

温度对 Au-9Ni 合金电刷丝力学性能的影响研究

李睿¹, 柳青², 孟宪刚¹, 曲强¹, 卢绍平², 武海军^{2*}

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100094; 2. 贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘要: 测定了 Au-9Ni 合金在不同热处理状态下的预变形刷丝在低高温循环处理过程中的接触压力变化, 研究了不同温度下刷丝蠕变速率变化。结果表明, 刷丝成型后在 330~350℃ 温度区间内进行时间为 30 min 的退火能够消除成型加工造成的应力集中; 在 -50~150℃ 的温度循环过程中, 电刷的压力随循环次数的增加而减小, 约 1000 个循环后进入稳定期; 模拟结果表明, 112000 次循环后压力降低约 20%; 在恒温恒压环境中, 150℃ 刷丝基本不产生变形, 250℃ 刷丝慢慢变形但幅度较小, 350℃ 蠕变率极高。

关键词: 金属材料; Au-9Ni 合金; 温度循环; 力学性能; 蠕变

中图分类号: TG146.3⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)03-0046-04

Effect of Temperature on the Mechanical Performance of Au-9Ni Slipping Brushes

LI Rui¹, LIU Qing², MENG Xiangang¹, QU Qiang¹, LU Shaoping², WU Haijun^{2*}

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China; 2. State Key Laboratory of Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Sino-Platinum Metals Co. Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: The change in the contact pressure and creep rate of Au-9Ni alloy brushes under different heat treatment conditions were studied. The result indicated that the stress concentration of the brushes as a result of the forming procedure could be reduced by annealing at 330~350℃ for 30 minutes. In the process of thermal cycling at -50~150℃, the contact pressure of the brushes decreased with the increase of the cycle number, and reached a steady state after about 1000 cycles. The simulation results demonstrated that the pressure dropped by about 20% after 112000 cycles. In a constant temperature and pressure environment, the brushes did not deform at 150℃ and deformed slowly and slightly at 250℃, but deformed severely with a high creeping rate at 350℃.

Key words: metal materials; Au-9Ni alloy; thermal cycling; mechanical property; creep

导电滑环是一类广泛应用于星载产品的重要机电部件, 在转动部分与固定部分之间传递电功率或信号。太阳帆板驱动机构的功率和信号滑环^[1]、控制力矩陀螺的信号滑环都是其典型应用范例。

金合金刷丝广泛应用于导电环中作为电刷材料, 它的优点是接触电阻低、耐腐蚀、不易氧化^[2-3]。在导电滑环中, 金合金刷丝以一定压力与金属环片对偶。该接触压力对电接触的性能、磨损率及使用

寿命影响很大^[4]。

刷丝的制作工艺流程包括机械成型、热处理等。热处理温度和环境温度条件对金合金刷丝的力学性能都会造成影响, 产生蠕变、内应力释放等效应, 导致刷丝形状发生变化, 进而与金属环片的接触压力减小, 造成导电滑环的断路等故障。星载导电环的使用热环境复杂, 其全寿命内需要经历多次低高温循环。例如卫星太阳帆板驱动机构用电刷丝, 其

收稿日期: 2016-08-23

基金项目: 云南省科技创新人才计划项目(2015HC034)、云南省应用基础研究重大项目(2016FC006)。

第一作者: 李睿, 男, 高级工程师, 研究方向: 机电设计制造。E-mail: rli29805@hotmail.com

*通讯作者: 武海军, 男, 高级工程师, 研究方向: 贵金属精密合金。E-mail: whj@ipm.com.cn

长期使用寿命要求 5~15 年, 每天经历温度循环约 1~15 次, 且无法维护。为保证空间用导电环的可靠性, 本实验研究了不同的热处理温度以及温度循环条件对 Au-9Ni 刷丝应力、延展率以及刷丝变形和压力的影响。同时进行了刷丝的蠕变特性的研究, 找到了对于特定形状的刷丝的可用温度上限。

1 实验

1.1 实验材料

Au-9Ni 线材直径为 0.5 mm, 电刷丝的硬度为 240~250 Hv_{0.1}^[5]。该线材经机械成型为刷丝后进行实验。

1.2 热处理温度影响测试

刷丝在成型过程中会产生一定的应力集中, 可能会影响到刷丝的接触稳定性, 为了对比分析不同热处理工艺对刷丝接触稳定性的影响, 设计以下实验方案:

1) 制作了 3 批次刷丝, 每批次 23 个样品, 其中一批次为原始态(简称 OS), 另外 2 批次分别进行 300℃ 和 350℃ 等温热处理, 保温时间为 30 min, 保护气氛为氩气。

2) 对不同热处理状态的电刷丝进行了弹性模量、抗拉强度、延伸率测试, 分析热处理对材料性能的影响。

3) 对剩余刷丝进行工装夹持(如图 1 所示), 夹持的接触压力为 0.14~0.16 N, 并对每个样品进行编号和原始接触压力测试记录, 测试各样品在 -50~150℃ 的温度循环条件下的接触压力变化, 每次循环的保温时间为 10 min, 最高循环次数为 1550 次, 每 50 次循环取出 1 个样品进行接触压力测试。

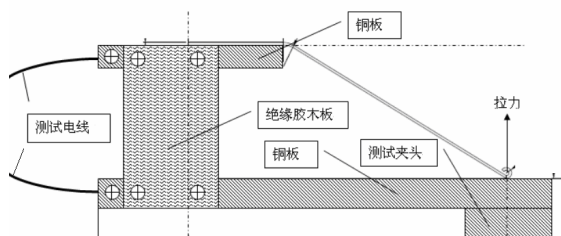


图 1 电刷丝压力测量装置

Fig.1 Experimental setup of preloading measurement

1.3 温度循环影响测试

使用原始状态的刷丝, 按照 1.2 中的要求制作样品 28 个, 开展长期的温度循环实验。温度循环条件与 1.2 中的要求相同, 总循环次数为 12000 次, 每间隔 500 次取出测试压力变化。这一循环次数相当于高轨卫星太阳帆板驱动机构约 32 年寿命所经历的温度循环次数。

1.4 刷丝蠕变特性测试

实验测试装置如图 2 所示, 利用低温箱式炉作为实验环境。为减少连接杆的热容量对刷丝位移的影响, 必须保证连接杆的热容量要大, 使得连接杆在加热过程中位移量基本为零, 只有这样才能保证刷丝因蠕变产生的位移真实体现刷丝在某温度下的力学变化。实验主要参数为: 1) 温度: 150、250 和 350℃; 2) 挂重: 15 g; 3) 时间: 最多 15000 min。

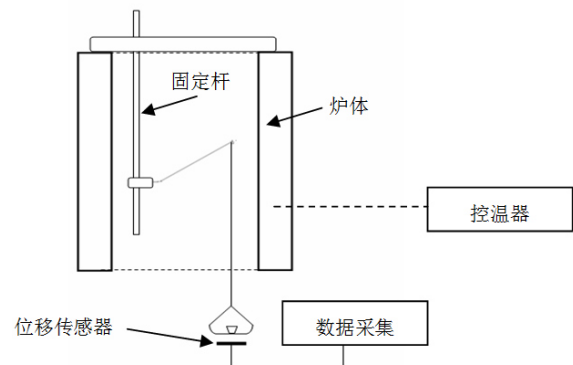


图 2 高温蠕变测试装置示意图

Fig.2 Illustration of the experimental setup of high temperature creep test

2 结果与讨论

2.1 热处理温度对刷丝力学性能的影响

温度循环实验是电子或机电类产品常用的实验手段, 实验中使样品处于不断循环变化的高温与低温作用下, 能够高效而且充分地放大产品的潜在缺陷^[6]。通过温度循环实验可以研究刷丝在空间温度交替环境下的接触压力变化规律。不同热处理状态电刷丝的力学性能测试结果如表 1 所示。

表 1 不同热处理状态下刷丝的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of brushes with different heat treatment

状态	E/MPa	σ/MPa	$\varepsilon/\%$
Original state (OS)	90681	839	1.64
	90502	851	1.00
	90509	835	1.34
300°C/30 min	90397	863	10.38
	90960	826	5.20
	90984	865	8.76
350°C/30 min	91329	833	8.76
	91444	825	9.04
	91219	817	8.98

由表 1 可以看出,与原始态相比,经 300 和 350°C 处理后,延伸率(ε)显著增加,弹性模量(E)和抗拉强度(σ)基本不变,说明在此温度区间内进行热处理只是消除了残余应力,而对其它力学性能没有影响。

在随后进行的温度循环过程中,对 3 种状态的刷丝压力每间隔 50 次各选取一个样品进行刷丝压力的测量,结果如图 3 所示。

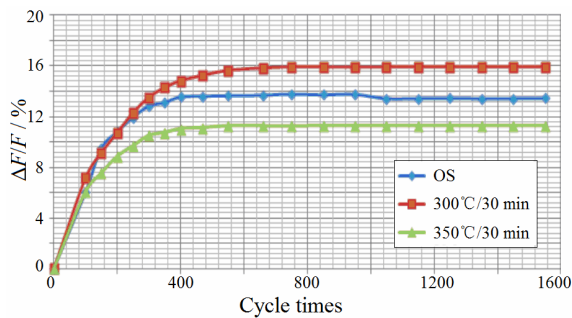


图 3 三种状态刷丝高低温循环过程中接触压力变化图

Fig.3 The preloading variation of brushes with three conditions in thermal cycling test

从图 3 数据变化趋势来看,3 种状态下,电刷丝的变化趋势基本相同,都是在循环初期接触压力降急剧增加,一定次数后逐渐趋于线性平衡,其中 350°C/30 min 热处理后压力变化最先趋于线性平衡,而且相对压力降最低,原始态次之,而 300°C/30 min 热处理后的压力降最高。

2.2 循环次数对刷丝压力的影响

对原始状态下刷丝进行长时间的高低温循环,通过中间取样测试获得在高低温循环过程中接触压力的变化趋势,结果如图 4 所示。

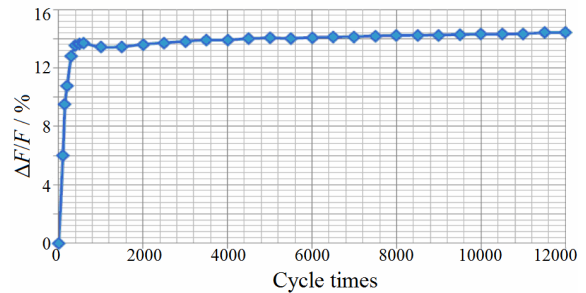


图 4 循环次数对刷丝接触压力降的影响

Fig.4 Influence of cycle times on preloading variation of brushes

从图 4 可以看出,在温度循环初期,接触压力降明显增加,在 1000 次左右基本趋于平衡,1000 次以后呈一定的比例增加,12000 次循环后平台的变化趋势基本稳定。

因为 1000 次以后的变化呈线性变化,因此本文通过计算机 Excle 软件模拟了 1000~12000 次循环的数据变化趋势,来推测得出 112000 次循环后的接触压力降情况,结果如图 5 所示。

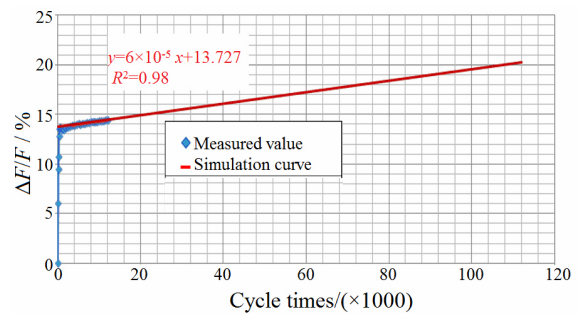


图 5 112000 次循环后接触压力变化模拟曲线

Fig.5 Simulation curve of the preloading decrease after 112000 thermal cycles

通过线性模拟得出了变化趋势曲线,其线性变化公式为:

$$y=6 \times 10^{-5} x+13.727 \quad (1)$$

拟合公式的线性相关系数 $R^2=0.98$,表明线性相关性非常高。以此公式计算得出 112000 次后的接触压力降为:

$$y_m=6 \times 10^{-5} \times 112000+13.727=20.45\% \quad (2)$$

计算结果表明刷丝的接触压力降约为 20.45%。

2.3 刷丝的蠕变特性

由于金属在一定温度下长时间保存会产生蠕变,因此,对于在某温度下工作并依靠原始弹性变形获得工作应力的部件,都可能随着时间的延长,在总变形量不变的情况下,弹性变形不断地转变为塑性变形,从而使工作应力逐渐降低,以致失效。

这种现象称为应力松弛。可以将应力松弛现象视为应力不断减小条件下的一种蠕变过程。保持恒温环境, 恒定张力, 检测接触点的位移变化的蠕变特性, 可以验证恒定接触压力下刷丝的变形大小。图6是恒定应力下改变温度测定获得的实际蠕变曲线。

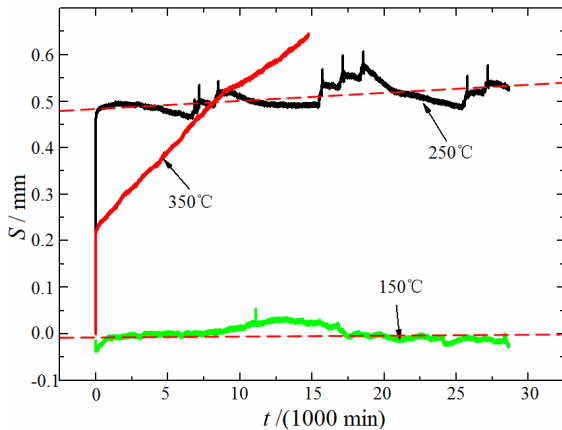


图6 不同温度下刷丝蠕变特性

Fig.6 Creep at different temperatures

材料的蠕变曲线随环境温度的高低而异。从图6可以看出, 150°C温度下, 蠕变量(S)非常小, 随着时间延长变化趋势基本不变; 当温度提高到250°C后, 蠕变量呈缓慢增加的趋势; 当温度提高到350°C时, 蠕变量增加的速度明显提高。由此说明, 在150°C环境下, 刷丝的弹性基本不变, 在250°C下因为蠕变而导致刷丝的刚度降低, 并最终导致电刷的接触压力逐渐降低; 350°C下蠕变速率更高, 接触压力降低更快。

3 结论

1) Au-9Ni 刷丝成型后热处理温度对刷丝应力状态影响很大。在350°C退火30 min能够消除成型加工造成的应力集中, 延伸率显著增加, 弹性模量和强度基本不变, 刷丝压力在温度循环条件下减小较少。

2) 温度循环时, Au-9Ni 电刷的压力随循环次数的增加减小。在-50~150°C的温度循环条件下, 电刷的压力初始阶段迅速减小, 随后进入稳定期。实

际测定12000个循环后压力降低约14%, 模拟计算结果表明112000个循环后压力降低约20.45%。

3) 不同温度对刷丝蠕变特性影响很大。150°C下刷丝基本不产生位移, 250°C慢慢变化, 但幅度较小, 350°C下蠕变率极高, 变形随时间急剧增加。

参考文献:

- [1] LI RUI, YE ZHUANG, QU QIANG, et al. Development of a new generation high reliability long life solar array drive mechanism for future applications[C]. Proceedings of the 64th International Astronautical Congress, Beijing, 2013: 23-27.
- [2] 薛萍, 罗新华, 冷勇, 等. 大电流旋转电滑环的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2008(6): 9-12.
XUE P, LUO X H, LENG Y, et al. Development of a high current rotation slip-ring[J]. Optical fiber & electric cable, 2008(6): 9-12.
- [3] 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.
LI C. Choice of material and experiment on space boren disk slip-ring brush[J]. Electro-mechanical engineering, 2009, 25(3): 6-9.
- [4] 郝建刚, 姜校亮, 杜玉娟. 风电滑环电刷压力测量方法[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(S1): 72-73.
HAO J G, JIANG X L, DU Y J. Research on brush pressure measurement of wind-power slip-ring[J]. Ship science and technology. 2012, 34(S1): 72-73.
- [5] 马丽存, 成亦飞, 李青. 贵金属及其合金丝、线、棒材规范: GJB 947A-2003[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2003.
MA L C, CHENG Y F, LI Q. Specification for thread, wire and rod of precious metals and their alloys: GJB 947A-2003[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Issuing Department, Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2003.
- [6] 黄蓉, 文昌俊, 聂磊, 等. 温度循环试验参数的比较与选择[J]. 湖北工业大学学报. 2013, 28(2): 62-65.
HUANG R, WEN C J, NIE L, et al. Comparison and selection of thermal cycling test parameters[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2013, 28(2): 62-65.