

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.03.12

空间滑动电接触 Au 镀层硬度测试方法研究

王永松¹, 沙春生¹, 范军², 陆大光², 宋涛², 金晶¹

(1. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245; 2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

摘要: 为了获取一种准确有效的 Au 镀层显微硬度测试方法以满足航天领域的应用需求, 本文采用显微维氏硬度法及纳米压痕硬度法研究了 Au 镀层在不同测试方法及不同测试载荷下的显微硬度值及其标准方差, 并依据相关检测技术标准的要求, 就检测方法的可行性进行了分析。结果表明: 本文优选的 Au 镀层显微维氏硬度检测参数及测试数据的判定范围满足标准 QJ482, 同时还能满足压痕深度小于镀层厚度的 1/7, 避免了基体对测试结果的影响, 测试方法可行, 测试数据有效。

关键词: Au 镀层; 显微维氏硬度; 纳米压痕硬度; 可行性分析

中图分类号: TB938.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)03-0065-04

Study on Au Coating Micro-hardness Tests Based on Space Sliding Electrical Contact

WANG Yongsong¹, SHA Chunsheng¹, FAN Jun², LU Daguang², SONG Tao², JIN Jing¹

(1. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer co. Ltd, Shanghai 200245, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 200245, China)

Abstract: In order to find a precise and effective method to characterize the micro-hardness of Au coating to meet the demands for space applications, the micro Vickers hardness test method and Nano-indentation test hardness method were selected under different test methods and different load conditions. According to the requirements of the relevant technical standards, the feasibility of the test method is analyzed. The results show that the optimized micro Vickers hardness test parameters and results meet the requirements of standard QJ482. The depth of indentation is less than 1/7 of the thickness of the Au coating, so that the impact of matrix material on hardness test results is avoided. The test method is feasible and the results are valid.

Key words: Au coating; micro Vickers hardness; Nano-indentation hardness; feasibility analysis

0 引言

导电滑环是通过电刷与导电环之间的滑动电接触实现空间相对旋转运动部件间的功率和电信号传输的部件。长寿命导电滑环是太阳帆板驱动机构、微波成像仪、微波辐射计、大气红外探测仪、地球辐射能量仪、扫描辐射计等机械扫描遥感仪器的关键部件, 直接影响到此类设备有效载荷的性能甚至整个科研任务的成败。Au 镀层以其优异的性能: 低摩擦、低磨损率、低接触电阻、低电噪声及良好的空间环境适应性, 被作为理想的空间滑动电接触材料, 广泛应用于各类卫星驱动机构用导电滑环的环体表面, 以改善滑环的电接触性能和耐磨损性能, 提高卫星的在轨寿命和可靠性^[1-2]。

某型号卫星导电滑环采用以镀 Au 盘片和贵金属合金触头为摩擦副体系的设计, 在研制过程中, Au 镀层的显微硬度以及 Au 镀层与对磨触头材料的硬度匹配性

对滑环电信号的稳定性以及整体磨损寿命有着重要的影响, 因此 Au 镀层的显微硬度值被选定为滑环产品验收的关键技术指标之一。然而 Au 镀层的显微硬度值与测试方法及测试载荷密切相关, 型号研制过程中就曾发生因 Au 镀显微硬度测试方法的差异而引起 Au 镀层真实硬度值偏离设计要求, 产品真空跑合试验结果超差, 单机报废的案例, 造成了重大损失。因此有必要对 Au 镀层显微硬度的测试方法及测试载荷进行研究, 以获得一种稳定可靠的测试方法来规避产品生产风险。

1 试验设备及方法

1.1 测试设备

试验选用某型号用导电滑环镀 Au 盘片, 盘片由绝缘基材和上面相互绝缘的导电铜环等组成, 铜环表面依次镀覆 Ni 层和 Au 层, 其中 Au 层厚度为 7~10 μm, 表面粗糙度优于 Ra0.3。根据产品的结构特征, 试验

确定选用显微维氏硬度和纳米压痕硬度两种方法进行检测，其中，显微维氏硬度测试采用 FM-800 显微维氏硬度计，加载载荷为 1~2000 gf (9.8 mN~19.6 N)；纳米压痕硬度采用 UMT-2 型多功能材料力学测试系统，加载载荷为 0~500 mN，测试设备如图 1 所示。



(a) FM-800显微维氏硬度计 (b) UMT-2型多功能材料力学测试系统

图 1 试验选用的显微硬度测试设备

1.2 测试方法

镀层的显微硬度值受测试方法和测试载荷的影响很大，当涂层较薄时，为了避免基体对测试结果的影响，应尽量减小压头压入的深度。一般认为，压入深度必须小于涂层薄膜厚度的 1/7~1/10^[3]，因此必须采用小载荷压入。如图 2 所示，试验采用截面法和表面法测试 Au 镀层显微硬度，研究镀层在 2, 5, 25 gf 三种载荷条件下显微维氏硬度和纳米压痕硬度的变化规律。

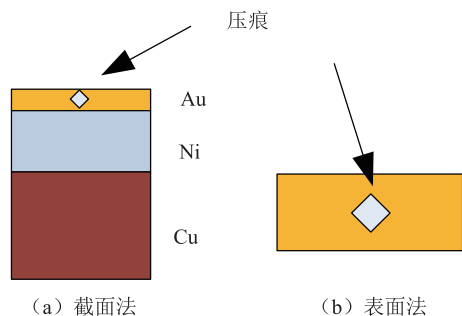


图 2 Au 镀层硬度检测截面法和表面法示意图

2 结果与讨论

2.1 显微维氏硬度试验

采用 FM-800 显微维氏硬度计对盘片 Au 镀层的表面和截面进行测量，测量载荷分别选择 2, 5, 25 gf，保载时间为 30 s。由于 Au 镀层的硬度值范围为 HV140~HV220，当采用 25 gf 载荷时，其压痕对应的对角线长度将达到 18 μm 左右，压痕范围将超出 Au 镀层区域 (7~10 μm)，会导致检测结果不准确，因此 25 gf 载荷下只进行了表面法检测。

图 3 为盘片 Au 镀层在不同测试载荷及测试方法下的显微维氏硬度值比较，可以看出不同测试方法和测试载荷对 Au 镀层的显微硬度有着明显的影响，2 gf 载荷表面法检测获得最高显微硬度 HV211.7，25 gf 表面法检测获得最低显微硬度 HV172.3。表 1 为不同测试载荷及测试方法的显微维氏硬度平均值及标准方差，可以看出随着载荷的增加，Au 镀层的平均硬度值由 2 gf 载荷的 HV204.6 降低到 25 gf 载荷的 HV177.3，试验结果符合显微硬度值随测试负载的减小而增大的一般规律^[4]。在相同的小载荷下 (2, 5 gf)，采用表面法和截面法测得的 Au 镀层显微硬度值基本一致，偏差不超过 5%，但是从实用性和可操作性角度考虑，表面法检测优势明显。

从表 1 可以看出硬度值标准方差随着载荷的增加先减小后增大，其中 5 gf 载荷表面法具有最小的标准方差值，表明在该测试条件下检测数据离散度最小，数据可信度高。这主要是由于当采用小载荷测量时，压痕对角线长度较小，难以准确测量，增加了硬度测量的不确定度，当采用大载荷时，其压痕深度往往会超过镀层厚度的 1/7，测试值受 Ni 镀层和 Cu 基体变形的影响较大，难以获取镀层的真实硬度值。

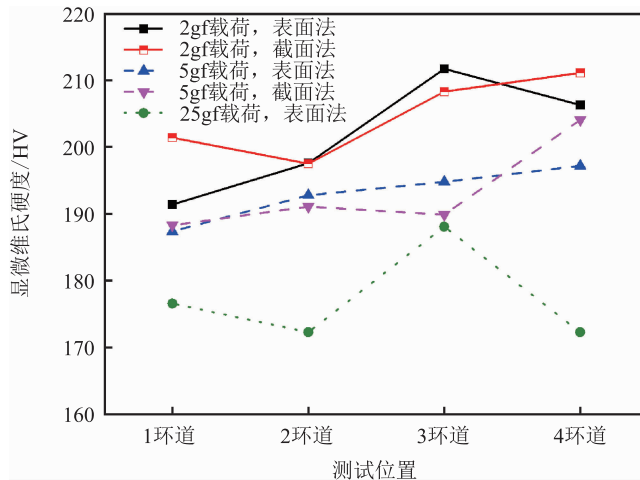


图 3 不同测试载荷及测试方法显微维氏硬度值比较

表 1 不同测试载荷及测试方法显微维氏硬度平均值及标准方差

测试项目	平均值/HV	标准方差
2 gf 表面法	201.8	8.5
2 gf 截面法	204.6	5.4
5 gf 表面法	193.1	3.6
5 gf 截面法	193.4	6.3
25 gf 表面法	177.3	6.5

2.2 纳米压痕硬度

图4为盘片Au镀层在不同测试载荷及测试方法下的纳米压入硬度值比较,可以看出2gf载荷截面法检测获得最高纳米压入硬度HV279.4,25gf表面法检测获得最低纳米压入硬度HV226.8。表2为不同测试载荷及测试方法纳米压入硬度的平均值及标准方差,与显微维氏硬度类似,纳米压入硬度值随测试负载的减小而增大。与表1对比可以发现纳米压入硬度测试值相比显微维氏硬度测试值偏大30%左右,这主要是因为两种硬度检测原理存在较大差异,属于不同的硬度评价体系,难以进行定量评估分析。另一个比较明显的差别在于纳米压入硬度值与标准方差值都明显高于显微维氏硬度测试值,离散性较大,这主要是因为纳米压入硬度测试设备对测试环境(振动、水平等)、样品平整度及表面粗糙度要求严苛^[5-7],而盘片Au镀层在实际生产中受工艺条件限制难以做到很高准确度(实际生产表面粗糙度范围一般为Ra0.3~Ra0.1),故导致纳米压入硬度测试值的离散性较大。

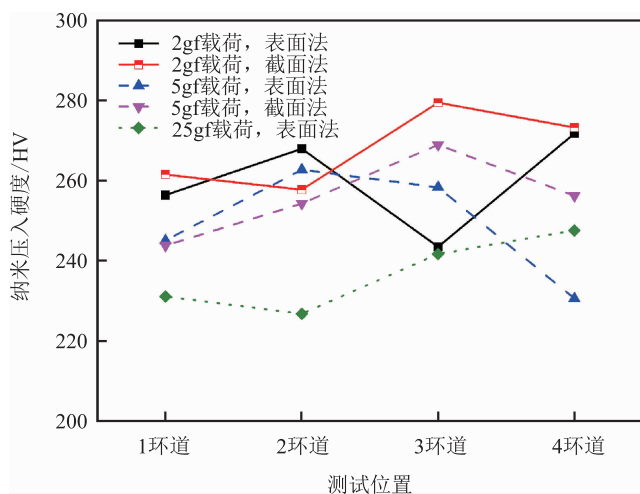


图4 不同测试载荷及测试方法纳米压入硬度值比较

表2 不同测试载荷及测试方法纳米压入平均值及标准方差

测试项目	平均值/HV	标准方差
2 gf 表面法	259.9	11.0
2 gf 截面法	268.0	8.7
5 gf 表面法	249.2	12.5
5 gf 截面法	255.8	8.9
25 gf 表面法	236.8	8.3

通过对表1和表2的对比分析可知,选用显微维氏硬度法,5gf载荷对Au镀层表面测试硬度的测试值标准方差最低,数据离散度最低。

2.3 显微维氏硬度测试方法可行性分析

测试方法是否符合相关标准要求是判定其可行性和测试数据准确性的重要依据,显微维氏硬度测试方法对标的主要标准有GB/T 4340.1《金属维氏硬度试验》和航天行业标准QJ482《金属镀覆层显微硬度测试方法》,对标的主要内容包括测试参数(载荷范围、保持时间)和测试结果是否在标准要求的判定范围(压痕对角线长度范围、压痕深度范围、膜层厚度对角线长度及压痕深度的要求等)。

根据盘片Au镀层的特性:厚度约为7~10μm、显微硬度一般为HV140~HV220、表面粗糙度Ra0.3~Ra0.1,计算在1~25gf小载荷条件下,采用显微维氏硬度法检测的压痕尺寸,获得的计算数据如表3所示。

表3 小载荷下显微维氏硬度值与压痕几何尺寸的换算关系

实验编号	载荷值	压痕对角线长度/μm	压痕深度/μm
1	1 gf 载荷	2.79 ~ 3.5	0.40 ~ 0.50
2	5 gf 载荷	6.25 ~ 7.83	0.89 ~ 1.12
3	10 gf 载荷	8.83 ~ 11.07	1.26 ~ 1.58
4	15 gf 载荷	10.82 ~ 13.56	1.55 ~ 1.94
5	20 gf 载荷	12.49 ~ 15.66	1.79 ~ 2.24
6	25 gf 载荷	13.97 ~ 17.51	2.00 ~ 2.50

注:硬度按照HV140~HV220范围折算。

由表3中数据可知,在1~25gf载荷下进行显微维氏硬度测试时,压痕对角线长度最大不超过18μm。而GB/T 4340.1《金属维氏硬度试验》第1部分:试验方法中规定,其仅适用于压痕对角线长度范围为0.020~1.400mm的硬度测试。若要使Au镀层(HV140~HV220)测试结果的范围满足GB/T 4340.1的适用范围,则载荷必须要超过30gf,此时压痕的深度将达3μm,超过了Au镀层厚度的3/10,基体对镀层的硬度已经造成干扰,硬度测试值偏离真实值,因此不适合用GB/T 4340.1对小载荷显微维氏硬度测试方法进行判定。

与GB/T 4340.1不同,航天行业标准QJ482未对加载载荷和压痕对角线长度的适用范围做规定,其约束条件侧重于压痕尺寸和镀层厚度的关系,具体适用要求为:当垂直于试样表面测试硬度值时,为了避免

基体金属对镀覆层硬度值测试的影响,试样镀覆层厚度应大于压头压痕对角线长度的 $1/7$ (即压痕深度值,可由压头几何形状尺寸换算得出),当在试样横截面上测试硬度值时,试样镀覆层厚度应大于压头压痕对角线长度的 3 倍。因此依据标准 QJ482, Au 镀层的厚度为 $7 \sim 10 \mu\text{m}$,若采用截面法测试,其压痕对角线范围应为 $2.33 \sim 3.33 \mu\text{m}$,对应载荷仅为 1 gf ,这样低的载荷必然增加测试结果的离散性;若采用表面法,其压痕深度必须小于镀层厚度,对应表 3 可知 25 gf 以下的载荷都能适用。

为了减少基体金属对试验测试结果的影响,获得更为准确的镀层硬度值,根据国内外相关文献的研究结果^[3],压痕深度应当小于镀层厚度的 $1/7 \sim 1/10$,已知 Au 镀层的厚度为 $7 \sim 10 \mu\text{m}$,即压痕深度必须小于 $1 \sim 1.42 \mu\text{m}$,对应表 3 数据可知, 5 gf 载荷的压痕深度区间基本上能够满足要求。

3 结论

对滑环镀 Au 层在不同测试方法及不同加载载荷下的显微硬度值及其标准方差进行了对比研究,实验结果证明显微维氏硬度测试值及其标准方差明显低于纳米压痕测试法。且由于滑环产品生产的工艺现状、平整度及表面粗糙度难以满足纳米压痕测试要求,因此采用显微维氏硬度测试法数据离散性更小、更为准确。

本文提出的采用显微维氏硬度对镀金层检测方法(采用表面法测试,加载载荷为 5 gf ,保载时间为 30 s)所获取的显微维氏硬度值为 $\text{HV}193.1$,对应的压痕深度约为 $0.95 \mu\text{m}$,Au 镀层的厚度为 $7 \sim 10 \mu\text{m}$,满足标准 QJ482 所要求的镀层厚度大于压头压痕对角线长度的 $1/7$,同时还能满足压痕深度小于镀层厚度的 $1/7$,避免了基体对测试结果的影响,测试方法可行、测试

数据有效,为贵金属镀层的硬度测试实验提供了参考与借鉴。

参 考 文 献

- [1] 王晓,李超.某星载滑环的可靠性设计与试验[J].电子机械工程,2009,25(5):28-30.
- [2] 李超.星载盘式滑环电刷材料的选择和试验[J].电子机械工程,2009,25(3):6-9.
- [3] Sun Y, Bell T, Zheng S. Finite Element Analysis of the Critical Ratio of Coating Thickness to Indentation Depth for Coating Property Measurements by Nanoindentation [J]. Thin Solid Films, 1995, 258: 198-204.
- [4] 秦芳.影响显微硬度测试值的几个主要问题[J].材料工程,1997(6):39-41.
- [5] 杨光,葛志宏.几种薄膜涂层硬度测试方法的比较[J].表面技术,2008,37(2):85-87.
- [6] 李清河,蔡珣,马峰,等.影响薄膜(涂层)硬度测试的因素[J].材料保护,2001,34(9):45-47.
- [7] 郝定武.“非均匀性”材料的硬度测试[J].计测技术,2010,30(1):43-45.

收稿日期:2019-01-12

基金项目:航天科技集团第三期重大工艺专项(ZDGY2016-15)

作 者 简 介



王永松(1968-),男,研究员,中国航天科技集团八院149厂副总工艺师,主要从事精密导电滑环研制工作。1999年起任中船集团第6354所研究室副主任、主任,2012年至今任149厂副工艺师。主持了神舟飞船、天宫实验室、导弹、机载吊舱、风云四号卫星等精密导电滑环的研制工作,

先后获中船集团科技进步二等奖、三等奖各1项,获国防科学技术三等奖1项。