文章编号：1004-0609(2015)06-1560-07

纳米 SiC 颗粒对微米 Ni-SiC 复合镀层性能的影响

王红星[1,2]，毛向阳[1,2]，沈　彤[1,2]

(1. 南京工程学院 江苏省先进结构材料及应用技术重点实验室，南京 211167；
2. 南京工程学院 材料工程学院，南京 211167)

摘　要：采用双脉冲复合电镀技术，在瓦特型镀液中，制备了含微/纳米 SiC 颗粒的 Ni 基复合镀层，研究镀液中纳米 SiC 添加量对复合镀层微观形貌、摩擦性能和抗氧化性能的影响。结果表明：在 SiC 颗粒(5 μm)浓度为 10 g/L 的镀液中，添加纳米 SiC 和 Ni-SiC 复合镀层镍择优取向由晶面(200)转变为晶面(111)；当 SiC(40 μm)浓度为 4.0 g/L 时，复合镀层显微硬度最大，为 456 HV；复合镀层摩擦因数最小，平均值为 0.28，为微米复合镀层的 1/2；经 900 ℃氧化 100 h 后，氧化质量增加为 6.025 mg/cm^2，为微米复合镀层的 1/3。

关键词：Ni-SiC 复合镀层；微米 SiC；耐磨；抗氧化性能
中图分类号：TG174.44　　**文献标志码**：A

Effect of nano-SiC particles on properties of Ni-SiC micro-composite coatings

WANG Hong-xing[1,2], MAO Xiang-yang[1,2], SHEN Tong[1,2]

(1. Key Laboratory of Advanced Structural Materials and Application Technology of Jiangsu Province, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. School of Materials Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Ni based composite coatings containing micro- and nano-SiC particles were prepared by dipulse electrodepositing in watts nickel solution. The effect of the nano-SiC content in the solution on the micro morphology, wear and oxidation resistance of the coating was investigated. The results show that the preferred orientation the Ni crystallites transits from (200) crystal face to (111) crystal face of Ni-SiC composite coatings when adding nano-SiC in electrolyte with SiC (5 μm) content of 10 g/L. the maximum value of microhardness of coating with 456 HV is obtained, and the smallest coefficient of coating with 0.28 is about 1/2 than that of micro-SiC composite coating when adding 4.0 g/L nano-SiC in electrolyte, and shows the best oxidation resistance with the mass gain of 6.025 mg/cm^2 is about 1/3 than that of micro-SiC composite coating after oxidation at 900 ℃ for 100 h.

Key words: Ni-SiC composite coating; micro-SiC; wear resistance; oxidation resistance property

复合电镀是通过金属电沉积的方法，将一种或几种不溶性固体颗粒(Al_2O_3、SiC、TiC 等)均匀地夹杂到金属基质中，形成具有良好耐磨性、耐腐蚀性和抗氧化等性能的镀层。镍由于具有良好的耐腐性和较高硬度等优点，已被广泛用作复合镀层的基质金属。

目前，以镍为基质金属，镀液中加入不溶性纳米颗粒，制备如 Ni-Al_2O_3[1−2]、Ni-BN[3]、Ni-SiC[4]、Ni-P-SiC[5−7]、Ni-TiC[8]等具有优良耐蚀性、耐磨性的

基金项目：国家青年科学基金资助项目(51301086)；南京工程学院资助项目(N20130212，CKJB201205)
收稿日期：2014-10-09；**修订日期**：2015-02-10
通信作者：王红星，副教授，博士；电话：025-86118274；E-mail: wanghx@njit.edu.cn

纳米复合镀层。另外，通过加入具有自润滑性的颗粒，形成如 Ni-PTFE[9]、Ni-MoS_2[10]和 Ni-C_g[11]等具有减摩性能的纳米复合镀层。由于纳米颗粒的高表面能，使其极易在镀液中发生团聚，并最终导致复合镀层中的颗粒以团聚状态存在。当团聚态的颗粒尺寸明显增大时，其弥散强化效果大大降低，起不到提高复合镀层性能的作用。通过分析文献[12−16]，通过改变复合镀工艺参数，诸如阴极电流密度、电沉积方式、颗粒浓度、镀液温度、超声波、磁场和表面活性剂等，这些研究结果有助于改善镀层内纳米颗粒的分散性，发挥了纳米颗粒的细化晶粒和弥散强化基体的作用。MEENU 等[17]比较研究了微米、纳米 SiC 颗粒对 Ni-Co 镀层耐磨性能，结果表明，含微米颗粒的复合镀层的磨损率低于纳米复合镀层；纳米复合镀层的硬度和耐腐蚀性能都高于微米复合镀层。综上所述，关于微/纳米颗粒单独沉积的研究已较多，而镀液中添加微/纳米颗粒共沉积的复合镀层的相关研究尚未见报道。

本文作者采用双脉冲电源，在瓦特型镀液中制备微/纳米 SiC 混杂的 Ni-SiC 复合镀层。在镀液中微米 SiC 浓度一定的条件下，添加纳米 SiC 颗粒，研究镀液中纳米 SiC 颗粒添加量对微米 Ni-SiC 复合镀层组织结构、耐磨性能和抗氧化性能的影响。

1　实验

1.1　镀液的配制

以纯度 99.9%电解镍板为阳极，纯铜切割成尺寸为 15 mm×15 mm×3.0 mm 的试片为阴极，采用多脉冲电镀电源(SMD−30P)，在纯铜表面沉积 Ni-SiC 纳米复合镀层。电镀液组成及工艺条件见表 1。

一般在常温下镀液添加微、纳米 SiC 颗粒，尤其是纳米 SiC 颗粒，加入到镀液时，常漂浮在镀液表面，需较长时间搅拌才能进入镀液。本实验中，首先取少量预先配制好的基础镀液用水浴锅加热到一定温度，然后加入称量好的 SiC 颗粒，并滴入表面活性剂(阳离子型表面活性剂)十六烷基三甲基溴化铵，添加量为 0.25%(质量分数)，SiC 颗粒很快被镀液润湿而进入到镀液中。再将润湿好的 SiC 颗粒加入到剩余的镀液中，超声波清洗器(KH−300DB)震荡，同时采用数显电动搅拌器(JJ−1200W)以转速 800 r/min 进行搅拌，时间为 15 min，进行复合镀。

1.2　性能测试

采用 FM700 型显微硬度测试设备测量复合镀层显微硬度。测试条件：压头载荷 1 N，加载时间为 15 s。在镀层横截面不同部位测试 5 个值，取平均值。

采用 WTM−2E 型可控气氛微型摩擦磨损试验仪进行镀层摩擦实验。测试条件：Si_3N_4 球为对磨材料，显微硬度 1500 HV，直径 4 mm；载荷 3 N，转速为 250 r/min，环境温度为室温，磨痕半径为 4 mm，时间为 0.5 h。

复合镀后的试样以丙酮为清洗液，进行超声波清洗、干燥后置于 Al_2O_3 坩埚中，连同坩埚一起，用精度为 0.1 mg 分析天平称量氧化前的质量。为了保证实验数据的准确性，在实验前瓷坩埚在 1000 ℃中烧至恒质量，以除去其中的水分和杂质。将试样同坩埚一起称取质量做为起始质量，称取质量后放入箱式炉内，在 900 ℃下静止空气中分别氧化 20、40、60、80 和 100 h。在预先设定的时间内氧化后，炉冷却到室温，将试样连同坩埚一起称取质量。

1.3　检测方法

采用 JSM−6380LV 扫描电镜(SEM)配能谱分析仪(EDS)分析复合镀层表面及磨损的微观形貌；采用 Bruker D8 Advance 型转靶 X 射线衍射仪(XRD)分析镀层结构，旋转靶为铜靶，采用 Cu K_α 激发源，管电流 40 mA，管电压 40 kV，步长 0.02°，扫描速度为 5.0 (°)/min。

2　结果与讨论

2.1　纳米 SiC 添加量对复合镀层微观形貌的影响

图 1 所示为镀液中纳米 SiC 颗粒添加量不同时 Ni-SiC 复合镀层的微观形貌。由图 1 看出，镀液中添

表 1　Ni/SiC 复合镀层的制备的工艺参数

Table 1　Electrodeposition parameters for Ni/SiC composite coatings

Concentration/(g·L^{-1})					pH	Temperature/℃	Stirring rate/(r·min^{-1})	Current density/(A·dm^{-2})	Cycle time/μs	Pulse width/μs	Plating time/h
$NiSO_4·6H_2O$	$NiCl·6H_2O$	H_3BO_3	SiC powder (5 μm)	SiC powder (40 nm)							
300	30	35	10.0	2.0, 4.0, 8.0	4.5−5.5	30±1	200	2	1000	100	10

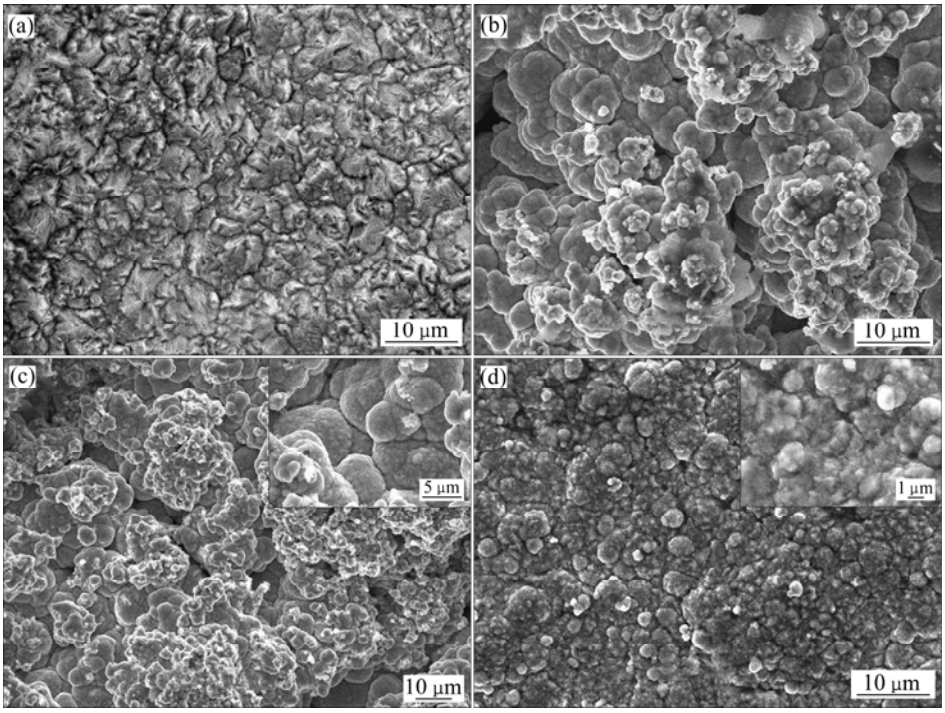

图 1 镀液中不同纳米 SiC 颗粒添加量复合镀层的表面微观形貌

Fig. 1 Surface morphologies of composite coatings with different nano-SiC contents in solution: (a) 0 g/L; (b) 2.0 g/L; (c) 4.0 g/L; (d) 8.0 g/L

加纳米 SiC 颗粒后，对复合镀层的微观形貌有明显的影响。镀液中未添加纳米 SiC 时，Ni-SiC 复合镀层表面晶粒尺寸较大，呈棱锥状，镀层致密，如图 1(a)所示；镀液中添加 2.0 g/L 纳米 SiC 后，镀层表面呈胞状，胞状结构由尺寸更小的晶粒组成，但胞状结构尺寸不均匀，镀层表面疏松，如图 1(b)所示；添加量为 4.0 g/L 时，复合镀层的表面形貌与 2.0 g/L 时的相类似，呈胞状结构，如图 1(c)所示；当纳米 SiC 颗粒添加量增加到 8.0 g/L 时，复合镀层的致密度有所增加，镀层的表面胞状结构尺寸随镀液中纳米 SiC 颗粒添加量增加而增大。这是因为镀液中添加少量纳米 SiC 颗粒时，在基质金属沉积过程中，SiC 颗粒吸附在基质金属表面的活化位置，增加了镍金属的形核位置，细化了晶粒，使镀层表面呈颗粒状；随镀液中纳米颗粒量多，颗粒间碰撞几率加大，出现团聚体，镀层中纳米 SiC 颗粒增多，形成表面堆积，复合镀层表面呈胞状结构；继续增加镀液中纳米颗粒添加量，纳米颗粒团聚现象更加严重，镍金属包裹在纳米颗粒团表面进行沉积，而纳米团颗粒之间镍晶粒的生长滞后，颗粒间隙得不到镍晶粒的补充，形成了疏松结构的镀层表面。

图 2 所示为镀液中纳米 SiC 颗粒不同添加量时 Ni-SiC 复合镀层的截面微观形貌。由图 2 看出，当镀液中纳米 SiC 颗粒添加量为 2.0~4.0 g/L 时，纳米 SiC 颗粒较均匀分散在镀层内，且含量随镀液中颗粒添加量的增加而增加，当镀液中纳米 SiC 颗粒添加量为 8.0 g/L 时，纳米 SiC 颗粒在镀层内分散性变差，出现团聚现象，如图 2(d)所示。

2.2 纳米 SiC 颗粒添加量对复合镀层组织结构的影响

图 3 所示为镀液中纳米 SiC 颗粒添加量不同时镀层的 XRD 谱。由图 3 看出，镀层均为单一的面心立方(fcc)结构。当镀液中只有微米 SiC 颗粒时，基质金属 Ni 在(200)晶面择优生长。当镀液中添加纳米 SiC 颗粒后，在添加量 2.0~8.0 g/L 范围内，基质金属 Ni 在(111)晶面呈择优生长。这可能是镀液中纳米 SiC 颗粒的存在，在镍结晶过程中，改变了 Ni 与 SiC 颗粒间界面相匹配关系，改变了 Ni 结晶过程中晶面的择优取向。另外，纳米颗粒可能充当了形核质点，影响了(200)晶面的生长趋势。

2.3 纳米 SiC 添加量对复合镀层摩擦性能的影响

图 4 所示为镀液中纳米 SiC 颗粒添加量与复合镀层的显微硬度和摩擦因数之间的关系。由图 4(a)看出，随镀液中纳米颗粒添加量增加，镀层显微硬呈先增后降低的变化趋势。微米 SiC/Ni 复合镀层的显微硬度最小，为 368 HV，镀液中纳米 SiC 颗粒添加量为 4.0 g/L 时，达到最大值，为 456 HV。在纳米 SiC 颗粒添加前，

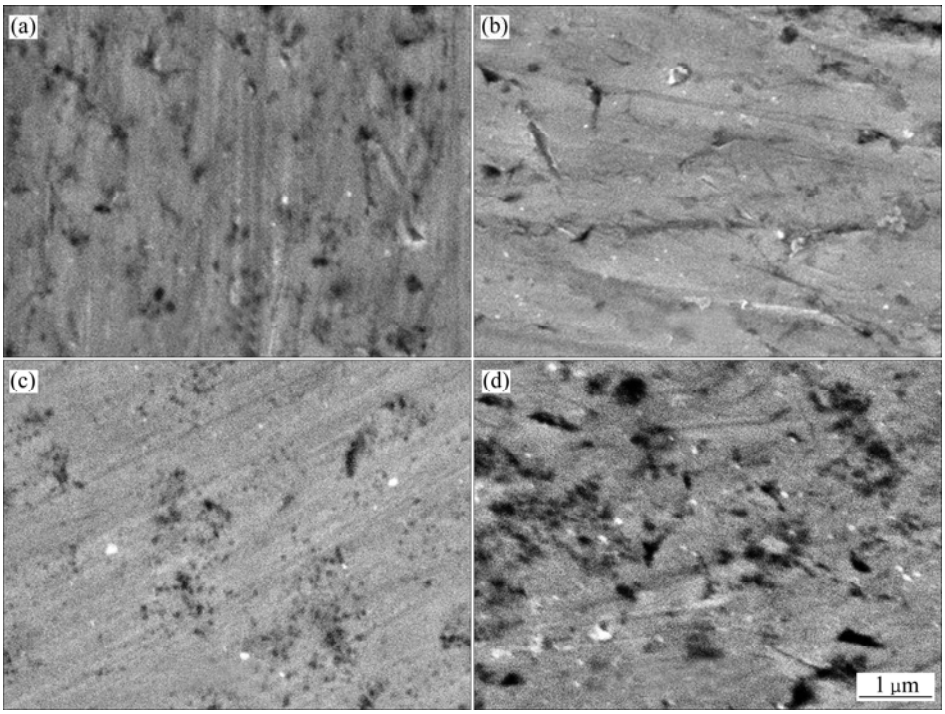

图 2　镀液中不同纳米 SiC 颗粒添加量复合镀层的截面微观形貌

Fig. 2　Cross-section morphologies of composite coatings with different nano-SiC contents in solution: (a) 0 g/L; (b) 2.0 g/L; (c) 4.0 g/L; (d) 8.0 g/L

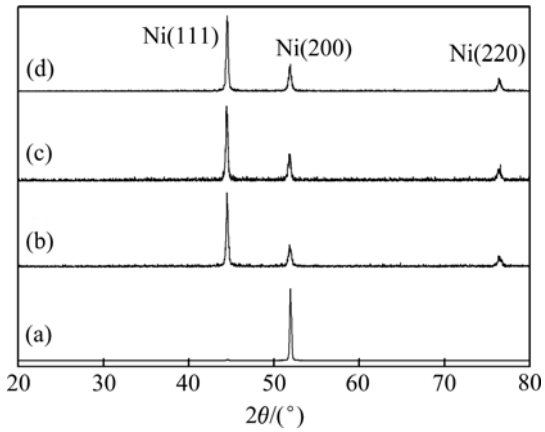

图 3　镀液中不同纳米 SiC 颗粒添加量复合镀层 XRD 谱

Fig. 3　XRD patterns of composite coatings with different SiC contents in solution: (a) 0 g/L; (b) 2.0 g/L; (c) 4.0 g/L; (d) 8.0 g/L

微米颗粒的细化晶粒的效果不明显，复合镀层晶粒尺寸较大；添加纳米颗粒后，纳米颗粒沉积在微米颗粒间，细化了微米颗粒间的镍晶粒，起到局部强化作用。同时，由于微/纳米共同细化镍晶粒，提高镀层的显微硬度；但镀液中纳米颗粒浓度超过一定值后，纳米颗粒以团聚态复合共沉积进入镀层，团聚态内部的结合力低，同时，也降低了镀层的致密度，在外力作用下，镀层内团聚态碎裂，导致复合镀层的显微硬度随镀液中纳米颗粒添加量的增加而降低。

由图 4(b)看出，随镀液中纳米颗粒添加量增加，摩擦因素大致呈先降后增的变化趋势。微米 SiC/Ni 复合镀层在滑动 30 min 内，镀层的摩擦因数平稳，基本维持在 0.6 左右；镀液中纳米 SiC 颗粒添加量为 2.0 g/L 时，镀层的摩擦因数有所降低，约为 0.45；镀液中纳米 SiC 颗粒添加量为 4.0 g/L 时，摩擦因素在 0.26~0.29 间波动；镀液中纳米 SiC 颗粒添加量为 8.0 g/L 时，摩擦因数上升，在 0.38~0.41 之间波动。结合前面镀液中纳米颗粒添加量与显微硬度的变化趋势，镀层的显微硬度与摩擦因素之间存在一定的对应关系，显微硬度高的复合镀层，摩擦因素较低。摩擦因素除了与硬度相关外，还受镀层表面形貌、致密度和晶粒尺寸等多种因素的综合影响[18]。

图 5 所示为镀液中纳米 SiC 颗粒不同添加量时复合镀层表面磨痕的微观形貌。由图 5 看出，复合镀层磨痕表面都存在犁沟现象，磨损机制为典型的磨粒磨损。微米 SiC/Ni 复合镀层的磨痕表面具有宽度较小的犁沟，呈轮胎花纹状并紧密排列，如图 5(a)所示；镀液中纳米 SiC 颗粒添加量为 2.0 g/L 时，磨痕表面存在宽度差异较大的犁沟，还出现了明显的挤压，形成棱状的凸起物，如图 5(b)所示；纳米 SiC 颗粒添加量增加到 4.0 g/L，磨痕表面的犁沟深度较浅，同时磨痕表面出现裂纹，如图 5(c)所示；添加量增加到 8.0

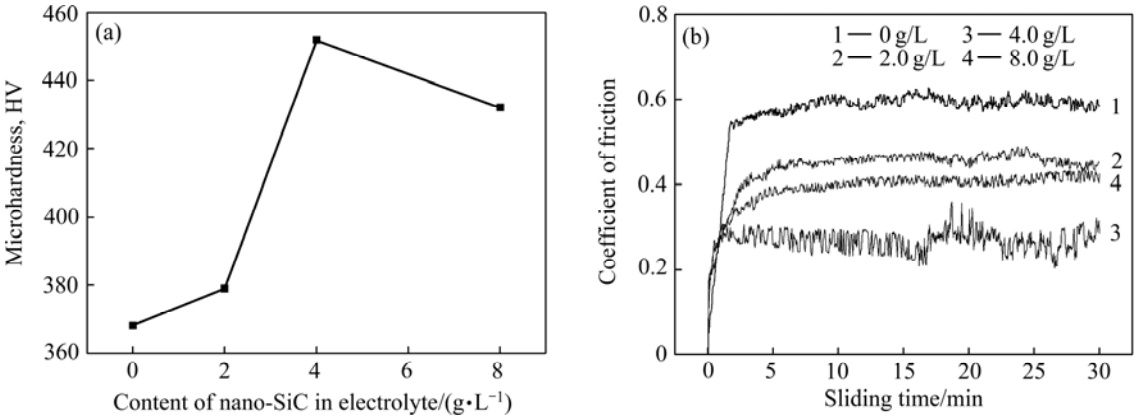

图 4 镀液中纳米 SiC 颗粒添加量与显微硬度关系以及摩擦因数与时间关系

Fig. 4 Relationship between contents of nano-SiC in electrolyte and microhardness(a) and relationship between coefficient of friction and sliding time(b)

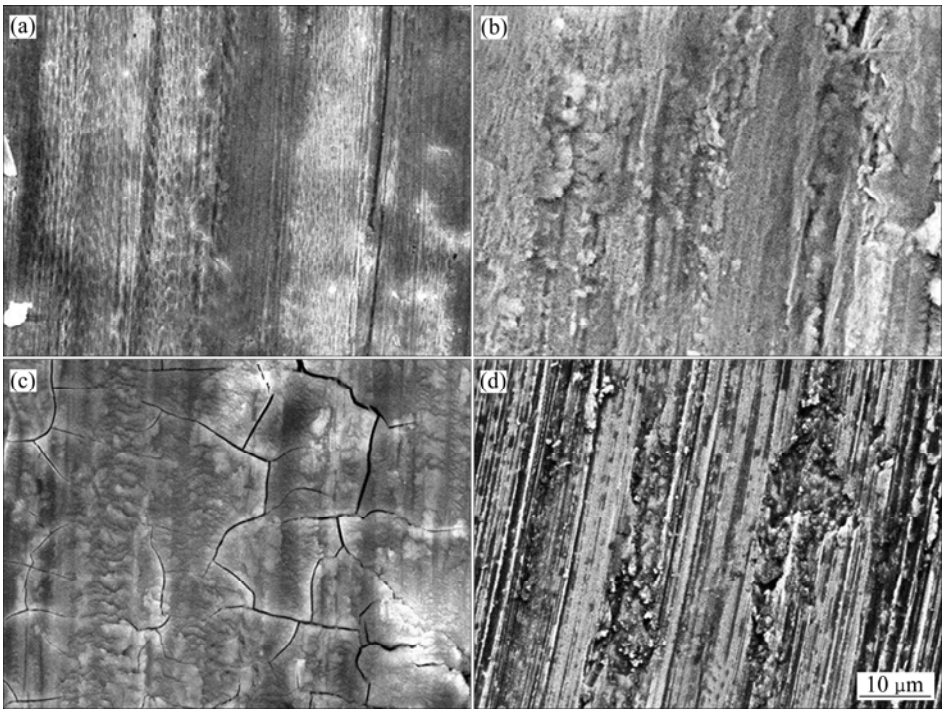

图 5 镀液中纳米 SiC 颗粒不同添加量时复合镀层的磨痕形貌

Fig. 5 Wear tracks morphologies of composites coatings deposited with different contents of nano-SiC particles in electrolyte: (a) 0 g/L; (b) 2.0 g/L; (c) 4.0 g/L; (d) 8.0 g/L

g/L，磨痕表面犁沟深而且密集，局部出现较大面积的材料转移，如图 5(d)所示。复合镀层的磨损失效主要是由于硬质颗粒的挤压、犁削后生成的磨屑充填于空隙中，或介于磨损表面之间，充当新的磨粒时，主要磨损机理为磨粒磨损。微米复合镀层表面的微米级颗粒作为硬质点，磨球压入镀层表面的深度较浅，减小了摩擦副和镀层的接触面积，形成了深度较浅的犁沟状磨痕形貌。微−纳米复合镀层中，由于纳米 SiC 颗粒的添加，造成微米颗粒沉积量减少，在磨损过程中，硬质点微米 SiC 颗粒的数量减少，微/纳米颗粒共同起硬质点作用，增加了摩擦副之间的接触面积。同时，由于镀液纳米颗粒浓度过高造成的内部结合力差的团聚态 SiC 沉积到镍镀层内，且分散性差，表面疏松，滑动摩擦过程中，在压力和剪切力的作用下，团聚态的 SiC 颗粒破碎，被剥落，充当磨粒，加剧磨损。本实验中，镀液中纳米 SiC 颗粒添加量为 4.0 g/L 时，硬度最大、摩擦因素较小。这是由于镀液中纳米颗粒团聚现象较轻，纳米 SiC 颗粒的分散性好，弥散分布在镀层内，强化了微米 SiC 颗粒周围的镍镀层，提高了微米颗粒在镀层内的结合力，与微米 SiC 颗粒共同强化基质镍金属，提高了复合镀层的显微硬度，并降低了摩擦因素。综上所述，当镀液中纳米 SiC 颗粒浓度

在一个适当范围内，复合镀层中 SiC 颗粒在金属基质中的分散性好，减少纳米颗粒的添加量，有效降低纳米颗粒的团聚现象，实现纳米与微米颗粒混杂共沉积，提高复合镀层的性能。

2.4　纳米 SiC 添加量对复合镀层抗氧化性能的影响

图 6 所示为 Ni-SiC 复合镀层在 900 ℃分别氧化 20、40、60、80 和 100 h 后的氧化增加质量曲线。由图 6 看出，在 900 ℃条件下氧化 100 h 后，复合镀层的氧化增加质量随镀液中纳米 SiC 颗粒添加量的增加呈先降低后增加的变化趋势。微米 SiC/Ni 复合镀层的氧化增加质量最大，为 20.153 mg/cm^2，镀液中纳米 SiC 颗粒添加量为 4.0 g/L 时，复合镀层的氧化增加质量最小，为 6.025 mg/cm^2，为微米复合镀层的 1/3。由文献[19]可以得到氧化增加质量 ΔG 与时间 t 的关系为 $(\Delta G)^2=K_p t+C$(式中 C 为常数，K_p 为氧化速度系数)。K_p 与金属表层组织、温度及氧化膜的性质等因素有关，可以用来定量评价金属的抗高温氧化性能，K_p 越大，金属的抗高温氧化性能越差，反之越好。根据实验数据可以算出，样品在 900 ℃、100 h 氧化后，微米 Ni-SiC 复合镀层和微、纳米 Ni-SiC(纳米 SiC 添加量为 4.0 g/L)复合镀层的 K_p 分别为 1.128×10^{-3} mg^2·cm^{-4}·s^{-1} 和 1.008×10^{-4} mg^2·cm^{-4}·s^{-1}。

图 7 所示为 Ni-SiC 复合镀层在 900 ℃经 100 h 恒温氧化后的表面形貌。由图 7 看出，氧化 100 h 后，相比于微米 Ni-SiC 复合镀层，镀液中添加纳米 SiC 颗粒后，复合镀层氧化膜晶粒尺寸明显减小。这是由于在氧化过程中，镀层内纳米 SiC 颗粒对氧化物长大起阻碍作用；另外，镀态下镍晶胞为由更细小的晶粒构成的结构。

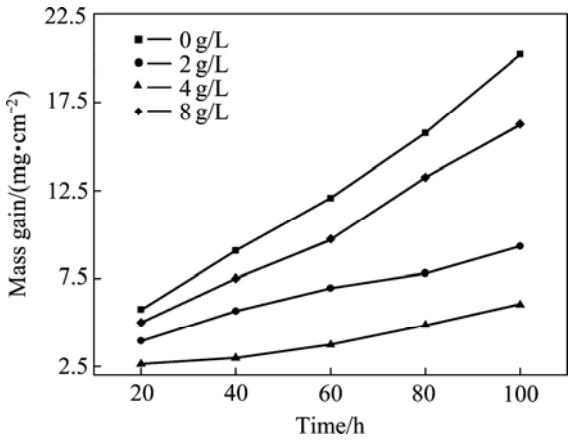

图 6　Ni-SiC 复合镀层在 900 ℃氧化不同时间后的氧化质量增加曲线

Fig. 6　Mass gain curves of Ni-SiC composite coatings after oxidized at 900℃ for different times

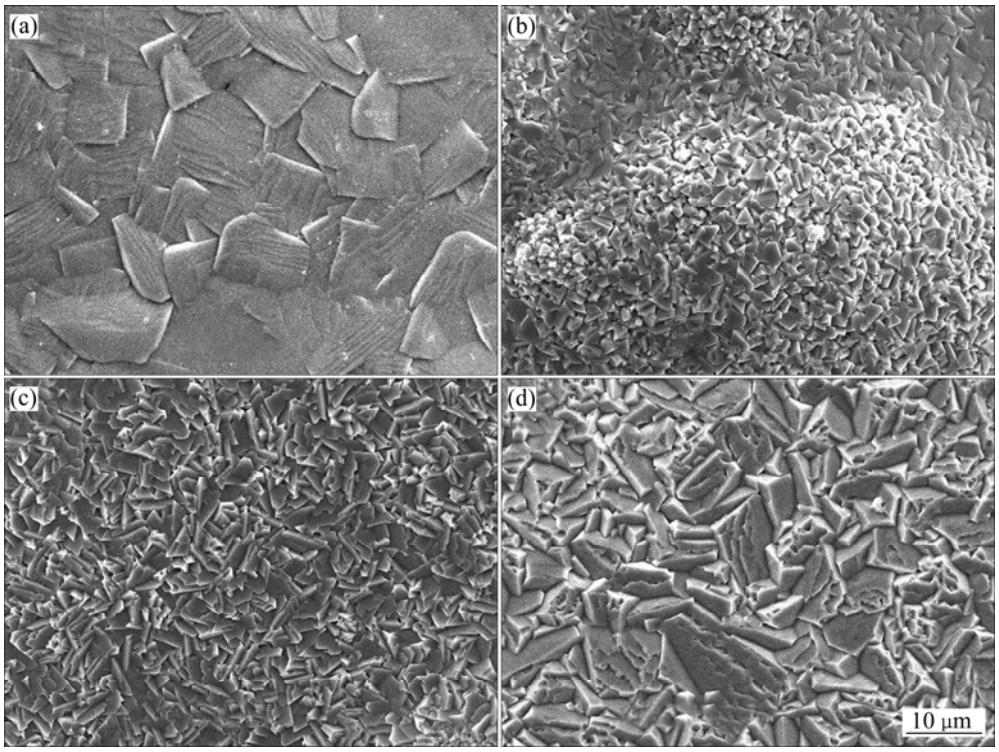

图 7　Ni-SiC 复合镀层在 900℃经 100 h 恒温氧化后的表面形貌

Fig. 7　Surface morphologies of Ni-SiC composite coatings after isothermal oxidation at 900 ℃ for 100 h: (a) 0 g/L; (b) 2.0 g/L; (c) 4.0 g/L; (d) 8.0 g/L

3 结论

1) 镀液中添加纳米 SiC 颗粒后，对复合镀层的微观组织结构无明显影响微，组织为 Ni 相，但镍镀层择优生长由晶面(200)转变为晶面(111)。

2) 复合镀层的显微硬度随镀液中纳米颗粒浓度增加呈先增后降低的趋势，而摩擦因素则呈先降低后增加的趋势，当镀液中添加 SiC 颗粒浓度为 4.0 g/L 时，复合镀层的显微硬度最大，为 456 HV，摩擦因素最小，平均值为 0.28 左右，为微米复合镀层的 1/2，在 900 ℃、100 h 氧化质量增加为 6.025 mg/cm^2，为微米复合镀层的 1/3。

REFERENCES

[1] 彭成章, 朱玲玲, 张晓菲. 脉冲电沉积/纳米复合镀层的组织结构与性能[J]. 润滑与密封, 2010, 35(6): 85−88.
PENG Cheng-zhang, ZHU Ling-ling, ZHANG Xiao-fei. Structure and properties of pulse electroplated Ni/nano-Al_2O_3 composite coatings[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(6): 85−88.

[2] FENG Qiu-yuan, LI Ting-ju, YUE Hong-yun, QI Kai, BAI Fu dong, JIN Jun-ze. Preparation and characterization of nickel nano-Al_2O_3 composite coatings by sediment co-deposition[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(8): 2262−2268.

[3] POMPEI E, MAGAGNIN L, LECIS N, CAVALLOTTI P L. Electrodeposition of nickel-BN composite coatings[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54 (9): 2571−2574.

[4] 马明硕, 常立民, 徐 利. 脉冲电沉积纳米镍−碳化硅复合镀层的性能[J]. 电镀与涂饰, 2011, 31(2): 14−16.
MA Ming-shuo, CHANG Li-min, XU Li. Properties of nickel-silicon carbide nanocomposite coating prepared by pulse electrodeposite[J]. Electroplating and Finishing, 2011, 31(2): 14−16.

[5] 郑学斌, 谭澄宇, 赵旭山, 刘 宇. Ni/SiC 复合镀层腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2008, 41(2): 17−19.
ZHENG Xue-bin, TAN Cheng-yu, ZHAO Xu-shan, LIU Yu. Corrosion behavior of Ni/SiC composite coating in saline solution[J]. Journal of Materials Protection, 2008, 41(2): 17−19.

[6] ZHOU Yue-bo, DING Yuan-zhu. Oxidation resistance of co-deposited Ni-Sic nanocomposite coating[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(5): 925−928.

[7] GüL H, UYSAL F K M, ASLAN S, ALP A, AKBULUT H. Effect of particle concentration on the structure and tribological properties of submicron particle SiC reinforced Ni metal matrix composite (MMC) coatings produced by electrodeposition[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(10): 4260−4267.

[8] KARBASI M, YAZDIAN N, VAHIDIAN A. Development of electro-co-deposited Ni-TiC nano-particle reinforced nanocomposite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 207: 587−593.

[9] ZHAO Q, LIU Y, ABEL E W. Effect of Cu content in electroless Ni-Cu-P-PTFE composite coatings on their anti-corrosion properties[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 8(7): 332−335.

[10] 朱乃龙, 杨顺贞, 纪秀林. Ni-P-MoS_2 复合镀层的制备和耐磨性能研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(12): 137−139.
ZHU Nai-long, YANG Shun-zhen, JI Xiu-lin. Preparation of Ni-P-MoS_2 composite coating and study on its wear resistance[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(12): 137−139.

[11] CARDINAL M F, CASTRO P A, BAXI J, LIANG H, WILLIAMS F J. Characterization and frictional behavior of nanostructured Ni-W-MoS_2 composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(1/2): 85−90.

[12] 王 平, 程英亮, 张 昭. 不同的 SiC 纳米颗粒镀前处理对 Ni-SiC 纳米复合镀层性能的影响[J]. 材料保护, 2010, 43(11): 23−26.
WANG Ping, CHENG Ying-liang, ZHANG Zhao. Effect of pretreatment modes of silicon carbide nanoparticulates on the properties of electroplated Ni-SiC nanocomposite coatings[J]. Materials Protection, 2010, 43(11): 23−26.

[13] 王 琳, 孙本良, 许 为, 姜秀明, 张 雷, 林辉龙. 工艺参数对 Ni-SiC 纳米复合镀层硬度的影响[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(5): 8−11.
WANG Lin, SUN Ben-liang, XU Wei, JIANG Xiu-ming, ZHANG Lei, LIN Hui-long. Influences of Technological Parameters on the Hardness of Ni-SiC Nano-composite[J]. Plating and Finishing, 2012, 34(5): 8−11.

[14] RANJAN S, SIDDHARTHA D, KARABI D. The effect of bath temperature on the crystallite size and microstructure of Ni-CeO_2 nanocomposite coating[J]. Materials Characterization, 2011, 62(3): 257−262.

[15] AUEZHAN A, OLEKSIY V P, YOUNG S P, DAE E K. Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the tribological properties ofAZ91Dmagnesiumalloy[J]. Tribology International, 2012, 54: 106−113.

[16] KLC F, GÜL H, ASLAN S, ALP A, AKBULUT H. Effect of CTAB concentration in the electrolyte on the tribological properties of nanoparticle SiC reinforced Ni metal matrix composite (MMC) coatings produced by electrodeposition[J]. Colloids and Surfaces A, 2013, 419: 53−60.

[17] MEENU S, WILLIAM G, ANJANA J, RAJAM K S. Influence of SiC particle size on the structure and tribological properties of Ni-Co composites[J]. Surface and coatings Technology, 2007, 202(2): 310−318.

[18] BABAK B, ALIREZA A. Effect of particle size and co-deposition technique on hardness and corrosion properties of Ni-Co/SiC composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(23): 4964−4975.

[19] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 56−57.
LI Tie-fan. High temperature oxidation and hot corrosion of metal[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 56−57.

(编辑 李艳红)