

# 高柔性及耐溶剂型硅橡胶的研制

殷小龙, 丁梦汝, 蒋珊珊, 闵洁\*

(东华大学 化学化工与生物工程学院, 上海 201600)

**摘要:** 采用乙烯基聚二甲基硅氧烷(乙烯基硅油)为基础聚合物、含氢聚二甲基硅氧烷(含氢硅油)为交联剂、异丙醇配位的氯铂酸为催化剂制备加成型液体硅橡胶, 研究含氢硅油中Si—H与乙烯基硅油中Si—Vi(乙烯基)的物质的量比( $A$ )以及含氢硅油中活性氢质量分数( $\omega$ )对硅橡胶力学性能的影响; 分别添加外增塑剂二甲基聚二甲基硅氧烷(二甲基硅油)和内增塑剂甲基丙烯酸十八烷基酯, 研究增塑剂种类和用量对硅橡胶力学性能和耐溶剂性能的影响。结果表明: 硅橡胶的压缩模量随着 $A$ 的增大先增大后减小, 随着 $\omega$ 的增大而增大, 当 $A=1.50$ ,  $\omega=0.010\ 0$ 时硅橡胶的压缩模量较大; 加入增塑剂后, 硅橡胶的压缩模量随着增塑剂质量分数的增大而减小, 在添加同等质量分数的情况下, 内增塑剂的增塑效果优于外增塑剂, 内增塑型硅橡胶的耐溶剂性能优于外增塑型硅橡胶; 当 $A=1.05$ ,  $\omega=0.003\ 6$ , 内增塑剂质量分数为0.40时, 可以制得具有高柔性及优良耐溶剂性能的硅橡胶。

**关键词:** 硅橡胶; 乙烯基聚二甲基硅氧烷; 含氢聚二甲基硅氧烷; 增塑剂; 力学性能; 压缩模量; 耐溶剂性能

**中图分类号:** TQ333.93

**文章编号:** 1000-890X(2020)06-0427-07

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.06.0427



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

加成型液体硅橡胶通常是以乙烯基聚二甲基硅氧烷(乙烯基硅油)作为基础聚合物, 含氢聚二甲基硅氧烷(含氢硅油)作为交联剂, 在铂系催化剂的作用下发生硅氢化反应而生成的交联网络结构弹性体<sup>[1-2]</sup>。硅橡胶是最常用的弹性材料之一, 因其独特的性能, 如耐高温、耐寒、耐天候老化和生理惰性, 且在极端温度条件下其拉伸强度、拉伸伸长率、撕裂强度和抗压缩永久变形性能十分优异, 在科学研究和工业生产中得到广泛应用。开发具有高强度和高柔性的硅橡胶材料是高分子有机硅领域的研究热点之一<sup>[3-4]</sup>。

增塑剂作为硅橡胶生产中常用的一类助剂, 能够使硅橡胶的模量减小, 软化温度降低, 拉伸伸长率和柔性提高。目前对硅橡胶的增塑剂及耐溶剂性能的研究较少, 本工作旨在制备一种具有高柔性及优良耐溶剂性能的新型硅橡胶, 研究含氢硅油中Si—H与乙烯基硅油中Si—Vi(乙烯基)的物质的量比( $A$ )及含氢硅油中活性氢的质量分数( $\omega$ )对硅橡胶力学性能影响, 并分别采用二甲基聚二

甲基硅氧烷(二甲基硅油)作外增塑剂、甲基丙烯酸十八烷基酯作内增塑剂, 研究增塑剂种类和用量对硅橡胶力学性能和耐溶剂性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

乙烯基硅油, 乙烯基质量分数为0.012 7; 含氢硅油, 活性氢质量分数分别为0.003 6, 0.007 5和0.010 0, 山东盛宇新材料有限公司产品。异丙醇, 分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司产品。氯铂酸, 分析纯, 上海帝韬化工科技有限公司产品。二甲基硅油, 粘度为 $50\text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 济南山海化工科技有限公司产品。甲基丙烯酸十八烷基酯, 化学纯, 上海麦克林生化科技有限公司产品。

### 1.2 试验设备和仪器

SX2-5-12型箱式电阻炉, 上海意丰电炉有限公司产品; AL104型电子天平, 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司产品; DGG-9070B型电热恒温鼓风干燥箱, 上海森信实验仪器有限公司产品; Nicolet iS10型变温傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪, 美国赛默飞世尔科技有限公司产品; DMA Q800型动态力学分析(DMA)仪, 美国TA仪器公司产品。

**作者简介:** 殷小龙(1993—), 男, 湖北孝感人, 东华大学在读硕士研究生, 主要从事硅橡胶类防护材料的研究。

\*通信联系人(minjie@dhu.edu.cn)

### 1.3 试样制备

#### 1.3.1 催化剂

将装有4A型分子筛的坩埚放入箱式电阻炉中,550℃下加热4 h后,停止加热,冷却至120℃后放入干燥缸中,冷却至室温后将适量分子筛倒入异丙醇溶液中,放置3~4 d(期间轻微振荡以使分子筛与异丙醇溶液充分接触),得到无水异丙醇,放置待用。

称取0.2 g氯铂酸固体,加入20 mL无水异丙醇,室温下搅拌使之充分溶解,得到异丙醇配位的氯铂酸催化剂(铂系催化剂)橘黄色透明溶液,移入棕色试剂瓶中待用。

#### 1.3.2 未添加增塑剂的硅橡胶

称取10 g乙烯基硅油,加入不同含氢量的含氢硅油(加入量见表1),混合均匀后加入10 μL铂系催化剂,充分搅拌,将混合物料注入圆柱形模具内,抽真空排泡后于105℃下加热2 h制得硫化硅橡胶。

表1 不同含氢量的含氢硅油在硅橡胶中的加入量 g

| A    | ω       |         |         |
|------|---------|---------|---------|
|      | 0.003 6 | 0.007 5 | 0.010 0 |
| 1.05 | 1.372   | 0.659   | 0.494   |
| 1.20 | 1.568   | 0.753   | 0.564   |
| 1.35 | 1.764   | 0.847   | 0.635   |
| 1.50 | 1.960   | 0.941   | 0.706   |
| 1.65 | 2.156   | 1.035   | 0.776   |

#### 1.3.3 外增塑型硅橡胶

按表2所示配方依次加入乙烯基硅油、活性氢质量分数为0.003 6的含氢硅油、二甲基硅油,混合均匀后加入铂系催化剂,充分搅拌,混合物料注入圆柱形模具内,抽真空排泡后于105℃下加热2 h制得硫化硅橡胶。

#### 1.3.4 内增塑型硅橡胶

按表3所示配方依次加入乙烯基硅油、活性氢

表2 外增塑型硅橡胶的配方 g

| 组 分   | 二甲基硅油质量分数 |       |       |       |
|-------|-----------|-------|-------|-------|
|       | 0.10      | 0.20  | 0.30  | 0.40  |
| 乙烯基硅油 | 10        | 10    | 10    | 10    |
| 含氢硅油  | 1.372     | 1.372 | 1.372 | 1.372 |
| 铂系催化剂 | 0.015     | 0.015 | 0.015 | 0.015 |
| 二甲基硅油 | 1.264     | 2.843 | 4.874 | 7.581 |

注:A为1.05。

表3 内增塑型硅橡胶的配方 g

| 组 分        | 甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数 |       |       |       |
|------------|----------------|-------|-------|-------|
|            | 0.10           | 0.20  | 0.30  | 0.40  |
| 乙烯基硅油      | 9              | 8     | 7     | 6     |
| 含氢硅油       | 2.095          | 2.821 | 3.544 | 4.267 |
| 铂系催化剂      | 0.015          | 0.015 | 0.015 | 0.015 |
| 甲基丙烯酸十八烷基酯 | 1              | 2     | 3     | 4     |

注:同表2。

质量分数为0.003 6的含氢硅油、甲基丙烯酸十八烷基酯,混合均匀后加入铂系催化剂,充分搅拌,将混合物料注入圆柱形模具内,抽真空排泡后于105℃下加热2 h制得硫化硅橡胶。

### 1.4 性能测试

(1) FTIR谱。将乙烯基硅油、甲基丙烯酸十八烷基酯滴在盐片上,将内增塑型硅橡胶研磨制成压片,分别在FTIR仪上测试FTIR谱,波数扫描范围为500~4 000 cm<sup>-1</sup>。

(2) 透明性。分别将4种二甲基硅油含量的外增塑型硅橡胶与4种甲基丙烯酸十八烷基酯含量的内增塑型硅橡胶放置于黑色条底板下拍摄照片,考察透明性。

(3) 力学性能。参照GB/T 7757—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 压缩应力应变性能的测定》,制备3 mm厚的硅橡胶试样,采用DMA仪的压缩模式以测试试样的应力-应变关系曲线。

(4) 耐溶剂性能。取厚度为3 mm的硅橡胶试样,在适量的甲苯溶剂中浸泡24 h后取出,用滤纸擦去残留在试样表面的甲苯,将试样放置在通风处24 h使甲苯缓慢挥发,采用DMA仪的压缩模式以测试试样的应力-应变关系曲线,考察其耐溶剂性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 FTIR分析

乙烯基硅油、甲基丙烯酸十八烷基酯和内增塑型硅橡胶的FTIR谱如图1所示。

从图1可以看出:对于乙烯基硅油,2 962 cm<sup>-1</sup>处的峰为甲基的不对称伸缩振动峰,1 493 cm<sup>-1</sup>处的弱峰为乙烯基硅油中的碳-碳双键伸缩振动峰,1 257 cm<sup>-1</sup>处的峰为Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>的伸缩振动峰,1 069 cm<sup>-1</sup>处强而宽的峰为Si—O—Si的反对称伸缩振动峰,786 cm<sup>-1</sup>处的强峰为Si—O的对称伸缩振动

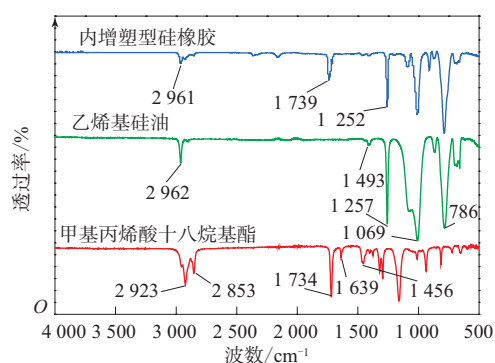


图1 乙烯基硅油、甲基丙烯酸十八烷基酯和内增塑型硅橡胶的FTIR谱

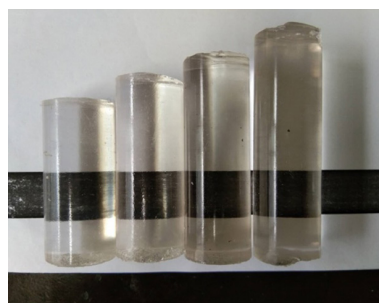
峰; 对于甲基丙烯酸十八烷基酯,  $2923$  和  $2853\text{ cm}^{-1}$  处的峰分别为亚甲基的不对称和对称伸缩振动峰,  $1734\text{ cm}^{-1}$  处的峰为酯基的对称伸缩特征峰,  $1639\text{ cm}^{-1}$  处的弱峰为碳-碳双键的伸缩振动峰,  $1456\text{ cm}^{-1}$  处的峰为亚甲基的弯曲振动峰和甲基的不对称伸缩振动峰。两者的FTIR谱皆与其自身结构相吻合。

从图1还可以看出, 对于内增塑型硅橡胶,  $2961\text{ cm}^{-1}$  处的峰为甲基的不对称伸缩振动峰,  $1739\text{ cm}^{-1}$  处的峰为来源于甲基丙烯酸十八烷基酯的酯基的对称伸缩振动峰,  $1252\text{ cm}^{-1}$  处的峰为  $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$  的伸缩振动峰,  $1640\text{ cm}^{-1}$  处的峰为碳-碳双键的伸缩振动峰。这说明甲基丙烯酸十八烷基酯与含氢硅油发生了加成反应, 即通过硅氢加成反应将甲基丙烯酸十八烷基酯连接在硅橡胶的主链上。

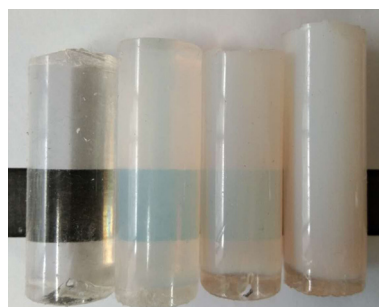
## 2.2 硅橡胶的透明性

分别添加二甲基硅油和甲基丙烯酸十八烷基酯的外增塑型硅橡胶和内增塑型硅橡胶的形貌如图2所示。

从图2可以看出: 添加不同质量分数的二甲基硅油的外增塑型硅橡胶均呈现透明状态; 甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数为0.10的内增塑型硅橡胶呈半透明状态, 甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数为0.20, 0.30和0.40的内增塑型硅橡胶呈现出乳白色, 且随着甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数的增大, 乳白色逐渐加深。分析认为: 对于添加外增塑剂二甲基硅油的硅橡胶, 由于二甲基硅油分子长链与硅橡胶分子长链相容性较好, 因此二甲



(a) 外增塑型硅橡胶 (从左到右二甲基硅油质量分数依次为0.10, 0.20, 0.30和0.40)



(b) 内增塑型硅橡胶 (从左到右甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数依次为0.10, 0.20, 0.30和0.40)

图2 增塑剂对硅橡胶透明性的影响

基硅油的加入对硅橡胶的折光率影响较小, 硅橡胶始终呈透明状态; 对于添加内增塑剂甲基丙烯酸十八烷基酯的硅橡胶, 由于甲基丙烯酸十八烷基酯的烷基长链与硅橡胶的分子长链之间相容性较低, 在甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数较小时, 其对硅橡胶的折光率影响不明显, 硅橡胶呈透明状, 但随着甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数的增大, 体系中甲基丙烯酸十八烷基酯的烷基长链聚集, 形成烷基相分离现象, 产生光散射质点, 使硅橡胶变白而透明性降低, 且随着甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数的增大, 硅橡胶的透明性逐渐变差。

## 2.3 硅橡胶的力学性能

### 2.3.1 $A$ 及 $\omega$ 的影响

反应体系中  $A$  和  $\omega$  都会影响硅橡胶的力学性能。图3和4分别示出了  $A$  和  $\omega$  对硅橡胶应力-应变关系曲线的影响。

从图3和4可以看出, 压缩模式下应变为负数, 硅橡胶的应力-应变关系曲线趋势大致相同, 即低压压缩应变条件下, 随着应变绝对值的增大, 应力逐渐增大, 而当应变绝对值增大到一定值时, 应力随

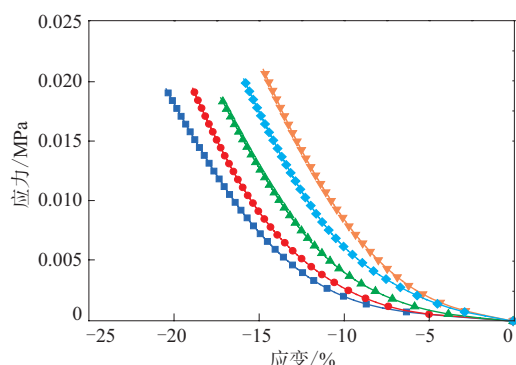


图3  $A$  ( $\omega=0.0036$ ) 对硅橡胶应力-应变关系曲线的影响

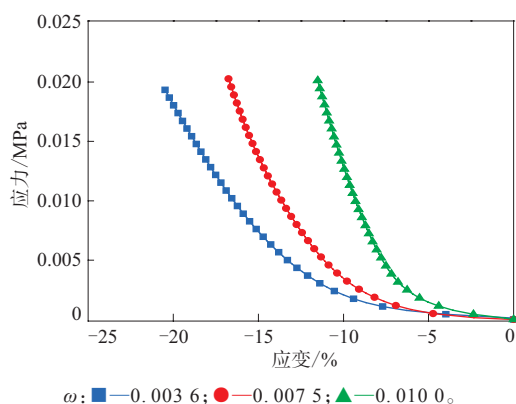


图4  $\omega$  ( $A=1.05$ ) 对硅橡胶应力-应变关系曲线的影响  
随着应变的增大急剧增大。这可能是由于在低压缩应变下,应力与应变绝对值呈正相关,应力随着应变绝对值的增大而缓慢增大,当压缩应变增大到一定值,硅橡胶分子链发生取向排列,硅橡胶发生压缩硬化,应力则随着应变绝对值的增大而急剧增大。

硅橡胶应力-应变关系曲线的斜率绝对值即为硅橡胶的压缩模量。从图3可以看出,当 $\omega$ 一定时,随着 $A$ 的增大,硅橡胶的压缩模量先增大后减小,当 $A=1.50$ 时,压缩模量达到最大值。原因可能为当 $A$ 较小时,含氢硅油的加入量小,使得硅橡胶的交联度低,硫化不完全;随着 $A$ 的增大,含氢硅油的加入量增大,硅橡胶的交联密度增大,因此压缩模量增大;当 $A$ 增大到1.50时,硅橡胶的交联密度达到最大,硫化充分;随着 $A$ 继续增大,含氢硅油过量,未反应的含氢硅油起溶胀作用,增加了硅橡胶分子链的移动性,使硅橡胶的压缩模量减小,硅橡胶变得柔软。

从图4可以看出,当 $A$ 一定时,随着 $\omega$ 的增大,硅橡胶的压缩模量随之增大。这是由于随着 $\omega$ 的增大,含氢硅油分子链中Si—H基团的密度变大,使得硅橡胶的交联密度增大,从而增大了硅橡胶的压缩模量,硅橡胶变硬<sup>[5-6]</sup>。

### 2.3.2 增塑剂的影响

图5示出了二甲基硅油质量分数对外增塑型硅橡胶应力-应变关系曲线的影响。

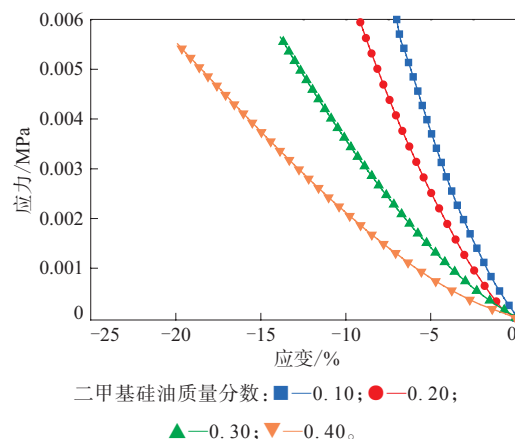


图5 二甲基硅油质量分数对外增塑型硅橡胶应力-应变关系曲线的影响

从图5可以看出,随着二甲基硅油质量分数从0.10增至0.40,外增塑型硅橡胶的压缩模量逐渐减小,说明二甲基硅油的加入可以使硅橡胶的压缩模量减小,起到了明显的增塑作用。

二甲基硅油作为非反应型添加剂掺入硅橡胶体系中,其本身不参与反应的进行,当反应温度升高时,乙烯基硅油与含氢硅油发生硅氢化反应形成交联体系,而二甲基硅油则在体系内形成固溶体,主要起溶胀作用,增大了硅橡胶分子链间的距离,减小了其间的相互作用力,从而增加了硅橡胶分子链的移动性,使得硅橡胶的柔性增加,压缩模量减小<sup>[7]</sup>。在一定范围内,二甲基硅油质量分数越大,硅橡胶的压缩模量越小,制备的硅橡胶越柔软。

图6示出了甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数对内增塑型硅橡胶应力-应变关系曲线的影响。

从图6可以看出,随着甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数的增大,内增塑型硅橡胶的压缩模量逐渐减小,尤其对于甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数为0.40的内增塑型硅橡胶,其压缩模量小于1。



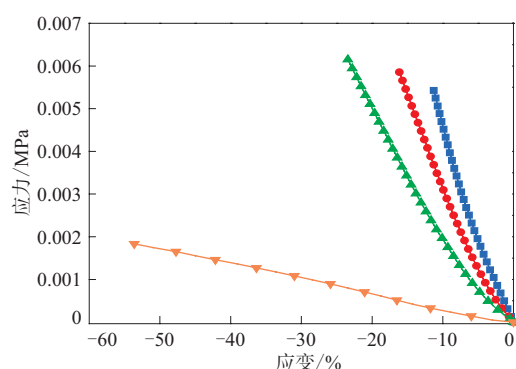


图6 甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数对内增塑型硅橡胶应力-应变关系曲线的影响

表4示出了二甲基硅油和甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数对外增塑型和内增塑型硅橡胶压缩模量的影响。

表4示出了二甲基硅油和甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数对外增塑型和内增塑型硅橡胶压缩模量的影响。

表4 增塑剂对硅橡胶压缩模量的影响  $10^4 \text{ MPa}$

| 增塑剂类型      | 增塑剂质量分数 |         |         |         |
|------------|---------|---------|---------|---------|
|            | 0.10    | 0.20    | 0.30    | 0.40    |
| 二甲基硅油      | 5.815 9 | 4.301 6 | 2.987 8 | 2.009 8 |
| 甲基丙烯酸十八烷基酯 | 3.793 9 | 2.725 4 | 1.918 6 | 0.442 7 |

从表4可以看出,在同等质量分数下,内增塑剂能够更明显降低硅橡胶的压缩模量,使硅橡胶表现出更高柔性,因此内增塑剂的增塑效果明显优于外增塑剂。

内增塑剂甲基丙烯酸十八烷基酯部分替代了乙烯基硅油后,其碳-碳双键与含氢硅油中的活性氢发生了加成反应,甲基丙烯酸十八烷基酯与硅橡胶分子链具有稳定的化学结合,降低了硅橡胶分子链的交联密度,从而使硅橡胶塑性增大,压缩模量减小,随着甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数的增大,硅橡胶的压缩模量随之逐渐减小。

## 2.4 硅橡胶的耐溶剂性能

图7示出了二甲基硅油对经甲苯溶剂处理的外增塑型硅橡胶应力-应变关系曲线的影响。

从图7可以看出,二甲基硅油质量分数为0.1~0.4的外增塑型硅橡胶经过甲苯处理后,其应力-应变曲线均发生了明显的偏移,曲线的初始斜率都明显增大,即外增塑型硅橡胶经甲苯处理后其压缩模量都比未处理的有所增大。分析认为,二甲基硅油分子与硅橡胶分子之间作用力较

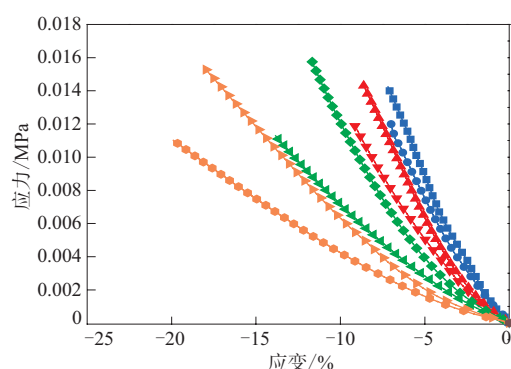


图7 二甲基硅油对经甲苯处理的外增塑型硅橡胶应力-应变关系曲线的影响

小,二甲基硅油极易被甲苯抽出而导致增塑作用被削弱,从而使得硅橡胶的压缩模量增大,说明外增塑型硅橡胶的耐溶剂性能较差。

图8示出了甲基丙烯酸十八烷基酯对经甲苯溶剂处理的内增塑型硅橡胶应力-应变关系曲线的影响。

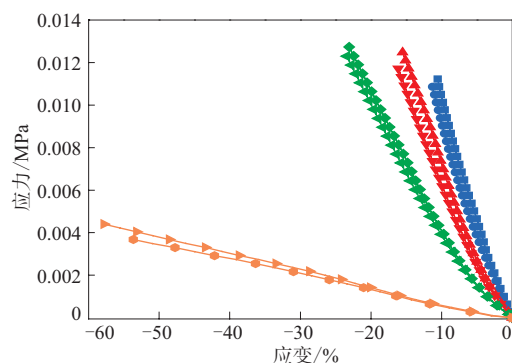


图8 甲基丙烯酸十八烷基酯对经甲苯处理内增塑型硅橡胶应力-应变关系曲线的影响

从图8可以看出,甲基丙烯酸十八烷基酯质量分数为0.1~0.4的内增塑型硅橡胶在经过甲苯处理后,其应力-应变关系曲线发生了微小的偏移,而曲线初始阶段的斜率几乎未发生变化,即压缩模量未发生改变。分析认为,甲基丙烯酸十八烷基酯参与体系的化学反应,由于甲基丙烯酸十八烷基酯与硅橡胶分子之间形成了化学键的结合,

故体系有较好的稳定性,甲基丙烯酸十八烷基酯不易被溶剂抽出,故甲苯处理对内增塑型硅橡胶的压缩模量影响很小,这说明内增塑型硅橡胶具有较高的耐溶剂性能。

图9示出了增塑型硅橡胶内部交联网络结构。

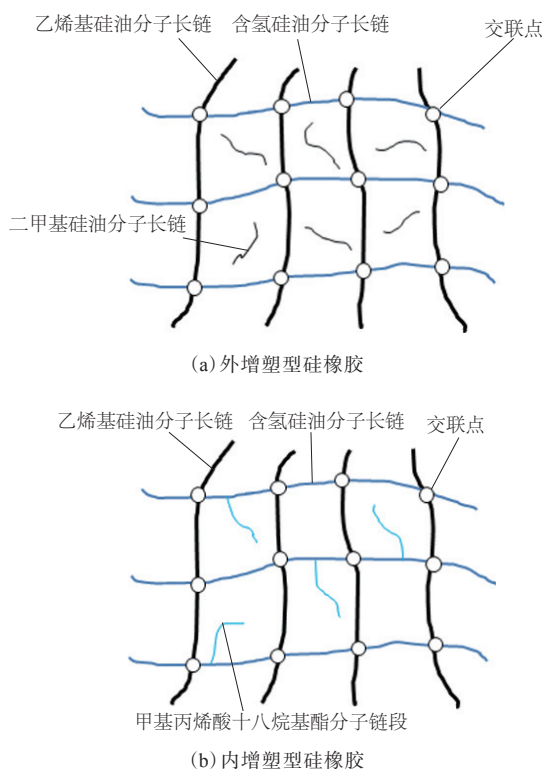


图9 增塑型硅橡胶内部交联网络结构

从图9可以看出:外增塑型硅橡胶内部二甲基硅油分子长链分布在硅橡胶交联网络中,与交联网络结构依靠分子间作用力结合,因此二甲基硅油易被溶剂抽提,外增塑型硅橡胶的耐溶剂性能较差。在内增塑型硅橡胶中,甲基丙烯酸十八烷基酯分子与硅橡胶分子通过化学键结合,因此甲基丙烯酸十八烷基酯不易被溶剂抽提,内增塑型硅橡胶的耐溶剂性能较好。

### 3 结论

(1) 添加二甲基硅油的外增塑型硅橡胶呈透明状态,添加丙烯酸十八烷基酯的内增塑型硅橡胶呈乳白色,且随着丙烯酸十八烷基酯质量分数的加大,内增塑型硅橡胶的颜色逐渐加深。

(2) 未添加增塑剂的硅橡胶的压缩模量与 $A$ 和 $\omega$ 有关,随着 $A$ 的增大先增大后减小,随着 $\omega$ 的增大而增大,在 $A=1.50$ , $\omega=0.010\ 0$ 时,硅橡胶的压缩模量最大。

(3) 内外增塑剂都能够使硅橡胶的塑性增大,压缩模量减小,且随着增塑剂用量的增大,增塑效果越明显,在添加同等质量分数的情况下,内增塑剂的增塑效果优于外增塑剂。

(4) 内增塑型硅橡胶的耐溶剂性能明显优于外增塑型硅橡胶。

(5) 当 $A=1.05$ , $\omega=0.003\ 6$ ,内增塑剂质量分数为 $0.40$ 时,可以制得具有高柔性及优良耐溶剂性能的硅橡胶。

### 参考文献:

- [1] 雷卫华,朱敬芝,许冰.加成型液体硅橡胶的流动性及结构性能的研究[J].材料导报,2015(12):89-95.
- [2] 幸松民,王一璐.有机硅合成工艺及产品应用[M].北京:化学工业出版社,2000:138-150.
- [3] Tian T F, Li W H, Ding J, et al. Study of Shear-stiffened Elastomers[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21 (12): 125009-125015.
- [4] 赵家鑫,关瑞芳,胡格,等.超支化硅油的合成及其对苯基硅橡胶性能的影响[J].橡胶工业,2019,66(9):643-649.
- [5] 赵翠峰,蒋立纯,贺攀,等.加成型室温硫化硅橡胶力学特性的影响规律[J].有机硅材料,2011(5):314-317.
- [6] 李志超.交联剂对高强度加成型液体硅橡胶性能的影响[J].当代化工研究,2015(1):51-52.
- [7] 崔小明.增塑剂在橡胶领域中的应用研究进展[J].增塑剂,2012(3):18-21.

收稿日期:2020-01-18

## Development of Silicone Rubber with High Flexibility and Solvent Resistance

YIN Xiaolong, DING Mengru, JIANG Shanshan, MIN Jie

(Donghua University, Shanghai 201600, China)

**Abstract:** The addition-cure type liquid silicone rubber was prepared by using vinyl polydimethylsiloxane as basic polymer, hydride functional polydimethylsiloxane as crosslinking agent

and isopropanol coordinated chloroplatinic acid as catalyst. The effects of the molar ratio ( $A$ ) of Si—H in hydride functional polydimethylsiloxane to Si—Vi (vinyl group) in vinyl polydimethylsiloxane and the active hydrogen content in hydride functional polydimethylsiloxane ( $\omega$ ) on the mechanical properties of silicone rubber were studied. The influence of the type and amount of plasticizer on the mechanical properties and solvent resistance of silicone rubber was also investigated, and two plasticizers were studied: external plasticizer dimethyl polydimethylsiloxane and internal plasticizer octadecyl methacrylate. The results showed that, the compression modulus of silicone rubber increased first and then decreased with the increase of  $A$ , and it increased with the increase of  $\omega$ . When  $A = 1.50$ , and  $\omega = 0.010\ 0$ , the compression modulus was high. The compression modulus of silicone rubber decreased with the increase of the mass fraction of plasticizer. At the same mass fraction, the plasticizing effect of internal plasticizer was better than that of external plasticizer, and the solvent resistance of the silicone rubber with internal plasticizer was better than that with external plasticizer. When  $A = 1.05$ ,  $\omega = 0.003\ 6$ , and the mass fraction of internal plasticizer was  $0.40$ , silicone rubber possessed high flexibility and good solvent resistance.

**Key words:** silicone rubber; vinyl polydimethylsiloxane; hydride functional polydimethylsiloxane; plasticizer; mechanical property; compression modulus; solvent resistance

### 五峰山长江大桥主缆穿上北橡院防腐“外衣”

中央广播电视总台在2020年5月2日上午的《劳动最光荣 奋斗最幸福》5·1特别节目和下午的《新闻直播间》节目两次播出了五峰山长江大桥主缆防腐施工的特别报道。

五峰山长江大桥是我国首座公路和铁路两用悬索桥,北主塔高达203 m,相当于70层楼房高,主缆直径为1.3 m,在同类桥梁中其主缆最粗,由44 000多根钢丝组成,长度为1.9 km,可提供的拉力达9万t,是桥梁非常重要的荷载部件,设计使用寿命为100年。为了让主缆顺利服役,达到100年的使用期,防腐作业非常重要。

五峰山长江大桥银色的主缆防腐“外衣”采用北京橡胶工业研究设计院有限公司(简称北橡院)具有国际先进水平的主缆专用高性能、长寿命特种复合橡胶弹性体缠包带,其缠绕在主缆悬索外部,密闭保护主缆,避免主缆腐蚀,协同主缆主动除湿系统,共同完成对主缆的密封保护,能够较大幅度延长主缆使用寿命,减少后期维护成本。

受新冠肺炎疫情影响,在全面落实联防联控各项措施的前提下,五峰山长江大桥建设工程于2020年2月25日全面复工。北橡院工程技术人员克服多种困难,同步参与复工。因该桥使用工况恶劣,日晒程度高,对缠包带性能要求很高。在疫情期间,北橡院积极安排技术人员进行产品升级

和生产,按质按量进行材料供应。主缆防腐施工计划于5月18日完工,以确保五峰山长江大桥总体施工进度。

主缆是悬索桥的生命线,主缆的安危直接关系到悬索桥的使用寿命和交通控制节点的安全运行,关系到百姓民生和国家安全。北橡院科研人员从2015年开始研发这种具有自主知识产权的主缆缠包带防腐防护成套技术,其系列产品有多种规格型号,可满足各种悬索桥主缆的动态力学性能要求,以及产品色牢度和美观性等应用要求,适用于不同直径的悬索桥主缆,具有良好的弹性适应能力和优异的耐老化性。该项技术达到了世界先进水平,曾荣获2019年中国非金属矿工业协会科技进步二等奖。其系列产品已在国内7座悬索桥主缆防护工程中应用,这7座桥中跨度超过1 000 m的大型悬索桥有3座。其中有世界第二、中国第一的武汉杨泗港长江大桥,山地最高的赤水河大桥,以及清水河大桥等里程碑式项目。

据了解,五峰山长江大桥是“连镇铁路”关键性控制工程,大桥预计在2020年11月底建成通车。届时,连云港至南京的高铁运行时间将由目前的8 h缩短至2 h左右,连云港至上海的高铁运行时间由11 h缩短至3 h左右,扬州、镇江等地将融入上海1 h经济圈。

(本刊编辑部)