

2.5 万次振动挑战！热浸锡工艺 让汽车电连接器“高温不罢工”

Fretting Friction Test and Research of Hot-dip Tinning Process on Automotive Electric Connectors

供稿|沙辉¹，罗祖国² / SHA Hui¹, LUO Zuguo²

内 容 导 读

汽车电连接器作为车辆电气系统的“神经枢纽”，长期面临振动与高温的双重考验，近年频发的新能源车安全事故更凸显其可靠性至关重要。电连接器常因振动引发微小摩擦，导致接触表面氧化、电阻增大，从而导致的“信号罢工”，轻则引发功能异常，重则导致车辆失控或自燃风险。本研究针对该痛点，模拟汽车运行工况下（125℃高温）对热浸锡工艺电连接器展开“耐力测试”。结果显示 2.5 万次微小振动摩擦后，其接触电阻始终稳定低于 100 mΩ，电接触保持稳定。这项研究可为同类型汽车电连接器的设计与验证提供参考。

微动是指在振动环境下，发生在近似紧配合的接触表面之间的微米量级振幅的运动^[1]。电连接器上的微动主要是由接触材料的热膨胀差和机械扰动（如重复性振动）引起。微动摩擦试验是一种测试材料表面抗磨损性能的实验方法，它通常用于评估各种材料在受到微小、持续或间歇的摩擦力作用下的性能。其基本原理是在 2 个试验材料或产品的表面间，施加一定的压力或负荷，然后通过在其中一个材料或产品的表面施加一定的旋转或线性运动，使两产品表面之间产生相对运动，这种相对运动导致材料表面之间的摩擦和磨损。微动摩擦试验通常用于评估材料或产品表面涂层的耐磨性、耐腐蚀性和耐疲劳性能等。

在汽车电连接器上，微动摩擦对电连接器的最

主要影响是摩擦腐蚀过程中会增加电连接器间的接触电阻，从而导致连接器电连接的可靠性降低甚至失效。电连接器端子接触电阻增加的主要原因是连接器端子和 pin 针间的接触界面因微动摩擦而产生了导电性较差或不导电的氧化物，这些氧化物在微运动过程中产生了堆积，从而减低了连接器接触界面的导电性，使接触电阻变大，接触可靠性降低。本文主要研究了采用热浸镀锡电镀工艺的汽车电连接器公母端子在 125℃ 的高温环境下，微动摩擦对该连接器接触电阻的影响情况。

微动理论

微动理论是一种涉及微小移动和相互摩擦的理论，它适用于各种系统，包括机械系统、电气系统

和液压系统等。微动理论可以用来描述这些系统中的微小振动和摩擦现象，以及它们对系统性能的影响。在机械系统中，微动理论可以用来描述机器的振动和微小移动，这些微小移动可能引起机器的疲劳和磨损，例如车身上电连接器的接触端子在使用过程中其接触区域的镀层就会因为微小移动而产生磨损、氧化，从而影响连接器的接触电阻。微动理论的核心是研究系统中的力和运动的关系，以及摩擦和振动对系统性能的影响。

实际上，早在上个世纪的 80 年代后期，Berthier 等^[2] 和 Vincent 等^[3] 对微动摩擦过程展开了相关研究，仔细研究了连接器接触界面的运动与调节机理，并最终提出了“微动三体理论”。该微动理论认为，磨屑的产生可看成是 2 个连续和同时发生的过程，即磨屑的形成和磨屑的演化^[4]。磨屑的形成是在力和微移动的作用下，接触表面的镀层出现颗粒脱落，并在持续的微动中被碾碎和产生迁移；而磨屑的演化主要是脱落的磨屑颗粒在不断的微动过程中发生了氧化。同时三体理论也认为，微动摩擦过程中第三体（接触摩擦磨损过程中形成的磨屑和颗粒）的出现与存在可以有效减少因粘着所导致的不利影响，第三体的出现能够减少接触表面的相互磨损，起到保护连接物件的接触表面作用^[4-5]。

热浸锡工艺

热浸锡工艺是一种金属表面处理工艺，它是将

金属材料浸入熔融的锡池中，使锡覆盖在金属表面，以提高金属的耐腐蚀性和焊接性能。通常情况下，热浸锡工艺的具体步骤如下。

（1）准备材料：选择适合的热浸锡材料，通常为金属材料，如铜材，铝材等。

（2）熔融锡：将锡加热至熔融状态，形成锡熔体。

（3）浸入锡熔体：将金属材料浸入熔融的锡熔体中，使金属表面被锡涂覆。

（4）冷却和凝固：将涂覆有锡层的金属材料冷却并凝固。

（5）表面处理：根据需要可以进行一些表面处理，如清洗、磨削等，以进一步改善金属材料的耐腐蚀性和焊接性能。

热浸镀锡电镀是将薄铜板（也称基材）通过脱脂池，清除铜板基材表面的油脂；再通过干燥室进行干燥，去掉铜板基材表面的水分；接着通过助焊室进行助焊处理，然后再将铜板基材送进液态的锡炉，镀锡完成后通过热风刀装置或毛刷子来调平并控制镀锡层的厚度，再由冷却装置进行冷却处理，最后经过镀层厚度检测装置检测电镀层的厚度后得到热浸镀锡原始铜板材。热浸镀锡原始板材经过冲压等工序后制成为汽车电连接器的接触端子。本文研究的汽车电连接器的接触端子的热浸镀锡工艺过程如图 1 所示。

热浸锡电镀工艺的主要特点是锡镀层与铜板的

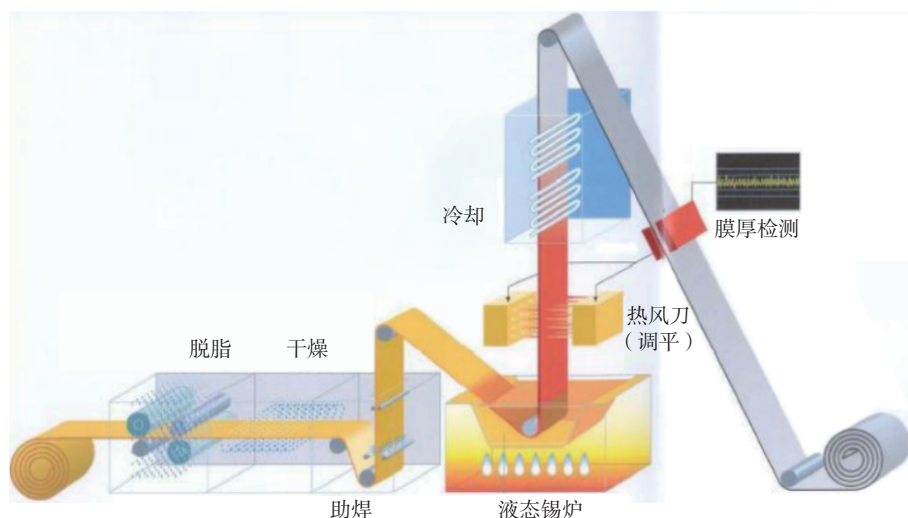


图 1 热浸锡加工原理图

结合力好、拥有光亮的结晶且不易变色、镀层耐腐蚀性强，同时还具有电镀效率高、污染小、成本低等优点。基于上述优点，使用热浸锡铜板冲制而成的电连接器端子在汽车行业上有着广泛应用。

微动摩擦试验及结果

试验样品

电池管理系统（BMS）连接器是一种在汽车中使用的连接器，用于连接电池单元、传感器和执行器等组件，以实现电压、电流和温度等参数的采集及控制信号的传输。因此，对连接器的接触可靠性提出了更高的要求。本文重点对应用在汽车电池管理系统的某款电连接器（简称 BMS 连接器）进行了在高温条件下的微动摩擦试验与研究。

该 BMS 连接器接触端子表面镀层的制备使用热浸锡工艺，其镀层厚度为 $2.032\ \mu\text{m}$ 。端子和 pin 针装配后的状态见图 2。开始测试前，需要仔细检查样品是否有缺陷、磨损或脏污等情况；确认样品没问题后可以连接测试电阻的接线和设备，最后再固定到微动试验机上。

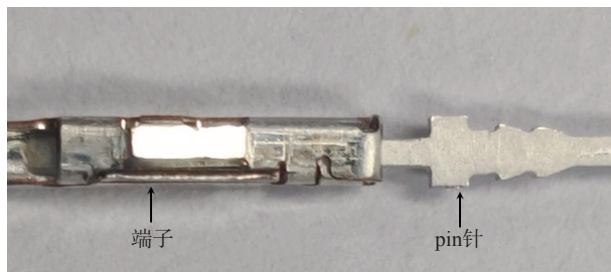


图 2 试验连接端子及 pin 针

试验过程

根据该电连接器在汽车上安装位置的环境情况、电连接器的应用工况以及汽车电连接器系统性能规范，本次微动摩擦试验的环境温度选定为汽车电连接试验温度 T3 等级，即 $125\ ^\circ\text{C}$ 。微动摩擦试验条件设定为电连接器 2 个端子之间的微动相对位移量 $50\ \mu\text{m}$ ，微动的循环频率 $1\ \text{Hz}$ ，电流载荷设置为 $10\ \text{mA}$ ，电压为 $100\ \text{mV}$ ，检测连接器接触电阻的频率 $4\ \text{Hz}$ 。参考文献 [6]，将连接器接触电阻的上限设定为 $100\ \text{m}\Omega$ ，即在试验中连接器的接触电阻如果超过 $100\ \text{m}\Omega$ ，则假定该连接器电连接的可靠性失效，

可以结束测试。

微动摩擦试验常见的微动试验机有机械式、电磁式和电液伺服式 3 种^[7]。机械式微动摩擦试验机通常使用杠杆或丝杆等机械结构实现微动运动，这种试验机的优点是结构和操作都比较简单，但运动的精度和稳定性相对较低。电磁式微动摩擦试验机采用电磁感应原理来实现微动运动，具有较好的精度和稳定性，但因为具有电源模块和控制电路模块，相比之下，其研发制造成本较高。电液伺服式微动摩擦试验机则是一款比较先进的微动试验设备，采用的是液压伺服系统完成微动运动，与前面 2 种试验机相比，精度最高、稳定性最好、响应速度快但制造成本高。

因为汽车上使用的连接器各规格和种类复杂繁多，不同单位的产品规格不尽相同，目前市面上没有统一适用的通用型汽车连接器微动试验机，所以目前基本都是使用自行开发的微动试验机。本文进行的微动摩擦试验便是使用自行开发的微动试验机，该微动试验机如图 3 所示。由于该试验机本身不具有发热模块，因此模拟高温环境条件下的微动摩擦试验需结合高温试验箱来完成。

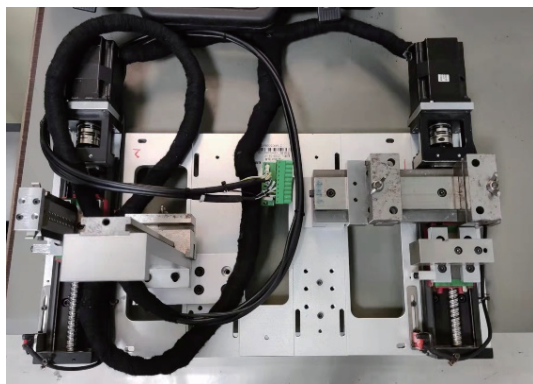


图 3 微动试验机

微动摩擦试验开始前，在微动摩擦试验机上安装好测试端子，然后将微动摩擦试验机放进测试用的高温试验箱，试验机的控制模块放在试验箱外，设置好温度条件及微动的条件后即可开始试验。使用高精度电阻测试设备全程实时检测连接器的接触电阻。试验结束后，将检测得到的电阻数据进行整理得到该连接器接触电阻的变化曲线如图 4 所示。根据接触电阻变化曲线可以分析该电连接器在试验

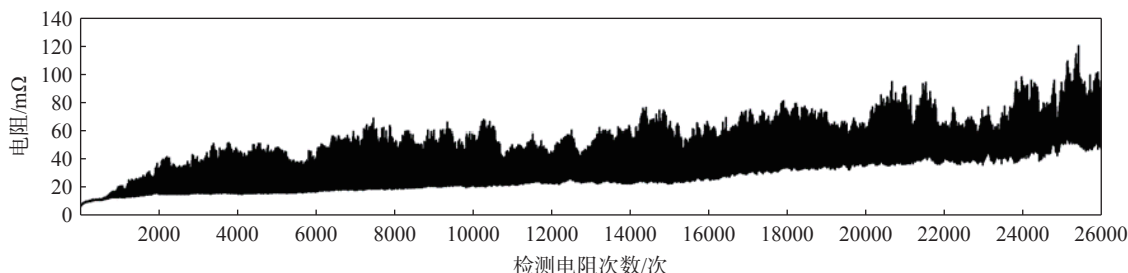


图4 高温下微动摩擦试验动态电阻曲线

不同阶段的电连接情况。

试验结果

通过动态接触电阻曲线可以看到，在初始阶段，连接器的接触电阻为 $7\text{ m}\Omega$ 左右，随着微动试验的进行，接触电阻逐渐升高，但始终保持在一个较低的状态，在小于 1000 次测试时接触电阻均保持在 $20\text{ m}\Omega$ 以下，如图 4 所示。在经历 1000 次微动之后，该连接器的接触电阻开始了明显的波动攀升阶段，且接触电阻的波动变得显著。接触电阻的变化现象和文献 [3] 的研究基本一致，初始阶段连接器的接触电阻阻值均比较低且稳定；随着测试的进行，连接器的接触电阻开始逐渐升高。这是因为微动摩擦机制（微动三体理论）开始启动，接触区域镀锡层逐渐磨损脱落，不断的发生碾碎和迁移，高温条件下也加剧了磨屑颗粒氧化，接触界面开始由单纯的表面镀层金属间的接触逐步演变为混合了镀层磨

屑和磨屑氧化物的多种金属及其氧化物间的接触。氧化的颗粒物和摩擦碎屑的产生降低了连接器接触界面的导电能力，从而导致连接器的接触电阻不断变化且持续变大。在 2.5 万次微动后其接触电阻阻值开始超过 $100\text{ m}\Omega$ ，即在 2.5 万次微动下该连接器的电接触依然可靠。

在持续不断的循环运动下，连接器的电接触不断地在氧化层和氧化层剥落所形成的新接触界面中进行，检测得到的接触电阻就出现了时高时低的波动状态。试验后端子和 pin 针接触点的磨损情况见图 5。观察发现 pin 针的触点处因长时间的磨损形成一个明显的接触凹坑，凹坑表面存在明显的磨屑堆积与氧化变黑现象。端子触点表层有明显的磨损脱落，触点外圈露出微白色，为锡的颜色。这是因为连接器在分离时氧化层脱落在 Pin 针上，中心处存在的黑点表明端子触点处也有磨屑脱落和小量磨屑物的堆积氧化。

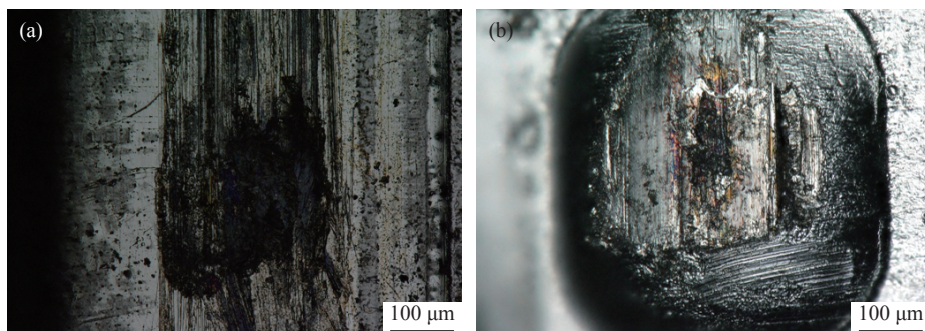


图5 试验后 Pin 针及端子接触点的磨损状态: (a) Pin 针触点; (b) 端子触点

结束语

对微动三体理论进行了简单介绍，分析了在汽车上经常用到的热浸镀锡电镀工艺的特点，并通过自行研制的微动试验机对某汽车 BMS 电连接器进行了高温条件下的微动摩擦试验。微动试验发现电连

接器触点处存在明显的磨屑堆积与氧化变黑现象，微动过程中接触电阻呈现出随着微动进行而波动上升的变化趋势，与微动三体理论基本符合。在微动摩擦试验的条件下，试验中使用的热浸锡电镀工艺的汽车电连接器在 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温条件下进行了 2.5 万

次微动后其接触电阻阻值依然小于 100 mΩ, 即在 2.5 万次微动下该连接器的电接触依然可靠。该试验可为同类型汽车电连接器设计与验证提供参考。

参考文献

- [1] 袁新璐. CuMg0.4 铜镁合金微动磨损机理研究 [学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022
- [2] Berthier Y, Vincent L, Godet M. Velocity accommodation in fretting. *Wear*, 1988, 125(1/2): 25
- [3] Vincent L, Berthier Y, Godet M. Testing methods in fretting fatigue: A critical appraisal // *Symposium on Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment*. San Antonio, 1990, 33
- [4] 何森. 基于强化研磨加工的 GCr15 轴承钢球抗微动磨损性能研究 [学位论文]. 广州: 广州大学, 2023
- [5] 李磊. 微动摩擦磨损的试验机研制及试验研究 [学位论文]. 南

京: 南京航空航天大学, 2010

- [6] Ren W B, Wang P, Fu Y H, et al. Effects of temperature on fretting corrosion behaviors of gold-plated copper alloy electrical contacts. *Tribol Int*, 2015, 83: 1
- [7] 任育博. 随机条件下 Zr-4 合金管的双向复合微动磨损特性研究 [学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022

作者简介: 沙辉 (1991—), 男, 广西贵港人, 研究生, 陆军特种作战学院教师, 研究方向: 车辆维修。通信地址: 广西桂林市象山区崇信路 33 号; E-mail: shahui1025@163.com。

罗祖国 (1979—), 男, 广西河池人, 胜蓝科技股份有限公司研发部副经理, 高级研发工程师, 研究方向: 电连接器设计与开发。通信地址: 广东东莞市东坑镇横东路 225 号; E-mail: luozuguo@jctc.cn。