镀层脱落都是没控制好退钝化膜时间所造成，它不能通过计算确定，也不应机械地搬用资料，要先在一种镀件上经过反复试验来确定。

2. 镀铁规范

通过实践，认为采用下列的电解液浓度及镀铁规范（表3-2-3）比较合适。

表3-2-3 镀铁规范

电解液浓度 (g/L)	300 ± 50
电解液的酸值	pH = 1.5~2
电解液的温度 (°C)	28~35
直流镀的电流密度 $J_{\text{直}} (\text{A}/\text{dm}^2)$	$J_{\text{直}} = 20 \sim 35$
起镀有效电流密度 $J_{\text{有效}} (\text{A}/\text{dm}^2)$	$J_{\text{有效}} = 1.5 \sim 2.5$

一般在电解液温度20°C以上时即可起镀，但最高不可超过40°C，可以在电解液中加入氯化锰（0.25~2.5 g/L）以改善镀层的质量。

镀铁分起镀、过渡镀、直流镀三个过程。

(1) 起镀 为了减低镀层的内应力，使它与基体金属有足够的结合强度，在退钝化膜后，用不对称交流电起镀。起镀的正半波电流密度与负半波电流密度要满足下列两个条件：

$$\frac{J_{\text{正}}}{J_{\text{负}}} = \beta = 1.3$$

$$J_{\text{正}} - J_{\text{负}} = J_{\text{有效}}$$

为了简化计算，经过实践，一般 $J_{\text{有效}}$ 取 2.1 A/dm^2 。

解方程式得：

$$J_{\text{正}} = 9 \text{ A}/\text{dm}^2$$

$$J_{\text{负}} = 7 \text{ A}/\text{dm}^2$$

因此起镀时：

正半波的电流 $I_{\text{正}} = 9 \times S \text{ A}$

负半波的电流 $I_{\text{负}} = 7 \times S \text{ A}$

式中 S —— 镀件需镀部分表面积 (dm^2)。

操作时先调正半波，后调负半波，并停留1~3min。

(2) 过渡镀 目的是使镀层的内应力及硬度均匀地而不是突然地增加，使接近选定值，为转换到直流电镀作好准备。

操作方法：先将正半波电流在4~5min时间内缓慢上升到 $I_{\text{正}} = \frac{I_{\text{正}}}{2}$ ；然后再将负半波电流同样在4~5min时间内缓慢下降到 $I_{\text{负}} = \frac{I_{\text{负}}}{8}$ ；此时 β 从 1.3 上升到 7~8。

(3) 直流镀 过渡阶段完成后，可换成直流镀，调整电流到选定值。算出电镀所需时间，达到所需厚度后，断电，取出镀件。

另一种方法是：

起镀正半波电流取 $I_{\text{正}} = \frac{I_{\text{正}}}{2}$ ，起镀负半波电流取 $I_{\text{负}} = I_{\text{正}} - I_{\text{有效}}$ ($I_{\text{有效}}$ 从表3-2-3中选取， $I_{\text{有效}} = J_{\text{有效}} \times S$)。起镀后停留1~3min。

过渡时 $I_{\text{正}}$ 不变，在17~20min时间内将负半波电流缓慢下降到 $I_{\text{负}} = \frac{I_{\text{负}}}{8}$ 或到零，然后转换成直流镀。

起镀有效电流密度与电解液温度的关系如下：

电解液温度 (°C)	<30	35	40
起镀有效电流密度 (A/dm^2)	1.9	2.0	2.1

(4) 镀后处理 镀件自镀槽中取出后，应立即用水冲洗。为了防止镀件表面生锈，可将它泡入碱溶液、溶解油溶液或10%亚硝酸钠溶液中。

拆除挂具后，要彻底清除涂在镀件表面的绝缘涂料，否则在装配使用时会造成油道堵塞，发生事故。

(三) 电解液

1. 电解液的选用

电解液的选用原则主要有：①原材料易购、便宜；②配制容易；③使用简便；④性能稳定；⑤对其它因素影响小。

根据常用的硫酸亚铁和氯化亚铁两种镀铁电解液比较（表3-2-4），氯化亚铁电解液有很多优点。为了使温度变化最小，一般选用电阻最小的浓度350~450 g/L。根据很多单位的经验，盐酸的浓度以保

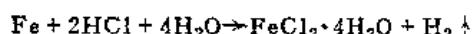
表3-2-4 硫酸亚铁和氯化亚铁电解液的比较

指标 电解液	铁盐浓度 (g/L)	酸浓度 (pH)	工作温度 (°C)	电流最大密度 (A/dm ²)	电流效率 (%)	沉积速度 (mm/h)	对酸度变化	工作性能
硫酸亚铁	420	2.0~2.1	40±1	10	0.31~0.52	0.04~0.07	很敏感	不稳定
氯化亚铁	120~900	1.0~2.0	4~106	80	0.95以上	0.1~1.7	不敏感	很稳定

持pH≈1.5为宜，此时镀层质量最易控制。

2. 电解液的配制

电解液中的主要成分氯化亚铁可用低碳钢屑（或中碳钢屑）加盐酸制取。其化学反应如下：



配制不同重量的氯化亚铁时，钢屑和盐酸的需要量，其计算公式如下：

1) 钢屑的需要量为

$$x = \frac{\text{Fe} \cdot K}{(\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}) A} = \frac{0.28 K}{A}$$

2) 工业盐酸的用量为

$$y = \frac{2\text{HCl} \cdot K}{(\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}) B} = \frac{0.37 K}{B}$$

式中 x ——钢屑需用量(g)；

y ——工业盐酸用量(g)；

K ——需要制备 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 的浓度(g/L)；

A ——低碳钢屑的含铁量，一般以98%计算；

B ——工业盐酸的浓度，一般为27.66%，

密度为1.14。

先将盐酸倒入塑料槽中，然后在良好通风条件下，将已除油的钢屑分四、五次放入槽内，静置24小时，用亚麻布、的确良布和快速定性滤纸过滤，加蒸馏水稀释到所需浓度即成。

电解液也可用三氯化铁配制：

1) 按要求浓度称取 FeCl_3 （一般按357 g/L投料），用蒸馏水溶解为酱油色，并需通电处理。

2) 采用阴、阳极面积之比为1:4(阴、阳极用10*低碳钢或化工纯铁)，为提高效果，极板应尽可能接近槽底。

3) 电流不大于 $10\text{A}/\text{dm}^2$ 。

4) 温度 室温。

5) 时间 每升电解液 $36\sim40\text{A}\cdot\text{h}$ 。

6) 经过电处理后此溶液比重为1.2~2。

7) pH值为0.5~1.5。

8) 将溶液过滤后为草绿色，然后方可试镀。

3. 电解液的处理

氯化亚铁中的铁离子是正二价，很不稳定，在常温下易氧化为三价的铁离子。三价铁离子积聚多了，影响镀层质量和性能。所以每次使用之前，都须通电处理，使三价离子还原为二价铁离子。可按阴极面积通 $15\sim20\text{A}/\text{dm}^2$ 直流电，阳极为阴极工作面积4~8倍，直到阴极板边缘呈现许多明亮的圆球时即可使用。

4. 电解液的维护

1) 电解液中严防有害杂质如：铜、铝、铬、汞、银、镍、锡的离子和碳，硫酸根等带入。

2) 溶液中如有大量的硫酸根离子，可用氯化钡与其作用，使生成硫酸钡沉淀。

3) 电解液中如有大量肉眼能看见的悬浮物和沉淀物，可采取静置沉淀或过滤的方法，去掉电解液中的杂质。

4) 当工件镀完，如暂时不镀，必须向镀槽中加入过量的盐酸和挂上处理溶液用的大极板（假阴极），防止二价铁离子氧化为三价铁离子。

5) 镀前必须把阳极板刷净，在镀的过程中，每隔半小时左右也需将阳极板上的阳极泥清刷一次，以保持极板干净。

6) 假阴极在任何情况下都不得做阳极板使用，否则电解液将被大量“溶解”下来的有害杂质污染，需长时间通电处理。

(四) 典型低温镀铁电源

低温镀铁电源有单相、三相两种。目前通常采用可控硅整流三相电源，其容量取决于生产规模、批量或最大镀件的被镀面积。

镀铁电源应能满足下列工艺要求：

1) 应能供给负载单相交流电，其正负半波应可以单独进行调整。该电源同时也能供给负载以可调的直流电。

2) 在不断电的条件下，交直流可以相互转换。

3) 输出的交直流电单独运行都应正常，可靠。电压、电流表指示灵敏、准确。

4) 输出的波形整齐无缺并且平稳。

哈尔滨整流器厂生产的专用镀铁电源只需一只镀槽，设备简单。其KGD_TF系列的参数简介如下：

(1) 型号的命名

K	G	D _T	F	□ □ - □ / □	设计序号	额定直流电流值(A)	额定直流电压值(V)
可 控 整 流	硅 不 对 称 整 流	强 迫 风 冷	(A 为 自 冷)	设计序号 (见表 5-3)			

(2) 技术特性

1) 额定输入、输出 参见表3-2-6。

2) 输出特性

① 对称交流 280A, 9V, 不超过7min, 手控时可持续30min。

② 不对称交流 350A, 6V, 不超过1h。

③ 直流 8V以上连续输出1000A, 4V时连续输出500A, 其它电压电流按比例使用。

④ 周期不对称 直流时间与不对称时间之比为(10~20):1。

表3-2-5 设计序号的意义

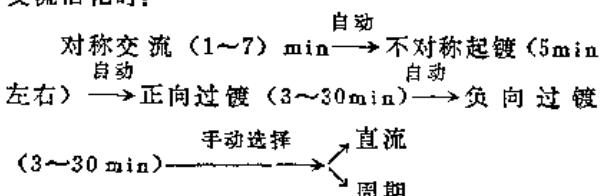
设计序号	结 构 特 征	附 注
11	输入为单相220V, 不对称输出为单相50Hz, 直流输出为单相全波可控整流	
21	输入为2相380V, 输出同上	
31	输入为3相380V, 不对称输出为单相50Hz, 直流输出为三相半波可控整流	
33	输入为3相380V, 不对称输出为三相半波二组反并联, 直流输出为三相半波可控整流	不对称频率为5~40Hz
36	输入为3相380V, 不对称输出同33序号, 直流输出为双反星带平衡电抗器六相可控整流	不对称频率为波数选择

表3-2-6 额定输入、输出值

规格	额定参数			交流输出		直流输出		不对称输出		备注
	电压 (V)	电流 (A)	相数	电压 (V)	电流 (A)	电压 (V)	电流 (A)	电压 (V)	电流 (A)	
300/15	220/ 380		1/2	15	300	50	150			
750/15	220/ 380		1/2	15	750	50	300			
1000/16	380	43	3	16	100	50	350			
1000/16	380	45.6	3	16	1000	5~ 40	500			
2000/16	380	80	3	16	2000	选择	100			波数在70以内任意组合

3) 控制方式 有自动和手动二种。

4) 自动控制程序和时间调节范围 采用对称交流活化时：



5) 输出电压调节范围 0~额定值

6) 负荷种类 I类(100%连续)。

7) 外形尺寸 800×550×1480(mm)[长×宽×高]

8) 使用条件

① 海拔高度不超过1000m。

② 周围介质温度不低于-10°C, 不高于+40°C。

③ 相对湿度不大于85% (温度20±5°C时)。

④ 没有导电及易爆尘埃, 没有腐蚀金属和破坏绝缘的气体的场所。

⑤ 无剧烈震动和冲击及垂直倾斜度不超过5°的地方。

(五) 无刻蚀低温镀铁新工艺

用低温镀铁工艺来修复磨损件，效果良好。但其工艺过程中有阳极刻蚀处理，即在镀铁前用30%的硫酸电解液处理工件表面，处理过后要冲洗残酸，这不仅污染环境，若残酸冲洗不净而带入镀液，还会使镀液质量变坏，严重影响镀铁的质量和性能。近年来，无刻蚀镀铁新工艺的出现使镀铁工艺有了

新突破。无刻蚀镀铁层结合强度高，质量稳定可靠，成品率高。

无刻蚀低温镀铁的要求是：

- 1) 镀铁电源、镀液质量均应满足工艺要求。
- 2) 零件下槽瞬间，欲镀表面要有酸性水膜，不应有碱性水膜和氧化膜。
- 3) 在 Fe^{+2} 沉积时，欲镀表面不应存在微观障碍物。
- 4) 要破坏其表面钝化层。
- 5) 施镀方法要合理。

总之，要交流对称活化，并且不对称起镀要匹配，这样才能获得应力小、结合牢的镀层。细述如下：

1. 无刻蚀镀铁电源

要求如前所述。

2. 无刻蚀镀铁镀液

镀液应采用氯化亚铁单盐镀液，可适量添加镍或锰以及抗氧化剂 V_2O_5 。镀液质量合乎标准的标志是：(1)镀液呈透明绿色；(2)洁净，盛在量杯里用肉眼看不见或仅能看见极少数微小杂质。(3)电解处理时，阴极板上结瘤是银白色球状、坚实而光滑，边缘无细刺。

为保证镀液质量，必须防止氧化和有害元素及不溶性杂质和有机杂质的污染。生产环境空气要清晰、粉尘量要小，日常水质要经分析处理，并调节好浓度、酸度、温度。要经常电解处理镀液，防止阳极泥进入阴极区，阳极材料宜用低碳镇静钢，电解处理时阳极与阴极面积比为(3~5):1，阳极电流密度 $10\sim 12 \text{ A/dm}^2$ 。要经常过滤镀液、适量添加新的氯化亚铁溶液，过滤后，至少要电解处理24 h，达到要求后才能使用。

3. 无刻蚀镀铁工艺参数

(1) 电极配比 交流电时阳极面积是阴极的0.8~1.5倍，正常镀铁时为2~4倍。

(2) 镀液 温度 $30\sim 45^\circ\text{C}$ ；密度 1.20 ± 0.2
($\text{FeCl}_2 \cdot 4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $350\pm 33 \text{ g/L}$)； $\text{pH} 0.6\sim 0.8$ (试纸为上海试剂三厂产品0.5~5精密试纸)。

(3) 电流

1) 交流活化 $\beta = 1$, $I = J_{\text{正}}S$, $t = 6\sim 8 \text{ min}$

2) 交流起镀 $\beta = 1.29\sim 1.3$, $I_{\text{正}} = J_{\text{正}}S$, $I_{\text{负}} = J_{\text{负}}S$, $t = 10 \text{ min}$

3) 交流过渡镀 $I_{\text{正}}$ 逐渐调到 $10(\text{A}/\text{dm}^2)S$,

$$t = 5 \text{ min}; I_{\text{负}} \text{逐渐降到 } \frac{10(\text{A}/\text{dm}^2)S}{6}, t = 20 \text{ min}.$$

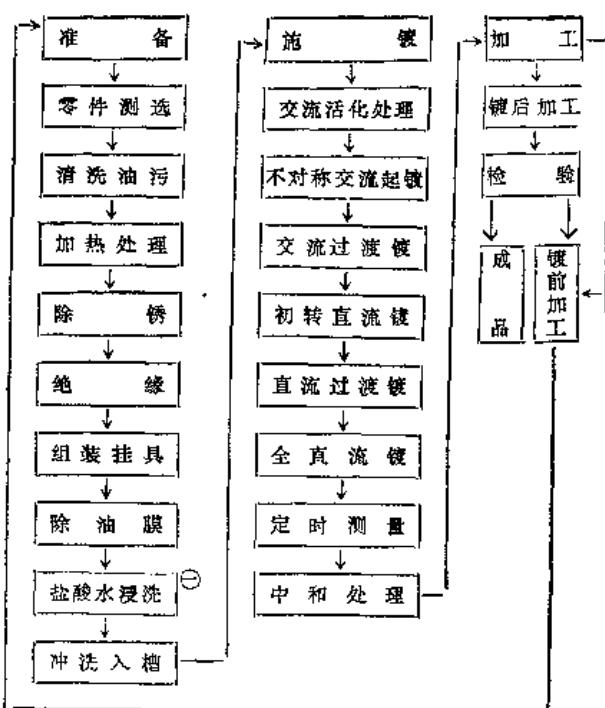
min.

4) 初转直流镀 $I = 10(\text{A}/\text{dm}^2)S$, $t = 15 \text{ min}$.

5) 直流过渡镀 $I = 10(\text{A}/\text{dm}^2)S$ 逐渐调到 $J_{\text{正}}S$, $t = 15\sim 20 \text{ min}$.

6) 全直流镀 $I = J_{\text{正}}S$, $J_{\text{正}} = 15\sim 25 \text{ A/dm}^2$ 施镀面积大于 50 dm^2 的 $J_{\text{正}} = 8\sim 15 \text{ A/dm}^2$ 。

(4) 无刻蚀镀铁工艺流程



第3节 电刷镀技术

电刷镀原名金属涂镀、快速笔涂电镀等。

(一) 电刷镀原理

电刷镀是一项在工件表面快速电沉积金属的技术。刷镀时，专用电源的负极接到工件上，正极和刷镀笔连接，蘸上沉积金属溶液，与工件接触并相对运动，溶液中的金属离子在电场作用下向工件表面迁移，放电后结晶沉积在工件表面上形成镀层，随着时间的延长，沉积层逐渐增厚，直至所要求厚度。

① 盐酸水浸洗即用15%~20%盐酸水溶液刷洗欲镀表面2~3 min，腐蚀去除氧化膜，中和去除碱性水膜，形成酸性水膜。

度。如图 3-3-1 示。

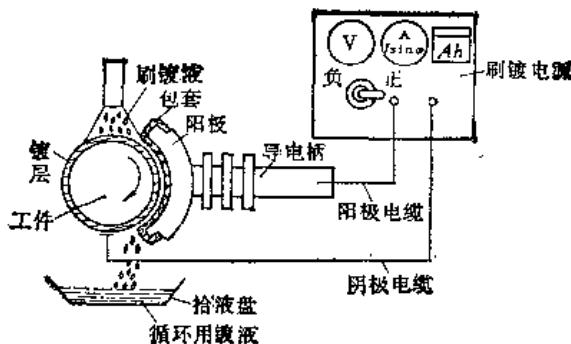


图3-3-1 电刷镀原理图

(二) 电刷镀技术的特点

电刷镀技术是四种基本的金属维修技术（焊接、喷涂喷熔（焊）、槽镀、电刷镀）之一。其特点如下：

1) 设备简单，工艺灵便，不需镀槽，工件可大可小，尤其是可以在现场不解体而进行电刷镀修复，给设备维修或机加工的超差件的修旧利废带来极大的方便。

2) 结合强度高。由于电刷镀层是在电、化学、机械力（涂笔与工件的摩擦）的作用下沉积的，因而结合强度比槽镀的高，比喷涂更高。喷涂层结合强度约为 $30\sim50\text{ N/mm}^2$ ，电刷镀层结合强度大于 70 N/mm^2 。另外，电刷镀层根据工况的耐磨、耐蚀、耐热、防渗碳、防氮化等需要，可随欲选到合适的沉积金属溶液。

3) 沉积速度快。因电刷镀的沉积溶液金属离子浓度较高，故比槽镀速度快5倍以上，辅助时间少、效率高。

4) 工件加热温度低，通常小于 70°C ，不会引起变形和金相变化。

5) 镀层厚度基本可以精确控制。镀后一般不必加工，表面粗糙度低，可以直接使用；即使进行机械加工，留的加工余量小，可大大减去不必要的浪费。

6) 污染小。不像镀铬那样有氯化物产生，故公害小。

7) 适应材料广。常用金属材料基本都可刷镀修复，如低碳钢、中碳钢、高碳钢、合金钢、铸铁、铝和铜及其合金，淬火钢、氮化钢等。焊接层、喷涂层、镀铬层等的返修或局部返修也可应用

电刷镀技术；淬火层、氮化层不必进行软化处理，不必破坏原工件表面，可直接电刷镀修复。

8) 修复磨损失件时，因电刷镀的是镀层等能改变原摩擦副，从而能大大延长使用寿命。

(三) 电刷镀的应用范围

该项技术在国外应用和发展较快。我国1980年开发，近年来推广甚速。在航空、船舶、机车、电子、化工、石油、汽车、机械、冶金以至文物保护部门都获得广泛应用，已取得明显经济效益。在机修部门主要用于：

1) 恢复磨损或超差零件的名义尺寸，使零件表面具有耐磨性。尤其适用于精密零件的修复。

2) 新件防护层，用于防磨、防蚀、抗高温氧化等场合，使零件具有工况需要的特殊性能，节约贵重金属。

3) 大型及精密零件如轴、套、油缸、栓塞、机体、导杆、导轨等局部磨损、划伤、凹坑、腐蚀的修复。

4) 改善零件表面的冶金性能。如改善材料的钎焊性，在铜和铝的表面经过电刷镀过渡层即可实现铝铜之间的钎焊；如需要局部防渗碳、防氮化，只需刷镀一层碱铜即可；如想提高喷涂层的结合强度，可以在喷涂前电刷镀一层过渡层等。

5) 改善轴承和配合面的过盈配合性能，电刷镀后顺应性良好。

6) 用于模具的修理与防护。另外也能实现模具刻字、去毛刺等。

7) 通常槽镀难于完成的作业，如盲孔、超大件，难拆卸零件等，也常用来修补铬层。

8) 电气触点、接头、开关的保护及维修。

(四) 电刷镀的工艺装备

1. 电刷镀专用电源

专用电源是电刷镀技术的主要设备。目前已研制成功并投放市场的有SD-10（原TD-10，下同）、SD-30、SD-60、SD-100、SD-150、SD-300等。

电源的主电路供给无级调节的直流电压和电流，控制线路中具有快速过电流保护装置、安培小时计及各种开关仪表等。

四种常用电源的主要技术指标见表3-3-1。其中中小件适用的SD-60专用电源的外特性是微降而平硬的。其常见故障及排除方法见表3-3-2。

表3-3-1 四种刷镀电源主要技术指标

序号	项 目	SD-10型	SD-30型	SD-60型	SD-150型
1	输入	单相交流220V ±10%, 50Hz			
2	输出	直流0~20V 0~10A 无级调节	直流0~35V, 0~3A, 0~30A, 无级调节	直流0~40V, 0~6A, 0~60A, 无级调节	直流0~20V, 0~75A, 0~150A
			交流0~35V, 0~20A (外接电流表控制)	交流0~40V, 0~40A (外接电流表控制)	无级调节
3	刷镀层厚度 监控装置(安培小时计)	机械计数, 无设定, 分辨率0.001Ah, 电流大于0.5A开始计数, 电流大于1A计数误差不大于±10%	六位荧光数码管显示, 分辨率0.001Ah, 电流大于0.6A开始计数, 电流大于2A计数误差不大于±10%	六位荧光数码管显示, 分辨率0.001Ah, 电流大于1A开始计数, 电流大于2A计数误差不大于±10%	机械计数或六位荧光数码管显示, 分辨率0.001Ah, 电流大于2A开始计数, 电流大于10A计数误差不大于±10%
4	环境温度	-10~+40°C			
5	快速过电流 保护装置	超过额定电流的10%时动作, 切断主电流时间0.01s, 不切断控制电路	超过额定电流10%时动作, 切断主电路的时间接近0.02s, 不切断控制电路	超过额定电流的10%时动作, 切断主电路时间0.035s, 不切断控制电路	
6	工作制式	间断: 在额定电流下可连续工作两小时 连续: 在额定电流的50%以下可连续工作			
7	温 升	<75°C			
8	体积(m³)	0.14×0.28×0.32	0.43×0.33×0.34	0.56×0.56×0.36	0.495×0.5×0.77
	重量(kg)	10	32	80	100
9	适 用	电子、仪表及小件刷 镀	小中零件的刷镀 阳极与工件一次性接触 面积S≤1dm²	中等零件刷镀阳极与工件 接触面积S≤2dm²	大件刷镀 阳极与工件接触面积 S≤4dm²

表3-3-2 SD-60型刷镀电源常见故障及排除方法

故 障 现 象	故 障 原 因	排 除 方 法
1.控制电源不通, 所有指示灯不亮	1.输入电源未接通 2.控制电源熔断丝断路	1.设法接通电源 2.检查输入电缆线 3.更换0.5A管状熔断丝
2.主电路不通, 无直流输出电压	1.主接触器(大功率继电器、中间继电器)发生故障 2.主回路熔断丝断丝	1.检查修理更换 2.更换熔断丝
3.主电源通, 但空载直流电压不到40V	1.一只或二只整流管击穿, 击断 2.全波整流管一边断线	1.更换新管 2.接通线路
4.主电源接通后即断开	过电流调整不当	重新调整

(续)

故 障 现 象	故 障 原 因	排 除 方 法
5. 安培小时计有显示，但不计数	1. $V-f$ 转换电路有故障 2. 线性放大器有故障 3. 计数板有故障	1. 检查更换 2. 更换新管 3. 更换新计数板
6. 快速过电流保护装置不动作	1. 过电流保护环节有故障 2. 过电流定值太高	1. 更换该环节 2. 调整动作电流值
7. 个别数码管不显示，不清零	该数码板故障	更换该板
8. 输出电压不稳	1. 调压器有污物 2. 调压器碳刷磨损	1. 清洗 2. 更换新刷
9. 镀层的实际厚度与设定厚度不符	1. 可能安培小时计不准确 2. 其它非电源设备的因素	1. 校正电位器 2. 对症分析有关部分
10. 数码管计数，进位紊乱	1. 计数板故障 2. 拨码盘上二级管焊错，损坏	1. 更换新计数板 2. 更正及更换二极管

2. 电刷镀溶液

根据用途，电刷镀溶液分为表面准备溶液、沉积金属溶液，去金属溶液和特殊用途溶液。用量最大的是表面准备溶液和沉积金属溶液。

(1) 表面准备溶液 镀层是否有良好的结合力，工件表面的制备情况是个关键。为此，电刷镀技术采用专用的溶液，通电进行电-化学处理，再经擦拭的机械作用，可以得到近乎“化学净”的表面。

常用的表面准备溶液有四种：电净液、1号活化液、2号活化液、3号活化液。其性能和用途见表3-3-3。另外4[°]活化液也时常使用。

(2) 金属刷镀溶液(沉积金属溶液) 沉积金属溶液与槽镀液不同，主要的区别是：1) 金属离子浓度高，故沉积速度快；2) 不是无机盐的简单混合液，刷镀液是络合物的水溶液，稳定，不需要中间调节；3) 无氯化物，使用温度区域宽，可长期放置。

常用刷镀液性能用途及工艺参数分别见表3-3-3和表3-3-4。

此外还有金镀液、银镀液、铂镀液、镉镀液、铬镀液。继之又研制开发了国外尚无的镍铁钴和镍铁钴等镀液。为便于运输，各镀液的固体制剂也被开发出来了。

表3-3-3 常用电刷镀溶液的性能和用途

溶液名称	代 号	主 要 性 能	主 要 用 途
表面准备溶液	电净液 SGY-1	无色透明，碱性， $pH=12\sim13$ ，手摸有滑感， -10°C 不结冰，经 -40°C 冰冻试验，回升到室温性能不变	具有较强的去油作用和轻度去铁锈能力，用于各种金属材料电解去油
	1 [°] 活化液 SHY-1	无色透明，酸性， $pH=0.8\sim1$ ，经 -40°C 冰冻试验，回升到室温性能不变	适用于不锈钢、铬镍合金、铸铁、高碳钢等去除金属表面氧化膜
	2 [°] 活化液 SHY-2	无色透明，酸性， $pH=0.6\sim0.8$ ，经 -40°C 冰冻试验，回升到室温后性能不变	适用于铝及低镁的铝合金、铜、铁、不锈钢等去除表面氧化膜
	3 [°] 活化液 SHY-3	淡兰色，弱酸性， $pH=3\sim5$ ，经 -40°C 冰冻试验，回升到室温后性能不变	适用于去除经1 [°] 或2 [°] 活化液活化的碳钢和铸铁表面残留的石墨(或碳化物)或者是不锈钢表面的污物
	4 [°] 活化液 SHY-4	无色透明，酸性， $pH>1$	适用于纯态的铬、镍或铁素体钢的活化

(续)

溶液名称	代号	主要性能	主要用途
沉积金属溶液	特殊镍	深绿色, pH = 0.9~1, 有较强烈的醋酸味, 在 -5°C 左右可能有结晶析出, 加热后, 结晶重新溶解, 性能不变。使用时加热到 50°C	适用于铸铁、合金钢、镍、铬及铜、铝等材料的过渡层和耐磨表面层
	快速镍	兰绿色, 中性 pH = 7.5~8.0, 略有氯气味	刷镀层具有多孔倾向和良好的耐磨性, 在铁、铝、铜和不锈钢上都有较好的结合力, 用来恢复尺寸和作耐磨层
	低应力镍	深绿色, 酸性, pH = 3~3.5 有醋酸气味。在 5°C 左右可能有结晶析出, 加热后结晶物溶解, 溶液性能不变。使用时加热到 50°C	刷镀层组织致密孔隙少, 镀层内具有应力, 可用作防护层和组合镀层的“夹心层”
	镍铬合金	深绿色, 酸性, pH = 1.8~2, 有轻度醋酸气味。在 -5°C 左右可能有结晶析出, 加热后结晶物溶解, 溶液性能不变。使用时加热到 50°C	刷镀层较致密, 耐磨性很好, 具有一定的耐热性, 可用作耐磨表面层。不能沉积过厚
沉积金属溶液	镍钴合金	绿褐色, 酸性, pH = 2, 有醋酸味	刷镀层耐磨性好, 致密, 具有良好的导磁性能
	酸性钴	红褐色, 酸性, pH = 2, 有醋酸味	镀层致密, 在铝、钢、铁等金属上具有良好的结合强度。作过渡层。具有良好的抗粘附磨损的性能和导磁性能
	快速铜	深兰色, 酸性, pH = 1.2~1.4, 溶液的冰点在 -16°C 左右。恢复到室温后性能不变	适用于镀厚及恢复尺寸。不能直接在钢铁零件上刷镀, 需加过渡层, 变载荷的工况禁用
	碱铜	紫色, 碱性, pH = 9~10, 溶液在 -21°C 左右结冰, 回升到室温后性能不变	刷镀层组织致密, 孔隙率小, 在铜、铸铁、铝、铜等金属上有很好结合强度。主要作过渡层和防渗碳、防氮化层、改善钎焊性的镀层和抗粘附磨损的镀层等
沉积金属溶液	厚沉积铜	兰紫色, 中性, pH = 7~8	镀层厚度增厚时, 不产生裂纹, 用于恢复尺寸和修补擦伤
	酸性锡	无色透明, 酸性, pH = 1.2~1.3	沉积速度快, 结合强度高, 用于恢复尺寸和防氮化层, 减磨层, 防护层等
	酸性锌	无色透明, 酸性, pH = 1.9~2.1	沉积速度快, 耐蚀性好, 用于恢复尺寸和防腐镀层
	碱性铜	淡黄色, 碱性, pH = 9~10, 要求密封存放	沉积速度快, 致密, 结合力好。用于防海水腐蚀, 抗粘附磨损密封, 润滑等

3. 镀具

刷镀笔是电刷镀的主要工具。它由导电手柄和阳极组成。目前生产有五种常用型号的刷镀笔。此外新开发的还有修复划伤、狭小沟槽及窄面棱角的铂铱合金不溶性阳极。

常见刷镀笔结构见图3-3-2至图3-3-5, 导电柄及阳极型号等参见表3-3-5和表3-3-6。

4. 辅具和辅助材料

(1) 转胎 用以夹持工件, 保证刷镀层均匀。转胎应能调节转速(0~600 r/min), 并带有尾架顶尖, 一般可利用旧车床代替。

(2) 镀液循环泵 连续供给刷镀液, 以减少辅助时间。现研制成功的有 SYB-5 和 SYB-15, 参见表3-3-7。

表3-3-4 常用刷镀溶液的主要工艺参数

溶液名称	颜色	pH值 (36℃)	金属离子含量 (g/L)	金属镀度 (g/cm³)	适用电压(V)				极性要求	合适的工件阳极相对速度 (m/min)	耗电系数 A·h/(dm²·μm)	单镀层的安全厚度 (mm)	镀层硬度	
					刷 镀 笔									
					SDB-1	SDB-2	SDB-3	SDB-4						
表面准备溶液	电净液	无色	>11						6~16	正极性	4~15			
	1号活化液	无色	<2						6~16	正或负	4~15			
	2号活化液	无色	<2						6~15	负极性	4~15			
	3号活化液	浅绿色	3~5						10~25		4~15			
沉积金属溶液	快速镍	兰绿色	7.5	50	8.8	8~15	12~18	15~20	8~15	正极性	6~35	0.1132	0.25	500HBW
	特殊镍	深绿色	<2	70	8.8	10~15	12~18	15~20	10~15		6~20	0.245		500HBW
	低应力镍	绿色	3~3.5	75	8.8	6~12	8~15	15~20	6~12		6~20	0.21	0.03	350HBS
	镍铬合金	深绿色	2~3	95	9	6~12	8~15	12~20	6~12		6~20	0.21	0.13	750HBW
	高速钢	深兰色	1.5~2.5	85	8.9	4~12	8~15	12~18	4~12		10~40	0.095	0.13	300HBS
	碱铜	兰紫色	9~10	40	8.9	6~12	8~15	12~18	6~12	负极性	6~20	0.18	0.13	250HBS
	酸性钴	暗红	2	73	8.9	10~12	12~15	12~18	10~12		3~8	0.245		600HBW
	酸性锡	无色	1.3	130	7.3	6~10	8~12	10~15	6~10		15~40	0.07		1HBS
	酸性锌	无色	1.9~2.1	136	7.2	6~12	8~15	12~18	6~12		10~30	0.0755	0.13	70HBS
	碱性铜	黄棕色	9~10	70	7.3	10~12	12~15	15~18	10~12		10~20	0.071		1HBS

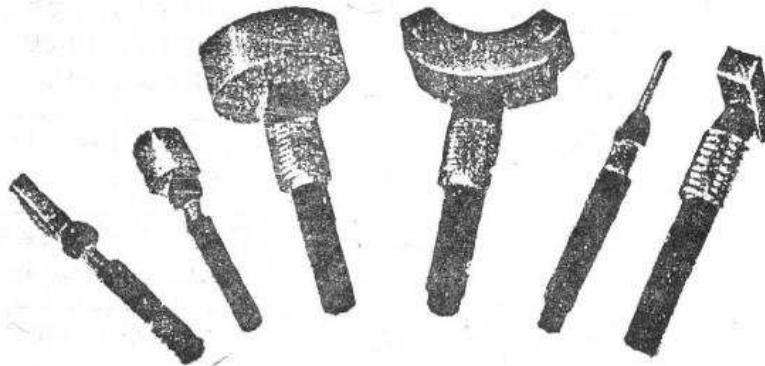


图3-3-2 刷镀笔

(3) 医用脱脂棉 包裹阳极、储存镀液、防止阳极与工件产生电弧以致灼伤工作面、过滤掉石墨粒及盐类。工业脱脂棉因含糊精、易污染镀液，不宜使用。

(4) 涂棉套管 包敷在棉花外面，提高耐磨性。成分为60%涤40%棉。包裹时注意外涂内棉用于硬镀层的刷镀；外棉内涤用于软镀层（如钢）的刷镀。常用针织涤棉套管规格有φ20, 40, 60,

80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300 mm。

尼龙套虽然耐磨，但是在高温时容易溶解到含有冰乙酸的镀液中而污染镀液，使镀层龟裂，不能使用。

(5) 塑料盘、挤压瓶及烧杯 盛装和回收镀液、冲洗工件、加热镀液用。

(6) 油石、刮刀和成型小砂轮 清整工件表

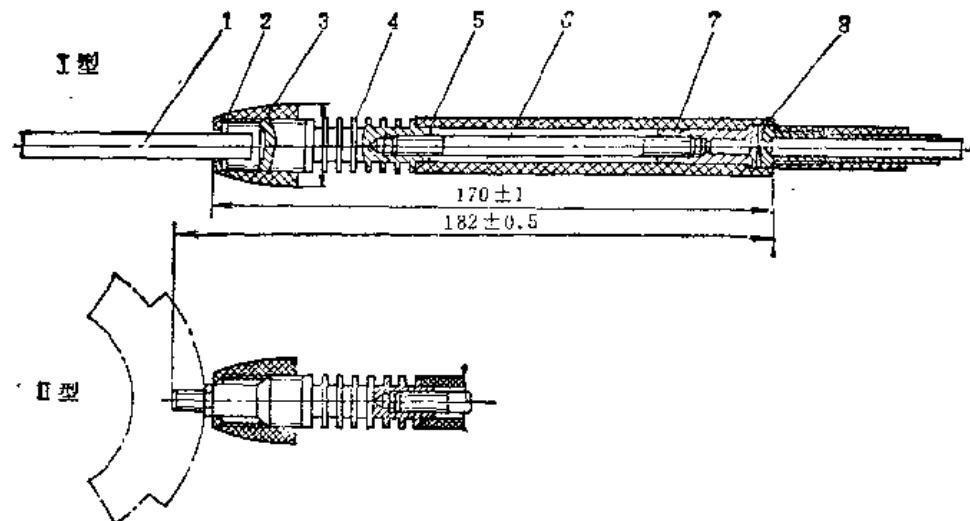


图3-3-3 SDB-1型导电柄
1—阳极 2—“O”型密封圈 3—锁紧螺母 4—柄体 5—尼龙手柄 6—导电螺栓 7—尾座 8—电缆插头

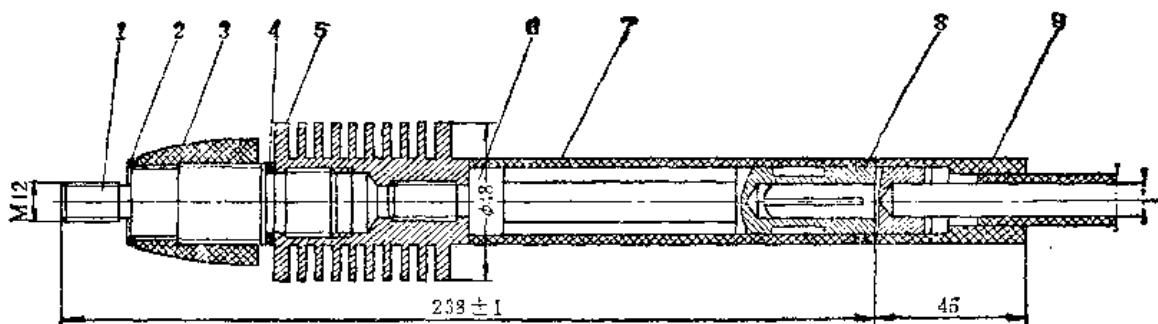


图3-3-4 SDB-3型导电柄
1—连接体 2, 4—“O”型密封圈 3—锁紧螺母 5—散热体 6—连接杆 7—尼龙手柄 8—尼龙螺母
9—电缆插头

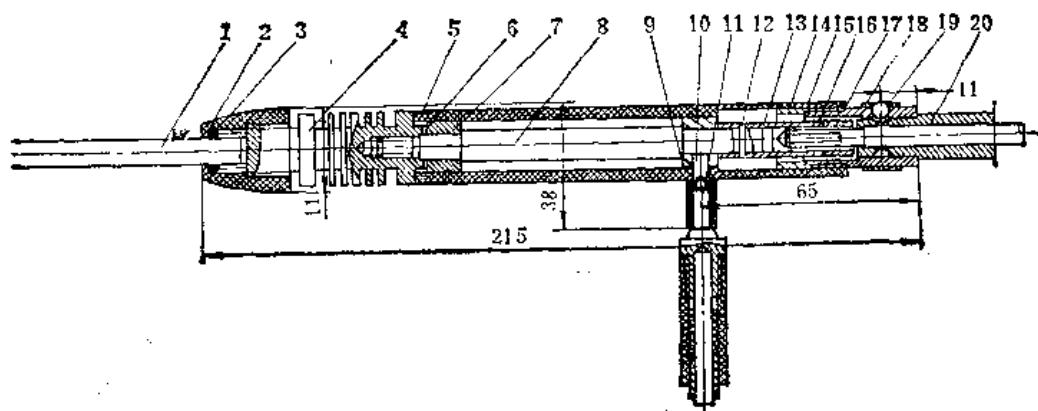


图3-3-5 SDB-4型导电柄
1—阳极 2—锁紧螺母 3—“O”型密封圈 4—连接体 5—尼龙手柄 6—垫圈 7—滑动轴承
8—旋转轴 9—绝缘套管 10—电缆插座 11—电缆插头 12, 14, 16—空芯铆钉 13—尼龙扭矩管
15—螺纹套管 17—连轴接头 18—弹簧管 19—钢球 20—转动软轴

表3-3-5 各种导电柄型号和特点

型 号	适用电流 (A)	特 点
SDB-1(Ⅰ)	25	压入式
SDB-1(Ⅱ)	25	拧入式M6
SDB-2	50	拧入式M10
SDB-3	90	拧入式M12
SDB-4	25	旋转式M16
SDB-5	150	拧入式M20

面用。油石不得浸泡在油中，可浸泡在水或镀液中。 200^* 金相水磨砂纸必须常备。

(7) 涤纶胶纸和绝缘漆 保护工件，屏蔽工件不需刷镀处，以防污染镀液。

(8) 带软轴的旋转台 刷镀大件时，驱动刷镀笔作相对于工件的圆周运动，转速 $0\sim 600\text{ r/min}$ 。

(9) 捆扎绳 捆绑阳极包套，有空芯塑料绳或橡皮筋。

上述辅具中，近两年已有新产品供应。如转

表3-3-6 各种石墨阳极型号、尺寸、适用范围

型 号	特 征 尺 寸 (mm)		配用导电柄	电 流 (A)	适 用 范 围
	d	B			
石墨 圆棒型	CDY4×50	4	50	SDB-1(Ⅰ)	5 小平面
	CDY6×70	6	70	SDB-1(Ⅰ)	7 小内孔
	CDY8×75	8	75	SDB-1(Ⅰ)	10 棱角
	CDY10×80	10	80	SDB-1(Ⅰ)	15 划伤凹坑
石墨 半圆型	CB30×30	30	30	SDB-1(Ⅱ)	15 内圆面
	CB40×40	40	40	SDB-1(Ⅱ)	15 平面
	CB50×50	50	50	SDB-1(Ⅱ)	20
	CB80×60	80	60	SDB-2	30
	CB100×60	100	60	SDB-2	50
	CB150×60	150	60	SDB-3	60
螺母 圆柱型	CDL15×90	15	90	SDB-1(Ⅱ)	10 较深内孔及局部平面，中型和大型内孔平面及孔的底面和棱面
	CDL20×90	20	90	SDB-1(Ⅱ)	15
	CDL25×90	25	90	SDB-1(Ⅱ)	20
	CDL30×35	30	35	SDB-1(Ⅱ)	20
	CDL40×50	40	50	SDB-2	25
	CDL50×50	50	50	SDB-2	30
	CDL75×50	75	50	SDB-2	30
	CDL100×50	100	50	SDB-3	50
	CDL125×60	125	60	SDB-3	60

(续)

型 号	特征尺寸 (mm)		配用导电柄	电流 (A)	适用范围
	d	B			
CY40×25	40	25	SDB-1(Ⅰ)	15	各种轴类 套环的外圆
CY60×30	60	30	SDB-1(Ⅱ)	30	
CY80×40	80	40	SDB-2	40	
CY100×50	100	50	SDB-3	50	
CY120×70	120	70	SDB-3	60	
CY200×100	200	100	SDH-5	100	
CY200×200	200	200	SDE-5	150	

型 号	特征尺寸 (mm)			配用导电柄	电流 (A)	适用范围
	L	B	H			
CP40×35×20	40	35	20	SDB-1(Ⅱ)	20	各种平面
CP60×45×20	60	45	20	SDB-2	30	
CP80×50×25	80	55	25	SDB-2	40	
CP120×65×30	120	65	30	SDB-3	60	
CF20×40×25	20	40	25	SDB-1(Ⅱ)	20	
CF20×80×25	20	80	25	SDB-1(Ⅱ)	25	
CF25×120×25	25	120	30	SDB-2	50	

不溶性金属阳极(铂——铱合金阳极)

型 号	特征尺寸 (mm)				配用导电柄	电流 (A)	适用范围
	d	L	B	H			
PD0.6×50	0.6	50			SDB-1(Ⅰ)	5	凹坑深孔窄面 棱角划伤
PD1.5×50	1.5	50			SDB-1(Ⅰ)	5	
PD2.5×50	2.5	50			SDB-1(Ⅰ)	5	
PP0.5×3×50		50	0.5	3	SDB-1(Ⅰ)	5	小平面
PP1×6×50		50	1	6	SDB-1(Ⅰ)	5	

表3-3-7 电刷镀液供给泵性能表

指 标	型 号	
	SYB-5	SYB-15
电 压 (V)	360	360
流 量 (L/min)	0—5连续可调	0—15连续可调
扬 程 (m)	3	3
最 大 溶 液 量 (L)	4	20
最 小 溶 液 量 (L)	<0.8	<0.8
用 途	配SD-30 SD-60 刷镀设备	配SD-150型 刷镀设备

胎、带软轴的旋转胎、输液泵、清水泵连同刷镀电源合并一起，命名为刷镀机(SDJ)，也有定点厂家生产。医药棉和针织涤棉套管也有了合二而一的新产品(TD-A型绒棉涤针织包套)。该产品厚度均匀，不用棉花、耐磨，可反复使用，提高沉积速度10%。

(五) 电刷镀工艺

电刷镀工艺包括两大部分：工件表面准备阶段和电刷镀阶段。宜把机械准备、电净、活化称为工件表面准备阶段；而把刷镀过渡层和工作层称为电

刷镀阶段。其具体内容分述如下：

(1) 机械准备 工作内容包括清整工件表面至光洁平整、如刮油去锈丙酮擦洗、剔除疲劳层、拓宽尖细狭缝、去掉飞边毛刺，以免划破笔套。预制键槽及油孔的塞堵；如需机械加工时，应找准正磨圆时注意遵循“越少越好、越光越好”的原则，即在满足工件表面准备的前提下，去掉的金属越少越好（以节省镀液）、磨得越光越好（以提高镀层的结合力），粗糙度最大不得高于 $R_a 6.3 \mu\text{m}$ ，须知，每刷镀 0.1mm 厚的镀层，其粗糙度大约提高一级。刷镀区两侧用涤纶胶纸等屏蔽保护等。

(2) 电净 在上述清理的基础上，还必须进一步用电净液(SGY-1)继续通电处理工件表面。通电使电净液成分分离解，形成气泡，撕破工件表面油膜，达到去油的目的。去油效果的标准是，冲水时，水膜均匀摊开。注意电净时间尽量短，以减少工件渗氢。电净时一般为正极性进行。所谓正极性即工件接负极，刷镀笔接正极；反之，工件接正极，笔接负极称为负极性。只有对疲劳强度要求甚严的工件，才用负极性电净，旨在减少氢脆。电净时电压为 $10\sim 15\text{V}$ 。

(3) 活化 根据材料的不同而选用不同的活化液。活化的实质是除去工件表面的氧化膜，使工件表面漏出坚实可靠的金属基体，为镀层与基体之间的良好结合创造条件。活化工序与低温镀铁中的刻蚀工序目的相同。

常见的中碳钢、高碳钢的活化过程是：第一次活化，用2号活化液(SHY-2)，反极性， $6\sim 12\text{V}$ ， $3\sim 15\text{s}$ ，这时工件表面呈均匀灰黑色，水冲至

净。第二次活化，用3号活化液(SHY-3)，反极性， $11\sim 18\text{V}$ ， $10\sim 20\text{s}$ ，这时工件表面呈均匀银灰色，水冲洗净残留活化液。上面提到的活化时间为刷镀笔与工件单位表面接触的净时间。

(4) 刷过渡层 在活化的基础上，紧接着就刷镀过渡层。常用的过渡层镀液有特殊镍(SDY101)和碱铜(SDY403)。碱铜作过渡层用于改善钎焊性或需防渗碳、防氮化的工件，用于需要具有良好的电气性能的工件，碱铜过渡层限于 $0.01\sim 0.05\text{mm}$ 厚。其余建议一律采用特殊镍作过渡层，特殊镍镀层结合力好，硬度较高，有时也用做工作层。用做过渡层时，为节约成本起见，特殊镍只需刷镀 $2\mu\text{m}$ 厚即可。

刷过渡层时，用正极性， 15V ，阳极与阴极相对运动速度为 15m/min 。一般最好先无电擦拭 $3\sim 5\text{s}$ ，然后再通电擦刷，这样效果才比较理想。

过渡层的作用主要是提高镀层与基体的结合强度及稳定性。另外也有使工艺划一的作用，即把无数不同材料用不同活化方法进行表面准备之后，基本划归为镍或铜的过渡层上来，使工艺简化。

(5) 刷工作层 根据工况选择工作层并刷镀到所需厚度。若在刷镀过渡层特殊镍的基础上，刷镀工作层快速镍(SDY102)时，不必水冲，先无电擦拭SDY102 $3\sim 5\text{s}$ 后，极性及电压不变，转速不变即可通电接着刷镀。常用材料电刷镀工艺参见表3-3-8。

(6) 电刷镀后的收尾处理 除去保护阴极的屏蔽物，清洗工件上残留镀液、防锈处理等，需要时送机械加工。注意把工件边缘和孔槽边缘倒角。

表3-3-8 常用材料表面处理及刷镀规范

金属种类	工件表面准备阶段						电刷镀阶段						
	电净		工序间处理	活化		工序间处理	刷镀过渡层			工序间处理	刷镀工作层		
	溶液	规范		溶液	规范		溶液	规范	工件表面情况		溶液	规范	工件表面情况
低碳钢	正极性 12~18V	水膜均匀擦开	自来水冲洗	2号活化液	负极性 6~12V	均匀 银灰色	自来水冲洗	特殊镍	先进行无电擦刷；正极性 14~15V $v = 15\text{m/min}$	淡黄色	自来水冲洗	先无电擦试； 正极性 14~15V $v = 15\text{m/min}$	均匀 淡灰色
	正极性 10~15V			2号活化液	负极性 6~12V	均匀 灰黑色			镀层 $\delta = 2\mu\text{m}$				
				3号活化液	负极性 11~18V	均匀 银灰色							

(续)

金属种类	工件表面准备阶段						电刷镀阶段							
	电净			工序间处理	活化			工序间处理	刷镀过渡层			工序间处理		
	溶液	规范	工件表面情况		溶液	规范	工件表面情况		溶液	规范	工件表面情况			
铝及铝合金	正极性 10~15V			2号活化液	负极性 12~15V	均匀灰色		特殊镍或碱铜	正极性 8~15V $v = 15 \text{ m/min}$	淡黄色或玫瑰色		快速镍或高速铜	正极性 14~15V $v = 15 \text{ m/min}$	淡灰色或铜紫色
镁及铜合金	正极性 8~15V	水膜均匀摊开	自来水冲洗				自来水冲洗				自来水冲洗			
镁、铬、不锈钢	正极性 10~15V			2号活化液	负极性 10~18V	先绿后灰色		特殊镍	正极性 14~15V $v = 15 \text{ m/min}$	淡黄色		快速镍	先无电擦拭；正极性 14~15V $v = 15 \text{ m/min}$	淡灰色
				1号活化液	负极性 10~12V	均匀灰色								

(六) 工艺说明

(1) 无电擦拭的作用 ①除去工件表面在工序间产生的微量氧化膜；②使工件表面的pH值与刷镀液一致；③将金属离子涂布到工件表面上。该工序对质量至关重要，但亦非随意滥用，应试验后决定。

(2) 电净、活化的目的是彻底除油除锈，决不可敷衍。电净的标准是水膜均摊，活化的标准是指定颜色，未达到标准不可存侥幸心理而马虎过去，那样，势必影响质量。

(3) 电净、活化清洗表面十分彻底，对粘接修复等亦可借鉴。即涂胶前用此工件表面准备的工艺方法，效果甚佳。

(4) 各工序宜连续进行，中间停歇则出现干斑会造成镀层剥离。因此，自始至终要使待镀及正在刷镀的工件表面保持湿润。一旦出现干斑，则应从头开始。

(5) 刷镀工艺温度 镀液预热60℃为宜，工件温升不要超过70℃。冬季气温低时，可温水浸泡工件加温；夏季太热，应勤换刷镀笔等。

(6) 镀键堵孔 镀键堵孔材料可用石墨、胶木，杉木等，不要用污染镀液的材料，如铅、松木；安装键堵的时间应在电净活化之后，键和堵应在镀液中事先浸泡。

(7) 阳极与阴极(工件)的相对运动参数

1) 相对速度 工件转速(或刷镀笔速度)即阳-阴极的相对线速度依镀液不同而不同。镍镀层合适的阳-阴极相对速度为6~20m/min，为提高生产率，通常取15m/min。换算转速公式见(13)。

2) 接触压力 接触压力不可过大或过小。过大的压力会挤掉阳极表面的溶液，使阳极与工件表面得不到新鲜溶液产生浓差极化；接触压力太小即不产生回路。所以，要保持阳极与工件轻轻均匀接触，使镀液在接触面上渗流即为适宜。

3) 接触面积 阳极与工件的接触面积的比例以取被刷镀的总面积的1/3或1/4为宜。如工件太大，可多笔同步刷镀，如保证不了接触面积的比例，则靠调整电压电流来调解。

4) 相对运动形式 原则是保持被刷镀面积上各处运动速度相等，其运动形式有三：①阳极动，阴极不动；②阴极动，阳极不动；③阳极与阴极皆动。

(8) 阳极的包裹 包裹前，将阳极先在清水中浸泡一下，敷一层高效滤纸，然后包裹医用脱脂棉，最后套以针织涤棉套管并扎紧。包裹的原则是薄、匀、紧。单面包层厚度总值为5~8mm。厚度愈大，沉积速度愈慢。

(9) 镀层的推荐厚度 合理镀层厚度(半径方向上的厚度)值应在0.3~0.5mm以内。超厚则质量难以保证，并且不经济。

如修复镀层需很厚时，建议采用组合镀层，以减少镀层内应力。推荐的镍组合镀层如图3-3-6。

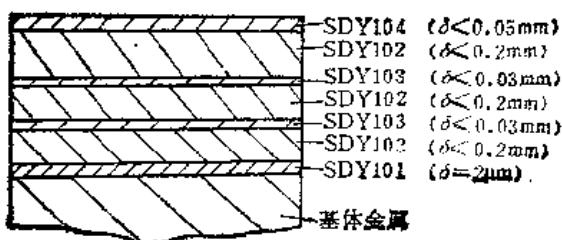


图3-3-6 镍组合镀层示意图

镍组合镀层的结合强度高，镀层内应力低，生产率高，表面耐磨性好。

(10) 镍刷镀层硬度较高，折合为39~53HRC。耐磨性也很好。常用镍镀层与常用材料的耐磨性递减顺序是：镍钨合金(SDY104)、特殊镍(SDY101)、快速镍(SDY102)、45钢淬火、20Cr渗碳淬火、45钢调质。镍镀层硬度值参见表3-3-9。

(11) 测量镀层厚度 不推荐用千分尺。因为千分尺测量镀层厚度时，要中断刷镀，要增加辅助时间。中断刷镀则镀层易氧化，而且，测量卡脚也是一个污染源。另外，停镀后立即测量，还有个热膨胀量在内，测量值也不精确。

用电源上的安培小时计来估测镀层厚度简洁方

便，误差小(仅为0.005~0.01mm)。所用电量与镀层厚度的数字换算的方法见(13)。计算好折成数字进行设定储存，届时蜂鸣器发声则告镀层厚度已满足设定要求。这对于镀后不加工的零件尤为便利。

(12) 镍镀层硬度虽高，但采用TR14车刀可以切削，用绿碳化硅砂轮可进行磨削。

(13) 电刷镀工艺中的几个参数的计算

1) 转速的计算

$$n = \frac{v}{\pi d}$$

式中 n —— 转速(r/min)；

v —— 阳-阴极相对线速度，取15m/min；

d —— 工件直径(mm)；

2) 刷镀液用量的计算

$$L = \frac{S\delta\gamma K}{M} \times 10$$

式中 L —— 刷镀液用量(mL)；

S —— 刷镀面积(dm²)；

δ —— 镀层厚度(μm)；

γ —— 镀层金属密度(g/cm³)；

M —— 镀液中金属的含量(g/L)查表3-3-4；

K —— 损耗系数 取 $K = 1.5 \sim 2$ 。

3) 刷镀用电量的计算

$$Q = C\delta SK'$$

式中 Q —— 刷镀用电量(A·h)；

表3-3-9 不同温度加热冷却后镍刷镀层的硬度

镍刷镀层	硬度	室温	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
特殊镍	HV	386	551	512	502	446	371	242
	HRC	39.5	51	48.2	47.8	44	38.2	22.8
快速镍	HV	549	596	515	329	286	242	186
	HRC	50.7	53.2	48.5	33.8	29.3	23	10.3
低应力镍	HV	571	571	506	530	442	337	238
	HRC	51.7	51.7	48.2	49.6	43.8	34.6	22.8
镍钨合金	HV	561	621	592	565	512	463	381
	HRC	50.8	54.4	53	51.6	48.4	43.5	39

注：1. 在MMT-3显微硬度计上测定荷重50g。

2. 真空退火，真空度 1×10^{-5} Torr 保温1小时。

3. 表内数据为5~9次的平均值。

C ——镀液的耗电系数 $Ah/(dm^2 \cdot \mu m)$ 查表3-3-4;

S ——刷镀面积 (dm^2);

δ ——镀层厚度 (μm);

K' ——损耗系数 取 $K' = 1.1 \sim 1.2$;

(七) 镀层剥离的原因及防止措施

造成镀层剥离的原因和防止措施大致有以下几个方面:

(1) 工件和镀液温度太低 工件和镀液温度太低, 而选用的电压、电流又太大, 造成镀层应力过大, 开裂剥离。该情况冬季发生的较多。

措施: 用温水浸泡加热中小件, 镀液加热到 $50^\circ C$, 起镀时用低电流刷镀, 然后逐渐增大电流。

(2) 工件和镀层氧化 由于电流大、活化时间长, 造成工件温升大, 使工件表面产生氧化层, 工序间停顿时间太长, 极性用错, 以及工件太大使阳极与其面积比例甚微等, 均使工件表面产生氧化层。发现氧化层后应立即清除, 否则, 便会留下隐患。

电刷镀铜层时, 最易产生氧化, 形成褐色表面。

措施: 针对不同的产生原因, 分别处理。工序之间紧凑不中断; 勤换笔防止工件温升太大; 极性一旦使用错误, 一定要重新活化; 镀铜时发现褐色表面, 一定打磨掉再刷镀; 工件大, 可多笔同步刷镀, 或另外用人工浇湿待镀表面。

(3) 电流脉冲太大 夹持偏心或阳极与工件周期性的在某固定部位挤压接触, 产生较大电流脉冲; 镀平面时, 因操作不当, 总停留在一处或总在一处起镀, 使工件多次承受大电流脉冲; 停车或起车时, 阳极与工件并未脱离也能造成大的脉冲电流。

措施: 针对不同的产生原因, 采用不同的措施。

(4) 表面活化错误或原疲劳层未除去 由于种种原因工件表面出现异种材料, 例如镍层-碳钢等, 这时一定按镍的活化方法处理表面。

含钼、钛量高的钢或含镁量高的铝合金应研究新的活化方法。

组合镀层的层间活化质量一定要保证。无论何种母材, 一旦用镍作过渡层, 那么以后的活化应按镍层处理。镀层达到一定厚度后, 表面较粗糙, 应

该使用磨石蘸上镀液打磨, 然后水冲洗至净, 再用1#活化液(SHY-1)正极性活化, 在通电刷镀前, 先无电擦拭, 然后再按规范刷镀。

(5) 工件-阳极相对运动速度低 在刷镀有划痕、擦伤、凹坑、内角等局部缺陷的工件时, 由于阳极移动受限制, 工件-阳极相对运动速度低, 产生过热、粗晶, 结合力差缺陷, 容易造成镀层剥离。

措施: 使用SDB-4型旋转刷镀笔或其它方法刷镀。刷平面时, 采用手动刷镀, 速度越快越好, 注意全面俱到、均匀沉积, 以免形成干斑。

(6) 阳极混用, 造成交叉污染 如果镀锡的笔略经清洗就用来刷镀镍, 势必有残留锡镀液造成镍镀液污染, 产生镀层剥离。所以, 阳极一定要专用, 并分别清洗, 标明存放。

(7) 遮蔽错误 采用铅、尼龙做键堵孔塞, 则受热后会污染镀液, 影响镀层结合强度。如使用酚醛清漆遮蔽, 漆膜受热或在酸碱镀液及包套摩擦力作用下, 也会污染镀层和镀液。

(8) 使用尼龙包套 尼龙包套虽有较好的耐磨性, 但在高温下会溶解在冰乙酸等的溶液内, 造成镀液污染, 使镀层变亮, 严重时产生剥离。

(9) 铸件的疏松缺陷未处理好 铸件疏松缺陷内吸附溶液, 因急剧加热形成很大压力的气泡, 造成镀层剥离。

(10) 工件边缘未倒角 工件的边缘、键槽及小孔的边缘, 由于电流集中、电流密度较大, 致使镀层粗糙, 在搬运工件过程中, 若发生碰撞, 易造成镀层剥离。

(八) 电刷镀的应用举例

1. C650车床主轴的修复

如图3-3-7所示, 主轴材料为45钢, 淬硬45~60HRC, 大修时发现三处 $R_0.4\mu m$ 轴颈平均磨损量 $0.03 \sim 0.05 mm$ 。采用电刷镀修复工艺过程如下:

(1) 机械准备 对磨损了的三处轴颈找正磨圆, 注意尽量少去, 以节约镀液。

电刷镀操作前, 用200号水磨砂纸打磨轴颈至光, 越光越好。磨削及打磨量约 $0.025 \sim 0.03 mm$ 。

在进行电净前, 及时用丙酮擦拭待镀轴颈, 以除去油脂。

选用C630车床进行刷镀操作。事先用塑料布

将车床导轨妥善地覆盖防护起来，工件刷镀区边缘用涤纶胶纸复盖。

选用三套相应的CY(月牙)型石墨阳极，每套五块，导电柄亦相应选配，然后用药棉及针织涤棉套管包裹起来。检测刷镀笔电阻，应不大于0.5Ω。

选用SD-60(旧型号TD-60)专用电源。事先通电预热15min。检测有无故障并调好。注意：工件接负极，笔接正极。

(2) 刷镀前工艺参数的计算 计算结果见表3-3-10。

表3-3-10 C650车床主轴的刷镀工艺参数

工艺参数	轴颈		
	φ160.45	φ180.6	φ206.5
转速(r/min)	29	26	23
镀层厚度(μm)	125	120	130
过渡层用电量(A·h)	2.217	2.730	2.860
工作层用电量(A·h)	64.015	75.554	85.877
过渡层镀液用量(mL)	14.56	17.50	18.37
工作层镀液用量(mL)	1273.80	1469.96	1671.39

注：1. 镀液用量的计算值不包括浸触笔的用量。

2. 过渡层镀液用量一般较少，可不必计算。

以φ160.45轴颈为例计算如下：

1) 转数

$$n = \frac{v}{\pi D} = \frac{15 \times 1000}{3.14 \times 160.45} \approx 29(r/min)$$

为操作方便，取三轴颈的平均转数 $n = 26 r/min$ 。

2) 镀层厚度

$$\begin{aligned} \delta &= \left(\frac{|\phi_0 - \phi_1|}{n} + \delta_{加工} + \delta_{活化} \right) \times 1000 \\ &= \left(\frac{|163.75 - 163.67|}{2} + 0.08 + 0.05 \right) \times 1000 \\ &= 125(\mu m) \end{aligned}$$

式中 ϕ_0 ——设计尺寸(mm)(取锥径的中径)；

ϕ_1 ——打磨后实测尺寸(mm)；

$\delta_{加工}$ ——镀后加工余量(mm)；

$\delta_{活化}$ ——电净活化所去掉的工件厚度(mm)；

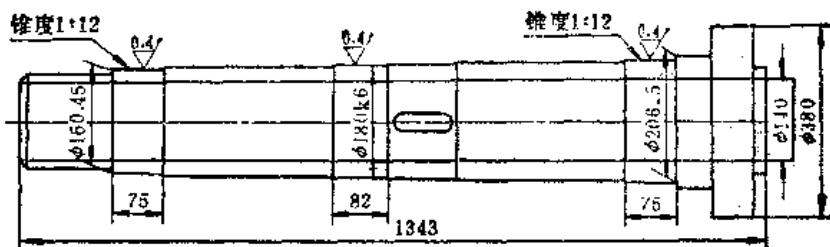


图3-3-7 C650车床主轴刷镀部位示意图

n ——几何形状系数，轴套回转件 $n = 2$ ；

3) 刷镀液需要量(如不用循环镀液泵，镀液又足够时，可免此项计算)

$$\begin{aligned} L_{SDY101} &= \frac{S \delta Y K}{M} \times 10 \\ &= \frac{3.86 \times 2 \times 8.8 \times 1.5}{70} \times 10 \\ &\approx 14.56(mL) \end{aligned}$$

式中 $S = \pi \phi_0 B = 3.14 \times 1.6375 \times 0.75 = 3.86$ (dm^2)，其余数据可查表3-3-4，下同。

$$\begin{aligned} L_{SDY102} &= \frac{3.86 \times 125 \times 8.8 \times 1.5}{50} \times 10 \\ &\approx 1273.80(mL) \end{aligned}$$

4) 用电量的计算 过渡层用电量的计算为：

$$\begin{aligned} Q_{SDY101} &= C \delta S K' \\ &= 0.245 \times 2 \times 3.77 \times 1.2 \\ &= 2.217(Ah) \end{aligned}$$

工作层用电量的计算

$$\begin{aligned} Q_{SDY102} &= C \delta S K' \\ &= 0.1132 \times 125 \times 3.77 \times 1.2 \\ &= 64.015(Ah) \end{aligned}$$

将计算结果按1Ah为1000个字换算后储存到设定装置中。

(3) 刷镀操作 按表3-3-8中的中碳钢一栏进行。镀后处理是拆除屏蔽用胶纸，然后经磨削加工至名义尺寸。

2. 修补镀铬层缺陷

图3-3-8所示的拉长淬火机的活塞杆镀铬后靠大头的一端有一段漏镀。活塞杆材料为45钢，调质HRC32左右。经测量及预留加工余量，刷镀层厚度定为0.20mm。各参数计算法同前例。

修补铬层的工艺顺序是：机械准备→电净→活化(2号活化液) $\frac{\text{负极性}}{10V, 25s}$ (均匀灰黑色)

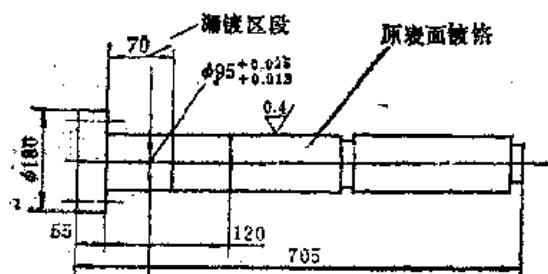


图3-3-8 拉长淬火机活塞杆

→水冲 →活化(3号活化液)
负极性 $15V 25s$ (均匀银灰色) →水冲 → [在漏镀区边缘与铬层接邻区段用小笔活化] 活化(1号活化液)
正极性 $10V 40s$ (均匀灰色) →不用水冲 特殊镍
正极性 $15V 2\mu m$ (先无电擦拭3~5s) →
快速镍 正极性 $15V$ 、至厚度 (先无电擦拭3~5s) →
水冲 →磨削加工。

修补镀铬层的要点是：原基体是什么材料则按什么材料规范活化，边缘近段材料呈异种材料时一定按镀铬层的活化方法进行。如出现有时镀不上的情况，则应采取闪镀的方法进行电刷镀，即瞬间升高电压为18~20V，闪镀一层镍以后及时恢复原来的15V电压继续刷镀，直至规定厚度。

铬镍材料的活化可采用4号活化液。也可采用下面办法进行。电净 正极性 $12V 10s$ →水冲 (水膜均匀摊开) →活化(2号活化液)
负极性 $10V 30s$ (先淡绿色，随后呈现灰色 [如果呈黑色斑点则采用3号活化液，如不呈黑色则省略3号活化液]) →水冲 →1号活化液
正极性 $10V 15s$ (颜色近于先绿后灰) →不必水冲 →(过渡层)。

3. 花键轴的修复

花键轴常见缺陷是键宽磨损 0.1~0.2mm。采用电刷镀技术修复的工艺如下：

(1) 机械准备 用细油石(不蘸油)打磨花键侧面除去毛刺；测量各键齿的宽度，每条花键的长度方向上测量不少于三处，并记录在案；用丙酮擦洗至净，用涤纶胶带粘贴在外径和底径上起防护作用。

(2) 电刷镀过程 按中碳钢材料的电刷镀工艺进行，不再赘述。最后刷镀的应是耐磨层，如镍

钨合金(SDY104)。整个刷镀过程是手工进行。

(3) 镀后处理 拆除胶带，清洗脱水，然后经修整后涂上防锈油。应该注意的是，修复应只镀积一侧键齿，另一侧磨损甚微，留做基准，不可两侧均刷镀。如果精度要求极严，刷镀时应留出磨削余量，然后进行磨削加工。

4. 夹钎镀修复导轨的划伤

修复机床导轨划伤的方法甚多，其中之一是锡铋合金钎焊修复法，但该法采用无槽化学镀铜，质量不甚理想，另外锡铋合金硬度低，甚怕刮拉，修复效果不佳。

采用夹钎镀法。修复导轨划伤效果较佳。其方法是采用电刷镀方法将划伤处镀一层结合牢靠的碱铜 ($\delta = 0.002mm$)，然后，用电烙铁 (300~500W) 按锡铋合金钎焊的工艺在碱铜表面上均匀焊一层易熔合金(锡焊料、锡铋合金焊条等均可)，以恢复尺寸，最上层(即工作层)再电刷镀一层快速镍 ($\delta = 0.05~0.1mm$)。然后用油石打磨至平。

值得指出的是，夹钎镀只适用于不以接触应力为主的低压副机构，如机床滑动导轨和滑动轴承等，其尺寸恢复层的金属强度要求不十分严格。

具体修复工艺流程是：机械准备(丙酮擦洗除油) →电净 正极性 $10V 20s$ (水冲、水膜均摊) →活化(2号活化液)
负极性 $10V 30s$ (均匀灰黑色) →水冲 →活化(3号活化液)
负极性 $15V 40s$ (均匀银灰色) →水冲 →特殊镍
正极性 $15V 2\mu m$ (注意先无电擦拭3~5s) →水冲 →碱铜
正极性 $12V 30~50\mu m$ (铜色) →水冲 →丙酮擦干 →钎焊锡铋合金(电烙铁300~500W、氯化锌焊剂、易熔合金(锡铋合金)焊条)恢复尺寸，凝固后修刮时略低于原轨平面约0.05~0.1mm →丙酮擦拭 →电净(同上) →活化(2号活化液) →活化(1号活化液)
负极性 $12V 30s$ (水冲) →活化(1号活化液)
正极性 $12V 50s$ (不用水冲) →特殊镍先无电擦拭3~5s 然后
正极性 $15V 2\mu m$ (均匀银灰色) →快速镍(先无电擦拭3~5s)
正极性 $15V$ (至尺寸恢复满足需要) →水冲 →油石打磨至要求。

5. 轴承外环的修复

电刷镀工艺基本与修复C650主轴相同，不同的是：镀层厚度计算公式中的 $\delta_{\text{加工}}$ 应取0.01mm，而 \varnothing_0 尺寸按公差带中值选取；镀后要用200#金相水磨砂纸打磨掉镀层的“虚假”尺寸，以防过盈量过大，不耐磨损。镀后轴承外环应放在防锈水中浸泡至少5min，然后取出晾干涂油供使用。

刷镀轴承时的夹持最好制备一套胎具，以免污染夹盘。如急用胎具来不及制备，可预先将车床卡盘刷一层防蚀剂，用塑料袋严密包装卡盘并不影响回转，将使卡爪与外环要有良好导电性。

值得说明的是，只有国外轴承无备件时方准应用刷镀。正常工艺应刷修与轴承外环相配合的孔，以保证互换性。