

重大工程装备

纳米 Fe_3O_4 增强硅橡胶与铁氧体的界面黏
结特性试验研究

王功起, 黄西成, 万强*

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 探究纳米 Fe_3O_4 增强硅橡胶与铁氧体的界面黏结特性。**方法** 分别开展准静态拉伸试验、界面法向和切向黏结强度试验。采用超弹性理论, 分析纳米 Fe_3O_4 增强硅橡胶材料的拉伸行为, 采用双线性和指数内聚力模型, 分析纳米 Fe_3O_4 增强与铁氧体的界面破坏行为。**结果** 通过拉伸试验获得了不同纳米 Fe_3O_4 含量的硅橡胶的工程应力应变曲线及两参数 Mooney-Rivlin 模型, 小变形范围的模型误差在 1% 以内, 大变形范围的最大误差为 3.8%。通过界面强度试验, 获得了不同纳米 Fe_3O_4 含量的硅橡胶和铁氧体界面的法向和切向力-位移曲线、黏结强度和界面断裂能, 得到了界面法向和切向黏结强度内聚力模型参数。**结论** 随着纳米 Fe_3O_4 含量增加, 硅橡胶的拉伸强度增加, 界面法向黏结强度和断裂能增大, 而切向黏结强度和断裂能变化不显著。双线性内聚力模型更适合作为纳米 Fe_3O_4 增强硅橡胶与铁氧体的界面黏结强度表征模型, 界面法向和切向黏结强度变化规律与实测值的吻合程度更高。

关键词: 纳米 Fe_3O_4 增强硅橡胶; 界面模型; 黏结强度; 超弹性; 内聚力模型

中图分类号: TJ04

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)04-0126-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.015

Experimental Investigation on Interfacial Bonding Performance between Nano- Fe_3O_4
Magnetic Particles Reinforced Silicone Rubber with Ferrite

WANG Gongqi, HUANG Xicheng, WAN Qiang*

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the interfacial bonding characteristics of nano- Fe_3O_4 reinforced silicone rubber with ferrite. Quasi-static tensile tests, interfacial normal and tangential bonding strength tests were conducted. The hyperelasticity theory was applied to analyze the tensile behavior of nano- Fe_3O_4 reinforced silicone rubber, and bilinear and exponential cohesive models were utilized to analyze the interfacial damage behavior of nano- Fe_3O_4 reinforced with ferrite. The engineering stress-strain curves of silicone rubber reinforced by nano- Fe_3O_4 particles with different content were obtained by tensile tests, and two-parameter Mooney-Rivlin model was gotten as well. The error of the model in a small deformation range was less than 1%, and that in a large deformation range was 3.8%. Through interfacial strength tests, the normal and tangential force-displacement curves,

收稿日期: 2024-02-26; 修订日期: 2024-03-25

Received: 2024-02-26; Revised: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金 (U2130206)

Fund: National Natural Science Foundation of China-NSAF Joint Fund of Chinese Academy of Engineering Physics (U2130206)

引文格式: 王功起, 黄西成, 万强. 纳米 Fe_3O_4 增强硅橡胶与铁氧体的界面黏结特性试验研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 129-134.

WANG Gongqi, HUANG Xicheng, WAN Qiang. Experimental Investigation on Interfacial Bonding Performance Between Nano- Fe_3O_4 Magnetic Particles Reinforced Silicone Rubber with Ferrite[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 126-134.

*通信作者 (Corresponding author)

the interfacial bonding strength and interfacial fracture energy, and the parameters of the interfacial cohesive model for the interface of silicone rubbers with different nano- Fe_3O_4 contents with ferrite were obtained. The experiments show that the tensile strength of silicone rubber and the interfacial normal bonding strength and fracture energy increase with nano- Fe_3O_4 content, while the tangential bonding strength and fracture energy do not depend significantly on the content. The bilinear cohesion model is more suitable for the characterization of the interfacial bonding strength of nano- Fe_3O_4 reinforced silicone rubber and ferrite, and the interfacial normal and tangential bond models are in better agreement with the measured values.

KEY WORDS: Nano- Fe_3O_4 reinforced silicone rubber; interface bonding model; bonding strength; hyperelastic; cohesive zone model

近年来, 纳米 Fe_3O_4 由于其具有颗粒粒径小、比表面积高、磁敏、超顺磁性、生物相容性和可调节性等特性, 在实际应用中越来越广泛^[1-6]。将纳米 Fe_3O_4 添加到硅橡胶基体中, 能够吸收和分散电磁辐射, 并减少电磁波的传播, 这对纳米 Fe_3O_4 增强的硅橡胶在电子设备、通信系统等领域具有重要意义。将铁氧体与纳米 Fe_3O_4 增强硅橡胶 (以下简称复合硅橡胶) 黏接制作成曲面型无遮挡传感器^[7]。然而, 纳米 Fe_3O_4 颗粒与硅橡胶基体及铁氧体等黏附体之间的界面相互作用是影响与使用性能的关键所在, 亟需开展相关研究。

关于复合材料界面黏结的力学问题, 已有不少学者在试验和理论方面进行了研究^[8-10]。王林等^[11]通过试验比较了橡胶金属件中 2 种胶黏剂在不同胶料、不同硫化体系、不同基体材质、不同表面处理方式及不同受力方式下的黏接性能。Wang 等^[12-13]研究了胶接头长度对搭接剪切强度的影响。蔡鹏^[14]通过非线性有限元方法, 对金属橡胶复合结构黏接层的破坏力学行为进行了研究, 并将试验结果和数值模拟结果进行了对比, 对黏接层的失效行为作出了相应判断。数值模拟方面, 自 1960 年 Dugdale^[15]在对穿透型裂纹的大型薄板进行拉伸测试试验时, 提出内聚力模型后, 众多学者将其应用于界面破坏问题^[16-18]。目前, 内聚力模型已广泛应用于柔性材料的动态裂纹扩展。Schwalbe^[19]对其进行了系统的总结和归纳。肖潇等^[20]利用内聚力模型和 Hashin 失效准则对胶黏剂和碳纤维增强树脂复合材料层合板进行了建模, 发现不同搭接材料将会影响搭接接头的失效过程, 胶层损伤受强度较小的搭接材料的影响较大。Alfano 等^[21-22]探究了不同内聚力本构形式在描述双悬臂梁结构断裂破坏行为时的准确性及计算收敛性, 发现在计算准确性上, 指数型更佳, 但是综合考虑, 双线性内聚力模型表现得更优异。然而, 目前对于铁氧体与复合硅橡胶黏结界面的研究还未系统展开, 适用于表征界面黏结强度的表征模型尚不明确, 还需要进行深入的研究。

基于上述问题, 为明确纳米 Fe_3O_4 颗粒含量对复合硅橡胶的力学性能及其与铁氧体界面黏结强度的影响, 本研究分析了不同含量纳米 Fe_3O_4 颗粒对硅橡胶拉伸性能的影响。以纳米 Fe_3O_4 含量为分析因素, 采

用二板法、四板法试验研究了纳米 Fe_3O_4 颗粒增强硅橡胶与铁氧体界面法向和切向的黏结强度。明确了纳米 Fe_3O_4 颗粒增强型硅橡胶的拉伸本构关系, 以及纳米 Fe_3O_4 含量对界面黏结强度的影响。确定了适用于表征界面黏结强度的表征模型, 为硅橡胶的材料组成优化及其与铁氧体的界面黏结损伤机理研究提供基础。

1 试验

1.1 复合硅橡胶制备

本文所研究的复合硅橡胶由纳米 Fe_3O_4 磁性颗粒和卡夫特 K907 硅橡胶黏接剂复合而成, 其中纳米 Fe_3O_4 的粒径为 20 nm, 黑色固体, 苏州比斯利新材料有限公司生产; 卡夫特 K907 硅橡胶黏接剂产自广东恒大新材料科技有限公司。

首先以设计比例称取纳米 Fe_3O_4 和硅橡胶黏接剂, 在室温条件下, 将二者放入搅拌器中进行搅拌混合, 搅拌速率为 2 000 r/min, 搅拌时长为 5 min。完成搅拌后, 倒入试验模具中, 通过盖板压制成型试样。拿掉盖板, 使其在室温下进行 1 d 的充分硫化处理, 脱模后得到相应的纳米 Fe_3O_4 增强硅橡胶。模具采用与硅橡胶黏接性能较差的聚四氟乙烯板制作而成。硫化处理时, 试样表面采用复合纤维纸覆盖, 保证硅橡胶能与空气充分接触硫化。

1.2 方法

1.2.1 材料准静态拉伸试验

根据 GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》^[23]进行复合硅橡胶的准静态拉伸试验, 纳米 Fe_3O_4 的质量分数分别为 0% (不含 Fe_3O_4)、10%、30%、50%。首先, 将复合硅橡胶制成标准试样, 并进行编号, 随后在万能材料试验机上进行拉伸试验, 拉伸速率为 200 mm/min, 记录试样拉伸过程中的载荷和位移, 每组试验进行 3 次平行试验。

1.2.2 界面法向黏结强度试验

先按照复合硅橡胶制备工艺制备二板法试样, 试样的直径为 40 mm, 厚度为 3 mm。然后采用卡夫特 K907 硅橡胶黏接剂将复合硅橡胶与铁氧体进行黏

接, 形成法向试验的黏接界面 (如图 1 所示), 再将铁氧体另一端用 502 胶水与夹头紧密黏接在一起, 即完成试样制备。

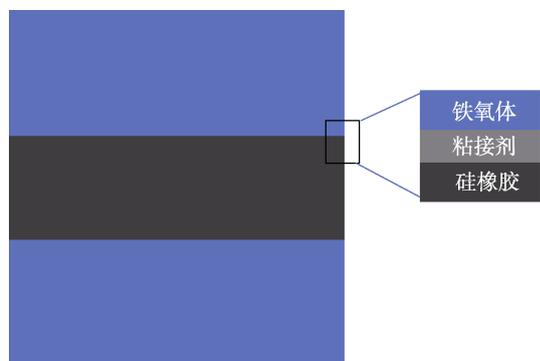


图 1 复合硅橡胶与铁氧体之间的法向试验黏结界面
Fig.1 Bonding interface between composite silicone rubber and ferrite for normal test

采用二板法测试界面法向黏接强度^[24], 在万能试验机上进行拉伸试验, 拉伸速率为 25 mm/min, 如图 2 所示。



图 2 界面法向黏结强度试验
Fig.2 Normal bonding strength test of interface

界面法向黏接强度按式 (1) 计算:

$$\sigma_n = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式中: σ_n 为法间黏接强度, MPa; F 为最大力值, MPa; S 为黏接面的面积, mm^2 。

界面断裂能按式 (2) 计算:

$$\varphi = \int \sigma d\delta \quad (2)$$

式中: σ 为黏接强度, MPa; φ 为位移, mm。

1.2.3 界面切向黏结强度试验

首先, 按照复合硅橡胶制备工艺制备试样: 复合硅橡胶试样的尺寸为 $25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 铁氧体试样尺寸为 $64 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 纳米 Fe_3O_4 的质量分数为 0%、10%、30%、50%。然后采用卡夫特 K907

硅橡胶将复合硅橡胶与铁氧体进行黏接, 形成切向试验的黏接界面, 如图 3 所示。

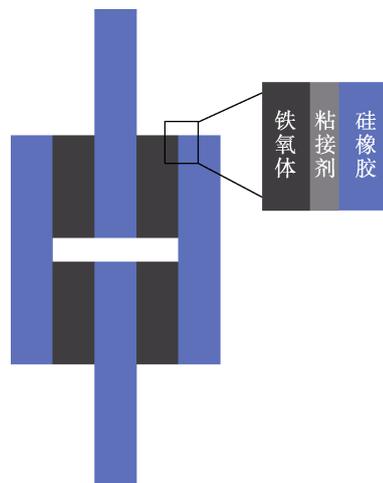


图 3 复合硅橡胶与铁氧体之间的切向试验黏结界面
Fig.3 Bonding interface between composite silicone rubber and ferrite for tangential test

采用四板剪切法^[25]测试界面的切向黏结强度, 在万能试验机上进行拉拔试验, 拉拔速率为 50 mm/min, 如图 4 所示。



图 4 界面切向黏结强度试验
Fig.4 Tangential bonding strength test of interface

界面切向黏接强度按式 (3) 计算:

$$\sigma_t = \frac{F}{2A} \quad (3)$$

式中: σ_t 为切间黏接强度, MPa; F 为最大力值, MPa; A 为一块橡胶片的单黏接面面积, mm^2 。

切向界面断裂能的计算方式与法向界面断裂能方式相同。

2 试验结果与分析

2.1 复合硅橡胶的拉伸性能分析

不同 Fe_3O_4 含量的复合硅橡胶在准静态拉伸试验下的工程应力-应变曲线如图 5 所示。由图 5 可知,

Fe₃O₄ 的质量分数从 0% 增大至 30% 时, 复合硅橡胶的断裂伸长率下降较明显, 降幅达 30%; 当 Fe₃O₄ 的质量分数为 30%~50% 时, 断裂伸长率呈相近水平。将 Fe₃O₄ 磁性颗粒掺入硅橡胶后, 其不同 Fe₃O₄ 掺量下硅橡胶的断裂强度均得到增强, 当 Fe₃O₄ 的质量分数达到 50% 时, 其断裂强度显著增强, 与不含 Fe₃O₄ 时相比, 断裂强度提高 0.7 MPa。结果表明, Fe₃O₄ 磁性颗粒对硅橡胶的断裂强度和断裂拉伸率的影响有所不同, Fe₃O₄ 磁性颗粒对硅橡胶的断裂强度具有一定的增强作用, 其断裂拉伸率随着 Fe₃O₄ 含量的增加而降低, 但当 Fe₃O₄ 的质量分数超过 30% 后, 断裂拉伸率水平相当。产生上述现象的主要原因在于, Fe₃O₄ 含量增加会导致搅拌过程中硅橡胶的流动性不好, 影响了 Fe₃O₄ 和硅橡胶间的结合, 进而影响硅橡胶复合材料的断裂伸长率, 而断裂伸长率与抗拉强度有着密切的关系, 导致材料的抗拉强度不升反降。

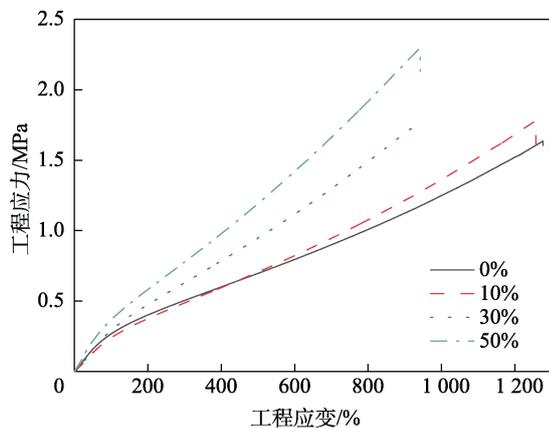


图 5 复合硅橡胶的准静态拉伸工程应力-应变曲线
Fig.5 Engineering stress-strain curves of composed silicone rubber under quasi-static tensile

采用 300% 定伸长率拉伸强度分析 Fe₃O₄ 含量对复合硅橡胶拉伸强度的影响, 结果见表 1。随着 Fe₃O₄ 含量的增加, 复合硅橡胶的 300% 定伸长率拉伸强度呈线性增强趋势, 线性相关系数达到 0.96, 表明 Fe₃O₄ 含量与拉伸强度的线性关系良好。由此可知, 纳米 Fe₃O₄ 磁性颗粒对硅橡胶的拉伸强度具有增强效应。

表 1 复合硅橡胶的定伸长率拉伸强度

Tab.1 Stretching strength of composed silicone rubber at constant elongation

Fe ₃ O ₄ 质量分数/%	300%定伸长率拉伸强度/MPa
0	0.50
10	0.51
30	0.63
50	0.75

2.2 界面法向黏结强度分析

4 种纳米 Fe₃O₄ 含量下, 复合硅橡胶的界面法向

应力-位移曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 复合硅橡胶与铁氧体的黏结界面在法向拉伸作用下, 总体可分为 3 个阶段: 第一阶段是线弹性阶段, 此阶段相对较短; 第二阶段是线弹性屈服点到塑性强化点, 此阶段相对较长, 且呈凸形增长; 第三阶段是从塑性弱化点到完全断裂, 此阶段历时较短。总体来说, 黏接层的力位移曲线大致呈上升阶段和下降阶段, 上升阶段比较平缓, 下降阶段呈瞬时跌落状。考察 4 种纳米 Fe₃O₄ 含量的复合硅橡胶所能承受的最大法向荷载可以发现, 随着纳米 Fe₃O₄ 含量的增加, 所能承受的最大法向荷载也随之增大。不同含量的纳米 Fe₃O₄ 在此方面的影响差异显著, 说明纳米 Fe₃O₄ 能增强界面的法向黏结强度。

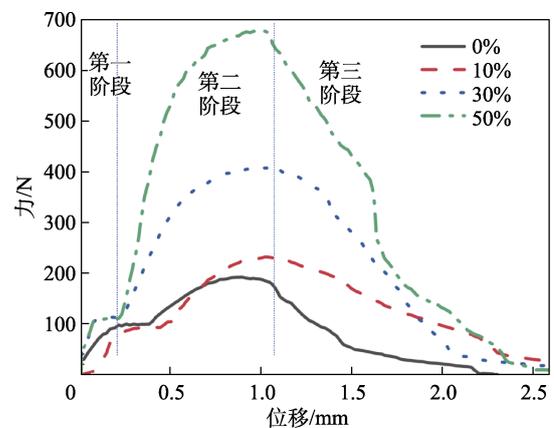


图 6 复合硅橡胶与铁氧体的界面法向力-位移曲线
Fig.6 Normal force-displacement curve of interface between composed silicone rubber and ferrite

二板法试验破坏后的典型界面破坏现象如图 7 所示。界面间法向破坏主要是橡胶和铁氧体界面间的破坏, 仅少量表现为硅橡胶破坏, 界面间法向破坏的面积占界面总面积的 85% 以上。进一步, 计算不同纳米 Fe₃O₄ 含量下复合硅橡胶与铁氧体的界面法向黏结强度和界面断裂能, 结果见表 2。由表 2 可知, 随着 Fe₃O₄ 含量的增加, 界面法向黏结强度和界面断裂能均呈现增大的变化趋势。



图 7 复合硅橡胶与铁氧体的界面法向破坏现象
Fig.7 Phenomenon of normal interface failure between composite silicone rubber and ferrite

表2 不同 Fe₃O₄ 含量下界面法向黏结强度和界面断裂能
Tab.2 Normal bonding strength and fracture energy of interface with different Fe₃O₄ content

Fe ₃ O ₄ 质量分数/%	界面法向黏结强度/MPa	界面断裂能/(mJ·mm ⁻²)
0	0.153	0.461
10	0.183	0.526
30	0.326	0.612
50	0.541	0.753

表3 不同 Fe₃O₄ 含量下界面切向黏结强度和界面断裂能
Tab.3 Tangential bonding strength and fracture energy of interface with different Fe₃O₄ content

Fe ₃ O ₄ 质量分数/%	界面法向黏结强度/MPa	界面断裂能/(mJ·mm ⁻²)
0	0.078	0.378
10	0.096	0.413
30	0.101	0.493
50	0.109	0.525

2.3 界面切向黏结强度分析

4 种 Fe₃O₄ 含量下, 复合硅橡胶的界面切向黏结试验的应力-位移曲线如图 8 所示。界面切向黏结的应力-位移曲线呈相似的变化规律, 曲线基本也可以分为 3 个阶段: 第一阶段是线弹性阶段, 与法向不同的是, 切向黏结的线弹性阶段相对较长; 第二阶段是线弹性屈服点到塑性强化点; 第三阶段是从塑性弱化点到完全断裂, 与法向黏结不同的是, 此阶段呈现台阶式下降, 从开始塑性弱化至完全破坏经历了多个台阶。界面切向黏结的应变-位移曲线特征与四板法直接相关, 采用四板法时, 复合硅橡胶与铁氧体共有 8 个接触面, 不同界面之间的破坏并不同步, 故而在塑性弱化至完全破坏的阶段呈现多个台阶。

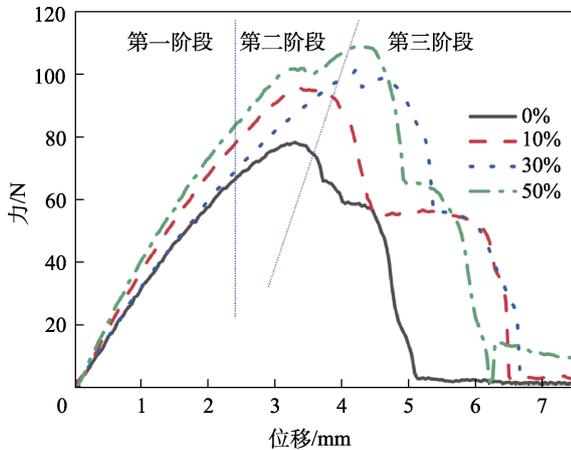


图8 复合硅橡胶与铁氧体的界面切向力-位移曲线
Fig.8 Tangential force-displacement curve of interface between composed silicone rubber and ferrite

考察 4 种纳米 Fe₃O₄ 含量的应力-位移曲线, 随着纳米 Fe₃O₄ 含量的增加, 所能承受的最大切向荷载缓慢增加, 与法向相比并不显著。进一步计算界面切向黏结强度和界面断裂能, 结果见表 3。对比不同 Fe₃O₄ 含量下的界面切向黏结强度和界面断裂能, 进行磁性颗粒增强后, 硅橡胶与铁氧体的界面切向黏结强度和界面断裂能均有所增强, 界面切向黏结强度最大差值为 0.021 MPa, 界面断裂能的最大差值为 0.147 mJ/mm²。

3 复合硅橡胶的本构关系

超弹性力学研究中使用最为广泛是 Mooney-Rivlin 模型, 此模型相对简单, 能描述大部分橡胶力学行为, 其应变能密度表达式^[26]为:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^M \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (4)$$

式中: W 为应变能; I_1 为第一应变偏量不变量; I_2 为第二应变偏量不变量; C_{ij} 为待定力学性能常数; D_i 为材料不可压缩性参数; J 为体积比。

一般根据阶数高低, 常见的 Mooney-Rivlin 模型有 4 种: 两参数、三参数、五参数和九参数应变能模型。根据复合硅橡胶在准静定拉伸试验下的应力应变曲线特征 (如图 5 所示), 曲线在上升过程中不存在拐点, 将其视为单曲线, 故本研究采用两参数模型作为的复合硅橡胶拉伸的本构模型, 其表达式为:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + \frac{1}{D} (J - 1)^2 \quad (5)$$

进一步, 式 (5) 中的待定系数可表示为:

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = C_{10} \quad (6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = C_{01} \quad (7)$$

将式 (6) 和 (7) 代入式 (5), 可得名义应力-应变的关系:

$$S_{11} = 2C_{10} \left[(1 + \varepsilon_{11}) - \frac{1}{(1 + \varepsilon_{11})^2} \right] + 2C_{01} \left[1 - \frac{1}{(1 + \varepsilon_{11})^3} \right] \quad (8)$$

式中: S_{11} 为名义第一主应力; ε_{11} 为名义第一主应变。

采用两参数 Mooney-Rivlin 模型, 根据 2.1 节准静定拉伸试验下的应力应变曲线, 通过曲线拟合方法, 可得到复合硅橡胶拉伸状态下的本构模型参数, 结果见表 4。当采用 Mooney-Rivlin 模型时, 模型参数须满足特定的正定性要求, 两参数模型需满足 $C_{10} + C_{01} > 0$ 。由结果可知, 两参数 Mooney-Rivlin 模型描述不同纳米 Fe₃O₄ 含量下复合硅橡胶的拉伸特性时, 能满足正定性要求, 且参数拟合的相关系数均大于 0.93。

表 4 复合硅橡胶拉伸状态下的本构模型参数
Tab.4 Constitutive model parameters of composed silicone rubber under tensile

数据结果	工程应变/ %	工程应力/MPa			
		0%	10%	30%	50%
试验结果	100	0.268	0.240	0.289	0.368
	200	0.402	0.390	0.472	0.583
	300	0.505	0.510	0.628	0.778
	400	0.601	0.625	0.783	0.980
	500	0.697	0.742	0.944	1.192
参数拟合结果	C ₀₁	0.294	0.168	-0.176	-0.210
	C ₁₀	0.546	0.596	0.840	0.880
	C ₁₀ +C ₀₁	0.840	0.764	0.664	0.670
	A _{dj} -R ²	0.934	0.963	0.946	0.932

利用表 4 中两数 Mooney-Rivlin 模型拟合 10% 复合硅橡胶的拉伸试验曲线, 结果如图 9 所示。对比试验结果和模型拟合结果, 在小应变范围内, 两者能很好地吻合, 误差在 1% 以内; 在大变形范围误差较大, 最大误差为 3.8%。由此可知, 两参数 Mooney-Rivlin 模型能够很好地描述复合硅橡胶的拉伸力学行为。

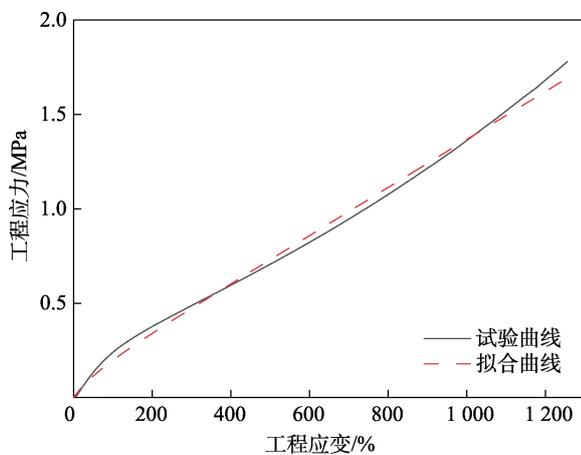


图 9 两参数 Mooney-Rivlin 模型拟合复合硅橡胶拉伸曲线
Fig.9 Two-parameter Mooney Rivlin model fit curve of composed silicone rubber under tensile

4 复合硅橡胶与铁氧体的界面内聚力模型

4.1 内聚力模型理论

内聚力模型反映了内聚区界面牵引力与张开位移之间的本构关系 (Traction Separation Law, TSL), 常用的内聚力模型为双线性模型和指数型模型^[19], 如图 10 所示。

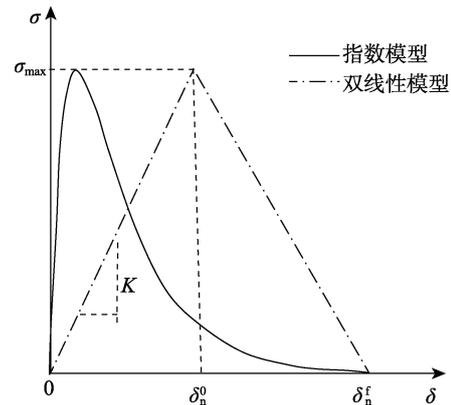


图 10 典型内聚力模型
Fig.10 Typical cohesive zone model

根据文献[19], 存在法向或切向分离位移的双线性内聚力模型的本构关系表达式为:

$$T_n = \begin{cases} \sigma_{\max} \frac{\delta_n}{\delta_n^0} & (0 \leq \delta_n \leq \delta_n^0) \\ \sigma_{\max} \frac{\delta_n^f - \delta_n}{\delta_n^f - \delta_n^0} & (\delta_n^0 \leq \delta_n \leq \delta_n^f) \end{cases} \quad (9)$$

$$T_t = \begin{cases} \tau_{\max} \frac{\delta_t}{\delta_t^0} & (0 \leq \delta_t \leq \delta_t^0) \\ \tau_{\max} \frac{\delta_t^f - \delta_t}{\delta_t^f - \delta_t^0} & (\delta_t^0 \leq \delta_t \leq \delta_t^f) \end{cases} \quad (10)$$

式中: T_n 、 T_t 分别为法向和切向的应力值; σ_{\max} 、 τ_{\max} 分别为法向和切向最大应力值; δ_n 、 δ_t 分别为界面法向和切向的相对位移; δ_n^0 、 δ_t^0 分别为界面损伤起始相对位移; δ_n^f 、 δ_t^f 分别为界面失效相对位移。

图 10 中, K 为界面刚度, 其大小为 $K = \sigma / \delta^0$, σ 为界面强度; G 为界面断裂能, 其大小为 $G = \sigma \delta^f / 2$ 。结合图 10 及式 (9)、(10) 可知, 当 $0 \leq \delta_n^{\max} \leq \delta_n^0$ 时, 为双线性内聚力模型的无损线弹性阶段, 当 $\delta_n^0 \leq \delta_n^{\max} \leq \delta_n^f$ 时, 为损伤演化阶段。

根据文献[19], 存在法向或切向分离位移的指数型内聚力模型的本构关系表达式:

$$T_n = \frac{G}{\delta_n} \left(\frac{\delta}{\delta_n} \right) \exp \left(-\frac{\delta}{\delta_n} \right) \quad (11)$$

$$T_t = \frac{G}{\delta_t} \left(\frac{\delta}{\delta_t} \right) \exp \left(-\frac{\delta}{\delta_t} \right) \quad (12)$$

对于双线性内聚力模型, 式 (11) 和 (12) 中的损伤起始临界应力 σ_{\max} 、损伤起始临界位移 δ^0 以及失效位移 δ^f 可通过界面黏结试验获取。同理, 对于指数型内聚力模型, 式 (11) 和 (12) 中的界面断裂能 G 、损伤起始临界应力 σ_{\max} 可通过界面黏结试验获取。因此, 可实现构建界面法向和切向的双线性内聚力模型和指数型内聚力模型。

在三维界面模型中,针对各个方向上分离位移之间的耦合关系,对双线性内聚力模型混合模式下的等效分离位移进行如下定义:

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_{shear}^2} \quad (13)$$

式中: $\langle x \rangle = \frac{x+|x|}{2}$, 即当 $x \geq 0$ 时, $\langle x \rangle = x$, 当 $x < 0$ 时, $\langle x \rangle = 0$; $\langle \delta_n \rangle$ 表示法向压力对混合模式下的等效分离位移不产生影响; δ_m 为混合模式下的等效分离位移; δ_{shear} 为等效切向分离位移, 对于二维情况, $\delta_{shear} = \delta_s$, 对于三维情况, $\delta_{shear} = \sqrt{\delta_s^2 + \delta_t^2}$ 。

4.2 内聚力模型分析

以纳米 Fe_3O_4 质量分数 10% 为例, 采用式 (9) ~ (12) 作为复合硅橡胶与铁氧体界面法向和切向的双线性和指数型内聚力模型, 计算结果与试验测试结果如图 11 所示。可以看出, 双线性内聚力模型的计算值与界面法向和切向黏结强度实测曲线的吻合程度更高, 而指数型内聚力模型仅在黏结强度最大应力处具有较高的一致性。相较于实测值, 指数型模型计算值整体在相同应力时, 分离位移小于实测值, 且在无损线弹性阶段和损伤演化阶段的描述均存在较大的差异。

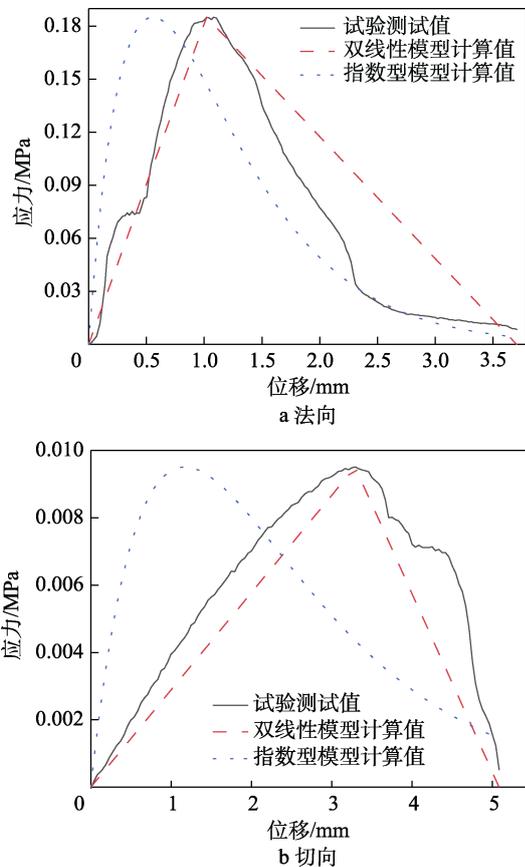


图 11 界面法向和切向黏结强度的 TSL 图
Fig.11 TSL diagram of interface normal and tangential bonding strength: a) normal; b) tangential

图 11 直观展示了内聚力模型计算值和试验实测值之间的关系, 但无法客观描述不同内聚力模型的性能, 故采用均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 和平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 对 2 种模型的性能进行评估, 表达式如式 (14) 和 (15) 所示。采用 MSE 来衡量模型的整体性能, 采用 MAE 来衡量偏差的绝对值。MSE 和 MAE 的值越小, 表明模型的贴合度越高、预测精度和准确性越高。

$$\eta_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{is} - y_{ic})^2 \quad (14)$$

$$\eta_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{is} - y_{ic}| \quad (15)$$

4 种 Fe_3O_4 含量下双线性和指数型内聚力模型的性能评估结果如图 12 所示。可以看出, 双线性内聚力模型表征法向和切向黏结强度的性能最优, 不同 Fe_3O_4 含量下法向黏结强度模型的性能最优, 不同 Fe_3O_4 含量下法向黏结强度模型的 MSE 和 MAE 均值分别为 9.67×10^{-4} 和 154.13×10^{-4} , 法向黏结强度模型的性能最优, 不同 Fe_3O_4 含量下法向黏结强度模型的 MSE 和 MAE 均值分别为 0.23×10^{-4} 和 39.8×10^{-4} 。相比之下, 指数型内聚力模型表征法向和切向黏结强度的评估指标 MSE 和 MAE 均较大, 表明指数型模型的性能相对较差。然而, 在分析中发现, 双线性内聚力模型的精确度与损伤演化阶段的失效位移选择有较大关系, 合理的失效位移值直接影响失效阶段表述的精度。

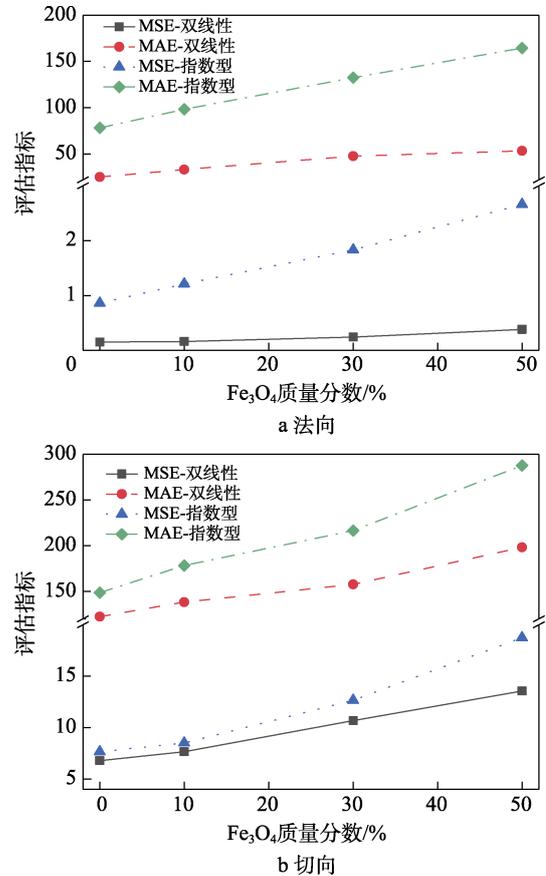


图 12 界面法向和切向黏结强度内聚力模型评估
Fig.12 Evaluation of interface normal and tangential cohesive model: a) normal; b) tangential

5 结论

本文通过对复合硅橡胶的准静态拉伸以及与PC95铁氧体的界面试验得到以下结论:

1) 随着纳米 Fe₃O₄ 含量的增加, 硅橡胶的拉伸强度增加, 300%定伸长率下的拉伸强度与 Fe₃O₄ 含量近似呈线性相关。

2) 采用两参数 Mooney-Rivlin 模型拟合不同纳米 Fe₃O₄ 含量下复合硅橡胶的拉伸试验曲线, 在小应变范围内, 拟合结果能够很好地吻合试验结果, 可将两参数 Mooney-Rivlin 模型作为复合硅橡胶材料的拉伸本构模型。

3) 界面法向最大荷载和界面断裂能随纳米 Fe₃O₄ 含量的增加而增大, 纳米 Fe₃O₄ 含量对界面的切向黏结强度和断裂能影响不显著。

4) 对比双线性和指数型内聚力模型作为复合硅橡胶与铁氧体的界面黏结强度表征模型, 双线性内聚力模型计算的界面法向和切向黏结强度变化规律与实测值的吻合程度更高, 适合作为复合硅橡胶与铁氧体的界面内聚力模型。

参考文献:

- [1] HUANG H H, ZHANG Z M, LI G K. A Review of Magnetic Nanoparticle-Based Surface-Enhanced Raman Scattering Substrates for Bioanalysis: Morphology, Function and Detection Application[J]. *Biosensors*, 2022, 13(1): 30-30.
- [2] KHIZAR S, ELKALLA E, ZINE N, et al. Magnetic Nanoparticles: Multifunctional Tool for Cancer Therapy[J]. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 2023, 20(2): 189-204.
- [3] GHOSAL K, CHATTERJEE S, THOMAS S, et al. A Detailed Review on Synthesis, Functionalization, Application, Challenges, and Current Status of Magnetic Nanoparticles in the Field of Drug Delivery and Gene Delivery System[J]. *AAPS PharmSciTech*, 2022, 24(1): 25.
- [4] HU C G, MOU Z Y, LU G W, et al. 3D Graphene-Fe₃O₄ Nanocomposites with High-Performance Microwave Absorption[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 15(31): 13038.
- [5] 安静, 何峻, 赵栋梁, 等. Fe₃O₄ 纳米颗粒的溶剂热法制备及电磁特性研究[J]. *功能材料*, 2013, 44(14): 2047-2050.
AN J, HE J, ZHAO D L, et al. Polyol-Based Synthesis of Fe₃O₄ Nanoparticles and Their Microwave Absorption Properties[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(14): 2047-2050.
- [6] LIN X H, JI G B, LIU Y S, et al. Formation Mechanism and Magnetic Properties of Hollow Fe₃O₄ Nanospheres Synthesized without any Surfactant[J]. *CrystEngComm*, 2012, 14(24): 8658.
- [7] 万强, 王功起, 解社娟, 等. 复杂结构的涡流红外曲面造型无遮挡传感器及缺陷评价方法: CN115015323A [P]. 2022-09-06.
WAN Q, WANG G Q, XIE S J, et al. Eddy Current Infrared Surface Unobstructed Sensor and Defect Evaluation Method Suitable for Complex Structures: CN115015323A [P]. 2022-09-06.
- [8] ZHU Z M, YANG Z R, XIA Y, et al. A Review of Debonding Behavior of Soft Material Adhesive Systems[J]. *Mechanics of Soft Materials*, 2022, 4(1): 7.
- [9] 许巍, 陈力, 张钱城, 等. 粘结界面的力学行为及其表征[J]. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42(12): 1361-1376.
XU W, CHEN L, ZHANG Q C, et al. Mechanical Behavior and Characterization of Bonding Interface[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2012, 42(12): 1361-1376.
- [10] ABDEL WAHAB M M. Fatigue in Adhesively Bonded Joints: A Review[J]. *ISRN Materials Science*, 2012, 2012: 746308.
- [11] 王林, 周承龙, 谢彦飞. 某一胶黏剂在橡胶金属件中的粘接性能研究[J]. *轨道交通装备与技术*, 2020(2): 27-29.
WANG L, ZHOU C L, XIE Y F. Research of the Binding Strength of an Adhesive Used in Rubber-Metal Component[J]. *Rail Transportation Equipment and Technology*, 2020(2): 27-29.
- [12] WANG Y C, NIAN G D, YANG X X, et al. Lap Shear of a Soft and Elastic Adhesive[J]. *Mechanics of Materials*, 2021, 158: 103845.
- [13] WANG Y C, YIN T H, SUO Z G. Polyacrylamide Hydrogels. III. Lap Shear and Peel[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2021, 150: 104348.
- [14] 蔡鹏. 金属橡胶元件粘接强度与破坏的有限元数值模拟研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017.
CAI P. The Finite Element Numerical Simulation Research of Strength and Failure for the Metal and Rubber Components[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2017.
- [15] DUGDALE D S. Yielding of Steel Sheets Containing Slits[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960, 8(2): 100-104.
- [16] 孙家啟, 纪冬梅, 唐家志. 内聚力模型在裂纹萌生及扩展中的应用[J]. *上海电力学院学报*, 2016, 32(2): 129-134.
SUN J Q, JI D M, TANG J Z. Application of Cohesive Zone Model on Crack Initiation and Propagation[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2016, 32(2): 129-134.
- [17] 赵丽滨, 龚愉, 张建宇. 纤维增强复合材料层合板分层扩展行为研究进展[J]. *航空学报*, 2019, 40(1): 522509.
ZHAO L B, GONG Y, ZHANG J Y. A Survey on Delamination Growth Behavior in Fiber Reinforced Composite Laminates[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(1): 522509.
- [18] 张泽文, 潘永智, 张天一, 等. 金属基复合材料界面与内聚力模型的研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2022, 52(3): 1-11.

- ZHANG Z W, PAN Y Z, ZHANG T Y, et al. Research Progress on Interface of Metal Matrix Composites and Cohesive Model[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2022, 52(3): 1-11.
- [19] SCHWALBE K H, SCHEIDER I, CORNEC A. Guidelines for Applying Cohesive Models to the Damage Behaviour of Engineering Materials and Structures[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [20] 肖潇, 岳涛, 张铁山. 基于内聚力模型的材料类型对胶接接头力学性能的影响[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(12): 28-37.
- XIAO X, YUE T, ZHANG T S. Effect of Material Type on Mechanical Properties of Bonded Joint Based on Cohesive Model[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(12): 28-37.
- [21] ALFANO G, CRISFIELD M A. Finite Element Interface Models for the Delamination Analysis of Laminated Composites: Mechanical and Computational Issues[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001, 50(7): 1701-1736.
- [22] ALFANO G. On the Influence of the Shape of the Interface Law on the Application of Cohesive-Zone Models[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(6): 723-730.
- [23] GB/T 528—2009, 硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定[S].
- GB/T 528—2009, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic - Determination of Tensile Stress-Strain Properties[S].
- [24] GB/T 11211—2009, 硫化橡胶或热塑性橡胶与金属粘合强度的测定 二板法[S].
- GB/T 11211—2009, Rubber Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Adhesion to Metal-Two-Plate Method [S].
- [25] GB/T 12830—2008, 硫化橡胶或热塑性橡胶 与刚性板剪切模量和粘合强度的测定 四板剪切法[S].
- GB/T 12830—2008, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic- Determination of Shear Modulus and Adhesion to Rigid Plates-Quadruple Shear Methods[S].
- [26] 赵亚溥. 近代连续介质力学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- ZHAO Y P. *Modern Continuum Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2016.