

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.05.010

超声波辅助电沉积 Cu-WC 复合镀层的耐腐蚀与机械性能

师敏^{1*}, 杜焘森²

(1. 廊坊职业技术学院 机电工程系, 河北 廊坊 065000;
2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 在电沉积 Cu-WC 复合镀层过程中引入超声波, 通过改变超声波功率制备了 5 种 Cu-WC 复合镀层。研究了复合镀层的形貌、耐腐蚀性能、硬度与抗划伤性能, 并与纯 Cu 镀层进行比较。结果表明: 随着超声波功率从 50 W 提高到 100 W, 复合镀层的晶粒变小并且掺杂的 WC 颗粒增多, 硬度提高, 耐腐蚀性能和抗划伤性能增强; 但当超声波功率达到 200 W, 复合镀层的晶粒粗化并且掺杂的 WC 颗粒量少, 硬度降低, 耐腐蚀性能和抗划伤性能变差。超声波功率为 100 W 时, 电沉积的 Cu-WC 复合镀层致密性最好, 并且较多 WC 颗粒呈分散状态掺杂在复合镀层中。该复合镀层的硬度较纯 Cu 镀层提高约 100 HV, 并且表现出较好的耐腐蚀性能与抗划伤性能。该复合镀层还能起到明显的表面强化作用, 使基体的抗拉强度提高约 45 MPa。

关键词: Cu-WC 复合镀层; 超声波辅助电沉积; 耐腐蚀性能; 抗拉强度; 抗划伤性能
中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A

Corrosion resistance and mechanical property of Cu-WC composite coatings prepared by ultrasonic-assisted electrodeposition

Shi Min^{1*}, Du Yaosen²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Langfang Polytechnic Institute, Langfang 065000, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Ultrasonic was introduced during the electrodeposition of Cu-WC composite coating, and five kinds of Cu-WC composite coatings were prepared under different ultrasonic power. The morphology, corrosion resistance, hardness and scratch resistance of the composite coating were studied and compared with those of pure Cu coating. The results show that with the increase of ultrasonic power from 50 W to 100 W, the grains of the composite coating are refined, and the amount of embedded WC particles and hardness increased, improving the corrosion resistance and scratch resistance. However, when the ultrasonic power reaches 200 W, the grains of the composite coating are coarsened, and the amount of embedded WC particles and hardness decreased, weakening the corrosion resistance and scratch resistance. The Cu-WC composite coating electrodeposited under ultrasonic power of 100 W has compact

收稿日期: 2024-12-16

修回日期: 2025-01-26

通信作者: 师敏(1987—), 硕士, 讲师, 研究方向为智能制造、特种加工工艺, email: lfshimin_065000@163.com

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2021318006)

引用信息: 师敏, 杜焘森. 超声波辅助电沉积 Cu-WC 复合镀层的耐腐蚀与机械性能[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(5): 66-73, 79.

Shi Min, Du Yaosen. Corrosion resistance and mechanical property of Cu-WC composite coatings prepared by ultrasonic-assisted electrodeposition[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(5): 66-73, 79.

structure, and more WC particles are embedded in a dispersed state. The hardness of the composite coating is about 100 HV higher than that of pure Cu coating, and it exhibits better corrosion resistance and scratch resistance. The composite coating can provide significant surface strengthening effect, improving the tensile strength of the substrate by about 45 MPa.

Keywords: Cu-WC composite coating; ultrasonic-assisted electrodeposition; corrosion resistance; tensile strength; scratch resistance

电子、军工等行业中通常在元器件表面镀铜,利用Cu镀层优异的导电性能和导热性能起到改性效果。但纯Cu镀层的耐腐蚀与机械性能(硬度、抗拉强度、耐磨性能、抗划伤性能等)不理想,导致在某些特殊环境或场合中的应用受到限制^[1-4]。为了在提高Cu镀层耐腐蚀与机械性能的同时保持其优异的导电和导热性能,一些学者通过电沉积将金属氧化物颗粒等非金属颗粒引入Cu镀层中。王寅等^[5]通过电沉积将氧化石墨烯颗粒引入Cu镀层中,研究发现Cu-氧化石墨烯复合镀层的硬度较纯Cu镀层提高约75 HV,耐磨性能也明显好于纯Cu镀层。张伟华等^[6]通过电沉积将SiC颗粒引入Cu镀层中,获得的Cu-SiC复合镀层的硬度和耐磨性能相比于纯Cu镀层明显提高。Hui等^[7]通过电沉积将Al₂O₃颗粒引入Cu镀层中,获得具有良好机械性能的Cu-Al₂O₃复合镀层。Eslami等^[8]通过电沉积将Si₃N₄颗粒引入Cu镀层中,获得的Cu-Si₃N₄复合镀层的耐腐蚀性能优于纯Cu镀层,还具有较高的硬度和较好的耐磨性能。

WC颗粒具有极高的硬度、优异的热稳定性、耐腐蚀性能和耐磨性能,通常被用作制备功能材料的增强相^[9-10]。Cu镀层的机械性能不理想,导致应用范围受限。将WC颗粒引入Cu镀层中有望在保持其良好的导电性、导热性和延展性的同时,提高其机械性能和耐腐蚀性能,对于拓宽Cu镀层的应用范围具有重要意义。然而,目前关于这方面的研究很少。本文选择WC颗粒作为增强相制备Cu-WC复合镀层,并在复合电沉积过程中引入超声波,旨在利用超声波的特性影响复合电沉积过程,并促使WC颗粒分散起到强化作用,从而获得具有良好耐腐蚀与机械性能的Cu-WC复合镀层。

1 实验

1.1 实验装置与材料

电沉积Cu-WC复合镀层采用自制实验装置。电源为直流稳压电源,正极与磷铜板(阳极)连接,负极与待镀基体(黄铜片)连接。工作槽为半封闭形式,盛有以焦磷酸铜和焦磷酸钾为主盐的镀液,体积约

1 000 mL。工作槽内置超声波发生器,通电情况下产生高频、强度可变的超声波。智能温控仪用于调控工作槽中的镀液温度,波动幅度不超过0.5 °C。磷铜板用作阳极可以降低阳极极化,并有利于阳极在电沉积过程中均匀溶解。待镀基体依次经打磨、抛光、除油、酸洗、水洗和烘干处理。

1.2 超声波辅助电沉积 Cu-WC 复合镀层

镀液主要成分如表1所示,调节pH为9.0。WC颗粒的纯度高于99.9%、平均粒径约500 nm。根据实验用量称取5g WC颗粒,先用适量去离子水配成悬液,然后缓慢倒入镀液中,同时持续搅拌(150 r/min)。

黄铜片依次经过抛光、除油、酸洗、水洗、干燥处理,然后与磷铜板平行正对着(间距约3 cm)浸在镀液中。接通电源后在黄铜基体上逐步电沉积Cu-WC复合镀层,设定电流密度为2 A/dm²,持续120 min。电沉积过程中镀液温度始终保持(30.0±0.5) °C,适度搅拌镀液使WC颗粒悬浮。设置超声波发生器的频率为40 kHz,功率在0~200 W范围内变化,通过改变超声波功率电沉积5种Cu-WC复合镀层。

表1 镀液主要成分

Tab.1 Main components of the bath

试剂	质量浓度/(g·L ⁻¹)
焦磷酸铜	50
焦磷酸钾	180
硼酸	35
柠檬酸氢二铵	90

1.3 Cu-WC 复合镀层表征与性能测试

采用扫描电镜(SEM, JSM-7800F型)和能谱仪(EDS, ULTIM MAX型)观察并分析Cu-WC复合镀层的形貌、表面成分,进一步推算复合镀层中WC颗粒含量。

配制质量分数3.5%的氯化钠溶液作为腐蚀介质。将尺寸相同的Cu-WC复合镀层试样以悬挂方式

浸在氯化钠溶液中静置144 h。实验前后分别对复合镀层试样烘干并称重，作差得到腐蚀失重。采用扫描电镜观察Cu-WC复合镀层在氯化钠溶液中浸泡120 h后的形貌。

采用显微硬度计(HX-1000TM型)测定Cu-WC复合镀层的硬度，压头在恒定法向载荷(0.49 N)作用下接触复合镀层表面并压入，保持状态15 s后压头缓慢抬升，同时显示硬度测定结果。

按照要求制备拉伸试样(包括裸黄铜试样和电沉积Cu-WC复合镀层的黄铜试样)，采用电子万能试验机(CMT5000系列)测定抗拉强度。实验过程中设定拉伸速度为0.2 mm/min，逐渐增大拉力直到试样被破坏。每组实验准备3个试样，测定结果取平均值。

采用多功能划痕仪(Erichsen 450型)测试Cu-WC复合镀层的抗划伤性能。测试前按要求制备试样，测试过程中钢针在外力作用下接触复合镀层表面并压入，试样与钢针发生相对移动，表面形成一道细长划痕。借助扫描电镜测量划痕宽度同时观察划痕形貌，对复合镀层的抗划伤性能进行评价。

2 结果与讨论

2.1 Cu-WC 复合镀层的表面成分和形貌

图1为超声波功率为100 W时电沉积Cu-WC复合镀层的EDS图谱。图中可见3个较尖锐的衍射峰，表明Cu-WC复合镀层为晶态结构。Cu元素的特征峰强度很高，表明复合镀层的主要成分为Cu，其质量分数达到95.06%。从图1还可见C元素和W元素的特征峰，两者的质量分数分别为2.73%、2.21%，表明WC颗粒参与复合电沉积过程。但C元素和W元素的特征峰强度远低于Cu元素，原因是在复合电沉积过程中被掺杂的WC颗粒量少。

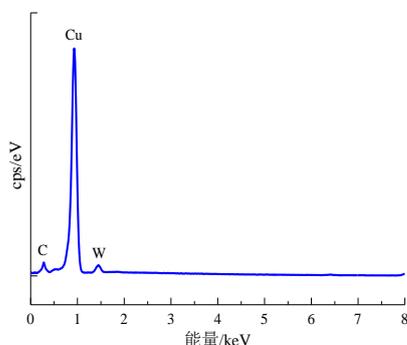


图1 超声波功率为100 W时电沉积Cu-WC复合镀层的EDS图谱

Fig.1 EDS spectra of the Cu-WC composite coating electrodeposited under ultrasonic power of 100 W

图2为不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层中WC颗粒含量。由图2可知，超声波功率为0 W(即未施加超声波)时电沉积的复合镀层中WC颗粒含量较低，为0.85%；而超声波功率为50~100 W时电沉积的复合镀层中，WC颗粒含量由1.68%升高到2.36%。结合超声波空化效应理论和复合电沉积理论^[11-13]分析，超声波在镀液中传递会产生空化效应、机械振动和热效应，共同作用促使WC颗粒处于分散状态，并且颗粒容易附着在沉积面，逐步被镀层掺杂。随着超声波功率从50 W提高到100 W，空化效应、机械振动和热效应共同作用的效果增强，促使较多WC颗粒附着在沉积面并被掺杂，因而复合镀层中WC颗粒含量呈升高趋势。

然而超声波功率为100~200 W时，电沉积的复合镀层中WC颗粒含量呈降低趋势，由2.36%降低到0.94%。这是由于超声波功率超过一定限度会产生过于强烈的空化效应、机械振动和热效应，对镀液造成过度搅拌，致使WC颗粒相互吸附形成团聚体。团聚颗粒会发生沉降，在沉积面附着以及被掺杂困难，因而复合镀层中WC颗粒含量呈降低趋势。

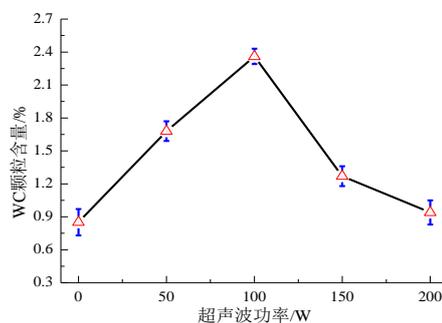
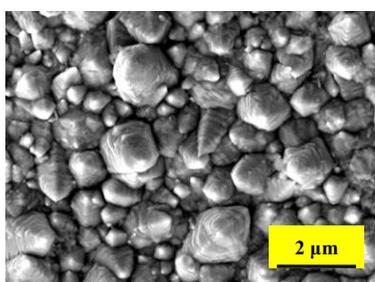


图2 不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层中WC颗粒含量

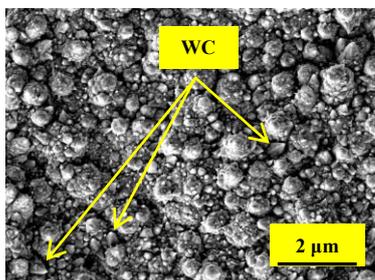
Fig.2 Content of WC particles in the Cu-WC composite coatings electrodeposited under different ultrasonic power

图3为纯Cu镀层以及不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层的形貌。由图3(a)可见，纯Cu镀层的晶粒类似角锥状，尺寸差异较大，其表面粗糙。由图3(b)可见，未施加超声波电沉积的复合镀层晶粒类似瘤状，形态不同于纯Cu镀层，呈错落排列。由于WC颗粒附着在沉积面会诱发行核增殖效应，致使已经形成的晶粒表面再次形核并生长，因而晶粒形态发生变化。由图3(c)和3(d)可见，超声波功率为50~100 W时，电沉积的复合镀层晶粒同样呈瘤状，但掺杂在复合镀层中的WC颗粒增多并且分散

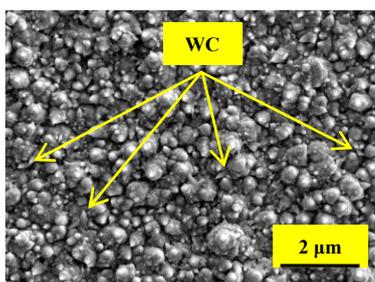
性较好;超声波功率为50~100 W时,电沉积的复合镀层晶粒排列紧凑,致密性好于纯Cu镀层和未施加超声波电沉积的复合镀层。原因为:超声波产生的多种效应共同作用使WC颗粒附着在沉积面,起到异质形核效果,使形核率提高并且趋于均匀形核。另外,超声波产生的多种效应共同作用可能击碎较大晶粒,并干扰晶粒生长过程^[14]。而晶粒碎块可能演变成新晶核,诱发形核增殖效应,在沉积面和晶粒间隙处形成一些细小晶粒,阻碍周围晶粒的正常生长,使晶粒变小并且排列趋于紧凑,逐步形成较为致密的复合镀层。



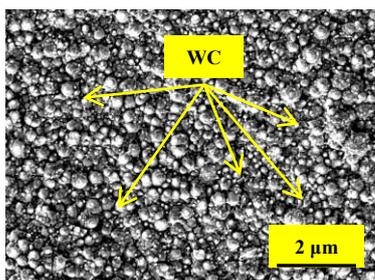
(a) 纯Cu镀层



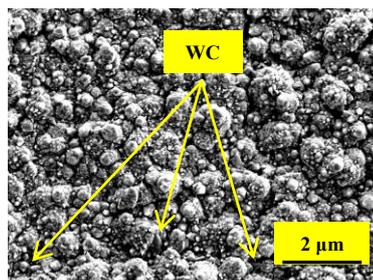
(b) 复合镀层(未施加超声波)



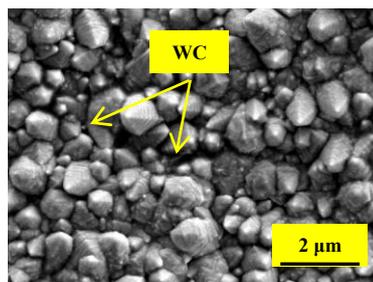
(c) 复合镀层(超声波功率 50 W)



(d) 复合镀层(超声波功率 100 W)



(e) 复合镀层(超声波功率 150 W)



(f) 复合镀层(超声波功率 200 W)

图3 纯Cu镀层以及改变超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层形貌

Fig.3 Morphology of pure Cu coating and the Cu-WC composite coatings electrodeposited under different ultrasonic power

随着超声波功率从50 W提高到100 W,空化效应、机械振动和热效应共同作用的效果增强,促使较多WC颗粒参与复合电沉积过程,异质形核效果加上形核增殖效应实现了晶粒细化,因而复合镀层的致密性提高。由图3(d)可见,超声波功率为100 W时电沉积的复合镀层晶粒细小、均匀并且排列较为紧凑,其致密性最好,该复合镀层中掺杂了较多的WC颗粒,呈分散状态。

由图3(e)可见,超声波功率为150 W时电沉积的复合镀层晶粒形态与超声波功率为50~100 W时电沉积的复合镀层相似,但晶粒尺寸差异较大。由图3(f)可见,超声波功率为200 W时电沉积的复合镀层晶粒形态与未施加超声波电沉积的复合镀层相似,晶粒也呈错落排列,其表面粗糙,致密性不佳,掺杂了少量WC颗粒。由于超声波功率超过一定限度容易形成WC颗粒团聚体,导致少量WC颗粒参与复合电沉积过程,难以起到异质形核效果,也难以阻碍周围晶粒生长,因而形成晶粒尺寸差异大、致密性不佳的复合镀层。

2.2 Cu-WC复合镀层的耐腐蚀性能

图4为不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层的腐蚀失重。由图4可知,Cu-WC复合镀层的腐蚀

失重低于纯Cu镀层(240 mg)。显然, WC颗粒掺杂起到了提高复合镀层耐腐蚀性能的作用。由于Cu-WC复合镀层不会与黄铜基体发生电偶腐蚀, 因而其耐腐蚀性能高于纯Cu镀层主要归因于: WC颗粒掺杂起到了延长腐蚀介质的扩散路径并阻碍腐蚀介质向复合镀层内部渗透的作用; WC颗粒凭借高阻抗特性致使复合镀层发生腐蚀的阻力增大, 因而复合镀层的腐蚀速度变慢。

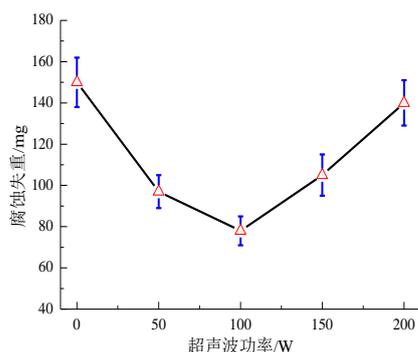


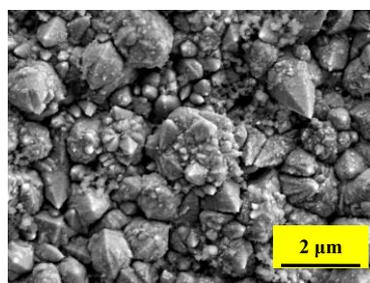
图4 不同超声波功率电沉积的 Cu-WC 复合镀层的腐蚀失重

Fig.4 Corrosion weight loss of the Cu-WC composite coatings electrodeposited under different ultrasonic power

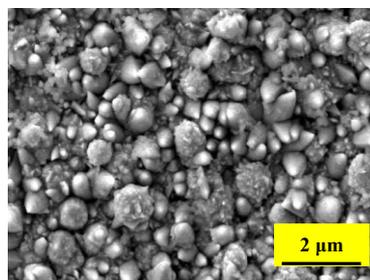
超声波功率为0、50和100 W时电沉积的复合镀层的腐蚀失重依次降低, 分别为150、97和78 mg。原因是适度提高超声波功率增强了超声波产生的多种效应的共同作用效果, 促使较多的WC颗粒掺杂在复合镀层中, 有效阻碍了腐蚀介质的渗透和扩散, 并增大了复合镀层发生腐蚀的阻力。同时逐步形成了较为致密的复合镀层, 腐蚀介质不容易在局部汇聚, 严重的局部腐蚀过程被抑制, 因而复合镀层的腐蚀速率降低, 耐腐蚀性能逐步提高。然而, 超声波功率为150~200 W时电沉积的复合镀层的腐蚀失重升高, 最高接近140 mg。由于超声波功率超过一定限度会导致掺杂在复合镀层中的WC颗粒量降低, 难以有效阻碍腐蚀介质的渗透和扩散, 减缓腐蚀效果有限。另外, 超声波功率超过一定限度时电沉积的复合镀层致密性不佳, 腐蚀介质会局部汇聚, 造成严重腐蚀, 因而腐蚀失重较高, 表现为耐腐蚀性能差。

图5为纯Cu镀层以及不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层在氯化钠溶液中浸泡120 h后的形貌。由图5(a)可见, 纯Cu镀层的晶粒遭到不同程度破坏, 形态发生了明显变化, 并且在晶粒表面及晶

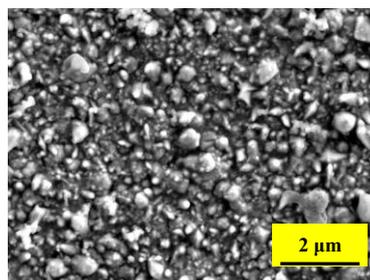
粒间隙处存在一些腐蚀产物, 推测是Cu₂O和CuCl₂。由图5(b)可见, 未施加超声波电沉积的复合镀层晶粒也遭到不同程度破坏, 沉积在晶粒表面及晶粒间隙处的腐蚀产物同样是Cu₂O和CuCl₂。由图5(c)和5(d)可见, 超声波功率为50 W和100 W时电沉积的复合镀层晶粒未遭到明显破坏, 但在晶粒间隙处沉积了一些腐蚀产物。由图5(e)和5(f)可见, 超声波功率为150~200 W时电沉积的复合镀层晶粒同样遭到了不同程度破坏, 局部腐蚀严重。相比较而言, 超声波功率为50~100 W时电沉积的复合镀层腐蚀程度轻, 在氯化钠溶液中表现出较好的耐腐蚀性能。



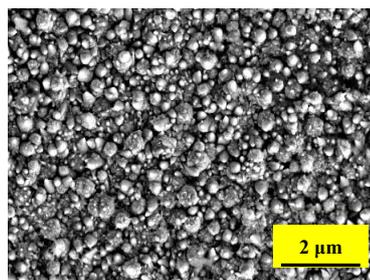
(a) 纯 Cu 镀层



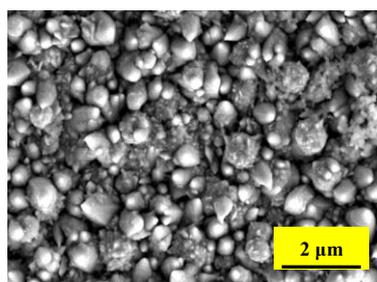
(b) 复合镀层(未施加超声波)



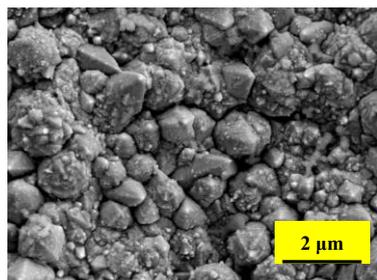
(c) 复合镀层(超声波功率 50 W)



(d) 复合镀层(超声波功率 100 W)



(e) 复合镀层(超声波功率 150 W)



(f) 复合镀层(超声波功率 200 W)

图5 纯Cu镀层以及不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层在氯化钠溶液中浸泡120 h后的形貌

Fig.5 Morphology of pure Cu coating and the Cu-WC composite coatings electrodeposited under different ultrasonic power after soaking in sodium chloride solution for 120 h

2.3 Cu-WC复合镀层的硬度

图6为不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层的硬度。由图6可知,未施加超声波电沉积的复合镀层的硬度为160.8 HV,较纯Cu镀层的硬度(130 HV)提高约30 HV。研究证实,Wc颗粒(硬度超过2 000 HV)参与复合电沉积过程被镀层掺杂能起到阻碍位错滑移等作用,实现硬质强化效果^[15-17]。但由于未施加超声波情况下,掺杂在复合镀层中的WC颗粒量少,硬质强化效果有限,因而复合镀层的硬度与纯Cu镀层相比未显著提高。超声波功率为50 W和100 W时电沉积的复合镀层的硬度较纯Cu镀层分别提高约90 HV和120 HV。这是由于适度提高超声波功率,增强了超声波产生的多种效应的综合作用效果,促使较多的WC颗粒呈分散状态掺杂在复合镀层中,有效阻碍了晶粒的位错滑移,起到明显的强化效果。另外,适度提高超声波功率电沉积的复合镀层较为致密,受外力作用时表现出较好的抵抗局部塑性变形能力。其中,超声波功率为100 W时电沉积的复合镀层硬度最高,达到236.8 HV。

超声波功率为150 W和200 W时电沉积的复合镀层硬度较纯Cu镀层仅分别提高50 HV和35 HV,呈明显降低趋势。原因归结为两方面:一是超声波

功率超过一定限度时,其产生的多种效应的共同作用效果较弱,仅少量WC颗粒掺杂在复合镀层中,硬质强化效果有限;二是超声波功率超过一定限度情况下电沉积的复合镀层致密性不佳,受外力作用抵抗局部塑性变形的能力弱。

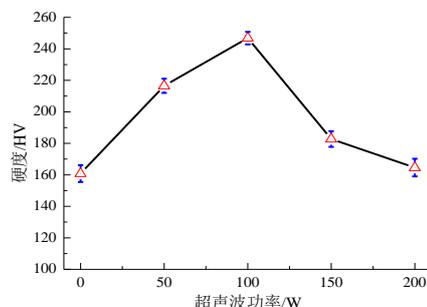


图6 不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层的硬度

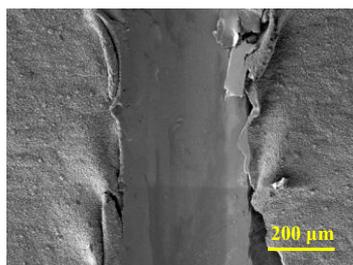
Fig.6 Hardness of the Cu-WC composite coatings electrodeposited under different ultrasonic power

2.4 Cu-WC复合镀层的抗划伤性能

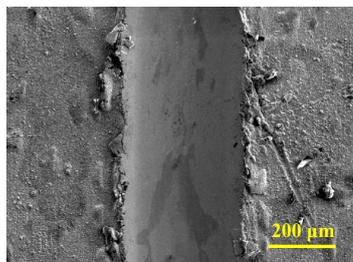
图7为纯Cu镀层以及不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层的表面划痕形貌。由图7(a)、7(b)、7(e)和7(f)可见,纯Cu镀层、未施加超声波电沉积的复合镀层以及超声波功率为150 W、200 W时电沉积的复合镀层表面都形成较宽的划痕,并且划痕边缘出现撕裂现象,伴随着镀层脱落。其中,纯Cu镀层和超声波功率为200 W时电沉积的复合镀层表面划伤程度相对严重,抗划伤性能较差。由图7(c)和7(d)可见,超声波功率为50~100 W时电沉积的复合镀层的表面划痕边缘未出现明显撕裂现象,脱落程度较轻。由于超声波功率在50~100 W范围内形成了较为致密的复合镀层,晶粒细小并且排列紧凑,受外力作用时表现出较强的抵抗局部塑性变形能力。此外,掺杂的WC颗粒呈分散状态,起到了阻碍位错滑移、硬质强化效果,使复合镀层承受外力挤压和剪切的能力增强,因而表现出较好的抗划伤性能。超声波功率为100 W时电沉积的复合镀层表面划痕最窄,表明其抗划伤性能更好。原因为该复合镀层的晶粒细小、结构致密,且掺杂的WC颗粒呈分散状态,起到了较好的强化效果。

表2所示为纯Cu镀层以及不同超声波功率电沉积的Cu-WC复合镀层的表面划痕宽度。由表2可知,纯Cu镀层的表面划痕最宽,约为420 μm。未施加超声波电沉积的复合镀层表面划痕与纯Cu镀层相比变窄,约为380 μm。超声波功率为50 W和100 W时

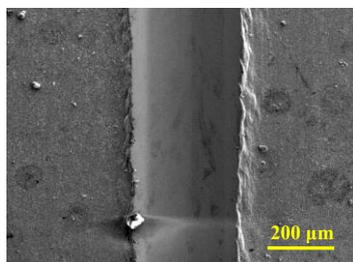
电沉积的复合镀层表面划痕更窄，分别为310 μm和290 μm。划痕越窄反映出涂层抗划伤能力越强，反之涂层的抗划伤能力越差^[18-20]。相比较而言，超声波功率为50~100 W时电沉积的复合镀层表现出较好的抗划伤性能。原因是适度提高超声波功率电沉积的复合镀层较为致密，并且较多的WC颗粒被掺杂，起到了硬质强化效果。



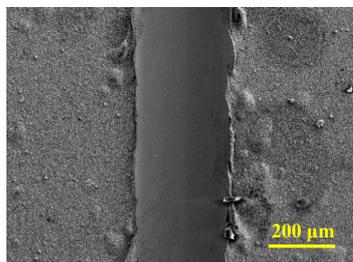
(a) 纯 Cu 镀层



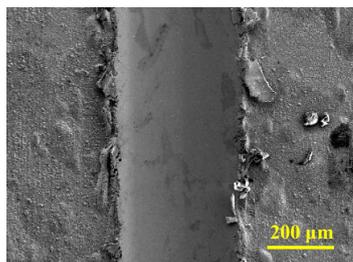
(b) 复合镀层(未施加超声波)



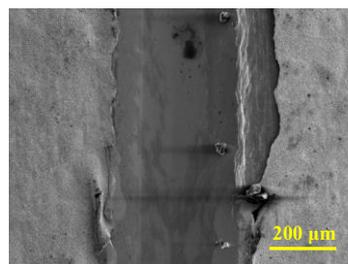
(c) 复合镀层(超声波功率 50 W)



(d) 复合镀层(超声波功率 100 W)



(e) 复合镀层(超声波功率 150 W)



(f) 复合镀层(超声波功率 200 W)

图 7 纯 Cu 镀层以及不同超声波功率电沉积 Cu-WC 复合镀层的表面划痕形貌

Fig.7 Scratches on the surface of pure Cu coating and Cu-WC composite coatings electrodeposited under different ultrasonic power

表 2 纯 Cu 镀层以及不同超声波功率电沉积 Cu-WC 复合镀层的表面划痕宽度

Tab.2 Width of scratches on the surface of pure Cu coating and Cu-WC composite coatings electrodeposited under different ultrasonic power

试样	划痕宽度/μm
纯 Cu 镀层	420
复合镀层(未施加超声波)	380
复合镀层(超声波功率 50 W)	310
复合镀层(超声波功率 100 W)	290
复合镀层(超声波功率 150 W)	380
复合镀层(超声波功率 200 W)	410

2.5 电沉积 Cu-WC 复合镀层对基体抗拉强度的影响

图8显示了超声波功率对电沉积Cu-WC复合镀层抗拉强度的影响。由图可见，未施加超声波情况下电沉积的Cu-WC复合镀层对基体的抗拉强度基本无影响；而超声波功率为50、100和150 W时，电沉积的Cu-WC复合镀层能明显提高基体的抗拉强度，分别提高了30、45和20 MPa。原因是适度提高超声波功率促使形成了晶粒细小、较为致密的Cu-WC复合镀层，对基体起到了表面强化作用。另外，硬质WC颗粒掺杂在复合镀层中能有效抑制局部塑性变形，提高了复合镀层承受拉伸的能力。相比较而言，超声波功率为100 W时电沉积的Cu-WC复合镀层对基体起到了更明显的强化作用。然而，超声波功率为200 W时电沉积的Cu-WC复合镀层难以提高基体的抗拉强度。这是由于超声波超过一定限度

会造成复合镀层的晶粒粗化、致密性不佳,对基体的表面强化作用有限。加之仅少量WC颗粒掺杂在复合镀层中,难以有效抑制局部塑性变形,因而复合镀层承受拉伸能力较弱。

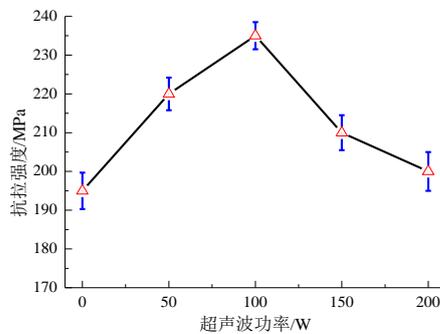


图8 超声波功率对电沉积 Cu-WC 复合镀层抗拉强度的影响

Fig.8 Influence of ultrasonic power on the tensile strength of electrodeposited Cu-WC composite coatings

3 结论

(1) 超声波功率对Cu-WC复合镀层的表面成分无影响,但会影响复合镀层的晶粒尺寸、WC颗粒的掺杂量及颗粒分布状况,因而复合镀层的致密性、耐腐蚀性能、硬度和抗划伤性能表现出差异。

(2) 在一定范围内提高超声波功率,可产生多种效应共同作用的效果增强,促使较多的WC颗粒参与复合电沉积过程,起到异质形核效果和硬质强化作用,逐步形成晶粒细小、结构较致密的Cu-WC复合镀层。这类复合镀层具有较高的硬度、较好的耐腐蚀性能和抗划伤性能,并且能提高基体的抗拉强度。但超声波功率超过一定限度会导致复合镀层的致密性不佳,硬度降低,同时耐腐蚀性能和抗划伤性能变差。

参考文献

[1] 徐国兴,张基兴,许梓浩,等. 新型高纵横比通孔镀铜整平剂研究[J]. 印制电路信息, 2024(1): 160-167.
 [2] 杨凯. 整平剂 DTDP 在高深径比通孔脉冲电镀中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
 [3] 朱凯. 金属沉积构建电子元件电气互连结构的研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
 [4] 巫中山,许伟廉,黄李海,等. 基于6 sigma的镀铜均匀性改善研究[J]. 印制电路信息, 2023(1): 188-195.
 [5] 王寅,邓贤超,李轩,等. TC4钛合金表面铜氧化石墨烯

复合镀层的组织结构和摩擦磨损性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(15): 32-39.

- [6] 张伟华,赵刚. 电沉积铜基纳米碳化硅复合镀层实验研究[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(11): 11-14.
 [7] Fan H, Zhao Y P, Wang S K, et al. Effect of jet electrodeposition conditions on microstructure and mechanical properties of Cu-Al₂O₃ composite coatings[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105: 4509-4516.
 [8] Eslami M, Saghafian H, Golestani-fard F, et al. Effect of electrodeposition conditions on the properties of Cu-Si₃N₄ composite coatings[J]. Applied Surface Science, 2014, 300: 129-140.
 [9] 宁海霞,成小乐. WC颗粒增强钢基复合材料的制备及耐磨性研究[J]. 新技术新工艺, 2010(1): 61-63.
 [10] 张展展,宁家庆,左玲立,等. 工艺参数对WC颗粒增强表层复合材料与钢基界面组织的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(11): 131-136.
 [11] 王文亚,傅波,黄清宇. 超声辅助电镀的仿真与实验[J]. 应用声学, 2023, 42(5): 938-948.
 [12] 赵紫怡,王晓丽,周鑫. 铜/镍-金刚石旋转圆柱复合电沉积的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(3): 75-82.
 [13] Li Y F, Zheng L, Zhang M M, et al. Mechanical properties of nanoparticle-reinforced Ni-based composite coatings prepared by jet electrodeposition[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33: 7944-7959.
 [14] 薛玉君,刘红彬,兰明明,等. 超声场中脉冲电沉积Ni-CeO₂纳米复合镀层的耐蚀性[J]. 无机材料学报, 2010, 25(5): 522-526.
 [15] Zhang Y G, Sun W C, Ma M, et al. Electrodeposition, microstructure and property of Co-WC composite coatings[J]. Materials Research Express, 2019, 6(12): 126438.
 [16] 刘爱莲,毛楠楠,徐家文. WC含量对CuZnAl表面Ni-P-WC复合镀层耐磨性的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2015(5): 516-520.
 [17] 武占文,陈吉,朴楠,等. Ni-WC纳米复合镀层的制备及钝化性能研究[J]. 金属学报, 2013, 49(10): 1185-1190.
 [18] 赵立新,郑立允,牛兰芹,等. TiAlN镀层硬质合金结构及性能研究[J]. 金属热处理, 2008, 33(7): 16-19.
 [19] 冯庆善,李荻. 管道外防护涂层抗划伤性能评估研究[J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(6): 267-271.