

十二烷基硫酸钠对碳纤维表面镍镀层电沉积行为的影响研究

杨斌¹, 刘敬萱², 齐亮², 肖翔鹏¹, 谢义高²

(1. 江西理工大学 工程研究院, 江西 赣州 341000;

2. 江西理工大学 材料科学与工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 目的 研究十二烷基硫酸钠(SDS)对碳纤维表面镍镀层电沉积行为及镀层质量的影响。方法 用线性伏安法测定不同质量浓度的 SDS 镀液电沉积镍的析出电位,用扫描电镜分析镍镀层表面形貌及镍在电沉积初期的微观状态。结果 未加入 SDS 的溶液中,镍的析出电位为 -0.829 V ;在 $0.1\sim 0.5\text{ g/L}$ SDS 的镀液中,镍的析出电位为 $-0.792\sim -0.745\text{ V}$;当 SDS 质量浓度为 0.3 g/L 时,镍的析出电位最大为 -0.745 V 。结论 镀液中添加少量 SDS 时有利于提高镍的析出电位,有利于镍在碳纤维表面形核析出,镍镀层表面均匀致密,由细小的角锥状结构构成;过量的 SDS 会影响碳纤维表面吸附-脱吸附的平衡,碳纤维表面存在未脱吸附的 SDS 微区,镍在此区域的形核析出受到影响,镍镀层表面质量较差,由不均匀分布的角锥状结构和垂直于基底的片层结构构成。在实验溶液体系中 SDS 最优添加量为 0.3 g/L 。

关键词: 镍镀层;碳纤维;十二烷基硫酸钠;电沉积;线性伏安法;析出电位

中图分类号: TQ153.1; TQ342 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)04-0132-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.022

Effect of Sodium Dodecyl Sulfate on Electrochemical Behavior of Nickel Plating Electrodeposition

YANG Bin¹, LIU Jing-xuan², QI Liang², XIAO Xiang-peng¹, XIE Yi-gao²

(1. Institute of Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the effect of sodium dodecyl sulfate (SDS) on the electrodeposition behavior and quality of nickel coating on carbon fiber surface. **Methods** The electroplating nickel deposition potential for different concentrations of SDS solution was measured using linear sweep voltammetry. The morphology of nickel plating surface in the beginning of the electrodeposition of nickel was analyzed using scanning electron microscopy. **Results** The deposition potential of nickel in the solution without additives was about -0.829 V . When adding $0.1\sim 0.5\text{ g/L}$ of SDS, the deposition potential of nickel in the solution in-

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-02

Received: 2016-01-05; Revised: 2016-02-02

基金项目: 江西省委组织部赣鄱555领军人才基金(2012215); 江西省教育厅青年项目(GJJ14447)

Fund: Supported by Poyang 555 Leading Talent Fund of Department of Organization, Jiangxi Committee, Chinese Communist Party (2012215) and Youth Project, Department of Education, Jiangxi Province (GJJ14447)

作者简介: 杨斌(1965—),男,教授,主要从事新材料设计与加工研究。

Biography: YANG Bin(1965—), Male, Ph. D, Professor, Research focus: design and processing of novel materials.

creased to $-0.792 \sim 0.745$ V, and the maximum deposition potential (-0.745 V) of nickel was 0.3 g/L SDS in the additive.

Conclusion The results showed that adding a small amount of SDS solution was beneficial to improve the deposition potential of nickel, which could promote the deposition of nickel plating. The surface of nickel coating consisting of a pyramid shaped fine structure was uniform and compact, but excessive amount of SDS would affect the equilibrium of adsorption and desorption on the surface of carbon fiber. There was a SDS micro area of non-desorption on the carbon fiber surface and the nucleation of precipitates in this area was affected. The surface of nickel coating consisting of unevenly distributed pyramidal structure and lamellar structure vertical to the base had poor quality. The optimal concentration of the SDS additive in the solution system should be 0.3 g/L.

KEY WORDS: nickel coating; carbon fiber; sodium dodecyl sulfate; electrodeposition; linear sweep voltammetry; deposition potential

碳纤维具有的比强度高、比模量高、密度小、耐高温、耐辐射、耐疲劳性好、导电导热性良好、热膨胀系数小等优良性能引起了人们的广泛关注,广泛作为增强相与树脂、金属、陶瓷、混凝土等材料构成复合材料使用^[1-3]。金属基碳纤维复合材料不仅继承了碳纤维的高比强度、高比模量和良好的韧性等优良性能,又能保持基体金属的特性,成为近年来研究的热点,在航空航天、生物材料和民用工业领域具有广阔的应用前景^[4-6]。但碳纤维与许多金属基体的润湿性很差,当复合材料承受一定载荷时,容易造成碳纤维剥落和脱离^[7]。因此如何提高碳纤维与基体金属之间的结合力,是制备金属基碳纤维复合材料的关键。为了改善碳纤维与基体金属间的润湿性及化学相容性,最常用的方法就是对碳纤维表面进行金属化预处理,而电镀法是材料表面金属化处理的一种常见方法,该方法具有设备简单、镀速快、成本较低、污染小等优点,在工业上也得到了广泛的应用。镍作为一种镀层金属与碳纤维具有较好的结合质量,因此电镀镍技术被广泛运用于碳纤维表面金属化预处理的相关研究当中^[7]。

在碳纤维表面电镀镍的预处理过程中,镍镀层的质量将直接决定预处理效果的好坏。因此制备一层结构致密,且与碳纤维基底结合良好的镍镀层,是众多研究者的目标。电镀添加剂是电镀溶液中具有特殊作用的一种成分,它能显著改善镀液的电化学性能和镀层力学物理性能。有机添加剂在硫酸盐、氯化盐、Watts 镀镍液中均表现出明显的效果。Lupi 等^[8]在硫酸盐和氯化盐的混合镀液中添加高浓度的硼酸作为缓冲剂,在此镀液中通过直流电沉积得到高纯镍。Borikar^[9]研究了在氨水-硫酸盐镀液中添加丙酮和 CTAB 对镍镀层表面形貌、电流效率、晶粒大小的影响,结果表明在高浓度的 CTAB 情况下,镀层表面形貌随着丙酮浓度增大而有所改善,同时晶粒大小也随之降低。十二烷基硫酸钠(SDS)是一种阴离子型

表面活性剂,常作为防针孔剂、雾化剂和润湿剂用于电镀镍的研究当中,起到减少镀层针孔、麻点和镀液与阴极之间的表面张力等作用^[10-12]。本文针对碳纤维表面镀镍这一特殊的研究体系,通过阴极线性伏安曲线和镀层表面形貌综合分析十二烷基硫酸钠对碳纤维表面镍镀层的电沉积行为的影响。

1 实验

本实验的研究体系选用日本东丽 T700S 型碳纤维,每次电镀一束碳纤维,每束碳纤维含单丝 24000 根,每根单丝直径约为 $7 \mu\text{m}$,长度为 10 cm。未经任何处理的碳纤维表面通常会有一层有机胶和有机杂物,此类有机物对碳纤维的镀层质量会有严重的影响,而且碳纤维表面光滑、活性差,具有疏水性,难以直接电镀,因此在电镀之前需要对其进行镀前处理^[13]。本文将碳纤维放入箱式电阻炉中,在 400°C 下去胶 30 min,再将去胶后的碳纤维置于质量分数为 65% 的 HNO_3 中粗化 30 min,用去离子水反复冲洗至中性后烘干作为阴极材料。

镀液组成为: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 200 g/L、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 60 g/L、 H_3BO_3 40 g/L 和 SDS 分别为 0.1、0.3、0.5 g/L。其中, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为主盐,提供电镀过程中所需要的镍离子; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为防阳极钝化剂,起到防止阳极钝化的作用,同时提供镍离子和氯离子,氯离子可以增加镀液的导电性; H_3BO_3 为 pH 缓冲剂,镀液 pH 过高或过低都会对镀层质量起到相应的影响,而加入硼酸可以将镀液 pH 稳定在合适的范围^[14]。电镀采用直流电沉积法,电流密度为 $0.4 \text{ A}/\text{cm}^2$,沉积时间为 22.5 min,电沉积过程中将电解槽置于恒温水浴锅中,温度为 50°C ,在无任何搅拌的条件下进行。

实验由 Autolab-PGSTAT302N 电化学系统实现电沉积以及镀液阴极线性伏安曲线的测定,采用传统的

三电极体系,以 Pt 电极为辅助电极,以镀前处理后的碳纤维为研究电极,以饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,文中电位值均相对于参比电极。采用 ZESS-SIGMA 场发射扫描电镜对碳纤维表面镀层形貌和镍在电沉积初期的微观状态进行观察,镀层的成分用 X 射线能谱仪标定。

2 结果与讨论

2.1 线性伏安曲线

采用动电势扫描法对不同质量浓度 SDS 镀液进行阴极线性伏安曲线的测定,SDS 质量浓度分别为 0、0.1、0.3、0.5 g/L,扫描范围为-0.65 ~ -1.00 V,扫描速率为 2.5 mV/s,结果如图 1 所示。可以看出,无 SDS 的镀液中镍的析出电位为-0.829 V,加入 SDS 的镀液中镍的析出电位明显增大,当 SDS 质量浓度为 0.1、0.3、0.5 g/L 时,相对应镍在阴极处的析出电位分别为-0.791、-0.745、-0.773 V。从金属电沉积热力学的角度分析,通常析出电位越正,镀液中的镍离子越容易在阴极表面还原析出从而形成镍镀层。因此,在镀液中加入适量的 SDS 有利于镍在碳纤维表面的沉积。此外,从图 1 中可知当添加剂为 0.3 g/L 时,镍的析出电位最大(-0.745 V),最有利于镍的电沉积。

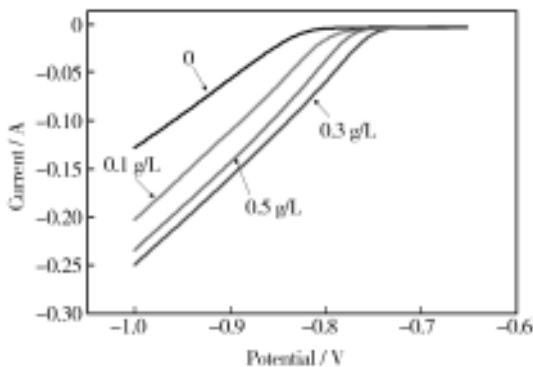


图 1 碳纤维在加入不同浓度 SDS 的溶液中所测得线性伏安曲线
Fig. 1 Linear sweep voltammograms for varying concentrations of SLS during nickel electro-deposition on carbon fiber substrate

2.2 镀层宏观表面观察及 SEM 表面分析

在不同 SDS 质量浓度的镀液中进行直流电沉积,所得镍镀层的宏观表面观察情况列于表 1。当溶液不含 SDS 时,镍镀层碳纤维整体呈现暗银色,表面镀

层厚度不均匀的现象较为明显,部分区域甚至未能实现镍的沉积,呈现为碳纤维的黑色,这可能是由于电沉积过程中析出的氢气吸附在阴极表面使镍难以沉积在阴极表面,造成不均匀的现象;当 SDS 质量浓度为 0.1、0.3 g/L 时,镍镀层呈现亮银色,表面镀层平整光滑,无明显缺陷;当 SDS 质量浓度为 0.5 g/L 时,表面镀层整体颜色发白,金属光泽有显著的下降,而且镀层粗糙,有部分区域出现起皮的现象,这可能是由于 SDS 含量过大,在镍的沉积过程中,吸附在碳纤维表面,来不及脱附便夹入镀层,使镀层内应力增加,从而使镀层脆性增加,出现起皮的现象^[15]。从镀层的宏观表面观察可以看出,添加剂 SDS 的含量并非越高越好,这一结果与图 1 中线性伏安曲线所得到的结果相一致。

表 1 不同添加剂条件下沉积的镍镀层的表面特征
Tab. 1 The surface luster of nickel coatings deposited in baths containing different additives

SDS 质量 浓度/(g·L ⁻¹)	析出电 位 /V	镀层颜色	外观质量
0	-0.829	暗银色	镀层不均匀
0.1	-0.792	亮银色	平整光滑、无明显缺陷
0.3	-0.745	亮银色	平整光滑、无明显缺陷
0.5	-0.768	银白色	表面粗糙、起皮

图 2 为不同含量 SDS 镀液中所沉积的镍镀层的 SEM 图像。从图 2a 和图 2c 中可见,SDS 对镀层表面及结构特征具有极大的影响。当镀液中加入 0.1、0.3 g/L 的 SDS 时,所制备的镍镀层表面均匀、致密。镀层表面呈现镍镀层常见的角锥状结构,这是镍在沉积过程中自由生长所形成的特征结构。通过对比图 2b 和图 2d 可发现,SDS 质量浓度为 0.3 g/L 时,其碳纤维表面镍镀层的角锥状结构相对较为细小。这可能是因为 SDS 质量浓度为 0.3 g/L 时,镍在碳纤维表面的析出电位较高,易在其表面形核析出。因此,在有限的阴极面积内较多的形核点分布必然导致其晶体结构的生长受到抑制,即角锥状特征结构相对较小。此外,从图 2e 和图 2f 中可见,SDS 质量浓度为 0.5 g/L 时,碳纤维表面镍镀层在表面角锥结构呈现不均匀分布的状态,此外在这些角锥间隙还存在着特殊的垂直基体生长的片层结构。这类片层在外力的作用极易被破坏,因此这种表面不均匀且难以维持稳定的镀层不能满足的碳纤维表面金属化预处理的要求。为了分析这种非理想镀层形成的原因,本文通过观察不

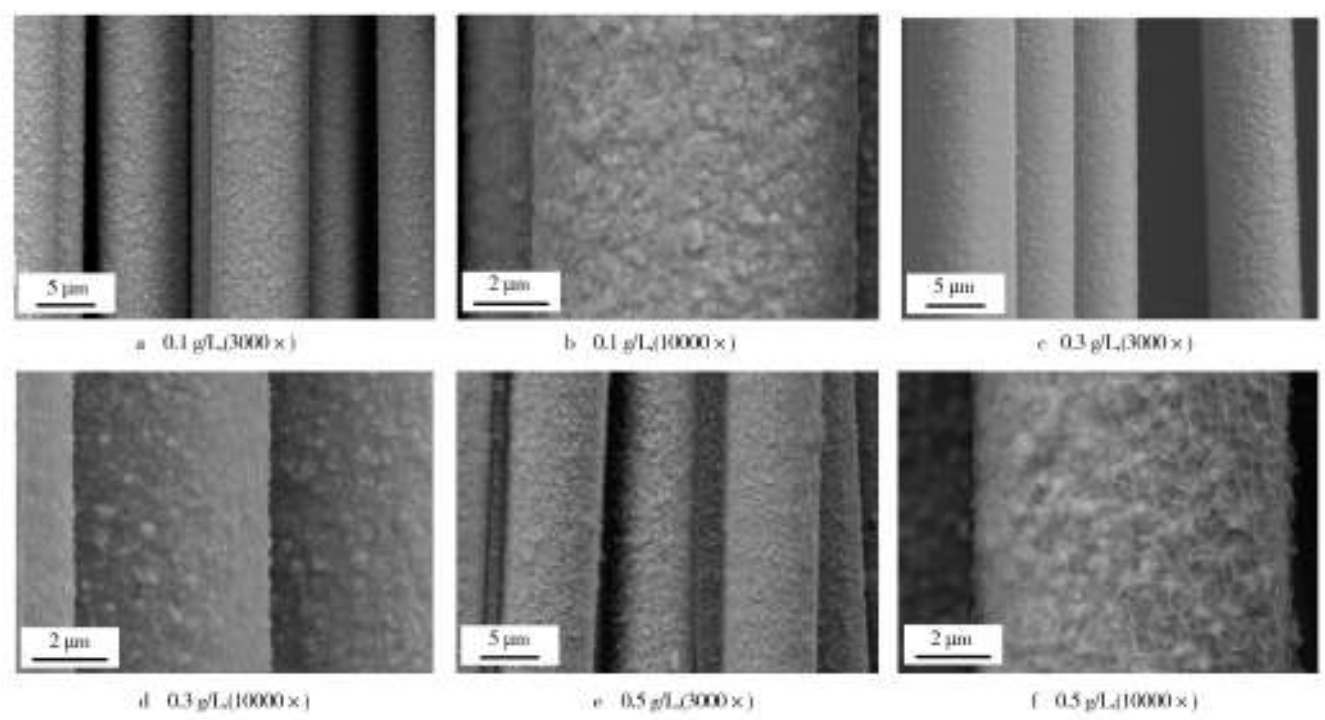


图 2 不同添加剂浓度的溶液中制备的镍镀层表面形貌的 SEM 图像
Fig.2 SEM morphology of nickel electrodeposited in solutions containing different additives

同 SDS 质量浓度的镀液中,镍镀层在沉积初期的状态对其进行分析。

2.3 添加剂对镍镀层析出的影响

图 3 为添加剂 SDS 质量浓度为 0.1、0.5 g/L 在沉积时间为 25 s 时的表面状态。镍在碳纤维表面沉积初期主要的过程为在晶核形成后的三维自由生长,晶粒持续长大直至两个晶粒相互接触抑制晶粒长大。SDS 质量浓度为 0.5 g/L 时,单位面积的晶核明显比 0.1 g/L 时多。SDS 属于阴离子型表面活性剂,在电沉积镍的过程中 SDS 吸附在阴极表面,可降低固液相、固气相界面的表面张力,同时带负电荷的阴极表面将降低双电层效应对镍离子传导的影响,镀液中的镍离子将优先在吸附有 SDS 的边界区域形核析出(如图 4b 所示)。因此,SDS 浓度增大有利于镍的形核析出。这与图 1 中线性伏安曲线所得到的结果一致。此外,SDS 质量浓度为 0.5 g/L 的镀液中沉积的晶粒在碳纤维表面分布并不均匀,碳纤维表面存在部分未沉积镍晶粒的微区。当镀液中 SDS 含量增大时,碳纤维表面吸附-脱吸附的平衡发生变化,碳纤维表面未脱吸附的局部微区增大(如图 4c 所示),这些局部微区即图 3b 中未沉积镍晶粒的区域。因此,添加过量的添加剂 SDS(0.5 g/L)将导致所沉积得到的镀

层表面均匀性降低,不利于形成均匀致密的镍镀层。

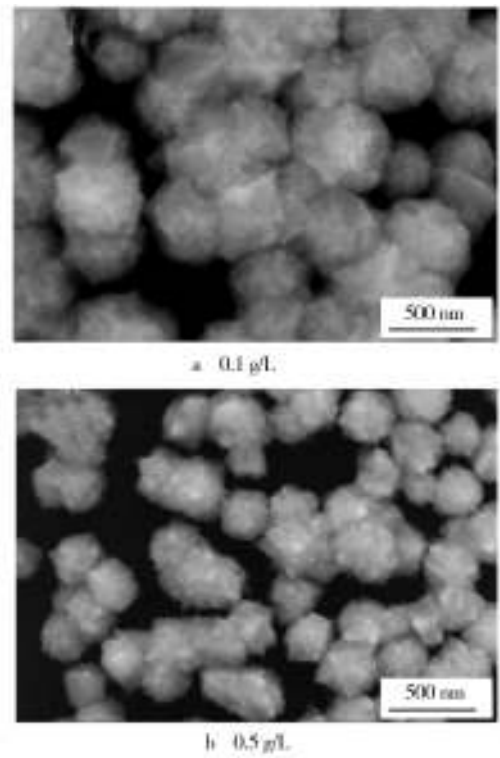


图 3 不同添加剂浓度下沉积的镍镀层的 SEM 照片镍镀层在沉积初期的状态
Fig.3 The SEM photos of nickel coatings deposited in baths containing different additives in short time

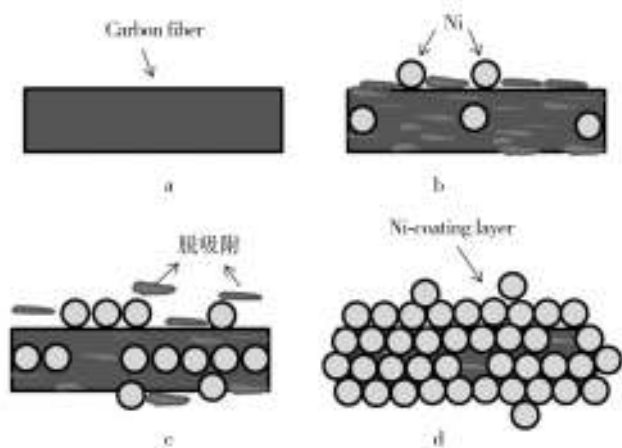


图4 含有 SDS 溶液中镍镀层的沉积过程示意图

Fig. 4 Diagram of nickel plating process on carbon fiber surface in SDS-containing solution

3 结论

1) 在碳纤维表面电沉积镍时,加入 SDS 会大大减小镍的析出电位,SDS 质量浓度为 0.3 g/L 时,镍的析出电位达到最大(-0.745 V),最有利于实现镍在碳纤维表面的电沉积。

2) 当 SDS 质量浓度为 0.1、0.3 g/L 时,可以获得均匀致密的镍镀层;当 SDS 质量浓度为 0.5 g/L 时,镀层表面出现特殊的垂直基体生长的片层结构,此类结构极易被外力破坏,不是理想的镍镀层。

3) SDS 含量过大会影响碳纤维表面吸附-脱吸附的平衡,降低镀层表面的均匀性,不利于形成均匀致密的镍镀层。综上所述,SDS 最适合的质量浓度为 0.3 g/L。

参考文献

- [1] 龙国宁,黄小忠,陈金. 碳纤维表面 h-BN 耐高温涂层的制备及表征[J]. 表面技术,2015,44(9):84—88.
LONG Guo-ning, HUANG Xiao-zhong, CHEN Jin. Preparation and Characterization of h-BN High-temperature Resistant Coating on the Surface of Carbon Fibers[J]. Surface Technology, 2015, 44(9):84—88.
- [2] 马祥林,任婷,段晓松,等. 全球 PAN 基碳纤维产业的现状及发展趋势[J]. 纺织导报,2014,30(12):44—46.
MA Xiang-lin, REN Ting, DUAN Xiao-song, et al. Current Development and Trend of PAN-based Carbon Fiber[J]. Fiber Technology, 2014, 30(12):44—46.
- [3] 李炜. 碳纤维增强抗氧化复合材料研究进展[J]. 复合材料学报,2013,30(S1):289—294.

料学报,2013,30(S1):289—294.

LI Wei. Research Progress on Carbon Fibrous Reinforced Oxidization-resistant Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(S1):289—294.

- [4] LIU L, LI W, TANG Y, et al. Friction and Wear Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Wear, 2009, 266(7/8):733—738.
- [5] ALLAOUI A, BAI S, BAI J B, et al. Mechanical and Electrical Properties of a MWNT/Epoxy Composite[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(15):1993—1998.
- [6] 姚怀,郭军华,崔文聪,等. 碳纤维化学镀镍表面改性研究[J]. 表面技术,2014,43(5):16—19.
YAO Huai, GUO Jun-hua, CUI Wen-cong, et al. Study on Electroless Nickel Plating for Surface Modification of Carbon Fiber[J]. Surface Technology, 2014, 43(5):16—19.
- [7] 吕晓轩,吕春祥,杨禹,等. 碳纤维表面电镀镍研究[J]. 化工新型材料,2011,39(8):89—91.
LYU Xiao-xuan, LYU Chun-xiang, YANG Yu, et al. Study on Electroplated Ni Coating of Carbon Fibers[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(8):89—91.
- [8] LUPI C, PASQUALI M, DELL'ERA A. Studies Concerning Nickel Electrowinning from Acidic and Alkaline Electrolytes[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(12):1246—1250.
- [9] BORIKAR D K, UMARE S S, VISWANATH S G. Electro-winning of Nickel from Ammonical Sulphate Bath and Effect of Acetone on Morphology of Nickel Deposit and Its Correlation with Kinetic Parameters[J]. Metallurgija, 2005, 45(1):3—8.
- [10] 范冠博,潘秉锁,田永常,等. 十二烷基硫酸钠对铁电沉积行为的影响[J]. 电镀与涂饰,2015,34(9):471—475.
FAN Guan-bo, PAN Bing-suo, TIAN Yong-chang, et al. Effect of Sodium Dodecyl Sulfate on Electrochemical Behavior of Iron Electrodeposition[J]. Electroplating & Finishing, 2015, 34(9):471—475.
- [11] MOHANTY U S, TRIPATHY B C, DAS S C, et al. Effect of Sodium Lauryl Sulphate (SLS) on Nickel Electrowinning From Acidic Sulphate Solutions[J]. Hydrometallurgy, 2009, 100(1/2):60—64.
- [12] 杨建文,贺朝辉,杨杰,等. 铝合金化学镀镍工艺研究[J]. 表面技术,2011,40(2):65—68.
YANG Jian-wen, HE Chao-hui, YANG Jie, et al. Study on the Process of Electroless Ni Coating Deposited on Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2011, 40(2):65—68.
- [13] TIWARI S, BIJWE J. Surface Treatment of Carbon Fibers[J]. Procedia Technology, 2014, 14(8):505—512.
- [14] 王永银,司云森,陈阵,等. 十二烷基硫酸钠对电沉积镍电化行为的影响[J]. 金属制品,2010,36(6):22—24.

(下转第 155 页)

面形成泡状球形氧化物,是导致涂层抗氧化性降低的原因之一。

3) NiCoCrAlY 粘结涂层氧化 100 h 时的氧化速率为 17.2134 mg/cm^2 , K17 镍基高温合金的氧化速率为 21.8346 mg/cm^2 , NiCoCrAlY 粘结涂层显著提高了 K17 的高温抗氧化性。

参考文献

- [1] 孙伟,花银群,陈瑞芳,等. 激光熔覆 MoSi_2 -NiCrSiB 复合涂层的组织和性能[J]. 热加工工艺,2014,43(22):149—151.
SUN Wei, HUA Yin-qun, CHEN Rui-fang, et al. The Microstructure and Properties of Laser Cladding MoSi_2 -NiCrSiB Complex Coating[J]. Thermal Processing, 2014, 43(22): 149—151.
- [2] 王会阳,安云岐,李承宇,等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报,2011,25(18):482—486.
WANG Hui-yang, AN Yun-qi, LI Cheng-yu, et al. Research Progress of Nickel-based Superalloy Materials[J]. Materials Review, 2011, 25(18): 482—486.
- [3] WANG X, CHEN M H, ZHU S L, et al. Oxidation Behavior of Glass-based Composite Thermal Barrier Coating on K417G Superalloy with a NiCoCrAlY Bond Coat at 1000°C [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 270(25): 314—323.
- [4] NITIN P, PADTURE, GEL M, et al. Thermal Barrier Coatings for Gas-turbine Engine Application-s [J]. Science, 2002, 4(12): 280—284.
- [5] MANFRED P, CHRISTOPH L, UWE S, et al. EB-PVD Thermal Barrier Coatings for Aero-engines and Gas Turbines[J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3(4): 193—204.
- [6] 张红松,杨树森,温倩. $\text{A}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 型稀土锆酸盐热障涂层研究进展[J]. 表面技术,2014,43(4):135—140.
ZHANG Hong-song, YANG Shu-sen, WEN Qian. $\text{A}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ Type Rare Earth Zirconate Research Progress[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 135—140.
- [7] 李嘉,谢铮,何箫,等. Gd_2O_3 - Yb_2O_3 - Y_2O_3 - ZrO_2 热障涂层材料的热物理性能[J]. 表面技术,2015,44(9):18—22.
LI Jia, XIE Zheng, HE Jing, et al. Gd_2O_3 - Yb_2O_3 - Y_2O_3 - ZrO_2 Thermal Barrier Coating Material Thermal Physical Properties[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 18—22.
- [8] 王东生,田宗军,杨斌,等. 等离子喷涂纳米热障涂层热震性能[J]. 热加工工艺,2012,41(4):126—129.
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, YANG Bin, et al. Plasma Sprayed Nanostructured Thermal Barrier Coatings[J]. The Hot Working Processes, 2012, 41(4): 126—129.
- [9] PAWLOWSKI L. Suspension and Solution Thermal Spray Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(19): 2807—2829.
- [10] 牟仁德,何利民,陆峰,等. 热障涂层制备技术研究进展[J]. 机械工程材料,2007(5):1—4.
MU Ren-de, HE Li-min, LU Feng, et al. Preparation of Thermal Barrier Coating Technology Research Progress[J]. Journal of Mechanical Engineering Materials, 2007(5): 1—4.
- [11] 郭洪波,彭立全,宫声凯,等. 电子束物理气相沉积热障涂层技术研究进展[J]. 热喷涂技术,2009(2):7—14.
GUO Hong-bo, PENG Li-quan, GONG Sheng-kai, et al. The Electron Beam Physical Vapor Deposition Thermal Barrier Coating Technology Research Progress[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009(2): 7—14.
- [12] GAO L H, GUO H B, WEI L L. Microstructure and Mechanical Properties of Yttrium Stabilized Zirconia Coatings Prepared by Plasmas Spray Physical Vapor Deposition[J]. Ceramics International, 2015, 41(7): 8305—8311.
- [13] GOTO T. High-speed Deposition of Zirconia Films by Laser-induced Plasma CVD[J]. Solid State Ionics, 2004, 172(1—4): 225—229.
- [14] 宋子豪,孙耀宁,王艳飞. 纳米陶瓷涂层的特性及研究现状[J]. 热加工工艺,2014,43(14):12—15.
SONG Zi-hao, SUN Yao-ning, WANG Yan-fei. Characteristics and Research Status of Nano Ceramic Coating[J]. Hot Working Technology Hot Work Technology, 2014, 43(14): 12—15.
- [15] LI C L, WANG W, TAN S L, et al. Bond Strength and Oxidation Resistance of YSZ/(Ni, Al) Composite Coatings[J]. Surface Engineering, 2014, 30(9): 619—623.

(上接第 136 页)

- WANG Yong-yin, SI Yun-sen, CHEN Zhen, et al. Effect of SDS on Electrochemical Behavior of Electrodeposited Nickel [J]. Metal Products, 2010, 36(6): 22—24.
- [15] 储荣邦. 光亮镀镍中如何正确使用十二烷基硫酸钠[J].

电镀与环保,2004,24(5):13—16.

CHU Rong-bang. The Correct Use of Sodium Dodecyl Sulfate in Bright Nickel Plating[J]. Electroplating & Pollution Control, 2004, 24(5): 13—16.