

文章编号: 2095-4980(2023)03-0271-07

弹片连接的弱力接触电阻测试与分析

曾鸣奇¹, 赵小龙^{*1}, 周昊楠¹, 彭玉彬¹, 张松昌^{1,2}, 贺永宁^{*1}

(1.西安交通大学 西安市微纳电子与系统集成重点实验室, 陕西 西安 710049;
2.西安文理学院 信息工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 弹片作为一种重要的电连接器, 它的可靠性会直接影响设备的电性能。研究弹片电连接的规律和影响因素, 对于提升设备性能并节约成本具有重要意义。本文通过软件仿真及实验测量, 测试了在弱外加力($<2\text{ N}$)的条件下, 以弹片为代表的电连接部件, 接触电阻阻值随着接触金属面材料的电阻率减小而减小, 且随着外加力的增大而减小的规律。通过机械接触理论分析及计算, 验证了接触电阻会受到材料的电阻率与外加力影响; 对弹片的接触电阻产生机理给出了明确解释, 能够更准确地判断弹片与不同接触界面产生接触电阻的大小关系。

关键词: 弹片; 金属界面; 接触电阻; 弱外加力

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022195

Measurement and analysis of the contact resistance of the weak force of the spring connection

ZENG Mingqi¹, ZHAO Xiaolong^{*1}, ZHOU Haonan¹, PENG Yubin¹, ZHANG Songchang^{1,2}, HE Yongning^{*1}

(1.The Key Laboratory of Micro-Nano Electronics and System Integration of Xi'an City, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China; 2.School of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: As an important electrical connector, the reliability of spring electrical connection directly affects the electrical performance of the device. It is important to study the regularity and influencing factors of spring electrical connection for improving equipment performance and saving cost. In this paper, through software simulation and experimental measurements, the rule is tested that the contact resistance decreases with the decrease of the resistivity of the contact metal surface material and decreases with the increase of the applied force when the electrical connection parts represented by the spring are under weak external force($<2\text{N}$). Through the analysis and calculation of mechanical contact theory, it is verified that the contact resistance is affected by the resistivity and external force of the material. The mechanism of contact resistance of the projectile is clearly explained, and the relationship between contact resistance of the projectile and different contact interfaces can be more accurately judged.

Keywords: spring; metal interface; contact resistance; weak external force

随着电气电子行业的迅猛发展, 如手机、移动平板电脑、智能手表等电子产品为了实现集多功能、小型化、可便携等条件于一体的要求越来越高, 设计师因此面临更多的电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)和射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)问题。为了在器件连接中更好地兼顾连接不同导体以及机械缓冲的作用, 需要在这些电子产品中, 使用如弹片的电连接部件。

弹片通常装配在射频电路板(Printed Circuit Board, PCB)上, 在 2 个电路或 PCB 之间起传递能量或信号的作用, 并能够提供建立和维护界面所需的正向力, 因此弹片需具备足够的导电性, 以及足够的机械强度和工艺性。

影响电连接导电性能以及机械强度的因素有多种, 如接触的外加力、结构、尺寸、界面材料等特性, 都是对电连接导电性能造成影响的主要诱因。李庆娅研究了环境腐蚀造成的接触界面变化、外界振动应力对 SMA 等射频电连接器的失效机理^[1]。证明了随着环境的腐蚀, 接触界面处金属粗糙度会增加, 且随着接触界面的恶化或

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-12-28

*通信作者: 赵小龙 email:zhaoxiaolong@xjtu.edu.cn; 贺永宁 email:yongning@xjtu.edu.cn

外界施加振动应力, 射频电连接器的传输特性会发生恶化; George T Flowers 研究了外界振动对插针式的电连接接触电阻的影响^[2-3], 证明了外界振动的应力变化确实会提高接触电阻并使阻值波动; 王龙泉建立了有限元模型, 研究了温度变化对电连接器接触特性的影响^[4]; Y H BI 对弹片的射频阻抗运用了去嵌入式方法进行了提取^[5], 研究了弹片的射频阻抗随频率的变化规律; 张松昌研究了同一界面不同压力下接触电阻与无源互调(PIM)之间的关系^[6]。多种研究证明, 射频频段器件之间的接触电阻会对电性能如传输特性、PIM 值有着较大的影响^[7], 且元器件的 PIM 值还会影响通信的速率、灵敏度等指标, 进而影响通信系统的总体质量^[8-10]。对于弱外加力下弹片与不同界面之间的接触电阻, 因为在低频情况下阻值较小, 且对信号影响不显著, 业界尚无相关研究发表。但在射频情况下, 作为连接件的弹片的接触状况会对整体电性能造成一定的影响, 如更换电阻率更高的界面和弱力接触等情况, 都会提高 PIM 值, 因此有必要对弹片的接触电阻进行研究。

为研究电连接部件在何种情况下兼具良好的缓冲与导电特性, 本文通过建立仿真模型, 对弹片与几种常见的金属界面的接触电阻进行了相应的仿真分析。并通过实验, 测试了弹片在外加力不断变化的情况下, 与不同金属接触界面之间接触电阻的变化规律。

1 弹片测试仿真及分析

为简化接触模型, 更直观地观察弹片与待测金属界面之间的接触状态, 本文选用型号为 BRT-AMSP-SMT-HP30A 的弹片作为研究对象。弹片形貌如图 1 所示, 是一种 C 型弹片^[5], 上方与 PCB 板接触处是一个由 0.5 mm 凸起的凸包结构。

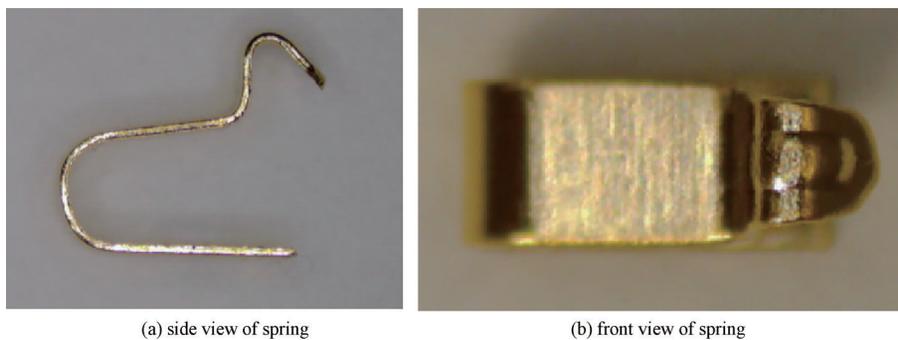


Fig.1 The sample diagram of spring

图 1 弹片样品图

综合实验测试环境及实际情况, 建立的仿真模型如图 2 所示, 主要包括 3 个部件, 分别为居于下部的用于固定弹片的下金属块, 中间起到电连接作用的弹片样品, 以及上部具有不同金属接触界面的 PCB。

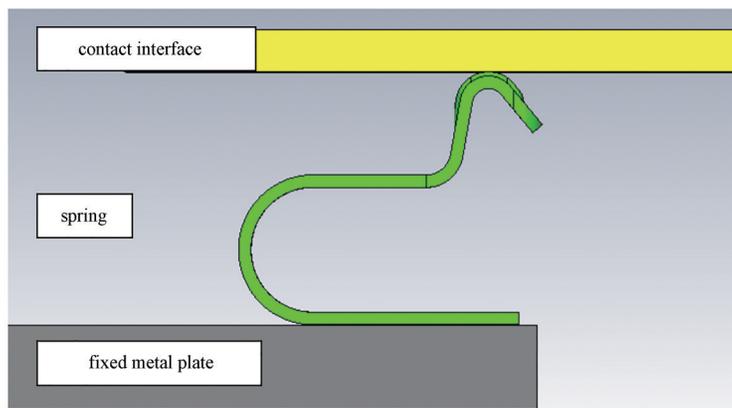


Fig.2 Test simulation diagram of spring

图 2 弹片测试仿真模拟图

起固定作用的下金属块, 尺寸设置为 14 mm×5 mm×1 mm, 材料为镀银铝合金, 银镀层厚度为 1 μm。弹片结构主要由铝合金构成, 与上表面接触的凸包结构高为 0.5 mm, 弹片上表面与施加压力的金属界面相接触。通过测试数款来自不同厂商的手机产品, 得到手机内中框的厚度一般在 0.5 mm 左右, 因此将 PCB 尺寸设置为 14 mm×16 mm×0.5 mm。实验中金属面选取 4 种常见的电连接材料, 分别为金、镀镍、铝合金以及不锈钢^[11-12]。其中镀

金层厚度为 0.25 μm ，镀镍层厚度为 2 μm ，铝合金与不锈钢厚度设置为 1 mm。

基于此种测试方法，测试结果中不仅包括了弹片凸包与不同界面之间的接触电阻，还有由固定金属块、弹片自身结构、金属接触面自身构成的体电阻，因此为了测试的准确性，需要先通过仿真得到体电阻，再在测试电阻结果中减去仿真的体电阻阻值。

采用仿真软件 CST 对建立的模型进行计算仿真，仿真时在固定金属块和 PCB 板远离弹片端加上端口，用于馈电及监测接触电阻随接触金属界面的变化情况。弹片凸包与上表面接触，接触面光滑平整，接触面积为 50 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 。弹片处于未压缩状态时，仿真结果如表 1 所示。表 1 中还列举了不同材料的电阻率，通过对比这 2 组数据，可见不同接触界面的体电阻仿真结果与各材料的电阻率呈一定的相关性，除了铝合金和镀镍材质，电阻率更大的材料往往会对应更大的接触电阻。

表 1 不同材料电阻率与体电阻仿真结果

Table 1 Simulation results of resistivity and body resistance of different materials

materials	Ni	Au	stainless steel	Aluminum alloy
resistivity/($\text{n}\Omega \cdot \text{m}$)	68.4	24.0	730.0	74.8
body resistance/ $\text{m}\Omega$	0.020 0	0.000 4	20.000 0	0.016 0

2 接触电阻测量试验

2.1 弹片接触电阻测量

为研究接触压力、接触电阻以及不同接触材料之间的关系，本文设计了如图 2 所示的固定金属板以及 PCB 板，以及固定住放置固定金属块的夹具，如图 3(a)~(b)所示。本次实验中，测量仪器使用了 Tegra 公司型号为 R1L-B 的微欧计，一个精确度在 0.01 N 和 10 μm 的压力装置以同时监测施加的压力以及下压的位移，如图 3(c)所示。其中，微欧计的测试原理为四线法，如图 3(d)所示，图中 $R_1 \sim R_4$ 为导线电阻，在测量过程中只需使用尺寸规格都相同的导线，便可在测试的过程中对消。

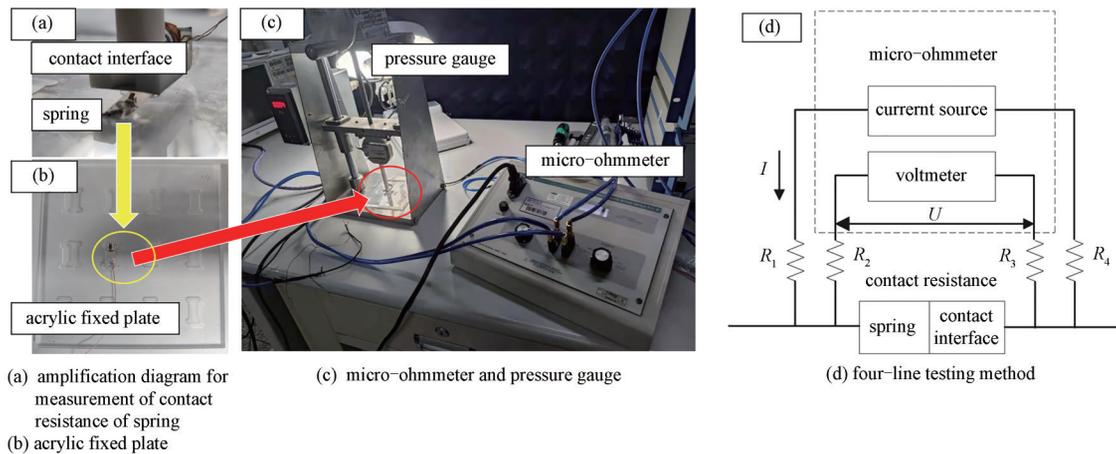


Fig.3 Experimental platform and schematic diagram of contact resistance measurement

图 3 接触电阻测量实验平台及原理图

测试过程中，为稳定待测件，需将弹片焊接在固定金属板上，并将固定金属板嵌入亚克力板中。同时为了测试接触电阻的准确性，测量开始时，需先单独测量固定金属板以及 PCB 板的直流电阻，测试后再在结果中将这二者的直流电阻减去，并使用丙酮、无水乙醇、去离子水依次将实验样品清洗 5 min，以去除表面的有机物污渍。

2.2 实验测量结果

根据上述实验平台，测试了镀金、镀镍、铝合金以及不锈钢这 4 种不同的接触界面与弹片的接触电阻。测试时控制下压的位移量，每次测量的位移间隔为 0.25 mm，读取此时的接触力与接触电阻示数，其中不锈钢材质的接触电阻随外加力变化关系曲线如图 4 所示，并用幂函数对测

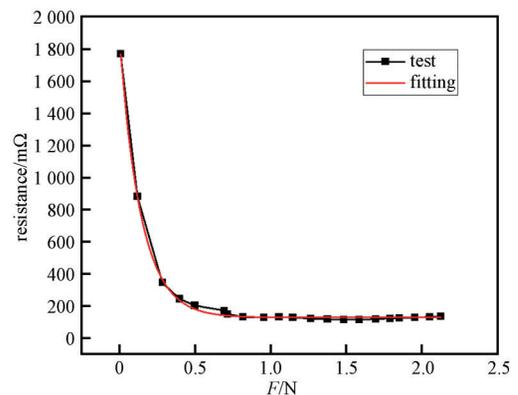


Fig.4 Diagram of contact resistance between spring and stainless steel varying with applied force

图 4 弹片与不锈钢接触电阻随外加力变化关系图

试数据进行拟合。

图中拟合的幂函数表达式为：

$$R_c = A - BC^F \tag{1}$$

式中： R_c 为接触电阻； F 为外加力； A, B, C 为拟合参数，与金属的材质有关。

观察测试结果可见，在外加力较小，弹片与金属刚接触时，接触电阻较大，随后阻值会随着外加力增大而减小。当外加力增加到 0.5 N 左右，接触电阻会逐渐趋于稳定，基本不再变化。其他 3 种金属材质的弹片接触电阻与外加力的实验测试结果和拟合曲线如图 5 所示。

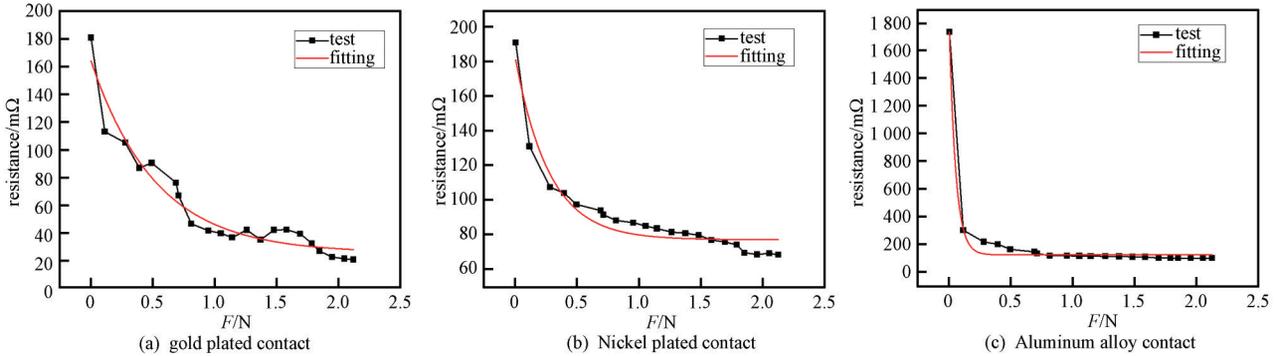


Fig.5 Relationship between contact resistance of bullet and gold-plated, Nickel-plated and Aluminum alloy with applied force
图5 弹片与镀金、镀镍、铝合金接触电阻随外加力变化关系图

由实验结果可见，对于不同的材料，当外加力较小以致 PCB 板刚与弹片接触时，接触电阻阻值都较大，随后阻值都会随外加力的逐渐增大而减小；在外加力达到 0.5 N 左右时，阻值趋于稳定不变。通过对比不同材料之间的接触电阻数据，结合不同材料的电阻率以及接触电阻仿真数据，可以发现，在相同外加力的情况下，电阻率越高的材料，与弹片的接触电阻也越大，大小对比关系满足仿真结果。

从测试结果可见，测试得到的电阻阻值与仿真得到的体电阻之间有较大的差距，差距至少在一个数量级以上，因此可以认为实验中测得的电阻主要源于接触电阻。而且从拟合曲线可见，对于这 4 种材料，幂函数拟合数据都较为贴近实验测量结果，具体拟合参数如表 2 所示。本次实验还测试了弹片外加力与弹片下降位移之间的关系，如图 6 所示，并对此曲线做了拟合处理。

表2 不同材料幂函数曲线拟合参数

materials	A	B	C
steel	128	-1 642	0.000 923
Au	25	-138	0.149 000
Ni	77	-103	0.026 500
Aluminum alloy	127	-1 608	0.000 478

拟合曲线为一次函数形式，具体值为：

$$D = 0.07 + 4.23F \tag{2}$$

式中： D 为位移量； F 为外加力。可见随着外加力的逐渐增大，弹片会几乎线性地向下进行位移。

3 实验结果分析

通过理论仿真及实验测量，证明弹片与金属界面之间的接触电阻与金属界面材料的电阻率、外加力有关。为进一步揭示接触电阻随材料以及外加力变化的规律，本文采用 Popov 的著作中^[13]给出的理论与解释，根据本文中使用的弹片的凸包型结构接触面，建立的等效电接触模型如图 7 所示。

这种凸包型结构在接触时可等效为一个矩形接触，长度 L 为凸包的截面长度，由弹片自身结构决定，基本为定值，接触面宽度 $2a$ 则由弹片结构、弹片材料、外加力决定，根据机械接触理论，公式如下：

$$a = \left(\frac{4}{\pi} \times \frac{FR}{E^*} \right)^{1/2} \tag{3}$$

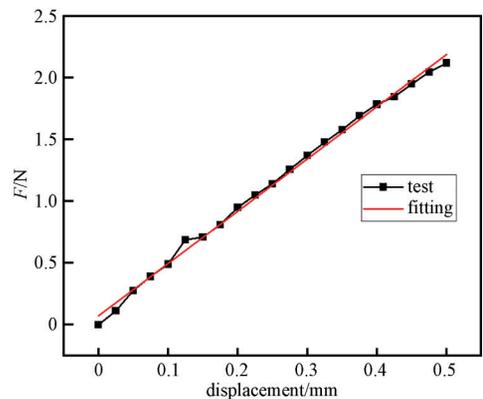


Fig.6 Relationship between additional force and displacement
图6 弹片外加力与位移关系图

式中： R 为凸包曲率半径； E^* 为凸包结构材料的杨氏模量。

因此，根据Holm的电接触理论^[4]，可以推导出凸包结构的接触电阻：

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{16\eta b} \sqrt{\frac{\pi E^*}{F}} L^{-1} R^{-1} \quad (4)$$

式中： R_c 为凸包结构的接触电阻； ρ_1 和 ρ_2 分别为弹片与接触金属界面的电阻率； η 为金属接触面的面密度； b 为金属接触面的二级粗糙半径。由式(4)中可知，随着外加力增大，凸包结构的等效接触面积增大，接触电阻减小；同时，接触电阻阻值随接触材料的电阻率增大而增大。这与仿真结果和实验测量结果相一致。

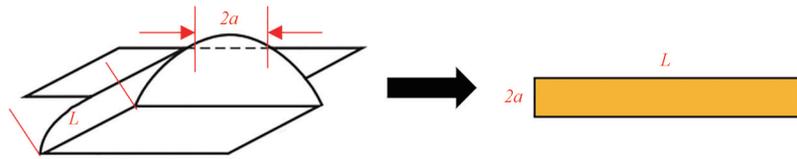


Fig.7 Contact equivalent model of convex hull structure
图7 凸包结构接触等效模型

为准确计算不同接触面之间的接触电阻阻值，使用Keyence公司S-4800型号的扫描电子显微镜观察不同材料的表面形貌，如图8所示。每一种材料的左图为放大400倍下的观察结果，右图为放大1000倍下的观察结果。电镜观察的接触面面密度以及二级粗糙半径如表3所示，此时根据已有的数据以及式(4)，在表3中列出了相应金属面的接触电阻阻值。

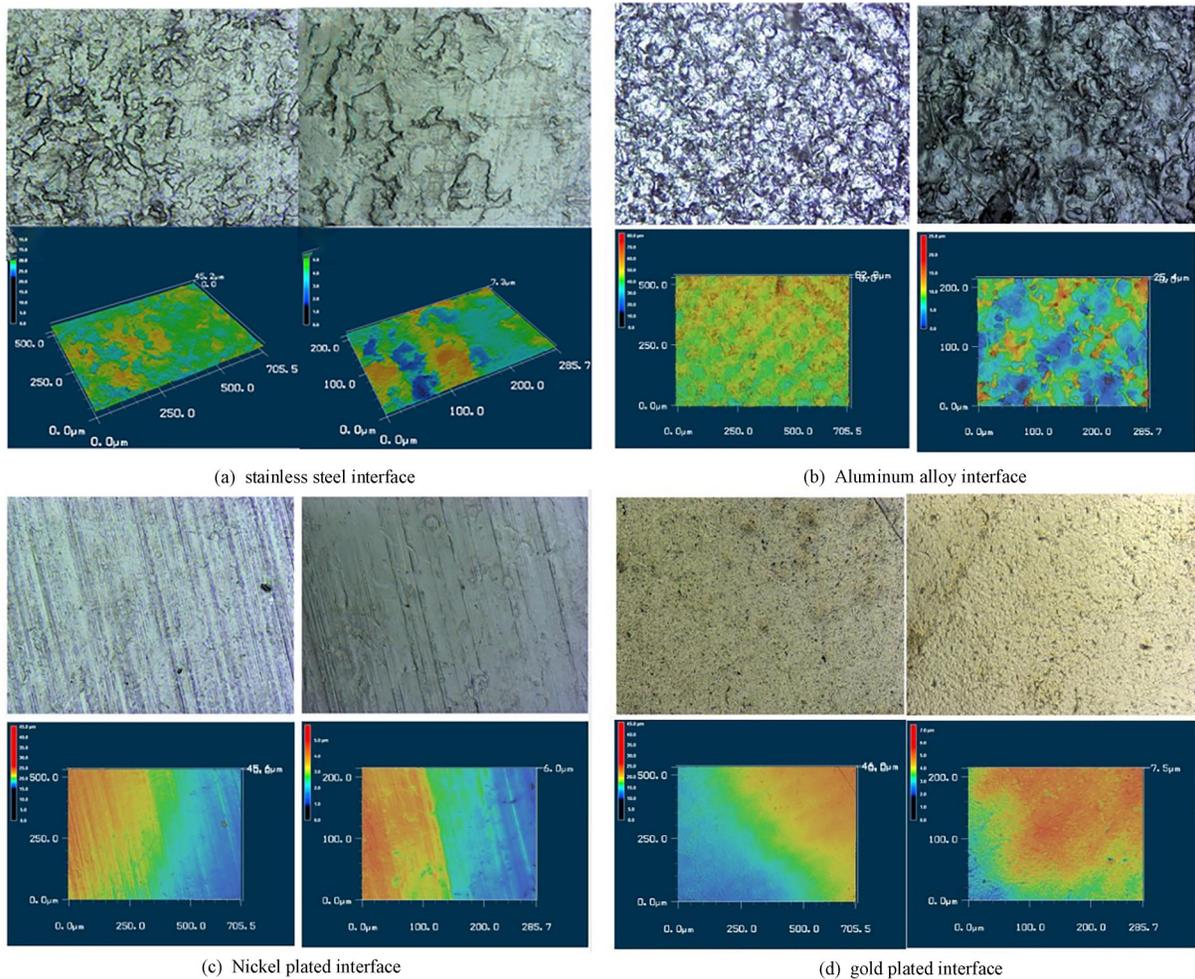


Fig.8 Observation on surface morphology of four metal interfaces
图8 四种金属界面表面形貌观察

由表 3 中根据此凸包模型计算得到弹片与不同材料间的接触电阻,与表 1 中仿真得到的体电阻数据对比可见,计算结果和仿真数据具有相同的大小对比关系,即不锈钢的阻值最大,镀镍材质与铝合金材质的电阻阻值接近,镀金材质的电阻阻值最小。考虑到实际电连接情况存在不理想的情况,计算与仿真结果和实际测试结果阻值大小有差异,但不同材质之间的大小对比关系基本相吻合,也与材料的电阻率大小对比关系基本一致,即电阻率越大的材料,接触电阻也会越大。

表 3 四种金属界面的面密度、二级粗糙半径以及接触电阻

materials	Ni	Au	stainless steel	Aluminum alloy
η (areal density)/(10 ⁹ m ²)	10.0	10.0	5.0	2.5
b (second level rough radius)/ μm	1.50	1.80	1.00	4.27
R_c (contact resistance)/ $\mu\Omega$	0.063 0	0.000 6	1.909 0	0.062 0

4 结论

本文通过仿真及实验,系统分析了弹片与接触电阻、不同金属界面及外加力之间的关系。认为弹片与金属界面的接触电阻大小和金属界面自身的电阻率有一致性,即金属电阻率越大,弹片与其接触电阻也会越大;且在弹片刚与 PCB 板接触时会有较大阻值,阻值会随着外加力增大而逐渐减小,在外加力为 0.5 N 时趋于稳定。本文还对弹片的外加力与接触电阻进行了拟合,基于本文弹片,给出了接触电阻与镀金、镀镍、铝合金、不锈钢 4 种材质的幂函数拟合曲线及相关参数。结合实验结果与机械接触理论,对弹片的接触电阻与材料、外加力之间的关系进行了原理阐述,研究结果对于弹片与不同材料在弱力下的接触电阻分析具有参考意义。

参考文献:

- [1] 李庆娅. 高频电接触失效机理及可靠性研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2020. (LI Qingya. Research on the failure mechanism and reliability of electrical contacts at high frequency[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.)
- [2] FLOWERS G T, XIE F, BOZACK M J, et al. A study of the physical characteristics of vibration induced fretting corrosion[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(2):318-325.
- [3] FLOWERS G T, XIE F, BOZAEKM J, et al. Modeling early stage fretting of electrical connectors subjected to random vibration[C]// Proceedings of the 49th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Washington, DC, USA:IEEE, 2003:45-50.
- [4] 王龙泉. 基于有限元分析的电连接器接触件接触特性与温度场模拟研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017. (WANG Longquan. Simulation study on contact characteristics of contact pieces and temperature field of electrical connector based on finite element analysis[D]. Zhenjiang, Jiangsu, China: Jiangsu University, 2017.)
- [5] BI Y H, WU W, ZHOU J. Innovative O-shape spring contact used in mobile devices[C]// 2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Denver, CO, USA:IEEE, 2013:779-782.
- [6] ZHANG S C, ZHAO X L, GAO F, et al. Study of metal contact resistance and its statistical correlation with passive intermodulation[C]// 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque, NM, USA:IEEE, 2018:353-358.
- [7] 王小丽, 陈翔, 崔万照. 空间大功率微波器件无源互调最新研究进展[J]. 空间电子技术, 2020, 17(5):1-10. (WANG Xiaoli, CHEN Xiang, CUI Wanzhao. Recent research advances of passive intermodulation for high-power microwave components[J]. Space Electronic Technology, 2020, 17(5):1-10.)
- [8] 李霄泉, 崔万照, 胡天存, 等. 无源互调抑制技术研究现状及发展趋势[J]. 空间电子技术, 2017, 14(4):1-6. (LI Xiaoxiao, CUI Wanzhao, HU Tiancun, et al. Review of passive intermodulation techniques and development trend[J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(4):1-6.)
- [9] 高凡, 赵小龙, 叶鸣, 等. 一种基于偶极子近场耦合法测量无源互调的方法[J]. 空间电子技术, 2018, 15(3):12-18. (GAO Fan, ZHAO Xiaolong, YE Ming, et al. A passive intermodulation measuring method based on the coupling of dipole near-field[J]. Space Electronic Technology, 2018, 15(3):12-18.)
- [10] 陈雄, 罗宇, 马凯学, 等. 基于耦合结构的双向可调无源互调参考源[J]. 空间电子技术, 2020, 17(5):20-23. (CHEN Xiong, LUO Yu, MA Kaixue, et al. Coupling network based tunable bidirectional PIM reference for passive intermodulation measurements[J]. Space Electronic Technology, 2020, 17(5):20-23.)
- [11] 李家明, 徐淑庆, 梁铭忠. 化学镀工艺在电子工业中的应用现状[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(1):21-24. (LI Jiaming, XU Shuqing, LIANG Mingzhong. Application status of electroless plating process in electronic industry[J]. Plating and Finishing, 2016, 38(1):21-24.)

- [12] 黎永钧. 化学镀镍合金在电子工业中得到的应用[J]. 电子工艺技术, 1998,19(5):185-189. (LI Yongjun. Applications of electroless Nickel alloy in electronics industry[J]. Electronic Process Technology, 1998,19(5):85-189.)
- [13] POPOV V L. Contact mechanics and friction:physical principles and applications[M]. Berlin:Springer, 2010.
- [14] HOLM R. Electrical contacts[M]. 4th ed. Berlin:Springer, 1979:3-4.

作者简介:

曾鸣奇(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电接触、射频电路设计 .email:tomtsang.qi@qq.com.

赵小龙(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微波元器件及其非线性干扰问题.

周昊楠(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波器件和电路非线性效应.

彭玉彬(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波射频无源器件设计和低气压放电.

张松昌(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电接触、射频系统可靠性.

贺永宁(1971-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微波毫米波新结构器件及其探测系统应用.

(上接第262页)

- [24] 魏焕,王新波,白鹤,等. 大功率微波部件多载波无源互调分析与实验验证[J]. 中国空间科学技术, 2021,41(1):100-105. (WEI Huan,WANG Xinbo,BAI He,et al. Analysis and experiment on multicarrier passive intermodulation in high power component[J]. Chinese Space Science and Technology, 2021,41(1):100-105.)
- [25] SMACCHIA Davide. Advanced techniques for the characterization and experimental validation of Passive Intermodulation effect (PIM) in space communications systems[D]. Valencia,Spain:Universitat Politecnica de Valencia, 2022.

作者简介:

魏 焕(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间微波部件特殊效应、微放电、无源互调机理、分析、检测与抑制技术 .email:weihuan5208@163.com.

白 鹤(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间大功率微波与天线技术.

胡天存(1983-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为空间大功率微波机理与抑制技术.

王新波(1984-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间微波部件微放电仿真分析技术.

王 瑞(1985-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微放电、无源互调与低气压放电等空间微波特殊效应.

崔万照(1975-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间微波技术.