



# 基于聚异丁烯的高性能氢燃料电池密封胶的制备与性能

曹健<sup>1,2</sup>, 胡建华<sup>2</sup>, 李艳<sup>2</sup>, 刘平<sup>1,2</sup>

(1 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东广州 510640; 2 广东时利和汽车实业集团有限公司, 广东佛山 528222)

**摘要:** 以改性聚异丁烯作为基体, 利用其双键与含氢硅油之间的加成反应, 制备了单组分密封胶; 研究了双键与硅氢的比值 ( $R$  值)、高活性聚异丁烯和二氧化硅的用量及固化条件等对密封胶力学性能的影响, 并据此进行配方优化。优化后的密封胶表现出优异的力学性能, 其拉伸强度、断裂伸长率和压缩永久变形分别达到 3.0MPa、300% 和 15%。同时, 密封胶具有优异耐老化性能、低氢气阻隔系数和低透湿度, 可应用于氢燃料电池。

**关键词:** 聚异丁烯; 密封胶; 力学性能; 氢燃料电池

**中图分类号:** TQ 436<sup>+</sup>.6

DOI:10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2026.02.012

## Preparation and Properties of High Performance Sealant for Hydrogen Fuel Cells Based on Polyisobutylene

CAO Jian<sup>1,2</sup>, HU Jian-hua<sup>2</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, LIU Ping<sup>1,2</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2 Guangdong TGPM Automotive Industry Group Co., Ltd., Foshan 528222, Guangdong, China)

**Abstract:** One-component sealant was prepared using modified polyisobutylene as the matrix, leveraging the addition reaction between its double bond and hydrosilicone oil. The effects of the molar ratio of double bond to silylhydride ( $R$  value), content of high reactive polyisobutylene and silica, curing conditions on the sealant's mechanical properties were investigated, thus leading to formulation optimization. The optimized sealant exhibits outstanding mechanical properties, achieving tensile strength, elongation at break, and compression set of 3.0 MPa, 300%, and 15%, respectively. Concurrently, the sealant demonstrates excellent aging resistance, low hydrogen transmission coefficient and low moisture permeability, making it suitable for hydrogen fuel cell applications.

**Key words:** polyisobutylene; sealant; mechanical properties; hydrogen fuel cells

与纯电动车相比, 氢燃料电池汽车具有加注时间短、续航里程长和清洁等优势。随着氢燃料电池技术的发展和相关政策的不断完善, 我国氢燃料电池汽车发展迅速, 累计保有量超过了 2 万辆<sup>[1-2]</sup>。目前, 氢燃料电池电堆是由上百片单电池叠装而成的, 是氢气的化学能转化成电能的场所。在电池运行时, 要将氢气和氧气完全隔离开, 从而提高能量转换效率; 同时整个装置必须保证

对氢气、氧气和冷却液的密封, 避免泄露影响燃料电池的效率和寿命等性能<sup>[3-4]</sup>, 这就要求使用密封胶对电堆进行密封, 从而保证电池的运行稳定性和安全性<sup>[4-6]</sup>。因此, 研制高性能的密封胶极为重要。

聚异丁烯 (PIB) 具有优异的综合性能。侧链甲基的存在使 PIB 的自由体积极低, 因此 PIB 是气密性良好的橡胶材料, 其气密性是硅橡胶和

**作者简介:** 曹健, 博士, 研究方向为有机高分子材料。

**通讯作者:** 胡建华, 博士, 研究方向为有机高分子材料; E-mail: hujianhua@tgpm.com.cn;

刘平, 教授, 博士生导师, 研究方向为有机高分子材料; E-mail: mcpliu@scut.edu.cn。

丙烯酸酯树脂的 20 倍以上<sup>[7]</sup>, 适用于对气密性要求严格的环境。此外, PIB 饱和的分子链使其具有耐老化、耐酸碱和使用温度范围宽等优点。因此, PIB 有可能是制备高性能氢燃料电池密封胶的材料。但是, PIB 仍存在力学性能差和压缩永久变形高等缺点, 不能满足氢燃料电池密封胶的使用要求。

针对上述问题, 本文使用改性聚异丁烯(PIB-V)作为基体, 含氢硅油作为固化剂, 添加二氧化硅及其它助剂, 通过物理共混制备了液体单组分聚异丁烯密封胶, 研究了双键与硅氢的摩尔比、高活性聚异丁烯(HRPIB)和填料的用量及固化条件等对密封胶力学性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料及仪器

改性聚异丁烯(PIB-V)、含氢硅油、铂金催化剂、炔醇抑制剂、高活性聚异丁烯(HRPIB)、聚 $\alpha$ 烯烃稀释剂(PAO), 均购自 Alfa-Aesar; 二氧化硅 A 和二氧化硅 B, 均购自江西广源化工有限公司。

电热恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; 行星匀质机, 深圳市中毅科技有限公司; 万能试验机, 三思泰捷; 旋转黏度计, Brookfield; 邵氏硬度计, 上海六菱仪器厂; VAC-V2 压差法气体渗透测试仪, 济南兰光机电技术有限公司; 湿热试验箱, 爱斯佩克。

### 1.2 单组分密封胶的制备

将改性聚异丁烯、含氢硅油、二氧化硅、稀释剂、铂金催化剂和抑制剂等在常温下使用行星匀质机充分混合均匀并脱泡, 制备得到液体单组分密封胶。将液体胶液置于模具中, 加热进行固化, 即可得到密封胶。

### 1.3 性能测试

力学性能: 按 GB/T 528-2009 进行测试, 拉伸速率为 500mm/min; 邵氏 A 硬度: 按 GB/T 531.1-2008 进行测试; 压缩永久变形按 GB/T 7759.1-2015 进行测试, 测试条件为 120°C×25%×22h; 黏度按 GB/T 2794-2022 使用旋转黏度计测试, 14# 转子, 1s<sup>-1</sup>, 23±2 °C; 氢气透过系数按 GB/T 1038.1-2022 进行测试; 透湿度按 GB/T 1037-2021 进行测试, 环境条件为 50°C×95%RH。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硅氢与双键的摩尔比对力学性能的影响

密封胶是通过 PIB-V 中的双键与含氢硅油中的硅氢之间的加成反应来进行固化的, 其理论物质的量比值, 即  $R$  值 [ $R=n(\text{Si-H}):n(\text{双键})$ ] 为 1。但实际固化过程中, 由于副反应等因素会导致交联反应不充分, 因此需要选择合适的  $R$  值。固定其它组分及用量, 通过调整含氢硅油的用量, 制备了具有不同  $R$  值的密封胶并加热固化, 测定的力学性能见表 1。

表 1  $R$  值对密封胶力学性能的影响

Table 1 The effect of  $R$  value on the mechanical properties of sealant

力学性能	$R$ 值			
	1.3	1.5	1.7	1.9
拉伸强度 /MPa	—	0.5	0.9	1.5
断裂伸长率 /%	—	229	288	214

由表 1 可知, 当  $R$  值为 1.3 时, 密封胶高温烘烤后未完全固化, 表明含氢硅油的添加量较低, 交联反应不充分, 未形成交联网络。当  $R$  值适当提高, 即适当增加含氢硅油的用量, 可以提高交联反应程度, 使交联密度提高, 交联网络更完整, 故拉伸强度和断裂伸长率均逐渐增大。继续增大  $R$  值, 拉伸强度继续提高, 但断裂伸长率会降低, 这是由于交联过度导致的。综合考虑,  $R$  值为 1.7 时具有最佳的力学性能。

### 2.2 HRPIB 用量对密封胶力学性能的影响

在制备密封胶时, 由于 PIB-V 具有较高的黏度, 需要添加合适的稀释剂来降低黏度, 以满足密封胶的使用要求。聚 $\alpha$ 烯烃稀释剂(PAO)与 PIB-V 具有非常好的相容性, 且黏度低, 故使用 PAO 作为稀释剂。虽然 PAO 可以有效降低黏度, 但其过量使用会导致密封胶固化后的性能变差, 因此选择活性稀释剂 HRPIB 和 PAO 进行搭配使用。低黏度的 HRPIB 可以有效降低液体密封胶的黏度; 而在固化时, 其末端的双键可以参与固化, 成为交联网络的一部分, 进而提高力学性能。固定 PAO 为 30 份,  $R$  值为 1.7, 其它成分用量均相同, 探讨 HRPIB 的用量对密封胶固化后力学性能的影响, 其结果如图 1 所示。随着 HRPIB 用量的不断增加, 密封胶的断裂伸长率逐渐提高, 说明 HRPIB 起到增塑的作用, 使密封胶的韧性提高。而拉伸强度则随

着HRPIB用量的增加而呈现先增大后降低的趋势,当HRPIB用量为20份时,拉伸强度达到最大值。出现上述现象的原因为:随着用量的增加,HRPIB可以与过量的含氢硅油发生反应,使交联网络更加完善,故拉伸强度提高;由于HRPIB仅单末端含有乙烯基,继续增加其用量导致交联网络中的悬垂链含量增加并形成更多缺陷,使拉伸强度降低。因此,综合考虑拉伸强度和断裂伸长率,HRPIB的最佳用量为20份。

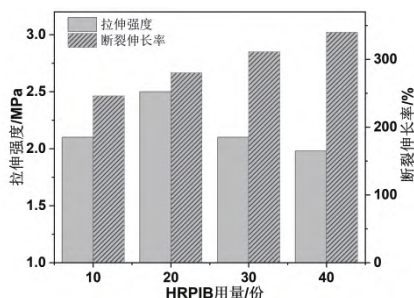


图1 HRPIB用量对密封胶力学性能的影响

Fig.1 The effect of HRPIB content on the mechanical properties of sealant

### 2.3 二氧化硅对密封胶力学性能的影响

为了进一步提高密封胶的力学性能,同时兼顾黏度和触变性,本文使用两种二氧化硅(A和B)复配使用,制备了一系列具有不同二氧化硅比例的密封胶样品,并测试了其力学性能。如表2所示,密封胶的拉伸强度、断裂伸长率和邵氏硬度均随着二氧化硅A或B用量的增加而逐渐提高,且均表现出较好的补强效果。当二氧化硅A和二氧化硅B的比例为10:30时,密封胶具有最佳的力学性能,且此性能可满足氢燃料电池密封胶的使用要求。

表2 二氧化硅(A和B)用量对密封胶力学性能的影响

Table 2 Effect of silica A and B content on the mechanical properties of sealant

力学性能	二氧化硅 A:B					
	20:20	15:20	10:20	10:25	10:30	15:25
拉伸强度/MPa	2.6	2.4	1.9	2.1	3.0	2.7
断裂伸长率/%	306	293	239	249	301	258
邵氏硬度	A36	A35	A33	A34	A35	A39

### 2.4 密封胶的最佳固化条件

本文所制备密封胶为单组分液体聚异丁烯,需要在使用时通过加热进行固化。因此,需要确定密封胶的最佳固化条件。如表3所示,测试了一系列固化条件下密封胶固化后的力学性能,综合判断固化条件。从表3明显看出,固化温度为

130°C时,90min可以达到完全固化,之后随着时间延长,密封胶的性能无明显变化。结合实际使用工况,130°C×90min是密封胶的最佳固化条件。在实际使用时,考虑到烘烤条件会有浮动,密封胶在120°C×120min和140°C×75min两种条件下也可以达到相同的性能。

表3 固化条件对密封胶力学性能的影响

Table 3 The effect of curing condition on the mechanical properties of sealant

固化条件	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	邵氏硬度
130°C×60min	2.8	324	A34
130°C×75min	2.9	327	A34
130°C×90min	3.0	300	A35
130°C×120min	3.0	290	A35
120°C×120min	3.1	291	A35
140°C×75min	3.1	292	A35

### 2.5 密封胶的老化性能

结合氢燃料电池密封胶的使用环境,分别对其在高温高湿环境(85°C和RH85%)和酸溶液环境(pH=2.3水溶液,85°C)中老化2000h后的性能进行测试,结果见表4。在两种老化条件下,密封胶的外观均无明显变化,拉伸强度较初始略有提高,断裂伸长率则降低,邵氏硬度升高,这是由于老化后的交联密度升高导致的。虽然密封胶老化2000h后的力学性能有变化,但其拉伸强度可达到3.1MPa以上,断裂伸长率可达到210%以上,邵氏硬度为A41,仍然可以满足氢燃料电池的使用要求。

表4 聚异丁烯密封胶的老化性能

Table 4 The aging properties of polyisobutylene sealant

力学性能	初始性能	老化2000h后的性能	
		85°C/RH85% pH=2.3溶液, 85°C	
拉伸强度/MPa	3.0	3.2	3.1
断裂伸长率/%	300	210	235
邵氏硬度	A35	A41	A41

### 2.6 密封胶的综合性能

根据配方优化结果,最终确定R值为1.7,HRPIB用量为30份,二氧化硅A和B用量分别为10份和30份,固化条件为130°C×90min,在此基础上制备了应用于氢燃料电池电堆的密封胶,其综合性能见表5。由表5看出,制备的密封胶具有较高的拉伸强度和断裂伸长率和低压缩永久变形等性能,可以满足使用要求。同时,密封胶还具有低的氢气透过系数和透湿度,表明其

对氢气和水蒸气具有良好的密封阻隔作用。此外,上文结果表明密封胶老化后的力学性能仍保持在较高水平,具有良好的耐老化性能。综合来看,制备的聚异丁烯密封胶可满足氢燃料电池密封胶的性能要求,并应用于汽车氢燃料电池中。

表5 聚异丁烯密封胶的综合性能

Table 5 The comprehensive properties of polyisobutylene sealant

性能	测试结果
黏度 / (Pa·s)	761
拉伸强度 /MPa	3.0±0.2
断裂伸长率 /%	300±30
邵氏硬度	A34-36
压缩永久变形 /%, 120℃×25%×22h	15
氢气透过系数 / [mol·m·(m <sup>2</sup> ·s·Pa) <sup>-1</sup> ]	12×10 <sup>-14</sup>
透湿度 / [g·(m <sup>2</sup> ·24h) <sup>-1</sup> ], 50℃×95%RH	5

### 3 结论

本研究制备了基于聚异丁烯的液体密封胶,并针对其力学性能差的问题,研究了R值、HRPIB和二氧化硅的用量及固化条件等对密封胶力学性能的影响。并根据结果对密封胶的配方进行优化,制备了力学性能、气体密封性能和耐老化性能等综合性能优异的密封胶。此密封胶可以应用于氢燃料电池中,起到对气体的密封作用。

### 参考文献

- [1] 高洁,刘嘉玉,裴治,等.中国氢燃料电池汽车产业现状及发展趋势分析[J].内燃机与配件,2023(23):109-112.
- [2] 任怡,代晓芳.氢燃料电池汽车产业现状研究与前景分析[J].汽车实用技术,2025(11):154-159.
- [3] DONG H Y, ZHI G Z. A review on the sealing structures of membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2013,7(1):285-292.
- [4] ZHAO J H, GUO H J, XING Y C, et al. A review on the sealing structure and materials of fuel-cell stacks [J]. Journal of Power Sources, 2023,7(1):59-69.
- [5] LI G, GONG J M, TAN J Z, et al. Stress relaxation behavior and life prediction of gasket materials used in proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Central South University, 2019(26):623-631.
- [6] 李新,王一丁,詹明.质子交换膜燃料电池密封材料研究概述[J].船电技术.2020,40(4):19-23.
- [7] 杨雁晖,柳丽君,郝建强.燃料电池用密封胶[J].粘接,2007,28(2):46-48.

(上接第73页)

industry markets?—A comparison of complete vehicles, energy systems, and raw materials [J]. Energy Economics, 2025,144: 108339.

- [21] 王鹏,张新意,孙启坤,等.连续纤维增强复合材料在动力电池箱盖上的应用[J].时代汽车,2024(10):127-129.
- [22] 周伟东,黄秋,谢晓新,等.固态锂电池聚合物电解质研究进展[J].储能科学与技术,2022,11(06):1788-1805.
- [23] 刘臣臻,张国庆,王子缘,等.膨胀石墨/石蜡复合材料的制备及其在动力电池热管理系统中的散热特性[J].新能源进展,2014,2(03):233-238.
- [24] ZHANG F, LI Q Y, LIU Y J, et al. Improved

thermal conductivity of polycarbonate composites filled with hybrid exfoliated graphite/multi-walled carbon nanotube fillers [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016,123(1):431-437.

- [25] 王旭尧,刘姝伶,闫晓丹,等.单离子导体聚合物电解质研究进展[J].新能源进展,2020,8(05):402-412.
- [26] CHEN Z F, LI X S, ZHANG J L, et al. Simulation and analysis of heat dissipation performance of power battery based on phase change material enhanced heat transfer variable fin structure [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2021, 80(11):535-555.