

# 汽车零部件 - 铝合金轴瓦及表面涂层的产 品解析

## EPMA-019

**摘要：**轴承部件需具有耐磨、耐蚀、一定温度区间的热化学稳定性以及优良的润滑特性。某铝合金轴瓦经过表面涂层处理后，具有良好的无油自润滑性能，本文借助岛津仪器电子探针显微分析仪器 EPMA、能量色散 X 射线荧光光谱仪 EDX 和傅里叶变换红外光谱仪 FTIR，分析其基体和涂层信息，推断了其实现方案。

**关键词：**轴瓦 聚四氟乙烯 EPMA EDX FTIR

铝合金密度约为钢的三分之一，具有强度较高、易于加工成型、切削性和导热性好等优点，是汽车轻量化发展趋势下，日益广泛采用的轻质金属材料。现已应用于汽车发动机、变速器、铝轮毂、转向节及各种换热器等部位，而且随着铸锻焊、冲压等制造技术的发展，会有更多的部件采用铝合金制造。为了满足工况和设计要求，铝合金一般会经过表面处理，如阳极氧化、喷砂、

涂装等。

某铝合金轴瓦部件进行了表面涂层处理，具有良好的无油自润滑性，为了研究其实现方案，借助岛津电子探针显微分析仪（EPMA）、能量色散 X 射线荧光分析仪（EDX）、傅里叶变换红外光谱仪（FTIR）进行了综合分析。

## ■ 实验部分

### 1.1 仪器

岛津电子探针 EPMA-1720 电子探针显微分析仪 EDX-8000 能量色散型 X 射线荧光分析仪



岛津 IRTracer-100 傅里叶变换红外光谱仪



## 1.2 分析条件

EPMA:

加速电压: 15 kV

束流: 100 nA

测试时间: 6 min

EDX:

电压: 15/50 kV

氛围: 真空

积分时间: 100 s

FTIR:

波长范围: 4000~650  $\text{cm}^{-1}$

附件: ZnSe 晶体 ATR

分辨率: 4  $\text{cm}^{-1}$

扫描次数: 20

切趾函数: Happ-Genzel

## 1.3 样品处理

试样切割到合适尺寸后, 直接测试。

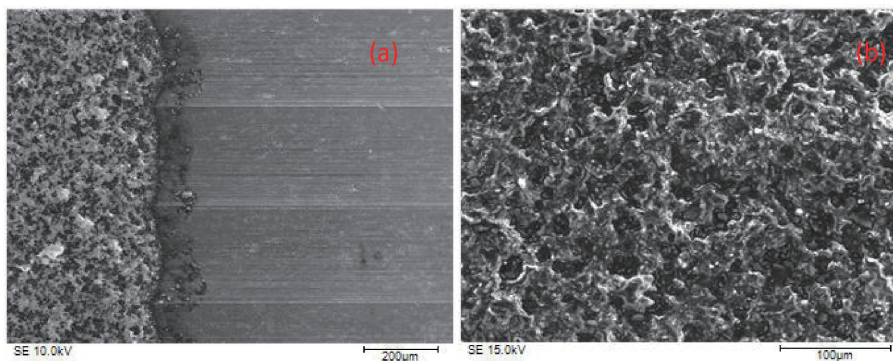
## ■ 结果与讨论

### 2.1 微区表面形貌特征观察

铝合金表面为黑色涂层, 见图 1。使用 EPMA 观察表面微区形貌特征, 结果见图 2。图 2.a 左侧为涂层, 右侧为未涂装的基体部分, 图 2.b 为涂装区域局部二次电子形貌 (SEI)。图 2.c 和图 2.d 为基体部分放大后显示的 SEI 和背散射电子像 (BEI) 特征。可见基体为铝合金, 存在多种元素分布。图 2.e 和图 2.f 为涂层区域放大后显示的 SEI 和 BEI, 表面有一定的粗糙度, 以及涂层中颗粒分布特征情况。



图1 待测试样整体形貌



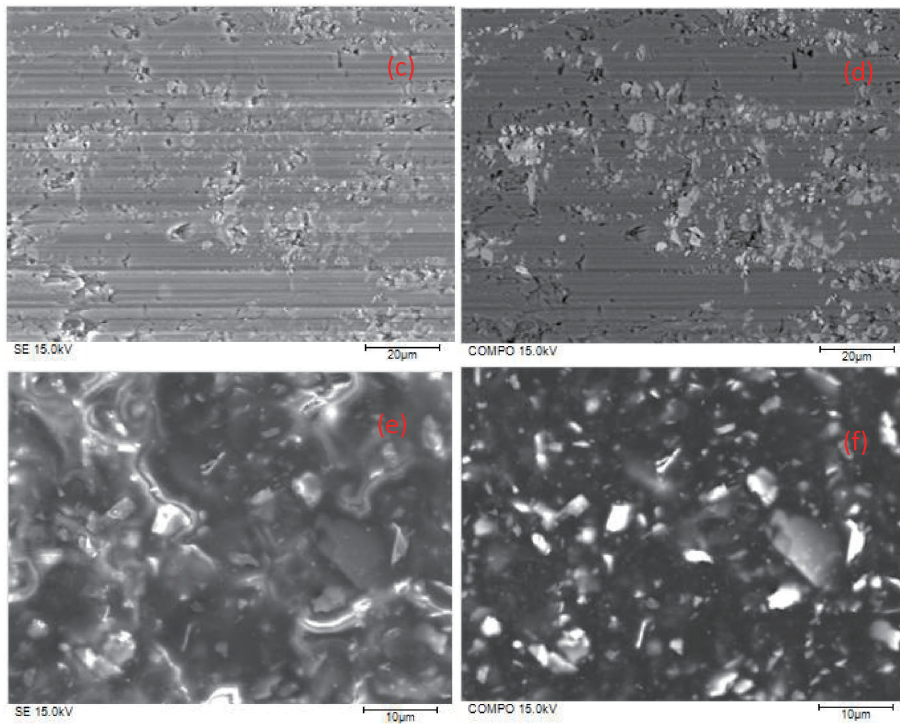


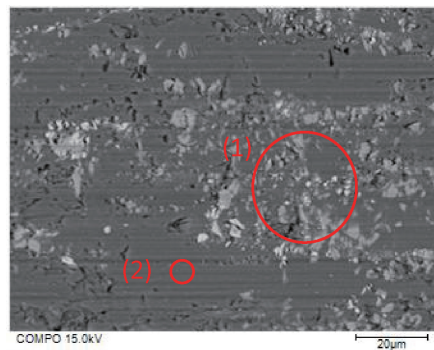
图2 轴瓦表面形貌特征

## 2.2 化学成分析

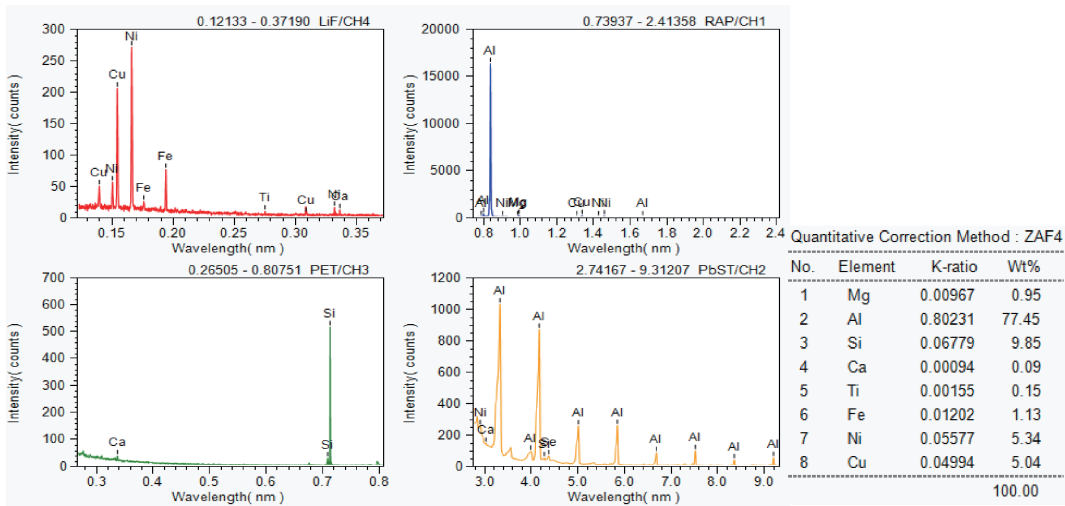
### 2.2.1 基体成分分析

#### 2.2.2 EPMA 的分析

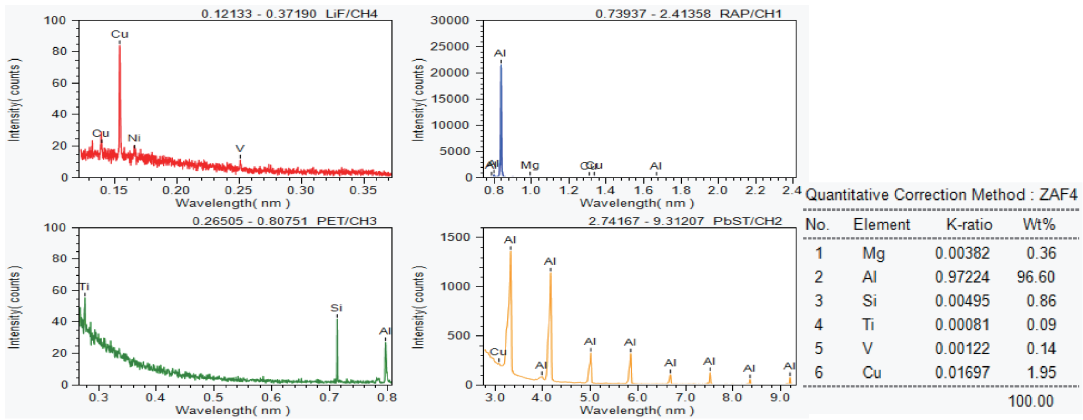
使用 EPMA 选中两个特征区域进行测试，其测试的位置示意图见图 3.a，测试结果及谱图见图 3.b 和图 3.c。位置 1 主要为合金元素析出集中部位，而位置 2 为基体主成分相，合金元素主要以固溶体的形式存在。



a.定性分析位置



b. 位置1定性分析谱图及结果



c. 位置2定性分析谱图及结果

图3 轴瓦基体的EPMA分析

### 2.2.3 EDX 的分析

由于 EPMA 微区分析的特征，得到的成分只限于微米级别的量度，测试大小范围从零点几到几十微米的局部，不能很好地代表材料的整体组分特征，而能量色散 X 射线荧光 (EDX) 测试有效范围为毫米级别（区别于配置在 EPMA 或 SEM 上的 EDS 能谱仪），可以根据需求选择一毫米到十毫米。使用 EDX 得到的结果更能反映基体材料的组成。基体成分测试谱图见图 4，成分结果见表 1：

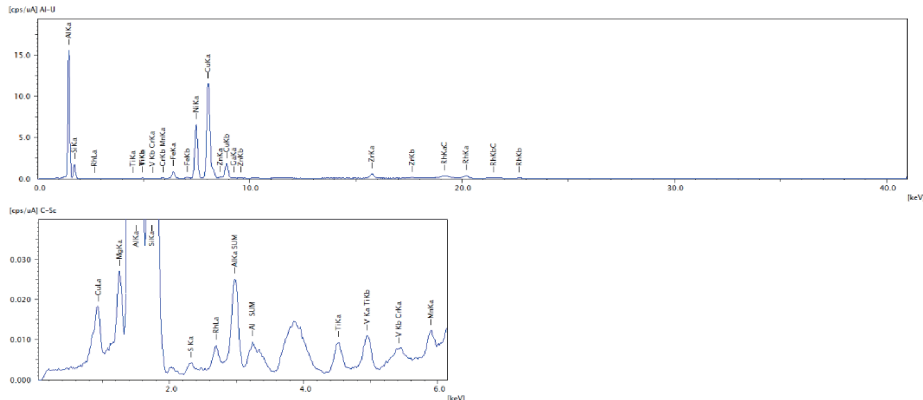


图4 基体成分EDX谱图

表1 基体成分EDX测试结果

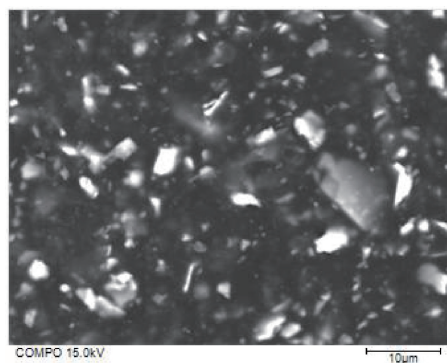
元素	结果	处理-计算	线系	强度
Al	77.288 %	定量分析-FP	AlKa	42.857
Si	17.194 %	定量分析-FP	SiKa	4.947
Cu	2.716 %	定量分析-FP	CuKa	100.050
Ni	1.658 %	定量分析-FP	NiKa	52.651
Mg	0.507 %	定量分析-FP	MgKa	0.173
Fe	0.336 %	定量分析-FP	FeKa	6.866
Zr	0.074 %	定量分析-FP	ZrKa	5.924
Ti	0.064 %	定量分析-FP	TiKa	0.324
V	0.054 %	定量分析-FP	V Ka	0.396
Mn	0.036 %	定量分析-FP	MnKa	0.525
S	0.031 %	定量分析-FP	S Ka	0.025
Zn	0.029 %	定量分析-FP	ZnKa	1.154
Cr	0.009 %	定量分析-FP	CrKa	0.095
Ga	0.005 %	定量分析-FP	GaKa	0.192

可以判断，基体为 Al-Si 系合金，添加 Cu、Ni、Mg 等多种合金元素。

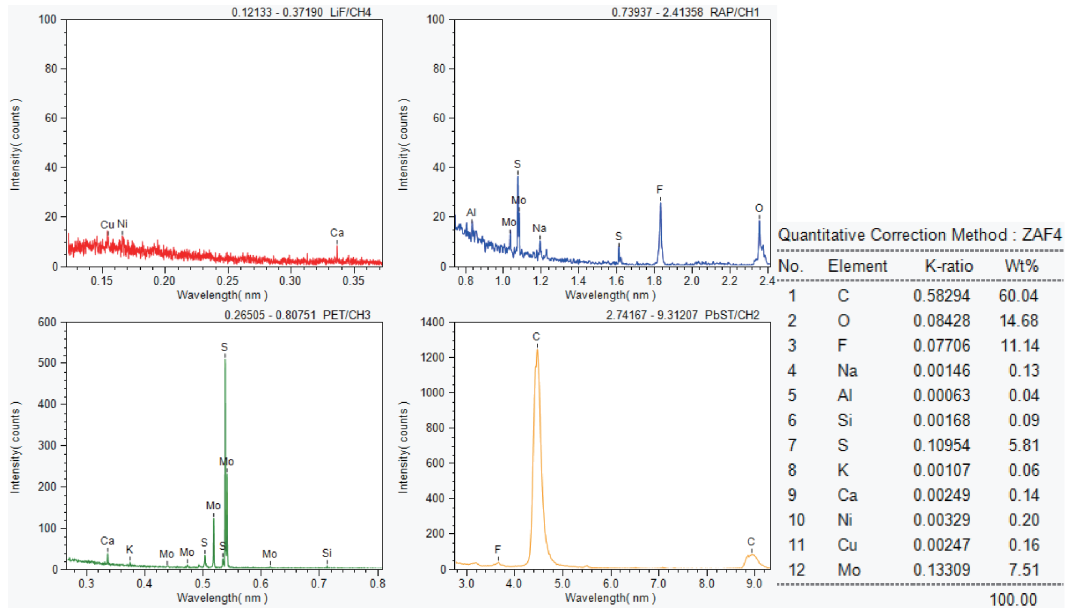
## 2.3 涂层的组分分析

### 2.3.1 EPMA 的分析

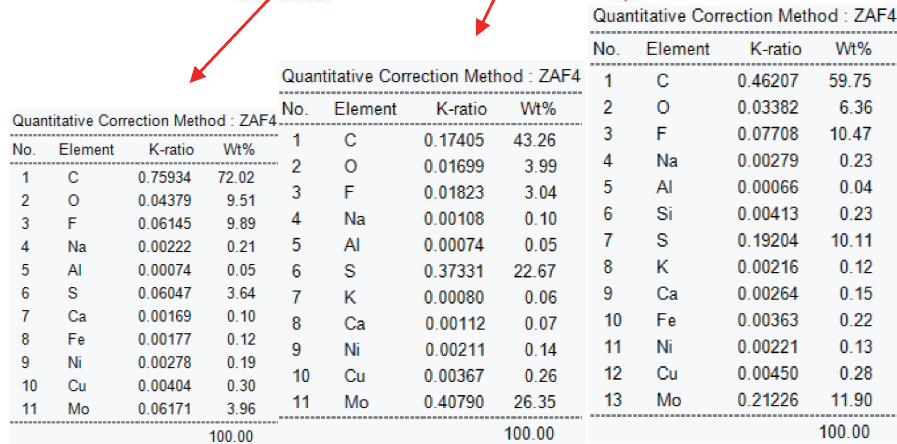
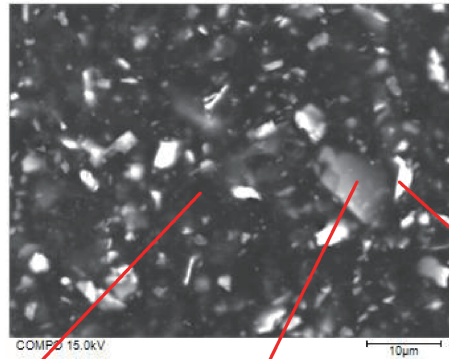
涂层中的成分，使用 EPMA 进行解析。使用散焦斑（束斑直径 50  $\mu\text{m}$ ）获得较为平均的成分，结果见图 5.b。EPMA 测试的深度也在微米量级，所以测试结果中可能会包含一定的基体元素构成信息。针对涂层中具体的颗粒分析，结果见图 5.c。检出 C、O、F 等轻元素存在以及 Mo、S 等元素。涂层可能为有机物涂装。



a. 涂层测试位置示意图



b. 涂层成分信息谱图及结果



c. 涂层中不同颗粒的成分测试  
图5 涂层的组分EPMA解析

### 2.3.2 FTIR 对于涂层中有机物的测试

作为有机物鉴别的利器，对于涂层中有机物的测试和分析，借助岛津傅里叶变换红外光谱仪（FTIR）完成。FTIR 测试谱图见图 6，经过谱图匹配，可以确认涂层主要由聚四氟乙烯材料构成。

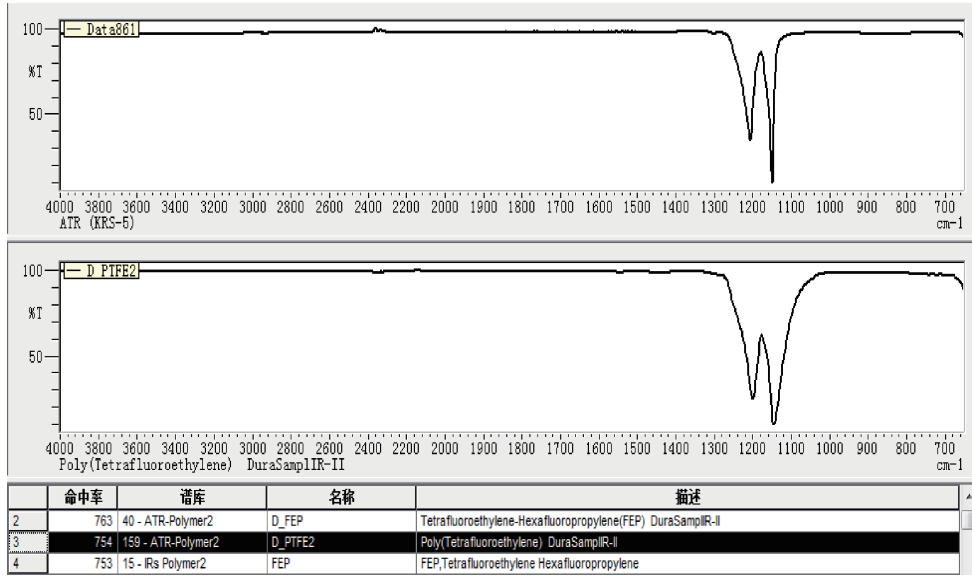


图6 FTIR对涂层物质的解析，上图是涂层测试结果，下图为聚四氟乙烯的标准谱图

### 2.3.3 EDX 对涂层成分的分析

使用 EDX 对涂层进行解析，采集的谱图见图 7。结合 EPMA 和 FTIR 的测试结果，使用薄膜 FP 法得出薄膜成分见表 2，进一步确认涂层结构信息。涂层主要有聚四氟乙烯构成，添加 Mo、S 元素，含有少量的杂质元素 Ca、K。

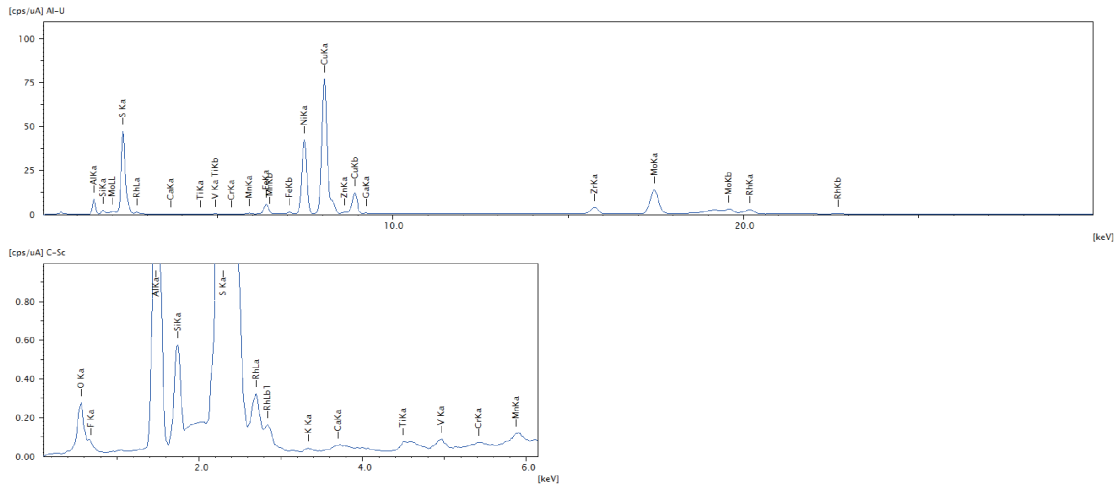


图7 涂层的EDX测试谱图

表2 涂层信息EDX解析结果

元素	结果	处理-计算	线	强度
====[第 1 层]====<	Layer1	>=====	=====	=====
Layer1	950.000 ug/cm2	含量	-----	-----
MoS2	62.336 %	定量分析-FP	MoKa	160.731
C2F4	37.160 %	定量分析-FP	F Ka	0.661
Ca	0.363 %	定量分析-FP	CaKa	0.503
K	0.141 %	定量分析-FP	K Ka	0.149
====[第 2 层]====<	Base	>=====	=====	=====
Al	79.389 %	定量分析-FP	AlKa	21.460
Si	15.223 %	定量分析-FP	SiKa	4.266
Cu	2.647 %	定量分析-FP	CuKa	673.376
Ni	1.600 %	定量分析-FP	NiKa	339.493
Fe	0.332 %	定量分析-FP	FeKa	41.267
Ti	0.082 %	定量分析-FP	TiKa	1.683
Zr	0.071 %	定量分析-FP	ZrKa	43.656
V	0.060 %	定量分析-FP	V Ka	2.053
Mn	0.046 %	定量分析-FP	MnKa	3.783
Zn	0.027 %	定量分析-FP	ZnKa	7.834
Cr	0.013 %	定量分析-FP	CrKa	0.711
Ga	0.009 %	定量分析-FP	GaKa	2.751
Mg	0.500 %	固定	-----	-----

综上,根据背散射电子图像特征、微区形貌以及表面宏观形貌并结合成分测试结果,基体应为 Al-Si 系铸铝合金,添加铜、镍、铁、锰等合金元素提高力学强度和热稳定性,表面涂层为聚四氟乙烯处理。

聚四氟乙烯(特氟龙)具有良好的耐热、耐磨、耐腐蚀以及优良的润滑性,作为表面涂层可应用材料十分广泛,是一种优良的耐磨且具有自润滑性的材料,在轴承部件中可实现无油润滑。欧美和日本已在多种精密轴套、轴瓦等部件上采用了铝合金表面聚四氟乙烯涂层处理,国内在此方面的应用相对来说才刚刚起步。

同时,在涂层颗粒中检出 MoS<sub>2</sub>。MoS<sub>2</sub>能够进一步改善耐磨性。根据检出的 O 元素,说明在涂层处理之前或做过阳极氧化处理,主要是利用氧化层多空的特性把聚四氟乙烯润滑粒子填充到孔中,改善聚四氟乙烯与基体的结合性能,提高附着性。

## 结论

借助岛津仪器分析判断,此轴瓦部件为铝硅系铸铝合金,表面经过聚四氟乙烯处理,聚四氟乙烯起耐蚀和自润滑的作用,可实现轴承的无油润滑,添加 MoS<sub>2</sub>颗粒可进一步改善耐磨性能。为了提高聚四氟乙烯与基体金属材料的附着性,在喷涂之前,基体进行了阳极氧化处理改性。