

文章编号: 1005-0523(2021)02-0122-05

## 推力轴瓦锡基合金 ZSnSb11Cu6 与改性聚四氟乙烯研究

谢克非<sup>1</sup>, 李金泽<sup>2</sup>, 胡瑞<sup>1</sup>, 熊乐<sup>1</sup>, 利盛昕<sup>3</sup>, 熊震<sup>1</sup>

(1. 南昌工程学院机械与电气工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 四川红华实业有限公司, 四川 乐山 614200;  
3. 赣州市水利水电勘测设计院, 江西 赣州 341000)

**摘要:**为了全面分析现有的锡基合金瓦和改性四氟乙烯塑料瓦的性能情况,对水轮发电机组常用的锡基合金 ZSnSb11Cu6 推力轴瓦和改性聚四氟乙烯推力轴瓦进行性能实验分析,通过对比锡基合金 ZSnSb11Cu6 和改性聚四氟乙烯的耐温性能、硬度、摩擦磨损性能,分析出推力轴瓦的最优耐温值、硬度值和摩擦磨损情况。进一步验证改性聚四氟乙烯推力轴瓦材质性能优越性,为不同种类、大小的传统锡基合金瓦电站提供有价值的技改性能参考数据。

**关键词:**水轮发电机;锡基合金;改性聚四氟乙烯;性能

**中图分类号:**TH14 **文献标志码:**A

**本文引用格式:**谢克非,李金泽,胡瑞,等. 推力轴瓦锡基合金 ZSnSb11Cu6 与改性聚四氟乙烯研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(2):122-126.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20210416.008

## Study on the ZSnSb11Cu6 and Modification of PTFE with Thrust Bearing Tin Base

Xie Kefei<sup>1</sup>, Li Jinze<sup>2</sup>, Hu Rui<sup>1</sup>, Xiong Le<sup>1</sup>, Li Shengxin<sup>3</sup>, Xiong Zhen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering Nanchang Institute of Engineering, Nanchang 330099;  
2. Sichuan Honghua Industrial Co., Ltd., Leshan 614200;  
3. Ganzhou Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** In order to fully analyze the performance of the existing tin-based alloy tiles and modified PTFE plastic tiles, this paper analyzes the performance of the commonly used tin-based alloy ZSnSb11Cu6 thrust bearings and modified PTFE thrust bearings for hydro-generator sets. By comparing the temperature resistance, hardness, friction and wear properties of the tin-based alloy ZSnSb11Cu6 and modified PTFE, the optimal temperature resistance, hardness and friction and wear conditions of the thrust bearing are analyzed. It further verifies the superiority of the material performance of the modified PTFE thrust bearing bush, and provides valuable technical modification performance reference data for different types and sizes of traditional tin-based alloy tile power stations.

**Key words:** water turbine generator; tin-based alloy; modified PTFE; properties

**Citation format:** XIE K F, LI J Z, HU R, et al. Study on the ZSnSb11Cu6 and modification of PTFE with thrust bearing tin base[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2): 122-126.

收稿日期: 2020-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(51765044); 江西省科技计划项目(20132BBI90026); 江西省自然科学基金(20132BAB206014); 江西省教育厅科学技术研究基金(GJJ180960, GJ180934)

作者简介: 谢克非(1961—), 男, 教授, 博士, 研究方向为材料科学与工程。E-mail: 3174670@qq.com。

锡基合金 ZSnSb11Cu6 与改性聚四氟乙烯是国内水轮发电机组推力轴瓦的两种瓦体材质<sup>[1]</sup>。锡基合金其应用可以追溯到工业革命时代<sup>[2]</sup>,其质量分数为锑 3%~15%,铜 2%~6%,镉<1%,锡余量。具有减摩特性的锡基巴氏合金是最适合相对于低硬度轴转动的材料,我国水轮发电机组推力轴承引进其材质使用至今<sup>[3]</sup>。近几十年,我国的部分水电站开始采用弹性金属塑料瓦代替巴氏合金瓦作为水轮发电机组推力轴瓦瓦体材料使用<sup>[4]</sup>,以东方电机等公司生产的改性聚四氟乙烯塑料瓦最具有代表性。但由于改性聚四氟乙烯推力瓦属于新生事物,应用效果和可靠性有待商榷,部分传统电站和新电站继续采用锡基合金 ZSnSb11Cu6 作为推力瓦材质。对锡基合金 ZSnSb11Cu6 与改性聚四氟乙烯进行性能实验分析,对比分析 2 种材质的优劣性,为电站提供有价值的参考数据和技改支撑<sup>[5-6]</sup>。

## 1 推力轴瓦的耐温性

推力轴瓦在日常工作中,会因机组开机停机,瓦面摩擦等过程导致瓦面温度剧烈攀升。以推力轴瓦运行工况为前提基准,首先对锡基合金(ZSnSb11Cu6)瓦和改性聚四氟乙烯瓦采用热差分析法(DTA)测试。获得锡基合金(ZSnSb11Cu6)和改性聚四氟乙烯详细的热差曲线及温度变化过程,分析各项特征温度<sup>[7-9]</sup>。

### 1.1 锡基合金 ZSnSb11Cu6 耐温性实验

锡基合金(ZSnSb11Cu6)采用热差分析测试的方式进行耐温性测量。取一定的锡基合金(ZSnSb11Cu6)试样进行坩埚称重,天平计量后减去干锅的重量得到锡基合金(ZSnSb11Cu6)试样的净重,实验仪器要求试样净重选择 30 mg。以室温为参考值,以 10 °C/min 的升温速度从室温提升到 300 °C,氮气条件下进行,氮气流量为 200 mL/min。实验过程中仪器进行数据绘制与编排,测得试样的热流/热重曲线如图 1。

锡基合金(ZSnSb11Cu6)耐温性实验过程数据呈现出蓝色、绿色和红色 3 条曲线,DTA 热流曲线为绿色曲线,TG 热重曲线为蓝色曲线,DDTA 微分差热曲线为红色曲线。对热流曲线与微分差热曲线的观察,可以了解到锡基合金(ZSnSb11Cu6)的吸热峰、放热峰及曲线上的特征值;对 TG 曲线的观察,了解锡基合金(ZSnSb11Cu6)的重量减少速

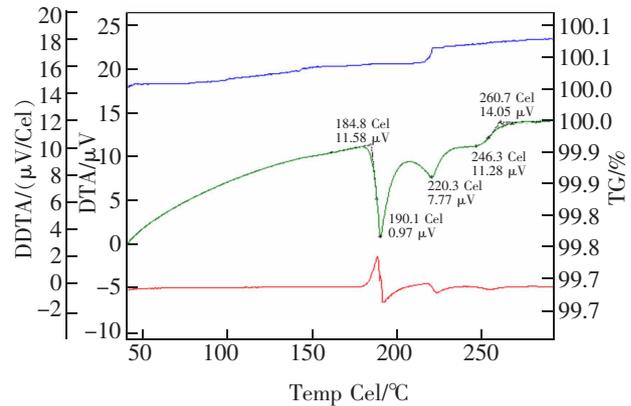


图1 锡基合金(ZSnSb11Cu6)TG/DTA 曲线  
Fig.1 TG/DTA curve of Tin alloy ZSnSb11Cu6

率。最终通过 TG、DTA 和 DDTA 曲线的观察分析,得到锡基合金(ZSnSb11Cu6)的温升变化过程,获得锡基合金(ZSnSb11Cu6)的各项温度特征值(Temp Cel)。

锡基合金(ZSnSb11Cu6)DTA 曲线中,有 3 个较为明显的吸热谷,在温度达到 184.8 °C 时吸热反应首先发生,电位差此时为 11.53  $\mu\text{V}$ ,在温度达到 190.1 °C 时,达到吸热峰值,即最大吸热量,电位差此时为 0.97  $\mu\text{V}$ ;在温度为 220.3 °C 时出现第 2 个吸热反应,在温度为 246.3 °C 时出现第 3 个吸热反应,热重曲线中,第 2 个吸热反应峰发生大幅度波动。

### 1.2 改性聚四氟乙烯耐温性实验

与锡基合金(ZSnSb11Cu6)实验条件及步骤相同,对改性聚四氟乙烯进行热差分析测试。改性聚四氟乙烯热重/热流曲线中,较为明显的吸热反应和放热共有 3 处,微分差热曲线也与之相互对应。

在温度达到 321.3 °C 时开始发生初次吸热反应过程,电位差此时为 12.96  $\mu\text{V}$ ,在温度达到 329.8 °C 时,达到初次吸热反应峰值,电位差此时为 10.37  $\mu\text{V}$ ;第 2 个吸热反应过程在温度为 511.3 °C 时出现,电位差为 12.60  $\mu\text{V}$ ,温度为 559.2 °C 时达到第 2 个吸热过程最大吸热反应量,此时为改性聚四氟乙烯最大吸热量,峰值处电位差为 3.57  $\mu\text{V}$ ;在温度为 246.3 °C 时出现第 3 个吸热反应。此外,在热重曲线中,在第 2 个吸热反应峰值处出现强烈波动,热重\热流曲线如图 2 所示。

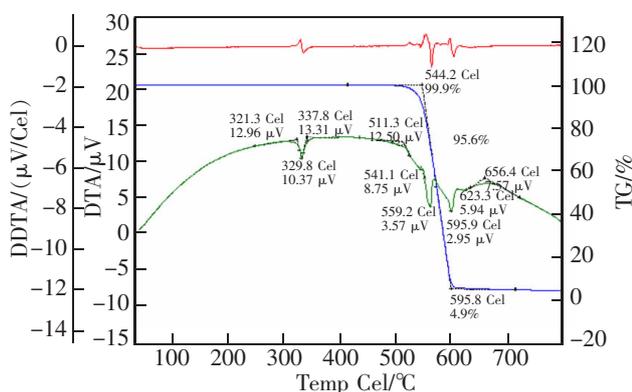


图2 改性聚四氟乙烯 TG/DTA 曲线  
Fig.2 TG/DTA curve of PTFE

## 2 推力瓦材质的硬度

由外界施加压力导致材料发生相对抵抗外压的能力,这种能力称为硬度。材料对外界物体入侵的这种局部抵抗能力,硬度一定程度上影响着金属的屈

表1 维氏硬度测量汇总数据

Tab.1 Vickers hardness measurement data

材料	1	2	3	4	5	6
ZSnSb11Cu6/(N/mm <sup>2</sup> )	60.57	62.35	75.96	75.96	68.65	78.46
改性聚四氟乙烯/(N/mm <sup>2</sup> )	14.48	15.94	14.54	14.04	13.64	14.04

将表1中的维氏硬度测量汇总数据用 Origin 软件进行曲线刻画,观察两种材料硬度曲线的离散和稳定状况,如图3所示。在图3中可以发现,锡基合金(ZSnSb11Cu6)改性聚四氟乙烯的维氏硬度曲线都存在一个波动范围区间。锡基合金(ZSnSb11Cu6)的硬度范围区间在60~80 N/mm<sup>2</sup>之间,改性聚四氟乙烯的硬度范围区间在14~15 N/mm<sup>2</sup>之间。并且,从 Origin 硬度曲线上可以观察到,锡基合金(ZSnSb11Cu6)的硬度测量值波动情况大,离散

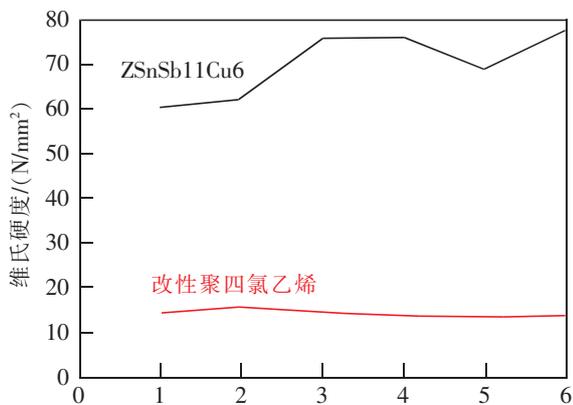


图3 维氏硬度曲线

Fig.3 Vickers hardness curve

服强度,发电机组上常应用此方法来进行间接比较各种材料的屈服强度<sup>[10]</sup>。此外,推力瓦运行工况中,材质软硬度也是影响瓦体材质的重要因素之一。通过对锡基合金(ZSnSb11Cu6)和改性聚四氟乙烯进行维氏硬度(宏观)实验,获得并处理数据,得到锡基合金(ZSnSb11Cu6)和改性聚四氟乙烯的硬度值<sup>[11]</sup>。

## 3 锡基合金ZSnSb11Cu6、改性聚四氟乙烯硬度

用锯尺将锡基合金(ZSnSb11Cu6)和改性聚四氟乙烯初步加工为14 mm<sup>3</sup>的立方体,然后使用铣刀再进行精加工,精加工为10 mm<sup>3</sup>的立方体,最后使用机械抛光机将其抛光成镜面,制好试样。紧接着,将试样块进行打点测量。以任一镜面边的中心点开始往面中心点打点,打点数目至6点实验结束。实验结束后,将测量的维氏硬度值进行汇总,如表1。

情况明显;改性聚四氟乙烯的硬度曲线平缓稳定,相对波动不明显。

计算处理上表1的锡基合金(ZSnSb11Cu6)和改性聚四氟乙烯的维氏硬度值,经过算数平均数的计算,得出两种材质的维氏硬度均值,将其均值作为锡基合金(ZSnSb11Cu6)和改性聚四氟乙烯的硬度参考值,计算过程如下

$$\bar{X}_{\text{合金}} = \frac{x_1+x_2+x_3+\dots+x_{n-2}+x_{n-1}+x_n}{n} = \frac{60.57+62.35+75.96+75.96+68.65+78.46}{6} = 70.325 \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

$$\bar{X}_{\text{改氟}} = \frac{x_1+x_2+x_3+\dots+x_{n-2}+x_{n-1}+x_n}{n} = \frac{14.48+15.94+14.54+14.04+13.64+14.04}{6} = 14.450 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

通过上述的算数平均数的计算,锡基合金(ZSnSb11Cu6)的硬度参考值为70.325 N/mm<sup>2</sup>,改性聚四氟乙烯的硬度参考值为14.450 N/mm<sup>2</sup>。

## 4 推力瓦材质的摩擦磨损性能

摩擦磨损性能是影响轴承耐久性又一重要性

能之一<sup>[12]</sup>。将锡基合金(ZSnSb11Cu6)和改性聚四氟乙烯加工成7.6 mm的销试样,摩擦磨损实验的对磨材料选用的为45号钢,将45号钢通过机械冷加工成58 mm的圆柱体,并在圆柱体其中心处挖取直径为14 mm,高度为5 mm左右的凹型槽,用于摩擦磨损试验机下沉安装固定螺丝,并且用砂纸将其打磨成粗糙面。

经过预先实验加载,锡基合金(ZSnSb11Cu6)5 kg荷载时出现较明显磨损;因此选定在5 kg荷载、油润滑(46号机油)的条件下进行详细实验,实验中分别对锡基合金(ZSnSb11Cu6)试样,改性四氟乙烯试样进行200,400,600 r/min摩擦实验,磨损实验<sup>[13]</sup>。其中,24 h磨损实验结果做为磨损标准<sup>[14]</sup>,摩擦磨损实验完成后,收集汇总数据,将数据绘制成图,锡基合金(ZSnSb11Cu6)曲线如图4所示。

在200 r/min下,锡基合金(ZSnSb11Cu6)摩擦系数在0.08到0.10之间进行波动,摩擦系数0.092为200 r/min条件下摩擦系数最终均值;在400 r/min下,锡基合金(ZSnSb11Cu6)摩擦系数在0.09~0.11之间进行波动,摩擦系数0.087为400 r/min条件下摩擦系数的最终均值;在600 r/min下,锡基合金(ZSnSb11Cu6)摩擦系数发生下滑现象,锡基合金(ZSnSb11Cu6)屈服强度已达到该种材料的极限,开始发生损坏,摩擦系数最终降至0.041。

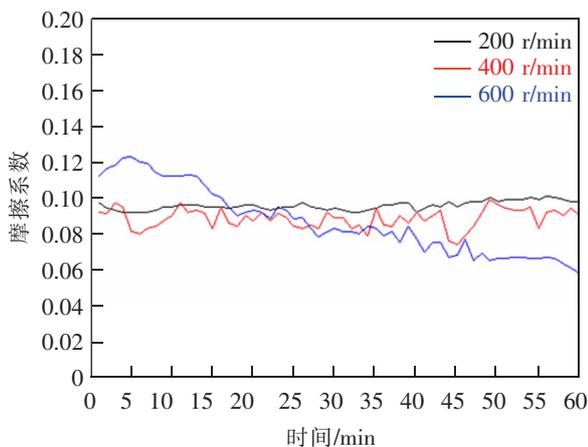


图4 5 kg荷载-锡基合金(ZSnSb11Cu6)

Fig.4 5 kg load-tin alloy (ZSnSb11Cu6)

采用电子天平,对实验后锡基合金(ZSnSb11Cu6)进行称重,与实验前称重值进行对比计算,锡基合金(ZSnSb11Cu6)磨损条件为200 r/min时,计算磨损量为0.149 g,锡基合金(ZSnSb11Cu6)磨损实验

为400 r/min时,计算磨损量为0.132 5 g,锡基合金(ZSnSb11Cu6)磨损实验条件为600 r/min时,计算磨损量为0.178 9 g。5 kg荷载下,锡基合金(ZSnSb11Cu6)的磨损现象开始显著突出。

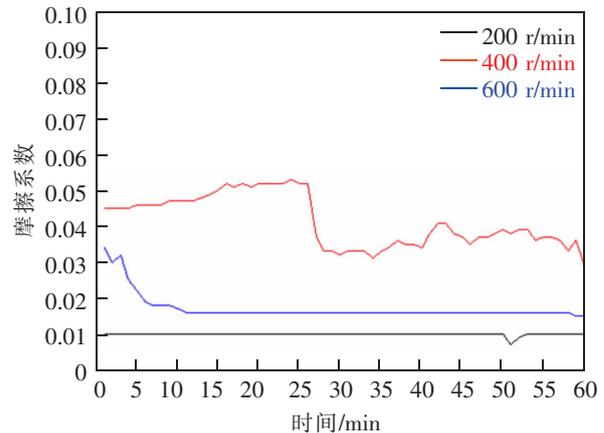


图5 5 kg荷载-改性聚四氟乙烯

Fig.5 5 kg load-modified PTFE

如图5所示,改性聚四氟乙烯5 kg荷载进行实验,改性聚四氟乙烯在200 r/min摩擦时,基本趋于平稳,摩擦系数在0.01上下波动,摩擦系数最终的计算均值为0.01;改性聚四氟乙烯在400 r/min摩擦时,摩擦系数在0.01~0.03区间内波动,波动情况较为剧烈,摩擦系数最终的计算均值为0.039;600 r/min下,改性聚四氟乙烯摩擦曲线,曲线在0.01~0.04之间波动,最终摩擦系数稳定在0.05。

通过电子天平称重,200 r/min实验条件下,0.001 g为改性聚四氟乙烯实验前后磨损量;400 r/min实验条件下,0.000 1 g为改性聚四氟乙烯实验前后磨损量;600 r/min实验下,0.093 g为改性聚四氟乙烯实验前后磨损量。5 kg荷载的条件下,改性聚四氟乙烯磨损量微小。

## 5 结论

1) 锡基合金(ZSnSb11Cu6)在温度处于184 ℃左右时,材料出现大规模分解,温度在184 ℃之前,锡基合金(ZSnSb11Cu6)材料自身可以正常发挥各项性能;改性聚四氟乙烯在温度处于511.3 ℃左右时,材料出现大规模分解,温度在320 ℃之前,改性聚四氟乙烯能保证性能的正常发挥,在500 ℃以上时,性能发生大规模衰减。改性聚四氟乙烯材质耐温性明显强于锡基合金(ZSnSb11Cu6)材质,更能面对复杂的高温现象。

2) 改性聚四氟乙烯的硬度计算值为 14.450, 锡基合金 (ZSnSb11Cu6) 的硬度计算值为 70.325, 改性聚四氟乙烯材质比巴氏合金材质硬度更小, 更不会损伤对磨镜板等材质。

3) 摩擦系数 0.08~0.1 之间为锡基合金 (ZSnSb11Cu6) 的摩擦系数范围, 摩擦系数 0.01~0.04 之间为改性聚四氟乙烯的摩擦系数范围, 相比较, 锡基合金 (ZSnSb11Cu6) 的摩擦系数远远大于改性聚四氟乙烯, 在 24 h 摩擦磨损实验下, 0.13~0.18 g 为锡基合金 (ZSnSb11Cu6) 的磨损量范围, 0.000 1~0.093 g 为改性聚四氟乙烯的磨损量范围, 磨损量远远小于锡基合金 (ZSnSb11Cu6), 耐磨性突出明显。

4) 综合以上性能的研究, 改性聚四氟乙烯塑料瓦比锡基合金 (ZSnSb11Cu6) 的性能更加优良, 更加耐磨。在水轮发电机组推力瓦材质的选择中, 改性聚四氟乙烯比锡基合金 (ZSnSb11Cu6) 工程应用性更好。

#### 参考文献:

- [1] 王敏. ZSnSb11Cu6 合金轴承的浇注工艺[J]. 铸造技术, 2008(4):571-572.
- [2] 佚名. 1967—1972 年滑动轴承材料的发展概况[J]. 国外机车车辆工艺, 1977(2):23-30.
- [3] NEWBIGIN H T. The problem of the thrust bearing[J]. Minutes of the Proceedings, 1914, 196:223-246.
- [4] 上海材料研究所. 弹性金属氟塑料复合材料及推力轴承[J]. 机电信息, 1996(11):35.
- [5] 姜茜. 水轮机组用聚四氟乙烯推力轴瓦[J]. 东方电机, 2003, 31(2):161-163.
- [6] 李文白, 刘显耀. 氟塑料推力瓦的应用及效果[J]. 四川水力发电, 1995(2):84-87.
- [7] 方静辉, 汪久根, 赵志强, 等. PTFE 瓦与巴氏合金瓦推力轴承热弹流特性的对比分析[J]. 轴承, 2012(4):29-32.
- [8] 杨仕福, 罗正平. 水轮发电机推力轴瓦温度场分析[J]. 东方电机, 1999(4):10-14.
- [9] 李金泽. 水轮发电机组瓦体磨损机理分析与改进[D]. 南昌:南昌工程学院, 2019.
- [10] 王印培. 钢的硬度值与屈服强度之间的经验关系[J]. 化工与通用机械, 1982(12):59-61.
- [11] SHIPRA A, PANDEY R. Performance investigation of micro-pocketed textured pad thrust bearing[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70(8):302-304.
- [12] 涂文兵, 陈超, 项云鹏. 高速列车轴箱轴承滚动体打滑特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(5):107-114.
- [13] 权强, 余睿. 仙游抽水蓄能电站推力轴瓦磨损原因分析及处理[J]. 水电与抽水蓄能, 2018, 4(6):79-83.
- [14] 杜鹏程, 许洪川. 百万千瓦核电厂主泵推力轴瓦异常磨损原因分析与优化改进[J]. 水泵技术, 2017(5):36-38.