

空间冷焊效应的研究进展

苍悦天, 张凯锋, 周晖, 万志华, 郝宏, 胡汉军

(兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 综述了自 20 世纪 60 年代以来国内外航天机构对空间冷焊效应的研究成果。首先, 从晶体结构与能量角度阐述了空间冷焊效应的机理, 并讨论了表面氧化物、非化学计量化合物和晶体缺陷在冷焊效应中的作用。接着针对冷焊效应的主要影响因素, 分别从接触类型、基体材料特性、接触面积与应力等方面进行了深入的分析, 具体包括静载、冲击和微动 3 种接触类型下冷焊效应的差异, 不同材料对偶间粘着力大小的对比以及接触面积和应力对冷焊效应的影响。随后介绍了国内外冷焊效应研究设备概况。在此基础上, 归纳了 3 种空间活动机构常用基体材料 (Fe、Al 和 Ti 基金属材料) 的冷焊防护措施, 具体包括镀 MoS₂、TiC 和 DLC 等涂层以及硬质阳极氧化、等离子体电解氧化等处理方法。最后, 针对我国目前空间冷焊效应的研究现状, 提出了研究重点与发展建议。

关键词: 高真空; 空间冷焊; 粘着力; 微动磨损; 冷焊防护

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)04-0092-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.04.008

Research Progress of Space Cold Welding Effect

CANG Yue-tian, ZHANG Kai-feng, ZHOU Hui, WAN Zhi-hua, HAO Hong, HU Han-jun

(Lanzhou Institute of Physics, China Academy of Space Technology, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The research results of space cold welding effect on domestic and foreign space institutions since the 1960s were reviewed in this paper. First, based on the explanation of lattice structure and energy, the mechanism of the space cold welding effect was expounded. Also, the role of surface oxides, non-stoichiometric compounds and crystal imperfections in cold welding effect was discussed. The main factors affecting the cold welding effect including contact type, substrate materials, contact area and the stress, were also analyzed. It included the difference of cold welding effect under static load, impact and fretting, the comparison of adhesion force between different material, and the influence of contact area and contact stress on cold welding. The equipment for the research of the cold welding effect was introduced. Aimed at three common substrate materials for space moving parts (steel, aluminium alloy and titanium alloy), the protection measures for cold welding were summarized. It included coatings (such as MoS₂, TiC, and DLC), hard anodizing and plasma electrolytic oxidation. According to the current research situation of the space cold welding effect in China, the main points of research and the development suggestions were put forward.

KEY WORDS: high vacuum; space cold welding; adhesion force; fretting wear; cold welding protection

收稿日期: 2021-02-09; 修订日期: 2021-10-15

Received: 2021-02-09; Revised: 2021-10-15

作者简介: 苍悦天 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面科学与工程。

Biography: CANG Yue-tian (1997—), Male, Postgraduate, Research focus: surface science and engineering.

通讯作者: 张凯锋 (1976—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空间活动零部件润滑与评价技术。

Corresponding author: ZHANG Kai-feng (1976—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: lubrication and evaluation technology of space moving parts.

引文格式: 苍悦天, 张凯锋, 周晖, 等. 空间冷焊效应的研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 92-103.

CANG Yue-tian, ZHANG Kai-feng, ZHOU Hui, et al. Research Progress of Space Cold Welding Effect[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 92-103.

在高真空环境中, 金属表面吸附层解吸, 相互接触的金属表面由于粘着力增加或原子相互渗透, 使相邻表面原子键发生结合, 从而致使金属粘接在一起, 这一现象称为空间冷焊。在地面环境中, 金属表面的表面层 (如氧化层、氮化层等) 会阻止冷焊的发生, 且表面层被破坏后, 金属立即与空气接触, 可重新生成表面层。但是在高真空环境下, 没有额外的气体, 表面层一旦被破坏, 便不能重建, 金属之间会直接接触, 冷焊发生的几率大大提高。

自 20 世纪 60 年代起, 各种在轨空间飞行器日渐增多, 空间飞行器的机械结构和服役环境也日益复杂, 尤其是载人航天任务对接机构与深空探测任务活动机构处于长时间压紧状态, 使得一些空间部件发生粘接、卡滞等故障, 从而使各国研究人员开始关注空间冷焊效应。迄今为止, 国外关于空间冷焊效应造成航天器异常的公开报道有 5 起^[1-2]。“Surveyor 1”月球探测器的势能计活动机构因发生冷焊而滞塞。美国空军的一颗研究卫星在发射过程中因振动而产生的摩擦使得防冷焊涂层过度磨损, 进而发生冷焊, 导致卫星入轨后天线未能正常展开。“Gemini 4”舱门铰链因润滑膜破损, 局部发生冷焊, 使舱门在开关过程中发生瞬间卡滞。美国空军“WEST FORD”在试验任务中, 冷焊造成铜针相互粘结, 导致整个任务以失败告终。1989 年美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, 简称 NASA) 发射的“伽利略”号木星探测器飞行 6 a 后入轨, 其高增益天线就因为发生冷焊而打开失败, 最后只能通过通信速率较低的天线传输数据, 使得“伽利略”号的工作效率大幅降低^[3]。冷焊效应对于在高真空或超高真空环境中的空间飞行器的正常运行存在巨大风险, 研究冷焊效应对于提高空间飞行器活动机构的可靠性和寿命, 保证空间飞行器正常服役具有十分重要的意义。

NASA 先后发射了“ERS15”、“ERS16”、“ERS20”、“OV-1-13”等用于空间冷焊效应研究的试验卫星, 卫星上搭载了不同金属材料组成的对偶样品, 并且包括了存在相对旋转运动的对偶样品。之后在 1984 年发射的长期暴露装置 (LDEF) 上进行了“不同材料的微焊接”飞行试验研究。这些空间试验取得了大量数据, 为地面试验提供了参考依据^[4]。

Ohno^[5]对冷焊的机理研究作出了贡献, 试图从晶体结构和能量的角度去解释冷焊现象。Merstallinger 等^[6-7]从工程应用角度对空间冷焊效应进行了卓有成效的研究, 并建立了供工程师参考的冷焊数据库。本文着重针对空间冷焊效应的机理、影响因素、试验设备以及几种常见空间材料的冷焊防护措施等方面进行了综述, 并展望了我国未来空间冷焊效应的研究重

点。

1 空间冷焊效应研究

1.1 冷焊机理

Ohno^[5]从非化学计量氧化物、局部温度和晶体缺陷等角度研究了金属表面氧化物间的空间冷焊效应机理。他提出的“冷焊的动态表面状态理论”中指出, 宏观上静止的受载表面, 在原子层面则处于动态。对于 2 个对偶金属材料而言, 其本质是二者表面氧化物的接触, 因此研究冷焊效应首先应关注金属表面的氧化物。外界条件 (机械载荷、声振动、热振动、太阳辐射等) 会使表面氧化物的晶格发生畸变, 所产生的畸变能会促进原子扩散, 从而使对偶表面处于动态, 而这一非平衡的状态最终会达到平衡。在地面环境中, 充足的氧气会填充表面氧化物中的阴离子空位, 从而形成扩散屏障。在高真空环境下, 没有额外的氧气, 氧化物中的原子会更容易地扩散到对偶表面中, 并建立起新的结构, 即产生了空间冷焊效应。

Enrich^[8]的研究表明, TiO 的分子式会在 $\text{TiO}_{0.6}$ 和 $\text{TiO}_{1.25}$ 之间变化, 理想的化学计量 TiO 应含有 15% 的阳离子和阴离子空位。在非化学计量氧化物中, 富钛样品的阴离子空位较多。反之, 富氧样品的阳离子空位较多。氧化物中氧原子的运动主要受离化态和空位的影响, 在高真空环境下, 表面层中含有较多的阴离子空位, 因此氧原子的扩散变得较为容易。

当 Mg 、 Al 、 Ti 等金属的氧化物互相接触时, 由于原子扩散, 其对偶表面可能产生 AB_2O_4 这类尖晶石型结构的化合物。例如, MgO 和 Al_2O_3 接触会产生化合物 MgAl_2O_4 , 其晶格结构如图 1 所示。结构中的 $\text{Al}-\text{O}$ 和 $\text{Mg}-\text{O}$ 均为较强的离子键, 因此这种化合物结合牢固, 化学稳定性好^[9], 在对偶表面一旦产生这一类化合物, 冷焊效应将会被加强。

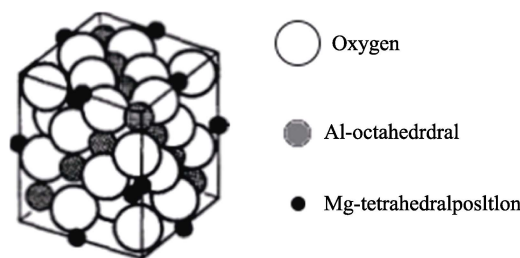


图 1 尖晶石 MgAl_2O_4 的晶格结构^[5]
Fig.1 Lattice structure of MgAl_2O_4 spinel^[5]

关于温度对冷焊效应的影响, 除了环境温度以外, 还应该关注晶体的局部温度。弹性振动和声振动等产生的振动能可以产生局部热量, 并导致热晶格振动。这些热晶格振动对于电子迁移率有着强烈的影

响,并且能够促进离子扩散,从而加剧冷焊。在很小的面积上施加振动能可以致使瞬间的温升,使得局部温度高于环境温度。因此,环境温度并不总能代表局部区域的温度。

位错与空位和间隙原子的组合对于原子扩散有着重要的影响,它们之间通常依次发生^[10]。一方面,位错会产生空位,而空位会促进原子扩散;另一方面,过多或过少的空位和间隙原子会产生位错攀移的驱动力,而位错攀移需要通过空位和间隙原子的扩散来完成物质迁移。除此之外,相比于没有位错的晶体,拥有位错的晶体生长速度较快,这种晶体生长导致了在粘接处的再结晶,并加强了粘接区域。综上所述,晶体中缺陷的存在会加强冷焊效应。

1.2 接触类型的影响

航天器中一些循环开合的运动部件通常会在静载条件下进行地面测试和设计^[11],但在航天器实际运行中,它们经常被施加冲击力。在火箭发射等特定阶段,这些运动部件又会产生横向运动,从而处于微动条件下,这种微小的滑移可能导致严重的表面破坏^[12-14]。因此,不能仅仅考虑静载条件下材料的空间冷焊效应。

Merstallinger等^[6]、Moeller等^[7]针对静载、冲击和微动3种接触类型下2个接触表面间的粘着力大小(反映冷焊的严重程度)进行了研究。在循环开合试验中,2种对偶材料分别是钛合金 IMI834 和不锈钢 AISI440C(国内牌号 9Cr18^[15]),试验结果如图2所示。在29 N的静载荷作用下,材料对偶的粘着力趋近于0;在29 N的冲击载荷作用下,最大粘着力为0.96 N;而在4 N的微动条件下,最大粘着力达到了9.5 N,约为初始加载的4倍。由此可见,相比于静载条件,在冲击和微动条件下,冷焊更容易发生,并且微动条件下的空间冷焊效应尤为严重。因此,在考虑冷焊效应时,必须重点关注冲击和微动这2种接触类型。

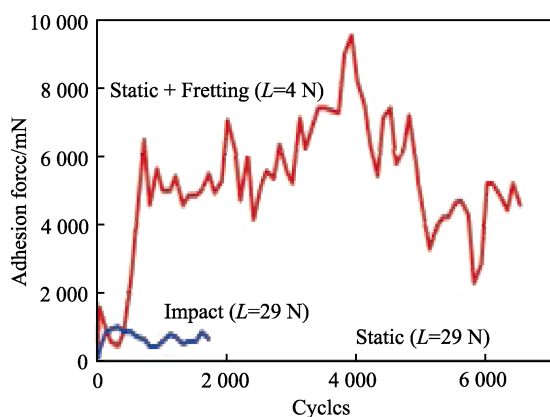


图2 静载、冲击和微动条件下的粘着力大小对比^[6]
Fig.2 Comparison of adhesion in static, impact and fretting condition^[6]

1.3 材料特性的影响

研究不同材料的冷焊效应,首先要建立起标准化的测试方法。欧洲 Austrian Research Centre Seibersdorf (ARCS) 制定的测试标准如下^[16]:参数静载荷和冲击能的选取与对偶材料的弹性极限有关;使用赫兹接触理论来计算接触应力;使用对偶中强度较低材料的屈服强度和 Von Mises 强度理论^[17]定义弹性极限。静载荷的选择分为3种,分别是接触应力达到40%、60%和100%弹性极限。冲击试验中,真空度应小于 5×10^{-6} Pa,初始载荷大小为40%弹性极限,在10 000次循环之后,将载荷大小增加至60%弹性极限,再经过5 000次循环,增加至100%弹性极限。微动试验中,真空度应小于 5×10^{-5} Pa,载荷的大小为60%弹性极限,循环次数为5 000。测试前,试件表面的粗糙度 $Ra < 0.1 \mu\text{m}$,每次接触和分离的时间为10 s。

Merstallinger等^[18]选取了一些常见的空间材料来进行测试,包括17-7PH 不锈钢(国内牌号 07Cr-17Ni7Al)、AISI52100 轴承钢(国内牌号 GCr15)、IMI834、Ti6Al4V(国内牌号 TC4)钛合金和7075 铝合金等。冲击试验的数据来源于载荷为100%弹性极限的情况,微动试验的数据来源于载荷为60%弹性极限的情况,具体如图3和图4所示。在冲击试验中,17-7PH 不锈钢(1 552 mN)和7075 铝合金(1 775 mN)与自身的对偶表现出了较大的粘着力,而 AISI52100 轴承钢的粘着力几乎为0(93 mN),Ti6Al4V 钛合金的粘着力介于它们之间(575 mN)。17-7PH 不锈钢与 AISI52100 或 AISI440C 轴承钢对偶时,粘着力大幅降低。由此可见,混合使用不同种钢材可以降低粘着力。

微动条件下的试验结果如图5所示(红色为冲击条件下的试验数据,白色为微动条件下的试验数据)。相比于冲击试验的数据,微动条件下各种材料对偶的粘着力显著增大。例如,在冲击条件下,17-7PH 不锈钢(SS17)与自身对偶的粘着力为1 552 mN,而在微动条件下增大至13 359 mN,约为前者的10倍。Inconel 718 镍合金(国内相近牌号 GH4169)表现出

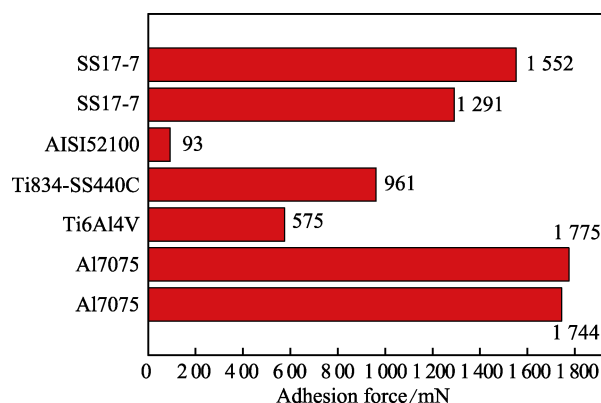


图3 在冲击条件下一些材料与自身对偶的粘着力^[6]
Fig.3 Adhesion force under impact for materials in contact to themselves^[6]

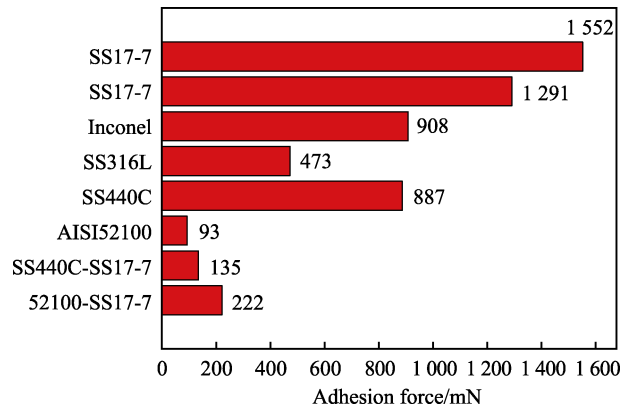


图 4 在冲击条件下一些钢材和镍合金与自身对偶的粘着力^[6]

Fig.4 Adhesion force under impact for different types of steel and Ni-alloy versus itself^[6]

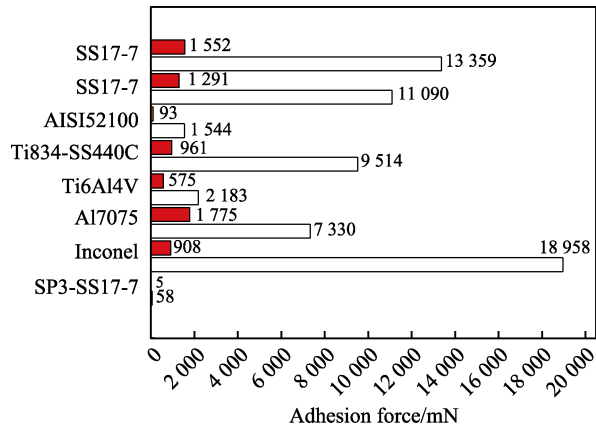


图 5 在冲击和微动条件下一些材料的粘着力对比^[6]

Fig.5 Comparison of adhesion force under impact and fretting^[6]

了最大的粘着力 (18 958 mN), 聚合物 VESPEL SP3 (含有质量分数为 15% MoS₂ 的热固性聚酰亚胺) 和 17-7PH 不锈钢的对偶没有发生冷焊。此试验数据也证明了微动条件下的冷焊效应更为严重。

Persson 等^[19]在研究不同材料与高速钢对偶的粘着力时,发现其大小与材料的镍含量有关,Merstallinger 等^[6]的试验数据也支持这一观点。不同镍含量的金属在 2 种条件下的粘着力如图 6 所示。粘着力最大的 Inconel 718 镍合金中,镍的质量分数为 52%,粘着力较高的 17-7PH 和 AISI316L 不锈钢中,镍的质量分数分别为 7%和 11%,粘着力很低的轴承钢 AISI52100 和 AISI440C (国内牌号 022Cr17Ni12Mo2) 的镍含量为 0。因此,Merstallinger 等^[6]认为粘着力随着对偶材料镍含量的降低而减小。但是由于试验选取的材料种类较少,并且没有排除金属中其他元素的影响,此结论还需进一步的实验来验证。

1.4 接触面积和应力的影响

Merstallinger 等^[20]也曾研究了几何参数和接触应力对空间冷焊效应的影响^[20],目的是研究在微动条件下粘着力是否与接触面积有关。试验参数见表 1,共

有 4 组不同半径和载荷的试件,试件材料选择无镀膜的奥氏体不锈钢 AISI316L 与自身接触,使用赫兹接触理论计算接触应力^[21-23]。

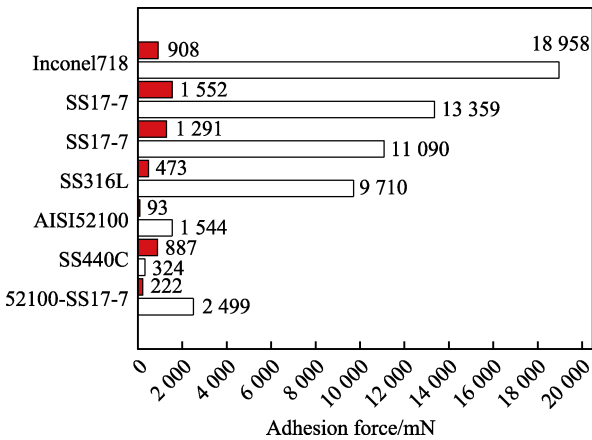


图 6 在冲击和微动条件下一些钢材和镍合金与自身对偶的粘着力对比^[6]

Fig.6 Comparison of adhesion force under impact and fretting for different steels and Ni-alloys versus themselves^[6]

表 1 试验参数^[20]
Tab.1 Test parameters^[20]

Tests	Tip radius/mm	Load/N	Contact pressure/MPa	Contact pressure/%
F1x	1	1	1 272	118
F2x	3	1	611	57
F3x	10	12	209	58
F3x	15	1	627	19

Merstallinger 等^[20]选择通过屈服强度乘以接触面积来计算理论状态下的粘着力,其中接触面积通过赫兹接触理论计算得到,接触面积和粘着力的计算结果如图 7 所示。可以看出,粘着力应随着接触面积的减小而降低。

实际测量的粘着力数据与使用赫兹接触理论计算的结果并不相符。实际的粘着力大小如图 8a 所示,只有第一组试件表现出了相对较低的粘着力 (6.2 N),其余 3 组相差不大,均在 10 N 左右。导致理论与实际结果不符的原因主要有 2 点:第一,微动磨损会导致接触面积增大^[24-25],由图 8b 可以看出,第三组试件在试验后显著地表现出了较大的接触面积,这表明即便接触应力相似,加载载荷增大也会导致微动磨损加剧;第二,由于试件表面粗糙度和污染物的影响,实际接触面积远小于理论推导的名义接触面积。在使用赫兹接触理论计算接触面积时,并没有考虑这 2 个因素,因此计算得到的结果与实际数据相差较大。

Merstallinger 等^[20]的试验无法直观表明接触面积对冷焊效应的影响,试验选用的理论已被证明不适合计算粘着力。因此,关于粘着力的计算模型还有待研究,其难点在于微动磨损过程以及实际接触面积的不可预测性。

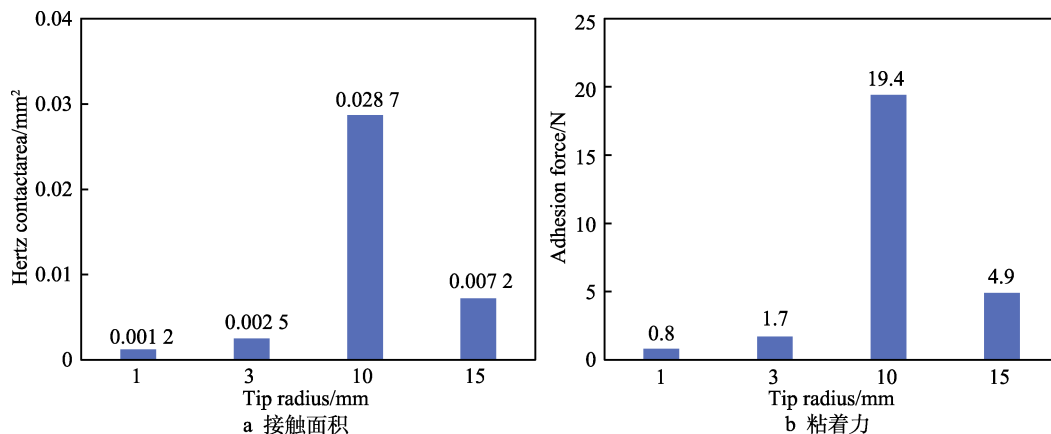


图7 使用赫兹接触理论计算得到的接触面积和粘着力^[20]
Fig.7 Contact areas (a) and adhesion forces (b) calculated by Hertz^[20]

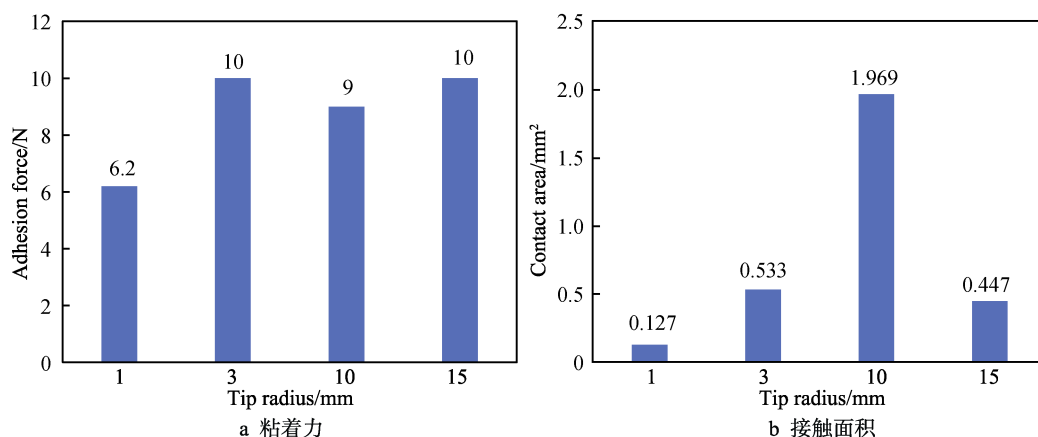


图8 实际测量的粘着力与微动试验后的接触面积^[20]
Fig.8 Measured adhesion forces (a) and measured contact areas (b) after fretting test^[20]

2 空间冷焊效应试验设备

20世纪70年代, NASA的Wang^[26]对冷焊的试验设备进行了研究。他指出在冷焊试验设备中不应该使用油泵, 因为泵油中的长链烃会在一定程度上对物体表面起到润滑作用, 从而使得试验数据无效。NASA研制的冷焊试验设备的侧面剖视图如图9所示。

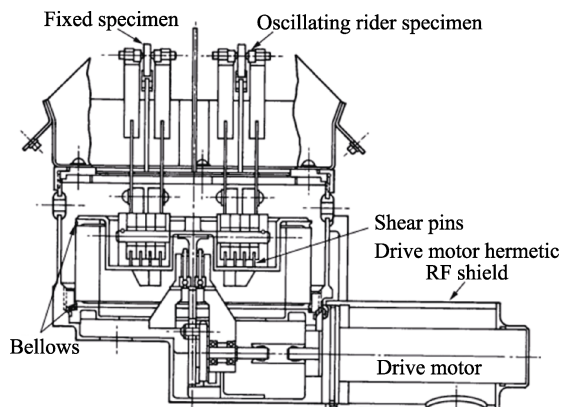


图9 NASA冷焊试验设备侧面剖视图^[26]
Fig.9 Side cutaway view of NASA cold welding test experiment^[26]

图10a为欧洲航天局(European Space Agency, 简称ESA)研制的冷焊试验设备, 用于进行冲击及微动冷焊试验, 其组成包括能达到 10^{-6} Pa真空度的超高真空系统和用于形成无振动环境的空气阻尼系统。微动试验装置的工作原理如图10b所示, 右侧的压电式致动器用于产生横向运动, 并通过位移传感器确认, 使用三轴压力传感器测量载荷、横向力和粘着力的大小^[9]。

北京卫星环境工程研究所(五院511所)研制的空间活动部件冷焊模拟设备如图11所示, 可以精确测量各种对偶材料的冷焊性能, 也可以对活动构件进行空间冷焊效应模拟试验。该设备拥有3种不同精度和用途的粘着力测量装置: 杠杆式冷焊测力装置(适用于工程材料)、冷焊测力轴尖天平(测力范围为 $1.5 \times 10^{-4} \sim 0.5$ N, 灵敏度为 $100 \mu\text{N}$)和应变测力装置(测力范围为 $5 \times 10^{-5} \sim 1$ N)。除此之外, 北京卫星环境工程研究所还研制了 $\Phi 500$ 小型无油超高真空冷焊试验设备和中型无油超高真空防冷焊评价试验设备等^[1,27]。

兰州空间技术物理研究所(五院510所)研制的LW-1型材料对偶超高真空冷焊效应试验设备及其原理如图12所示, 可用于测试对偶材料在超高真空环

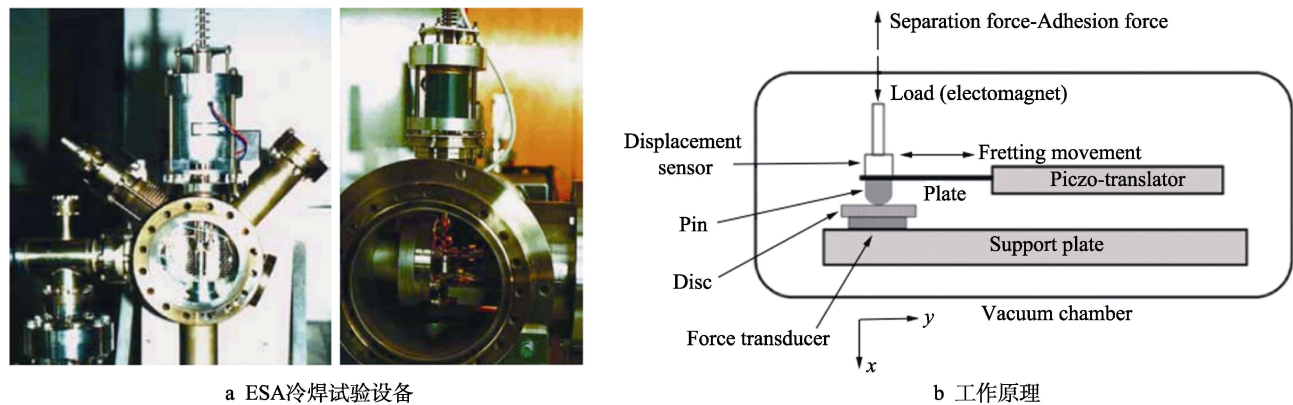


图 10 ESA 冷焊试验设备及其工作原理^[9]
Fig.10 ESA cold welding test experiment (a) and the functional sketch (b) of a fretting device^[9]

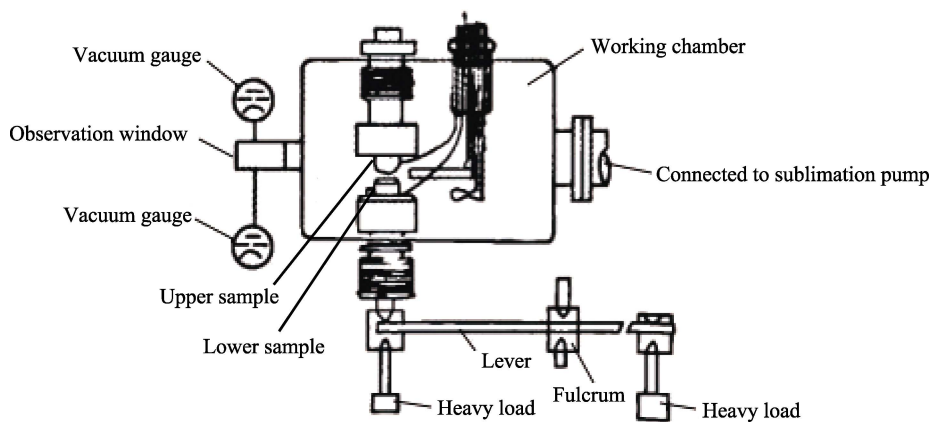


图 11 空间活动部件冷焊模拟设备结构^[1]
Fig.11 The sketch of cold welding simulation facility for space moving parts^[1]

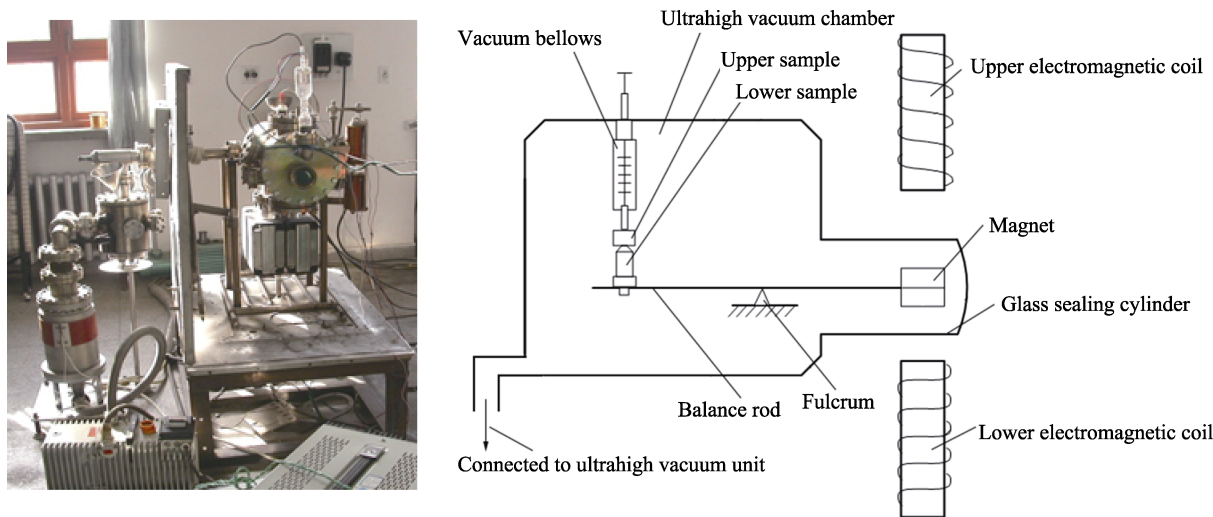


图 12 LW-1 型材料对偶超高真空冷焊效应试验设备及原理^[28-29]
Fig.12 LW-1 ultrahigh vacuum cold welding test experiment and its sketch^[28-29]

境中的粘着力或粘着系数（粘着系数=单次粘着力/加载载荷）。该设备综合利用了电磁力与杠杆的原理来生成测试所需的加载力和分离力，其真空室内只有杠杆支点一处摩擦位置，并且可通过固体润滑处理使得杠杆自身产生的误差忽略不计^[28-29]。

3 典型材料的空间冷焊效应防护措施

研究空间冷焊效应的最终目的是防止其在航天器活动构件上发生，因此空间冷焊效应的防护措施是研究的重点之一。

3.1 Fe 基金属材料

虽然各类新材料不断涌现,但高强度钢凭借其弹性模量大、冲击韧性好和强度高等优势在短期内仍将不可被替代^[30-34]。Merstallinger 等^[13]选取 TiC、DLC 和 MoS₂ 等涂层来对 17-7PH 不锈钢和 AISI52100 轴承钢进行镀膜后的冷焊试验,其结果如图 13 所示。在 17-7PH 不锈钢上镀 TiC 能使冲击条件下的粘着力

降至原来的 1/4 左右,而镀 MoS₂ 则可完全避免冷焊。AISI52100 轴承钢与 17-7PH 不锈钢的对偶粘着力本身较低,还可以通过在前者上镀 DLC 膜进一步降低粘着力,并且 DLC 膜在 37 000 次循环之后仍没有脱落。由此可见,在冲击条件下,MoS₂ 比 TiC 能更有效地防止 17-7PH 不锈钢发生冷焊,DLC 涂层更适合轴承钢这一类具有较高硬度的基体材料^[35-39]。

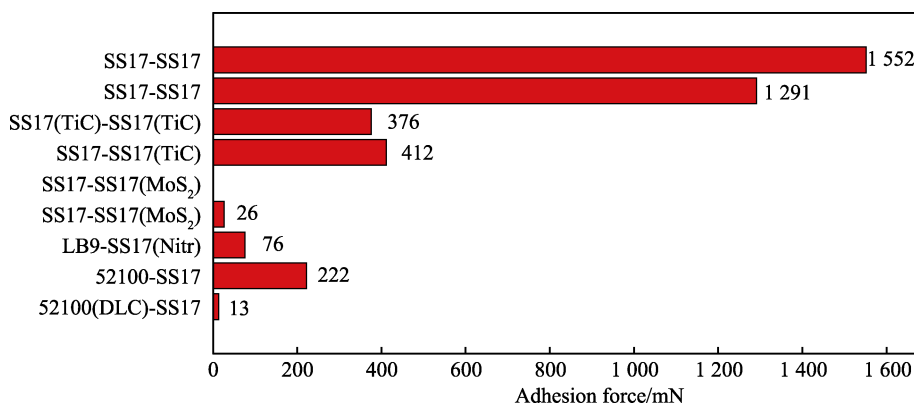


图 13 冲击条件下不同镀膜钢的粘着力^[13]

Fig.13 Adhesion force under impact for different coatings on steel^[13]

微动条件下的试验结果如图 14 所示。可以看出,仅在 17-7PH 不锈钢上镀 MoS₂ 不足以预防冷焊,粘着力达到了 5 870 mN,相比于未镀膜时,仅降低了约 50%。微动试验后,镀有 MoS₂ 的不锈钢 SS17-7PH 的扫描电镜图像如图 15 所示。从图 15 可以清晰地看到镀层已被破坏,通过能谱分析也能确认接触区域的 Mo 元素含量为 0,表明 MoS₂ 镀层已经全部脱落。对 17-7PH 不锈钢进行氮化处理也不能有效降低粘着力

(8 517 mN)。在 AISI52100 轴承钢上镀 DLC 膜,可降低其与 SS17-7PH 对偶的粘着力至 1/3 左右(856 mN)。镀有 MoS₂ 的 AISI440C 轴承钢与 17-7PH 不锈钢对偶的粘着力为 261 mN,但是在 17-7PH 不锈钢上额外镀 TiC,使得组合的粘着力增大为 2 210 mN,并且观察到 MoS₂ 镀层在 366 次循环之后破裂。因此,Merstallinger 等^[13]认为 TiC 会破坏 AISI440C 轴承钢上起到预防冷焊作用的表面层。

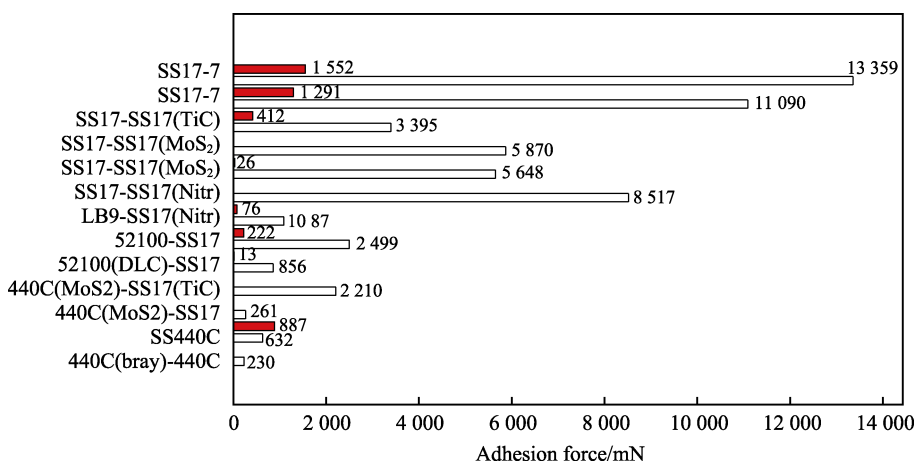


图 14 冲击和微动条件下不同镀膜钢的粘着力^[13]

Fig.14 Adhesion force under impact and fretting for different coatings on steel^[13]

复合镀层往往比单一材料具有更良好的性能。例如,1997 年我国发射的风云二号卫星(FY-2A)的分离段就采用了含有 MoS₂ 的复合镀层进行防冷焊处理,保证了星箭的正常分离^[40]。因此,未来关于各种

复合镀层在防冷焊处理上的应用值得关注^[41-42]。

3.2 Al 基金属材料

尽管受到钛合金及复合材料的挑战,铝合金凭借

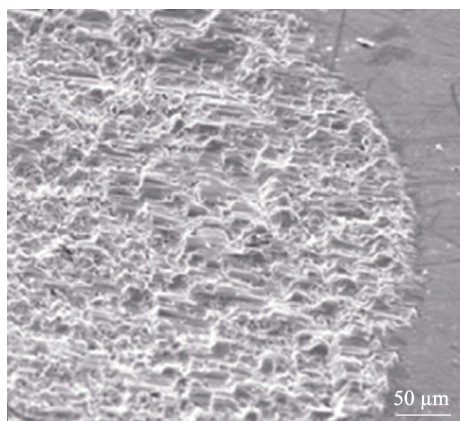


图 15 微动试验后镀有 MoS_2 的不锈钢 SS17-7PH 表面^[13]
Fig.15 Surface of disc SS17-7PH with MoS_2 coating after fretting tests^[13]

耐腐蚀性好、相对密度小、加工方便、可回收性强以及铝的资源丰富等优势, 在短期内依然是航天器的重要材料, 其中 2000 系和 7000 系变形铝合金在航天领域的应用最广^[43-44]。其防冷焊处理在冲击条件下的试验结果如图 16 所示, 硬质阳极氧化铝合金与 15-5PH (国内牌号 05Cr15Ni5Cu4Nb) 不锈钢以及阿洛丁阳极氧化处理 (阿洛丁 1200) 铝合金的对偶、

镀 CrNi 的铝合金与硬质阳极氧化铝合金的对偶均表现出较低的粘着力, 但是仅在一侧铝合金上进行阿洛丁阳极氧化处理不足以预防冷焊 (粘着力为 336 mN)。等离子体电解氧化 (Keronite) 后的铝合金不仅表现出很低的粘着力, 而且铝合金表面没有碎片产生^[13,45]。

传统的阳极氧化技术因其可以提高铝合金的耐磨性和抗腐蚀性而得到了广泛的应用, 但是其存在着危害环境以及长期暴露下黑色涂面不稳定的问题^[46-47]。等离子体电解氧化技术作为一种相对新型的环保型电解镀膜工艺, 适用于镁、铝等轻金属及其合金, 有着广阔的应用前景。Shrestha 等^[48]针对等离子体电解氧化技术在空间轻金属材料结构的应用进行了研究。其工艺过程为在使用压缩空气搅动的电解槽中施加调制电压, 由于部件表面产生微弧, 足够高的电压会产生强烈的等离子体, 这会使得部件表面氧化以及电解质溶液中的元素共沉积, 从而在基体上形成硬质陶瓷氧化层。与传统阳极氧化处理相比, 等离子体电解氧化技术可以提高抗冲击和微动磨损的能力, 目前世界各国已将此技术应用于尖端武器装备制造以及航空航天等领域^[49]。

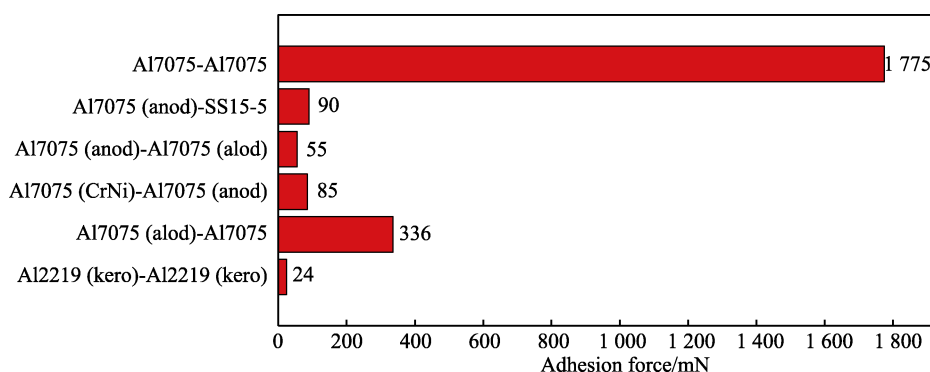


图 16 冲击条件下不同镀膜的铝合金的粘着力^[13]

Fig.16 Adhesion force under impact for different coatings on aluminium^[13]

微动条件下的试验结果如图 17 所示, 硬质阳极氧化后的 7075 铝合金与 17-7PH 不锈钢的对偶表现出很低的粘着力, 硬质阳极氧化后的铝合金与镀 CrNi 或阿洛丁阳极氧化处理后的铝合金对偶均没有表现出冷焊。

与冲击试验结果类似, 仅对一侧铝合金进行阿洛丁阳极氧化处理依然不足以预防冷焊 (粘着力为 2 036 mN)。等离子体电解氧化处理后的铝合金不仅没有表现出粘着力, 而且镀层没有脱落 (如图 18 所示), 相比之下,

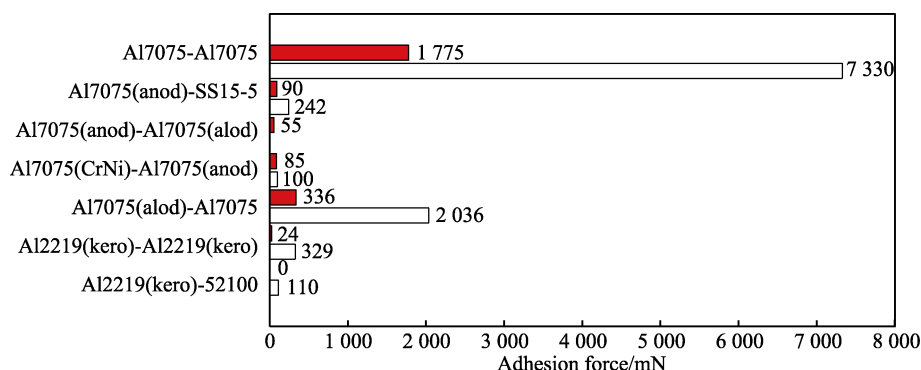


图 17 冲击和微动条件下不同镀膜的铝合金的粘着力^[13]

Fig.17 Adhesion force under impact and fretting for different coatings on aluminium^[13]

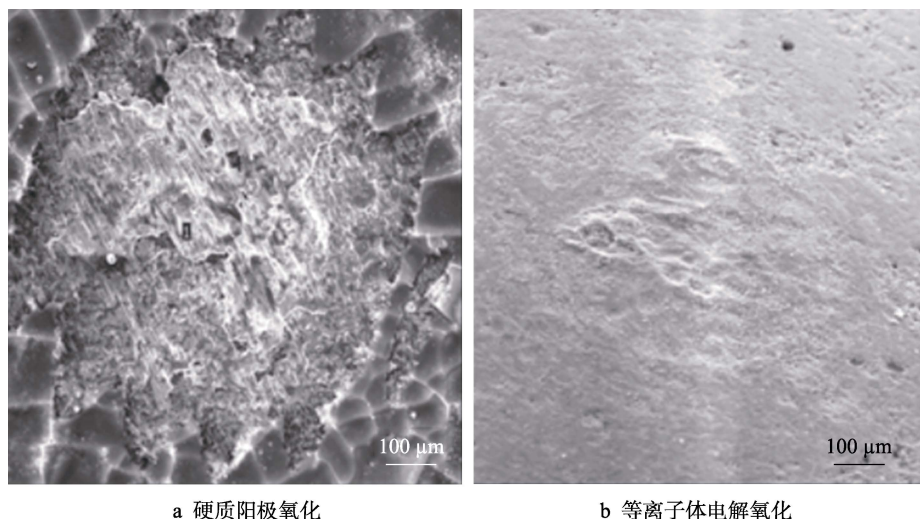


图 18 微动试验后硬质阳极氧化和等离子体电解氧化处理的铝合金表面镀层对比^[13]
Fig.18 Comparison of Al-coatings under fretting: a) hard anodizing; b) Keronite^[13]

硬质阳极氧化的铝合金表面已经破裂。因此,对于铝合金的冷焊防护,等离子体电解氧化处理是较优选择。

3.3 Ti 基金属材料

钛合金因其具有耐腐蚀、比强度高优点,常用于航天器构件^[50-53]。对于钛合金中应用范围较广的 Ti6Al4V,其防冷焊处理在 2 种条件下的试验结果如图 19 所示。试验数据表明,所选用的方法在冲击条件下的防护效果比较理想,但在微动条件下均不能完全避免冷焊。相对而言,等离子体电解氧化处理后钛合金的粘着力最低(1 356 mN)^[54]。Santos 等^[55]研究了 DLC 涂层对 Ti6Al4V 的冷焊防护作用,其试

验条件为 24.5 N 大小的静载荷作用在 $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 的面积上,真空度约为 10^{-6} Pa ,保持时间为 10 h。在此条件下,没有观察到冷焊发生。Santos 等还发现,在 DLC 膜与 Ti6Al4V 基体之间添加硅过渡层,可以使 DLC 膜与基体结合得更好。

未来对于钛合金的冷焊防护措施还需要进一步研究,包括钛合金与自身以及其他材料的对偶组合。研究表明,对于钛合金的冷焊防护,等离子体电解氧化技术值得关注^[56-57]。Santos 等^[55]的研究虽然证明了 DLC 膜在短期静载条件下可以预防冷焊,但是还需在冲击和微动条件下进行测试,并且延长保持时间。

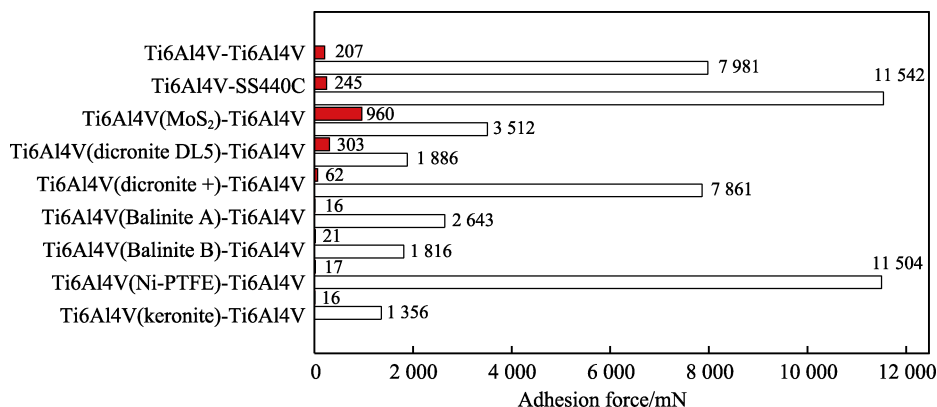


图 19 冲击和微动条件下不同镀膜的 Ti6Al4V 的粘着力^[53]
Fig.19 Adhesion force under impact and fretting of coatings on Ti6Al4V^[53]

4 结语与展望

从 20 世纪 60 年代起, NASA、ESA 以及中国航天科技集团公司所属单位(五院 510 所、五院 511 所)针对空间冷焊效应及其防护措施开展了卓有成效的研究,满足了不同轨道航天器飞行任务的工程应用需求,但对空间冷焊效应的机理研究还不够深入。对于

常见的空间活动机构材料(如 Fe、Al 和 Ti 基金属),在静载和微动 2 种接触类型下,采用镀膜和阳极氧化等表面处理可以有效避免冷焊的发生,但在微动条件下,许多材料对偶还没有有效的冷焊防护技术。

国内仅有航天五院 510 所和五院 511 所具备空间冷焊效应研究和评价的条件,经过近 60 年的技术攻关,已取得了一系列成果,并制定了冷焊效应评价的行业标准。随着我国深空探测任务的稳步推进,长达

数年(如从地球轨道到达木星轨道需要近 6 a)飞往探测目标过程的冷焊效应评价体系已成为制约该类航天器可靠性的核心问题之一。目前,我国冷焊效应的评价标准还处于短周期静载条件的研究阶段,尽管满足了我国绝大部分航天器短期飞行过程的防冷焊需求,但对于冲击和微动条件下的冷焊效应评价体系还未建成。同时,针对长期飞行冷焊效应的加速评价方法也未展开系统研究。针对我国目前空间冷焊效应的研究现状,可借助软件仿真分析与真空技术相结合的方式,系统开展对于静载、冲击和微动 3 种接触类型下冷焊效应机理和评价方法的研究,并建立冷焊效应数据库,为我国后续各类航天器的冷焊防护措施提供解决方案和设计依据。

参考文献:

- [1] 汪力, 闫荣鑫. 超高真空环境冷焊与防冷焊试验现状与建议[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(6): 558-563.
WANG Li, YAN Rong-xin. A Study on Cold Welding and Protection Against Cold Welding[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(6): 558-563.
- [2] 童靖宇. 空间冷焊效应及其防护技术研究[J]. 航天器环境工程, 2000, 17(1): 39-45.
TONG Jing-yu. Space Cold Welding Effect and Its Avoidance[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2000, 17(1): 39-45.
- [3] JOHNSON M R. The Galileo High Gain Antenna Deployment Anomaly[R]. Washington: NASA, 1994.
- [4] EVANS H, DEVINE E. Orbital Experiment to Determine Space Environmental Effects on Cold Welding and Wear of Materials[C]//9th Structural Dynamics and Materials Conference. Virginia: AIAA, 1968.
- [5] OHNO J. Ultrahigh Vacuum Cold Welding in a Dynamic Load Elevated Temperature Environment[C]//8th Structural Dynamics and Materials Conference. Virginia: AIAA, 1967.
- [6] MERSTALLINGER A, SEMERAD E, DUNN B D. Influence of Coatings and Alloying on Cold Welding due to Impact and Fretting[C]//10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. San Sebastian: [s. n.], 2003.
- [7] MOELLER C E, NOLAND M C. Cold Welding Tendencies and Frictional Studies of Clean Metals in Ultra-High Vacuum[J]. ASLE Transactions, 1967, 10(2): 146-157.
- [8] EHRLICH P. Phasenverhältnisse Und Magnetisches Verhalten Im System Titan/Sauerstoff[J]. Zeitschrift Für Elektrochemie Und Angewandte Physikalische Chemie, 1939, 45(5): 362-370.
- [9] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 3 版. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
HU Geng-xiang, CAI Xun, RONG Yong-hua. Fundamentals of Materials Science[M]. Third edition. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010.
- [10] BONNET R, LOUBRADOU M. Atomic Positions around Misfit Dislocations on a Planar Heterointerface[J]. Physical Review B, 1994, 49(20): 14397-14402.
- [11] MERSTALLINGER A, SALES M, SEMERAD E, et al. Assessment of Cold Welding between Separable Contact Surfaces Due to Impact and Fretting under Vacuum[K]. Paris: ESA Scientific & Technical Memoranda, 2009.
- [12] XU J, ZHU M H, ZHOU Z R, et al. An Investigation on Fretting Wear Life of Bonded MoS₂ Solid Lubricant Coatings in Complex Conditions[J]. Wear, 2003, 255(1-6): 253-258.
- [13] ROBERTS E W. A Space Tribology Handbook[J]. European Space Mechanisms & Tribology Symposium, 1997, 410(94): 239.
- [14] DUBOIS J M, BRUNET P, COSTIN W, et al. Friction and Fretting on Quasicrystals under Vacuum[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, 334-335: 475-480.
- [15] GB/T 20878—2007, 不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分[S].
GB/T 20878—2007, stainless and heat-resistant steel—Designation and Chemical Composition[S].
- [16] ECSS-E-ST-33-01C, European Cooperation for Space Standardization[S].
- [17] 郭开元, 陈天富, 冯贤桂. 材料力学[M]. 第 3 版. 重庆: 重庆大学出版社, 2013.
GUO Kai-yuan, CHEN Tian-fu, FENG Xian-gui. Mechanics of Materials[M]. Third Edition. Chongqing: Chongqing University Press, 2013.
- [18] MERSTALLINGER A, SEMERAD E, DUNN B D, et al. Study on Adhesion/Cold Welding under Cyclic Load and High Vacuum[C]//6th European Space Mechanisms & Tribology Symposium. Zürich, Switzerland: [s. n.], 1995.
- [19] PERSSON U, CHANDRASEKARAN H, MERSTALLINGER A. Adhesion between some Tool and Work Materials in Fretting and Relation to Metal Cutting[J]. Wear, 2001, 249(3-4): 293-301.
- [20] MERSTALLINGER A, SALES M, SEMERAD E, et al. Reduction of cold Welding by Geometric Parameters[C]//13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium forum. Vienna, Austria: [s. n.], 2009.
- [21] MÜSER M, Valentin L. Popov: Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications[J]. Tribology Letters, 2010, 40(3): 395.
- [22] DARBY M I, EVANS G R, JONES B C. Parameters in the Hertz Theory of Contact between Two Bodies[J]. Materials Science and Engineering, 1987, 89: L19-L20.
- [23] GREENWOOD J A, JOHNSON K L, MATSUBARA E. A Surface Roughness Parameter in Hertz Contact[J]. Wear, 1984, 100(1-3): 47-57.
- [24] 侯文英. 摩擦磨损与润滑[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
HOU Wen-ying. Friction, Wear and Lubrication[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

- [25] BLANCHARD P, COLOMBIE C, PELLERIN V, et al. Material Effects in Fretting Wear: Application to Iron, Titanium, and Aluminum Alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22(7): 1535-1544.
- [26] WANG J T. Cold-Welding Test Environment[M]. California: California Institute of Technology, 1972.
- [27] 达道安, 谈治信. 中国航天器真空技术的进展(二)[J]. 真空与低温, 2002, 8(1): 1-7.
DA Dao-an, TAN Zhi-xin. Progress of Vacuum Technology of Spacecraft in China[J]. Vacuum and Cryogenics, 2002, 8(1): 1-7.
- [28] 周晖, 万志华, 张凯峰, 等. 一种摩擦副材料对偶粘着系数的测试方法及装置: CN108333103B[P]. 2020-08-18.
ZHOU Hui, WAN Zhi-hua, ZHANG Kai-feng, et al. Method and Device for Testing Adhesion Coefficient of Friction Pair Couple Material: CN108333103B[P]. 2020-08-18.
- [29] 杨建斌. 航天器空间环境模拟设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
YANG Jian-bin. Space Environment Simulation Equipment for Spacecraft[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.
- [30] 刘天模, 徐幸梓. 工程材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
LIU Tian-mo, XU Xing-zi. Engineering Materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [31] SATHIYA P, ARAVINDAN S, HAQ A N. Friction Welding of Austenitic Stainless Steel and Optimization of Weld Quality[C]//International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering. Chennai, India: [s. n.], 2004.
- [32] 刘振宝, 梁剑雄, 苏杰, 等. 高强度不锈钢的研究及发展现状[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 549-557.
LIU Zhen-bao, LIANG Jian-xiong, SU Jie, et al. Research and Application Progress in Ultra-High Strength Stainless Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 549-557.
- [33] 刘洪秀, 于兴福, 魏英华, 等. 航空轴承钢的发展及热处理技术[J]. 航空制造技术, 2020, 63(S1): 94-101.
LIU Hong-xiu, YU Xing-fu, WEI Ying-hua, et al. Development of Aviation Bearing Steel and Heat Treatment Technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(S1): 94-101.
- [34] 翁立军, 孙晓军, 汪晓萍, 等. 新型 MoS₂ 基润滑及防冷焊薄膜性能的研究[J]. 空间科学学报, 1996, 16(S1): 60-65.
WENG Li-jun, SUN Xiao-jun, WANG Xiao-ping, et al. Study on the Lubrication and Anti-Cold-Weld Performances of New MoS₂-Based Cosputtered Films[J]. Chinese Journal of Space Science, 1996, 16(S1): 60-65.
- [35] 宋坤林. 316L 不锈钢和钛合金表面 DLC(Ni)薄膜的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
SONG Kun-lin. Preparation and Properties of DLC(Ni) Films on 316L SS and Ti Alloy[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [36] 韩建超, 李云, 高鹏, 等. 空间机构 MoS₂ 固体润滑真空摩擦特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11): 61-67.
HAN Jian-chao, LI Yun, GAO Peng, et al. Friction Performance of Space Machine with MoS₂ Solid Lubrication Coating in Vacuum Environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(11): 61-67.
- [37] 刘洪喜, 王浪平, 王小峰, 等. TiC 薄膜对轴承钢表面滚动接触疲劳寿命和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(11): 1197-1201.
LIU Hong-xi, WANG Lang-ping, WANG Xiao-feng, et al. Effects of TiC Films on the Rolling Contact Fatigue Life and Mechanical Properties of Bearing Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(11): 1197-1201.
- [38] 李凝, 黄健萌. 自润滑复合镀层的摩擦学性能及其强化机理分析[J]. 电镀与环保, 2010, 30(6): 5-8.
LI Ning, HUANG Jian-meng. Analysis on Tribological Properties and Strengthening Mechanism of Self-Lubricating Composite Coatings[J]. Electroplating & Pollution Control, 2010, 30(6): 5-8.
- [39] PAJOVIC S, COLAS G, SAULOT A, et al. Work of Adhesion Measurements of MoS₂Dry Lubricated 440C Stainless Steel Tribological Contacts[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(12): 1700423.
- [40] 方学敬, 周惠娣, 胡丽天. 风云卫星星箭分离防冷焊润滑涂层的研制[C]//中国空间科学学会空间材料专业委员会'99 学术交流会议论文集. [出版地不详]: 中国空间科学学会, 1999.
FANG Xue-jing, ZHOU Hui-di, HU Li-tian. Development of Anti-Cold Welding Lubricating Coatings for Separation of Fengyun Satellite and Rocket[C]//Space Materials Committee of Chinese Society of Space Sciences' 99 Symposiums Forum. [s. l.]: Chinese Society of Space Research, 1999.
- [41] 马志坤, 赵新明. 复合镀层的现状与发展[J]. 电刷镀技术, 2001(2): 1-3.
MA Zhi-kun, ZHAO Xin-ming. Present Situation and Development of Composite Coatings[J]. Electro Brush-Plating Technology, 2001(2): 1-3.
- [42] 韩彦斌. Zr 基大块非晶合金防冷焊复合镀层研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
HAN Yan-bin. The Study of Composite Film Against Cold Welding of Zr-Based Bulk Metallic Glass[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.
- [43] 王建国, 王祝堂. 航空航天变形铝合金的进展(1)[J]. 轻合金加工技术, 2013, 41(8): 1-6, 32.
WANG Jian-guo, WANG Zhu-tang. Advance on Wrought Aluminium Alloys Used for Aeronautic and Astronautic Industry (1)[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2013, 41(8): 1-6, 32.
- [44] 何佳欢, 江文剑, 王峰. 航天器天线材料选用及工艺控制方案[C]//2017 年全国天线年会论文集(下册). 西安: 西安电子科技大学出版社, 2017.
HE Jia-huan, JIANG Wen-jian, WANG Feng. Material Selection and Controlling of the Technological Process for Spacecraft Antenna[C]//2017 National Antenna Annu-

- al Meeting Forum (Volume 2). Xi'an: Xidian University Press, 2017.
- [45] SHRESTHA S, MERSTALLINGER A, SICKERT D, et al. Some Preliminary Evaluations of Black Coating on Aluminium AA2219 Alloy Produced by Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process for Space Applications[C]//9th International Symposium on Materials in a Space Environment. Noordwijk, The Netherlands: [s. n.], 2003.
- [46] 盛永清, 吴志鹏, 赵安安. 7075 铝合金硬质阳极氧化工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(12): 46-48.
SHENG Yong-qing, WU Zhi-peng, ZHAO An-an. Study on the Hard Anodic Oxidation Process of 7075 Aluminum Alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2019, 47(12): 46-48.
- [47] 曹慧明, 张世坤. 航空铝合金结构表面的阿洛丁处理方法[J]. 航空维修与工程, 2012(1): 54-55.
CAO Hui-ming, ZHANG Shi-kun. The Alodine Process on the Surface of Aviation Aluminum Alloy Components[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2012(1): 54-55.
- [48] SHRESTHA S, DUNN B D. Advanced Plasma Electrolytic Oxidation Treatment for Protection of Light Weight Materials and Structures in a Space Environment[J]. Advanced surface treatment, 2007(11): 40-44.
- [49] MALAYOĞLU U, TEKIN K C. Wear Behaviour of Plasma Electrolytic Oxide Coatings on E21 and WE43 Mg Alloys[J]. Surface Engineering, 2015, 31(7): 526-533.
- [50] 李四清, 王旭, 邓雨亭, 等. 固溶温度对 IMI834 钛合金锻件组织和性能的影响[J]. 航空制造技术, 2019, 62(19): 47-52.
LI Si-qing, WANG Xu, DENG Yu-ting, et al. Effect of Solid Solution Temperature on Microstructure and Properties of IMI834 Titanium Alloy Forging[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(19): 47-52.
- [51] 刘莹, 曲周德, 王本贤. 钛合金 TC4 的研究开发与应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(1): 47-50.
LIU Ying, QU Zhou-de, WANG Ben-xian. Research Development and Application of Ti₆Al₄V Alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(1): 47-50.
- [52] MU Ming, LIANG Jun, ZHOU Xin-jian, et al. One-Step Preparation of TiO₂/MoS₂ Composite Coating on Ti₆Al₄V Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation and Its Tribological Properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 214: 124-130.
- [53] POZA P, SIRVENT P, RICO Á, et al. Oscillating Contact Wear in Cold Sprayed Ti₆Al₄V Coatings for Aeronautical Repairs[J]. Materials Science Forum, 2018, 941: 1686-1691.
- [54] MERSTALLINGER A, SALES M, SEMERAD E, et al. Cold Welding in Hold down Points of Space Mechanisms Due to Impact and Fretting[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2008, 222(8): 1005-1014.
- [55] SANTOS L V, TRAVA-AIROLDI V J, CORAT E J, et al. DLC Cold Welding Prevention Films on a Ti₆Al₄V Alloy for Space Applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(8): 2587-2593.
- [56] 彭昭美. Ti-6Al-4V 合金等离子体电解氧化的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
PENG Zhao-mei. A Study of the Plasma Electrolytic Oxidation of Ti-6Al-4V Alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [57] DURDU S, DENİZ Ö F, KUTBAY I, et al. Characterization and Formation of Hydroxyapatite on Ti₆Al₄V Coated by Plasma Electrolytic Oxidation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 551: 422-429.

责任编辑: 刘世忠

(上接第 23 页)

- [71] 冯潇, 赵雪雪, 邢亚哲. 热喷涂制备固体氧化物燃料电池电解质层的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 10-17.
FENG Xiao, ZHAO Xue-xue, XING Ya-zhe. Research Progress on Preparation of Solid Oxide Fuel Cells Electrolyte Layer by Thermal Spraying[J]. Surface Technology, 2019, 48(4): 10-17.
- [72] ZHANG Yong, JAVED A, ZHOU Meng-meng, et al. Fabrication of Mn-Co Spinel Coatings on Crofer 22 APU Stainless Steel by Electrophoretic Deposition for Interconnect Applications in Solid Oxide Fuel Cells[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2014, 11(2): 332-341.
- [73] HU Ying-zhen, LI Cheng-xin, YANG Guan-jun, et al. Evolution of Microstructure during Annealing of Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ Spinel Coatings Deposited by Atmospheric Plasma Spray [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(25): 13844-13851.
- [74] HU Ying-zhen, LI Cheng-xin, ZHANG Shan-lin, et al. The Microstructure Stability of Atmospheric Plasma-Sprayed MnCo₂O₄ Coating under Dual-Atmosphere (H₂/Air) Exposure[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2016, 25(1/2): 301-310.
- [75] 赵雪雪, 门引妮, 邢亚哲. 固体氧化物燃料电池钪基电解质的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 125-132.
ZHAO Xue-xue, MEN Yin-ni, XING Ya-zhe. Research Progress in Ceria-Based Electrolytes of Solid Oxide Fuel Cell[J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 125-132.
- [76] HU Ying-zhen, YAO Shu-wei, LI Cheng-xin, et al. Influence of Pre-Reduction on Microstructure Homogeneity and Electrical Properties of APS Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ Coatings for SOFC Interconnects[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(44): 27241-27253.

责任编辑: 彭颀