

电火花沉积/堆焊技术试验研究

王华仁

(东方电机股份有限公司, 四川 德阳 618000)

[摘要] 为了对不宜施焊的工程构件(如汽轮发电机转子)在加工、装配、运输及运行过程中出现的轧刀、加工超差、磕碰、磨损和拉毛等进行修复,对电火花沉积/堆焊工艺技术和沉积/堆焊层性能进行了试验研究,结果表明:电火花沉积/堆焊层与基体呈冶金结合,结合情况良好;对基体热输入小,热影响区很小且不会产生变形;选择合适的材料,可以使沉积/堆焊层与基体的性能基本接近。试验证明:电火花沉积/堆焊技术可以达到对上述缺陷进行修复的目的。

[关键词] 电火花沉积/堆焊技术;沉积层性能;沉积/堆焊工艺;应用

[中图分类号] TG455

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2007)01-0035-04

Experimental Research of the Electric Spark Deposition/Overlying Welding Technology

WANG Hua-ren

(DEC Dongfang Electrical Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China)

[Abstract] In order to repair the engineering components (such as the generator rotor), that is not suitable welding and is dug, size exceeded, bumped, wear and harmed in the machining, mounting, transporting and running, the electric spark deposition/overlying welding technology and the performance of the deposition coating are studied. The result shows that the electric spark deposition is metallurgy combined to the substance; The hot affect zone is very small, and no distortion; If select the right material, it can obtain the deposition coating performance approximated to the substance. The examination shows that the electric spark deposition/overlying welding technology is adapt to repair the disfigurements described above.

[Key words] Electric spark deposition/overlying welding technology; Performance of deposition coating; Deposition/overlying welding technique; Applications

0 引言

电火花沉积/堆焊具有热输入小,对工件造成的热影响区和变形极小、与基体呈冶金结合、结合强度高等特点,因此,此技术成为表面工程中一个飞速发展的新技术,正在和将在精密模具的制造与修复、精度要求较高的机械零部件的尺寸恢复、超薄结构的微连接与补焊、精密成型等领域获得广泛的应用。

转子轴颈在加工时扎刀、尺寸超差或在装配时碰伤的情况在我公司时有发生。在此之前,出现此类问题时,不是将轴颈加工小并照配轴瓦,就是对其进行简单修整后带伤交货,为此,时常与用户发生冲突,给公司形象造成不利影响,还直接影响到公司的经济效益。已经在电厂运行中的汽轮转子也有因磨损拉伤而影响正常运行的情况发生,电厂一般采用将轴颈加工小并新配轴瓦的办法,或请其他单位对其进行修复。例如,我公司为

伊朗 Arak 电厂生产的 325MW 汽轮发电机转子密封瓦轴颈处,因为某些原因在使用过程中出现磨损拉伤沟槽,影响密封效果并直接影响到电厂的安全运行,经过公司的临时处理方案处理后,机组恢复并达到了使用要求,但电厂方仍然要求我公司进行永久性修复或换新转子;我公司生产的 13-106-2 交变变频电机轴表面有大量分散缺陷,包括麻点、磕碰、划伤、压痕等,其中有一条约长 50mm × 宽 5mm × 深 0.6mm 的压痕,影响了产品外观质量。而这类转子的技术规范又严禁施焊,为此,我们提出了对电火花沉积/堆焊技术进行试验研究的课题,以使我公司能掌握该技术,为解决我公司在生产中出现的问题和为用户服务找到一条较好的途径。

1 电火花沉积/堆焊技术简介

1.1 电火花沉积/堆焊技术原理

电火花沉积/堆焊是利用旋转电极与工件基体之间产生瞬间高能量脉冲放电的原理(最大脉冲放电频率 2000Hz),在电极与工件“相对最近点”产生电火花,在非常小的放电区域内,瞬间($\mu\text{s} \sim \text{ms}$ 数量级)流过的电流很大,其电流密度高达 $10^5 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$,这种在时间和空间上的高度集中放电,将产生大量

[收稿日期] 2006-09-04

[作者简介] 王华仁(1960-),男,四川苍溪人,高级工程师,学士,主要从事热喷涂、脉冲焊、电火花沉积/堆焊等表面工程技术的试验研究和工程应用。

的热能,使电极和工件上极微小的放电点处的金属熔化并具有爆炸性,该过程产生的动能使熔化的金属离开电极表面并沉积到工件表面,与工件表面微小熔化区的金属实现冶金结合。

电火花沉积/堆焊属于电火花特种加工领域。传统的电火花加工技术主要是电火花成型、电火花切割(线切割)、电火花雕刻、电火花磨削等,这些工艺都是利用电火花放电对工件材料的烧蚀去除功能来实现加工目的的,而电火花沉积/堆焊则是在利用电火花放电过程蚀除电极材料的同时,又把蚀除掉的电极上的熔融金属沉积并堆焊到工件表面的适当位置(如沟槽、凹坑等),从而实现对工件表面的修复或强化。由于电火花沉积/堆焊时的高能量密度使基体表面产生快速微小的熔化,而冷态的基体又使该熔化区快速冷却,因而产生电火花强化的效果;又由于电火花沉积/堆焊时使用 Ar 气保护,在电火花放电时,极间电压使 Ar 气电离击穿并形成微小的电弧,又使沉积/堆焊层有脉冲氩弧焊的效果,从而与基体金属形成结合强度很高的冶金结合层。

1.2 电火花沉积/堆焊技术特点

1) 由于电火花沉积/堆焊使用的能量密度很高,且在时间和空间上高度集中,所以,电火花沉积/堆焊技术对基体的热输入非常集中,热量在基体中的传导和扩散范围极小,基材的组织性能发生变化的热影响区很小,几乎没有热应力和变形,克服了焊接工艺在这方面存在的缺点。

2) 由于电极与基体的同时熔化,使其形成的沉积/堆焊层与基体呈冶金结合,结合强度高,这又继承了焊接工艺在这方面的优点。

3) 由于电火花沉积/堆焊时是快速熔化和快速冷却,对工件具有表面淬火的电火花强化效果。

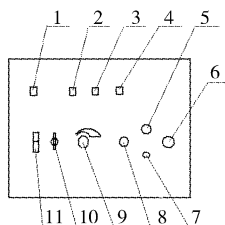
4) 由于电火花沉积/堆焊时的瞬间温度很高,故可以制造高熔点金属(如 Ti、W、WC 等)的复合强化层。

5) 由于电火花沉积/堆焊只有显微熔化,没有传统熔化焊时出现的宏观熔池,因而沉积层不可避免地存在显微气孔,这对沉积层的性能没有明显的影响,在油润滑的轴颈还有承油的效果,对润滑有利。

1.3 电火花沉积/堆焊设备

1.3.1 电火花沉积/堆焊设备简图

电火花沉积/堆焊设备面板和沉积/堆焊枪的简图分别如图 1 和图 2 所示。

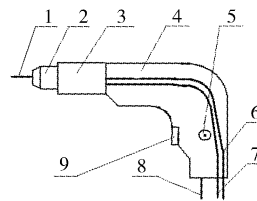


1. 复位开关;2、3、4. 输出功率档位开关;5. 遥控器插口;6. 沉积/堆焊枪输出接口(正);7. 保护气出口;8. 输出负极;9. 输出脉冲频率调节旋钮;10. 输出功率高低档位开关;11. 电源开关

图 1 电火花沉积/堆焊设备面板简图

Figure 1 Facelate diagram of the electrical spark deposition/overlying welding equipment

进行电火花沉积/堆焊操作时,输出地线(负极)夹子夹在



1. 电极;2. 保护气冒;3. 绝缘枪柄;4. 电机;5. 开关自锁按钮(按下,电机连续旋转;松开,电机停止旋转);6. 保护气输入管;7. 沉积/堆焊正极电源输入线;8. 电机电源输入线;9. 电机开关

图 2 沉积/堆焊枪简图

Figure 2 Deposition/overlying welding torch diagram

欲处理的工件上,输出正极为旋转电极(夹于手持式电机),并通以氩气保护。

1.3.2 电火花沉积/堆焊设备主要技术参数

该设备的主要技术参数为:输入电源为 AC、220V、50Hz,输入电流为 15A,最大输出功率为 2000W,脉冲频率为 50 ~ 2000Hz。

1.4 电火花沉积/堆焊设备的操作

1.4.1 设备安装及调试

1) 将电源输入插头、沉积/堆焊枪连接插头、地线插头和保护气输入输出插头分别连接到机箱上的相关插座及接头上;

2) 将氩气流量计装到氩气瓶上,用软管连接氩气流量计出口与机箱保护气输入接口。打开氩气瓶,检查是否漏气;

3) 用 15A 三孔插头、插座,接上 220V、50Hz 输入电源;

4) 将地线夹夹在工件上;

5) 合上电闸,打开机箱电源开关(此时,电源指示灯亮,机箱内冷却风扇运转);

6) 手持旋转电机,按下枪柄扳机,检查电极是否旋转正常,保护气是否畅通;

7) 在旋转时用电极轻触工件表面,检查火花是否正常。

1.4.2 设备操作

1) 用丙酮等洗净工件(或试样)表面的油污,用油石、砂纸等去除工件(或试样)表面的氧化皮及铁锈;

2) 将地线夹子夹在工件(或试样)上;

3) 选择种类及规格合适的电极材料,并夹紧、夹正在枪头上(若电极偏心,应调整夹头使电极尽量处在中心位置);

4) 根据电极规格和沉积修补区大小,调整好输出功率和输出频率;

5) 打开保护气并调整好流量;

6) 按下手持电机上的开关扳机,并按下开关自锁按钮;

7) 使电极轻轻地在工件(或试样)表面按一定方向移动,形成连续沉积/堆焊层(注意:若电极压在表面过紧,将使电极与工件短接而无火花,无法实现沉积/堆焊),电极与工件表面呈 30°~40°角度,左右摆动,摆幅为 10~40mm,摆动速度以沉积层能均匀覆盖工件表面为宜。

沉积过程中,若有未沉积表面或出现凹坑,应对其进行补沉积。对沉积层的高点,可用锉修或锤击的方式消除。

在进行电火花沉积/堆焊时,电极以保持暗红为佳,此时,火花较多,沉积/堆焊层呈现明亮的金属光泽。若呈黄色(约 600℃),应调低输出功率,或使用间断沉积方式,以防止电极氧化。

在进行电火花沉积/堆焊时,一般应先用较小的功率,再逐步增大到规定的功率,这样可以使沉积底层更加致密并与基体结合牢固。

2 工艺试验

2.1 试样及材料选择

试样基材为 25Cr2Ni4MoV, 试样尺寸为 10mm × 10mm × 27.5mm 的方形试样块(这些试样均为汽发转子材料性能试验中使用过的冲击试样)。基体材料的成分和性能分别见表 1 和表 2。电火花沉积/堆焊试验用焊条材料见表 3 所示。

表 1 25Cr2Ni4MoV(汽发转子锻件)的化学成分

Table 1 Chemical composition of the 25Cr2Ni4MoV

元素	C	Cr	Ni	Mo	V
质量分数/%	≤0.25	1.5~2.0	3.25~4.0	0.2~0.5	0.05~0.13
元素	P	S	Si	Mn	Fe
质量分数/%	≤0.015	≤0.018	0.15~0.35	0.15~0.35	余量

表 2 25Cr2Ni4MoV(汽发转子锻件)技术条件

Table 2 Technical conditions of the 25Cr2Ni4MoV

性能指标	轴向试样	切向试样	径向试样	中心孔轴向
强度极限 σ_b /MPa	≥735	≥735	≥735	≥735
屈服极限 $\sigma_{0.2}$ /MPa	650~755	650~755	650~755	605~755
延伸率 δ_5 /%	≥17	≥17	≥17	≥16
断面收缩率 Ψ /%	≥50	≥50	≥50	≥45
冲击能量 A_{KV} /J	≥88			
疲劳极限 σ^{-1} /MPa		≥295		
脆性转变温度 (FATT ₅₀)/℃			≤-23	≤-18

表 3 电火花沉积/堆焊试样及沉积/堆焊用材料

Table 3 Samples and material of the electric spark deposition/overlying welding

试样编号	主要成分	材料牌号	规格/mm	沉积层厚度/mm	硬度 HRC
1	Ni、Cr、Fe	DH-22	φ3.2	1	20~30
2	Ni、Cr、Fe	DH-24	φ3.2	1	20 左右
3	Ni、Cr、Fe	DH-40	φ4.0	1	40~45
4	Ni、Cr、Fe	DH-50	φ4.0	1	45~50
5	Ni、Cr、Fe	DH-60	φ4.8	1	58~64
6	Co 基合金	DH-21	φ4.0	1	25~35
7	Co 基合金	DH-06	φ4.0	1	40~45
8	Ni、Cr、Fe	DH-22	φ3.2	1	20~30

2.2 表面预处理

如果试样(或工件)表面有油污,可用金属油污清洗剂对试样表面的油污进行清洗(如果表面没有油污,该步骤可以省略);用细锉轻轻锉去试样表面氧化层;用细砂纸轻轻砂磨试样表面,使其露出新鲜洁净的金属表面;用丙酮最后清洗试样和焊条表面的油脂。

2.3 试样制备

按 1.4 所述的操作步骤和方法,在试样基体上分别用不同材质和规格的焊条(见表 3 所列)逐层沉积/堆焊,使补层厚度达到

约 1mm 左右,然后用线切割将试样从中间剖开,根据金相试验方法将其抛磨成金相分析和硬度试验用试样。对通过硬度试验初步选定下来的沉积材料 DH-22 还制备了用于 X 射线衍射分析(XRD)、扫描电子显微镜分析(SEM)及 EDAX 分析的试样。

3 试验结果及分析讨论

3.1 金相试验

分别对不同规格、不同材质的焊条的沉积/堆焊层进行了金相试验,同时对同一个试样上进行了多个断面的金相检测。结果见图 3、图 4 和图 5,从中可以看出,用 DH-22、DH-24 和 DH-21 焊条所沉积的焊层与基体结合很好,呈冶金结合状态,焊层组织呈层状结构,焊层中有少量的显微气孔和微裂纹。用 DH-40、DH-50、DH-60 和 DH-06 焊条所沉积的焊层与基体结合仍然很好,也表现为冶金结合状态,焊层组织仍呈层状结构,但焊层中有较多显微气孔和微裂纹,这是因为它们的硬度较高因而韧性较差,使得在沉积/堆焊时的快速熔化和快速冷却过程中形成了显微气孔和微裂纹。

对不同断面进行金相分析表明:由于沉积/堆焊是逐层进行的,所以,在各个截面上表现出了一定的差别。

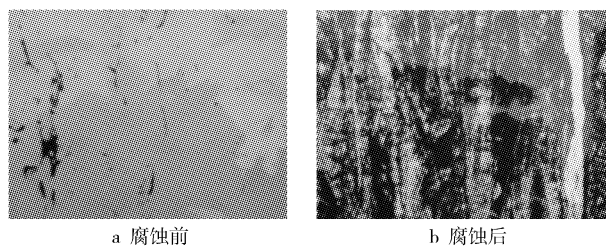


图 3 25Cr2Ni4MoV + DH-22 沉积/堆焊层金相照片 100 ×
Figure 3 DH-22 deposition on substance of 25Cr2Ni4MoV before and after erode

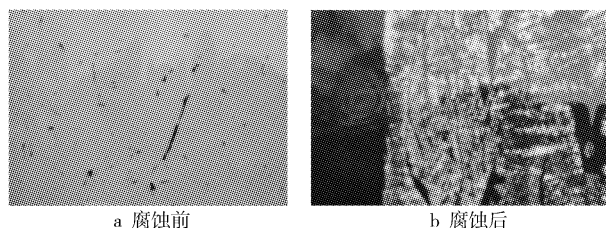


图 4 25Cr2Ni4MoV + DH-24 沉积/堆焊层金相照片 100 ×
Figure 4 DH-24 deposition on substance of 25Cr2Ni4MoV before and after erode

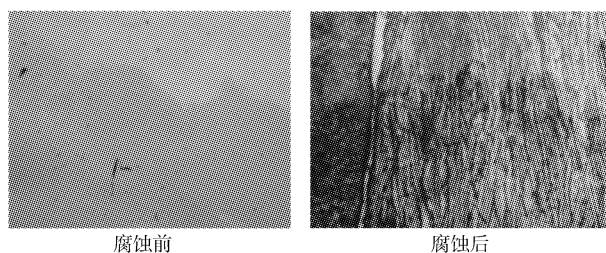


图 5 25Cr2Ni4MoV + DH-21 沉积/堆焊层金相照片 100 ×
Figure 5 DH-21 deposition on substance of 25Cr2Ni4MoV before and after erode

3.2 显微硬度试验

对各种沉积/堆焊层进行了显微硬度测试,还对初步选定的 DH-22 材料的沉积层进行了宏观硬度试验。从试验结果可以看出,基体硬度约在 HV206 ~ HV276 之间,热影响区(0.04mm 内)则在 HV220 ~ HV338 之间,即热影响区的硬度比基体的硬度略有升高。这是由于在沉积/堆焊时,基体表面快速熔化后快速冷却,产生了自淬硬现象。沉积/堆焊层的硬度与所使用的材料有关:DH-22 在 HV240 ~ HV312 之间;DH-24 在 HV122 ~ HV220 之间;DH-21 在 HV338 ~ HV449 之间;DH-40 在 HV411 ~ HV510 之间;DH-50 在 HV411 ~ HV606 之间;DH-60 在 HV388 ~ HV606 之间;DH-06 在 HV411 ~ HV564 之间。由于堆焊材料是以熔化状态沉积/堆焊到基体表面上的,而焊条表面熔化的材料很少,在其冷凝时自淬硬现象使沉积/堆焊层也产生淬硬效果,故使其硬度比焊前高。显微硬度结果表明,与基体硬度比较接近的沉积/堆焊材料有 DH-22, DH-21 的硬度略高于基体硬度,而 DH-24 的硬度则略低于基体硬度。对于修复像汽发轴颈类的缺陷时,可以选择 DH-22;在要求硬度较低的地方可以选用 DH-24;在要求硬度较高的场合则可选用 DH-21;若对硬度要求更高的耐磨工件,还可选用 DH-40、DH-50 甚至 DH-60。

3.3 电镜及 X-射线衍射分析

针对通过硬度试验初步选定下来的沉积材料(DH-22)所做的沉积/堆焊层试样,用 D/max-1400 X-射线衍射仪(XRD)进行了 X-射线衍射分析,用 Amray1845FE 扫描电子显微镜(SEM)观察分析了截面形貌,用 EDAX 分析技术分析了各区的成分,还用显微硬度仪测定了各区的显微硬度(HV)。结果见图 6、图 7、图 8 和图 9。

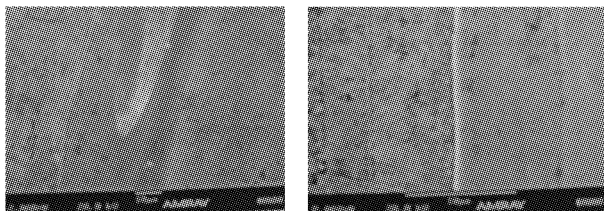


图 6 25Cr2Ni4MoV + DH-22 沉积/堆焊层扫描电子显微形貌 8000 ×
Figure 6 SEM image of DH-22 deposited coating

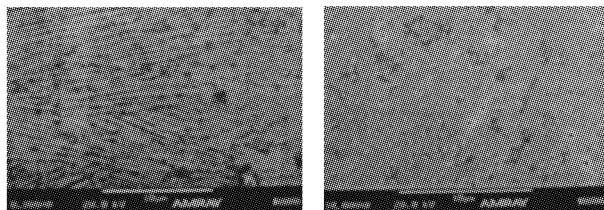


图 7 25Cr2Ni4MoV + DH-22 沉积/堆焊层和基体扫描电子显微形貌 8000 ×
Figure 7 SEM image of DH-22 deposited coating and 25Cr2Ni4MoV substance

从中可以看出,沉积/堆焊层中有缩孔等缺陷,这是因为沉积/堆焊时只有显微熔化,没有形成传统熔化焊中出现的宏观熔池,虽然与基体的结合可以达到冶金结合的效果,但沉积层中没有宏观的熔化和凝固过程,所以,沉积层中存在微小的缩孔等缺陷。

经过刻蚀后可以看出:基体仍然为索氏体组织,其化学成分仍然为原来基体的合金钢成分;沉积/堆焊层呈现出层状组织的特征,其化学成分为所使用的焊条的成分。也就是说,电火花沉

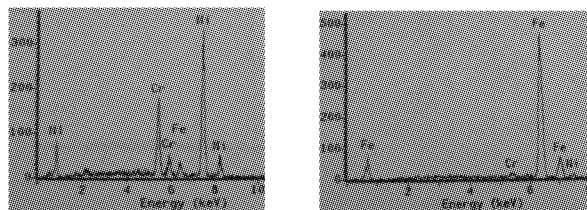


图 8 25Cr2Ni4MoV + DH-22 沉积/堆焊层和基体 X-射线衍射谱
Figure 8 XRD patterns of DH-22 deposited coating and 25Cr2Ni4MoV substance

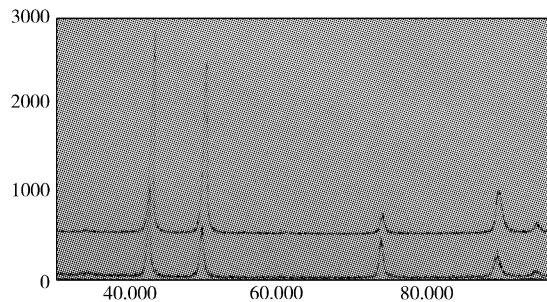


图 9 DH-22 焊材在沉积/堆焊前后的 X-射线衍射谱

Figure 9 XRD patterns of DH-22 before and after deposited

积/堆焊时,基体和焊层的成分没有发生任何改变,没有熔化焊中常见的冲淡现象。

通过对焊条和试样中焊层的 X-射线衍射(XRD)分析,发现焊条和试样中焊层的主要组织为 FeCrNi 相($\text{Ni}_{2.9}\text{Cr}_{0.7}\text{Fe}_{0.36}$),面心立方结构,说明焊条经过电火花沉积/堆焊后的组织仍然是具有面心立方结构的奥氏体。

显微硬度测试发现,试样中焊层、熔合区和基体的显微硬度分别为 HV305、HV314、HV246,电火花沉积/堆焊层的显微硬度比基体的显微硬度略高。

4 交变频电机轴上缺陷修复

我公司生产的交变频电机轴表面有大量分散缺陷,包括麻点、磕碰、划伤、压痕等,其中有一条约 50mm × 5mm × 0.6mm (长 × 宽 × 深) 的压痕(见图 10),严重影响产品外观质量。根据贺总 2004 年 4 月 13 日组织的专家组对该缺陷进行的评审决定,我们用电火花沉积/堆焊工艺对其进行了修复(见图 11),对电火花沉积/堆焊技术的实用性进行了实际检验,证明该技术对修复这些缺陷是十分有效的。



图 10 交变频电机轴上缺陷之一
Figure 10 One of faults of frequency motor axis



图 11 用电火花沉积/堆焊技术修复电机轴上缺陷
Figure 11 Fault repairing of motor axis by electric spark deposition overlying welding

(下转第 50 页)

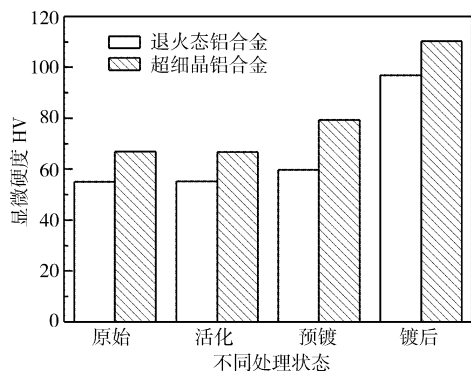


图4 退火态铝合金和超细晶铝合金不同处理状态的显微硬度
(活化处理 30s, 预镀处理 4min, 施镀 2h)

Figure 4 Microhardness of Al alloy in the different states of electroless plating(activation treatment 30s; preplating treatment 4 min; plating 2h)

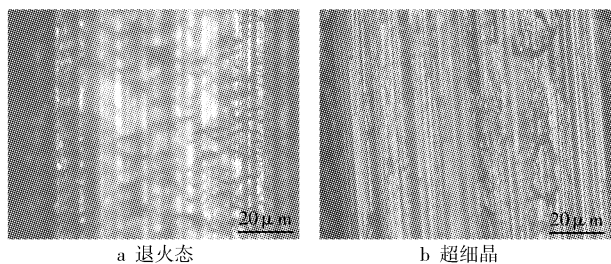


图5 铝合金化学镀镍后镀层划痕处的形貌

Figure 5 Micrographs in the vicinity of scratched Ni layers
by electroless plating on Al alloy

镀层的孔隙率是一个很重要的质量指标,孔隙率越低,耐蚀性越好。退火态铝合金和超细晶铝合金经同样工艺施镀后,镀层的孔隙率见表1。由此可见,超细晶铝合金作为基体时,镀层的耐蚀性较好。同时也进一步说明超细晶铝合金作为基体时,获得的镀层更致密。

表1 不同基体镀层的孔隙率

Table 1 Porosity of electroless Ni plating layer on Al alloy

材料	孔隙率/(个·cm ⁻²)
退火态铝合金	17
超细晶铝合金	9

2.3.2 耐浓硝酸变色

相同施镀工艺条件下,不同基体的镀层在 65% ~ 68% 的浓硝酸中,镀层镀态的变色时间见表2。超细晶铝合金材料作为基体时,镀层的变色时间较长一些,镀层具有更高的耐蚀性。虽然浓硝酸变色试验测定镀层耐蚀性是非标准的方法,只能经验地比较镀层的耐蚀性,但其结果与盐雾试验结果有相当的可比性^[13]。

(上接第 38 页)

5 结 论

从试验结果可以得出如下结论:

表2 不同基体镀层的浓硝酸变色时间

Table 2 Discoloured time of electroless Ni plating layer in HNO₃

材料	变色时间/s
退火态铝合金	6
超细晶铝合金	10

3 结 论

1) 在超细晶铝合金材料上比在退火态铝合金上更容易实现化学镀镍。

2) 与退火态铝合金相比,在超细晶铝合金上获得的化学镀镍层更均匀、致密,且结合力较好。

3) 超细晶铝合金镀层的硬度和耐蚀性都优于退火态铝合金镀层。超细晶铝合金镀层的孔隙率为 9 个/cm²,耐浓硝酸变色时间为 10s,而退火态铝合金镀层的孔隙率和耐浓硝酸变色时间则分别为 17 个/cm² 和 6s。

[参 考 文 献]

- [1] 冯立明,王月,王玉景. 6063 铝合金化学镀 Ni-P 合金工艺研究[J]. 腐蚀与防护,2005,26(2):69-71
- [2] 康忠明,彭秋波,代明江,等. 铝合金化学镀 Ni-P-B 的研究[J]. 电镀与涂饰,2005,24(2):11-14
- [3] 尹国光,潘小芳,陈延民. 铝合金化学镀镍工艺研究[J]. 材料保护,2004,31(1):30-32
- [4] 王玲. 铝合金化学镀 Ni-P 前处理工艺[J]. 电镀与涂饰. 1996,15(2):21-22
- [5] 于光. 铝合金化学镀镍[J]. 材料保护,1995,28(9):16-17
- [6] 陈西府,潘红良. 基体表面状况对化学镀 Ni-P 镀层性能的影响[J]. 电镀与环保,2003,23(2):37-39
- [7] Valiev R Z, Isamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation [J]. Prog. Mater. Sci., 2000, 45(2): 103-189
- [8] 殷遇春,许慧. 铝及铝合金制件化学镀镍工艺实践[J]. 江苏冶金, 1995,2:18-19
- [9] 刘波,李明. 铝合金化学镀镍的预处理研究[J]. 电镀与环保, 2001,21(6):14-15
- [10] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004. 278-279
- [11] GB 5933-86,轻工产品金属镀层的结合强度测试方法[S].
- [12] 于媛,范晓艳,戴晓敏,等. 铝合金基体上化学镀 Ni-P 合金层组织结构的研究[J]. 大连大学学报,1998,19(2):26-29
- [13] 姜晓霞,沈伟. 化学镀理论及实践[M]. 北京:国防工业出版社, 2000. 225-226

1) 电火花沉积/堆焊层与基体呈冶金结合,结合情况良好。

2) 电火花沉积/堆焊对基体热输入很小,几乎没有热影响区,更不会产生变形。

3) 选择合适的材料,可以使沉积/堆焊层的硬度等性能与基体基本接近。