

火箭锁紧装置黏滞摩擦系数的影响因素研究

李寅博¹, 曹景乐², 陈友伟², 解国新¹

(1. 清华大学高端装备界面科学与技术全国重点实验室, 北京 100084;
2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 火箭锁紧装置是卫星与火箭连接的关键机构。装置中的V形卡块在预紧力施加过程中, 易发生偏斜, 使得火箭分离配合面接触不均匀, 产生应力集中, 导致火箭分离面黏着磨损。本文研究了火箭锁紧装置中的V形卡块和上下端框的铝合金摩擦副在不同影响因素下摩擦系数的变化, 探究了温度、正压力以及铝合金表面粗糙度对界面黏着和黏滞摩擦系数的影响。研究结果表明, 硫酸阳极化处理的2A14T6-2A14T6比较适合作为摩擦副材料, 在加工和锁紧过程中, 应合理控制其粗糙度、温度和正压力, 以避免黏着磨损。

关键词: 2A14T6 铝合金; 2219 铝合金; 界面黏着; 火箭分离

中国分类号: V421.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2024) 02-0066-07

Study on the Influencing Factors of the Viscous Friction Coefficient in the Satellite and Rocket Locking Device

LI Yinbo¹, CAO Jingle², CHEN Youwei², XIE Guoxin¹

(1. State Key Laboratory of Tribology in Advanced Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The satellite and rocket locking device is the key mechanism used for the connecting and locking satellites and rockets. The V-shaped clamp block in the device is prone to deflection during the application of preload force, which makes the contact of the satellite and rocket separation mating surface uneven and produces stress concentration, leading to the adhesive wear of the satellite and rocket separation surface. In this paper, the changes of the friction coefficient of the aluminum alloy friction vice of the V-shaped block and the upper and lower end frames of the satellite and rocket locking device under different influencing factors are investigated, and the influences of the temperature, positive pressure, and the roughness of the aluminum alloy surface on the interfacial adhesion and viscous friction coefficients are explored. The results show that sulfuric acid anodized 2A14T6-2A14T6 is more suitable as the friction pair materials, and roughness, temperature and positive pressure should be reasonably controlled during processing and locking to avoid adhesive wear.

Key words: 2A14T6 aluminum alloy; 2219 aluminum alloy; Interface adhesion; Separation of satellite and rocket

收稿日期: 2023-09-25; 修订日期: 2024-02-01

基金项目: 火箭创新基金自主研发项目 (ZH2022011)

作者简介: 李寅博 (1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为金属的摩擦与润滑。

通信作者简介: 解国新 (1982—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为固体润滑。

0 引言

星箭锁紧装置是卫星与火箭连接、锁紧和分离的关键机构。包带锁紧装置为航天领域主要采用的星箭锁紧装置，其结构包括螺栓、金属带、上端框、下端框和 V 形卡块等（见图 1）。包带锁紧装置通过两条包带，采用两个爆炸螺栓连接成一个整环，包带内侧装有 V 形卡块，V 形卡块卡住卫星支架上框和卫星下框，在施加预紧力后，V 形卡块将卫星与火箭紧紧连接在一起，实现连接功能。待火箭将卫星送入预定轨道，包带实施解锁，卫星与火箭完成分离^[1]，最终完成卫星发射任务。据 NASA 统计，14.3% 的发射故障与星箭分离有关^[2-6]。

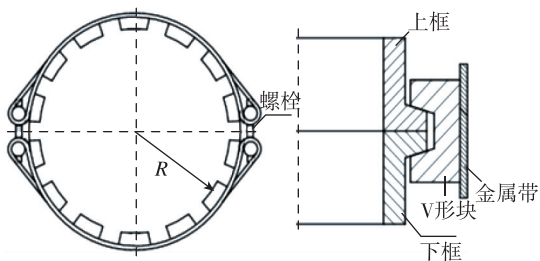


图 1 包带连接结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the belt connection structure

杨晓燕等^[7]对特定工况下运动机构摩擦副失效现象开展了深入研究，认为黏着磨损的影响因素有材料特性、接触压力、滑动速率、表面粗糙度、温度和润滑状态等。刘家濬等^[8]对凸轮摩擦副黏着磨损失效过程及原因进行深入分析，认为摩擦温度对磨损表面特征的影响较为重要。唐乾刚等^[9]根据星箭连接处受力情况及锁紧装置的特点，分析星箭连接处发生松动的可能性，并提出解决包带应力不均匀的方法。秦朝焯等^[10]对包带卡滞行为进行了研究，建立包带卡滞行为的闭合模型^[11]。杜晓东等^[12]认为锁紧正压力和摩擦系数的改变，会引起系统应变能和摩擦损耗能发生改变，从而影响分离性能。

在预紧力施加过程中，包带锁紧装置中的 V 形卡块易发生偏斜，使得星箭分离配合面接触不均匀，产生应力集中，导致星箭分离面发生一定的黏着磨损现象，降低包带锁紧装置的解锁能力，从而引发 V 形卡块卡滞等重大事故发生。目前在星箭分离过程中，包带锁紧装置星箭分离面发生黏着磨损现象的演变规律及其降低包带锁紧装置

解锁能力的作用机制等问题尚不清楚，黏着磨损的发生及其主要影响因素和作用机制会随着实际工况的不同而变化，对于包带锁紧装置星箭分离面黏着磨损现象的产生机理需结合星箭分离的实际工况。

选取 2A14T6 和 2219 两种铝合金材料，分别组成 2A14T6-2A14T6 和 2219-2219 两种摩擦副，研究不同表面粗糙度、温度以及正压强对界面黏着和黏滞摩擦系数的影响。

1 试验方案

1.1 试样设备及原理

为了最大程度模拟星箭分离面的微动磨损和界面黏着的实际情况，选择在 SRV 摩擦磨损试验机上进行，试验采用面与面接触的摩擦接触方式。摩擦试样和摩擦副接触示意图如图 2 所示，其中上试样的摩擦面为整个圆环面，下试样为厚度 7.88 mm 的圆块，并非整个圆形表面接触参与摩擦，仅中间部分与上试样圆环部分接触。

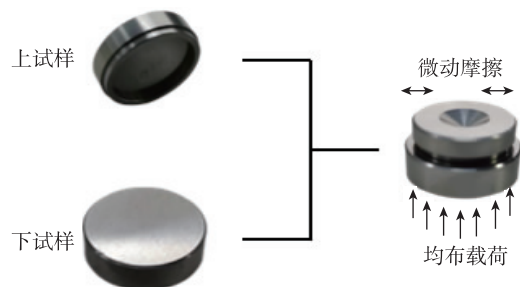


图 2 面面式接触试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of surface-surface contact test

1.2 试验对象

试验摩擦副组合如表 1 所示。摩擦副试样的尺寸如图 3 所示。

表 1 试验摩擦副

Tab. 1 Test friction pairs

组合	上试样	下试样	表面处理
A	2A14T6	2A14T6	未处理
B	2A14T6	2A14T6	硫酸阳极化
C	2219	2219	磷酸阳极化

1.3 试验过程

试验采用单一变量的方法，分别研究不同试验条件下（表 1）的摩擦系数。试验得到不同组合

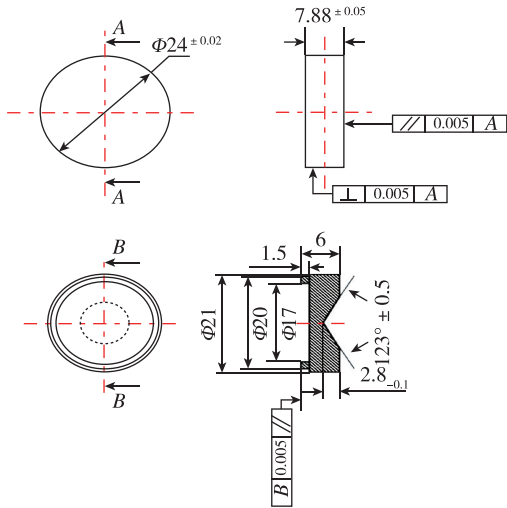


图3 摩擦副试样尺寸示意图

Fig. 3 Schematic diagram of friction pairs size

下(测试参数见表2)的摩擦系数曲线,对摩擦系数曲线进行处理,得到不同条件下的摩擦系数。每种摩擦副组合均有3组试验件。

表2 不同测试参数组合

Tab. 2 Different testing parameters

试样组合	温度/℃	粗糙度	正压强/MPa
B	25	Ra 0.4/0.8/ 1.6/3.2/6.4	1.0
B	25/50/75/ 100/125	Ra 0.2	2.0
B	25	Ra 0.2	0.2/0.5/1.0/1.5/2.0
A	25	Ra 0.2	0.2/0.5/1.0/1.5/2.0
C	25	Ra 0.2	0.2/0.5/1.0/1.5/2.0

2 试样结果分析

2.1 粗糙度对摩擦系数的影响

正压强和温度参数确定(正压强 1.0 MPa、温度 25 ℃)的情况下,改变粗糙度参数,得到摩擦系数曲线。经过硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副在不同粗糙度下的试验结果如图 4 所示。

从 5 组摩擦副的摩擦曲线可以看出,摩擦系数随着摩擦副粗糙度的增大逐渐升高,粗糙度为 Ra 0.4 和 Ra 0.8 摩擦副的摩擦系数在 0.5~0.6 之间波动。粗糙度为 Ra 1.6 摩擦副的摩擦系数在 0.6~0.7 之间波动。粗糙度为 Ra 3.2 摩擦副的摩擦系数在 0.6~0.8 之间波动,波动幅度更剧烈,表明摩擦副表面的黏着磨损和氧化随着粗糙度的升高进一步加剧。粗糙度为 Ra 6.4 摩擦副的摩擦系数

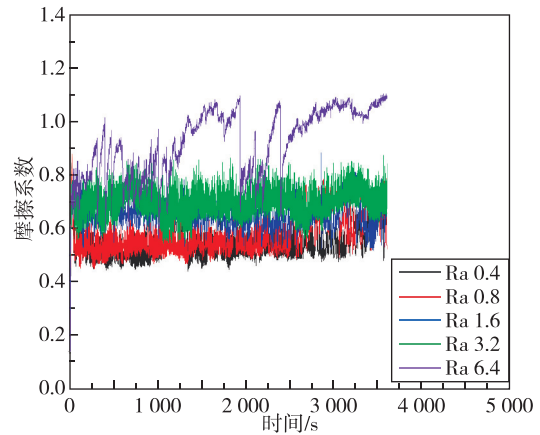


图4 摩擦系数随时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of friction coefficient with time

在 0.7~1.1 之间波动,波动范围最大,其中在大约 2 000 s 和 2 500 s 出现了摩擦系数从 1.1 到 0.7 的断崖式下降,原因是黏着磨损使摩擦副材料发生黏连和分离,表明在此粗糙度下粗糙峰相互摩擦转移,极易发生界面黏着难以分离的情况。

图 4 试验数据得到 5 组不同粗糙度试验件的摩擦系数,分别计算不同摩擦副组合 3 组试验件的平均值及其标准差,绘制经过硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 试验件的摩擦系数随粗糙度变化折线图,如图 5 所示。

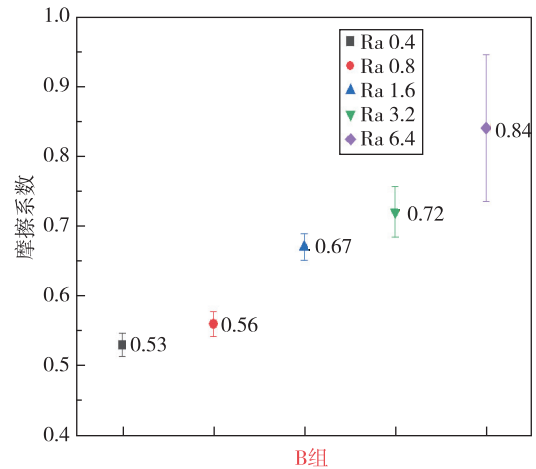


图5 摩擦副的摩擦系数随粗糙度变化曲线

Fig. 5 Curves of friction coefficient with roughness

从图 5 可以看出,前 3 种粗糙度 (Ra 0.4, 0.8, 1.6) 的摩擦副组合摩擦系数标准差均较小,表示同一摩擦副 3 组试验件试验结果的重复性较好且数据的波动较小。粗糙度为 Ra 3.2 和 Ra 6.4 的摩擦副组合摩擦系数的标准差相比前 3 种粗糙度的摩擦副摩擦系数的标准差较大。随着粗糙度的增

大，材料表面的粗糙峰在相互碰撞过程中造成摩擦系数的剧烈波动，界面发生了黏着磨损和黏连等情况，因此总体上采用摩擦系数随粗糙度变化来研究粗糙度的影响规律准确可信。在试验参数范围内，低粗糙度 (Ra 0.4, 0.8, 1.6) 的摩擦系数平均值分别为 0.53, 0.56, 0.67, 随着粗糙度的增加，摩擦副的摩擦系数逐步增大，但总体波动较小，说明在这 3 种粗糙度下，摩擦副的磨粒剥落和黏着磨损现象并不显著。粗糙度 Ra 3.2 和 Ra 6.4 摩擦副的摩擦系数波动很大，说明高粗糙度 (Ra 3.2, 6.4) 的摩擦副，发生了较为严重的界面黏着现象。

2.2 温度对摩擦系数的影响

正压强和粗糙度参数 (正压强 2.0 MPa、粗糙度 Ra 0.2) 确定的情况下，改变温度参数 (25, 50, 75, 100, 125 °C) 得到摩擦系数曲线，经过硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副在不同温度下的试验结果如图 6 所示。

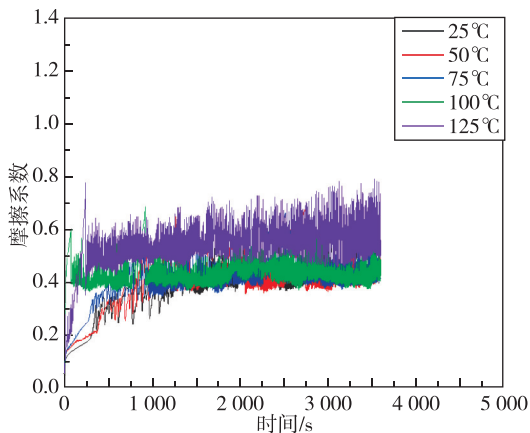


图 6 摩擦系数随时间的变化曲线

Fig. 6 Curves of friction coefficient with time

从 5 组摩擦副的摩擦曲线可以看出，摩擦系数随着环境温度的增大逐渐升高，温度在 25, 50, 75, 100 °C 下，摩擦副的摩擦系数在 0.36~0.44 之间，且随着温度的上升，摩擦系数有所上升。但总体来看，摩擦系数上升不大，且摩擦系数的波动较小，在 1 000 s 后摩擦系数均在一定范围保持稳定；而温度在 125 °C，摩擦系数相较前 4 组温度下的摩擦系数，有了较明显的上升，并且波动剧烈，说明在此温度下，摩擦副界面发生了材料的反复多次黏着分离再黏着的过程。由于高温的影响，加剧了材料的剥离和氧化过程。

从图 7 可以看出，5 组在不同温度下摩擦副的摩擦系数平均值分别为 0.38, 0.40, 0.42, 0.43,

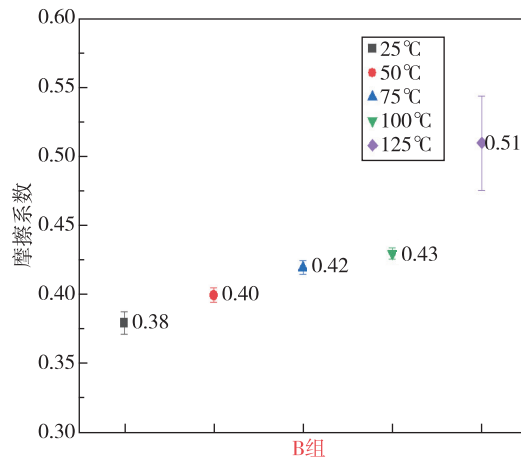


图 7 摩擦副的摩擦系数随温度变化曲线

Fig. 7 Curves of friction coefficient with temperature

0.51, 其中前 4 组摩擦副的摩擦系数标准差均较小，说明在此 4 组温度下的试样件试验结果的重复性较好，且数据的波动较小。温度在 125 °C 下的摩擦副，摩擦系数发生了剧烈的波动，摩擦系数在 0.47~0.53 之间。可以看出超过一定的温度阈值，摩擦副界面由于高温的作用，加剧了界面间的颗粒氧化和黏着现象。

2.3 正压强对摩擦系数的影响

粗糙度和温度参数 (粗糙度 Ra 0.2、温度 25 °C) 确定的情况下，改变正压强参数 (0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa) 得到摩擦系数曲线。表面未处理和经过表面硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副在不同正压强下的试验结果分别见图 8 和图 9，经过表面磷酸阳极化处理后的 2219-2219 试验结果如图 10 所示。

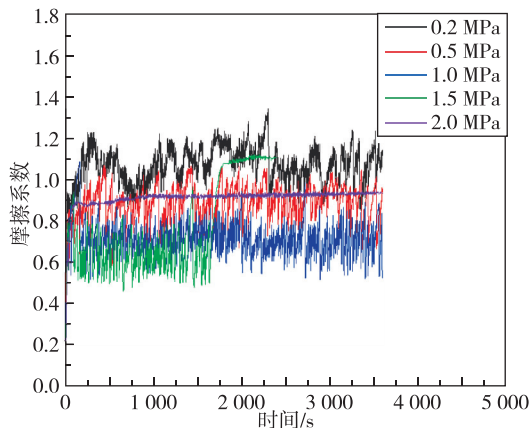


图 8 摩擦系数随时间的变化曲线

(表面未处理 2A14T6-2A14T6 摩擦副)

Fig. 8 Curves of friction coefficient with time

(untreated 2A14T6-2A14T6 friction pair)

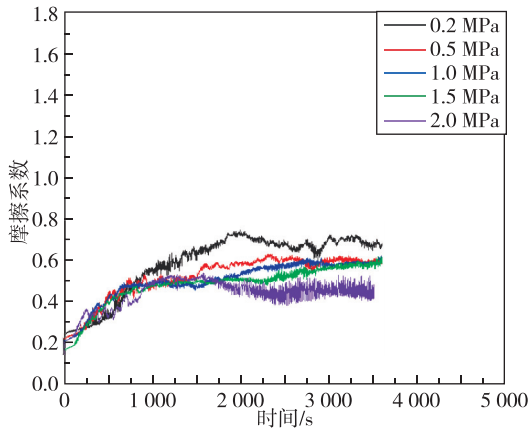


图9 摩擦系数随时间的变化曲线
(硫酸阳极化处理的2A14T6-2A14T6摩擦副)
Fig.9 Curves of friction coefficient with time
(2A14T6-2A14T6 friction pair treated with
sulfuric acid anodization)

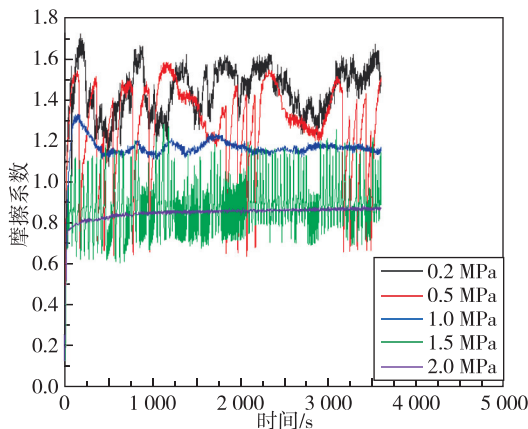


图10 摩擦系数随时间的变化曲线
(磷酸阳极化处理的2219-2219摩擦副)

Fig.10 Curves of friction coefficient with time (2219-2219
friction pair treated with phosphoric acid anodization)

从图8中可以看出,表面未做处理的摩擦副,在正压强为0.2,0.5,1.0 MPa下,摩擦系数随着载荷的增大,逐渐变小,且均有一定的波动。在1.5,2.0 MPa时,摩擦系数有所上升。在1.5 MPa的试验过程中,前1700 s摩擦系数均在0.60左右波动,在1700 s处摩擦系数在短时间内大于剪切力,从而发生了黏连,随后在1800 s摩擦系数迅速上升,达到1.1左右。在2.0 MPa下,摩擦系数相较1.5 MPa下的摩擦系数进一步上升,达到0.90左右。

图9显示经过硫酸阳极化处理后的摩擦副的摩擦系数明显低于表面未处理摩擦副的摩擦系数,

且摩擦系数均较稳定。5组数据摩擦系数的变化范围在0.4~0.6之间,且随着正压强的升高,摩擦系数逐渐降低,最后在1000 s后达到稳定。

对于经过磷酸阳极化处理后的2219-2219摩擦副,摩擦系数在相同正压强下均高于表面未处理的2A14T6-2A14T6摩擦副。图10显示同样随着正压强的增大,摩擦系数从1.40左右降至0.85左右。表面磷酸阳极化处理的摩擦系数均高于无表面处理表面硫酸阳极化处理的摩擦系数。磷酸阳极化的氧化膜的膜厚较小,在摩擦过程中很快被破坏,和铝合金基体黏结,导致摩擦系数的增大。

从图11可以看出,5组表面未处理2A14T6-2A14T6摩擦副在不同正压强下的摩擦系数平均值分别为1.06,0.90,0.72,0.78,0.91。5组摩擦副的摩擦系数的标准差均较小,说明此5组温度下的试样件试验结果的重复性较好且数据的波动较小。在1.0 MPa时,摩擦副的摩擦系数达到最小,说明在前期正压强增大,剪切力进一步降低,而随着正压强的逐步加大,界面黏着现象进一步加剧,导致摩擦系数逐渐增大。

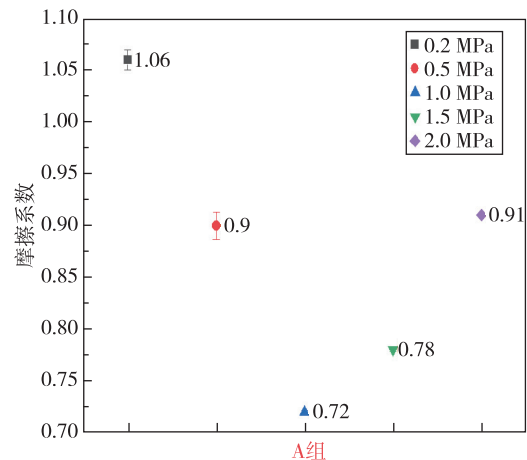


图11 摩擦副的摩擦系数随正压强变化曲线(表面未处理2A14T6-2A14T6摩擦副)

Fig.11 Curves of friction coefficient with positive pressure
(untreated 2A14T6-2A14T6 friction pair)

从图12可以看出,5组经过硫酸阳极化处理的2A14T6-2A14T6摩擦副在不同正压强下的摩擦系数平均值分别为0.59,0.54,0.50,0.49,0.42。相较于表面未做处理的摩擦副,5组不同正压强下摩擦副的摩擦系数分别降低了44.3%,40.0%,30.6%,37.2%,说明表面硫酸阳极化处理对于摩擦系数的降低起到了一定的作用。

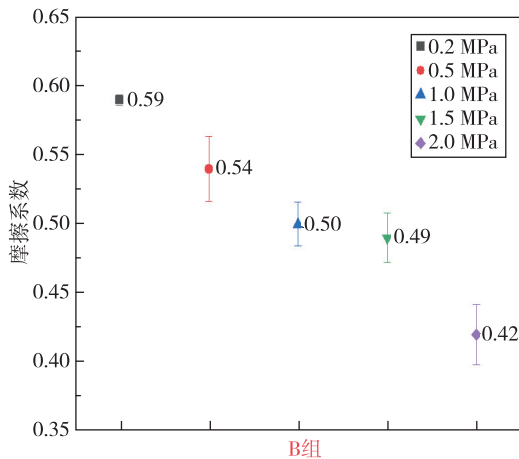


图 12 摩擦副的摩擦系数随正压强变化曲线 (硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副)

Fig. 12 Curves of friction coefficient with positive pressure (2A14T6-2A14T6 friction pair treated with sulfuric acid anodization)

从图 13 可以看出, 5 组经过磷酸阳极化处理的 2219-2219 摩擦副在不同正压强下的摩擦系数平均值分别为 1.37, 1.26, 1.21, 0.93, 0.91。且在 1.5 MPa 和 2.0 MPa 摩擦系数标准差较大, 说明在较高载荷下, 界面发生了较为严重的界面黏着。

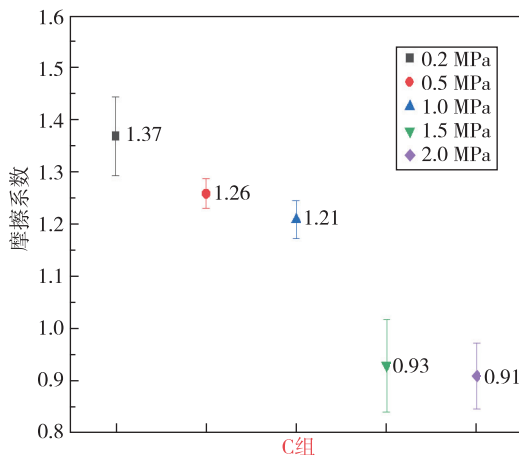


图 13 摩擦副的摩擦系数随正压强变化曲线 (磷酸阳极化处理的 2219-2219 摩擦副)

Fig. 13 Curves of friction coefficient with positive pressure (2219-2219 friction pair treated with phosphoric acid anodization)

3 结论

对表面硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副的摩擦试验结果进行分析, 探究了不同粗糙度、温度和正压强对 5 组摩擦副摩擦系数的影响规律; 同时对表面未做处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦

副和磷酸阳极化处理的 2219-2219 摩擦副的摩擦试验结果进行分析, 探究了不同正压强对于 5 组摩擦副摩擦系数的影响规律, 得到以下结论。

1) 随着表面粗糙度的增大, 经过硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副的摩擦系数逐渐增大, 且波动也逐渐增大。

2) 随着温度的增大, 经过硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副的摩擦系数逐渐增大, 且在温度为 120 °C 时, 摩擦系数发生了剧烈的波动, 说明摩擦副界面发生了较为严重的磨粒氧化和界面黏着。

3) 随着正压强的增大, 未做表面处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副的摩擦系数先减小后增大, 且均有不同程度的波动; 经过硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副的摩擦系数不断减小; 经过磷酸阳极化处理的 2219-2219 摩擦副的摩擦系数同样不断减小。这 3 种试样中, 在相同的正压强下, 硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 摩擦副的摩擦系数最小, 磷酸阳极化处理的 2219-2219 摩擦副的摩擦系数最大。说明未做任何处理的试样在摩擦过程中发生了一定的黏着磨损, 而磷酸阳极化处理的 2219-2219 摩擦副界面黏着现象反而加重。

经过硫酸阳极化处理的 2A14T6-2A14T6 比较适合作为摩擦副材料, 且在加工和锁紧过程中, 应合理控制其粗糙度、温度和正压强, 尽量控制粗糙度小于 Ra 3.2, 温度 100 °C 以内和较小的锁紧正压强, 以避免黏着现象的产生、加剧和黏滞摩擦系数的大范围波动。

参考文献

- [1] 马兴瑞, 王本利, 苟兴宇, 等. 航天器动力学——若干问题进展及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 白绍竣. 包带连接建模与力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [3] 袁家军. 卫星结构设计与分析(下)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2004.
- [4] Chang I S. Investigation of space launch vehicle catastrophic failures[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1996, 33(2): 198-205.
- [5] 盛磊. 国外运载火箭的发射失败与对策[J]. 航天返回与遥感, 1996, 17(3): 59-66, 48.
- [6] Klarer P R, Vaughn M R, Gilbride J F, et al. Design for an international circular compression band restraint device [J]. Office of Scientific & Technical Information Techni-

- cal Reports, 2002.
- [7] 杨晓燕, 张雷. 机载导弹发射装置粘着磨损分析[J]. 失效分析与预防, 2008, 3(2): 37-41.
- [8] 刘家潜, 程荫芋, 崔周平. 凸轮摩擦副粘着磨损机理的探讨[J]. 内燃机工程, 1983, 4(3): 56-62.
- [9] 唐乾刚, 孙世贤. 包带式火箭锁紧预紧力分析[J]. 国防科技大学学报, 1996, 18(2): 20-25.
- [10] 秦朝烨, 褚福磊, 阎绍泽. 包带连接特性及星-箭-包带连接结构耦合动力学的研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(4): 437-444.
- [11] Buffe J, Valli R. Shock analysis of the Ariane clamp-band release event on the Meteosat second generation satellite[J]. Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing, 1999, 428: 543-548.
- [12] 杜晓东, 陆晓峰, 李明轩, 等. 刚性包带式火箭锁紧机构分离性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(2): 1-8.
- [13] 江涛, 吴佳林, 汪全, 等. 长征四号运载火箭火箭分离装置发展及思考[J]. 上海航天(中英文), 2023, 40(S1): 233-238.

引用格式:李寅博, 曹景乐, 陈友伟, 等. 火箭锁紧装置黏滞摩擦系数的影响因素研究[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(2): 66-72.

Citation: Li Y B, Cao J L, Chen Y W, et al. Study on the influencing factors of the viscous friction coefficient in the satellite and rocket locking device [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(2): 66-72.