文章编号：1003-1480（2021）03-0012-04

真空极端温度环境下不同 MoS_2 涂层分离螺母装置解锁性能研究

唐 科，胡振兴，李 辰，张志峰

（北京宇航系统工程研究所，北京，100076）

摘 要：为评价不同二硫化钼工艺状态的分离螺母装置在真空极端温度环境下的解锁性能，开展了摩擦磨损试验和分离螺母装置气动解锁试验。在-100~120℃度真空环境下进行了球-盘式摩擦磨损试验，结果表明磁控溅射 MoS_2 比树脂基 MoS_2 具有更好的真空和极端温度适应性。在-120~120℃真空环境下通过气动解锁性能测试，发现两种涂层状态的分离螺母装置均能够正常气动解锁，但采用磁控溅射 MoS_2 的分离螺母装置所需要的解锁压力更低。

关键词：分离螺母装置；磁控溅射 MoS_2；树脂基 MoS_2；真空；极端温度环境

中图分类号：TJ45+9 文献标识码：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2021.03.004

Study on Unlocking Performance of Separation Nut Devices with Different MoS_2 Coating under Extreme Temperature Vacuum Enviorment

TANG Ke，HU Zhen-xing，LI Chen，ZHANG Zhi-feng

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering，Beijing，100076)

Abstract: In order to evaluate the unlocking performance of separating nut device with different MoS_2 coating in the extreme temperature vacuum environment, the friction performance test and the pneumatic unlocking test were carried out. Compared with resin-based MoS_2, magnetron-sputtering MoS_2 has better adaptability to vacuum and extreme temperature according to the ball on disc rubbing test in vacuum environment of -100 ~ 120 ℃. The pneumatic unlocking performance test was carried out in the vacuum environment of -120 ~ 120 ℃. It is found that the separating nut device with two kinds of coating state can be normally pneumatic unlocked, but the releasing pressure of the separating nut device with magnetron-sputtering MoS_2 is lower.

Key words: Separation nut device; Magnetron-sputtering MoS_2; Resin-based MoS_2; Vacuum; Extreme temperature environment

分离螺母装置是一种在航天领域广泛使用的机构类连接解锁机构件，其采用轴向连接、径向解锁的方式。解锁时火工品产生燃气推动支撑环移动，解除对分瓣螺母的径向约束，完成解锁功能[1]。为保证机构运动部件的功能，分瓣螺母接触面均喷涂了 MoS_2 固体润滑涂层，以减小分瓣螺母和支撑环之间的接触应力，降低解锁阻力，确保解锁可靠性。MoS_2 作为一种重要的航天器用固体润滑剂，是减小火工分离装置运动部件摩擦力的关键原材料，其制备工艺可以分为擦涂、真空溅射、粘接等几种[2]。20 世纪 60 年代，美国开发了以环氧树脂为粘接剂、二硫化钼为润滑剂的喷涂涂料，并通过手工喷涂工艺在零部件表面制备出具有良好润滑防腐性能的树脂基二硫化钼涂层。手工喷涂树脂基二硫化钼涂层涂装效率高，但涂层厚度较厚（通常在 10μm 左右），涂层厚度均匀性、一致性无法保证。同时涂层致密性较差，大气潮湿环境下

收稿日期：2021-02-28
作者简介：唐科（1982-），男，高级工程师，从事分离结构及火工品装置研究。
基金项目：国家自然科学基金联合基金项目资助（U1737214）。

水汽极易通过大量孔隙微缺陷渗入，导致二硫化钼颗粒氧化失效。近年来，二硫化钼涂层的溅射制备方法及减摩耐磨机理备受国内外学者的关注[3-5]。共沉积 MoS_2 和金属形成的 MoS_2/金属膜显示出了很好的摩擦性能[6]。S.Watanabe[7]采用多频溅射制备了 MoS_2/WS_2 多层薄膜，发现这种超晶薄膜相比单一的薄膜具有更低的摩擦系数和更长的使用寿命。

国内外研究人员对 MoS_2 膜摩擦学特性做了大量的研究，使得 MoS_2 制备工艺和性能得到很大改善。上官爱红研究发现进入真空环境后，MoS_2 固体润滑运动部件表面可能出现冷焊现象，从而增加磨损，降低运动部件寿命，而运动部件表面磁控溅射 MoS_2 涂层可以避免冷焊。此外，运动部件表面涂层若长期在-100~100℃环境中，可能会因结构部件热胀冷缩，影响润滑膜的附着性，润滑膜的线膨胀系数应与基体材料线膨胀系数匹配[8]。为研究航天广泛使用的分离螺母装置在真空-100~120℃下的真空环境适应性，本文对磁控溅射沉积型 MoS_2 和树脂基粘接型 MoS_2 两种不同工艺状态的 MoS_2 涂层进行性能评价，包括试块级的摩擦性能测试和装置级的解锁性能测试。

1　摩擦试块测试

1.1　试验材料选取和 MoS_2 涂层制备

采用磁控溅射 MoS_2 涂层和树脂基 MoS_2 涂层试块。基体材料为 PH13-8Mo 沉淀硬化不锈钢，两种涂层喷涂后的实物状态如图 1 所示。

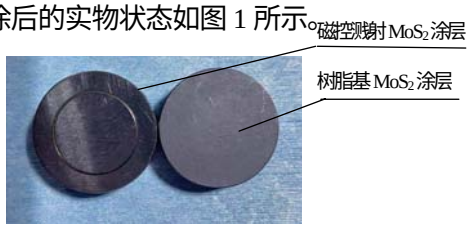

图 1　摩擦试块

Fig.1　Friction test block

1.2　试验条件

在真空环境（真空度≤30Pa）极端温度（-100~120℃）下，开展了磁控溅射 MoS_2 涂层和树脂基 MoS_2 涂层的性能测试工作，对两种不同 MoS_2 减摩涂层进行了试块级摩擦性能评价。球-盘摩擦磨损试验摩擦副为钢/MoS_2 膜，试块基体为 PH13-8Mo 沉淀硬化不锈钢，磁控溅射 MoS_2 涂层厚度不到 1μm，树脂基 MoS_2 涂层厚度约为 10μm。试验采用专用的真空高低温摩擦学性能测试箱进行，测试箱如图 2 所示，能够实现真空度≤30Pa 的目标，试块装夹状态如图 3 所示，采用轴盘测试方法[9]测试试块的摩擦性能，测试原理如图 4 所示。

图 2　真空高低温测试箱

Fig.2　Vacuum high and low temperature test box

图 3　摩擦试块装夹状态

Fig.3　Clamping state of friction test block

测试时，将镀有 MoS_2 润滑膜的 PH13-8Mo 基体安装在摩擦机上，采用抽气泵抽真空，并保温，以模拟真空高、低温环境。试验采用球-圆盘滑动接触方式，球静止在圆盘上方，圆盘在水平面转动，载荷由球施加至圆盘，球与圆盘产生摩擦力，通过力传感器采集后进行 AD 转换，生成摩擦系数随圆盘旋转圈数变化的曲线。

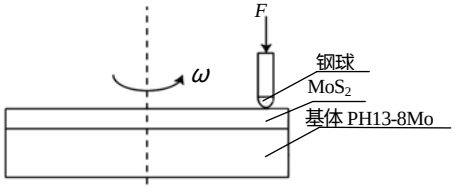

图 4　摩擦测试原理

Fig.4　Friction testing principle

1.3　试验结果及分析

1.3.1 极端高温性能

真空高温 120℃情况下，对磁控溅射 MoS_2 涂层和树脂基 MoS_2 涂层试块的摩擦系数进行了测试，结果如图 5 所示。

由图 5 可见高温下磁控溅射 MoS_2 的摩擦系数均比树脂基 MoS_2 的摩擦系数小，静摩擦系数、最大动摩擦系数分别为 0.117、0.08，后者分别为 0.144、0.112。这是由于磁控溅射 MoS_2 涂层为金属涂层，树脂基

MoS_2 涂层中含环氧树脂，磁控溅射 MoS_2 涂层的摩擦性能受高温影响较小，因而在高温下的摩擦性能明显优于树脂基 MoS_2 涂层。同时对磨损性能进行了对比，对比了磁控溅射 MoS_2 涂层和树脂基 MoS_2 涂层试块的磨痕宽度和深度，如图 6 所示。由图 6 可见两者磨痕宽度相当，而磁控溅射 MoS_2 涂层的磨痕深度明显小于树脂基 MoS_2 涂层。上述结果均表明在真空高温环境下，磁控溅射 MoS_2 涂层相比树脂基 MoS_2 具有更优的耐磨性能。

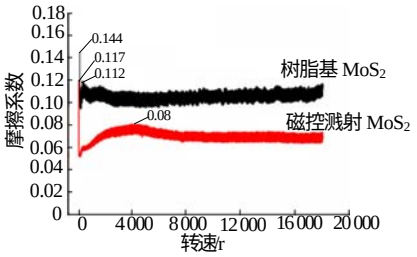

图 5　高温 120℃真空下摩擦系数对比

Fig.5　Comparison of friction coefficient at 120℃ in vacuum

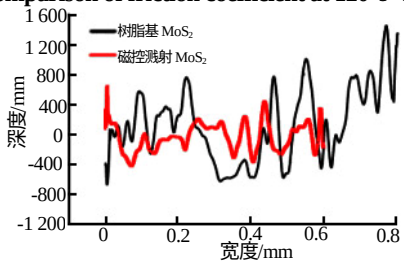

图 6　高温 120℃真空下磨痕宽度和深度对比

Fig.6　Comparison of wear scar width and depth at 120℃ in vacuum

1.3.2 极端低温性能

为了进一步评价磁控溅射 MoS_2 涂层的真空低温摩擦性能，开展了真空环境常温、-10℃、-50℃和-100℃下的摩擦性能测试，如图 7 所示。

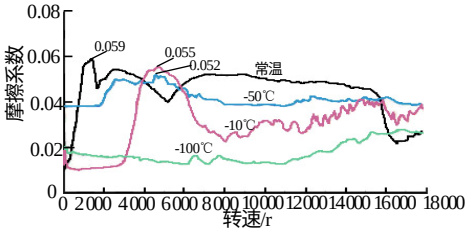

图 7　磁控溅射 MoS_2 涂层真空不同低温下动摩擦性能

Fig.7　Friction performance of magnetron-sputtering MoS_2 at different low temperatures in vacuum

由图 7 发现不同低温环境对磁控溅射 MoS_2 的摩擦性能影响不大，动摩擦系数最高仅为 0.06 左右。同时，测试了-100℃树脂基 MoS_2 涂层静摩擦系数，并与 120℃高温状态下的静摩擦系数进行对比，如图 8 所示。由图 8 可见，相对于 120℃高温状态，-100℃真空状态下，其静摩擦系数有一定增大，达到 0.187，高于高温状态的静摩擦系数 0.144，说明温度环境对磁控溅射 MoS_2 涂层的摩擦性能影响更小。

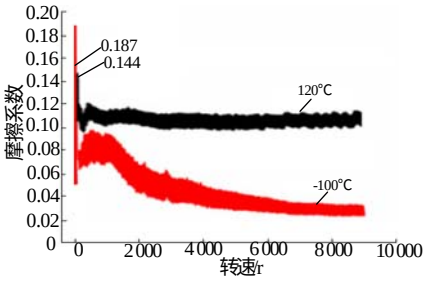

图 8　树脂基 MoS_2 高低温真空下静摩擦系数对比

Fig.8　Comparison of coefficient of resin-based MoS_2 at high and low temperature in vacuum

2　分离螺母装置解锁性能

为了进一步评价采用磁控溅射 MoS_2 和树脂基 MoS_2 两种涂层的分离螺母装置在真空极端高低温环境下的解锁性能，开展了气动解锁试验。在分离螺母装置内部的分瓣螺母零件喷涂了磁控溅射 MoS_2 和树脂基 MoS_2 两种涂层。高温和低温真空解锁测试原理分别如图 9~10 所示。

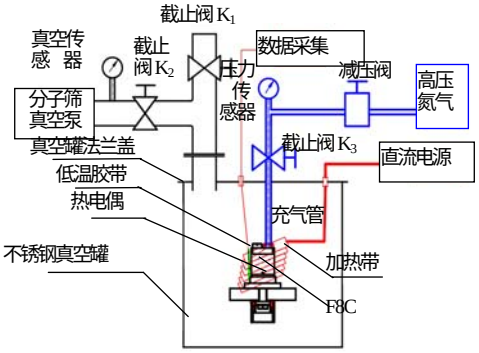

图 9　高温试验测试原理

Fig.9　High temperature vacuum testing principle

高温真空解锁平台在真空罐内进行，通过加热带对分离螺母装置加热，实现了真空度不高于 10Pa、温度为 120℃的目标。低温真空解锁平台，由于液氮挥发，无法直接在真空罐内试验，仅能在真空袋内进行，以达到低温-120℃、真空度不高于 3 000Pa 的目标。利用上述试验装置，对两种不同状态的分离螺母装置分别进行了 120℃真空、-120℃真空和常温环境的临界气压解锁试验。在每个温度点下，每套产品各进行了 3 次气动解锁试验，对相同状态的临界解锁压力取

平均值，结果如表 1 和图 11 所示。结果表明，两种涂层状态的分离螺母均能够正常实现气动解锁分离，满足临界解锁压力不大于 7MPa 的技术要求。温度越低所需要的临界解锁压力越高，同时，相同温度状态下，采用磁控溅射 MoS_2 涂层的分离螺母装置的临界解锁压力更低。

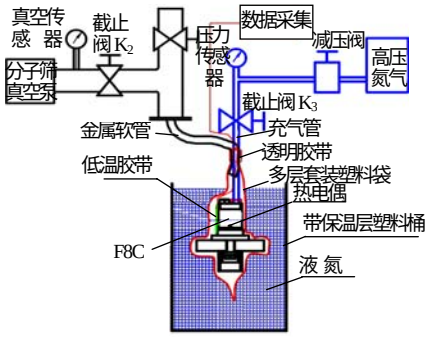

图 10　低温试验测试原理

Fig.10　Low temperature vacuum testing principle

表 1　分离螺母装置解锁压力结果

Tab.1　Unlocking pressure results of separating nut device

涂层状态	试验温度/℃	临界解锁压力/MPa			
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	均值
磁控溅射 MoS_2	-120	4.54	4.06	4.24	4.28
	20	2.86	2.02	1.84	2.24
	120	1.60	1.24	1.45	1.43
树脂基 MoS_2	-120	7.48	5.92	5.20	6.2
	20	3.44	2.57	2.75	2.92
	120	2.95	2.70	2.60	2.75

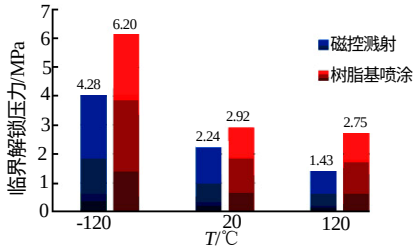

图 11　不同 MoS_2 涂层的分离螺母装置临界解锁压力对比

Fig.11　Comparison of critical unlocking pressure of separating nut devices with different MoS_2 coating

3　结论

（1）磁控溅射的纳米复合-多层 MoS_2 涂层在 PH13-8Mo 沉淀硬化不锈钢表面磨痕深度小于树脂基 MoS_2 涂层，说明具有稳定的减摩性能和较长的耐磨损寿命。（2）在真空极端温度条件（-100~120℃）环境下，磁控溅射 MoS_2 涂层受真空度、温度影响较小，摩擦和磨损性能优于树脂基 MoS_2 涂层。（3）从低温-120℃真空环境到高温 120℃真空环境中，两种涂层状态的分离螺母装置均表现出了较好的环境适应性，在气动压力作用下，均能够正常解锁。（4）在不同的真空温度环境下，两种分离螺母装置的临界解锁压力随着温度升高而下降，运动部件采用磁控溅射工艺 MoS_2 涂层的分离螺母装置，所需临界解锁压力更低。

参考文献：

[1] 刘竹生,王小军,等.航天火工装置[M].北京:中国宇航出版社,2012.

[2] Roberts E W.Space tribology handbook[M].2nd edition. European Space Agency,2002.

[3] Hao, Wang, Liping, et al.. Low humidity-sensitivity of MoS_2/Pb nanocomposite coatings[J].Wear:an International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear, 2016, 350/351:1-9.

[4] Hu J J , Wheeler R , Zabinski J S , et al.. Transmission electron microscopy analysis of Mo-W-S-Se film sliding contact obtained by using focused ion beam microscope and insitu microtribometer [J]. Tribology Letters, 2008, 32(1):49-57.

[5] Harpal S , Mutyala K C , Hamidreza M , et al.. Tribological behavior of Ti containing MoS_2 in sliding and rolling contact[J].Tribology & Lubrication Technology,2015(1): 22-24.

[6] Renevier N M , Fox V C , Teer D G , et al.. Coating characteristics and tri-bological properties of sputter-deposited MoS_2/ metal composite coatings deposited by closed field unbalanced magnetron sputtering plating[J].Surface & Coatings Technology, 2000, 127(1):24-37.

[7] Miyake S W N . Friction properties of WS_2/MoS_2 multilayer films under vacuum environment [J].Surface and Coatings Technology, 2004,188(1):644-648.

[8] 上官爱红,穆猷,李治国,刘朝晖.空间环境对 MoS_2 固体润滑运动部件寿命的影响[J].光学精密工程,2014,22(12):3 264-3 271.

[9] 万志华,郑军,赵云平,等.溅射沉积润滑与密封,2011,36(12): 51-55.