

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.08.007

## 基于乙烯基 POSS 改性的厌氧胶的制备及性能研究

王新礼<sup>1</sup>, 李生<sup>1</sup>, 吴正江<sup>2</sup>, 田盼<sup>1</sup>, 李冬冬<sup>1</sup>, 冯增辉<sup>1\*</sup>

(1. 中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司 特种表面保护材料及应用技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430030; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** 针对机械设备维护与修理中厌氧胶连接件的可拆卸性问题, 本研究利用乙烯基二甲基硅氧基笼状聚倍半硅氧烷(POSS-V)对厌氧胶连接件的力学性能进行改性。通过红外光谱对固化前后的厌氧胶进行了表征, 并结合摩擦磨损试验、扫描电镜分析、流变学测试、扭矩测试以及剪切强度的测试, 深入研究了 POSS-V 对厌氧胶性能的影响机制。研究发现, POSS-V 的引入显著提升了厌氧胶的耐热性, 并通过交联作用, 使破坏扭矩最大可提高 64.75%, POSS-V 与丙烯酸酯产生交联反应形成了球状颗粒, 有效减少了摩擦系数。在提高厌氧胶破坏扭矩的同时, 还维持甚至降低了拆卸扭矩值, 从而优化了厌氧胶的综合性能。

**关键词:** 乙烯基 POSS; 厌氧胶; 摩擦系数; 黏度; 扭矩

中图分类号: TQ437.4 文献标识码: A

## Preparation and performance study of anaerobic adhesives modified with vinyl-based POSS

Wang Xinli<sup>1</sup>, Li Sheng<sup>1</sup>, Wu Zhengjiang<sup>2</sup>, Tian Pan<sup>1</sup>, Li Dongdong<sup>1</sup>, Feng Zenghui<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Special Surface Protection Materials and Application Technology, China Academy of Machinery Wuhan Research Institute of Materials Protection Co., Ltd., Wuhan 430030, China; 2. Design &amp; Research Institute of Wuhan Second Ship, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** This research used ethenyl-functionalized polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS-V) to modify the mechanical properties of anaerobic adhesive connectors to address the issue of their disassembly in the maintenance and repair of mechanical equipment. The study characterized the anaerobic adhesive before and after curing using infrared spectroscopy, and combined friction and wear tests, scanning electron microscopy analysis, rheological testing, torque testing, and shear strength testing to thoroughly investigate the impact mechanism of POSS-V on the performance of anaerobic adhesive. The research found that the introduction of POSS-V significantly improved the heat resistance of the anaerobic adhesive. Through cross-linking, the maximum destructive torque could be increased by 64.75%, and the cross-linking reaction between POSS-V and acrylic ester formed spherical particles, effectively reducing the friction coefficient. While increasing the destructive torque of the anaerobic adhesive, it also maintained or even reduced the disassembly torque value, thus optimizing the overall performance of the anaerobic adhesive.

**Keyword:** vinyl-based POSS; anaerobic adhesive; coefficient of friction; viscosity; torque

收稿日期: 2024-04-03

修回日期: 2024-04-09

作者简介: 王新礼(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为厌氧胶, email: 2294065267@qq.com

\*通信作者: 冯增辉(1993—), 工程师, 硕士, 研究方向为涂料涂装, email: 13419694843@163.com

在机械设备维护与修理的过程中,厌氧胶连接件的可拆卸性一直是一个重点和难点。为了确保连接的可靠性同时又能便于后期的拆卸与维护,需要向厌氧胶中添加特定的改性剂,以调整厌氧胶连接件的强度<sup>[1]</sup>。目前,常见的改性剂包括增塑剂和弹性体,然而,这些添加剂往往会削弱胶黏剂的耐高温性能,限制了它们在高温条件下的应用。王刚等人<sup>[2]</sup>尝试利用石墨等低摩擦系数的惰性固体粉末,作为耐高温厌氧胶的力矩调节添加剂,但却增加了胶粘剂的黏度,不利于提升厌氧胶的加工<sup>[1]</sup>。在使用硅油改性丙烯酸酯厌氧胶的尝试中<sup>[1]</sup>,虽然提高了厌氧胶的耐热性,但硅油的引入降低了内部交联密度,进而降低了破坏扭矩,凸显了改性剂对厌氧胶性能的负面影响。基于此,亟待寻求一种理想改性剂,实现在保持耐热性的同时,有效提升胶体的力学性能,保持可拆卸性。同时,保证在维持或增强胶黏剂的基本粘接能力的基础上,不增加胶体的黏度,甚至进一步优化其加工性能。

多面体低聚倍半硅氧烷(POSS)具有优异的补强作用以及较好的耐热性<sup>[3]</sup>,为构建厌氧胶改性剂提供了基础。POSS是由Si-O键交替连接形成的笼型骨架构成,分子式一般为 $(R-SiO_{1.5})_n$ <sup>[4]</sup>。R基一般为环氧基团、氨基、羟基等。通过调整R基团的类型,可以实现对分子结构的精准设计<sup>[5]</sup>,Si-O键则赋予POSS材料良好的热稳定性,与树脂基体相连接后POSS的笼型结构可以有效地限制分子链的运动,从而提高材料的刚性和强度<sup>[6]</sup>。因此POSS常被用作有机/无机复合材料的补强剂<sup>[3,7]</sup>。Paul<sup>[8]</sup>认为富集在表面的POSS可以使复合材料的摩擦系数降低。Yu等人<sup>[9]</sup>合成了S8-POSS,并将其引入涂层中,制备了具有优异摩擦学性能的温度响应型固液复合润滑涂层,涂层中的POSS在摩擦过程中熔化并覆盖在磨损表面上,有效降低了摩擦系数。Chen等人<sup>[4]</sup>使用POSS提高环氧涂层的耐腐蚀性和耐摩擦学性能,摩擦磨损实验表明,环氧涂层摩擦学性能的提高主要是由于POSS的引入造成的。研究认为添加的纳米POSS可以提供润滑作用,在某种程度上,摩擦方式从滑动摩擦转变为滚动摩擦,这降低了复合涂层的摩擦系数和磨损面积。Joshi等人<sup>[10]</sup>发现在八甲基POSS/高密度聚乙烯(HDPE)的纳米复合材料,少量的POSS颗粒起到润滑剂的作用,降低了纳米复合材料的黏度,但黏度随着含量的增加而

增加。

高俊刚等人<sup>[11]</sup>将通过水解缩合法合成的乙烯基笼型倍半硅氧烷(POSS-V)作为改性剂制备出耐高温厌氧胶,在200℃老化96h后剪切强度保持率在87%左右。在此,研究人员使用POSS-V提高厌氧胶的耐热性,但POSS-V对厌氧胶连接件的力学性能未做深入研究。POSS-V能够参与厌氧胶的交联反应与聚合物相连接,对厌氧胶有较强的增强作用。交联程度增加会导致厌氧胶的破坏扭矩和拆卸扭矩增加<sup>[12]</sup>,但由于POSS可以改善聚合物的摩擦性能,因此可以通过在厌氧胶中引入POSS-V提高厌氧胶破坏扭矩和拆卸扭矩的同时维持厌氧胶的可拆卸能力,POSS中含有的Si-O也能提高厌氧胶的耐热性能。

为此,本研究使用POSS-V对聚氨酯丙烯酸酯基厌氧胶进行了改性,考察了POSS-V对厌氧胶固化物摩擦学性能的影响机制,并通过扫描电子显微镜揭示了POSS-V在微观层面的作用机理。本文探究了POSS-V在厌氧胶体系中的作用机理,同时研究了POSS-V含量对胶体的强度、耐热性及流变学性能的影响,为开发新型高强度厌氧胶提供新的思路。

## 1 实验方法

### 1.1 实验材料

双三羟甲基丙烷四丙烯酸酯,长兴公司;1,4-二醇二甲基丙烯酸酯,长兴公司;苯氧基甲基丙烯酸酯,沙多玛公司;聚氨酯丙烯酸酯,沙多玛公司;糖精(BSI),阿拉丁试剂;乙酰苯肼(APH),阿拉丁试剂;过氧化氢异丙苯(CHP),阿拉丁试剂;乙烯基二甲硅氧基笼状聚倍半硅氧烷(POSS-V),如图1所示,广州一新科技有限公司;顺丁烯二酸(MA),阿拉丁试剂;1,4-萘醌,阿拉丁试剂;乙二胺四乙酸二钠(EDTA),天津市大茂化学试剂厂;气相二氧化硅;以上药品使用时并未经过其它处理。

### 1.2 厌氧胶的制备

按照基本配方,如表1所示,向250 mL烧杯中加入丙烯酸酯单体、预聚物以及阻聚剂,使用搅拌器在60℃搅拌30 min后加入促进剂,再搅拌30 min,然后快速冷却至室温,加入引发剂并搅拌2 h,至无固体且胶体均匀一致后将产物倒出避光保存。设计不同POSS-V含量的实验方案,如表2所示。

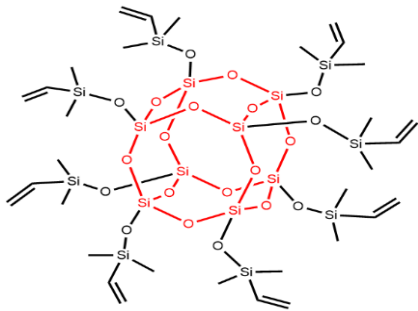


图1 POSS-V结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the POSS-V structure

表1 厌氧胶基本配方

Tab.1 Basic formulation of anaerobic adhesives

原料	用量/wt. %
双三羟甲基丙烷四丙烯酸酯	20~30
1,4-丁二醇二甲基丙烯酸酯	10~20
苯氧基甲基丙烯酸酯	5~10
聚氨酯丙烯酸酯	30~40
POSS-V	0~25
BSI	0.5
MA	0.5
APH	0.5
CHP	2
1,4-萘醌	0.1
EDTA	0.1
气相二氧化硅	1

表2 不同POSS-V用量的厌氧胶

Tab.2 Anaerobic adhesive formulations with different POSS-V dosages

样品	P-0	P-5	P-10	P-15	P-20	P-25
POSS-V 含量/wt. %	0	5	10	15	20	25

1.3 厌氧胶固化物的制备

氧气会阻碍厌氧胶的固化过程,这使得在常温有氧状态下厌氧胶一般无法固化<sup>[13]</sup>,基材表面存在的过渡金属离子在固化过程中起着关键作用<sup>[14]</sup>,其中Cu<sup>2+</sup>对厌氧胶固化速度的促进效果较好<sup>[15]</sup>,因此在固化的过程中加入一定量的Cu<sup>2+</sup>,具体制备方法如下:取12 g的厌氧胶,滴加4滴0.001 mol/L的Cu<sup>2+</sup>溶液,搅拌均匀后,将混合物倒在聚四氟乙烯板材上,然后将其放入80℃的恒温烘箱中,加热4 h后取出样品。用80目砂纸粗打磨样品的两面,可进行摩擦性能测试。

1.4 结构和性能表征

(1)扭矩强度:采用扭矩扳手对胶粘剂粘接的紧固件进行扭矩强度测试。室温扭矩按照《GB/T 18747.1—2002》进行测试。以螺母和螺栓发生相对位移时的起始扭矩值定为试样的破坏扭矩;扭矩扳手分别转动90°、180°、270°、360°后测出的扭矩的平均值为平均拆卸扭矩又称为拆卸扭矩,如图2所示。

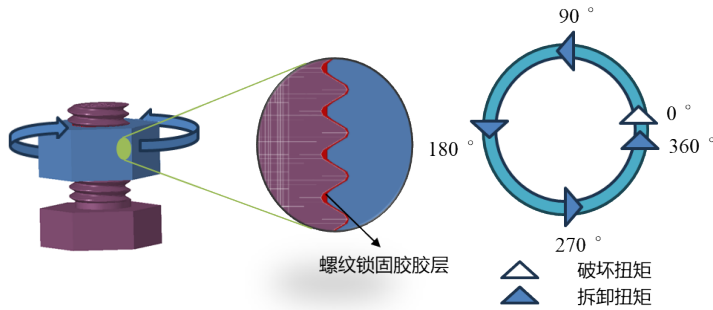


图2 破坏扭矩和拆卸扭矩示意图

Fig.2 Schematic diagram of the ultimate torque and disassembly torque

(2)剪切强度:依据《GB/T 6329—1996》标准,准备厌氧胶搭接剪切试样。由于试样粘接边缘暴露于空气中,在常温下难以彻底固化,因此配合厌氧胶促进剂使用。试样涂胶和装配完成后,置于60℃的电热鼓风干燥箱内加热固化4 h,随后常温下固化24 h后可用于性能测试。

(3)红外光谱:使用IRAffinity-1S型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)对POSS-V以及P-0和P-10固化前、固化后的样品进行表征,确定固化反应的顺利进行。测试的波数扫描范围为500~4000 cm<sup>-1</sup>分辨率设定为4 cm<sup>-1</sup>,扫描次数为10次。

(4)扫描电子显微镜:为了解厌氧胶拆卸后的状

态以及磨痕的状态,采用JSM-6510LV型扫描电子显微镜(SEM)观察,加速电压为20 kV,在观察微观形貌时,放大倍数统一为50、100、1000倍。

(5)流变学性能测试:采用TA公司的平板流变仪测量黏度,测试胶粘剂的黏度随剪切速率的变化。测试温度为25 °C,剪切速率为0.1~100.0 s<sup>-1</sup>,每数量级点数为5。

(6)摩擦学性能测试:采用Rtec摩擦磨损试验机测试复合材料摩擦学性能,摩擦配副选用GCr15球,直径6.3 mm。用无水乙醇清洁打磨后的试样表面后进行摩擦学试验,试验条件为干摩擦,载荷10 N,频率为4 Hz,往复行程为8 mm。摩擦学试验结束后,将磨损后的试样表面喷金后,用扫描电镜观测其表面形貌,分析磨损机理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 红外表征

为了探究POSS-V能否与丙烯酸酯在厌氧条件下进行自由基反应,我们对POSS-V、P-0固化前后、P-10固化前后的样品进行红外分析。如图3所示,对于POSS-V的红外谱图,在1605 cm<sup>-1</sup>处观察到POSS-V的C=C的伸缩振动吸收峰<sup>[16]</sup>,在1062 cm<sup>-1</sup>观察到POSS中的Si-O-Si的对称伸缩特征峰。

对于在P-10固化前和固化后的红外谱图,在1060 cm<sup>-1</sup>观察到POSS中的Si-O-Si的对称伸缩特征峰,以及780 cm<sup>-1</sup>的反对称伸缩振动峰。对于液体样可以看到在1632 cm<sup>-1</sup>处的C=C双键伸缩振动峰,在固化后强度减弱或消失,说明厌氧胶固化比较完全,POSS成功参与到固化过程中。

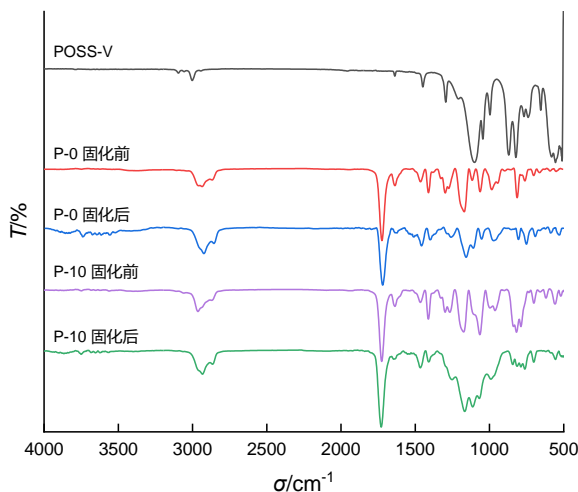


图3 POSS-V、P-0和P-10固化前后红外光谱图

Fig.3 Infrared spectra of POSS-V, P-0, and P-10 before and after curing

### 2.2 摩擦学性能

当在紧固件上涂覆了厌氧胶之后,厌氧胶经过固化,在螺纹间形成了坚固的硬化层。这种硬化层能够牢固地连接螺栓和螺母,但在施加足够拆卸力时,硬化层会被破坏或剪切,从而允许螺母被拧出。在拧出过程中,厌氧胶可能从塑性状态变为有一定脆性的碎片,这些碎片随着螺纹的旋转而脱落。厌氧胶的碎片可以增加螺纹接触面之间的摩擦系数。这是因为碎片可能在金属表面之间形成不平整的接触,从而增加了接触表面的不规则性和摩擦。这种

增加的摩擦力需要通过更大的拆卸扭矩来克服。因此在一些研究中会通过添加润滑性填料来降低拆卸扭矩。

在此,我们对厌氧胶的固化物做了摩擦学性能测试,在未添加POSS-V的情况下,摩擦系数相对较高并且在整个摩擦测试期间保持相对稳定,如图4所示。这种稳定性可能反映了材料表面性质的一致性,以及在摩擦过程中没有显著的表面改变或磨损机制变化。引入POSS-V后,摩擦系数有显著的下降,这表明POSS-V在提升材料的润滑性能方面起



到了积极的作用。然而,随着摩擦时间的增加,摩擦系数逐渐升高,认为 POSS-V 在摩擦界面形成的保护层可能逐渐磨损或变形,其润滑效果可能会减弱。

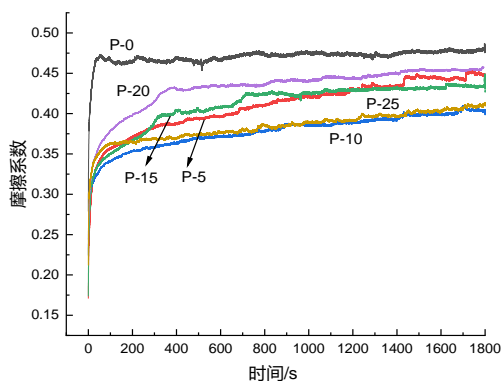


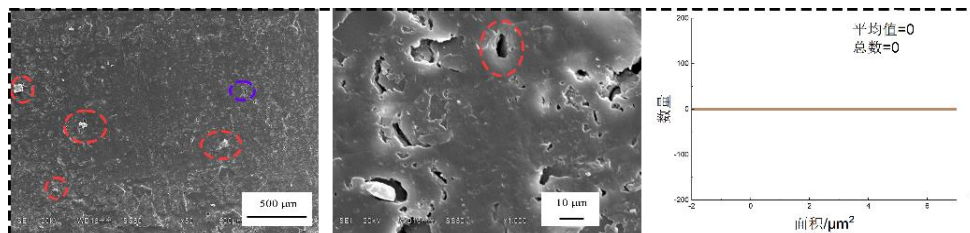
图4 不同 POSS-V 含量的厌氧胶固化物的摩擦系数随时间变化曲线

Fig.4 Friction coefficient curves over time for anaerobic adhesive cured products with different POSS-V contents

随后我们采用 SEM 对经历摩擦磨损后的表面进行了分析。SEM 分析结果揭示了 POSS-V 添加对磨损痕迹产生了显著影响。具体而言,加入 POSS-V 的样品磨痕较为狭窄,在放大 50 倍的电镜照片中能够看到磨痕的边缘,如图 5 所示,而未添加 POSS-V 的样品,其磨痕则较为宽阔。这一差异认为是 POSS-V 促进了厌氧胶固化物中交联密度的提高,进而增强了材料的机械性能,尤其是耐磨性能。磨损过程中,固化物表面经受剪切力作用产生弹塑性变形,此变形能够吸收并分散较大的应力场,但同时可能引致大分子链在应力集中区域断裂,在材料

表面观察到的划痕与微观撕裂现象,主要归因于疲劳磨损<sup>[17]</sup>,如图 5 所示。同时在放大 1000 倍的电镜照片中观察到,添加 POSS-V 后,磨痕表面出现球状颗粒,随着 POSS-V 含量的增加,球状颗粒逐渐与树脂基体相容,颗粒变大,认为这种颗粒状凸起降低了固化物的摩擦系数。代志鹏<sup>[18]</sup>等使用 POSS-V 制备液体硅橡胶时也观察到类似的球状颗粒。通过放大 1000 倍的电镜照片对颗粒面积和数量进行评估,如图 5 所示,根据直方图和高斯分布,发现 P-10 具有最多的颗粒数,随着 POSS-V 含量的增加,颗粒面积增大,数量减少,表明 POSS-V 发生自身聚集或与丙烯酸酯产生交联反应形成了球状颗粒,随着 POSS-V 的增加,球状颗粒逐渐增大,润滑作用失效,摩擦系数逐渐上升。

POSS-V 的引入增强了固化物的交联密度,同时在厌氧胶固化体中形成了独特的两相结构。POSS-V 的自身聚集或与丙烯酸酯单体的反应形成的球状颗粒结构均匀分散于固化物中,起到了调节摩擦性能的作用。认为这种结构导致平均摩擦系数的降低,从而改善了材料的整体摩擦磨损性能。认为随着摩擦过程的进行,接触面上的热量积累和剪切力作用增强,导致材料表面发生严重的塑性变形。同时,持续的剪切力作用可能导致微观裂纹的产生和扩展,这些裂纹和其它缺陷会进一步破坏表面的完整性,POSS-V 在摩擦界面形成的保护层逐渐磨损或变形,其润滑效果减弱,导致摩擦系数逐渐增加。随着 POSS-V 含量的增加,摩擦系数的变化表现出一个先减小后增加,再减小的趋势,POSS-V 的添加确实能够改善材料的润滑性能,但是其效果受到 POSS-V 含量的影响。



(a) P-0

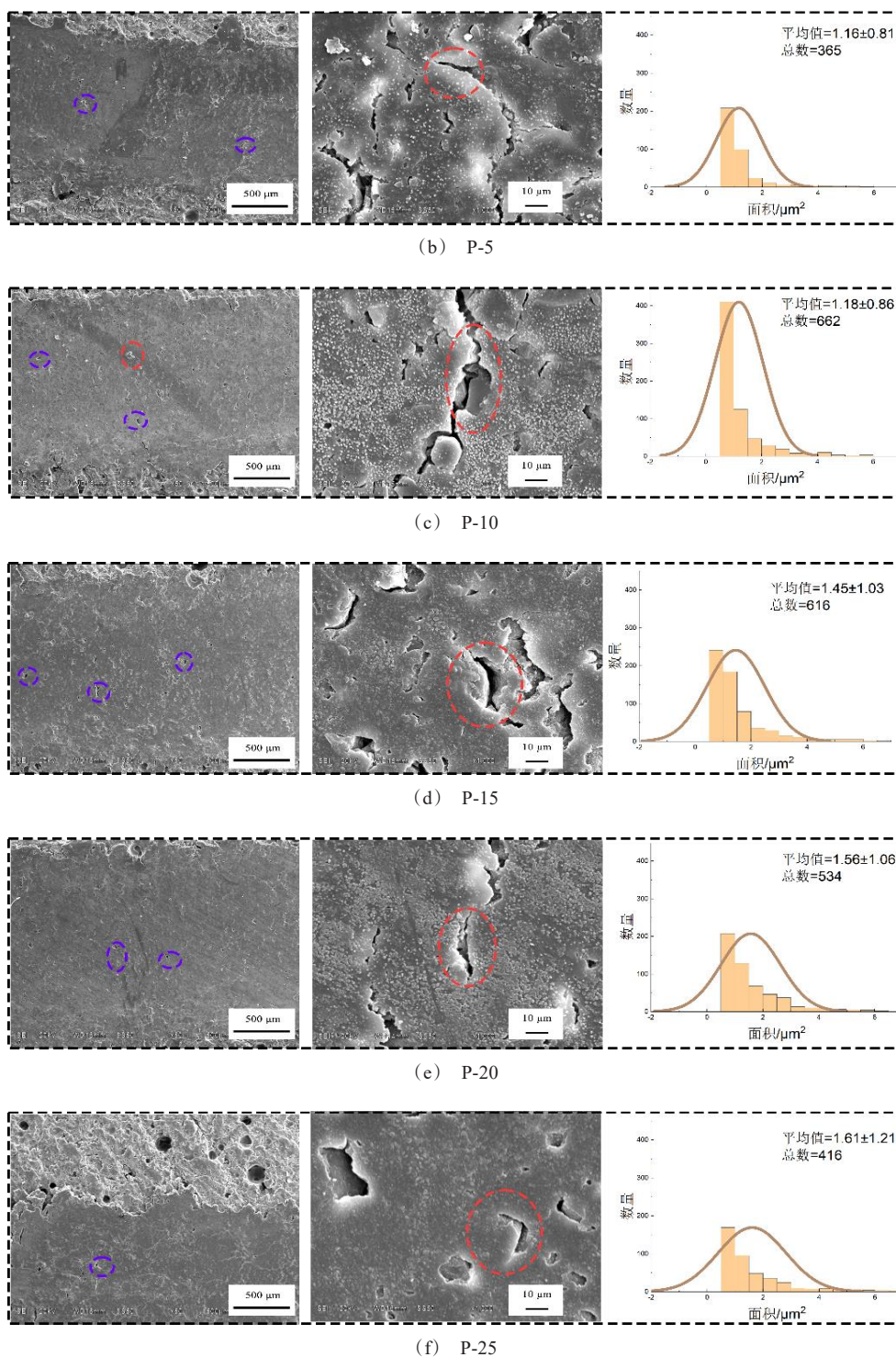


图5 不同POSS-V含量的厌氧胶固化物摩擦实验后磨痕放大50、1000倍的表面形貌及不同POSS-V含量的颗粒面积分布图  
Fig.5 Surface morphology of anaerobic adhesive cured products with different POSS-V contents after friction test, magnified 50 and 1000 times, and particle area distribution of different POSS-V contents

### 2.3 流变学特性

在研究中,通过流变仪测试揭示了POSS-V对胶液黏度的影响。如图6所示,胶液在不同剪切速

率下的黏度呈现随剪切速率增加而减少的趋势,这是假塑性流体的典型特征,即剪切变稀现象。初期剪切速率增加时,黏度线性下降,因为分子链排列需

要时间适应外力。随着剪切速率进一步增大,分子链间的相对滑移更加明显,导致黏度更低。POSS 含量增加使胶液黏度提高,但在含量达到 10% 和 15% 时,黏度变化不大。POSS-V 的添加改变了胶

液的黏度,且高 POSS-V 含量增加了黏度,但整体黏度不大,仍易于厌氧胶的施工,胶液仍表现出随剪切速率增加黏度降低的假塑性特性。

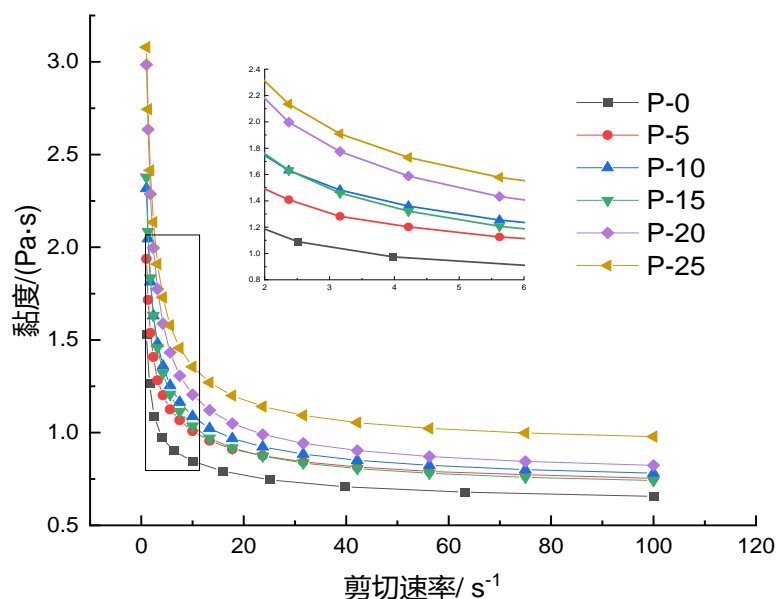


图 6 不同 POSS-V 含量的厌氧胶胶液黏度随剪切速率变化的曲线

Fig.6 Viscosity curves of anaerobic adhesive solutions with different POSS-V contents as a function of shear rate

## 2.4 力学性能

根据上述方法对各方案厌氧胶的破坏扭矩、拆卸扭矩、剪切强度等性能进行测试。在测试过程中选用 304 不锈钢作为紧固件的基材。如图 7 所示, POSS-V 含量对厌氧胶的破坏扭矩和拆卸扭矩有影响。随着 POSS-V 含量的增加,厌氧胶的破坏扭矩逐步增加。当含量超过 20% 后,破坏扭矩出现轻微下降。当 POSS-V 含量为 15% 时,最大的破坏扭矩为 17.2 N·m,比未添加 POSS 提高了 64.75%。在研究中破坏扭矩出现上升,但是拆卸扭矩却略有下降,认为 POSS-V 形成的球状颗粒结构与丙烯酸酯产生交联并均匀分散于固化物中,增加了破坏扭矩,起到了摩擦性能调节剂的角色,提供了润滑能力。随着 POSS-V 含量的增加,润滑作用逐步减弱,拆卸扭矩随 POSS-V 含量的变化表现出与摩擦系数相同的规律。

随后我们取螺栓上被破坏的厌氧胶固化物进行 SEM 测试,结果如图 8 所示。P-0 由于未添加增强剂,固化整体较软,螺母拧出时厌氧胶被碾碎成较小的块状,呈“蓬松状”,如图 8(a)所示。随着 POSS-V

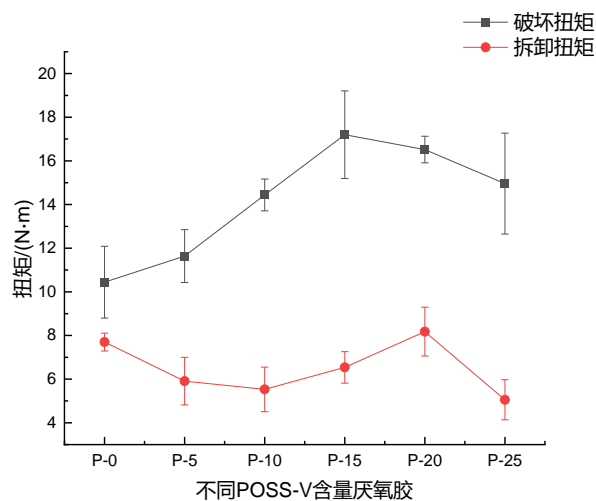


图 7 破坏扭矩和拆卸扭矩随 POSS-V 含量变化的曲线

Fig.7 Curves of ultimate torque and disassembly torque as a function of POSS-V content

的加入,厌氧胶刚性增加,出现较大的块状残留,如图 8(b)~(f),推测较为光滑的一面与不锈钢基材相接触,另一边出现的块状物为厌氧胶在紧固件中摩擦碾压产生。同时在图 8(c)~(e)较为光滑的一面



观察到有颗粒状凸起,证明了颗粒物由 POSS-V 与丙烯酸酯反应生成,而非在摩擦磨损测试中产生。随着 POSS-V 含量的增加,厌氧胶的刚性越强,断裂

面越整齐,块状物减少,扭矩强度增加,但由于摩擦系数减少,拆卸扭矩不变甚至出现下降趋势。

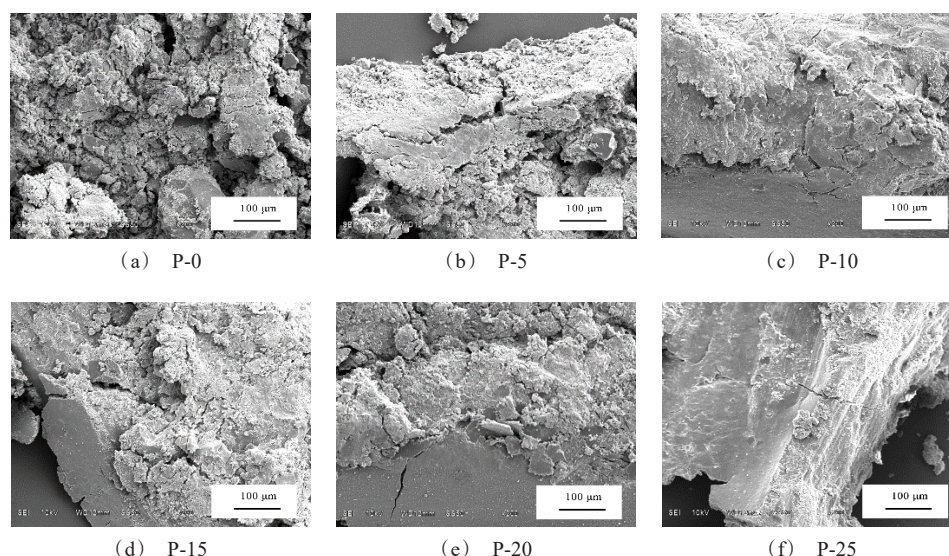


图8 不同POSS-V含量的厌氧胶在紧固件中的微观形貌

Fig.8 Microscopic morphology of anaerobic adhesives with different POSS-V contents in fasteners

POSS-V 上的乙烯基基团能够与丙烯酸酯在厌氧状态下能够与丙烯酸酯发生反应产生交联,能够提高厌氧胶的耐热性,且具有独特的Si-O键结构,与C-O键(358.0 kJ/mol)和C-C键(304.0 kJ/mol)相比, Si-O键(约460.5 kJ/mol)具有更高的键能<sup>[19]</sup>,因而具有良好的热稳定性和热氧化稳定性<sup>[20]</sup>。如表3和图9所示,为不同POSS-V含量在120 °C下的扭矩强度值,POSS-V的加入提高了扭矩强度,具有较高的强度保持率,但POSS-V含量变化对厌氧胶的扭矩强度并未产生显著影响。

表3 在120 °C下不同POSS-V含量的厌氧胶的强度保持率

Tab. 3 Strength retention rate of anaerobic adhesives with different POSS-V contents at 120 °C

方案	强度保持率/%	
	破坏扭矩	拆卸扭矩
P-0	72.03	59.09
P-5	113.06	69.37
P-10	100.07	73.46
P-15	86.63	67.61
P-20	84.50	48.32
P-25	104.61	109.00

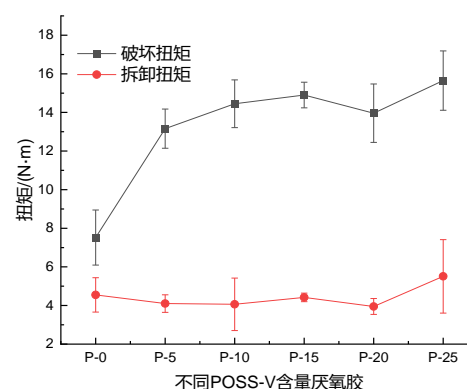


图9 在120 °C下破坏扭矩和拆卸扭矩随POSS-V含量变化的曲线

Fig.9 Curves of ultimate torque and disassembly torque as a function of POSS-V content at 120 °C

剪切强度,是指在粘接部件破坏时,每单位粘接面积能够承受的最大平行于粘接表面的载荷。在相同的测试条件下,剪切强度较高的产品往往具有更高的韧性<sup>[21]</sup>。随着POSS-V含量的增加,剪切强度初始时没有明显变化,然后逐渐降低,如图10所示。



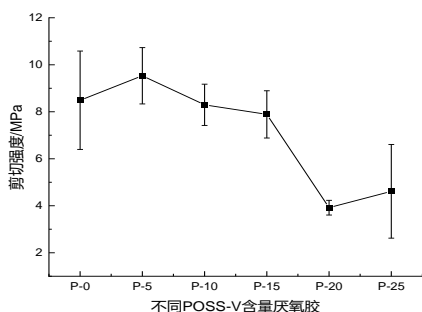


图 10 厌氧胶剪切强度随 POSS-V 含量变化的曲线

Fig. 10 Shear strength curves of anaerobic adhesives as a function of POSS-V content

POSS-V 作为一种增强剂,具有与厌氧胶单体交联的能力,增加了固化后的交联程度。首先,厌氧胶中的聚氨酯软段发挥作用,使其具有较高的剪切强度;随着 POSS-V 含量进一步增加,厌氧胶固化后变得更加脆弱,导致剪切强度下降。剪切破坏方式表现为胶粘剂失效,然而 POSS-V 的加入改变了厌氧胶剪切破坏表面的形貌,从具有韧性的撕裂状转变为了“纤维状”,如图 11 所示。认为这种变化是由于 POSS-V 改变了厌氧胶固化物的交联程度,从韧性撕裂转变为脆性断裂。

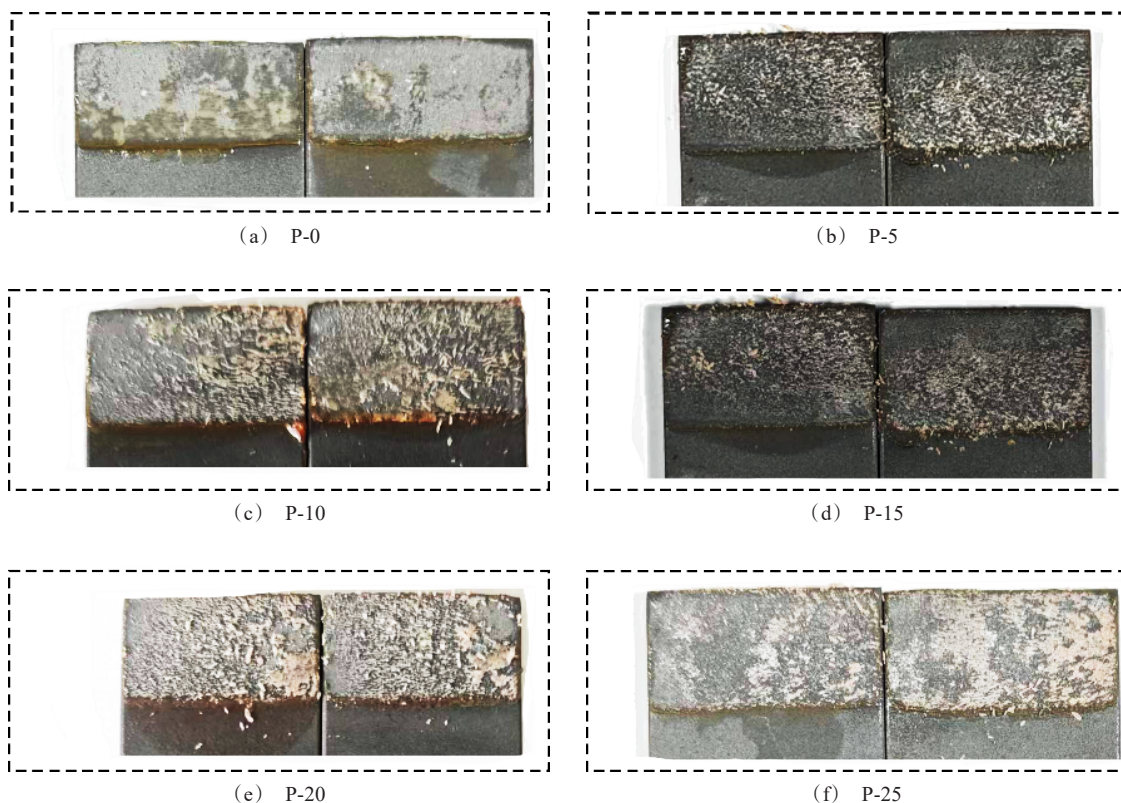


图 11 不同 POSS-V 含量下厌氧胶剪切破坏形貌

Fig. 11 Shear failure morphology of anaerobic adhesives with different POSS-V contents

### 3 结论

本研究使用 POSS-V 对聚氨酯丙烯酸酯基厌氧胶进行了改性,探究了其对厌氧胶摩擦学、流变学、力学性能的影响机制,具体表现在:

(1)POSS-V 通过与丙烯酸酯单体反应,形成的

球状颗粒结构均匀分布于固化体中,有效调节了摩擦性能,显著降低了摩擦系数。随着 POSS-V 含量增加,球状颗粒的面积扩大,与树脂基体相容,然而其润滑效果有所减弱。

(2)POSS-V 与厌氧胶单体反应后增加了交联密度,从而提升了厌氧胶的破坏扭矩。当 POSS-V

的添加量达到 15% 时,其破坏扭矩相较于未添加 POSS-V 的厌氧胶提高了 64.75%。此外,通过降低固化物的摩擦系数,厌氧胶的拆卸扭矩得以保持不变,甚至有所下降。POSS-V 的加入提高了厌氧胶在高温下的强度保持率。

(3)POSS-V 的加入改变了剪切破坏的表面形态,由原来的韧性撕裂向“纤维状”转变。当 POSS-V 含量较多时,剪切强度则有所降低。通过上述研究,本文不仅深化了对 POSS-V 在改善厌氧胶性能方面的理解,而且为开发新一代高性能厌氧胶提供了参考,具有重要的理论意义和应用价值。此项研究将为厌氧胶的制备提供新的思路。

### 参考文献

- [1] 王刚,刘晓辉,米长虹,等. 有机硅改性丙烯酸酯厌氧胶黏剂的制备及性能[J]. 精细石油化工, 2019, 36(1): 59-65.
- [2] 王刚,张大勇,赵颖,等. 力矩调节剂对耐高温厌氧胶性能影响的研究[J]. 化学与黏合, 2011, 33(4): 42-44, 73.
- [3] Zeng L, Liang G, Gu A, et al. High performance hybrids based on a novel incompletely condensed polyhedral oligomeric silsesquioxane and bismaleimide resin with improved thermal and dielectric properties[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47: 2548-2558.
- [4] Chen J, Liu T, Zhang X, et al. Polyhedral oligomeric silsesquioxane grafted covalent organic frameworks for simultaneously improved tribological and corrosion resistance of epoxy coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 172: 107164.
- [5] Li G, Wang L, Ni H, et al. Polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS) polymers and copolymers: a review[J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers, 2001, 11: 123-154.
- [6] Pan R, Shanks R, Liu Y. The effect of humping semi-enclosed cage structure on polymer chains characteristics of TSI-POSS/PU hybrid composites[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 751: 30-34.
- [7] Yu C, Ju P, Wan H, et al. POSS-grafted PAI/MoS<sub>2</sub> coatings for simultaneously improved tribological properties and atomic oxygen resistance[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(36): 17027-17037.
- [8] Jones P J, Cook R D, McWright C N, et al. Polyhedral oligomeric silsesquioxane-polyphenylsulfone nanocomposites: Investigation of the melt-flow enhancement, thermal behavior, and mechanical properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 121(5): 2945-2956.
- [9] Yu C, Ju P, Wan H, et al. Designing a PAI/PTFE coating with enhanced high-temperature tribological properties by S8-POSS: solid-liquid dual lubrication[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 145: 105667.
- [10] Joshi M, Butola B S, Simon G, et al. Rheological and viscoelastic behavior of HDPE/octamethyl-POSS nanocomposites[J]. Macromolecules, 2006, 39(5): 1839-1849.
- [11] 高俊刚,董双良,董喜华,等. 硅烷改性耐热厌氧胶的制备及其固化动力学[J]. 中国胶粘剂, 2007(10): 1-5.
- [12] 韩云龙,王秋龙,姜垚男,等. 乙氧基化双酚 A 二甲基丙烯酸酯对耐高温厌氧胶性能的影响[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(4): 27-30.
- [13] Raftery D, Smyth M R, Leonard R G, et al. Effect of copper (II) and iron (III) ions on reactions undergone by the accelerator 1-acetyl-2-phenylhydrazine commonly used in anaerobic adhesives[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1997, 17(2): 151-153.
- [14] Aronovich D A. Achievements in the field of initiating systems of curing of anaerobic adhesives[J]. Polymer Science, Series D, 2021, 14: 143-155.
- [15] 王新礼,汪洋,马创,等. 环氧丙烯酸酯在厌氧胶中的应用研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2024, 33(1): 63-70.
- [16] 王明超,王敏,周俊,等. 笼型八乙烯基 POSS 改性 EPDM 的热稳定性[J]. 弹性体, 2019, 29(3): 23-26.
- [17] Li Y, Wang T, Chen S, et al. Dry friction thermal behavior and wear mechanism of polyurethane elastomer for main drive seal of TBM[J]. Tribology International, 2024, 193: 109367.
- [18] 代志鹏,陈绪煌,余鹏,等. 乙烯基 POSS 改性加成型液体硅橡胶[J]. 弹性体, 2018, 28(5): 22-27.
- [19] 代广富,裴勇兵,褚俊涵,等. 有机硅树脂耐高温改性方法及机理研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(3): 174-182.
- [20] 关佩琳,赵娟. 一种碳硼烷改性有机硅树脂的制备及其耐热性能[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(2): 311-316.
- [21] Da Silva L F M, Critchlow G W, Figueiredo M A V. Parametric study of adhesively bonded single lap joints by the Taguchi method[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008, 22(13): 1477-1494.