

# 金属表面处理新技术

阎洪 编著

责任编辑 谭学余

图书在版编目 (CIP) 数据

金属表面处理新技术 / 阎洪编著. —北京: 冶金工业出版社, 1996.10

ISBN 7-5024-1886-5

I.金… II.阎… III.金属表面处理-新技术 IV.TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 10107 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

河北固安印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1996 年 10 月第 1 版, 1996 年 10 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 6.75 印张; 182 千字; 210 页; 1—3500 册

18.00 元

# 目 录

<b>1 金属材料表面的功能性镀覆</b> .....	<b>(1)</b>
<b>1.1 化学镀镍的特性和应用前景</b> .....	<b>(1)</b>
1.1.1 化学镀镍层的特点和优势 .....	(1)
1.1.2 化学镀镍的基本原理 .....	(4)
1.1.3 化学镀镍的组织结构 .....	(6)
1.1.4 化学镀镍层的性能 .....	(9)
1.1.5 化学镀镍层的应用 .....	(12)
1.1.6 化学镀镍的发展趋势 .....	(17)
<b>1.2 电镀金属及合金层</b> .....	<b>(20)</b>
1.2.1 单一金属镀层 .....	(21)
1.2.2 电镀锌合金层 .....	(22)
1.2.3 电镀锡合金层 .....	(23)
1.2.4 电镀镍合金层 .....	(24)
1.2.5 电镀贵金属合金层 .....	(25)
<b>1.3 金属材料表面的非晶化处理</b> .....	<b>(26)</b>
1.3.1 非晶态合金层的制备方法和特点 .....	(27)
1.3.2 非晶态合金镀层的性能 .....	(32)
1.3.3 非晶态合金层的工业应用 .....	(35)
<b>1.4 复合镀层的性能和应用</b> .....	<b>(37)</b>
1.4.1 复合镀的特点 .....	(38)
1.4.2 复合镀层的制备 .....	(40)
1.4.3 复合镀层的沉积机理 .....	(41)
1.4.4 复合镀层的性能和应用 .....	(42)
<b>1.5 电刷镀技术及其进展</b> .....	<b>(48)</b>
1.5.1 电刷镀的特点 .....	(49)

1 5 2	电刷镀层的性能 .....	(50)
1 5 3	电刷镀技术的应用 .....	(52)
1 5 4	电刷镀技术的研究现状及发展动态 .....	(53)
<b>1.6</b>	<b>镀金和节金新技术 .....</b>	<b>(55)</b>
1 6 1	镀金层的硬度和耐磨性 .....	(56)
1 6 2	镀金层的镀层组合 .....	(57)
1 6 3	获得镀金层的新工艺 .....	(58)
1 6 4	节金和代金镀层 .....	(61)
<b>2</b>	<b>金属材料表面的高能束处理 .....</b>	<b>(63)</b>
<b>2.1</b>	<b>金属材料的激光表面改性技术 .....</b>	<b>(63)</b>
2 1 1	激光表面处理的技术特点 .....	(63)
2 1 2	激光表面处理技术 .....	(64)
2 1 3	激光表面冷覆改性技术 .....	(67)
<b>2.2</b>	<b>用电子束进行表面改性处理 .....</b>	<b>(70)</b>
2 2 1	电子束表面改性处理的特点 .....	(71)
2 2 2	电子束加热的原理 .....	(71)
2 2 3	电子束装置 .....	(73)
2 2 4	电子束对材料表面性能的影响 .....	(74)
2 2 5	电子束表面改性处理的现状与应用前景 .....	(76)
2 2 6	电子束与激光束的特征比较 .....	(78)
<b>2.3</b>	<b>离子注入在材料科学和工程中的应用 .....</b>	<b>(79)</b>
2 3 1	离子注入技术的特点 .....	(80)
2 3 2	离子注入的过程 .....	(80)
2 3 3	离子注入对材料性能的影响 .....	(81)
2 3 4	离子注入技术的工业应用 .....	(85)
2 3 5	离子注入技术的发展动向 .....	(88)
<b>3</b>	<b>金属材料表面的涂覆和热浸镀技术 .....</b>	<b>(90)</b>
<b>3.1</b>	<b>热喷涂工艺的现状和发展 .....</b>	<b>(90)</b>

3.1.1	热喷涂工艺的特点 .....	(91)
3.1.2	热喷涂方法的种类及其技术 .....	(92)
3.1.3	热喷涂涂层材料 .....	(99)
3.1.4	热喷涂涂层的性能 .....	(101)
3.1.5	热喷涂技术的应用 .....	(103)
3.1.6	热喷涂技术的发展方向 .....	(106)
3.2	<b>金属陶瓷涂层的研究与发展</b> .....	(108)
3.2.1	陶瓷涂层的特点 .....	(109)
3.2.2	制备陶瓷涂层的方法 .....	(110)
3.2.3	陶瓷涂层的性能研究 .....	(113)
3.2.4	陶瓷涂层的类型和应用 .....	(115)
3.3	<b>钢铁表面的热浸镀技术</b> .....	(118)
3.3.1	热浸镀的工艺流程 .....	(118)
3.3.2	热浸镀涂层的类型和性能 .....	(120)
3.3.3	应用前景 .....	(124)
<b>4</b>	<b>金属材料表面的气相沉积方法</b> .....	(127)
4.1	<b>化学气相沉积层的技术和应用</b> .....	(127)
4.1.1	化学气相沉积法的基本原理和特点 .....	(127)
4.1.2	化学气相沉积层的类型和工艺 .....	(128)
4.1.3	化学气相沉积新技术 .....	(130)
4.1.4	化学气相沉积的基体材料 .....	(131)
4.1.5	化学气相沉积层的性能 .....	(132)
4.1.6	化学气相沉积层的应用 .....	(135)
4.1.7	化学气相沉积技术的发展方向 .....	(137)
4.2	<b>金属表面处理中的物理气相沉积法</b> .....	(138)
4.2.1	物理气相沉积法的原理和工艺 .....	(139)
4.2.2	新型物理气相沉积层的类型和性能 .....	(144)
4.2.3	物理气相沉积层的应用 .....	(146)
4.3	<b>金刚石薄膜的研究与发展</b> .....	(147)

4.3.1	金刚石薄膜的沉积方法	(148)
4.3.2	金刚石的结构和沉积原理	(153)
4.3.3	金刚石薄膜的性能	(155)
4.3.4	金刚石薄膜的应用	(157)
<b>5</b>	<b>金属材料表面的热扩散渗入工艺</b>	<b>(160)</b>
5.1	渗碳技术	(160)
5.1.1	常规渗碳工艺	(160)
5.1.2	渗碳工艺技术的进步	(162)
5.1.3	等离子渗碳	(163)
5.1.4	钢铁渗碳过程中合金元素对碳化物形成的影响	(166)
5.1.5	渗碳钢的性能	(167)
5.1.6	稀土在渗碳工艺中的应用	(173)
5.2	渗氮技术	(174)
5.2.1	常规渗氮工艺	(174)
5.2.2	渗氮新技术	(177)
5.2.3	气氛氮势控制和渗氮复合热处理工艺	(185)
5.2.4	合金元素对氮化层组织和性能的影响	(186)
5.2.5	渗氮层的组织和性能	(187)
5.2.6	渗氮工艺技术的应用	(189)
5.3	渗硼技术	(191)
5.3.1	常规渗硼方法	(191)
5.3.2	渗硼新技术	(193)
5.3.3	渗硼层的组织和性能	(199)
5.3.4	钢的成分对渗硼层性能的影响	(201)
5.3.5	各种金属的渗硼	(204)
	<b>参考文献</b>	<b>(208)</b>

# 1 金属材料表面的功能性镀覆

## 1.1 化学镀镍的特性和应用前景

目前，金属材料在工业上的应用越来越普遍，这就要求对材料表面进行必要的改性处理。电镀等表面处理技术，虽然极大地拓宽了金属材料的应用领域，但它们也有局限性。化学镀镍层用于金属材料表面改性处理有独特的优点，引起了表面处理工作者的极大兴趣。发达国家已开辟了生产规模的化学镀镍生产线。据报道，只要预处理适当，几乎所有金属材料都能镀覆结合力良好的化学镀镍层。

近年来，化学镀镍作为一项表面处理手段越来越显示出重要的作用，应用于众多领域。一般应用化学镀镍层的强化性能，即硬度和耐磨性，还有抗腐蚀性能。化学镀镍的不断发展，归结于该技术具有良好的工艺性、镀层独特的物理、化学和机械性能。工艺设备简单，易于控制和掌握，镀层均匀平整，适合于复杂形状零件，这是电镀技术所不具备的。化学镀镍层的硬度高和耐磨性好，甚至可以同镀硬铬相比，抗蚀性优良，能耐许多介质的腐蚀，具有良好的表面防护特性。

材料的表面功能化也是化学镀镍的发展趋势，化学镀镍层具备优良的性能，经过化学镀镍的材料可用于航空、机械、电子、汽车、石油化工等许多领域。下面对化学镀镍的工艺、多功能特性、应用及其发展前景进行探讨。

### 1.1.1 化学镀镍层的特点和优势

化学镀镍技术是采用金属盐和还原剂，在材料表面上发生自催化反应而获得镀层的方法。到目前为止，化学镀镍是国外发展最快的表面处理工艺之一，化学镀镍之所以获得迅速的应用和发

展，是由其优越的性能特点所决定的。

#### 1.1.1.1 厚度均匀性

厚度均匀和分散性良好是所有化学镀层的一大特点。化学镀镍过程避免了电镀镍层由于电流密度分布不均带来的镀层厚度不均匀。电镀镍层的厚度在整个零件，尤其是形状复杂的零件上差异很大，在零件的边角和离阳极近的部位，镀层较厚；而在内表面或离阳极远的地方，镀层很薄，甚至镀不到。采用化学镀可避免电镀的这一不足。化学镀时，只要零件表面和镀液接触，镀液中消耗的成分能及时得到补充，任何部位的镀层厚度都基本相同，即使凹槽、缝隙、盲孔也是如此，一般厚度差异不会超过 $\pm 10\%$ 。

#### 1.1.1.2 氢脆

电镀是利用电能将镍阳离子转换成金属镍沉积在阴极上，而化学镀镍则是在无电源的情况下，用化学还原的方法使镍阳离子还原成金属镍并沉积在基体金属表面上。实验表明，镀层中氢的夹入与化学还原反应无关，而与电镀条件有很大关系，通常镀层中的含氢量随电流密度的增加而增加。

在电镀液中，除了一小部分氢是由  $\text{NiSO}_4$  和  $\text{H}_2\text{PO}_3$  反应产生以外，大部分是由于两极通电时发生电极反应引起的水解而产生的。在阴极反应中，伴随着大量氢的产生，阴极上的氢与金属 Ni-P 合金同时析出，形成了  $(\text{Ni-P})\text{H}$ ，附着在沉积层中。由于阴极表面生成超数量的原子氢，一部分脱附生成  $\text{H}_2$ ，而来不及脱附的就留在镀层内，留在镀层内的一部分氢扩散到基体金属中，而一部分氢在基体金属和镀层的缺陷处聚集，形成氢气团，该气团有很高的压力，在压力作用下，缺陷处导致了裂纹；在应力作用下，形成断裂源，从而导致氢脆断裂。氢不仅渗透到基体金属中，而且也渗透到镀层中。据报导，电镀镍要在  $400^\circ\text{C} \times 18\text{h}$  或  $230^\circ\text{C} \times 48\text{h}$  的热处理之后，才基本上除去镀层中的氢，所以电镀镍除氢是很困难的，而化学镀镍不需要除氢。

#### 1.1.1.3 硬度和耐磨性

镀态下的镍磷化学镀层，依含磷量不同，其维氏硬度一般在



HV480~600 之间，远远超过电镀镍 HV150~400 的硬度指标。镀层经过适当热处理之后，由于  $\text{Ni}_3\text{P}$  高度弥散析出，增加了镀层塑性变形时滑移面的阻力，使镀层强化，硬度提高。维氏硬度可达 HV1000~1100，明显优于工业硬铬镀层 HV800~1000。其抗拉强度超过 700MPa，相当于某些合金钢的强度。

镍磷化学镀层的耐磨性优于电镀镍层。由于镀层中含有磷，在摩擦过程中，当表面承受最大的压力和温度时，因表面磷化物的形成与迁移，使镀层具有固体润滑效果。与许多材料对磨时，镍磷化学镀层的摩擦系数很低，具有良好的抗擦伤性和抗咬合性。镍磷化学镀层由于硬度高，具有一定的抗磨粒磨损能力，不易发生粘附，能保持力学和热力学的相容性，所以能满足耐磨镀层的条件。

#### 1.1.1.4 耐蚀性

化学镀镍和电镀铬一样，是一种障碍镀层，它是通过将基体金属和外界腐蚀环境隔绝而达到防护目的。铬虽有良好的耐腐蚀性，然而电镀铬层由于高应力引起裂纹，不能保护基底金属免受腐蚀。化学镀镍的耐蚀性比电镀铬要好，这是由于化学镀镍是非晶态结构，非晶态是一种均匀的单相组织，不存在晶界、亚晶界、位错、层错之类的晶体缺陷，因而不易产生微电池作用。同时，化学镀镍层和基体结合均匀、致密，腐蚀介质难以透过镀层而浸蚀基体，具有极好的耐蚀作用。它能耐多种化学介质的腐蚀，如常温非氧化性酸、非氧化性盐、高温高浓度烧碱、氯化氢、硫化氢、乳酸、甲酸等各种有机溶剂。此外，化学镀镍层在 HCl 和  $\text{H}_2\text{SO}_4$  中的耐蚀性比不锈钢优异得多，几乎不被碱和盐腐蚀。

#### 1.1.1.5 结合力

在电镀时，氢气在阴极析出后，经常是呈气泡状粘附在阴极表面上，在基体与镀层之间形成了很多气孔；因此，电镀层的结合力较差，容易剥离。而化学镀镍在镀态时，与钢、铝、铜及其合金的结合力较好，为 300~400MPa，超过了基材的剪切强

度。经过热处理后，在结合界面处能形成深度为 2~7.5 $\mu\text{m}$  的扩散层，这就使结合力更好。所以化学镀镍的结合力远远优于电镀铬层。

#### 1.1.1.6 内应力

一般电镀镍层的内应力是 105~245MPa，而化学镀镍层的内应力是 15~60MPa。因此，化学镀镍层的内应力比电镀镍低得多，电镀镍是高应力的镀层，镀层容易出现应力裂纹而导致零部件报废。

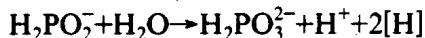
#### 1.1.1.7 可焊性

镍磷化学镀层具有良好的可焊性，由于镀层中含有磷，降低了熔点，因而可焊性好。铝、镁、不锈钢和非金属材料，要进行焊接是比较困难的。但是这些材料在进行 Ni-P 化学镀后，借助于镀层良好的焊接性能，能使这些材料顺利进行焊接，这对扩大这些材料的成型和修复性能起着极重要的作用。

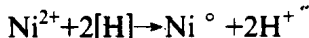
### 1.1.2 化学镀镍的基本原理

镍磷化学镀的基本原理是以次亚磷酸盐为还原剂，将镍盐还原成镍，同时使镀层中含有一定量的磷。沉积的镍膜具有自催化性，可使反应继续进行下去。关于 Ni-P 化学镀的具体反应机理，目前尚无统一认识，现在为大多数人所接受的是原子氢态理论：

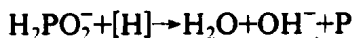
(1) 镀液在加热时，通过次亚磷酸根在水溶液中脱氢，而形成亚磷酸根，同时放出初生态原子氢，即



(2) 初生态的原子氢吸附催化金属表面而使之活化，使镀液中的镍阳离子还原，在催化金属表面上沉积金属镍：



(3) 随着次亚磷酸根的分解，还原成磷：



(4) 镍原子和磷原子共同沉积而形成 Ni-P 合金。

由此得出，其基本原理是通过镀液中的镍离子还原，同时伴

随着次亚磷酸盐的分解而产生磷原子进入镀层，形成过饱和的Ni-P固溶体。

为了使镀液稳定，镀速适当及镀层质量优良，在化学沉积镍磷合金过程中，除了需要及时地补充上述反应所消耗的主盐外，还需在镀液中加入适量的络合剂、稳定剂、缓冲剂和其它添加剂等。

#### 1.1.2.1 镍盐

镍盐是镀液中的主盐，作为二价镍离子的供给源，使化学反应得以连续进行。一般采用的镍盐有氯化镍、硫酸镍和醋酸镍。由于硫酸镍不易结块，且价廉易得，目前多数配方采用硫酸镍。

#### 1.1.2.2 次磷酸盐

还原剂一般采用次磷酸盐，其作用是通过催化脱氢，提供活泼氢原子，把 $\text{Ni}^{2+}$ 还原成金属，并使镀层中含有磷的成分。其次磷酸盐的浓度增加，可加速 $\text{Ni}^{2+}$ 的还原，提高镀速。

#### 1.1.2.3 络合剂

镀液中加入络合剂的作用是使 $\text{Ni}^{2+}$ 与络合剂生成稳定络合物，同时还可防止生成氢氧化物及亚磷酸盐沉淀。强络合剂对提高镀液稳定性有利，但使镀速降低，选择适当的络合剂可控制稳定性和镀速，改善镀层光亮度和耐蚀性，同时还可以改变还原反应的活化能，实现低温施镀。酸性镀液常用的络合剂有乳酸、氨基乙酸、羟基乙酸、柠檬酸、苹果酸、酒石酸、硼酸和水杨酸等。碱性镀液常用的络合剂有氯化铵、醋酸铵、柠檬酸铵和焦磷酸铵等。目前，镀液中的络合剂正在向复合应用方向发展。

#### 1.1.2.4 稳定剂

在施镀过程中，因种种原因不可避免地会在镀液中产生活性的结晶核心，致使镀液自分解而失效。加入稳定剂后，可对这些活性结晶核心进行掩蔽，使之达到防止镀液分解的目的。现在常用的稳定剂有铅离子、硫脲、锡的硫化物、硫代硫酸盐、偏硫氢化物、钼酸盐和碘酸盐等。

### 1.1.2.5 缓冲剂

在施镀过程中有  $H^+$  产生，使镀液 pH 值下降，影响镀速和镀层性能。缓冲剂的作用是保证镀液 pH 值在工艺要求范围内。常用的缓冲剂有柠檬酸、丙酸、乙二酸、琥珀酸及其钠盐。

### 1.1.2.6 其它添加剂

镀液中加入少量的氟化物可提高镀速并有助于铝上镀覆，较多的氟化物则可提高镀层的硬度。镀液中加入磺化脂肪酸、硫酸脂等阴离子表面活性剂，可降低镀液与镀件的表面张力，提高浸润能力，有利于施镀过程中  $H_2$  气泡的逸出。

## 1.1.3 化学镀镍的组织结构

### 1.1.3.1 磷含量对化学镀 Ni-P 合金结构的影响

化学镀 Ni-P 合金的结构与磷含量有关，如图 1-1 所示，由 X 射线衍射图可知，磷含量小于 4.5% 时，Ni-P 合金的结构与纯镍相似，在  $2\theta$  为  $45^\circ$  和  $52^\circ$  附近出现了衍射峰。经分析，这些衍射峰分别为 Ni (111) 和 Ni (200)，表明 Ni-P 合金为晶态。

磷含量为 5%~6% 时，X 射线衍射图上只有 Ni(111) 衍射峰，而且峰不够尖锐，比磷含量为 4.5% 的 Ni-P 合金衍射峰有明显的不对称宽化。因此，磷含量为 5%~6% 的 Ni-P 合金仍为晶态，但晶粒比 4.5% 的 Ni-P 合金细小，晶体结构的完整性不如磷含量为 4.5% 的 Ni-P 合金。

磷含量为 7%~8% 的 Ni-P 合金，其衍射图在  $2\theta = 45^\circ$  处出现馒头状衍射峰，Ni-P 合金具有非晶态特征。但衍射峰出现的位置与 Ni(111) 峰的位置重合，具有一定的晶态特性，这种结构是晶态向非晶态的过渡阶段，或者说，它是具有短程有序的微晶结构。

磷含量为 9% 以上的 Ni-P 合金，其衍射图  $2\theta = 45^\circ$  处为一个弥散的衍射峰，表明是无定形即非晶态。

总之，化学镀 Ni-P 合金的结构与磷含量有直接关系，随着磷含量的增加，其结构变化过程为：晶态  $\rightarrow$  晶态+微晶  $\rightarrow$  微晶  $\rightarrow$

微晶+非晶态→非晶态。

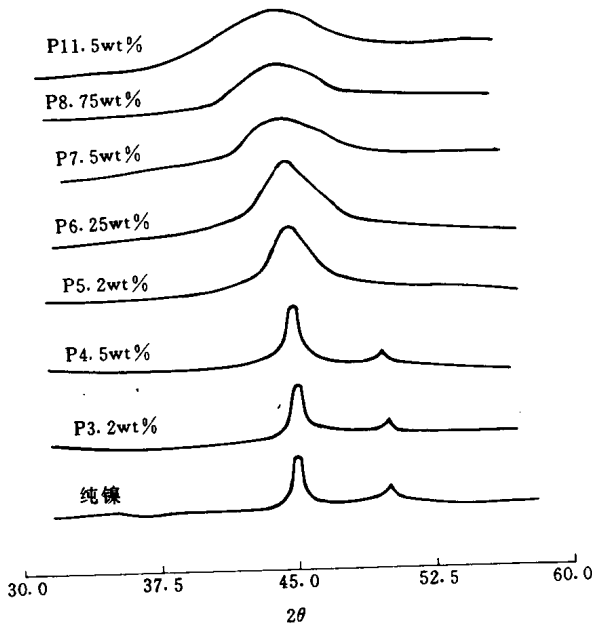


图 1-1 磷含量对镀态 Ni-P 合金层组织结构的影响

### 1.1.3.2 热处理温度对化学镀 Ni-P 合金结构的影响

化学镀 Ni-P 合金的结构除与磷含量有关外，还与热处理的温度有关，见图 1-2。

当热处理温度在 250℃ 以下时，Ni-P 合金层的 X 射线衍射结果显示在  $2\theta = 45^\circ$  处为一个弥散的馒头峰，其结构为非晶态。

当热处理温度为 250℃ 时，虽然未出现其它衍射峰，但衍射峰明显变窄，这是晶粒长大和应力释放的表现，其峰位刚好是 Ni(111) 峰位，这时 Ni-P 合金层为非晶态与晶态的混合态。

当热处理温度为 300℃ 以上时，衍射图中除了有 Ni(111) 和 Ni(200) 峰外，还出现了数量众多、峰值明显且与  $\text{Ni}_3\text{P}$  相衍射峰相吻合的衍射峰，随着温度的升高，Ni-P 合金镀层由非晶向微

晶转化，最后转变成晶态，形成  $\text{Ni}_3\text{P}$  相。

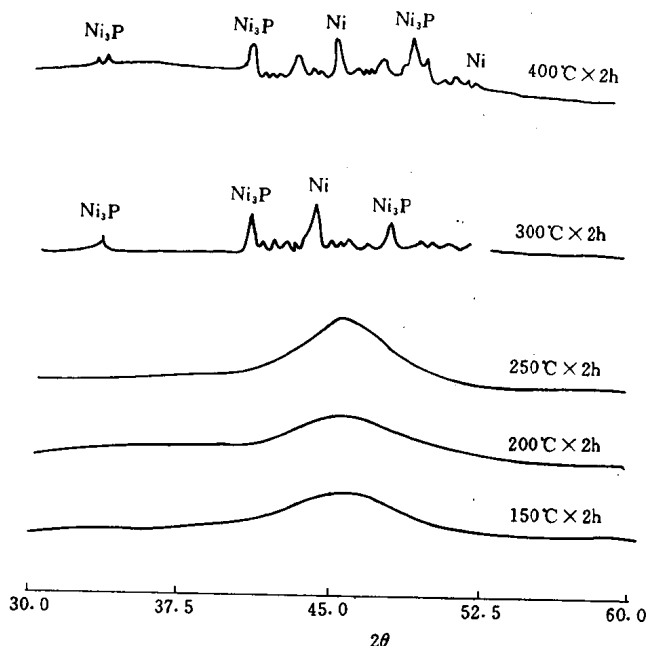


图 1-2 化学镀 Ni-P 合金经热处理后的 X 射线衍射图

### 1.1.3.3 镀层结构稳定性与组织

镀镍固溶体和非晶态都处于热力学不稳定状态，只要满足一定的成分、结构和能量条件，便向稳定状态发展。

图 1-3 反应了 Ni-P 合金层在加热过程中的热效应，总是伴随有晶化和固态相变过程。Ni-4.0%P 合金加热到 310℃ 时，扫描曲线 DSC 有所变化，于 400℃ 出现一放热峰，表明 Ni-4.0%P 合金在 400℃ 附近存在一次转变，非晶态合金处于热力学不稳定状态，总是要向稳定态过渡。Ni-10.0%P 合金加热到 300℃ 附近，曲线略有变化，温度升到 300℃，出现一尖锐的放热峰，随着温度的提高，跟着出现另一放热峰，峰位温度在 400℃，由此可见，Ni-10.0%P 合金至少发生两次转变。

Ni-4.0%P 合金加热时，镀层内磷原子扩散偏聚，衍射峰更

加尖锐，衍射强度增大。温度继续升高，镍晶格中的磷含量下降，结晶趋于完善，衍射加强；当磷原子聚集到足够数量时，过饱和固溶体脱溶沉淀，析出第二相  $\text{Ni}_3\text{P}$ ，然后，镍继续脱溶， $\text{Ni}_3\text{P}$  不断析出，聚集粗化。可见 DSC 曲线  $400^\circ\text{C}$  的放热峰实质，是发生了固溶体脱溶分解转变。

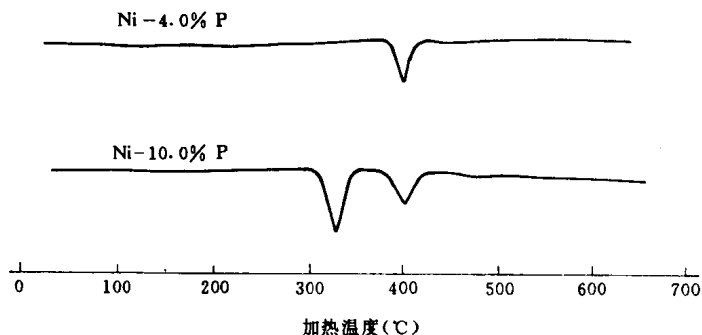


图 1-3 Ni-P 合金加热过程中的 DSC 热扫描曲线

Ni-10.0%P 合金加热到  $290^\circ\text{C}$ ，衍射峰漫散射宽化程度有所变化，与 DSC 曲线对应，这时非晶态的原子组态在调整，为晶化作准备，即是非晶态低温结构的弛豫。加热到  $340^\circ\text{C}$ ，DSC 曲线上出现了尖锐的放热峰，非晶态合金发生晶化反应，继续升高温度，非晶态 Ni-P 合金不断晶化，同时，也有  $\text{Ni}_3\text{P}$  分解出来，然后聚集粗化，形成稳定组织  $\text{Ni}+\text{Ni}_3\text{P}$ 。

#### 1.1.4 化学镀镍层的性能

##### 1.1.4.1 硬度

镀态下，低磷镀层为过饱和固溶体，晶格畸变大，且磷含量增加，晶粒细化，具有较高的塑变抗力，通常硬度比高磷非晶态镀层高。热处理后，镍磷镀层中的磷原子扩散偏聚，为脱溶、分解和晶化作准备，引起硬度上升，当镀层中有  $\text{Ni}_3\text{P}$  析出时，硬度迅速上升，直至达到最大值 HV1100；超过  $400^\circ\text{C}$  处理，由于  $\text{Ni}_3\text{P}$  聚集粗化，镀层软化，硬度下降。高磷镀层是以  $\text{Ni}_3\text{P}$  为基体的，所以较高温度处理后的镀层仍保持较高硬度。热处理时间

对镍磷镀层硬度的影响与温度作用一样，延长处理时间，也可获得同样的硬度变化过程，温度越高，要获得高的硬度所需的时间就越短，反之，所需的时间越长。

#### 1.1.4.2 耐磨性

化学镀镍磷合金层比电镀镍层的硬度高、更耐磨，适当热处理后，耐磨性可以和硬铬镀层相媲美。镍磷合金镀层的摩擦系数受热处理影响不大，但是热处理对耐磨性有影响。

镀态 Ni-4.0%P 合金比 Ni-10.0%P 合金具有较少的磨损体积，耐磨性好。这是因为非晶态合金的原子间结合力较晶态原子间结合力小，塑性变形抗力小，非晶态合金在磨损过程中极易滑动转移，加剧磨损。

随着热处理温度的提高，镀层硬度增加，非晶态合金的结构弛豫，磨损体积减小。到 400℃ 时，镀层硬度最高，Ni-4.0%P 合金磨损体积最小，耐磨性最好；随后热处理温度升高，硬度下降，磨损体积加大，但 Ni-10.0%P 合金随着热处理温度的增加，耐磨性提高，超过 400℃ 热处理，虽然硬度降低，磨损体积仍减小。

Ni-4.0%P 合金的硬度成为控制磨损的主要因素，表明 Ni<sub>3</sub>P 的沉淀强化效果对耐磨性起重要作用，要求保证具有固溶体+弥散分布的第二相 Ni<sub>3</sub>P 组织，才能维持最好的耐磨性能。

对于 Ni-10.0%P 合金，高温热处理后得到的是以 Ni<sub>3</sub>P 为基体的混合组织，镀层具有一定的硬度，由于 Ni<sub>3</sub>P 的聚集粗化，Ni 的再结晶，使得镀层延性大为改善，韧性增加，提高了抗裂纹形核和扩展能力，故具有极好的耐磨性。

#### 1.1.4.3 抗腐蚀性

镍磷合金镀层化学稳定性高，可以耐各种介质的腐蚀，具有优良的抗腐蚀性能。镀态下高磷合金镀层比低磷镀层更耐蚀，非晶态镀层的抗蚀性优于晶态镀层。热处理后，在镀层中，由于 Ni<sub>3</sub>P 相的形成，引起镀层的体积收缩而导致晶界增多，使镀层的耐蚀性大大下降。高温热处理后，镀层表面形成了氧化膜，阻止了腐蚀的进行，加上镀层与钢基体之间形成的 Ni-Fe 扩散层



是连续坚固的，并加强了结合，则使镀层的抗蚀性上升。

镍磷镀层的耐蚀性优于碳钢和电镀镍，在某些介质中，它比镀铬和不锈钢还强。

#### 1.1.4.4 密度

由于磷元素原子的介入，改变了镀镍层的密度，对其它物理性能也会产生影响。化学镀镍层的密度和磷含量成比例，随着磷含量的增加，密度降低。例如，当磷含量为3%时，镀镍层的密度为 $8.25\text{g}/\text{cm}^3$ ，当磷含量为8.5%时，密度为 $7.92\text{g}/\text{cm}^3$ 。

#### 1.1.4.5 热学性能

化学镀 Ni-9% P 合金层的热传导系数为  $0.0439\sim 0.0564\text{J}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ ，冶金纯镍为  $0.828\text{J}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ ；镍磷合金的热膨胀系数比电镀镍要低些，前者为  $13\sim 14.5\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ，后者为  $14\sim 17\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。

化学镀镍层的热学性能十分重要，表现在和基体一起承受摩擦磨损和腐蚀过程中产生的热学和力学行为，二者的相溶性对镀层使用寿命的影响较大。

#### 1.1.4.6 电学性能

化学镀镍层的导电性取决于磷含量，电阻率高于冶金纯镍。Ni-P 镀层的电阻率为  $60\sim 120\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ，纯镍为  $9.5\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。

随着磷含量的增加，Ni-P 镀层的电阻率提高，例如，Ni-7%P 镀层为  $70\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ，Ni-10%P 镀层为  $110\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。热处理后，由于镀层中析出  $\text{Ni}_3\text{P}$  相，因此，镀层的电阻率下降。Ni-P 镀层经  $600^\circ\text{C}$  热处理，电阻率由  $72\mu\Omega\cdot\text{cm}$  降至  $20\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。此外，镀层电阻率还与厚度有关，镀层加厚，电阻率下降；厚为  $2\mu\text{m}$  时，电阻率为  $68\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ；厚度达  $10\mu\text{m}$  时，电阻率为  $40\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。

#### 1.1.4.7 磁性能

化学镀镍层中含有抗磁性的磷，故磁性比电镀镍层要低，化学镀镍层的磁性由镀液的 pH 值、成分和基材所决定。碱性镀液产生含磷量低于 8% 的 Ni-P 镀层，通常表现出铁磁性，经过热