

电连接器微动腐蚀损伤行为与机理研究综述

郁大照¹, 刘琦^{1,2}, 冯利军³, 程贤斌^{1,4}

(1.海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264000; 2.92279 部队, 山东 烟台 264000;
3.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 4.92095 部队, 浙江 台州 318000)

摘 要: 电连接器在服役期间, 其电接触界面很容易受到振动和微位移的影响, 并在腐蚀气氛的作用下, 产生微动腐蚀损伤。当接触电阻值 (Electrical contact resistance, ECR) 超过一定阈值时, 即判定为接触失效。人们对电接触微动腐蚀问题的认识过程是随着工业社会的发展和研究手段的进步而不断逐步深入的, 因此从行为和机理两个方面综述了微动腐蚀研究的发展和现状。为了降低 ECR, 提高电接触的耐久性, 研究人员围绕材料、镀层种类和厚度、接触力、振幅、频率、温度、相对湿度、气体氛围等因素对微动腐蚀的影响做了大量的试验和分析工作, 介绍了其中比较活跃的研究团队以及他们的主要工作。分别详细介绍了 Antler 和 Bryant 描述的微动腐蚀模型, 4 种不同微动滑移状态的产生机制和微观形貌分析, 进而对 ECR 产生的影响。由于电连接器受到振动应力、温度应力和电应力的综合作用, 在内部接触件上发生电-热-机械多物理场耦合作用, 故综述了材料性能与行为、接触条件和环境条件 3 个方面 10 个因素的影响作用。还归纳总结了应用于电接触微动腐蚀研究的主要方法, 最后从多因素耦合作用、海洋环境影响和射频连接器应用 3 个角度探讨了未来研究的重点方向。

关键词: 电连接器; 电接触; 微动; 微动腐蚀; ECR

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0233-13

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.023

Review on the Behavior and Mechanism of Fretting Corrosion Damage of Electrical Connectors

YU Da-zhao¹, LIU Qi^{1,2}, FENG Li-jun³, CHENG Xian-bin^{1,4}

(1.School of Basic Sciences for Aviation, Naval Aviation University, Yantai 264000, China;
2.Unit 92279 of the PLA, Yantai 264000, China; 3.Southwest Institute of Technology and Engineering,
Chongqing 400039, China; 4.Unit 92095 of the PLA, Taizhou 318000, China)

ABSTRACT: During the service period of electrical connectors, the electrical contact interface is subjected to vibration and micro displacement easily, and under the action of corrosive atmosphere, fretting corrosion damage will occur. When the value of Electrical Contact Resistance (ECR) exceeds a certain threshold, it is determined to be a contact failure. With the development of industrial society and the progress of research methods, people's understanding of electrical contact fretting corrosion has

收稿日期: 2021-01-18; 修订日期: 2021-04-28

Received: 2021-01-18; Revised: 2021-04-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51375490)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51375490)

作者简介: 郁大照 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为腐蚀防护与控制。

Biography: YU Da-zhao (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion protection and control.

引文格式: 郁大照, 刘琦, 冯利军, 等. 电连接器微动腐蚀损伤行为与机理研究综述[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 233-245.

YU Da-zhao, LIU Qi, FENG Li-jun, et al. Review on the behavior and mechanism of fretting corrosion damage of electrical connectors[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 233-245.

been gradually deepening. Therefore, the development and status of research on fretting corrosion from two aspects of behavior and mechanism was reviewed. In order to reduce the ECR, and improve the durability of electrical contacts, a lot of test and analysis has been done involving materials, coating type and thickness, contact force, amplitude, frequency, temperature, relative humidity and gas atmosphere and other factors, the more active research team and authors with their main job was introduced. The fretting corrosion model described by Antler and Bryant was introduced respectively, the formation mechanism of four different fretting regimes and the micro-morphology analysis were introduced in detail, and the influence on ECR was further discussed. Ten main factors affecting the fretting corrosion of electrical connectors were summarized from three aspects: material properties and behavior, contact conditions and environmental conditions. The vibration stress, temperature stress and electrical stress act on the electrical connector, which causes the complex electrical-thermal-mechanical multi-physical coupling effect in the internal contact parts of the electrical connector. The main methods used in the study of electrical contact fretting corrosion was also summarized, and the key research directions in the future was discussed from three perspectives: coupling effect of multiple factors, influence of marine environment and application of RF connectors.

KEY WORDS: electrical connector; electrical contact; fretting; fretting corrosion; ECR

电连接器是广泛应用于配电或传输信号的重要电气部件,其连接的性能指标、质量和可靠性水平对整个设备或系统具有不可忽视的制约和影响作用。电连接器看似结构简单,但其失效概率却是最高,现场数据显示,连接器的退化和故障造成了30%~60%的电接触问题^[1]。电连接器的核心,是以确保电路连续为目的的电气/电子设备的载流元件之间的界面以及包含该界面的部件,定义为电接触^[2]。当电连接器处于振动、冲击或温度变化等环境时,接触件之间可能出现断路、接触不良或瞬间断电等失效问题^[3]。典型案例^[4]为,将传输高速信号的铜基接触件暴露于高接触压力下时,会产生黑色的细小侵蚀粉末(CuO),并可能在某一瞬间填充于接触表面的触点之间,形成一个周期为1 μs的电气断路(MIL-STD-202和GJB360B要求断路不超过10 μs)。在模拟系统中,短时间的开路绝不会被注意到。然而,在高速电子多路传输技术或逻辑电路中,这种开路至少会造成7~10个数据位的信息丢失,从而造成各种各样的问题。比如,汽车的气囊在撞击中可能不会打开,飞机携带的导弹在飞行员按动发射按钮时可能不会点火,而当收到错误的信号时,可能发生导弹坠落或爆炸等灾难。

在机械振动、疲劳载荷、电磁振动或者热循环等交变载荷作用下,名义上相对静止的接触表面之间发生的振幅极小的相对运动(位移幅值一般为微米量级),称之为“微动”^[5]。在电接触领域中,微动主要来源于以下4个方面:1)外界振动以及温度发生的变化^[6];2)电连接材料的热膨胀系数存在差异,导致接触界面匹配状态发生变化;3)工作环境中的电磁力变化,导致连接件的周期性松动,发生界面有规律的摩擦磨损等;4)预紧应力的衰减乃至消失。连接件都存在一个最初的预紧力,以保证良好的导电性能。但是随着触头的使用次数增加,服役时间延长,预紧力会逐渐减弱乃至散失,导致接触界面出现由最初的紧贴状态到逐渐发生界面微幅滑移等现象^[7]。实

验证据表明, 10^{-8} cm (<100 nm) 量级的振幅足以产生微动^[8]。Mindlin^[9]证明了微动发生的最小滑移幅度为:

$$\delta = \frac{[3(2-\nu)(1+\nu)]}{8Ea} \mu P \left[1 - \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{2/3} \right] \quad (1)$$

其中, a 为接触外圆直径, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, P 为法向力, μ 为静态接触表面之间的摩擦系数, T 为切向力 ($T < \mu P$)。

由于微动现象与机理的复杂性,对微动问题的研究又可细分为微动磨损、微动疲劳和微动腐蚀(fretting corrosion) 3个研究方向^[10]。通常研究者根据具体问题的性质和特定的研究目的,对3种微动类型进行区分。当将微动过程与环境介质影响结合考虑时,就形成了一个复杂的涉及机械运动和化学反应等因素共同作用的微动腐蚀问题。所以在分析微动腐蚀过程中,既要考虑材料受到微动和腐蚀影响的单独作用,也要注意它们的相互影响和交互作用。

由于机械、电气和环境条件等因素的影响,微动腐蚀成为电接触件的主要失效机制之一^[1],因此对电接触微动腐蚀研究的全面了解具有重要意义。本文主要综述了电连接器微动腐蚀损伤行为与机理以及主要的研究方法,并提出了未来研究的发展趋势。

1 电连接器微动腐蚀损伤行为与机理

1.1 微动腐蚀损伤行为研究

人们对电接触微动腐蚀问题的认识是随着工业社会的发展逐步深入的,大致可以划分为基础学科建立和学科交叉融合两个阶段。

第一阶段为20世纪初至50年代的基础学科建立阶段。一方面,人们通过机械磨损认识到了微动腐蚀问题的存在及其危害,开始探索微动腐蚀的规律与机理。1939年, Tomlinson等^[11]首先通过试验,研究了

紧密配合接触表面的微动腐蚀特性,并在对现象机理的理论探讨中摒弃了传统的机械磨损理念,提出了可能与疲劳效应密切相关的分子磨损过程。1954 年, Uhigh^[12]认为机械和化学因素共同作用导致了微动腐蚀行为,并概述了可采取的补救措施。另一方面,“电接触”理论迅速发展为一门独立的学科,以 Ragnar Holm 在 1958 年出版《电接触》一书为标志。

第二阶段为 20 世纪 60 年代至今。1964 年 Fairweather 等^[13]报道了微动引起电话继电器和开关的不稳定现象,但微动作用并没有作为导致电连接失效的重要影响因素而受到足够的重视。随着科学技术的发展与工程实践的需要,电接触应用的需求急剧增加,特别是电气电子学的飞速发展对电接触质量和可靠性的要求不断提高,对电接触的应用提出了新的挑战,因此人们对电接触微动腐蚀的危害作用也越来越重视。研究人员围绕影响电连接器微动腐蚀的因素进行了大量工作,主要包括材料、镀层种类和厚度、接触力、振幅、频率、温度、相对湿度、气体氛围等,并试图不断提高电接触的耐久性。这里列举了其中比较活跃的研究团队和作者以及他们的主要工作。

德国东威斯特法伦立珀大学的 Song 等^[14-18]通过试验测定接触电阻值 (ECR) 和使用寿命的方式,研究了多种因素对镀锡、镀镍和镀银电触点微动腐蚀行为的影响。该团队通过试验证明,增加真空度会阻碍磨屑氧化物的形成过程,使镀锡电触点的微动寿命被延长,并测量计算了真空度与寿命的定量对应关系。该团队还测量计算了不同温度、幅值、法向力、镀层厚度和样品几何形状对电触点寿命的影响。此外,该团队还从微动腐蚀试验寿命、磨损深度、接触区的元素分布和磨损过程等方面,研究了第三体对电触点耐磨性和电性能的影响。

法国里昂中央学院的 S. Fouvry 等^[19-22]运用典型实验和分析模型相结合的方法,研究了不同镀层电触点的失效行为和耐久性,并量化描述了微动滑动振幅、法向力、材料性能以及镀层厚度等因素的影响。该团队在试验中观察到,贵金属镀层可以缓解氧化碎片层的形成,但只能延迟电触点的磨损变形,磨损到基底金属后,会再次观察到高且不稳定的电阻。该团队还提出,从部分滑移状态到全局滑移状态对微动磨损寿命有着从无限到有限的影响。因此,为了预测连接器的电气性能,确定电接触之间的临界跃迁幅度 δ_c 十分必要。

北京邮电大学的许良君、芦娜等^[2]翻译出版了电接触研究专著《电接触理论、应用与技术》,填补了国内没有全面、深入介绍电接触理论著作的空白,专著中包含了有关微动腐蚀的内容。

哈尔滨工业大学的任万滨等^[23-26]利用自制的电动振动试验台对微动导致的电接触失效行为进行了系列研究。该团队从微动腐蚀的诱因之一——振动环

境着手,对不同振幅和振动频率条件组合下 ECR 的响应特性进行了试验研究,证实了 ECR 的瞬态波动频率与振动频率相同,且只有当振动幅值超过 0.1 mm 量级时,ECR 才有显著变化。在温度对镀金触点的影响研究中发现,环境温度、摩擦产生的热以及电流引起的焦耳热对触点微动腐蚀的影响是一把双刃剑:额外的热量一方面使镀层软化,增加有效接触面积;另一方面提高了总氧化腐蚀速率。

西南交通大学的刘新龙、蔡振兵等^[7,27-30]利用自制的压电陶瓷微动试验机,研究了位移幅值、法向载荷、电流、温度以及不同气氛、材料对微动腐蚀行为的影响。该团队在研究温度对铜触点的影响中发现,随着温度的升高,磨损中材料的粘附和转移减少,有利于保持电触点有效接触面积,而阻碍 ECR 升高,另一方面,粘附与氧化存在竞争机制,氧化物增多又增加了膜层电阻。该团队还对不同铜-石墨比复合材料的耐磨性和电接触耐久性进行了研究,发现扁平试样的石墨颗粒分层,并在接触面之间形成石墨摩擦膜,该膜具有优异的润滑性能,但提高石墨含量的同时会导致电导率降低,因此开发此复合材料的关键因素在于寻找最优的铜-石墨比。

1.2 微动腐蚀损伤机理研究

电连接器的接触件必须导通且接触可靠,其接触状态的变化可通过 ECR 来进行判断,超过一定阈值即可判定为接触失效^[31]。

接触表面在微观上是粗糙不平的,两个工程物体之间的接触发生在两个表面的凸体机械接触所产生的离散点上。对于所有固体材料,在很大范围的接触载荷下,其真实接触面积仅为公称接触面积的一小部分。因此,电流流过的“a 斑点 (a-spots)”面积要比实际接触面积小得多,如图 1 所示。当接触界面接近时,电流线变得越来越扭曲,而流线束在一起通过单独的 a 斑点时,a 斑点对电流的收缩使作用于导电的材料体积减小,从而增加了电阻。这种由于电流线通过 a 斑点时收缩而增加的电阻定义为收缩电阻。

在配合元件为金属的电接口中,接触面通常覆盖

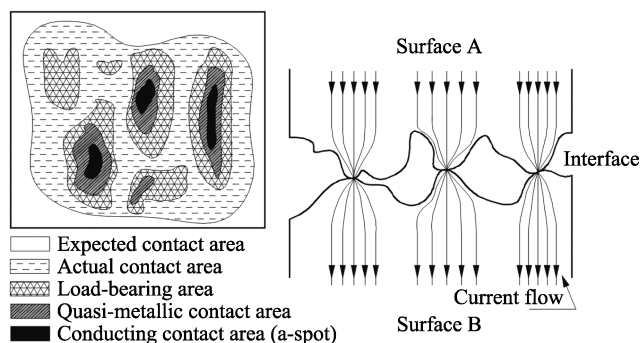


图 1 实际接触面积和电流收缩的示意图^[2]

Fig.1 Schematic diagram of actual contact area and electric current constriction^[2]

有氧化物或其他电绝缘层。一般来说,只有当金属对金属的触点真正形成接触时,即在接触表面的粗糙处电绝缘膜破裂或移位时,界面才具有导电性。通常,接触表面存在污染物膜,膜层会导致 a 斑点的电阻增加,使其超过收缩电阻值。由于接触表面污染膜的阻碍作用而增加的电阻称为膜层电阻。收缩电阻与膜层电阻之和称为接触电阻 (ECR) [2]。

1985 年, Antler^[32]对自己和其他研究者发表的微动研究成果作出了批判性评论,包括微动机理、试验参数、不同材料的微动行为以及润滑剂的作用等方面。Antler 在其中描述的微动腐蚀模型如图 2 所示,最早在 1955 年 Waterhouse 等^[33]也曾发表过与之相似

的描述。锡铅焊料之间的微动腐蚀过程为:首先,接触副之间的相对运动使金属表面磨损产生碎屑,碎屑随即被氧化;之后,新旧氧化物在力和运动的作用下变得致密并累积, ECR 增大;长期使用后,会形成一层较厚的绝缘层,接触力不能再破坏这层绝缘层,导致 ECR 显著增加,电触点不再可靠工作。

1993 年, Bryant^[34]在 Antler 描述的微动腐蚀模型基础上做了进一步的研究。Bryant 描述的模型假设微动振动分离了接触表面,使原始金属 a 斑点暴露在环境污染物的侵蚀下,具体过程如图 3 所示。通过分析得出, ECR 是随时间单调增加的,且最初增长缓慢,随后迅速增长。

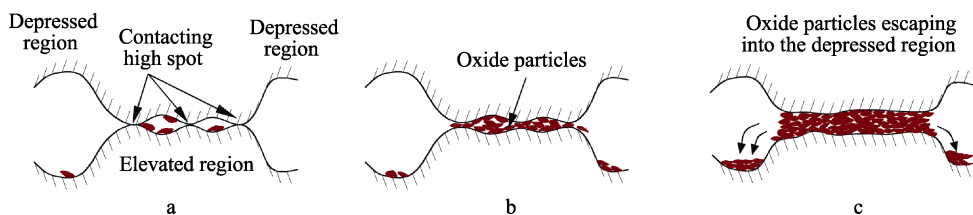


图 2 Antler 描述的微动腐蚀模型示意图^[32]

Fig.2 Schematic diagram of fretting corrosion model described by Antler^[32]

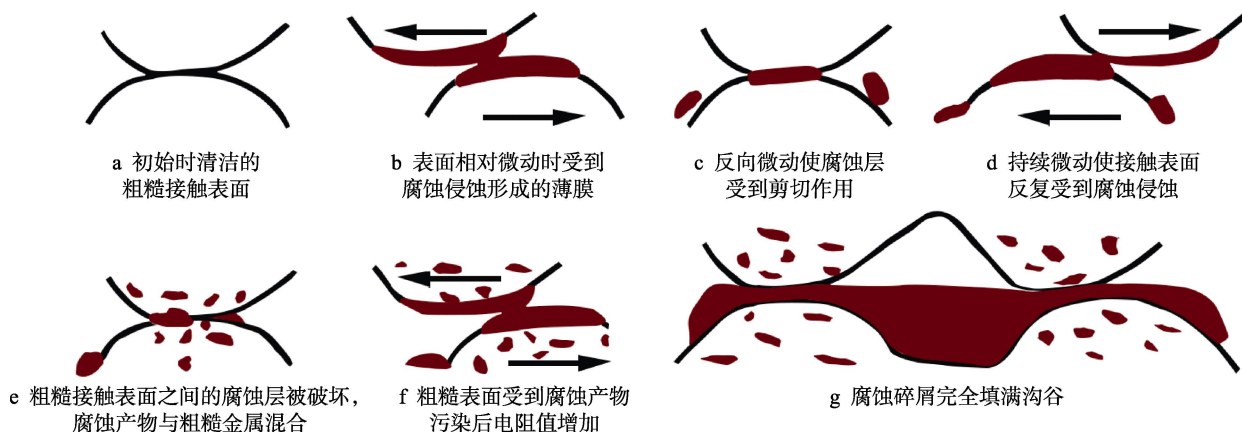


图 3 Bryant 描述的微动腐蚀模型示意图^[34]

Fig.3 Schematic diagram of fretting corrosion model described by Bryant^[34]: a) rough contact surface cleaned initially; b) film formed by corrosion erosion when the surface is relatively fretting; c) reverse fretting causes the corrosion layer to be sheared; d) continuous fretting causes repeated corrosion and erosion on the contact surface; e) the corrosion layer between the rough contact surfaces is damaged, and the corrosion products are mixed with the rough metal; f) the resistance value increases after the rough surface is polluted by corrosion products; g) corrosion debris completely fills the valley

Antler 和 Bryant 描述的微动腐蚀模型,代表了 20 世纪人们对电接触微动腐蚀的经典认知。随着试验设备、测量体系、失效分析技术和计算机仿真技术的发展进步,对微动腐蚀的研究方法更加成熟多样。借助扫描电子显微镜 (SEM) 和能量色散 X 射线光谱仪 (EDX) 等微观分析手段,目前受到普遍认可和使用的观点是:不同的微动磨损状态是影响 ECR 波动的直接原因。

当平行于界面方向施加的力超过配合表面之间的摩擦力时,接触界面就会发生微动运动,如图 4 所示。假设发生了振幅为 δ 的界面位移, δ 的大小决定了

接触表面损伤状态,进而影响收缩电阻和膜层电阻。

1) 粘着状态。此状态下,触面间的宏观位移主要由两部件表层区域的弹性变形所调节。粗糙表面的凸体粘着连接,使接触界面保持粘着接触状态,位移较大时则会引起微动方向上的塑性变形和剪切作用。根据材料、接触几何和其他因素,大约 $1\ \mu\text{m}$ 的运动可能会发生粘着状态。虽然在初始阶段基本上不会产生可检测的表面损伤,但由于往复运动可能会导致表面疲劳裂纹的形核和扩展,特别是沿着接触区域的边缘,这将导致磨损碎片的形成,因此不能将粘着状态视为非微动。

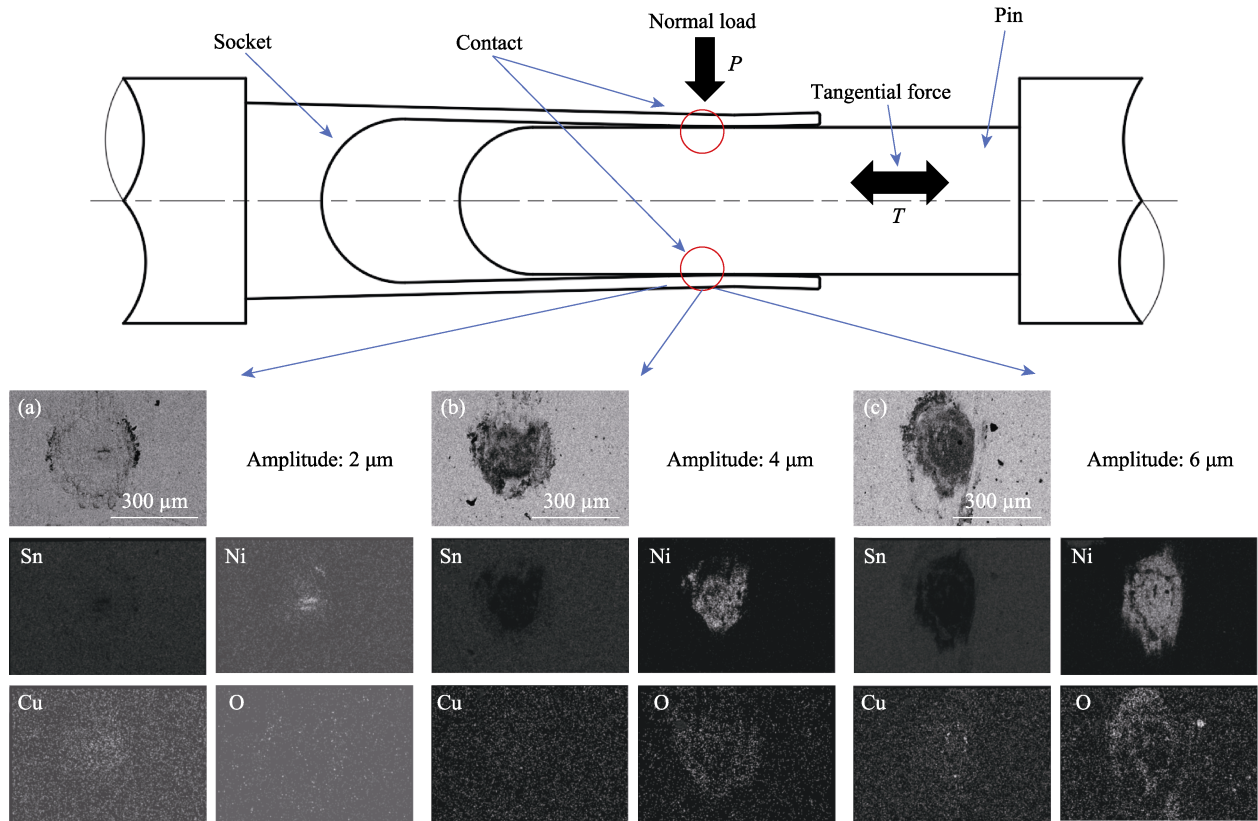


图 4 电连接器微动腐蚀 SEM 形貌和 EDX 元素图^[35]
Fig.4 SEM image and EDX elements maps of electrical connectors^[35]

2) 部分滑移状态。如果 δ 小于临界跃迁幅度 δ_i ，如图 5 中虚线左侧所示，滑动状态被定义为部分滑移。在这种界面运动条件下，有一环形区域将内部粘着区域包围，该环发生滑移但位移很小，力-位移曲线类似于以原点为中心的滞回曲线。在小的局部滑移振幅下，粘着区仍然相对无损，但周围的环形滑移区可能会形成裂纹、微动疲劳和磨损碎片。对应的 SEM 形貌和 EDX 元素图见图 4a，其中的电触点为铜材质镀锡，铜和锡之间镀镍作为垫层。中心粘着区以完美的金属-金属接触保证了接触导电性，而在外部环形区，两个表面之间发生了较小的相对位移，产生了氧化磨损屑。

3) 全局滑移状态。当 δ 大于 δ_i 时，滑移状态对应于全局滑移。在这种情况下，滑动发生在整个接触区域，力-位移曲线本质上为梯形，如图 5 中虚线右侧所示。切向力 T 与位移幅值 δ 无关，与法向接触力 P 根据常规关系 $T=\mu P$ 有关，其中 μ 为摩擦系数。初始全局滑移有利于消除表面原生氧化物，促进金属与金属之间的强烈相互作用。在每个滑动周期中，粗糙表面的凸体粘着连接状态被打破，凸体滑过对应表面的多个凸体。如果发生分层磨损，损伤会更加严重。对应的 SEM 形貌和 EDX 元素图见图 4c，镀锡层已经完全磨损，镍覆盖了整个表面接触区，铜基板暴露。此外，高浓度的氧集中在镍周围，导致 ECR 增大，波动较大。

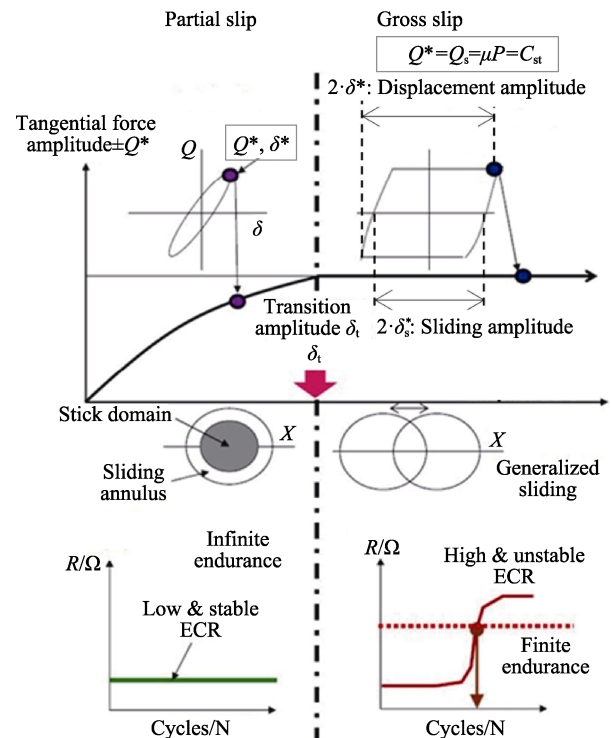


图 5 球面-平板接触界面的滑移机制^[21]
Fig.5 Sliding regimes for a contact interface consisting of a sphere and a flat^[21]

4) 混合滑移状态。显然，在部分滑移与全局滑移之间将会有一个中间滑移区，该区域中的位移由部

分滑移和全局滑移共同产生,这种滑动状态定义为混合滑移状态。混合滑移状态下的微动通常表现为先全局滑移、后部分滑移。初始全局滑移有利于消除表面原生氧化物,促进形成金属-金属冶金结合。摩擦系数不断增大,直至达到局部滑移条件。随着微动循环次数的增加,切向力随往复位移的变化由典型的全局滑移演变为部分滑移的特征。对应的 SEM 形貌和 EDX 元素图见图 4b,中央区域同时覆盖有铜和镍,整个损伤区域和外部区域可以观察到氧。

分析 4 种微动磨损状态可知,第一种状态对 ECR 基本没有影响,后三种状态可能会造成 ECR 波动。微动接触在小的部分滑移条件下运行时,会产生闭合的微动环,由于内部保持了未受损的粘着区,保证了直接的金属/金属相互作用和良好的导电,从而保持低而稳定的 ECR。当位移幅值 δ 大于临界跃迁幅度 δ_t 时,整个微动界面发生全局滑移,促进普遍的表面磨损,导致非导电氧化物碎片(可能包含多种材料的氧化物)形成,ECR 与位移幅值的典型变化规律见图 6^[20]。

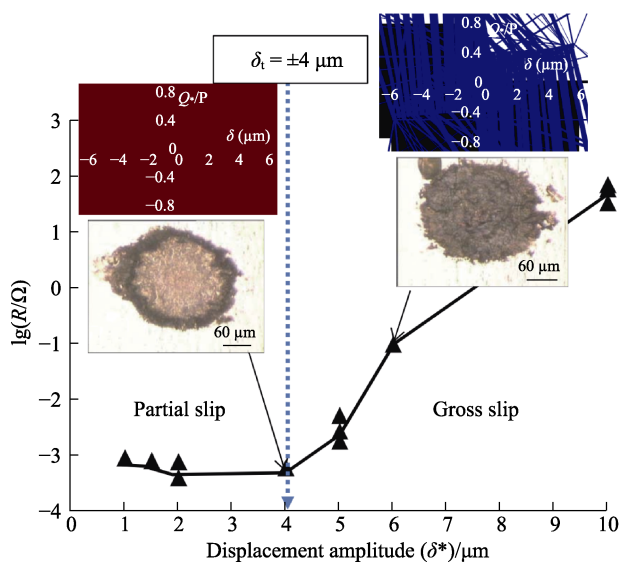


图 6 ECR 与位移幅值的变化规律(10 000 次循环)^[20]

Fig.6 Evolution of ECR as a function of the displacement amplitude at 10 000 cycles^[20]

1.3 主要影响因素

微动腐蚀是微动磨损与氧化等环境腐蚀的结合现象,是一个涉及机械运动和化学反应共同作用的复杂问题。已知的影响微动的因素可以分为三类,即:材料性能与行为、接触条件以及环境条件,如图 7 所示。

1.3.1 材料性能与行为

1) 材料的影响。电接触材料在使用中会受到不同的机械力、热应力和环境的影响,所以材料特性对电接触性能有最直接的影响。材料的杨氏模量和泊松比影响电接触的机械性能,电导率和电阻率决定 ECR 大小,热膨胀系数和导热率影响电连接器工作温度。用于电接触领域中的金属材料范围很广,文献[36]将

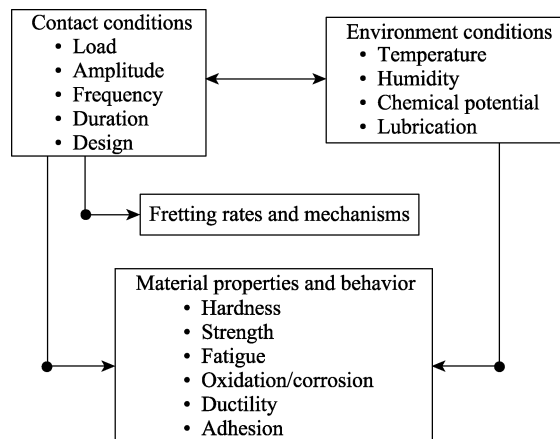


图 7 影响微动的因素示意图

Fig.7 Schematic representations of the factors affecting fretting

其分为四大类,分别是:铜基、银基、金基和新型电接触材料。铜、铝以及铜铝合金在大电流领域使用最多,而贵金属材料及其合金则大多应用在小电流接触领域,纯贵金属主要用作镀层材料。

2) 涂(镀)层的影响。目前,电子和电气行业在电接触中使用的保护和耐磨涂层不断增加。使用涂层不仅有利于控制成本,而且能够实现一些有用的功能,比如:腐蚀和磨损防护、形成扩散阻挡层、构成导电电路元件以及在电介质表面制造无源器件等。电子/电气连接器的性能基本上是由表面现象控制的,如污染、氧化、再氧化、硫化物形成、腐蚀等。这些污染物存在于接触表面,增加了 ECR,降低了连接的可靠性^[37]。同时也应注意到,尽管涂层具有很多优点,仍有许多不利因素,如表面缺陷(孔隙率)、硬度对基底材料的粘附性、抗氧化性和腐蚀环境的影响等,会影响几乎所有类型的涂层电气连接。例如,镀金层如果孔隙率过高,在涉及暴露在高湿度的环境试验和严重污染的实验室或户外环境中时,无法起到良好的抗腐蚀作用。在铜基片上加入一层硬质镍中间层,可以明显提高金镀层的耐磨性能^[38]。稳定的镍层对长寿命至关重要,而且通过在金镀层中添加硬质纳米颗粒和优化合金含量也可以提高耐磨性能^[18]。

3) 粗糙度的影响。电接触的粗糙度是包含接触表面以及镀层和底板的粗糙度的定量表征。但是在微动条件下,测量初始表面粗糙度和 ECR 演化之间的直接关系还有一定的困难,文献[39]分析认为主要原因是:在几个往复循环之后,微动区表面粗糙度也会发生快速变化。如果电接触微动幅值很小,那么提高摩擦系数就能够提高摩擦力,当摩擦力大到足以与滑动切向力抗衡时,就能够阻止滑动。但是摩擦力增大会引起严重塑性变形和疲劳失效,促进磨损颗粒产生,磨粒在大的摩擦力下形成犁削效应,进一步加剧接触表面损伤。然而,如果滑动不可避免,则应采用小的摩擦系数,因为摩擦力减小,会使接触面的弹性滑动增多,以及塑性应变的量值和程度降低,有利于

保持接触表面的完好性。

1.3.2 接触条件

1) 力的影响。微动腐蚀导致的接触劣化速率通常随着接触载荷的增加而降低。ECR 本质上是由接触力和接触面积决定的,当增大微动界面受力时,界面之间的微动腐蚀产物或摩擦聚合物就更容易被穿透,从而抑制了微动的危害作用。在滑动界面中,增加接触载荷会导致更大的摩擦力,从而阻碍运动,并减轻微动腐蚀产物的形成。在连接器中,提高法向负载会增加固位力,从而减少微动的趋势^[16]。同时也要看到,提高接触载荷只能推迟微动腐蚀的发生,但长时间的微动依然会导致微动疲劳和表面层断裂。因此,标准规格的接触件均规定有最大插入力和最小分离力。大的插拔力有利于保证接触稳定可靠,但同时插拔力越大也意味着带来的磨损更大,导致每次插合和分离都会加剧磨损,甚至使表面受到损伤,在提高接触不确定性的同时,又降低了使用寿命。接触件的插拔力和机械寿命、接触件结构、接触部位镀层质量均直接相

关^[40]。插针插孔最理想的设计状态为:插拔力大小适中,既可以保证插针插孔之间平滑插拔,将插合与分离造成的表面损伤降到最低,又能保证电连接器插合后接触紧密,ECR 和接触压力稳定连续。

2) 微动频率的影响。由于微动是以一定的速率进行的往复运动,而腐蚀是时间的函数,所以微动频率是微动腐蚀试验的重要控制因素之一。对于非贵金属涂层接触,在试验的典型范围内,接触件在不同频率下发生微动腐蚀,电阻和金属体积比随微动周期数的增加而增加,如图 8 所示^[41]。可以观察到,频率越低,性能退化速率越快,频率升高,早期周期的电阻上升变得温和。这主要是因为在较低频率下,氧化物在一个循环时间内积累较多。对于镀金铜合金电触点,文献[23]将其微动形态分为 3 类,分别是无限大寿命态、氧化主导失效态和瞬态不稳定电导率失效态,固定振幅增加频率,会导致微动从部分滑移态过渡到氧化磨损的全局滑移态,进而过渡到电导率不同的全局滑移态。

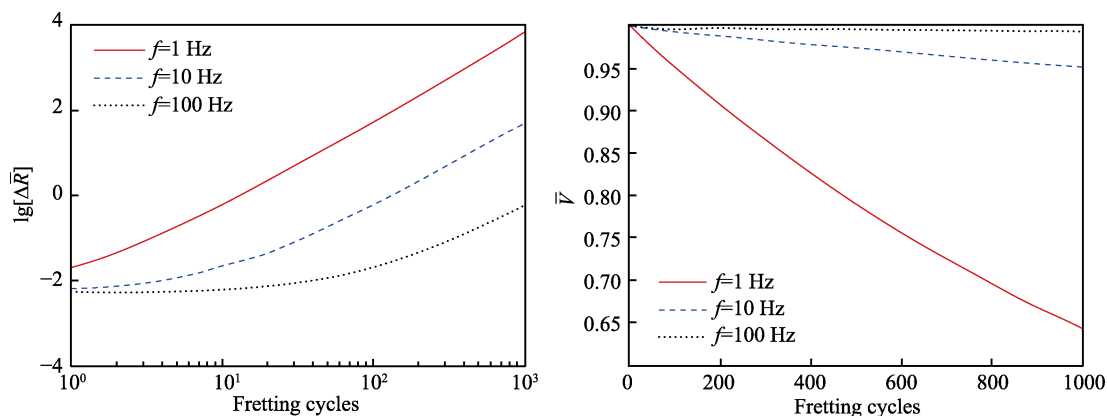


图 8 不同频率下归一化电阻和金属体积比随微动循环次数增加而增加^[41]

Fig.8 Increase of normalized resistance and volume ratio of metal with fretting cycles for different frequencies^[41]

3) 微动振幅的影响。微动位移幅值对 ECR 的影响趋势为,幅值越大,达到相同 ECR 增量值所需要经历的循环数越少。这种趋势源于材料在滑动过程中,金属碎片产生和氧化的机制。在这一前提下,微动位移幅值对 ECR 的影响可能取决于表面接触的化学物质(如易氧化性等)和物理性质(如金相组织、表面硬度和匹配材料的厚度等)。最终表现在 ECR 上的差异,可以用碎屑移动的动力学和接触区域内 a 斑点的形成和隔断来合理地解释。微动幅值越短,暴露用于氧化作用的接触点数越少,可以延迟 ECR 增大的时间;微动幅值增加,导致接触区域暴露在空气中的接触点数增多,氧化作用加剧,ECR 升高明显加快,较大的幅值使磨损加剧,摩擦力增大。振幅超过某一临界值时会产生全局滑移,将不可避免地导致电接触的有限寿命,使用贵金属涂层也只能延缓故障发生的时间^[19]。

4) 电流的影响。电流对电接触性能的影响过程

非常复杂,电流载荷流过电连接器时,既符合工况规律又实时变化,所以这一个过程具有循环反复的特征。文献[24]总结这一过程为,首先,大电流下,触点因发热而软化,直接导致导电面积变大,并减少电流收缩的发生,使 ECR 大大降低;其次,触点发热可加速接触区域的氧化速度,并且伴随着接触区域磨屑的加速氧化,导致 ECR 波动和急剧上升,但是大电流能够有效击穿材料表面形成的氧化膜,消除膜层电阻;最终表现出来的 ECR 也保持在较低值。文献[19]认为,交流电和直流电条件下 ECR 行为没有显著差异,交流电流下的微动会在接触区外围形成松散的片状碎片,而直流电流下形成的微动碎片更致密,表面更粘连。文献[42]中使用最大采样率为 1 GHz 的数字存储示波器测量触点和限流电阻上的电压降,观测到电流值对高压降的发生有影响,电流越大,不连续点发生得越早且发生得越频繁。

1.3.3 环境条件

1) 相对湿度的影响。相对湿度对于电接触中微动作用的影响是重要而复杂的, 主要涉及对化学反应速率、表面磨屑物理特性和接触材料表面机械特性等因素的影响以及各因素之间的相互作用^[2]。微动磨损在湿度饱和空气中比在干燥空气中低^[43]。文献[7]通过试验说明, 在有限的时间内, 湿度对触头接触区域的影响主要还是物理特性, 改变的是表面产物的积累方式和组合状态, 外界相对湿度对触头表面的化学成分改变需要长时间的化学反应过程。

2) 温度的影响。温度可以同时影响氧化或腐蚀的速度和材料的力学性能。文献[44]采用电动振动台和恒温箱搭建了综合环境应力试验装置, 通过试验证明, ECR 增大源自温升、微动磨损和微动腐蚀。文献[45]研究了温度对镀金铜合金触点的微动腐蚀特性的影响, 提出金的软化是导致低 ECR 扩展区和较高温度下故障率降低的原因, 然而, 高温下形成的氧化铜颗粒硬度较高, 导电性差, 导致 ECR 恶化更严重。文献[46]通过试验发现, 镀锡铜合金触点的寿命

随温度的升高而降低, 并给出了振幅在 35 μm 以下时的寿命预测方程。

3) 环境气体的影响。大气中存在的氧气、二氧化碳、水蒸气、硫和氯化物与金属材料接触, 会使其逐渐劣化或蚀变。文献[29]通过微动试验研究了 3 种不同气氛 (氧气、空气和氮气) 对电连接器 ECR 的影响, 结果表明, 在高摩擦系数条件下, 氮气环境下的 ECR 值最小且稳定, 富氧环境促进 Cu_2O 的形成, 从而增加 ECR。文献[47]对铜基连接器的连接部位进行化学成分分析和微观组织分析, 发现富氧环境下触点接触表面容易生成大量的 CuO 和 Cu_2O , 其中 CuO 是绝缘体, 它的产生直接分离两接触界面, Cu_2O 则是电阻值极大的半导体, 它的生成直接导致电阻值上升。

综上所述, 振动应力、温度应力和电应力综合作用于电连接器, 使电连接器的内部接触件发生复杂的电-热-机械多物理场耦合作用。主要影响插针与插孔之间的接触压力、接触面积以及针孔材料的电阻率, 导致间歇性故障的出现, 文献[25]总结了影响 ECR 波动因素的物理机理, 如图 9 所示。

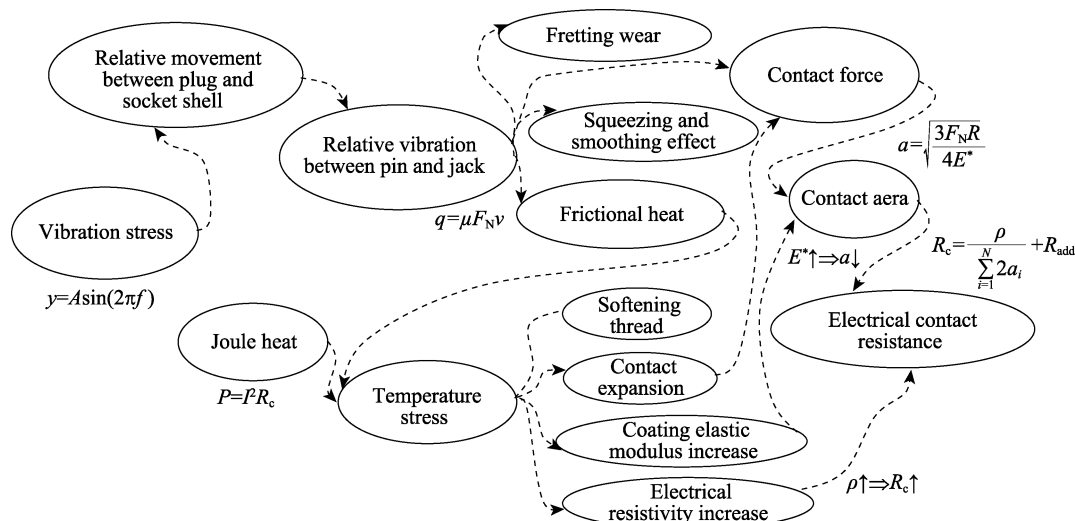


图9 影响 ECR 波动因素的物理机理分析^[25]

Fig.9 Physical mechanism analysis of the influencing factors to ECR fluctuation^[25]

2 电连接器微动腐蚀的主要研究方法

2.1 试验观测法

虽然目前各研究机构和人员对微动腐蚀问题的研究仍以试验分析为主, 但尚未在文献中看到可直接用于微动腐蚀试验的成熟商业设备, 人们大多基于自身需求自行开发试验机。微动腐蚀试验机应具备合理的驱动装置和微动平台、载荷加载装置和腐蚀环境控制装置, 并配备数据测量、采集和处理系统^[48]。试验机中最关键的部件是产生执行力的驱动装置, 按照动力源形式的不同可分为压电陶瓷驱动、机械传动式驱动、电动式振动驱动和电磁激振器驱动几种类型, 具

体见表 1。相对而言, 压电陶瓷驱动因其行程精度高、可控性好的优点, 在基础试验研究中更具综合优势。根据试验需要可以配置环境试验箱, 实现对环境气体、相对湿度和温度等因素的控制。

试验接触件分为单触点模拟结构和成品件结构。单触点模拟结构通常是球面/平板结构和交叉圆柱结构, 这两种结构既能做到对插针插孔接触的合理简化, 也能避免因错位带来的试验数据离差。成品件结构主要用于产品指标阈值的分析测定^[49]、故障问题的复现定位^[50]以及可靠性水平的评定等^[51]。

2.2 理论分析法

在对电接触微动腐蚀问题的理论分析中, 研究者

表 1 微动试验装置分类
Tab.1 Classification table of fretting test equipment

Driving method	Realization principles	Development institutions	Experimental parameters
Piezoelectric ceramic drive	By controlling the voltage at both ends of the piezoelectric ceramic, the working device vibrates back and forth	University of the Renne ^[34]	Amplitude: 1~10 μm Frequency: 10 Hz
		Lipper University of East Westfalen ^[14]	Amplitude: 50 μm Frequency: 1 Hz
		University of California ^[51]	Amplitude: 6.5 μm Frequency: 5 Hz
		Beijing University of Posts and Telecommunications ^[52]	Displacement: 0~200 μm Frequency: 0.001~1 Hz
		Southwest Jiaotong University ^[7]	Amplitude: 10~45 μm Frequency: 2 Hz
Mechanical drive	By using mechanical mechanism and their combination mechanism to make the working device vibrate	University of New Orleans ^[53]	Amplitude: 50 μm Frequency: 1 Hz
		Yonsei University ^[54]	Amplitude: 25 μm Frequency: 1~10 Hz
Electric vibration drive	By feeding alternating current into a constant magnetic field, the working part is excited and vibrates	Auburn University ^[55]	Frequency: 30~600 Hz Acceleration: 10 g
		Harbin Institute of Technology ^[22]	Amplitude: 4~62 μm Frequency: 60~1000 Hz
Electromagnet drive	By feeding periodic current into an electromagnetic coil, the working part is driven to vibrate	University of Rennes ^[6]	Amplitude: 10 μm Frequency: 100 Hz
		Ecole Centrale de Lyon ^[18]	Amplitude: 0.5~40 μm Frequency: 1~500 Hz

们普遍运用了数值分析与数学建模的方法。

数值分析是研究分析用计算机求解数学计算问题的数值计算方法,尤其注重理论分析与实践检验相结合,使理论分析结果及时得到验证。在电接触微动腐蚀研究中,数值分析主要用于 ECR 值的回归分析和接触件的寿命预测问题。对于法向力对 ECR 的非单调演化,Fouvry 等^[21]通过将摩擦能量密度法与基本柔度描述相结合,描述了法向力与位移幅值的协同效应,并预测了电接触的耐久性。Kim 等^[46]研究了温度和跨度振幅对 ECR 的影响,并应用阿伦尼乌斯方程提出了寿命预测公式。运用模型法可以抽象出研究对象的各个组成部分、特征、属性和关系,进而通过综合分析,把握其规律性。Ji 等^[41]建立了计算微动循环过程中电阻上升和氧化物积聚的理论模型,针对锡-锡电接触的微动腐蚀过程,以解析形式导出了归一化电阻方差和氧化体积,得到了微动频率和法向力对寿命的影响规律。Zhu 等^[57]以电连接器成品件为试验对象,建立了电连接器间歇故障再现和电连接器损伤模型,基于间歇故障和损伤模型,建立了一种基于遗传算法的优化方法。Li 等^[50]分析了电连接器的电接触模型和断续失效机理,选取断续失效频率作为断续失效再现的特征,建立了加速断续破坏表征模型,最终计算了间歇失效频率的分布。

学者们进行研究时并不会限定单纯使用某种方法,例如数学分析方法有利于对试验数据的分析和归纳,数学建模方法有利于从试验现象中抽离本质和特

征,结合运用两种方法,才能更好地评价和预测电阻积累、金属损耗与相关试验结果的吻合性。比如,Sun 等^[58]提出一种考虑表面膜厚度增加,导致 ECR 增加的振动诱发物理模型,并利用粒子滤波方法预测了航空圆形电连接器的剩余使用寿命。

2.3 有限元仿真分析法

微动过程和腐蚀过程都是瞬态过程,并伴随着几何非线性和材料非线性的演化过程,因此采用有限元方法求解时,通常采用增量方法,通过反复迭代更新模型状态。求解接触问题时,通常利用接触约束算法,将约束优化问题转化为无约束优化问题,常用的有罚函数法、拉格朗日乘子法和增广拉格朗日乘子法。微动腐蚀仿真的难点在于建立多物理场耦合的有限元模型,热循环和振动不仅导致微动腐蚀,同步发生的疲劳、磨损和腐蚀都会引起表面的损伤^[59]。

印度全球科技学院的 Angadi 等^[60]总结了世界各地的研究人员对电连接器本体区域和接触区域进行有限元建模的方法和分析内容,并将有限元模型分析结果与试验数据进行了对比分析。Huang 等^[61]建立了微型连接器的扭销-插接三维有限元模型,根据连接器的真实接触界面,设置尺寸和材料性能,模拟了插入过程中发生小幅振动引起的微动过程。Fallahnezhad 等^[62]利用 ABAQUSTM 自适应网格技术,建立了新的有限元模型来模拟金属-金属接触微动腐蚀过程,同时捕捉由机械微动磨损和电化学腐蚀引起的材料表

面损伤,该模型能够计算去除/再生的被动氧化层,以及微动磨损和腐蚀造成的材料损失。Ibrahim 等^[59]在早期工作的基础上,建立了叶片插头/插座连接系统有限元模型,模拟振动和热循环引起的微动腐蚀影响。Zhang 等^[63-64]利用 ABAQUSTM 和 ANSYSTM 建立三维有限元模型,分析了轴向振动对叶片插头/插座连接器微动腐蚀的影响,得出需考虑不同电缆长度、弹簧力和镀层类型的计算结果。

3 电连接器微动腐蚀研究的发展趋势

现代科学技术的飞速发展,为电接触微动腐蚀研究提供了更多方法和手段,同时也对接触可靠性与寿命提出了更高的要求。现从多个角度提出未来电连接器微动腐蚀研究的发展趋势。

1) 多因素耦合作用下电接触微动腐蚀损伤的行为与机理研究。当前,国内外的研究人员关于电接触微动腐蚀方面的研究工作已取得长足的进步,但大多数还是局限于对某一特定材料、特定条件、特定环境下的特性研究,还未能综合微动幅值、法向力、镀层类型、基材、温度、湿度以及环境参数等对寿命有影响的因素进行系统研究,也未形成适用于多因素耦合作用下的微动腐蚀行为和失效机制的统一理论。未来应不断提高数学建模、加速试验与有限元分析等现代分析手段在微动腐蚀研究中的应用水平,并与材料设计及磨损、腐蚀行为更好地结合起来,构建完整的电接触微动腐蚀研究理论体系,以提高电连接器设计和制造水平。

2) 海洋环境下电连接器微动腐蚀问题研究。21 世纪,人类进入了大规模开发利用海洋的时期,而电连接器的性能变化受海洋环境影响十分显著。例如,海军飞机服役环境大多数是在海上或者沿海基地,环境特点是高温、高湿和盐雾出现的时间长,加上沿海城市工业废气的作用,飞机停放环境条件十分恶劣,会造成金属件腐蚀、非金属件老化、油液污染变质等^[65-66],在这样的环境下,电连接器极易发生壳体腐蚀、绝缘性能下降、导通电阻增加甚至断路等问题^[67]。海洋环境对电连接器微动腐蚀的影响同样是多因素共同作用的结果。因此,开展考虑接触件结构特点、复杂工况和海洋环境等因素综合作用下的电连接器微动腐蚀问题研究,是十分必要且迫切的。

3) 射频连接器微动腐蚀问题研究。随着大数据时代的到来和军事高技术的发展,系统的数据传输速率迅速增加,所需的频段变得越来越宽,系统中的互连组件(包括电连接器)对信号完整性的影响愈发凸显。特别是在高频环境下,射频连接器表现出更为复杂的电磁特性,趋肤效应、表面粗糙度等许多过去可以忽略的物理效应变得重要起来^[68]。尽管已有研究表明微动可以影响交流信号,但迄今为止,关于射频信

号条件下微动对电接触的影响的详细研究还远远不够深入。数字传输需要电连接器传输射频信号,这些连接器可能会因恶劣的服役环境而退化,在接触界面产生微动腐蚀损伤,进而对信号传输产生影响。因此,不断将射频信号向高频扩展,研究连接器微动腐蚀损伤对其的影响,已成为一个重要的研究课题。

参考文献:

- [1] SWINGLER J, MCBRIDE J W, MAUL C. Degradation of road tested automotive connectors[J]. IEEE transactions on components and packaging technologies, 2000, 23(1): 157-164.
- [2] BRAUNOVIC M, KONCHITS V V, MYSHKIN N K, et al. 电接触理论、应用与技术[M]. 许良军译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
BRAUNOVIC M, KONCHITS V V, MYSHKIN N K, et al. Electrical contacts fundamentals, applications and technology[M]. XU Liang-jun translated. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [3] 杨奋为. 航天电连接器质量检验专题讲座(第 1 讲)[J]. 质量与可靠性, 2006(4): 51-57.
YANG Fen-wei. Failure analysis of aerospace electrical connectors (part I)[J]. Quality and reliability, 2006(4): 51-57.
- [4] STEINBERG Dave, 常勇, 等. 电子设备热循环和振动故障预防[M]. 丁其伯译. 北京: 航空工业出版社, 2012.
STEINBERG Dave, CHANG Yong. Preventing thermal cycling and vibration failures in electronic equipment[M]. DING Qi-bo translated. Beijing: Aviation Industry Press, 2012.
- [5] 周仲荣, 朱旻昊. 复合微动磨损[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
ZHOU Zhong-rong, ZHU Min-hao. Composite fretting wear[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2004.
- [6] CARVOU E, JEMAA N B. Time and level analysis of contact voltage intermittences induced by fretting in power connector[C]// Electrical contacts-2007 proceedings of the 53rd IEEE holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2007: 211-215.
- [7] 刘新龙. 电接触条件下的微动磨损性能影响因素研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
LIU Xin-long. Study on influence factors of fretting wear performance under electrical contact[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [8] MASON W P, WHITE S D. New techniques for measuring forces and wear in telephone switching apparatus[J]. Bell system technical journal, 1952, 31(3): 469-503.
- [9] MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact[J]. Journal of applied mechanics, 1949, 16(3): 259-268.

- [10] 李欣. 机械连接结构的微动疲劳理论与工程应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
LI Xin. Fretting fatigue theory and engineering applications of mechanical connection structures[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019.
- [11] TOMLINSON G A, THORPE P L, GOUGH H J. An investigation of the fretting corrosion of closely fitting surfaces[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1939, 141(1): 223-249.
- [12] UHLIG H H. Mechanism of fretting corrosion[J]. Journal of applied mechanics, 1954, 21(4): 401-407.
- [13] FAIRWEATHER A. Development of resistance and microphone noise at a disturbed contact[C]//Proc. 2nd int. symp. on electrical contact phenomena. [s.l.]: [s.n.], 1964: 316-319.
- [14] SONG Jian, SCHINOW V, YUAN Hao-miao. Third bodies in electrical contacts—Wear and electrical performance[C]//2017 IEEE holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2017: 117-124.
- [15] SONG Jian, YUAN Hao-miao, SCHINOW V. Fretting corrosion behavior of electrical contacts with tin coating in atmosphere and vacuum[J]. Wear, 2019, 426-427: 1439-1445.
- [16] YUAN Hao-miao, SONG Jian, SCHINOW V. Fretting corrosion of tin coated electrical contacts: The influence of normal force, coating thickness and geometry of sample configuration[C]//2016 IEEE 62nd holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2016: 33-38.
- [17] YUAN Hao-miao, SONG Jian. Fretting corrosion behavior of various contact surfaces under diverse operating conditions[C]//2019 IEEE holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2019: 19-26.
- [18] SONG Jian, WANG Liang-liang, ZIBART A, et al. Corrosion protection of electrically conductive surfaces[J]. Metals, 2012, 2(4): 450-477.
- [19] FOUVRY S, JEDRZEJCZYK P, CHALANDON P. Introduction of an exponential formulation to quantify the electrical endurance of micro-contacts enduring fretting wear: Application to Sn, Ag and Au coatings[J]. Wear, 2011, 271(9-10): 1524-1534.
- [20] FOUVRY S, LAPORTE J, PERRINET O, et al. Fretting wear of low current electrical contacts: Quantification of electrical endurance[C]//2017 IEEE holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2017: 1-11.
- [21] POMPANON F, LAPORTE J, FOUVRY S, et al. Normal force and displacement amplitude influences on silver-plated electrical contacts subjected to fretting wear: A basic friction energy-contact compliance formulation[J]. Wear, 2019, 426-427: 652-661.
- [22] GRATON O, FOUVRY S, ENQUEBECQ R, et al. Effect of lubrication on DC and RF electrical endurance of gold plated contacts subjected to fretting wear[C]//2018 IEEE holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2018: 426-434.
- [23] REN Wan-bin, DU Ying-wei, CUI Li, et al. Research on fretting Regimes of gold-plated copper alloy electrical contact material under different vibration amplitude and frequency combinations[J]. Wear, 2014, 321: 70-78.
- [24] REN Wan-bin, WANG Peng, SONG Jian, et al. Effects of current load on wear and fretting corrosion of gold-plated electrical contacts[J]. Tribology international, 2014, 70: 75-82.
- [25] REN Wan-bin, DU Dan-yang, DU Yang. Electrical contact resistance of connector response to mechanical vibration environment[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2020, 10(2): 212-219.
- [26] REN Wan-bin, ZHANG Xu, MENG Xiang-xing. Fretting behavior of gold-plated contact materials used in high-frequency vibration and different temperature environment[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2017, 7(4): 572-581.
- [27] HE Li-ping, CAI Zhen-bing, PENG Jin-fang, et al. Effects of oxidation layer and roughness on the fretting wear behavior of copper under electrical contact[J]. Materials research express, 2020, 6(12): 1265e3.
- [28] LIU Xin-long, CAI Zhen-bing, XIAO Qian, et al. Fretting wear behavior of brass/copper-graphite composites as a contactor material under electrical contact[J]. International journal of mechanical sciences, 2020, 184: 105703.
- [29] LIU Xin-long, CAI Zhen-bing, CUI Ye, et al. Effect of different atmospheres on the electrical contact performance of electronic components under fretting wear[J]. Journal of physics D: Applied physics, 2018, 51(15): 155302.
- [30] LIU Xin-long, CAI Zhen-bing, LIU Shan-bang, et al. Influence of wear test parameters on the electrical contact performance of brass alloy/copper contactors under fretting wear[J]. Journal of materials engineering and performance, 2019, 28(2): 817-827.
- [31] FLOWERS G T, XIE Fei, BOZACK M J, et al. Vibration thresholds for fretting corrosion in electrical connectors [C]// IEEE transactions on components and packaging technologies. USA: IEEE, 2002: 65-71.
- [32] ANTLER M. Survey of contact fretting in electrical connectors[J]. IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology, 1985, 8(1): 87-104.
- [33] WATERHOUSE R B. Fretting corrosion[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1955, 169(1): 1157-1172.
- [34] BRYANT M D. Resistance buildup in electrical connectors due to fretting corrosion of rough surfaces[J]. IEEE transactions on components, packaging, and manufacturing technology: Part A, 1994, 17(1): 86-95.
- [35] BOUZERA A, CARVOU E, JEMAA N B, et al. Minimum fretting amplitude in medium force for connector coated material and pure metals[C]//2010 proceedings of the 56th IEEE holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [36] 谢博华, 鞠鹏飞, 吉利, 等. 电接触材料摩擦学研究进

- 展[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(5): 656-668.
- XIE Bo-hua, JU Peng-fei, JI Li, et al. Research progress on tribology of electrical contact materials[J]. Tribology, 2019, 39(5): 656-668.
- [37] KONG Zhi-gang, SWINGLER J. Combined effects of fretting and pollutant particles on the contact resistance of the electrical connectors[J]. Progress in natural science: Materials international, 2017, 27(3): 385-390.
- [38] ANTLER M, DROZDOWICZ M H. Wear of gold electrodeposits: Effect of substrate and of nickel underplate [J]. Bell system technical journal, 1979, 58(2): 323-349.
- [39] PARK Y W, SANKARA NARAYANAN T S N, LEE Kang-yong. Fretting corrosion of tin-plated contacts: Evaluation of surface characteristics[J]. Tribology international, 2007, 40(3): 548-559.
- [40] 李应. 航空电连接器接触可靠性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- LI Ying. Investigation on contact reliability of aerospace electrical connector[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [41] JI Xiang-ying, WU Yong-ping, LU Bing-hai, et al. Fretting corrosion degradation of non-noble metal coated contact surfaces: A theoretical model[J]. Tribology international, 2016, 97: 31-37.
- [42] MAUL C, MCBRIDE J W, SWINGLER J. Intermittency phenomena in electrical connectors[J]. IEEE transactions on components and packaging technologies, 2001, 24(3): 370-377.
- [43] SUNG I H, KIM J W, NOH H J, et al. Effect of displacement and humidity on contact resistance of copper electrical contacts[J]. Tribology international, 2016, 95: 256-261.
- [44] ANGADI S V. An experimental investigation and a multiscale electro-thermo-mechanical model of a flat pin high power electrical connector[J]. Dissertations & theses-gradworks, 2011.
- [45] REN Wan-bin, WANG Peng, FU Ying-hua, et al. Effects of temperature on fretting corrosion behaviors of gold-plated copper alloy electrical contacts[J]. Tribology international, 2015, 83: 1-11.
- [46] KIM M J, KIM H K. Effects of temperature and span amplitude on fretting corrosion behavior of tin-plated electrical contacts[J]. Microelectronics reliability, 2017, 69: 80-87.
- [47] MENGOTTI E, DUARTE L I, PIPPOLA J, et al. Fretting corrosion: Analysis of the failure mechanism for low voltage drives applications[J]. Microelectronics reliability, 2014, 54(9-10): 2109-2114.
- [48] 任万滨, 王鹏, 崔黎. 触点材料微动磨损特性测试分析方法现状[J]. 电工材料, 2012(4): 25-29.
- REN Wan-bin, WANG Peng, CUI Li. Status of test methods for contact materials fretting wear characteristics[J]. Electrical engineering materials, 2012(4): 25-29.
- [49] YANG Hao-yue, FLOWERS G. Fretting in electrical connectors induced by axial vibration[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2015, 5(3): 328-336.
- [50] LI Qian, LYU Ke-hong, QIU Jing, et al. Research on intermittent failure re-presentation of electrical connector based on accelerated test[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part O: Journal of risk and reliability, 2019, 233(3): 317-327.
- [51] 谭晓明, 张丹峰, 王德, 等. 海洋环境下航空电连接器腐蚀行为规律研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 56-60.
- TAN Xiao-ming, ZHANG Dan-feng, WANG De, et al. Corrosion behavior of aviation electrical connector in marine environment[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(2): 56-60.
- [52] YOON Y, ETSION I, TALKE F E. The evolution of fretting wear in a micro-spherical contact[J]. Wear, 2011, 270(9-10): 567-575.
- [53] 杨捷斐. 微动摩擦测试仪的研究设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- YANG Jie-fei. The study and design of friction testing for fretting[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008.
- [54] BELOUFA A. Conduction degradation by fretting corrosion phenomena for contact samples made of high-copper alloys[J]. Tribology international, 2010, 43(11): 2110-2119.
- [55] PARK Y W, LEE Kang-yong. Development of empirical equations for fretting-corrosion failure-time of tin-plated contacts[J]. Wear, 2008, 265(5-6): 756-762.
- [56] FU Ru-jian, CHOE S Y, JACKSON R L, et al. Experimental study of the vibration-induced fretting of silver-plated high power automotive connectors[C]// 2010 proceedings of the 56th IEEE holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [57] ZHU Zun-qing, LI Qian, ZHANG Yong, et al. Optimal design of an electrical connector intermittent fault-accelerated reproduction test based on a genetic algorithm [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part O: Journal of risk and reliability, 2019, 233(5): 857-867.
- [58] SUN Bo, LI Yu, WANG Zi-li, et al. Remaining useful life prediction of aviation circular electrical connectors using vibration-induced physical model and particle filtering method[J]. Microelectronics reliability, 2019, 92: 114-122.
- [59] IBRAHIM R D, CHEN Chen, FLOWERS G T. Modeling and analysis of a blade/receptacle pair for the prediction of thermal cycling and temperature dependent vibration driven fretting corrosion[C]// 2010 proceedings of the 56th IEEE holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [60] ANGADI S V, JACKSON R L, PUJAR V, et al. A comprehensive review of the finite element modeling of electrical connectors including their contacts[J]. IEEE trans-

- actions on components, packaging and manufacturing technology, 2020, 10(5): 836-844.
- [61] HUANG Bo, LI Xun-bo, ZENG Zhi, et al. Mechanical behavior and fatigue life estimation on fretting wear for micro-rectangular electrical connector[J]. Microelectronics reliability, 2016, 66: 106-112.
- [62] FALLAHNEZHAD K, OSKOEI R H, TAYLOR M. Development of a fretting corrosion model for metallic interfaces using adaptive finite element analysis[J]. Finite elements in analysis and design, 2018, 148: 38-47.
- [63] ZHANG Fu-xi, FLOWERS G T. Fretting corrosion in electric connectors induced by axial vibration[C]// 2014 IEEE 60th holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2014: 1-8.
- [64] ZHANG Fu-xi, FLOWERS G T, DEAN R N, et al. A study on axial vibration-induced fretting corrosion in electrical connector pair[C]// 2016 IEEE 62nd holm conference on electrical contacts. USA: IEEE, 2016: 146-151.
- [65] 胡建军, 陈跃良, 卞贵学, 等. 飞机结构加速腐蚀与自然腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(11): 900-904.
- HU Jian-jun, CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue, et al. Corrosion of aircraft structure material in accelerated simulating environment and service environment[J]. Corrosion & protection, 2011, 32(11): 900-904.
- [66] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39.
- SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Comprehensive corrosion control of naval aircraft[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(6): 35-39.
- [67] 王玲, 杨万均, 张世艳, 等. 热带海洋大气环境下电连接器环境适应性分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 5-9.
- WANG Ling, YANG Wan-jun, ZHANG Shi-yan, et al. Environmental worthiness analyses of electrical connectors in tropic marine atmosphere[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(6): 5-9.
- [68] 纪锐. 射频连接器电接触失效机理及其对传输信号影响的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- JI Rui. Research on the failure mechanism of radio frequency connector and its effects on signal transmission[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- (上接第 216 页)
- [71] 元云岗. 表面纳米化/离子氮化复合处理对 TC4 钛合金微动磨损机制的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- YUAN Yun-gang. Influence of surface nanocrystallization/nitriding treatment on the mechanism fretting wear of TC4 titanium alloy[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [72] LIU Jun, SUSLOV S, VELLORE A, et al. Surface nanocrystallization by ultrasonic nano-crystal surface modification and its effect on gas nitriding of Ti6Al4V alloy[J]. Materials science and engineering: A, 2018, 736: 335-343.
- [73] 李晓宇, 宋超伟, 费琦, 等. 骨修复 3D 打印钛合金支架材料的研究进展[J]. 临床和实验医学杂志, 2019, 18(2): 222-225.
- LI Xiao-yu, SONG Chao-wei, FEI Qi, et al. Research progress of 3D printing titanium alloy scaffold for bone repair[J]. Journal of clinical and experimental medicine, 2019, 18(2): 222-225.
- [74] 李大成, 付莹, 陈望军, 等. 多孔钛合金支撑棒在踝关节损伤中的应用及生物力学性能[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(34): 5413-5417.
- LI Da-cheng, FU Ying, CHEN Wang-jun, et al. Application and biomechanical study of porous titanium alloy support rod in ankle joint injuries[J]. Chinese journal of tissue engineering research, 2017, 21(34): 5413-5417.
- [75] 张庆福, 牛璐, 符国才, 等. 中段桥接式钛合金全下颌骨植入体的设计制作研究[J]. 口腔颌面外科杂志, 2019, 29(3): 148-151.
- ZHANG Qing-fu, NIU Lu, FU Guo-cai, et al. Design and fabrication of middle part bridging mandible prostheses of titanium alloy[J]. Journal of oral and maxillofacial surgery, 2019, 29(3): 148-151.
- [76] 黄润, 张兰, 黄雷, 等. 钛合金表面纳米化对成骨细胞生物学行为的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 81-88.
- HUANG Run, ZHANG Lan, HUANG Lei, et al. Effects of surface nanocrystallization of titanium alloy on biological behavior of osteoblast[J]. China surface engineering, 2017, 30(5): 81-88.
- [77] 嵇伟平, 韩培, 赵常利, 等. 钛合金表面纳米结构对成骨细胞黏附的促进作用[J]. 科学通报, 2008, 53(1): 83-88.
- JI Wei-ping, HAN Pei, ZHAO Chang-li, et al. Promoting effect of titanium alloy surface nanostructure on osteoblast adhesion[J]. Chinese science bulletin, 2008, 53(1): 83-88.
- [78] LU Jin-wen, ZHANG Yong, HUO Wang-tu, et al. Electrochemical corrosion characteristics and biocompatibility of nanostructured titanium for implants[J]. Applied surface science, 2018, 434: 63-72.