



天津大学丛书

郭鹤桐 张三元 著

COMPOSITE COATINGS

复合镀层

天津大学出版社

81.35/
427.1

复合镀层

郭鹤桐 张三元 著

天津大学出版社

(津)新登字012号

21128/10

复 合 镀 层

郭鹤桐 张三元 著

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本, 850×1168 毫米 1/32 印张, 14¹/₈ 字数, 365千字

1991年12月第一版 1991年12月第一次印刷

印数, 1—2300

ISBN7-5618-0297-8

TQ·10

定价, 11.70元

序

将电镀技术用于生产，已经有了一百多年的历史，但在实践中正式采用通过电镀与化学镀形成的复合镀层，则是最近二三十年的事。本来在经典的电镀工艺中，非常忌讳镀液中出现固体悬浮物，因为这些杂质会使镀层质量变坏。然而随着科学技术的进展，却可反其道而行之，有意识地向镀液中添加固体微粒，采取相应的措施，使微粒与金属共沉积，形成具有各种不同性能的复合镀层。它既能解决普通镀层所无法解决的问题，又可为采用电沉积方法取代其他方法制备某些新型材料提供了可能。

随着复合镀层的出现与发展，它已陆续在不少领域的实际应用中取得了突出成就，给电镀工业注入了新的强大活力。例如，在内燃机缸体内壁镀敷的Ni-SiC复合镀层，明显提高了缸体的耐磨性；以Ni-金刚石复合镀层制备的钻磨工具，有利于提高机加工的劳动生产率，并可使机加工中的一些难题得以解决；于Ni-SiO₂复合镀层上形成的微孔铬，已成为增强装饰-防护性镀层耐蚀性的重要手段；采用Ni-(CF)_n等具有自润滑功能的复合镀层代替纯镍镀层，在摩擦条件下的使用寿命增大了10倍左右，等等。这样一来，不但是镀层的品种得以显著增加、应用范围日益扩大，而且能使电镀生产所承担的任务，由主要是对某些零部件的表面加工，进一步发展成为有能力独立完成一定产品的制备。近年来，具有各种特殊功能（耐电蚀、易焊接、抗咬死等）的复合镀层的推广应用，又给大量节约贵重原材料提供了可能。此外，用复合电铸法生产金属基复合材料，也已成为结构材料生产中的一项具有一定特点的新技术。可以说，复合镀层目前已经在材料科学中占据了一定的地位。

尽管复合镀层获得了比较广泛的应用，并且对复合电沉积的理

论研究也进行了不少工作，但它仍然属于发展中的学科。当前国内外尚缺乏比较系统和全面论述复合镀层理论与实践的书籍。为了满足广大电镀工作者的需要，我们收集了国内外大量资料，去粗取精，认真整理，撰成此书，以飨读者。

本书除对复合镀层的性能、形成工艺和复合共沉积机理等共同性问题加以介绍外，还对不同类型的复合镀层分别以一定的篇幅列出专门章节进行讨论。特别是对在其他电镀书籍中很少涉及的金金刚石钻磨工具的制备、电镀金属基复合结构材料、复合化学镀等内容，都给予了足够的重视。

考虑到近年来我国在复合镀层的研究和应用中取得了不少成绩，故在本书取材上有意识地多反映一些国内的情况，其中有不少内容是我们自己的科研成果，甚至还包括某些尚未公开发表的资料。

由于湖北汽车工业学院的张三元高级工程师和我合写本书时，缺少一些可资参考的现成模式，所以无论在体例上，还是内容上，都会存在值得商榷的地方，欢迎读者予以批评指正。

郭鹤桐 于天津大学

1988年12月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1—1 复合镀层的特点.....	(1)
§ 1—2 复合镀层的发展过程.....	(4)
§ 1—3 复合镀层的分类.....	(8)
§ 1—4 镀层中颗粒含量表示法.....	(12)
第二章 形成复合镀层的工艺	(19)
§ 2—1 固体微粒的制备与粒径的测定.....	(19)
§ 2—2 镀液中固体微粒的加入与悬浮.....	(23)
§ 2—3 微粒的性质与镀液中微粒浓度对镀层中微粒 含量的影响.....	(38)
§ 2—4 镀液组成对镀层中微粒含量的影响.....	(46)
§ 2—5 电镀的操作条件对镀层中微粒含量的影响.....	(52)
§ 2—6 复合化学镀工艺.....	(64)
第三章 复合电沉积机理	(74)
§ 3—1 概述.....	(74)
§ 3—2 外电场对复合电沉积的作用.....	(79)
§ 3—3 两步吸附机理.....	(91)
§ 3—4 流体动力因素对复合电沉积的作用.....	(100)
§ 3—5 微粒在电极表面上的附着力.....	(114)
第四章 复合镀层的性能	(121)
§ 4—1 复合镀层的强化机理.....	(121)
§ 4—2 复合镀层的硬度、强度与塑性.....	(130)
§ 4—3 复合镀层的内应力.....	(141)
§ 4—4 复合镀层的导电性.....	(148)
§ 4—5 复合镀层的化学性能.....	(153)
第五章 装饰-防护性复合镀层	(167)

§ 5—1	概述	(167)
§ 5—2	镍封	(178)
§ 5—3	微孔铬	(186)
§ 5—4	缎面镍	(191)
§ 5—5	锌基耐蚀性复合镀层	(197)
§ 5—6	荧光复合镀层	(202)
第六章	用于制造钻磨工具的复合镀层	(214)
§ 6—1	概述	(214)
§ 6—2	金刚石钻头及扩孔器	(224)
§ 6—3	金刚石磨具	(238)
§ 6—4	金刚石滚轮	(250)
第七章	耐磨复合镀层	(265)
§ 7—1	概述——摩擦磨损的基本概念	(265)
§ 7—2	影响复合镀层耐磨性的因素	(274)
§ 7—3	提高汽缸缸体耐磨性的复合镀层	(287)
§ 7—4	铬基耐磨复合镀层	(300)
§ 7—5	化学镀耐磨复合镀层	(307)
第八章	自润滑复合镀层	(318)
§ 8—1	概述	(318)
§ 8—2	镍基自润滑复合镀层	(322)
§ 8—3	铜基自润滑复合镀层	(342)
§ 8—4	其他类型自润滑复合镀层	(351)
第九章	电铸复合镀层	(369)
§ 9—1	概述	(369)
§ 9—2	复合电铸工艺	(372)
§ 9—3	几种纤维增强的复合镀层	(377)
§ 9—4	高模量石墨纤维增强的复合镀层	(383)
第十章	其他复合镀层	(392)
§ 10—1	高温下耐磨与抗氧化的复合镀层	(392)

§ 10—2	用作电接触材料的复合镀层	(398)
§ 10—3	具有催化功能的复合镀层	(408)
§ 10—4	具有光电转换效应的复合镀层	(416)
§ 10—5	用作有机膜底层的复合镀层	(420)
§ 10—6	能降低内应力的复合镀层	(431)
§ 10—7	刷镀复合镀层	(434)

第一章 绪 论

§ 1-1 复合镀层的特点

各种材料在性能上都各有所长，但也各有所短。如果能把几种材料合理地组合在一起，往往能综合它们各自的优点，在一定程度上弥补它们各自的缺点，形成一种优于各自性能的材料，甚至成为具有优异性能的新型材料。随着航空、宇航、电子、海洋、化工、冶金及原子能等工业的开发和进展，现有的单一材料已难以满足某些特殊的要求，迫切需要各种各样的新型结构材料与功能材料，因此以各种形式组合成的复合材料得到了很大发展，目前已成为材料科学中的一个非常重要的组成部分。

近20年来高速发展起来的复合镀层 (composite coating) 已成为复合材料中的一支新军，在工程技术中获得了广泛的应用。通过金属电沉积的方法，将一种或数种不溶性的固体颗粒，均匀地夹杂到金属镀层中所形成的特殊镀层就是复合镀层。这种制备复合镀层的方法，可称之为复合电镀 (composite plating)。这种技术在国内外也还有一些其他名称。例如弥散电镀 (dispersion plating)、镶嵌电镀 (occlusion plating)、分散电镀或组合电镀等等。不过考虑到它是制造复合材料的一种方法，还是以复合电镀这一名称，更能反映出这类过程的实质性作用〔1〕。利用化学镀技术来获取复合镀层时，可称之为复合化学镀〔2〕。若以电铸法制备复合镀层，则为复合电铸。因为复合电镀的应用，远比复合化学镀和复合电铸广泛得多，而且复合电镀中的许多规律性东西，有相当大的一部分也适用于复合化学镀和复合电铸，因此在研究复合镀层时，常常用复合电镀为代表。

复合镀层的基本成分有两类。一类是通过还原反应而形成镀层的那种金属，可称为基质金属。基质金属系均匀的连续相；另一类则为不溶性固体颗粒，它们通常是不连续地分散于基质金属之中，组成一个不连续相。所以，复合镀层属于金属基复合材料。如果不经过特殊的加工处理，基质金属和不溶性固体颗粒之间，在形式上是机械地混杂着。两者之间的相界面基本上是清晰的，几乎不发生相互扩散现象。但是它们可以获得基质金属与固体颗粒两类物质的综合性能。例如，金刚石，立方氮化硼(c-BN)等材料硬度很高，耐磨性很好，但它们的抗拉强度低，抗冲击能力差，不易加工成型，妨碍了它们获得更广泛的应用。若通过复合电镀把金刚石、立方氮化硼等颗粒镶嵌在镀镍层之中，制成各种磨具（钻头、金刚石滚轮等），则能在很大程度上克服金刚石、氮化硼等的缺点，保持并发扬其耐磨的优点。这些工具已在成型磨削、高速磨削、地质钻探、石油开采等领域中获得了广泛应用。如果把SiC、Al₂O₃等硬质耐磨颗粒和石墨、MoS₂、聚四氟乙烯等具有减摩功能的颗粒，同时共沉积到金属镀层中，则这种复合镀层就成为既有耐磨性能，又有自润滑性能的优异材料〔3〕。

与熔渗法、热挤压法、粉末冶金法等目前用得较多的热加工方法相比，用复合电镀技术制取复合材料，具有明显的优越性，其优点与特点介绍如下。

1. 用热加工方法制造复合材料，一般需要用500~1000°C或更高的温度处理或烧结。因此，很难使用有机物来制取金属基复合材料。此外，由于烧结温度高，基质金属与夹杂于其中的固体颗粒之间会发生相互扩散作用及化学反应等，这往往会改变它们各自的性能，出现一些人们并不希望出现的现象。用复合电镀法制造复合材料时，大多都是在水溶液中进行，温度很少超过90°C。因此，除了目前已经大量使用的耐高温陶瓷颗粒外，各种有机物和其他一些遇热易分解的物质，也完全可以作为不溶性固体颗粒分散到镀层中，制成各种类型的复合材料。在这种情况下，基质金属与夹杂物

之间基本上不发生相互作用，而保持它们各自的特性。但是，如果人们需要复合镀层中的基质金属与固体颗粒之间发生相互扩散，则可在复合电镀之后，再进行热处理，从而使它们获得新的性质〔4〕。所以说，复合电镀在一定程度上增强了人们控制材料各方面性能的主动权。

2. 大多数情况下可以在一般的电镀设备、镀液、阳极等基础上略加改造（主要是增加使固体颗粒在镀液中充分悬浮的措施等等），就能用来制备复合镀层。与其他制备复合材料的方法相比，复合电镀的设备投资少，操作比较简单，易于控制，生产费用低，能源消耗少（因不需要高温处理），原材料利用率比较高。所以，通过电沉积来形成复合材料，是一个比较方便而且经济的方法。采用热加工法制备复合材料时，不但需要比较复杂的生产设备，而且还需要采用保护性气体等附加措施。

3. 同一基质金属可以方便地镶嵌一种或数种性质各异的固体颗粒；同一种固体颗粒也可以方便地镶嵌到不同的基质金属中，制成各种各样的复合镀层。而且，改变固体颗粒与金属共沉积的条件，可使颗粒在复合镀层中的含量从零到50%或更高些的范围内变动，镀层性质也会发生相应的变化。因此，人们可以根据使用中的要求，通过改变镀层中颗粒含量来控制镀层的性能。这就是说，复合电镀技术为改变和调节材料的机械、物理和化学性能，提供了极大的可能性和多样性。也可以说，复合电镀技术是根据需要对镀层的性能加以“裁剪”。

可供选用的固体颗粒品种很多，几乎一切不溶于镀液中的颗粒均可选用。可供选用的基质金属也有很多种〔5〕。虽说单金属品种是有限的，但考虑到几种单金属组成合金的数目时，基质金属的品种就不胜枚举了〔6〕。目前曾经使用过的基质金属就有三四十种以上。如果将不同种类的固体颗粒和基质金属进行排列组合，就会发现有可能制备的复合镀层的品种数目将大得惊人。所以说，复合电镀技术的通用性、适应性好，与其他形成复合材料的方法相比，复

合电镀的适用范围要宽广得多。

4. 很多零部件的功能,例如,耐磨、减摩、导电、抗高温氧化、抗划伤能力等都是由零部件的表面层体现出来的。因此,在很多情况下可以采用某些具有特殊功能的复合镀层取代用其他方法制备整体的实心材料。也就是说,可用廉价的基体材料镀上复合镀层,代替由贵重原材料制造的零部件。例如,在悬浮有 La_2O_3 等固体颗粒的镀银溶液中,于铜铆钉上电镀银基复合镀层,可取代整体纯银电触头〔7〕。因此,所取得的经济效益是非常大的。

复合镀层也和普通电镀层一样,可以根据需要直接在零部件表面上获得任意厚度的镀层。应当指出,复合电镀是一种十分方便的加工方法。一般说来,复合镀层对基体材料本身的物理机械性能没有什么大影响。

尽管复合电镀具有上述的许多长处,但它在应用中仍存在着一些问题。例如,在打算沉积出颗粒含量过高(例如50%以上)的复合镀层时,在工艺上会遇到困难;又如,由于基体表面电流分布的不均匀,镀层厚度自然也不均匀,若电沉积的复合镀层过厚,零部件会出现不同程度的变形,有可能成为不合格产品;另外,在不少情况下,仅在零部件表面镀敷一层复合材料,并不能满足使用中的要求,有必要采用整体的材料制造。因此,复合镀层不可能完全取代用各种热加工方法制备的材料,因为每种方法都有自己的特点和适用的范围。

§ 1-2 复合镀层的发展过程

据文献报导,早在本世纪30年代左右,苏、美等国学者就曾对复合电镀技术进行过研究〔8,9〕。至于用复合电镀技术制备牙科医生用的小钻头等,也许出现得还要更早些〔10〕。只是由于这种技术在当时很不成熟,故未能及时引起人们的注意。自50年代初期开始,对复合电镀做了进一步研究。其目的是为飞行速度越来越高的飞机和

宇航设备以及工作温度越来越高的气轮机部件，研制能耐高温及在高温下能保持足够强度、能耐磨损的镀层和材料^[11]。随着研究工作的不断深入，在1962年就出现了用电镀法获得复合镀层的专利^[12]。现在已发明了多种制备复合镀层的新工艺，制出了多种类型的复合镀层，找到了它们在很多领域中的新用途。

复合镀层发明初期，主要是以镍、铜、钴等单金属为基质金属，以 SiC 、 Al_2O_3 、 Cr_3C_2 、 SiO_2 等耐高温的陶瓷粉末作为共沉积的夹杂物。随着研究的深入，除陆续采用铁、银、锌、镉、金、铬、铅、锡、铟、钼等单金属作为基质金属外，还曾使用过铜锌、铜锡、镍铁、锡铅等合金。

1966年Metzger等开始试验复合化学镀，以化学镀的Ni-P合金作为复合镀层的基质金属^[13]。1983年苏联报导了制备以磷化层为基质，以 MoS_2 为镶嵌微粒的复合镀层的消息^[14]。除在水溶液中沉积复合镀层之外，还可在非水溶液中沉积复合镀层^[15]。另外，既可以用挂镀法，也可以用滚镀法沉积复合镀层^[16]。

经过这些年的研究，用于复合电镀的不溶性固体颗粒的种类也大大地扩展了。除原来使用过的氧化物、碳化物、氮化物之外，几乎所有类型的陶瓷颗粒、各种金属粉末、树脂粉末以及石墨、 MoS_2 、 WS_2 、聚四氟乙烯、金刚石等均可作为共沉积的颗粒。就固体颗粒大小来说，可以是直径小于 $1\mu\text{m}$ 的微粉，也可以是直径大于 1cm 的颗粒；既可以是长度达到数米的各类纤维丝，也可以是长度仅几个微米的晶须^[17]。由于目前研究和应用得比较广泛的是直径在 $40\mu\text{m}$ 以下的固体颗粒与金属的共沉积，所以，在未作特别说明时，本书中所讨论的问题，均是指这种颗粒。为了概念清楚，我们将 $40\mu\text{m}$ 以下的颗粒称为微粒。若涉及到直径 $40\mu\text{m}$ 以上的固体颗粒时，我们将明确地予以指出。

在复合镀层的发展过程中，除了对固体微粒与金属共沉积的各种条件进行了认真研究以外，还在复合镀层的后处理上做了不少工作。通过后处理，可使复合镀层的性能得到改善。例如，将电沉积

的Ni-TiO₂复合镀层在10⁻³Pa真空中于750°C下烧结十几分钟,可使镀层中TiO₂成为缺氧型的n型半导体,因而使镀层具有一定的光电转换效应^[18]。又如,通过对(Fe-Ni)-Cr复合镀层的热处理,可使镀层中金属铬微粒与Fe-Ni合金发生相互扩散,形成不锈钢镀层。用在普通碳钢上电镀不锈钢来代替整体的不锈钢器皿,可节约大量较为贵重的材料^[19]。大家都知道直接电镀Fe-Ni-Cr三元合金相当困难,而电镀Fe-Ni合金并不难。因此,使铬以金属微粒的形式与Fe-Ni合金共沉积后,再经热处理,就能比较方便地获得与不锈钢组成相近的合金镀层。

过去,电镀层的应用,主要是在防蚀与装饰方面。单金属与合金的功能镀层,虽然也用了不少,但由于在镀层品种的开发与工艺控制上遇到困难,多年来功能镀层的应用进展不快。随着复合镀层的出现,以及对它的性能和制造工艺的深入了解,功能镀层得到了迅猛的发展^[20]。复合电镀已被认为是当前解决高温腐蚀、高温强度和磨损,以及某些特殊情况下的磨损等问题的一种很有前途的方法^[21],是制取复合材料的一种先进方法^[22,23]。因此,世界各国竞相研究,近十几年来发展很快,是比较活跃的技术领域之一。尽管目前研究过的复合镀层类型已经很多,但随着科学技术的进展,对材料提出了各式各样的新要求,因而对复合镀层新品种的开发,仍在不断地进行着。例如,用复合电镀法将Eu₂O₃微粒均匀地分散在坡莫合金(含Ni80%, Fe20%)中,可制成磁性薄膜,含0.3% Eu₂O₃的坡莫合金镀层,正以其较高的磁性记忆密度,引起人们的注意^[24];在镀铜层中加入赤磷,则可在钢件电阻铜焊时,避免使用含贵金属的铜焊合金,等等。

尽管复合镀层还处在发展之中,但有些比较成熟的工艺,也早已列入一些国家的国家标准。例如,1970年英国制订了镍封的国家标准。1979年美国材料协会所属的B8委员会,把镍基复合镀层纳入工程镀镍层的ASTM标准。1981年又成立了国际联合研究机构,以互通情报,促进复合镀层的开发、研究和推广应用^[25]。从60年

代中期起,美国金属精饰(Metal Finishing)杂志,在每年第二期的综合评述过去一年内电镀行业的发展概况的例行文章中,专门开辟了复合电镀栏目,介绍过去一年中有关复合电镀领域的新进展。

1962年前后,我国就开始了镍封的研究。在这以后的20多年中,天津大学、武汉材料保护研究所以及其他一些单位,都在进行复合电镀工艺及其共沉积理论方面的研究工作,并取得了不少成绩。镍封工艺早已在上海等地使用于生产^[26,27,28]。由天津大学研究成功的、以复合电镀法制造低压电器用电触头的新工艺,在四年前就已用于生产。由于它能节约大量金属银,因而工艺有很大的经济效益^[7]。最近研制出的复合镀锡工艺,也正在生产中推广使用。武汉材料保护研究所研制的Ni-氟化石墨等减摩复合镀层,已经获得成功,也在积极推广应用之中。用复合电镀技术制备各种小磨具(什锦锉、小磨头)也早已进行了小批量生产,在制造较大型有特殊用途的金刚石磨具,立方氮化硼磨具,金刚石钻探用钻头,金刚石滚轮等方面,也得到了越来越多的应用和进展^[29,30]。

为了进一步提高复合镀层的性能,研究固体微粒共沉积机理,强化复合电镀过程,曾在电镀领域中用过的一些比较先进的研究方法和手段,经过适当的安排几乎都能用来研究复合镀层。除了使用周期换向电流、脉冲电流以及在超声场中进行电镀等专用技术外,还可将研究金属电沉积的各种电化学方法(伏安法、计时电流法、计时电位法、交流阻抗法等)和非电化学方法(光学显微术、椭圆术、光反射法、X-射线衍射法、扫描电镜和电子探针、X-光电子能谱、俄歇能谱、透射电镜、质谱、离子探针、放射显影术等)用于研究复合镀层^[31]。而且非电化学研究方法对研究复合镀层结构和性能,更具有特殊的重要意义。

§ 1-3 复合镀层的分类

由于考虑的角度不同,对复合镀层的分类方法也自然不同。首先,可以根据构成复合镀层的组分来分类。例如根据所采用的基质金属,可将它们区分为镍基复合镀层(即以镍为基质金属)、铜基复合镀层(即以铜为基质金属)、银基复合镀层(即以银为基质金属)等等。镍基复合镀层是当前应用最广的一种复合镀层。

目前能够用于制备复合镀层的固体颗粒品种已经很多了,这些材料的性质彼此常常有很大的差异。它们可以是无机颗粒,包括金刚石、石墨、各种氧化物(如 Al_2O_3 , ZrO_2)、碳化物(如 SiC , WC)、硫化物(如 MoS_2)、硼化物(如 CrB_2)、氮化物(如 BN)、硫酸盐(如 BaSO_4)、硅酸盐(如高岭土、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)等等;它们也可以是有机颗粒,例如,聚四氟乙烯、氟化石墨、尼龙、聚氯乙烯、氨基甲醛树脂等等。此外,金属粉(如镍、铬、钨粉等等)也可做为与基质金属共沉积的颗粒。用不同性质的颗粒与金属共沉积,在工艺上当然会有一定的差别。因此,也可以依据所使用的固体颗粒材料的性质,将复合镀层分为无机的、有机的与金属的三大类。在当前研究和使用的复合镀层中,以无机的复合镀层为数最多。

另外一种比较常用的分类法是按照复合镀层的用途,将它们分为装饰-防护性复合镀层,功能性复合镀层及用做结构材料的复合镀层三大类。这和普通镀层的分类方法是一致的〔32〕。

装饰-防护性复合镀层 镀层的装饰性和防护性通常是分不开的。当然这里提到的防护,主要是针对抵抗大气腐蚀而言。很明显作为一种装饰性镀层,必须同时具有一定的防护性能,否则它们的装饰作用就不可能持久。而另外一些专以防护制品免遭腐蚀为目的的镀层,也常对它的外观提出一定的装饰性要求。

目前生产中用得最多的装饰-防护性复合镀层是镍封和缎面镍

(镍与 SiO_2 、 SiC 、高岭土、 BaSO_4 等形成的复合镀层)[33]。最近有人提出使用各种不同颜色的荧光颜料与镍共沉积,可制备出彩色荧光复合镀层[34]。这种仍处于研究阶段的镀层,自然也属于装饰-防护性复合镀层。

功能性复合镀层 功能性复合镀层是利用镀层的各种物理、机械、化学性能,例如耐磨、导电、抗高温氧化等,来满足各种使用场合中的需要,在生产和科研中应用范围很广。按理说,耐大气腐蚀也是镀层的一种功能。但考虑到它所涉及的范围非常广泛,是任何一个在空气中的物品都会碰到的问题,它的普遍性远大于其特殊性,故功能性镀层中将不把耐大气腐蚀的镀层包括在内,而是把它们归入装饰-防护性镀层中。

根据复合镀层所具有的不同功能和在使用中对它们的要求,可将它们分为以下几类:

1. 具有机械功能的复合镀层

用 SiC 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 WC 、 TiC 等固体微粒与镍、铜、钴、铬等基质金属形成的各种复合镀层,具有较高的耐磨性。通常称为耐磨的复合镀层[5, 10]。在目前研究与使用的功能性复合镀层中,耐磨的镀层占绝大部分。自身具有润滑性能的微粒,如 MoS_2 、石墨、氟化石墨、聚四氟乙烯等,能与铜、镍、铁、铅、铜锡合金等基质金属形成自润滑的复合镀层,也可称为减摩的复合镀层[5, 6]。另外,金刚石颗粒与镍共沉积形成的复合镀层,可用来制备各种磨削工具,例如金刚石砂轮、钻头、什锦锉、油石以及金刚石滚轮等。它们都是用于制造磨削工具的复合镀层[35]。其他象具有降低内应力(铁与 B_4C 微粒形成复合镀层)[36]和改善耐蠕变性(如铅和 TiO_2 、 BaSO_4 等微粒形成的复合镀层)[37]等功能的复合镀层,也都属于这一类。

2. 具有化学功能的复合镀层

在抵抗强腐蚀性介质(如强酸、强氧化剂等)的腐蚀方面,复合镀层常常不如一般的金属镀层。例如, Ni-SiC 复合镀层在大气