

电沉积制备镍基复合镀层的研究进展

冯筱珺, 阚洪敏, 魏晓冬, 张宁, 王晓阳, 龙海波

(沈阳大学 辽宁省先进材料制备技术重点实验室, 沈阳 110044)

摘 要: 金属-陶瓷复合镀层可以显著改善的硬度、致密性、耐蚀性、耐磨性以及抗高温氧化性能等可显著得到改善, 应用范围广泛。综述了影响复合镀层性能的几大因素, 重点介绍了增强相粒子粒径、表面活性剂类型、制备镀层的沉积方式以及第二相颗粒种类对电沉积复合镀层性能的影响。陶瓷颗粒尺寸影响复合镀层的性能, 细小颗粒对镍基复合镀层具有细晶强化作用, 微米级陶瓷颗粒能够大大改善 Ni 基复合镀层的力学性能。超细纳米陶瓷颗粒作为增强相, 可以显著提高复合镀层的耐蚀性, 添加纳米颗粒的复合镀层的显微硬度优于添加微米颗粒复合镀层。非离子表面活性剂能提高第二相颗粒在镀层中的复合量及在镀液中的分散性, 有利于获得高硬度的复合镀层, 进而提高整个镀层的耐磨性和耐蚀性。超声波-脉冲电沉积法得到的复合镀层形貌更平整, 晶粒更细小, 结构更致密, 且得到的复合镀层硬度更高, 耐磨性、耐蚀性更好。与 SiC 复合镀层相比, SiO₂ 复合镀层具有更好的耐蚀性和抗氧化性。最后, 分析展望了颗粒增强镍基复合材料的应用前景及未来研究的重点。

关键词: 电沉积; 镍基复合镀层; 第二相颗粒; 表面活性剂; 颗粒尺寸; 碳化硅

中图分类号: TQ153.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0075-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.013

Research progress of Ni-based Composite Coatings Prepared by Electrodeposition

FENG Xiao-jun, KAN Hong-min, WEI Xiao-dong, ZHANG Ning, WANG Xiao-yang, LONG Hai-bo

(Key Laboratory of Advanced Materials Technology of Liaoning Province, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

ABSTRACT: Metal ceramic composite coating can significantly improve hardness, density, corrosion resistance, wear resistance and high temperature oxidation resistance of the coating, and has a wide range of application. Some factors affecting properties of composite coatings were reviewed, effects of reinforced-phase particle size, type of surfactant, deposition mode and type of second-phase particles on properties of electrodeposited composite coating were emphatically introduced. The ceramic particle size affected properties of the composite coating, fine grains had effect of refined crystalline strengthening on Ni-based composite coating. Micron-grade ceramic particles could greatly improve mechanical properties of the Ni-based composite coating; corrosion resistance of the composite coating could be significantly improved using ultrafine ceramic particles in reinforced phase. Microhardness of the composite coating with nano particles was superior to that of composite coating with

收稿日期: 2017-02-13; 修订日期: 2017-03-22

Received: 2017-02-13; Revised: 2017-03-22

基金项目: 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目资助 (LJQ2015074); 国家自然科学基金资助 (51101104, 51372156)

Fund: Supported by the Excellent Talent Support Program of Liaoning Higher Education Institutions (LJQ2015074), the National Natural Science Foundation of China (51101104, 51372156)

作者简介: 冯筱珺 (1992—), 女, 硕士生, 研究方向为纳米材料与技术。

Biography: FENG Xiao-jun (1992—), Female, Master degree, Research focus: nano materials and technology.

通讯作者: 阚洪敏 (1978—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为纳米材料与技术。

Corresponding author: KAN Hong-min (1978—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: nano materials and technology.

microparticles. Nonionic surfactant could improve compound quantity of the second-phase particles in the coating and dispersibility in plating solution, which contributed to high-hardness composite coating, thus improving wear resistance and corrosion resistance of the whole coating. Morphology of the composite coating prepared in ultrasonic-pulse electrodeposition method was more smooth, the grain was finer, the structure was more compact, and the composite coating was harder, and wear resistance and corrosion resistance were better. Compared with SiC composite coating, SiO₂ composite coating exhibits better corrosion resistance and oxidation resistance. Finally, application prospect and future research focus of particle-reinforced nickel-based composite materials were analyzed.

KEY WORDS: electrodeposition; Ni-based composite coating; second-phase particles; surfactant; particle size; silicon carbide

在电解质溶液中,金属与不溶性固体微粒共沉积能够获得性能优异的复合镀层。镍已经被广泛地用作金属基质,镍基复合镀层除了可以被用作装饰性镀层外,还被用于如耐腐蚀、耐磨、耐热镀层等功能性镀层。近几年来,镍基复合镀层在曳引机的深松铲尖表面、宇航发动机的复杂形状部件以及油田设备等方面的应用越来越多^[1-6]。最早出现并且应用广泛的镀镍工艺为瓦特镀镍液,在瓦特镀液中加入金属的碳化物、氮化物、氧化物等作为第二相固体微粒,如碳化硅、氮化铝、氮化硅、氧化铝、二氧化钛和氧化锆等进行复合电镀,可得到具有更好的耐磨、耐腐蚀等特殊功能的复合镀层^[7-10]。

20 世纪 90 年代末,纳米微粒的出现为获得具有特殊功能的复合镀层提供了前所未有的机遇。金属基质与纳米颗粒形成的复合镀层具有良好的使用性能,因而受到人们的普遍关注。纳米结构金属陶瓷涂层的制备包括纳米尺寸的氧化物颗粒,如 Al₂O₃、TiO₂ 和 Y₂O₃ 分散到耐腐蚀的金属基质中。研究已经表明,即使少量的氧化物颗粒分散在镍基体中,也可显著改善该涂层的抗氧化性能和机械性能。例如,在钢表面镀覆镍涂层可以提高低温下的抗氧化和耐腐蚀性,但在高温下,由于晶粒生长,镍将失去抗氧化性能导致镍涂层软化,从而形成耐侵蚀性较差的表面。为了提高镍涂层的高温抗氧化性和耐侵蚀性,纳米尺寸的氧化物粒子被分散到镍金属基质中。

镍基复合镀层具有较高的硬度、较好的致密性、良好的耐蚀耐磨性以及装饰性等,这些性能主要取决于复合镀层基体相的显微结构及共沉积颗粒的含量和分布。由于纳米颗粒能够增强镍基复合镀层,使它的晶粒变细小,结构变得更加致密,表明纳米颗粒细化晶粒的效果显著。然而,颗粒尺寸的减小会降低颗粒的共沉积含量。此外,纳米颗粒表面能高,易团聚,在高导电金属电解质中很难均匀分布,而增强粒子的团聚将显著降低复合镀层的硬度、强度、耐蚀性和耐磨性。因此,本文针对纳米颗粒-镍基复合镀层的微

观组织形貌,综述了影响复合镀层性能的几大因素以及它的应用。

1 镍基复合镀层性能的影响因素

有研究表明,作为增强相的微粒在镀层中的含量越高,所得到的复合镀层的硬度、耐磨性、耐蚀性以及力学性能越能得到提高^[11-12]。但在实际生产过程中,镀层中第二相粒子的复合量受很多因素的影响。

1.1 SiC 颗粒尺寸的影响

将一种或多种不溶性陶瓷微粒,通过金属电沉积的方式均匀地嵌入到镍基镀层中,所形成的特殊镀层就是镍基复合镀层^[13]。颗粒增强复合镀层的强化机制通常有细晶强化、颗粒强化、弥散强化等^[14]。大量研究表明,在 Ni 基镀层中添加一定量的纳米 SiC 颗粒,可以提高整个镀层的耐磨性和耐蚀性。增强相选用微米陶瓷颗粒能够大大改善 Ni 基复合镀层的力学性能^[15-16]。超细纳米陶瓷颗粒作为增强相,可以提高镀层的耐蚀性^[17]。

不管是添加微米 SiC 颗粒,还是纳米 SiC 颗粒,对 Ni 基镀层都能起到细化晶粒的作用^[18]。添加量一定时, SiC 颗粒的粒度越小,复合镀层的表面形貌、显微硬度、耐磨性能越好。但是由于纳米颗粒尺寸十分细小,易于团聚,因此也有研究者^[19]研究了 2、1、0.2 μm 的 SiC 颗粒对 Ni-P-SiC 复合镀层性能的影响。当 SiC 粒度为 0.2 μm 时,纳米颗粒能够均匀分散在 Ni-P-SiC 复合镀层表面,整个镀层平整、致密。吴俊升等人^[20]以 20 nm 和 1.5 μm SiC 颗粒作为镍基复合镀层的第二相粒子,研究 SiC 颗粒尺寸对镍基复合镀层性能方面的影响。微米级颗粒增强复合镀层可以获得更高的表面硬度,与含 20 nm 陶瓷颗粒的复合镀层相比,含 1.5 μm SiC 颗粒的复合镀层的硬度明显提高,可达 693.2HV。在 NaCl 水溶液中,复合镀层的容抗弧半径呈 Ni-20 nm SiC>Ni-1.5 μm SiC>纯 Ni 的变化趋势,可以看出,复合镀层的耐蚀性能从优到劣依次为添加 20 nm SiC 复合镀层、添加 1.5 μm SiC 复

合镀层、纯 Ni 镀层。同时, 王红星等人^[21]在研究添加 40 nm SiC 对 Ni-5 μm SiC 的影响即纳米颗粒对微米颗粒复合镀层性能的影响时, 发现添加纳米颗粒的复合镀层的显微硬度优于 Ni-5 μm SiC 微米颗粒复合镀层, 与此同时, 复合镀层的摩擦因数也有所减小, 为微米复合镀层的一半。

SiC 颗粒对镍基复合镀层也有细化作用^[22-23], 主要是由于 SiC 颗粒的加入增大了电沉积过程的阴极极化, 使阴极电位更负, 增大了阴极表面 Ni 微晶的成核数目, 加上空位电阻效应抑制了 Ni 晶粒长大, 两者的协同作用使复合镀层的晶粒细化, 进而使复合

镀层晶粒变小的效果更加明显, 复合镀层的微观组织结构更加均匀、致密, 化学稳定性更能得到提高, 耐蚀性得到改善。SiC 颗粒的加入能够减小复合镀层中金属基体与腐蚀介质的接触面积, 与微米 SiC 颗粒相比, 纳米 SiC 颗粒的改变效果更显著。图 1 为添加不同尺寸的增强相 SiC 颗粒对制备的 Ni 基复合镀层微观组织形貌的影响, 可以看出, 添加 30 nm SiC 后, 整个复合镀层的形貌变得光滑平整, 晶粒也得到细化, 形态也由棱锥状转变为胞状, 组织之间更加紧凑排布, 结构更加均匀、致密, 表明了陶瓷颗粒尺寸对复合镀层性能的影响较大^[24]。

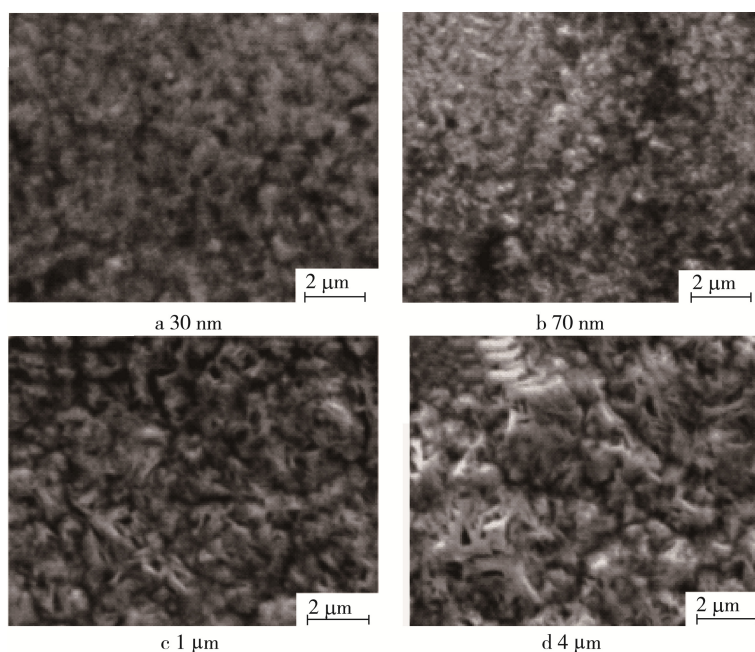


图 1 SiC 颗粒粒径不同时 Ni-SiC 复合镀层的 SEM 图片

Fig.1 SEM images of Ni-SiC composite coatings with different particle sizes of SiC particles

当添加量一定时, SiC 颗粒的粒度越小, 搅拌对其起的作用越大, SiC 颗粒更易于均匀悬浮在镀液中, 这样镀液中的纳米 SiC 颗粒的团聚现象就不严重, SiC 颗粒在镀层中能够均匀分布, 对复合镀层起弥散强化作用, 强化了 SiC 颗粒周围的镍镀层, 使陶瓷颗粒在镀层内的结合力得到提高。当纳米 SiC 颗粒与微米 SiC 颗粒同时发挥作用时, 可以强化基质镍金属, 复合镀层的显微硬度得到提高, 并降低其摩擦因数, 从而使复合镀层的耐磨性、耐蚀性得到提高, 表明 SiC 颗粒的粒度对复合镀层的性能有很大影响。由于 SiC 颗粒尺寸过于细小, 因而陶瓷颗粒的团聚现象也不容忽视。

1.2 表面活性剂的影响

镀层中金属与微粒的结合状态以及第二相微粒在镀层中的含量影响着整个复合镀层性能的优劣, 同时陶瓷颗粒在镀液中的分散性和稳定性也影响制备的复合镀层的均匀分布情况^[25]。由于纳米颗粒粒径很

小, 比表面积和化学反应活性位就会增加, 这样的增强相添加到镀液中就会更加便于团聚^[26]。因此, 第二相微粒的表面状态得到改善, 陶瓷微粒能够在镀液中得到充分分散, 最大限度地共沉积基质金属与陶瓷微粒是提高复合镀层性能的关键所在^[27]。不管是阴离子型、阳离子型, 还是非离子型, 作为电镀添加剂的表面活性剂都对改善陶瓷微粒的表面状态起着不可缺少的作用^[28]。

吴向清等人^[29]采用添加不同表面活性剂的方法研究了 Ni-SiC 复合镀层的性能。结果表明, 非离子表面活性剂不易使陶瓷微粒与基体金属发生共沉积, 具有一定的抑制沉积速率的作用, 使镀层中的 SiC 颗粒含量增加、复合镀层的硬度增加及耐磨性提高的是阳离子表面活性剂; 非离子型与阳离子型表面活性剂的协同作用, 可以促进镀层中 SiC 微粒的共沉积, 更好地改善复合镀层性能。也有研究者^[30]选用三种典型的表面活性剂 OP-10、十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB)、十二烷基苯磺酸钠 (LAS), 在一定工艺条件下制备

Ni-SiC 复合镀层。发现阴离子表面活性剂能够显著改善镀层的表面质量,但对粒子的复合量贡献不大;阳离子表面活性剂能够有效提高 SiC 颗粒在镀液中的悬浮性能,促进 SiC 粒子与镍共沉积;非离子表面活性剂能够显著提高镀层的粒子复合量和硬度。图 2 为

添加不同表面活性剂复合镀层的微观组织形貌,可以看出,添加阴离子型 LAS 表面活性剂的复合镀层的光洁度和平整性最好,表明表面活性剂能够影响复合镀层的形貌,进而影响其性能。

复合镀层中,作为增强相的颗粒复合量与陶瓷微

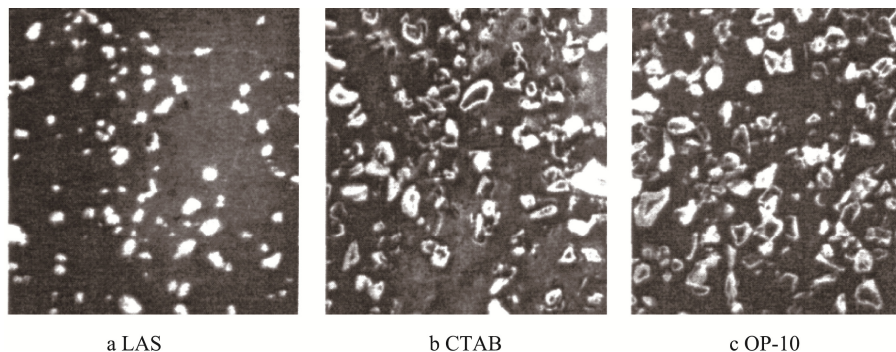


图 2 不同表面活性剂下 Ni-SiC 复合镀层的 SEM 图片
Fig.2 SEM images of Ni-SiC composite coatings with different surfactants

粒在镀液中的悬浮性能有一定的关系^[31]。一般情况下,在镀液中悬浮性好的陶瓷颗粒,在镀层中的复合量也会增多^[32]。分散体系的稳定性与颗粒的表面电势绝对值有关^[33—35],添加阳离子表面活性剂能够电离出阳离子,与吸附阳离子而表面呈正电性的 SiC 颗粒产生静电排斥作用,使其表面电势的绝对值增加,表面电势绝对值越大,稳定性越好^[36]。添加阴离子表面活性剂时 SiC 粒子分散悬浮,是由于 SiC 颗粒被阴离子表面活性剂电离出的阴离子包裹,进而引起电势绝对值的增加^[37]。非离子表面活性剂、阳离子表面活性剂能显著改善颗粒的悬浮性能,但它强大的表面活性使 SiC 颗粒与基体紧密结合^[38]。因此非离子表面活性剂在使 SiC 颗粒均匀分散在镀液中,提高第二相颗粒在镀层中的复合量,获得高硬度的复合镀层方面表现最好,进而提高了复合镀层的耐磨性和耐蚀性。

1.3 电沉积方式的影响

虽然上述两种因素能够改善复合镀层的性能,但是由于陶瓷颗粒和表面活性剂在制备、使用和存贮时

的一些原因,改善效果仍待提高。为了解决这一问题,近年来,国内外学者以制备方法、制备工艺条件优化为核心主题,对复合镀层开展了广泛而深入的研究。

夏法锋等人^[39]发现,以超声波-脉冲电沉积方式制备的 Ni-SiC 纳米镀层的显微组织更加致密、光滑,镀层的耐蚀性最好。也有研究者发现(如图 3),表面平整性差、晶粒粒度大、形状不规则、分布不均匀的 Ni-SiC 复合镀层,是通过直流电沉积法制备的。与磁力-直流电沉积方式相比,直流电沉积超声波搅拌制备的复合镀层的表面平整性、组织致密性方面有明显改善。超声波-脉冲电沉积法得到的复合镀层形貌更平整,晶粒更细小,结构更致密,且硬度更高,耐磨性、耐蚀性更好。这主要是由于电沉积过程中,超声波和脉冲电流的协同作用,使基质金属与纳米颗粒的传质效果得到增强,同时降低镍晶核的生长速率,提高晶粒镍的形核率;其次,在整个电沉积过程中,占据、阻碍基质金属生长的第二相陶瓷颗粒能够降低形核过电位,促使致密、光滑的微观组织结构形成,为基质金属提供形核点,实现晶粒细化^[40]。根据

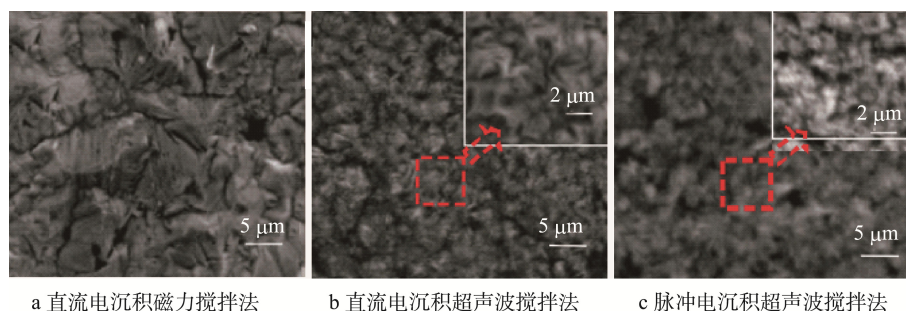


图 3 不同沉积方式下 Ni-SiC 复合镀层的 SEM 图片

Fig.3 SEM images of Ni-SiC composite coatings under different deposition modes: a) DC electrodeposition magnetic stirring method, b) DC electrodeposition ultrasonic stirring method, c) pulse electrodeposition ultrasonic stirring method

Archard 定律, 镀层硬度与耐磨性之间存在一定关系, 即一般情况下, 镀层硬度与镀层耐磨性成正比^[41]。脉冲电沉积超声波搅拌得到的复合镀层的耐磨耐蚀性更好, 这是由于这种方式能够得到平整的表面形貌、致密的组织、紧凑排列的晶界, 从而硬度高, 并且与腐蚀介质的实际接触面积小, 减小由表及里的渗透腐蚀, 抑制晶间腐蚀, 减轻复合镀层的腐蚀程度。

1.4 第二相颗粒种类的影响

解决在高温环境下的腐蚀问题及在高温或某些特殊情况下的磨损问题, 复合镀层被认为是一种有效的方法^[42]。Ni-SiC 复合镀层被应用于汽车发动机的缸体上, 这是因为该复合镀层的耐磨性较好, 能够明显提高其使用寿命^[43-44]; Ni-SiO₂ 复合镀层能够改善材料的抗氧化性; Ni-荧光颜料复合镀层在紫外线照射下能够发出荧光, 用途广泛; Ni-TiO₂ 复合镀层具有电催化功能。由此可以发现, 加入不同种类的第二相颗粒可以获得不同性能的镍基复合镀层。

禹萍等人^[45]通过对 Ni-SiC、Ni-SiO₂ 复合镀层的微观组织形貌进行观察和分析, 研究第二相颗粒种类对复合镀层的腐蚀性、抗氧化性以及导热性的影响。结果发现, 加入 SiO₂ 颗粒的复合镀层在耐蚀和抗氧化性方面更胜一筹; 加入 SiC 颗粒的复合镀层, 其导热性明显强于 Ni-SiO₂ 复合镀层, 两者的导热系数随时间的延长均略有减少。这主要是由于 SiC 微粒能够导电, 电沉积制备复合镀层后, SiC 颗粒进入到镀层中, 促使镀层生长, 镀层表面粗糙、疏松, 从而使加入 SiC 颗粒的复合镀层的抗氧化性能降低。与基质金属镍结合也会形成许多微观腐蚀电池, 使复合镀层的抗腐蚀性能降低。加入 SiC 颗粒的复合镀层与加入 SiO₂ 颗粒的复合镀层相比, 其表现出较好的导热性, 也与 SiC 颗粒具有导电能力有关^[46-47]。

在一定温度下, 材料具有高强度、抗蠕变、抗疲劳、耐腐蚀、与氧相容等特性, 是成为液体火箭发动机涡轮部件的必要条件^[48]。虽然添加 SiC 颗粒形成的复合镀层具有高强度、高刚度和抗蠕变的性能, 但却不能兼顾与氧的相容性^[49], 而 Ni-SiO₂ 复合镀层在抗氧化性方面更胜一筹。因此, 可以将 SiC、SiO₂ 作为第二相颗粒加入到镍基镀层中, 制备出 Ni-SiC-SiO₂ 复合镀层, 取长补短, 使复合镀层同时具备高强度、耐腐蚀、抗氧化等特性。

2 应用

2.1 在曳引机方面的应用

用深松代替翻耕是保护性耕作技术推广的重要条件, 已被广泛应用^[50]。深松铲在工作时, 由于铲尖

会受到来自土层的强烈磨损, 会影响深松的生产效率。磨损程度增加, 寿命缩短, 加上深松铲的使用量逐年增多, 不必要的损耗和能源浪费也会增加。在深松铲尖表面制备镍基复合涂层, 使该类刀具的耐磨性和使用寿命延长, 韧性增强, 满足了农机长时间、高强度的作业要求, 且失效频率变低, 从而降低使用成本。

2.2 在汽车、航空方面的应用

Ni-SiC 复合电镀已成功地应用于汽车发动机缸体、形状复杂的航空发动机部件等。如日本铃木汽车公司将该复合镀层成功应用于发动机的汽缸内壁, 镀有 Ni-SiC 复合镀层的汽缸内壁的磨损量仅为普通铁汽缸的 60%, 从而节省 20%~30% 的成本。不仅如此, 由于复合镀层制备灵活, 因而可以广泛地应用在形状复杂的构件上, 大大提高了应用范围。纳米结构金属-陶瓷涂层已经在许多工业得到应用, 已被用于需要高温和耐侵蚀性的喷气发动机组件。

2.3 在油田设备方面的应用

关键部位的性能是油田机械设备使用寿命的关键, 有时整个机械设备无法继续使用往往是因为其表面疲劳或磨损^[51]。对油田设备的金属表面, 通过电沉积复合镀层技术添加纳米颗粒, 形成具有高耐磨性、抗高温氧化性、耐蚀性、高硬度等优点的复合镀层, 能够改善关键零件的使用性能, 提高整个设备的使用寿命, 大大减少维修和成本^[52]。例如, 在室温条件下, 油田装备的金属或非金属表面, 经过电沉积一层纳米复合镀层后, 整个机械设备的耐磨、耐蚀、防护、装饰、电磁性能等均得到提高, 因而在油田设备关键零件上应用广泛^[53-54]。

3 展望

随着现代科技的进步, 特别是汽车业、轮船业、航空、各种工业燃气轮机等工业的蓬勃发展, 对材料的性能提出了越来越高的要求。镍基复合镀层价值的增加值高, 具有很大的应用前景。提高镍基复合镀层产品的综合性能, 减小 Ni 晶粒的尺寸, 使得到的镍基复合镀层表面形貌更加平整, 组织结构更致密, 通过生产工艺优化降低成本, 是今后的研究重点。通过改变表面活性剂添加的方式来解决第二相陶瓷颗粒的团聚问题, 以满足工业应用领域对相关材料日益苛刻的性能要求。同时, 也可以采用多种第二相颗粒复合, 取长补短, 制备出满足不同性能的复合镀层。根据以往研究, 通过分子动力学设计和仿真, 更直观地观察纳米镀层的微观结构, 也有利于纳米复合镀层的应用与再开发。

参考文献:

- [1] SEN R, BHATTACHARYA S, DAS S, et al. Effect of Surfactant on the Co-electrodeposition of the Nano-sized Ceria Particle in the Nickel Matrix[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 489(2): 650.
- [2] LARIBAGHAL S M, AMADEH A, HEYDARZADEDEHSOHI M. Investigation of Mechanical Properties and Operative Deformation Mechanism in Nano-crystalline Ni-Co-SiC Electrodeposits[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 542(4): 104.
- [3] MAURIN G, LAVANANT A. Electrodeposition of Nickel-Silicon Carbide Composite Coatings on a Rotating Disc Electrode[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1995, 25(12): 1113.
- [4] HU F, CHAN K C. Electrocodeposition Behavior of Ni-SiC Composite under Different Shaped Waveforms[J]. Applied Surface Science, 2004, 233(1—4): 163.
- [5] 胡伟, 谭澄宇, 崔航, 等. Ni-SiC 复合梯度镀层的耐腐蚀性能[J]. 材料保护, 2009, 42(6): 17.
HU Wei, TAN Cheng-yu, CUI hang, et al. Corrosion Resistance of Ni-SiC Composite Gradient Coating [J]. Materials Protection, 2009, 42(6): 17.
- [6] 陈华东, 曾波. 六偏磷酸钠的应用及制备技术[J]. 无机盐工业, 2010, 42(2): 9.
CHEN Hua-dong, ZENG Bo. Application and Preparation Technology of Sodium Hexametaphosphate Six[J]. Organic Salt Industry, 2010, 42(2): 9.
- [7] EWA R, LIDIA B, ŁUKASZ D, et al. Electrodeposition of Nickel-SiC Composites in the Presence of Cetyltrimethylammonium Bromide[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(24): 7414.
- [8] 李晖, 谢华, 邹刚. Ni-P-纳米 SiC 化学复合镀层组织与性能研究[J]. 表面技术, 2009, 38(1): 37—38.
LI Hui, XIE Hua, ZOU Gang. Study on Microstructure and Properties of Ni-P-Nano SiC Electroless Composite Coating[J]. Surface Technology, 2009, 38(1): 37—38.
- [9] XIA F, XUB H, CHAO L, et al. Microstructures of Ni-AlN Composite Coatings Prepared by Pulse Electrodeposition Technology[J]. Applied Surface Science, 2013, 271(4): 7.
- [10] PAYDARA S, JAFARIA A, BAHROLOLOOMB M E, et al. Enhancing Ni Electroplated Matrix through Mixed Boron Nitride-Carbide Reinforcement[J]. Vacuum, 2013, 92: 52.
- [11] SHRESTHA N K, MASUKOA M, SAJI T. Composite Plating of Ni-SiC Using Surfactants and Wear Resistance of Coatings[J]. Wear, 2003, 254: 555.
- [12] 曹学功. 镍-金刚石复合镀层耐磨性能研究[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2000, 21(2): 141.
CAO Xue-gong. Study on Wear Resistance of Ni Diamond Composite Coatings [J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science Edition), 2000, 21(2): 141.
- [13] 郭鹤桐, 张三元. 复合镀层[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
GUO He-tong, ZHANG San-yuan. Composite Coating [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1991.
- [14] ROBIN A, FRATARI R Q. Deposition and Characterization of Nickel-Niobium Composite Electrocoatings[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2007, 37(7): 805.
- [15] VAEZI M R, SDRNEZHAAD S K, NIKZAD L. Electrodeposition of Ni-SiC Nano-composite Coatings and Evaluation of Wear and Corrosion Resistance and Electroplating Characteristics[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2008, 315: 176.
- [16] BENEÀ L, BONORA P L, BORELLO A, et al. Effect of SiC Size Dimensions on the Corrosion Wear Resistance of the Electrodeposited Composite Coating[J]. Materials and Corrosion, 2002, 53(1): 23.
- [17] 吴小凤, 姚正军. TiO₂ 纳米颗粒增强无铬锌铝涂层的组织及耐蚀性[J]. 材料热处理学报, 2014, 35: 210.
WU Xiao-feng, YAO Zheng-jun. Microstructure and Corrosion Resistance of TiO₂ Nano Particle Reinforced Chromium Free Zinc Aluminum Coating[J]. Journal of Heat Treatment, 2014, 35: 210.
- [18] BAGHERY P, FARAZM M, MOUSAVI A B, et al. Ni-TiO₂ Nanocomposite Coating with High Resistance to Corrosion and Wear[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204: 3804—3810.
- [19] 王勇, 马春华, 楚殿庆. SiC 粒度对磁力搅拌-化学沉积 Ni-P-SiC 镀层的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(1): 135.
WANG Yong, MA Chun-hua, CHU Dian-qing, et al. Effect of SiC Particle Size on Magnetic Stirring and Chemical Deposition of Ni-P-SiC Coating[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36(1): 135.
- [20] 吴俊升, 李晓刚, 孔明, 等. SiC 颗粒尺寸对镍基复合镀层耐磨性和耐蚀性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 125.
WU Jun-sheng, LI Xiao-gang, KONG Ming, et al. Effect of SiC Particle Size on Wear Resistance and Corrosion Resistance of Ni Based Composite Coating [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 125.
- [21] 王红星, 毛向阳, 沈彤. 纳米 SiC 颗粒对微米 Ni-SiC 复合镀层性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1560.
WANG Hong-xing, MAO Xiang-yang, SHEN Tong. Effect of Nano SiC Particles on Properties of Micron Ni-SiC Composite Coating[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(6): 1560.
- [22] RIQUELME A, RODRIGO P, RAMS J. Analysis and Op-

- timization of Process Parameters in Al-SiC Laser Cladding [J]. Review of Economic Studies, 2016, 78(2): 165—173.
- [23] SIMCHI A, GODLINSKI D. Effect of SiC Particles on the Laser Sintering of Al-7Si-0.3Mg Alloy[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(2): 199—202.
- [24] 李建芳, 周言敏. 电沉积方法对 Ni-SiC 纳米微粒复合镀层结构与性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(4): 32.
LI Jian-fang, ZHOU Yan-min. Effect of Electrodeposition Method on Structure and Properties of Ni-SiC Nano Composite Coating[J]. Electroplating and Refining, 2014, 36(4): 32.
- [25] 刘伟, 谭僖, 曹腊梅. Si(B)CN 陶瓷及其复合材料评价与应用研究现状[J]. 装备环境工程, 2016(3): 98—104.
LIU Wei, TAN Xi, CAO La-mei. Research Progress in the Evaluation and Application of Si(B)CN Ceramics and Ceramic Matrix Composites[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016(3): 98—104.
- [26] 林灵楠, 彭浩, 丁国良, 等. 表面活性剂对纳米制冷剂颗粒团聚的影响[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(9): 1969—1972.
LIN Ling-nan, PENG Hao, DING Guo-liang, et al. The Influence of Surfactant on the Particle Agglomeration of Nanorefrigerant[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(9): 1969—1972.
- [27] DAS M, BYSAKH S, BASU D, et al. Microstructure, Mechanical and Wear Properties of Laser Processed SiC Particle Reinforced Coatings on Titanium[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(205): 4366—4373.
- [28] 郭国才. 表面活性剂在电镀中的应用[J]. 电镀与环保, 2006, 26(3): 15.
GUO Guo-cai. Application of Surfactants in Electroplating [J]. Electroplating and Environmental Protection, 2006, 26(3): 15.
- [29] 吴向清, 谢发勤. 表面活性剂对 Ni-SiC 复合镀层性能的影响[J]. 材料保护, 2009, 42(2): 10.
WU Xiang-qing, XIE Fa-qin. Influence of Surfactant on the Properties of Ni-SiC Composite Coating[J]. Materials Protection, 2009, 42(2): 10.
- [30] 林志平, 黄新民, 舒霞, 等. 表面活性剂对 Ni-SiC 复合电镀的影响[J]. 金属功能材料, 2008, 15(5): 20.
LIN Zhi-ping, HUANG Xin-min, SHU Xia, et al. Effects of Surfactants on Ni-SiC Composite Plating[J]. Metallic Functional Materials, 2008, 15(5): 20.
- [31] CUI C Y, CUI X G, ZHAO Q, et al. Simulation, Microstructure and Microhardness of the Nano-SiC Coating Formed on Al Surface via Laser Shock Processing[J]. Materials & Design, 2014, 62(10): 217—224.
- [32] 韩廷水, 于爱兵, 田欣利. 表面活性剂对 Ni-Si₃N₄ 复合镀层的影响[J]. 中国表面工程, 2004, 17(6): 32—35.
HAN Ting-shui, YU Ai-bing, TIAN Xin-li. Effects of Surfactants on Ni-Si₃N₄ Composite Coatings [J]. China Surface Engineering, 2004, 17(6): 32—35.
- [33] 蒋庆哲. 表面活性剂科学与应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006: 43.
JIANG Qing-zhe. Surfactant Science and Application [M]. Beijing: Sinopec Press, 2006: 43.
- [34] FILIATRE C, PIGNOLET C. Electrodeposition of Particles at Nickel Electrode Surface in a Laminar Flow Cell[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2003, 222: 55.
- [35] 曹晓瑶. 表面活性剂合成性能及其在废纸脱墨中的应用[J]. 包装工程, 2015, 36(9): 150—154.
CAO Xiao-yao. Synthesis and Properties of Surfactant and Its Application in Deinking of Wastepaper[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9): 150—154.
- [36] 郝亚莉, 杨文忠, 尹晓爽, 等. 表面活性剂对 Ni-P-Al₂O₃ 复合镀层性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 15—21.
HAO Ya-li, YANG Wen-zhong, YIN Xiao-shuang, et al. Effects of Surfactants on Properties of Ni-P-Al₂O₃ Composite Coatings[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 15—21.
- [37] CALDERÓN J A, HENAO J E, GÓMEZ M A. Erosion-Corrosion Resistance of Ni Composite Coatings with Embedded SiC Nanoparticles[J]. Electrochimica Acta, 2014, 124: 190—198.
- [38] LEE J, HAN K, KOO J. A Novel Method to Evaluate Dispersion Stability of Nanofluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 70: 421—429.
- [39] 夏法锋, 黄明, 马春阳, 等. 电沉积方式对 Ni-SiC 纳米镀层耐腐蚀性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 16(44): 2429.
XIA Fa-feng, HUANG Ming, MA Chun-yang, et al. Effect of Electro Deposition Methods on Corrosion resistance of Ni-SiC Nano Coatings[J]. Functional Materials, 2013, 16(44): 2429.
- [40] 宿辉, 张兆国. 镍基纳米(SiC)_p 化学复合镀层的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(4): 55—57.
SU Hui, ZHANG Zhao-guo. Study on Ni Based Nano (SiC)_p Composite Coatings[J]. Surface Technology, 2010, 39(4): 55—57.
- [41] 楼永通, 陈益棠, 王寿根, 等. 膜分离技术在电镀镍漂洗水回收中的应用[J]. 膜科学与技术, 2002, 22(2): 43.
LOU Yong-tong, CHEN Yi-tang, WANG Shou-gen, et al. Application of Membrane Separation Technology in the Recovery of Nickel Plating Rinse Water [J]. Membrane Science and Technology, 2002, 22(2): 43.
- [42] EVANS T E, HART A C, SKEDGELL A N. The Colored Film on Stainless Steel[J]. Trans Inst of Metal Finish, 1973, 51: 108—112.
- [43] 马洪芳, 王艺涵, 许斌. Ni-P 纳米复合化学镀的研究现

- 状及展望[J]. 材料保护, 2010, 43(11): 32—35.
- MA Hong-fang, WANG Yi-han, XU Bin. Research Status and Prospect of Electroless Plating of Ni-P Nanocomposites[J]. Materials Protection, 2010, 43(11): 32—35.
- [44] PARIDA G, CHAIRA D, BASU A. Ni-ZrO₂ Composite Coating by Electro-Co-deposition[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2013(1): 156.
- [45] 禹萍, 苏玉长, 谭澄宇, 等. Ni-SiC 和 Ni-SiO₂ 复合镀层性能的研究[J]. 表面技术, 2001, 30(3): 27.
- YU Ping, SU Yu-chang, TAN Cheng-yu, et al. Study on Steel Ni-SiC and Ni-SiO₂ Composite Coatings[J]. Surface Technology, 2001, 30(3): 27.
- [46] 顾云飞, 魏守强, 邵忠财. 镍基复合镀层研究的最新进展[J]. 表面技术, 2008, 39(4): 15—21.
- GU Yun-fei, WEI Shou-qiang, SHAO Zhong-cai. Recent Progress in the Study of Ni Based Composite Coatings [J]. Surface Technology, 2008, 39(4): 15—21.
- [47] 李亚敏, 王阿敏, 刘洪军. 表面直接化学复合镀 Ni-P-SiC 工艺研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(24): 45—49.
- LI Ya-min, WANG A-min, LIU Hong-jun. Study on Surface Direct Electroless Composite Plating Ni-P-SiC Process[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(24): 45—49.
- [48] 高丕周. 发动机缸体 Ni-SiC 耐磨镀层的研究[J]. 现代制造工程, 2010(11): 58.
- GAO Pei-zhou. Study of Ni-SiC Wear-resisting Layer Application on the Engine Block[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010(11): 58.
- [49] 刘演龙. 纳米 SiC 对高频脉冲电沉积 Ni 镀层性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 91—96.
- LIU Yan-long. Effect of Nano SiC on the Properties of Ni Coatings Deposited by High Frequency Pulse Electrodeposition[J]. Surface Technology, 2016, 45(12): 91—96.
- [50] 张国洪. 新型镍基复合材料在曳引机应用[J]. 科技创新与应用, 2013(7): 18.
- ZHANG Guo-hong. Application and Innovation of New Nickel Based Composites in Traction Machine[J]. Science and Technology, 2013(7): 18.
- [51] 梅明亮, 王翠凤. 脉冲电镀制备 Ni-cBN 复合镀层的性能[J]. 材料保护, 2016, 49(2): 46—49.
- MEI Ming-liang, WANG Cui-feng. Properties of Electrodeposited Ni-cBN Composite Coatings by Pulsed Power Supply[J]. Materials Protection, 2016, 49(2): 46—49.
- [52] 卢绮敏. 石油工业中的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 186.
- LU Qi-min. Corrosion and Protection in Petroleum Industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 186.
- [53] 张伟, 吉小超, 魏敏, 等. 国内外再制造技术体系及竞争力分析[J]. 中国表面工程, 2014(3): 1—9.
- ZHANG Wei, JI Xiao-chao, WEI Min, et al. Analysis of Remanufacturing Technology System and Competitiveness at Home and Abroad[J]. China Surface Engineering, 2014(3): 1—9.
- [54] 汤迎文, 鲁玉祥. Ni-W-P-碳纳米管复合镀层的制备及组织与性能研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- TANG Ying-wen, LU Yu-xiang. Study on Preparation, Microstructure and Properties of Ni-W-P-Carbon Nanotube Composite Coating[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.