

## 三种胶黏剂与航天煤油相容性分析

于 君, 冯 弦, 韩 伟, 杜宗罡, 杨 超, 高利川  
(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为满足液氧/煤油火箭发动机所用材料相容性要求, 采用浸泡法对由 3 种胶黏剂 (DW-1 低温胶、DW-3 低温胶、J-249 胶) 组成的铝合金 2219/聚甲基丙烯酸酯亚胺 (PMI) 黏接件和 PMI/PMI 黏接件分别与石油基、煤基航天煤油的相容性展开研究。通过将所得胶接件置于  $-60 \sim 50$   $^{\circ}\text{C}$  温度下的两种航天煤油中进行浸泡, 并对浸泡后的胶黏件进行拉伸性能测试, 结果表明: 3 种胶在经  $-60 \sim 50$   $^{\circ}\text{C}$  温度范围内的两种航天煤油浸泡处理后, 仍可对胶接件进行有效胶接, 且 DW-1 和 DW-3 胶在低温环境下的表现更优, 高温环境会导致 DW-1 胶与合金 2219 胶接界面有一定程度的弱化, 而 J-249 胶与煤基航天煤油表现出较好的适应性。

**关键词:** 相容性; 胶黏剂; 煤基航天煤油; 石油基航天煤油; 甲基丙烯酸酯亚胺

中图分类号: TQ437

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)05-0122-08

## Analysis on compatibility for three kinds of adhesives with aerospace kerosene

YU Jun, FENG Xian, HAN Wei, DU Zonggang, YANG Chao, GAO Lichuan  
(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** To meet the compatibility requirements of materials used in liquid oxygen/kerosene rocket engines, a comparative experimental study was conducted by the soaking method on the compatibility of aluminum alloy 2219/polymethacrylimide (PMI) bonding specimens and PMI/PMI bonding specimens with petroleum based and coal based aerospace kerosene, respectively, which are composed of three adhesives (DW-1 low-temperature adhesive, DW-3 low-temperature adhesive, J-249 adhesive). The obtained bonding specimens were soaked in two types of aerospace kerosene at  $-60 \sim 50$   $^{\circ}\text{C}$ , and the tensile performance on the soaked bonding specimens were tested. The results show that the three adhesives can still effectively bond the bonding specimens after being soaked in two types of aerospace kerosene within the temperature range of  $-60 \sim 50$   $^{\circ}\text{C}$ , and the DW-1 and DW-3 adhesives perform better in low temperature environment. The high temperature environment will weaken the interface between DW-1 adhesive and alloy 2219, while J-249 adhesive and coal-based aerospace kerosene show better adaptability.

收稿日期: 2024-01-18 修回日期: 2024-08-22

基金项目: 国家重点研发计划

作者简介: 于 君 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究领域为液体火箭推进剂。

引用格式: 于君, 冯弦, 韩伟, 等. 三种胶黏剂与航天煤油相容性分析[J]. 火箭推进, 2024, 50(5): 122-129.

YU J, FENG X, HAN W, et al. Analysis on compatibility for three kinds of adhesives with aerospace kerosene[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(5): 122-129.

**Keywords:** compatibility; adhesive; coal-based aerospace kerosene; petroleum-based aerospace kerosene; polymethacrylimide

0 引言

航天煤油作为一种碳氢燃料,与传统肼类推进剂相比具有更加环保、成本更低的优势,同时具有可观的比冲性能,目前普遍应用于我国部分长征系列液体火箭推进主动力系统<sup>[1-3]</sup>。目前,从来源上可将航天煤油分为煤基和石油基航天煤油,两者虽来源不同,但在化学组成上并无明显差别,可实现无差别替换<sup>[4-5]</sup>。从应用角度出发,煤油作为一种复杂的混合物,其中含有的部分化学组分或多或少会对输送管路以及其他接触部件产生化学反应,例如会腐蚀某些金属材料表面而破坏密封,或者会对某些非金属材料产生明显的溶胀效应,降低材料使用强度等<sup>[6-7]</sup>。相关研究者曾在石油基航天煤油和煤基航天煤油研制过程中开展过它们与金属材料和非金属材料的相容性研究工作。

在航天系统工程应用过程中不可避免地会使用到胶接件,以满足不同的使用环境要求。例如在火箭的燃料和氧化剂储箱结构设计中通常选择共底的结构模式,考虑到基于液氧的极冷特性,就需要对这种共底结构所用材料进行选择,以降低液氧与燃料之间的冷量交换,保证液体燃料的高效流通性<sup>[8-9]</sup>。共底主要通过夹层结构来实现,核心通过黏结层,将不同材质通过黏结固定,形成多层复合的层状结构<sup>[10-11]</sup>。黏结层(胶层)对环境的适用性关系到整个共底结构的使用性能,其中 DW-1 胶和 DW-3 胶因可在 -269 ~ 60 ℃ 长期使用,被重点用于宇航系统的超低温容器、管道和各种深冷技术中的

黏接<sup>[12-14]</sup>。由于黏结层和黏接件之间的材料差异,当温度发生变化时,由于材料热膨胀系数不同,可能会导致黏结层间出现微裂纹,随着微裂纹的持续发展进而引起结构强度被破坏<sup>[15]</sup>。微裂纹的存在引发了推进剂与接触材料的相容性问题。

部分研究者针对共底结构所用材料与液氧的相容性开展研究工作<sup>[16-18]</sup>,但并未发现有关胶黏剂与石油基航天煤油和煤基航天煤油相容性的公开报道。

结合胶黏剂在推进剂贮箱共底结构中的使用环境,分析认为影响其黏结强度的主要因素为航天煤油温度以及煤油自身的化学结构特性。本文主要从航天煤油浸泡胶黏剂黏接件(铝合金/泡沫黏接件)对其黏结特性影响角度出发,开展胶黏剂(DW-1 低温胶、DW-3 低温胶、J-249 胶)在 -60 ~ 50 ℃ 温度下与两种航天煤油相容性的研究,通过对铝合金 2219/PMI 黏接件和 PMI/PMI 黏接件的拉伸性能进行测试,为液氧煤油火箭结构设计、材料选择和服役寿命评估提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

实验金属材料为铝合金 2219,非金属材料为 PMI 泡沫(聚甲基丙烯酸酞亚胺泡沫),胶为 DW-1 低温胶、DW-3 低温胶、J-249 胶。实验试剂为液体火箭发动机用石油基航天煤油和煤基航天煤油,各项指标均符合国军标 GJB 8087,详细参数如表 1 所示。实验所需仪器如表 2 所示。

表 1 煤基/石油基航天煤油理化参数

Tab. 1 Physical and chemical parameters of coal-based/petroleum-based aerospace kerosene

参数	技术指标(GJB 8087)	煤基航天煤油	石油基航天煤油
密度(20 ℃)/(kg · m <sup>-3</sup> )	830 ~ 836	833	834
	初馏点 ≥ 188	191	204
	10% 馏出温度 ≤ 215	198	208
馏程/℃	50% 馏出温度 ≤ 235	210	212
	90% 馏出温度 ≤ 260	244	219
	终馏点 ≤ 270	262	228

续表

参数	技术指标 (GJB 8087)	煤基航天煤油	石油基航天煤油
结晶点/℃	≤ -60	< -60	< -60
闪点/℃	≥60.0	67.0	73.5
运动黏度 (20 ℃)/(mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	≥2.40	2.42	2.48
运动黏度 (-40 ℃)/(mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	≤25.0	13.4	19.8
碘值/g	≤0.5	0.2	0.1
酸度/(mg · 100 mL <sup>-1</sup> )	≤0.5	0.2	0.2
实际胶质/(mg · 100 mL <sup>-1</sup> )	≤2.0	1.4	0.2
水溶性酸和碱	-	-	-
芳烃质量分数/%	≤5.0	0.6	3.6
总硫质量分数/%	≤0.001 00	0.000 13	0.000 40
硫化氢质量分数/%	-	-	-
硫醇质量分数/%	-	-	-
水分/%	≤0.03	-	-
机械杂质质量分数/%	≤0.000 3	-	0.000 1

表 2 实验所需主要仪器设备  
Tab.2 Main experimental instruments and equipments

设备名称	型号规格	试验用途	主要技术参数
电子万能试验机	EMT 305D	拉伸试验和平拉试验	量程:20 kN;精度:0.5 级;相对误差优于 0.4% ; 重复性优于 0.3%
电子万能试验机	CMT 6303	滚筒剥离试验	量程:2 kN;精度:0.5 级;相对误差优于 0.4% ;重 复性优于 0.3%
电子引伸计	3542-050M-010-LHT	纵向变形测量	标距:50 mm;精度:0.3 mm;测量范围:0 ~ 55 mm; 测量温度: -270 ~ 200 ℃
电子数显卡尺	SF200000878286	试样尺寸测量	测量范围:0 ~ 150 mm;精度:0.01 mm
电子天平	JA21002P	称量试样质量	测量范围 0 ~ 2.1 kg;精度:0.01 g
鼓风干燥箱	GW-50ASBP	试样胶接固化	控温范围:室温至 500 ℃;精度:0.1℃

1.2 胶接件的制作

铝合金 2219/PMI 胶接试样按照 ASTM C 297<sup>[19]</sup> 的要求裁切出方形 PMI 试样(长为 60 mm, 宽为 60 mm, 厚为 25 mm, 见图 1) 和对应铝合金 2219 平拉试验夹具(见图 2), 试验前用丙酮擦拭合金 2219 平拉试验夹具胶接面;然后将配制调节好状态的胶黏剂均匀涂覆于两个平拉试验夹具胶接面, 将方形 PMI 试样置于两个平拉试验夹具胶接面间, 使用 C 型夹加压固定;最后将胶接平拉试样平置于烘箱, 60 ℃ 固化 4 h, 制得合金 2219/PMI 平面拉伸试样。PMI/PMI 胶接试样按照 ASTM D 638 的规定根据 Type III 要求加工为哑铃型。

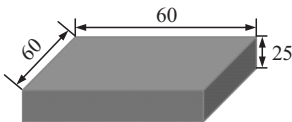


图 1 PMI 试样尺寸(单位: mm)  
Fig.1 PMI sample size( unit: mm)



图 2 平拉试验夹具  
Fig.2 Flatwise tension test clamp

1.3 实验方法

采用直接将不同类型胶接件完全浸泡到航天煤油中的方法,通过测试胶接件浸泡前后的相关力学性能,以判断胶与航天煤油的相容性。根据国内火箭实际应用情况<sup>[11,20-21]</sup>以及型号任务要求,选择 3 种胶(DW-1 低温胶、DW-3 低温胶、J-249 胶)制作成铝合金 2219/PMI 和 PMI/PMI 标准胶接件。温度的选择结合常规储存环境设定为 -20 ℃ 和 25 ℃,以及考虑极端温度情况 -60 ℃ 和 50 ℃ 这 4 个温度点,测试时间的确定原则是应覆盖火箭发射任务的全周期,最终确定浸泡时间为 50 d。通过测试浸泡前后的同规格试验件拉伸效果以评价 3 种胶与 2 种航天煤油在不同温度下的相容性,每种胶接件、油品、每个测试温度点浸泡胶接件 5 件以及相同规格参比件 5 件,以作为对照实验。铝合金 2219/PMI 胶接试样的平面拉伸试验参照 ASTM C 297《夹层结构平面拉伸强度标准试验方法》执行,PMI/PMI 胶接试样的拉伸性能试验参照 ASTM D 638《塑料拉伸性能标准测试方法》执行,且均在电子万能试验机上进行<sup>[22]</sup>。

2 结果与讨论

2.1 煤油处理铝合金/PMI 胶接件的拉伸性能试验

将铝合金/PMI 胶接件安装在拉伸夹具的连接头中,并与试验机连接进行平面拉伸测试,设定平拉试验加载速率为 1.0 mm/min,直至试样破坏。按照式(1)计算试样的平拉强度  $\sigma$ ,测试结果如表 3 所示。

$$\sigma = \frac{F}{ab} \tag{1}$$

式中: $F$  为最大破坏载荷,N; $a$  为试样宽度,mm; $b$  为试样长度,mm。

表 3 铝合金 2219/PMI 胶接试样平面拉伸性能测试结果  
Tab.3 Results of plane tensile properties of aluminum alloy 2219/PMI bonded samples

编号	$\sigma$ /MPa		
	J-249 胶黏件	DW-1 胶黏件	DW-3 胶黏件
1	2.12	2.27	2.46
2	2.24	2.58	2.51
3	2.28	2.30	2.32
4	1.92	2.60	2.23
5	2.37	2.31	2.43
平均值	2.19	2.41	2.39
离散系数/%	7.95	6.77	4.74

由表 3 的测试结果可以看出,DW-1 胶黏件和 DW-3 胶黏件的平拉强度相当,J-249 胶黏件平拉强度比 DW-1 胶黏件和 DW-3 胶黏件低,由此可以看出 DW-1 胶和 DW-3 胶对合金 2219/PMI 的胶接效果要优于 J-249 胶。

对 3 种胶(DW-1 低温胶、DW-3 低温胶、J-249 胶)和 PMI/合金 2219 标准胶接件,于 -60 ℃、-20 ℃、25 ℃ 和 50 ℃ 这 4 个温度点下在两种航天煤油浸泡 50 d,经过处理后进行平拉强度测试,测试结果如表 4 所示。

表 4 航天煤油浸泡后铝合金 2219/PMI 胶接试样平面拉伸性能测试结果

Tab.4 Results of plane tensile properties of aluminum alloy 2219/PMI adhesive samples after soaked in aerospace kerosene

试样浸油类型	浸油温度/℃	J-249 平拉强度		DW-1 平拉强度		DW-3 平拉强度	
		平均值/MPa	离散系数/%	平均值/MPa	离散系数/%	平均值/MPa	离散系数/%
煤基航天煤油	-60	2.11	7.46	2.41	4.02	2.50	5.36
	-20	1.98	7.53	2.34	4.24	2.47	2.71
	25	2.05	11.39	2.36	3.78	2.33	4.07
	50	2.02	11.36	1.73	14.90	2.27	5.41
石油基航天煤油	-60	1.97	8.73	2.46	5.28	2.44	3.33
	-20	2.02	10.99	2.37	2.85	2.38	6.18
	25	2.06	9.11	2.30	8.37	2.47	4.61
	50	2.13	11.60	1.98	13.19	2.24	14.93

由表 4 可以看出,3 种胶黏剂胶接合金 2219/PMI 试样分别经  $-60$ 、 $-20$ 、 $25$ 、 $50$   $^{\circ}\text{C}$  的煤基煤油和石油基煤油浸泡处理及空白试样的平拉强度的批次内和批次间离散系数均较低,表明试验所得数据具有良好的稳定性。经拉伸试验后可观察到,对于 J-249 胶、DW-1 低温胶和 DW-3 低温胶 3 种胶黏剂胶接的合金 2219/PMI 胶接试样,其空白试样与经不同温度的煤基煤油和石油基煤油处理后平拉破坏均为 PMI 泡沫破坏,非泡沫与合金处脱胶等无效破坏模式。这主要是由于所黏附的材料和低温胶黏剂的膨胀系数不同,当温度变化时两种材料相互间收缩的程度不一致,必然会产生很大的热应力<sup>[23]</sup>。但同时也说明 3 种胶黏剂在经不同环境温度的两种类型煤油中处理后,均不会对合金 2219 与 PMI 泡沫间的胶接强度产生明显影响。这也与两种航天煤油化学结构组成有关(如表 1 所示),约含有 98% 的饱和烃含量,表现出较强的氧化安定性,并不会与聚合物的胶黏剂产生化学作用。航天煤油浸泡的合金 2219/PMI 胶接试样与空白试样(未经煤油浸泡的试样)平面拉伸性能对比如图 3 所示。

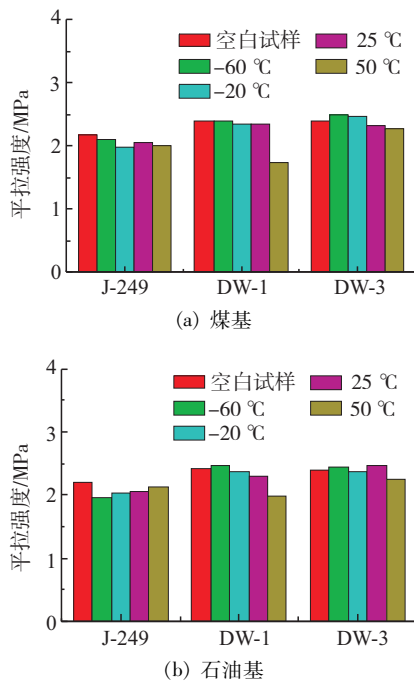


图 3 航天煤油浸泡前后铝合金 2219/PMI 胶接试样平面拉伸性能对比

Fig. 3 Comparison of plane tensile properties of aluminum alloy 2219/PMI adhesive samples before and after soaking in coal-based

由图 3 可以看出,J-249 和 DW-3 胶黏剂胶接合金 2219/PMI 试样分别经  $-60$ 、 $-20$ 、 $25$ 、 $50$   $^{\circ}\text{C}$  的煤基煤油和石油基煤油浸泡处理 50 d 后的平拉强度和未经煤油浸泡的平拉强度基本相当。其中,J-249 胶黏剂经两种煤油处理后拉伸强度均有所降低,且煤基航天煤油对 J-249 在低温下的相容性略优于石油基航天煤油。DW-1 和 DW-3 两种胶黏剂在低温下能很好地维持稳定的拉伸强度,且随着温度升高至  $50$   $^{\circ}\text{C}$ ,使用 DW-1 的胶接件出现少量 PMI 泡沫与合金 2219 脱胶的现象,拉伸强度有所下降,其破坏试样说明经两种煤油高温浸泡处理后,DW-1 低温胶与合金 2219 胶接界面有一定程度的弱化。

## 2.2 煤油处理 PMI/PMI 胶接件的拉伸性能试验

采用楔形夹具夹持试样,由激光标线确保试样夹持对中。按照标准规定,初始段加载速率设定为  $1.0$   $\text{mm}/\text{min}$ ,采用 3542-050M-010-LHT 型电子引伸计测量拉伸轴向变形以计算拉伸模量;变形大于  $5\,000$   $\mu\text{m}$ 时,加载速率调整为  $5.0$   $\text{mm}/\text{min}$ ,直至试样破坏。分别按照式(2)和式(3)计算 PMI/PMI 胶接试样的拉伸强度和拉伸模量。

$$\sigma_t = \frac{P_t}{b\delta} \quad (2)$$

$$E_t = \frac{\Delta P}{b\delta\Delta\epsilon} \quad (3)$$

式中: $P_t$  为拉伸破坏载荷,N; $\Delta P$  为载荷增量,N; $\Delta\epsilon$  为与  $\Delta P$  对应的纵向应变; $b$  为试样宽度,mm; $\delta$  为试样厚度,mm。

煤油处理 PMI/PMI 胶接试样的拉伸性能试验结果如表 5、图 4 和图 5 所示。

由表 5 可以看出,所有测试结果的离散系数均小于 10%,表明测试结果具有足够的稳定性。此外,从试验过程可以看出,对于 J-249 胶、DW-1 低温胶和 DW-3 低温胶这 3 种胶黏剂胶接的 PMI/PMI 拉伸试样,其空白试样与经不同温度的煤基航天煤油和石油基航天煤油处理后试样均为工作段非胶接处 PMI 泡沫破坏,说明 3 种胶黏剂在不同环境温度的两种类型煤油中均可对 PMI 泡沫进行有效胶接。

由图 4 和图 5 可知,J-249 胶黏剂处理的 PMI/PMI 胶接试样经两种航天煤油处理后,在低温环境下,胶接试样的拉伸强度和拉伸模量均保持很好的稳定性。

表 5 PMI/PMI 胶接试样拉伸性能试验结果  
Tab.5 Results of tensile properties for PMI/PMI glued specimens

试样	浸油	J-249				DW-1				DW-3			
		拉伸强度		拉伸模量		拉伸强度		拉伸模量		拉伸强度		拉伸模量	
		平均值/ MPa	离散 系数/%	平均值/ MPa	离散 系数/%	平均值/ MPa	离散 系数/%	平均值/ MPa	离散 系数/%	平均值/ MPa	离散 系数/%	平均值/ MPa	离散 系数/%
空白试样	25	2.05	8.52	122.85	6.89	2.42	5.18	129.38	2.45	1.97	4.02	115.38	5.73
	-60	2.10	5.22	123.62	2.57	2.19	3.09	111.19	3.20	1.97	7.06	112.01	4.60
煤基	-20	2.04	9.12	115.02	6.58	1.79	8.79	119.70	8.91	2.04	7.28	113.30	3.21
	25	1.98	9.48	126.08	3.62	1.66	9.59	117.86	3.28	2.04	4.52	126.04	5.09
航天煤油	50	2.36	9.58	121.00	8.55	1.57	5.35	121.54	8.08	2.00	6.87	124.31	4.30
	-60	2.08	6.47	123.04	9.78	2.01	4.88	111.54	1.14	2.15	5.57	119.82	2.63
石油基	-20	2.04	3.75	128.21	4.58	2.07	6.78	115.22	3.86	2.06	5.43	117.48	2.10
	25	2.45	9.12	128.97	6.90	2.04	6.61	107.78	1.91	2.06	5.89	115.81	3.29
航天煤油	50	2.65	8.68	150.08	4.35	2.22	8.86	119.43	8.00	1.87	8.90	137.20	6.68

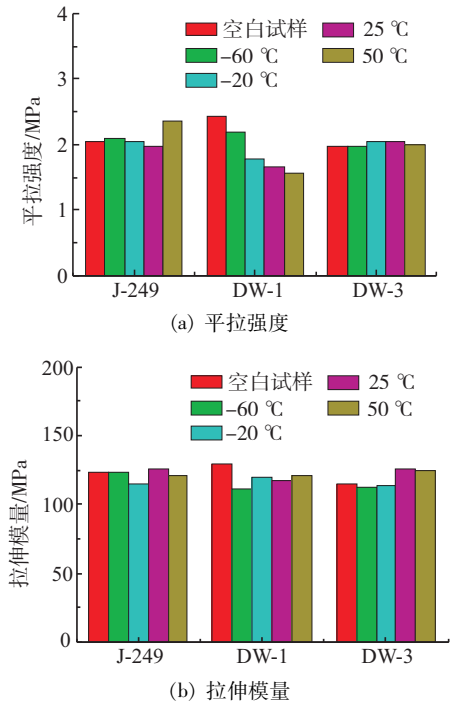


图 4 煤基煤油浸泡 PMI/PMI 胶接试样拉伸性能试验结果  
Fig.4 Results of tensile properties for PMI/PMI glued specimens soaked in coal-based aerospace kerosene

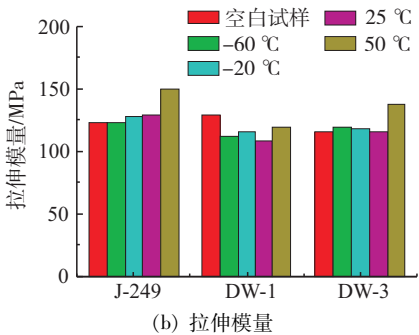
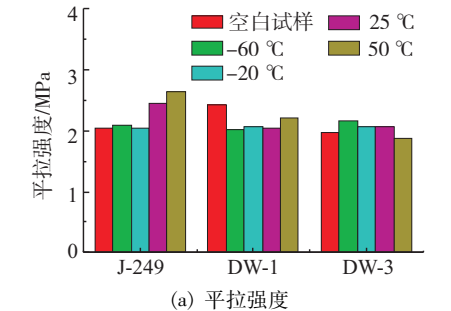


图 5 石油基煤油浸泡 PMI/PMI 胶接试样拉伸性能试验结果  
Fig.5 Results of tensile properties for PMI/PMI glued specimens soaked in petroleum-based aerospace kerosene

随着温度升高,石油基航天煤油首先引起试件的拉伸强度和拉伸模量的升高,而煤基航天煤油并不会引起试件拉伸模量的变化,也表明 J-249 胶黏剂处理的 PMI/PMI 胶接试样经煤基航天煤油浸泡处理后能更好地维持自身状态。DW-1 胶黏剂处理的 PMI/PMI 胶接试样经两种航天煤油浸泡处理后,其拉伸强度和拉伸模量均有下降,表明具有较弱的耐高温性能。DW-3 胶黏剂处理的 PMI/PMI 胶接试样经两种航天煤油处理后,不同温度下的拉伸强度和拉伸模量变化规律较为一致,与空白试样相比,拉伸强度几乎无明显变化,而从拉伸模量变化规律可以看出,煤基航天煤油比石油基航天煤油更易引起胶接试样拉伸模量的升高。

### 3 结 论

采用 3 种胶黏剂 DW-1 低温胶、DW-3 低温胶、J-249 胶分别制成合金 2219/PMI 胶接件和 PMI/PMI 胶接件,通过对胶接件与煤基/石油基航天煤油相容性研究,可以得出以下结论。

1)DW-1、DW-3、J-249 胶制备得到的合金 2219/PMI 胶接件和 PMI/PMI 胶接件经两种航天煤油浸泡处理后,在  $-60 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度范围内,拉伸试验中并无明显的胶接处断裂,表明 3 种胶在不同环境温度的两种类型煤油中均可对合金 2219/PMI 胶接件和 PMI/PMI 胶接件进行有效胶接。

2)从合金 2219/PMI 胶接件和 PMI/PMI 胶接件的拉伸强度和拉伸模量测定结果可以看出,J-249 胶黏剂经两种煤油处理后拉伸强度均有所降低,且 DW-1 和 DW-3 胶在低温环境下的表现更优,高温环境会导致 DW-1 胶与合金 2219 胶接界面有一定程度的弱化。

3)J-249 胶黏剂处理的 PMI/PMI 胶接试样经煤基航天煤油浸泡处理后比在石油基航天煤油处理后能更好地维持自身状态。DW-1 和 DW-3 胶黏剂处理的 PMI/PMI 胶接试样在低温环境下表现更优。

### 参考文献

- [1] EDWARDS T. Liquid fuels and propellants for aerospace propulsion: 1903-2003 [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 1089-1107.
- [2] 马瀚英. 航天煤油[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003: 1-7.
- [3] 王镜淇, 王成刚, 陈雪娇, 等. RBCC 组合动力用液体推进剂研究进展[J]. 火箭推进, 2022, 48(6): 101-112.  
WANG J Q, WANG C G, CHEN X J, et al. Research progress of liquid propellant development for RBCC engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(6): 101-112.
- [4] 韩伟, 杨超, 兰海平, 等. 煤基与石油基航天煤油掺混理化性能[J]. 火箭推进, 2019, 45(2): 60-65.  
HAN W, YANG C, LAN H P, et al. Physical and chemical properties of blended fuel of coal-based and petroleum-based space kerosene [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(2): 60-65.
- [5] 余锋, 李娟娟, 岳兵, 等. 材料与航天煤油相容性试验研究[J]. 航天制造技术, 2013(3): 17-21.  
YU F, LI J J, YUE B, et al. Experimental study on the compatibility of material with kerosene [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(3): 17-21.
- [6] 杜宗罡, 史雪梅, 单世群, 等. 减阻航天煤油减阻机理与传热规律数值模拟[J]. 火箭推进, 2022, 48(1): 76-82.  
DU Z G, SHI X M, SHAN S Q, et al. Numerical study on flow drag reduction mechanism and heat transfer process of polymer drag reducing rocket kerosene [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(1): 76-82.
- [7] 赵云峰. 航天特种高分子材料研究与应用进展[J]. 中国材料进展, 2013, 32(4): 217-228.  
ZHAO Y F. Progress on research and application of special polymer materials in aerospace industry [J]. Materials China, 2013, 32(4): 217-228.
- [8] 赵飞明, 赵云峰, 陈江涛. 航天胶黏剂的性能与应用[J]. 粘接, 2014, 35(12): 42-45.  
ZHAO F M, ZHAO Y F, CHEN J T. Performance and application of aerospace adhesives [J]. Adhesion, 2014, 35(12): 42-45.
- [9] 王彬, 杨瑞生, 郑卫东, 等. 运载火箭共底贮箱加注过程非稳态温度分布数值模拟[J]. 化工学报, 2020, 71(Sup. 1): 68-76.  
WANG B, YANG R S, ZHENG W D, et al. Numerical simulations on unsteady temperature distribution of sandwich bulkhead tank in launch vehicle [J]. CIESC Journal, 2020, 71(Sup. 1): 68-76.
- [10] 李茂, 韩涵, 唐杰, 等. 大温差隔热共底在运载贮箱中的应用研究[J]. 上海航天, 2016, 33(Sup. 1): 43-49.  
LI M, HAN H, TANG J, et al. Application of PMI foam cored sandwich bulkhead tank in launch vehicle [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2016, 33(Sup. 1): 43-49.
- [11] 李照谦, 南博华, 何腾锋, 等. 新一代运载火箭贮箱大温差泡沫夹层共底研制[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(4): 68-72.  
LI Z Q, NAN B H, HE T F, et al. Development of large temperature difference foam sandwich co-bulkhead of cryogenic tank for new-generation launch vehicle [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(4): 68-72.
- [12] 郭平军, 梁国正, 张增平. 胶粘剂在航天工业中的应用[J]. 中国胶粘剂, 2009, 18(3): 56-60.

- GUO P J, LIANG G Z, ZHANG Z P. Application of adhesives in aerospace industry [J]. China Adhesives, 2009, 18(3): 56-60.
- [13] 唐梅, 孙丽荣, 常青, 等. 胶粘剂在航天领域的应用[J]. 化学与粘合, 2002, 24(4): 171-172.
- TANG M, SUN L R, CHANG Q, et al. Organic adhesives applied in aerospace industry [J]. Chemistry and Adhesion, 2002, 24(4): 171-172.
- [14] 李协平, 王洪奎. 超低温胶粘剂及其在航天运载器上的应用[J]. 粘接, 1989, 16(2): 1-6.
- LI X P, WANG H K. The cryogenic adhesives and their applications in rocket and spacecraft [J]. Adhesion in China, 1989, 16(2): 1-6.
- [15] 张建峰. 碳纤维增强树脂基复合材料低温液氧相容性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHANG J F. Study on compatibility of carbon fiber reinforced resin matrix composites with liquid oxygen at low temperature [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [16] 王戈, 刘长军, 李效东, 等. 聚合物基复合材料在液氧贮箱中的应用研究[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(1): 16-22.
- WANG G, LIU C J, LI X D, et al. Study on application of polymer composites in liquid oxygen tank [J]. Aerospace Materials & Technology, 2004, 34(1): 16-22.
- [17] CHAMBERLAIN D L, IRWIN K C, KIRSHEN N A, et al. Investigation of reactivity of launch vehicle materials with liquid oxygen [Z]. 1968.
- [18] SPIES O R. Initiation and growth of explosions in liquids and solids [J]. Journal of the Franklin Institute, 1953, 255(2): 155-156.
- [19] ASTM 复合材料委员会. 夹层结构平面拉伸强度标准试验方法: ASTM C 297 [S]. 华盛顿: 美国国防部, 2015.
- [20] 吴金林. 低温导热绝缘胶粘剂研究[J]. 低温工程, 1998(3): 51-54.
- WU J L. Study of the adhesive of low temperature heat conduction and insulation [J]. Cryogenics, 1998(3): 51-54.
- [21] 孙培杰, 李鹏, 张振涛, 等. 新一代运载火箭共底贮箱隔热性能试验及环境预示[J]. 上海航天, 2014, 31(5): 54-59.
- SUN P J, LI P, ZHANG Z T, et al. Experimental and numerical investigation of heat insulation performances of coplanar tanks in new generation launch vehicle [J]. Aerospace Shanghai, 2014, 31(5): 54-59.
- [22] 杨俊峰. 电子万能试验机的设计研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- YANG J F. Design, research and application of electronic universal testing machine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [23] 朱鸿梅. 玻璃钢低温粘接性能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- ZHU H M. Study on low temperature bonding properties of FRP [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.