

文章编号:1000-8055(2013)03-0513-07

# 高温磁悬浮轴承励磁绕组制造技术

金超武, 鲁旭东, 朱益利, 徐龙祥

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

**摘 要:** 针对国内外高温励磁绕组存在的缺陷与不足, 提出了一种新型的迷宫形励磁绕组结构, 首先通过电火花线切割制造出单层迷宫形线圈, 并在线圈匝间和层间充分均匀地填充耐高温绝缘材料; 然后通过真空钎焊工艺实现多层迷宫形线圈的牢固焊接, 最后将焊接成型的多层线圈封装成迷宫形绕组, 并应用于单自由度高温磁悬浮轴承试验台中, 实现了 550℃ 被悬浮物体近 20h 的稳定悬浮。研究结果表明: 线圈焊缝的高温电阻值小, 抗剪切强度满足要求, 焊缝的金相组织致密均匀; 绕组匝间和层间绝缘性能良好; 迷宫形励磁绕组在原理和工艺上是可行的。对高温悬浮试验后的迷宫形绕组内部形貌进行观察后发现封装线圈的高温绝缘材料存在一定的缺陷, 有待进一步研究。

**关 键 词:** 高温磁悬浮轴承; 励磁绕组; 迷宫形线圈; 电火花线切割; 高温绝缘材料; 真空钎焊

**中图分类号:** V233.3<sup>+</sup>22; TH162

**文献标志码:** A

## Excitation coil manufacturing technology for high temperature active magnetic bearing

JIN Chao-wu, LU Xu-dong, ZHU Yi-li, XU Long-xiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In view of many defects and deficiencies of high temperature excitation coil at home and abroad, a new type of maze like excitation coil structure was proposed. Firstly, the monolayer maze like coil was manufactured by electric discharge machining (EDM) wire cutting, and the high temperature resistant insulating material was put into the gap of coils sufficiently and uniformly. Secondly, the vacuum soldering process was utilized to connect each layer. Finally, the packaged coils were used in a single degree-of-freedom (DOF) high temperature active magnetic bearings (HTAMB) test, and the HTAMB can achieve stable levitation for 20 hours at 550℃. The results show that the welding line resistance value is small, the shear strength of the selected solder and welding line shaped by copper parent metal are credible and coil insulation performance between turns and layers is fine in high temperature environment. Therefore, the high temperature excitation coil is feasible in theory and technology. The oxidized and impaired excitation coil internal structure caused by high temperature levitation test shows that the high temperature resistant insulating material used in encapsulated coil has certain flaws, and they need further research.

**收稿日期:** 2012-03-13

**网络出版地址:** [http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.513\\_006.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.513_006.html)

**基金项目:** 航空科学基金(2008ZB52018)

**作者简介:** 金超武(1980—), 男, 湖南长沙人, 讲师, 博士, 主要从事磁悬浮技术与机电一体化研究。

**Key words:** high temperature active magnetic bearing (HTAMB); excitation coil; maze like coil; electric discharge machining (EDM) wire cutting; high temperature resistant insulating material; vacuum brazing

高温磁悬浮轴承的主要应用领域是航空多电发动机,航空多电发动机是以传统航空燃气涡轮发动机为基础,装配主动磁悬浮轴承、内置一体化起动机/发电机、分布式电子控制系统、电动燃油泵和电力作动器等新部件和系统的一种新型航空发动机<sup>[1]</sup>。航空多电发动机具有普通航空发动机无法比拟的优点,已经是国内外研究的热点。高温磁悬浮轴承是航空多电发动机关键技术中的重中之重,国内外航空多电发动机的发展主要围绕它的技术而展开。高温励磁绕组的制造技术是高温磁悬浮轴承系统首先要解决的一个关键性问题。截止目前,国内外对高温绝缘导线的研制以及高温导线在高温磁悬浮轴承中的应用已经作了一定程度的研究。国外比较典型的是陶瓷导线,这种导线是在金属裸导线的外表面覆盖了一层  $6\mu\text{m}$  左右厚致密的陶瓷绝缘材料,能够在  $1000^\circ\text{C}$  以下工作<sup>[2-4]</sup>,美国 NASA 将这种导线运用到了高温径向磁悬浮轴承,但是由于陶瓷层比较脆,在绕线和使用过程中容易破碎,从金属裸导线上脱落,造成线与线之间短路,并且这种陶瓷绝缘导线在  $550^\circ\text{C}$  只有 2500 h 左右的使用寿命,限制了它在工业上的应用<sup>[5-7]</sup>。国内比较典型的是玻璃纤维绝缘导线,主要特点是采用 0.2 mm 厚的玻璃纤维丝做绝缘层,南京航空航天大学磁悬浮技术应用研究所率先在高温径向磁悬浮轴承上使用了这种导线,实现了在  $550^\circ\text{C}$  高温下稳定悬浮,是国内最早对高温磁悬浮轴承系统进行研究和试验的单位,同时也发现高温导线存在绝缘层老化脱落的现象<sup>[8]</sup>。本文在常温磁悬浮轴承系统结构和原理的基础上,根据航空发动机、燃气轮机高温环境对磁悬浮轴承系统提出的新要求,希望能够设计制造出一套适合  $550^\circ\text{C}$  以上能够长期稳定运行的高温磁悬浮轴承,并重点研究高温励磁绕组的设计思想和制造工艺。

## 1 新型高温励磁绕组结构设计

### 1.1 单层迷宫形线圈简介

本文针对现有技术的不足和高温磁悬浮轴承励磁绕组结构的要求,提出了一种新型的励磁绕组结构设计思想,首先其线圈结构不需要绕制成型,形状稳定,匝间和层间间隙均匀,然后在线圈

的匝间和层间间隙中填充耐高温的绝缘材料,以达到高温下的绝缘效果,最终加工成一定形状和尺寸的励磁绕组。由于单层线圈的形状类似于迷宫,因此将这种结构的线圈命名为“迷宫形线圈”,具体结构形式如图 1 所示。

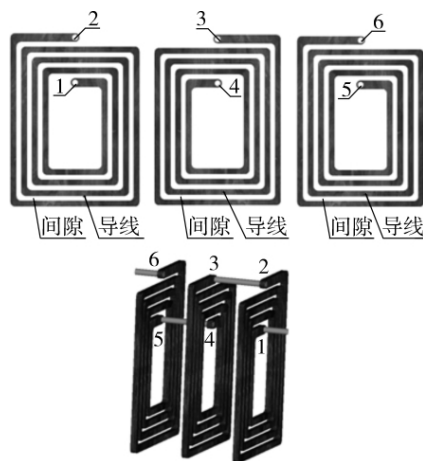


图 1 单层迷宫形线圈示意图

Fig. 1 Schematic of monolayer maze like coil

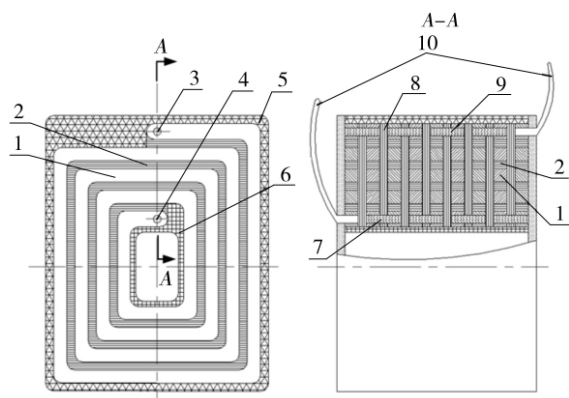
图 1 中每层迷宫形线圈相互独立,该结构由金属导线实体、线圈匝间间隙、线圈内外接头孔(如图中标号 1,2)组成。然后将线圈依次连接起来,为了保证每层线圈中电流的流向一致,可以将 2 号接头和 3 号接头连接,将 4 号接头和 5 号接头连接,以此类推,将多层线圈叠放,在单层线圈的匝间和相邻两层线圈的层间用耐高温的绝缘材料填充,在第一层线圈和最后一层线圈中设置引出线作为电流入口和出口,最终在多层线圈叠放之后形成的内腔和外表面分别涂刷耐高温的绝缘材料使之成为一个整体。

### 1.2 迷宫形绕组的具体结构形式简介

图 2 是由多个单层迷宫形线圈加工制造的迷宫形励磁绕组(下文简称:迷宫形绕组)的具体结构形式和设计制造方案。

该迷宫形绕组的结构包括 2 层以上的单层迷宫形线圈,每层迷宫形线圈均采用耐高温金属板材按照线圈走线方向一体加工而成,且相邻两层迷宫形线圈的走向相反,其中一层是顺时针迷宫形线圈,另外一层是逆时针迷宫形线圈;用内圈连

接柱7和外圈连接柱9将相邻两层迷宫形线圈焊接在一起;在线圈的匝间和层间间隙中填充耐高温绝缘材料,构成匝间绝缘体2和层间绝缘体8,并用绝缘材料作为迷宫形线圈的内层绝缘体6和外层绝缘体5,最终将多层迷宫形线圈封装在一起<sup>[9]</sup>。



1 迷宫形线圈; 2 匝间绝缘体; 3 外接头孔; 4 内接头孔;  
5 外层绝缘体; 6 内层绝缘体; 7 内圈连接柱;  
8 层间绝缘体; 9 外圈连接柱; 10 引出线

图2 迷宫形绕组结构图

Fig. 2 Structure diagram of maze like coil

## 2 新型高温励磁绕组加工制造

### 2.1 新型高温励磁绕组的整个制造工艺流程

新型高温励磁绕组的制造工艺流程如图3所示。

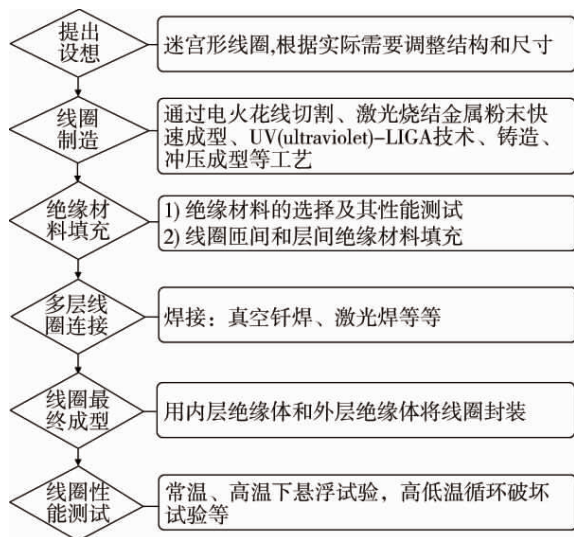


图3 励磁绕组设计制造流程图

Fig. 3 Design and manufacturing flowchart of exciting winding

### 2.2 制造单层迷宫形线圈

从图3流程图中可见,单层迷宫形线圈的加工制造是整个迷宫形励磁绕组的基础部分,结合图1可见,单层迷宫形线圈金属实体横截面积为 $0.75 \sim 1.5 \text{ mm}^2$ ,每匝线圈之间有 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ 的缝隙,由于迷宫形线圈结构和相关尺寸比较特殊,可以考虑用铸造、冲压成型、电火花线切割、激光烧结金属粉末快速成型、LIGA (lithographie, galvanoformung, abformung)等多种工艺方法,在试验当中尝试了电火花线切割、激光烧结金属粉末快速成型等方法,对比发现激光快速成型受激光光斑尺寸的限制很难保证匝间 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ 的间隙;电镀工艺成型速度较慢,平均每小时才电镀出 $10 \mu\text{m}$ 厚的金属层;LIGA工艺复杂并且存在光敏胶去除十分困难的问题<sup>[10-14]</sup>。

基于以上考虑,本文尝试用立方体紫铜块来整体加工出迷宫形线圈的形状,首先用线切割将立方块切割成很多独立的单层线圈,然后分离出单层迷宫形线圈,如图4所示。最终成型的单层迷宫形线圈形状较为稳定,单层线圈水平放置时十分平整。

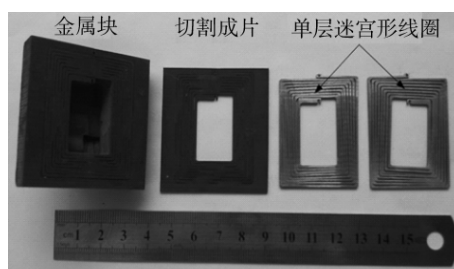


图4 电火花线切割加工出的单层迷宫形线圈实物图

Fig. 4 Photograph of monolayer maze like coil manufactured by EDM wire cutting

### 2.3 填充绝缘体

选择合适的耐高温绝缘材料,并通过合理的工艺将绝缘材料均匀地填充在单层迷宫形线圈的匝间,形成匝间绝缘体,如图5所示。

用云母纸作为线圈的层间绝缘体,如图6所示。

### 2.4 焊接多层迷宫形线圈

图2中介绍了单层迷宫形线圈的内、外接头孔,直径为 $1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$ ,为此,本文设计了与之配套的阶梯轴式连接柱,并通过真空钎焊的方式来将相邻两层迷宫形线圈焊接起来<sup>[15-16]</sup>。

如图7所示是阶梯轴式连接柱的造型图和实

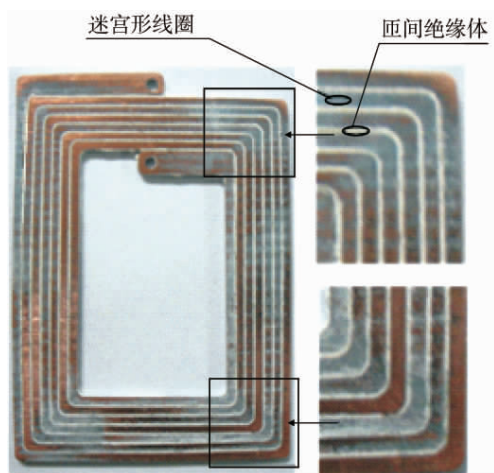


图 5 填充匝间绝缘体实物图

Fig. 5 Photograph of insulator filled in coil turn-to-turn

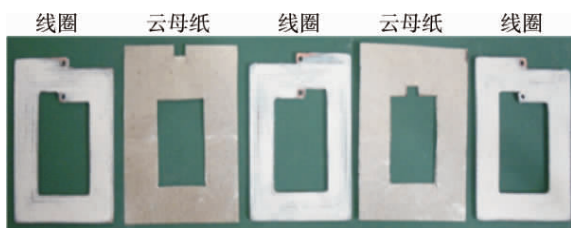


图 6 填充层间绝缘体实物图

Fig. 6 Photograph of insulator filled in coil layer-to-layer

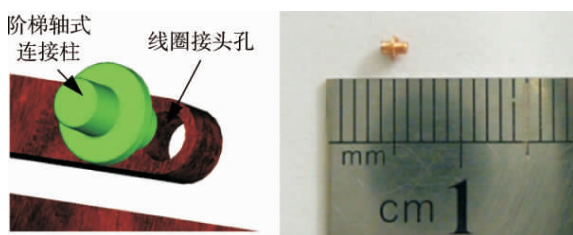


图 7 阶梯轴式连接柱造型图和实物图

Fig. 7 Profile diagram and photograph of connecting column looked like stepped shaft

物图.

焊缝示意图如图 8 所示.

钎焊焊缝微观形貌如图 9~图 12 所示. 从这些图中可见钎焊所形成的焊缝整齐, 且焊缝中的钎料组织均匀、致密, 基本没有气孔、夹杂、裂纹等常见焊接缺陷存在, 尤其从图 11、图 12 中可以观察到, 焊缝中钎料和线圈紫铜母材之间有一定深度的扩散层, 正是这层扩散层保证了焊接处导电性和焊缝强度.

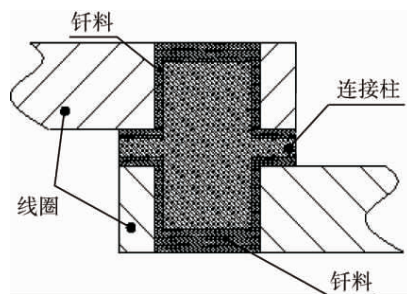


图 8 焊缝示意图

Fig. 8 Sketch map of weld bead

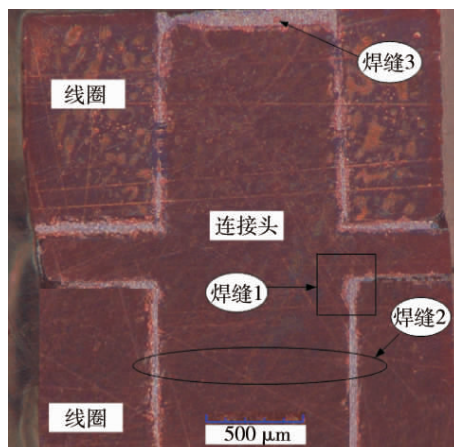


图 9 实际焊缝剖视图 1

Fig. 9 Cutaway view 1 of the actual weld bead

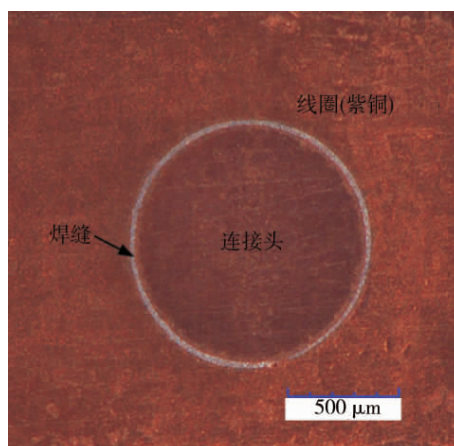


图 10 实际焊缝剖视图 2

Fig. 10 Cutaway view 2 of the actual weld bead

经过焊缝电阻测试发现, 每个焊接头处的高温接触电阻值较小, 只有单层迷宫形线圈的 1.94% 左右, 功耗和发热都可以忽略.

经过焊缝剪切强度测试发现, 在 550 °C 时, 焊缝强度可以达到 2 MPa, 基本可以满足绕组在振动环境的使用要求.

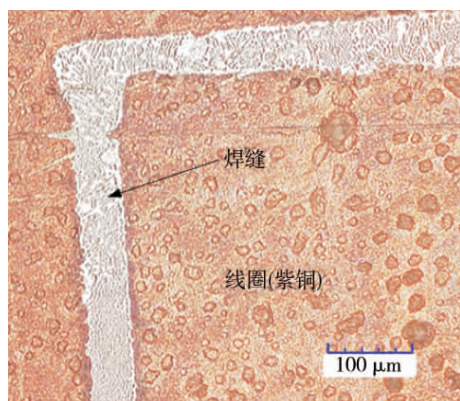


图 11 焊缝 1 的组织形貌

Fig. 11 Morphology of weld bead 1

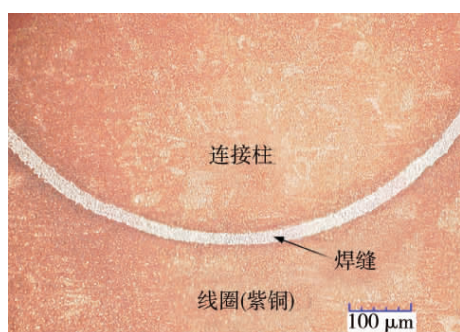


图 12 焊缝 2 的组织形貌

Fig. 12 Morphology of weld bead 2

## 2.5 励磁绕组的成型

如图 13 所示是关于多层线圈焊接完成之后的相关细节,可见线圈排列紧凑且整齐,相邻两层

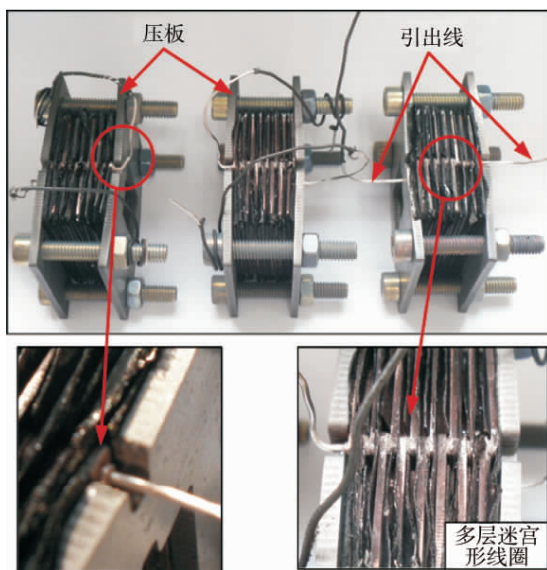


图 13 多层迷宫形线圈焊接实物细节图

Fig. 13 Detailed map of welded multilayer maze like coil

迷宫形线圈之间由云母纸隔开保证层间绝缘,同时作了一些处理,保证引出线能够和线圈接头孔之间保持良好的焊接效果。

完成了线圈焊接之后,将所选用的耐高温绝缘材料涂刷在多匝线圈形成的内腔和外表面,放入烘箱中固化,形成内层绝缘体和外层绝缘体,线圈被耐高温绝缘材料封装成一个整体,如图 14 所示。

在进行常温、高温悬浮试验之前,对已经加工成型的迷宫形励磁绕组进行了相关电学和物理化学性能测试,试验结果表明:线圈层间、匝间绝缘良好,且封装材料坚固、热膨胀小,可以尝试进行悬浮试验。

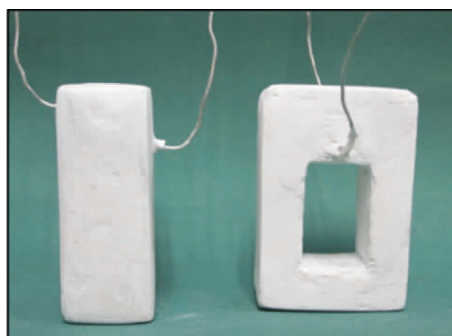


图 14 封装成型的迷宫形励磁绕组

Fig. 14 Packaged maze like exciting winding

## 3 迷宫形励磁绕组悬浮试验

### 3.1 单自由度高温磁悬浮轴承试验装置简介

为了检验加工的新型迷宫形绕组的整体励磁性能,本文采用了一套单自由度高温磁悬浮轴承试验台来进行测试,如图 15 所示是该试验台的原理简图,此试验台单边保护间隙为 0.2 mm,磁悬浮轴承磁极与被悬浮物体的单边间隙为 0.35 mm,所选用的位移传感器是差动变压器式位移传感器,该传感器由南京航空航天大学磁悬浮技术与应用研究所开发研制,可以用于 550 °C 高温环境,且性能良好,差动变压器式传感器铁心与被悬浮物体的单边间隙为 0.8 mm<sup>[17]</sup>。

如图 16 所示是该单自由度高温磁悬浮轴承试验台的实物装置图。

### 3.2 单自由度高温磁悬浮轴承悬浮试验

在常温稳定悬浮超过 8 h 后,对该系统进行 550 °C 高温悬浮试验,以检验迷宫形励磁绕组的常温性能。

如图 17 所示,系统静态悬浮稳定,高温 550 °C

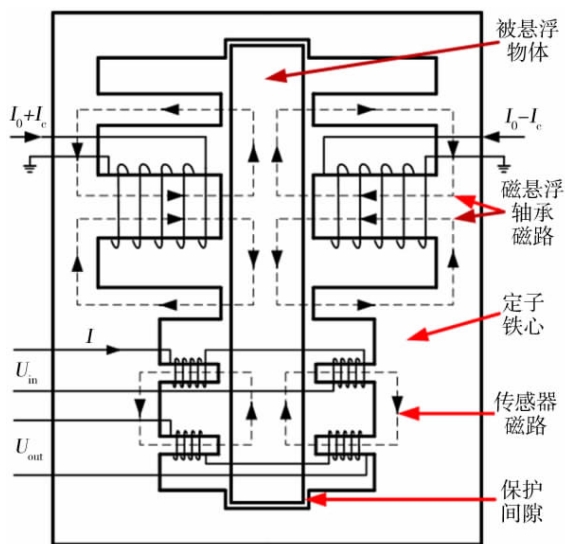


图 15 单自由度高温磁悬浮轴承试验台原理简图

Fig. 15 Principle drawing of one degree-of-freedom HTAMB test bed

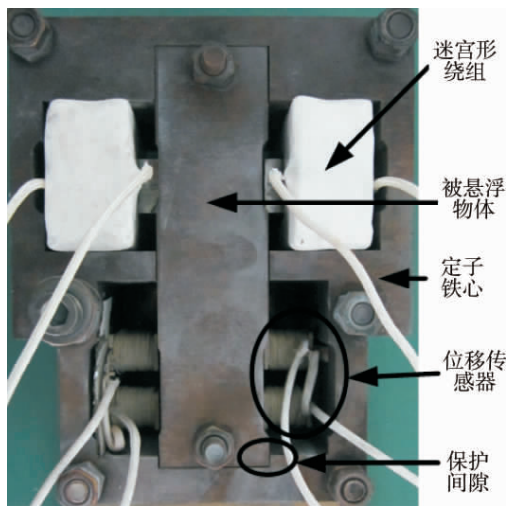


图 16 单自由度高温磁悬浮轴承试验台

Fig. 16 Test bed of one degree-of-freedom HTAMB

时位移曲线波动量小于 100 mV,说明被悬浮物体振动峰峰值小于  $8\mu\text{m}$  (位移传感器的灵敏度为  $12.5\text{mV}/\mu\text{m}$ ),悬浮稳定性能良好。

接着,在  $550^\circ\text{C}$  温度下,对该系统施加激振干扰信号,以模拟被悬浮物体在高速旋转环境下的动态悬浮情况。用信号发生器给功率放大器的信号输入端加入一个  $\pm 1\text{V}$  的正弦波信号,然后记录被悬浮物体的位移信号和绕组中的电流信号。

如图 18 所示,  $550^\circ\text{C}$  时激振信号频率在 500 Hz 时位移曲线波动量为 400 mV,说明被悬浮物体的振动峰峰值为  $32\mu\text{m}$ ,被悬浮物体仍能够稳定悬浮。

综上所述,将迷宫形绕组作为单自由度磁悬

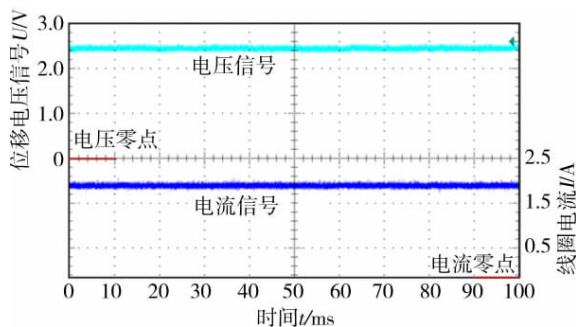
图 17 高温  $550^\circ\text{C}$  时的静态悬浮振动曲线

Fig. 17 Vibration curve of static levitation at  $550^\circ\text{C}$

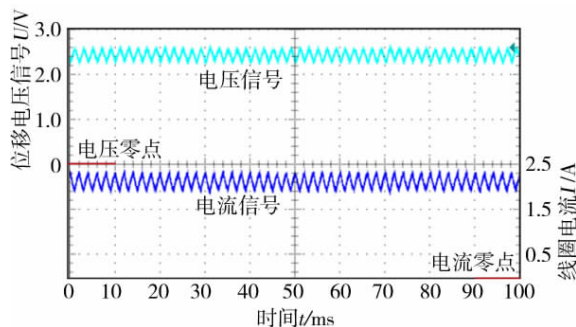
图 18 高温  $550^\circ\text{C}$  时的加以 500 Hz 激振悬浮振动曲线

Fig. 18 Vibration curve of excited levitation at the frequency of 500 Hz at  $550^\circ\text{C}$

浮轴承试验台的励磁绕组,成功实现了高温磁悬浮轴承系统在  $550^\circ\text{C}$  高温环境中稳定悬浮超过 20 h。

## 4 结 论

本文提出了一种新型迷宫形线圈和绕组的设想,并通过电火花线切割加工出单层线圈;成功地在线圈匝间和层间均匀地填充了耐高温的绝缘材料;使用真空钎焊工艺将多层线圈焊接成一个整体;并用绝缘材料将其封装成整体励磁绕组;经过常温和高温试验,成功实现了单自由度磁悬浮轴承系统在  $550^\circ\text{C}$  稳定悬浮超过 20 h。最后对经过悬浮试验之后的迷宫形绕组内部结构和形貌进行了观察,绕组外层绝缘体出现了一定程度的裂纹,因此,后续将会重点对外层绝缘体的封装材料进行研究。本文所做工作将为高温磁悬浮轴承系统的研究奠定一定的理论和实验基础。

## 参考文献:

[1] 梁春华. 欧美积极开展多电发动机研究[J]. 国际航空,

- 2009(5):61-63.
- LIANG Chunhua. More electric engines in the west[J]. International Aviation, 2009(5):61-63. (in Chinese)
- [2] Montague G, Jansen M, Ebihara B, et al. Design and fabrication of high-temperature radial magnetic bearing for turbomachinery[R]. NASA/TM-2003-212300, 2003.
- [3] Mutlu I H, Celik E, Hascicek Y S. High temperature insulation coatings and their electrical properties for HTS/LTS conductors[J]. Physica C: Superconductivity, 2002, 370(2):113-124.
- [4] WANG Hui, XU Chuanxiang, Dang M O. Effect of organic electronic insulation material on the sustained voltage of diode at high Temperature[C]// Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials. Tokyo: IEEE, 1995:101-104.
- [5] Iannello V. Magnetic bearing systems for gas turbine engines[R]. Washington: MAG'95, 1995.
- [6] Kelleher W P, Kondoleon A S. A magnetic bearing suspension system for high temperature gas turbine application [C]// Proceedings of International Gas Turbine & Aero-engine Congress & Exhibition. Orlando. Magnetic Actuator Developemind, 1997:15-24.
- [7] Scholten J R. A magnetic bearing suspension system for high temperature gas turbine application-control system design[R]. Florida: ASME Turbo Expo'97, 1997.
- [8] 徐龙祥, 周波. 磁浮多电航空发动机的研究现状及关键技术[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1):51-59.
- XU Longxiang, ZHOU Bo. The current situation and development trend for more-electric gas turbine engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1):51-59. (in Chinese)
- nese)
- [9] 徐龙祥, 纪历, 鲁旭东. 高温磁悬浮轴承励磁线圈结构及其生产方法: 中国, 201110190914. 5[P]. 2012-02-22.
- [10] 雍耀维. 电火花切割与成型加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [11] 陈琦, 彭兆弟. 实用铸造手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [12] 成虹. 冲压工艺与冲模设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [13] 季凌飞. 激光烧结氧化物基体功能陶瓷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [14] 李明辉, 杨晓欣. 数控电火花线切割加工工艺及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [15] 吴小俊, 童彦刚. 无铅钎焊材料的研究[J]. 电焊机, 2008, 38(1):77-80.
- WU Xiaojun, TONG Yangang. Current research of lead-free solder [J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(1):77-80. (in Chinese)
- [16] 王福田, 王天宇. 银基钎料真空钎焊效果的研究[J]. 电焊机, 2001, 31(6):31-33.
- WANG Futian, WANG Tianyu. Study on vacuum brazing with silver based solder [J]. Electric Welding Machine, 2001, 31(6):31-33. (in Chinese)
- [17] 金超武. 高温磁悬浮轴承若干关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- JIN Chaowu. Research on some key technologies of high temperature active magnetic bearing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)