

复合电镀技术及应用的发展趋势

黄凌峰, 刘建明, 王帅, 刘通, 沈婕, 章德铭

(1. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
2. 北京市工业部件表面强化与修复工程技术研究中心, 北京 102206)

摘要: 本文主要从复合电镀理论发展、复合电镀参数影响、复合电镀研究应用现状三个方面对复合电镀技术进行了概述, 并简要介绍了国内外复合电镀技术发展差距。

关键词: 复合电镀; 机理; 参数; 应用

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127(2019)09-0001-08

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2019.03.001

Composite Electroplating Technology and Application

Lingfeng Huang, Jianming Liu, Shuai Wang, Tong Liu, Jie Shen, Deming Zhang

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160;

2. Beijing Engineering Technology Research Center of Surface Strengthening and Repairing of Industry Parts, Beijing 102206)

Abstract : In this paper, the development of composite electroplating theory, the influence of composite electroplating parameters and the present situation of composite electroplating research and application were summarized. The development gap of composite electroplating technology at home and abroad was also briefly introduced.

Keywords : Composite electroplate; Mechanism; Parameter; Application

0 引言

相比于粉末冶金技术、喷涂技术、气相沉积技术等多元涂层制备技术, 复合电镀技术具有简易、便利、非视线镀覆等特点^[1,2], 因此近几十年来受到越来越高的关注度, 并得到了广泛的发展与应用。

复合电镀技术发展至今已有近百年历史, 最早可追溯至 20 世纪 20 年代末美国科学家开展的铜-石墨复合电镀技术研究^[3], 该技术主要应用于汽车轴承以提高其机械性能。20 世纪 60 至 70 年代, 复合电镀技术发展取得了显著的进步。尤

其在欧洲, 出于对复合镀层可塑性、多样性等特点的兴趣, 复合电镀技术得以迅速发展^[4]。第二相颗粒共沉积机理以及耐磨复合镀层复合电镀工艺在这一时期得到了广泛的研究, 以满足航空工业与汽车工业日益增长的耐磨涂层技术需求。

上世纪 70 年代后, 复合电镀的研究范围得到了进一步的拓展, 发展了以金属镍为基体的 Ni-Al₂O₃^[5]、Ni-石墨^[6]、Ni-PTFE^[7] 等减摩、耐蚀复合镀层。80 年代后, 美、英等国又开始研究发展耐高温涂层的复合电镀制备技术^[8], 以 MCrAlY 为代表的复合电镀涂层制备技术此后被广泛应用于汽车、地面燃机与航空工业。本世纪初, 随着

纳米材料科学的发展, 纳米颗粒因其小尺寸效应而产生的特殊性能引起了复合电镀研究人员的关注, 越来越多的研究者开始从事纳米颗粒复合电镀技术研究, 纳米复合镀层在硬度、耐磨、耐蚀等性能上有着显著的提升^[9, 10]。

本文主要围绕 M-X 型复合电镀技术进行论述, 其中 M 为金属基镀层, X 是在 M 金属基镀层生长过程中共沉积的第二相颗粒物, X 可以是金属颗粒、有机物颗粒以及无机陶瓷颗粒。

1 复合电镀机理

复合电镀机理的研究兴起于 19 世纪 70-80 年代, 在此期间, 以 Jannsen^[11] 和 Celis^[12] 为代表的欧洲各大高校研究团队都针对复合电镀机理开展了大量工作。复合镀层中第二相颗粒的尺寸涵盖了从数十纳米到数百微米的粒径范围, 将第二相颗粒复合到金属镀层中的方法很多, 例如, 让第二相颗粒向阴极表面对流, 在金属镀层的生长过程中不断将第二相颗粒包覆进入镀层中; 亦可通过电吸附将第二相颗粒转移至阴极表面并复合进入生长的镀层中。

第二相颗粒是否能够顺利复合进入生长的镀层中取决于颗粒自身特性(浓度、表面电性质、形状、尺寸等), 镀液参数(添加剂、温度、pH 值等), 电流类型(恒定直流电、各种波形脉冲电流等), 电流密度, 镀液内的流动环境(层流、湍流等), 容器和阳极的形状等诸多因素。例如, 进行纳米 SiC 颗粒 Ni-SiC 复合镀时, 如不添加表面活性剂使纳米 SiC 颗粒之间相互分散, 复合电镀过程完成后, SiC 颗粒易以团聚的形式在镀层中出现^[13], 从而造成镀层中 SiC 颗粒不均匀分布; 而在进行 1~3 μm 大小 Ni-SiC 颗粒复合镀时则可在不加入添加剂的条件下获得 SiC 颗粒均匀分散的复合镀层(如图 1 所示); 而当 SiC 颗粒尺寸增长至数十或数百微米时, 则难以通过搅拌的方式使 SiC 颗粒在镀层中均匀复合, 此时, 依靠金属 Ni 层的生长已难以捕获如此大颗粒的运动 SiC 颗粒。

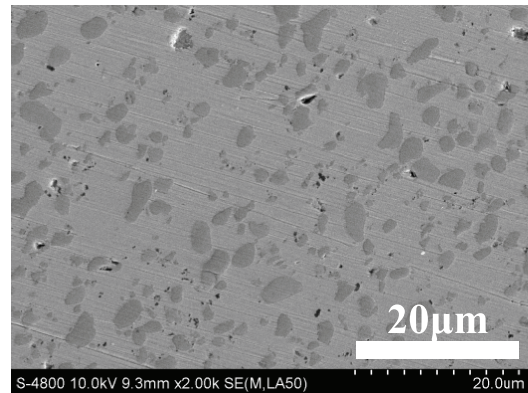


图 1 Ni-SiC 复合镀层显微组织

Fig.1 Microstructure of Ni-SiC composite electroplating coating

事实表明, 建立合理的数学模型, 对镀层成分、电镀条件等电镀参数的指导以及对镀层中颗粒均匀分散程度、镀层第二相复合量等镀层质量的预测都有非常积极的意义。

1964 年, Williams 和 Martin^[14] 提出, 在镀槽的搅动下, 颗粒通过对流的方式向阴极迁移。Bazzard 和 Boden^[15] 提出粒子与阴极表面发生碰撞, 需要一定的停留时间才能被镀层捕获。1967 年, Brandes 和 Goldthorpe^[16] 认为, 完全机械地捕获粒子是不可能的, 一定有一种引力使粒子停留在镀层表面, 例如静电引力。Guglielmi 提出了一种复合电镀两步协同模型^[17]: (1) 粒子靠近阴极并微弱地吸附在阴极表面; (2) 粒子失去离子云并变成强吸附。该模型包括粒子电泳、电荷转移电极动力学和粒子的朗缪尔吸附。尽管这一理论存在诸多缺陷, 但这一成功的早期模型已广泛用于近似描述许多复合镀体系, 并仍在近年来的论文中被频频引用。1987 年, Celis 等人^[18] 将这一两步模型完善至五步模型, 模型中细化了离子云对粒子的作用及变化过程。同年, Valdes^[19] 提出了“完美水槽”模型, 该模型考虑了粒子的扩散与对流, 并提出了阴极表面临界距离的概念。此后, 新的理论模型仍不断被提出^[20, 21] 用以解释复合电镀过程中的参数影响机理, 经典复合电镀机理不断得到补充与完善。

2 复合电镀中的参数影响

同单金属电镀工艺一样,复合电镀工艺中最基本也最重要的是对电镀时电流密度的控制。一般来说,不论何种电镀都有一个合适的电流密度范围。适当地增加电流密度可以增加粒子在镀层中的复合量,但当电流密度超过一定值时,第二相颗粒的复合量可能不再增加,甚至会出现降低的现象。第二相颗粒的粒径范围同样会对颗粒的复合量产生显著影响^[22],在同一组参数条件下,要使镀层具有更高的颗粒复合量,往往需要对颗粒的粒径分布进行选择与优化。在最近的研究中发现,脉冲电流在复合电镀过程中能起到比直流电流更好的作用^[23],合理控制脉冲电流可以使第二相颗粒在镀层中分布更加均匀并可提高镀层的物理性能。

镀液电解质的组成是影响复合电镀共沉积过程的重要因素。电解质、镀液添加剂、表面活性剂的类型和浓度都对复合电镀过程有着重要影响^[23]。目前,关于镀层组成对复合镀层的影响研究较少,研究者与工厂一般采用成熟的镀液体系作为复合电镀的基础镀液,研究精力主要集中在对第二相颗粒类型、尺寸和形状的选择。越来越多的研究表明,采用更小尺寸的粒子进行复合电镀可以提高复合镀层的多种性能。例如,采用纳米尺寸的 SiC 颗粒进行 Ni-SiC 复合电镀相比于采用微米、毫米尺寸的 SiC 颗粒可以明显提升镀层显微硬度,改善复合镀层显微组织^[24]。为了避免镀液添加剂对复合镀层的复杂影响,研究人员常选择无添加剂的镀液进行复合镀层制备或对复合电镀工艺参数进行研究。

复合电镀过程中,电极的几何形状和镀液的搅拌类型对镀层的生长和粒子在镀层中的复合都有显著的影响。实验室研究中通常采用磁力搅拌,圆盘电极或圆柱电极作为阳极。镀液搅拌运动时,其运动方向一般平行于电极。在工厂的复合电镀生产过程中,一般采用开口的容器,在阴极上方利用叶片进行机械搅拌,或采用搅拌板块在镀槽中做往复柱塞运动,或采用循环泵使镀液进行流动循环的方式进行搅拌。实验室中的搅拌条件下,镀液流动一般以层流为主,但在工厂的多种搅拌方式下,镀液很可能呈湍流状运动。对于微米级

大小粒子,层流镀液对粒子在镀层中的复合影响不明显;但在湍流条件下,随着流速增大,粒子会变得难以在镀层中复合并造成镀层中第二相颗粒复合量的下降^[25-27]。

尽管阴极镀件与镀液的相对运动对复合电镀过程及结果影响显著,大多数针对复合电镀的试验研究仍建立在液体运动状态、环境不稳定的基础上。实验室常用的磁力搅拌方式,从磁子转速控制、搅拌位置到磁子带动溶液运动的各个环节都缺乏稳定性和可重复性。镀液流动状态的影响是复杂且重要的,它在复合电镀中对镀层的质量影响往往占据最主要的地位,在当前对此缺乏系统研究的背景下,研究者应该特别关注并加以控制。

3 复合电镀应用现状

当前,复合电镀涂层的种类多,工业应用范围广。除了常见的耐磨、切削涂层的复合电镀生产与应用外,具有磁性、光学、电学等特殊性质与应用的复合镀层及相关复合电镀技术也不断涌现与发展。

3.1 硬质陶瓷颗粒复合镀

陶瓷材料在金属基体上的应用一直是一项技术难题,复合电镀技术很好地将陶瓷颗粒与金属基体相结合并赋予了金属基体特殊的性能,主要以耐磨和切削性能为主。金属-硬质陶瓷复合电镀技术最早且成功的一项应用就是高性能汽车、摩托车燃气机气缸套表面 Ni-SiC 复合镀层的使用^[28]。除此之外,Co-WC 等耐磨复合镀层也逐渐应用到精密磨具表面并替代真空镀膜技术。近年来,公开的金属-陶瓷复合电镀报道主要集中在以 SiC 为颗粒构成的复合镀层上。如 Surviliene 等人对 Cr-SiC 复合电镀技术及涂层耐蚀性能进行了研究^[29],实验结果显示,复合了 SiC 陶瓷颗粒的 Cr 镀层的耐蚀性得到了极大的提高。

3.2 聚合物颗粒复合镀

金属-聚合物复合镀层主要用于自润滑、耐腐蚀以及其他特殊用途(如燃料电池的质子交换膜中)。由于聚四氟乙烯(PTFE)等聚合物颗粒具有化学惰性和疏水特性,因此,在复合电镀过程中,

粒子尺寸、表面活性剂等参数的制定都非常重要，以确保聚合物粒子在镀液中的稳定悬浮分散。

早在上世纪 70 至 80 年代国外就有学者开始进行聚合物的复合电镀工艺研究^[3]。目前，以 PTFE 颗粒为复合相的自润滑涂层的复合电镀工艺技术已得到广泛研究。比较常见的有 Ni-PTFE 复合镀层、Ni-P-PTFE 复合镀层、Cu-Ni-Sn-PTFE 复合镀层等^[30, 31]。聚合物复合镀技术还被用于钢板表面镀 Zn 防护层中，用以提高镀层的耐蚀性能。常见镀 Zn 复合的聚合物粒子有聚苯乙烯、聚酯、聚氨酯等材质。例如，Zn—聚烯烃氧化物和 Zn—共聚氧化物复合镀层在 5 wt% NaCl 溶液中的线性电位扫描极化结果显示，与不含聚合物的 Zn 镀层相比，复合镀层的耐蚀性有明显的提升^[32]。

3.3 其他颗粒复合镀

除常见的金属 - 硬质陶瓷颗粒、金属 - 聚合物颗粒复合镀外，越来越多的粉体材料被用于复合镀以满足涂层多样化的性能需求。例如，随着石墨烯材料的问世，研究人员发现将石墨烯粉体复合在金属镀层中不仅可以改善镀层的摩擦、耐蚀、导热等性能^[33-35]，还可以用在电池电极的双极板和流场板中。又如，研究者发现将 TiO₂ 颗粒复合在 Ni 镀层中可以显著提升 NdFeB 永磁材料的耐蚀性能^[36]。再如，将 TiO₂ 颗粒复合在 Ag 镀层中可以用作专业电子材料^[37]。Cr、CrAl 等粉体材料复合在 Ni 或 NiCo 镀层中，热处理后可获得极好的耐高温涂层材料，在国外已广泛应用于航空工业中^[38]。

当前，单金属电镀技术已发展得非常全面且大多已非常成熟，复合电镀技术因其可将单种或多种不同性质的颗粒与单金属镀层相结合，往往会使得单金属镀层衍生出很多优异的性能，近几十年来在国内外均受到了研究人员极大的关注与兴趣。美国及欧洲等国在复合电镀技术研究上起步较早，除在传统的刀具、磨具等行业的复合电镀技术发展精湛外，在汽车工业、航空工业等领域也针对涂层耐磨、减磨、耐高温等性能需求分别发展了多类型复合电镀体系与技术，并开发了一系列涂层产品，如 Praxair、Tricom、Parker 等公司的复合电镀涂层产品。国内针对复合电镀技

术的研究起步较晚，目前仅在切削、耐磨、耐蚀涂层制备等少量方向有相关应用。近年来，国内研究机构大多把重点放在了各种新型复合镀层的研发上，部分国外成熟的复合电镀涂层技术、产品未能得到足够重视。

4 复合电镀技术未来发展趋势

随着现代科学技术的不断发展，对涂层材料的性能需求不断提高。复合电镀技术也逐渐由二元复合镀向三元或多元复合镀技术发展，以满足对涂层多种性能的要求。例如，传统的 Ni-Cr 二元复合镀层抗氧化温度极限约在 800℃，Ni-CrAlY 多元复合镀不仅抗氧化温度可提升至 1000℃ 以上^[39]，同时还具有良好的抗熔盐热腐蚀性能^[40]。又如，传统的 Ni-SiC 二元复合镀层耐蚀性能一般，而 Ni-Cr-SiC 三元复合镀层则可兼具良好的耐磨与耐蚀性能^[41]。

正如前文所述，纳米复合电镀技术是未来复合电镀的另一发展方向。由于纳米颗粒较小，不仅在磁学、光学、电学、催化等性能上可能产生重大变化，在扩散动力学等方面也往往表现出与宏观材料的极大不同。例如，采用微米级大小的金属 Cr 颗粒制备的 Ni-Cr 复合镀层需要在数百摄氏度的真空环境下进行热处理以使得金属 Cr 充分扩散均匀，这一热处理工艺可能对基体组织、性能造成不利影响。而采用纳米 Cr 颗粒制备的 Ni-Cr 复合镀层则不需进行额外热处理，在服役工况中纳米 Cr 颗粒即可迅速扩散均匀并使复合镀层获得良好的抗氧化性能^[42]。

5 总结

复合电镀工艺过程中参数变量多，不仅需要考虑第二相颗粒的在镀液中的悬浮与均匀分散，在很多情况下还要考虑第二相颗粒在镀液中的稳定性以及镀液自身的稳定性，要考虑颗粒对镀层生长以及镀层结构的影响，复合电镀工艺参数的多变性也是复合电镀理论至今未能发展完善的原因之一。由此可见，发展一项稳定且具有应用价值的复合电镀技术具有相当的难度。此外，复合电镀技术相比于喷涂技术有涂层沉积速度慢，涂

层厚度小等不足,这些缺点也限制了复合电镀技术在某些涂层制备领域的应用。但瑕不掩瑜,复合电镀技术不仅具备高精度、可控性强、“非视线”^[22]等传统电镀技术的优点,还因其复合了第二相物质而集多种性能于一身,在很多应用方向上具有不可替代性。

复合电镀往往以Ni、Co、Cu、Zn等成熟的金属电镀体系为基础,这可能是导致部分人错误认识复合电镀技术难度的一方面原因;另一方面,复合电镀镀层往往作为一种性能、功能强化型涂层而存在,在过去大力发展基础结构材料的大环境下也难以得到关注。近年来,通过调节元素种类、组成来提升金属结构材料各项性能的空间已变得十分有限,包括热喷涂、冷喷涂、激光熔覆、气相沉积、复合电镀等在内的涂层制备技术正得到不断发展与关注^[22,43~45]。相信在未来,我国复合电镀技术会得到更广泛的发展与应用,为材料表面防护、改性贡献更多的力量。

参考文献

- [1] Zhang Y. Electrodeposited MCrAlY coatings for gas turbine engine applications[J]. *Jom*, 2015, 67(11): 2599-2607.
- [2] Low C T J, Wills R G A, Walsh F C. Electrodeposition of composite coatings containing nanoparticles in a metal deposit[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201(1): 371-383.
- [3] Roos J R, Celis J P, Fransaeer J, et al. The development of composite plating for advanced materials[J]. *JOM*, 1990, 42(11): 60-63.
- [4] Helle K, Walsh F. Electrodeposition of composite layers consisting of inert inclusions in a metal matrix[J]. *Transactions of the Imf*, 1997, 75(2): 53-58.
- [5] Kedward E, Martin J. Electrodeposition of composite coatings: the U.S., 3830711[P]. 1972-07-20[1974-08-20].
- [6] Ghose M. Influence of heat treatment on the bond strength of codeposited Ni-SiC composite coatings[J]. *Surface Technology*, 1984, 21(2): 193-200.
- [7] Sykes J M, Alner D J. The use of surface-active agents in promoting codeposition of polymer particles with electroplated metal[J]. *Transactions of the IMF*, 1973, 51(1): 171-172.
- [8] Kedward E C, Addison C A, Honey F J, et al. Processes for the electrodeposition of composite coatings: the U.S., 4305792[P]. 1980-08-20[1981-12-15].
- [9] 蒋斌,徐滨士,董世运,等. 纳米复合镀层的研究现状[J]. *兵器材料科学与工程*, 2004, 35(3): 1-3.
- [10] Vaezi M R, Sadrezhaad S K, Nikzad L. Electrodeposition of Ni-SiC nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2008, 315(1): 176-182.
- [11] Hovestad A, Janssen L J J. Electroplating of metal matrix composites by codeposition of suspended particles[M]. New York: *Modern Aspects of Electrochemistry*, 1999: 475-532.
- [12] Celis J P, Roos J. Kinetics of deposition of alumina particles from copper-sulfate plating baths[J]. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 1977, 31(3): 1230-1234.
- [13] Walsh F C, Ponce D L C. A review of the electrodeposition of metal matrix composite coatings by inclusion of particles in a metal layer: an established and diversifying technology[J]. *Transactions of the IMF*, 2014, 92(2): 83-98.
- [14] Williams R V, Martin P W. Electrodeposited Composite Coatings[J]. *Transactions of the Imf*, 1964, 42(1): 182-188.
- [15] Bazzard R, Boden P J. Nickel-Chromium Alloys by codeposition: part I codeposition of chromium particles in a nickel matrix[J]. *Transactions of the Imf*, 1972, 50(1): 63-69.
- [16] Brandes E A, Goldthorpe D. Co-deposition of metals and ceramic particles[J]. *Metallurgia*. 1967, 76: 195-198.
- [17] Guglielmi N. Kinetics of the deposition inert particles from electrolytic baths[J]. *Electrochem Soc*, 1972, 119(8): 1009-1012.
- [18] Celis J P, Roos J R, Buelens C. A mathematical model for the electrolytic codeposition of particles with a metallic matrix[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1987, 134(6): 1402-1408.
- [19] Valdes J L. Electrodeposition of colloidal particles[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1987, 134(4): 223-225.
- [20] Fransaeer J, Celis J P, Roos J R. Analysis of the electrolytic codeposition of non-brownian particles with metals[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1992, 139(2): 413-425.
- [21] Bercot P, Pena-Munoz E, Pagetti J. Electrolytic composite Ni-PTFE coatings: an adaptation of Guglielmi's model for the phenomena of incorporation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 157(2-3): 282-289.
- [22] 李志平,黄凌峰,刘建明,等. CrAlY 粒径对复合电

- 沉积 NiCrAlY 涂层成分与组织影响 [J]. 热喷涂技术, 2018, 10(1): 75-80.
- [23] Gyftou P, Stroumbouli M, Pavlatou E A, et al. Electrodeposition of Ni/SiC composites by pulse electrolysis[J]. Transactions of the IMF, 2002, 80(3): 88-91.
- [24] Nasirpouri F. Electrodeposition of nanostructured materials[M]. Springer, 2016, 62.
- [25] Hovestad A, Janssen L J J. Electrochemical codeposition of inert particles in a metallic matrix[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1995, 25(6): 519-527.
- [26] Gabe D R, Wilcox G D, Gonzalez-Garcia J, et al. The rotating cylinder electrode: its continued development and application[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1998, 28(8): 759-780.
- [27] Low C T J, Leon C P D, Walsh F C. The rotating cylinder electrode(RCE) and its application to the electrodeposition of metals[J]. Cheminform, 2005, 36(28): 246-262.
- [28] Kappes A, Stephan G, Laux G, et al. Apparatus for producing a wear-resistant surface on a workpiece: the U.S., 3514389[P]. 1968-09-06[1970-05-26].
- [29] Survilienė S, Aesėnienė A, Jasulaitienė V, et al. Influence of SiC+WC addition to Cr(VI) bath on corrosion behaviour of coatings in sulphate solution[J]. Transactions of the Imf, 2013, 86(6): 308-314.
- [30] 邓纶浩, 郭忠诚. PTFE 在复合镀层中应用及进展 [J]. 电镀与环保, 1999(2): 3-7.
- [31] 冶银平, 陈建敏. 电刷镀 Ni/PTFE 复合镀层的摩擦学特性 [C]// 第四届全国表面工程学术交流会议论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2003: 286-289.
- [32] Koleva D, Boshkov N, Raichevski G, et al. Electrochemical corrosion behavior and surface morphology of electrodeposited zinc, zinc-cobalt and their composite coatings[J]. Transactions of the Imf, 2013, 83(4): 188-193.
- [33] 陈娟娟. 石墨烯/Ni 基复合镀层的制备及摩擦学性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [34] Lapinski J, Pletcher D, Walsh F C. The electrodeposition of nickel-graphite composite layers[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(21): 5205-5209.
- [35] 胡振峰, 丁小龙, 金国, 等. 电刷镀镍——石墨烯复合镀层的制备及导热性能 [J]. 电镀与涂饰, 2017(36): 1121.
- [36] Li Q, Gao H, Wang J P, et al. Electroplating of anticorrosive Ni-TiO₂ composite coatings on sintered NdFeB permanent magnets[J]. Transactions of the IMF, 2009, 87(3): 149-154.
- [37] Cantaragiu A M, Cojocaru P, Carac G, et al. Electrocodeposition of Ag/TiO₂ nanocomposite coatings in cyanide free electrolytes[J]. Transactions of the IMF, 2011, 89(1): 39-43.
- [38] Khan A S, Nazmy M. MCrAlY bond coating and method of depositing said MCrAlY bond coating: the U.S., 7264887[P]. 2004-07-08[2007-09-04].
- [39] Huang L F, Liu J M, Cheng X Y, et al. The structure and oxidation resistance behavior of Ni-CrAlY coatings prepared by plating process[C]//Orlando: International Thermal Spray Conference and Exposition. 2018: 557-560.
- [40] Saremi M, Bahraini M. Electrodeposition of NiCrAlY coating on In-738 Ni super alloy and its oxidation and hot corrosion performance[J]. Transactions of the IMF, 2003, 81(1): 24-27.
- [41] 何新快, 吴璐焯, 侯柏龙, 等. 三价铬超声-脉冲电沉积 Ni-Cr/SiC 纳米复合镀层 [J]. 功能材料, 2014, 44(6): 906-910.
- [42] Zhang Y, Peng X, Wang F. Development and oxidation at 800 °C of a novel electrodeposited Ni-Cr nanocomposite film[J]. Materials Letters, 2004, 58(6): 1134-1138.
- [43] 徐滨士, 李长久, 刘世参, 等. 表面工程与热喷涂技术及其发展 [J]. 中国表面工程, 1998, 1: 3-9.
- [44] 刘全民. 激光熔覆陶瓷增强金属基复合涂层研究现状 [J]. 热喷涂技术, 2014, 6(2): 1-5.
- [45] 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, 1(2): 7-14.