

硅橡胶异质粘合技术

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

摘要: 本研究探讨了不同类型添加剂(包括抗氧化剂与抗冲击改性剂)对液态硅橡胶(LSR)与热塑性塑料(聚酰胺PA、聚对苯二甲酸丁二酯PBT)复合材料粘合性能的影响。结果表明, 添加剂与热塑性塑料的相容性、结晶行为及熔体流动指数(MFI)均显著影响粘合强度。相容性较差的添加剂导致粘合强度下降, 而高结晶度与高粘度通常伴随较低的粘合力。研究为优化LSR-热塑性复合材料粘合性能提供了重要依据。

关键词: 液态硅橡胶; 热塑性塑料; 添加剂; 粘合强度; 结晶度

中图分类号: TQ330.56

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2026)02-0079-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.02.015

硅橡胶, 又称聚硅氧烷, 是一种由硅氧烷($\text{Si}-\text{O}-$)主链和额外的有机基团(如甲基、乙基、羟基、苯基等)组成的合成聚合物(见图1)。由于 $\text{Si}-\text{O}$ 键的键能高于 $\text{C}-\text{O}$ 键或 $\text{C}-\text{C}$ 键, 硅橡胶展现出独特的物理和化学性能组合。这些特性使其在医疗、电子、工业和日常应用中得到了广泛应用。



图1 含 $\text{Si}-\text{O}$ 骨架的端基硅胶

硅橡胶可以是固态或液态。它可以通过加热、光照或在室温下固化。固态材料通常通过压延或压缩成型加工, 而液态材料则可以通过涂覆、喷涂或注射成型。硅橡胶在加工方面具有极高的多样性。通过在分子层面设计有机官能团, 某些液态硅橡胶可以直接粘附到基材上, 这非常适合建筑应用。一些硅橡胶在固化后仍保持高透明度, 可用于光学封装(如LED透镜)。甚至还有热塑性硅橡胶, 其保留了硅胶的优点, 但可以采用塑料制造方法加工。

在不牺牲硅胶优点的情况下, 可以加入添加剂以获得更具针对性的性能: 例如, 加入二氧化硅填料以提高刚性和机械性能, 或加入导电/导热填料以赋予热/电导性。然而, 由于其低表面能和高化学惰性, 将硅橡胶与其他材料粘合仍然具有挑战性。本文探讨了硅橡胶的材料特性、优缺点以及将其与其他物质粘合的难点。

1 硅橡胶的优点

1.1 耐温性

硅橡胶在高温下(最高可达200 °C, 甚至在添加添加剂/改性后可达到更高温度)仍能保持性能, 在低温下(最低可达-40 °C)也能保持功能。

1.2 耐化学性

硅橡胶对多种化学品具有优异的耐性, 包括酸、碱和臭氧。

1.3 抗紫外线

硅橡胶具有抗紫外线(UV)性能, 即使在长时间阳光照射下也能保持其特性。

1.4 绝缘

硅橡胶具有优异的电绝缘性能, 适用于高压电气元件(图2)。

1.5 生物相容性

大多数硅胶是无毒的, 广泛应用于食品、医疗和制药行业。

1.6 环保性

与塑料或传统橡胶相比, 硅橡胶对环境污染更小, 且能耗更低。

1.7 柔软度和弹性

$\text{Si}-\text{O}$ 骨架具有优异的柔韧性和延展性, 非常适合用于皮肤接触产品(见图3)。

编者简介: 章羽(1991-), 男, 本科, 主要从事橡塑技术装备方面的研究, 已发表论文多篇。

原文: RUBBER WORLD No.6/2025, by Yen Tu Yang, General Silicones.



图 2 用于高压系统的耐用硅胶绝缘体

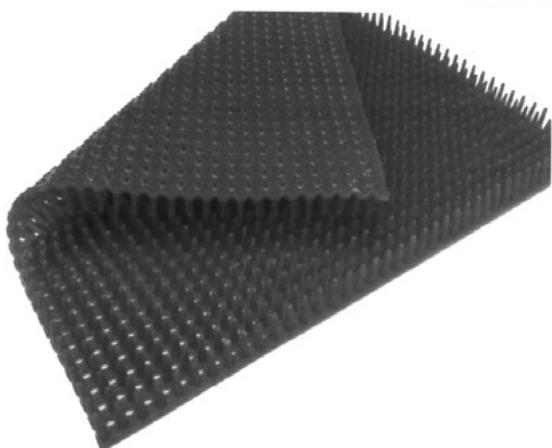


图 3 医用柔软且可拉伸的硅胶手术垫

2 硅橡胶的缺点

2.1 成本

硅橡胶的价格通常高于传统塑料或橡胶。

2.2 耐溶剂性和耐磨性

硅橡胶在非极性溶剂（如甲苯）中的表现不佳，且耐磨性有限。

2.3 低表面能

硅橡胶容易吸附灰尘和颗粒物，并且容易积聚静电。

2.4 机械强度较低

与某些传统材料相比，硅橡胶并不适合用于高强度应用。

为了克服这些缺点并拓展其应用范围，开发异质硅橡胶复合材料是一种有前景的策略。

3 硅橡胶与其他材料的粘接：技术与表面处理

由于硅橡胶具有化学惰性和低表面能，因此在粘接前通常需要进行表面改性或预处理。常见的方法包括：

3.1 表面底漆

针对硅胶或目标基材的专用底漆剂通过涂覆或喷涂的方式施用。干燥后，即可粘合第二种材料。由于成本效益高且操作简单，这种底漆剂被广泛应用，但许多底漆剂含有有机溶剂，引发了环境问题。因此，人们开发了水性底漆剂，作为一种更环保的替代品。

3.2 化学表面处理

强酸、强碱或氧化剂被用于在表面生成反应性官能团。这种方法也会对环境造成挑战。

3.3 等离子体表面改性

高能等离子体通过引入反应性离子 / 电子或辐射来激活表面，从而形成官能团、清除污染物并增加粗糙度以获得更好的附着力。这种方法对环境更友好，但需要复杂且高能量的设备。

3.4 官能团整合

在材料合成过程中引入反应性官能团，使其能够参与键合反应。该方法要求具备深厚的化学知识，且具有高度特异性和独特性（图 4）。



图 4 硅胶复合膜键盘，增强耐用性

4 硅橡胶异质粘接技术实现

基于上述表面处理方法，硅橡胶可与多种材料实现有效粘接，如图 5 所示，常见被粘接材料包括：

金属：铁、铝、不锈钢；

塑料：PET、PI、PC、PU、ABS、PTFE（特氟龙）；

其他：玻璃纤维、纺织品



图 5 硅胶与其他材料的粘接

5 粘合性能测试方法

为确保硅橡胶复合材料在各类应用（如汽车、医疗等领域）中的可靠性，可采用多种粘合性能测试方法进行评估。除 ASTM 等通用标准外，如表 1 所示，以下为几种常用测试方法：

表 1 测试方法

测试方法	条件	通过标准
高温 / 高压耐久性	在 350 °C、5 MPa 条件下反复压制	无材料分离
直接拉伸试验	使用拉力试验机测试，硅胶被撕裂或受力 $\geq 2 \text{ kgf/cm}$	热循环后无分离
沸水冲击试验	在沸水和冰水之间交替	无材料分离

5.1 高温高压耐久性测试

在高温高压条件下，使用压头对复合材料进行多次压制。例如，将温度设定为 350 °C，压力为 5 MPa，每次压制 10 s，共压制 50 次。随后观察两种材料是否发生分离（图 6 和图 7）。若未分离，则判定粘合性能合格；反之则不合格。该测试确保硅橡胶在极端条件下保持稳定粘合性，测试条件可根据具体应用需求调整（图 8）。

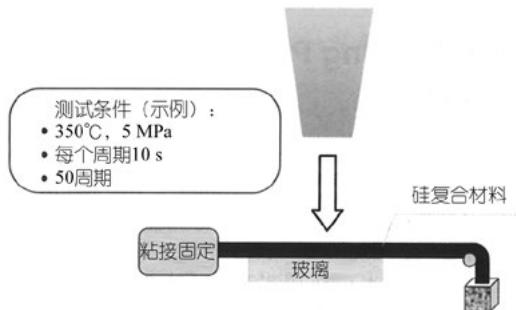


图 6 硅胶的高温高压粘接测试

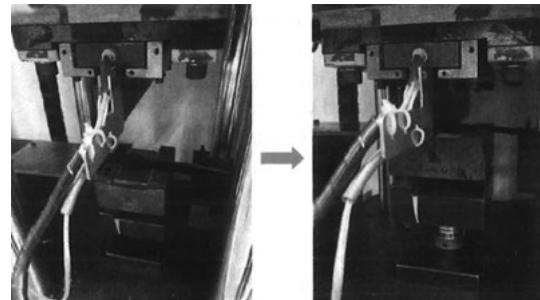


图 7 高温高压粘接试验装置

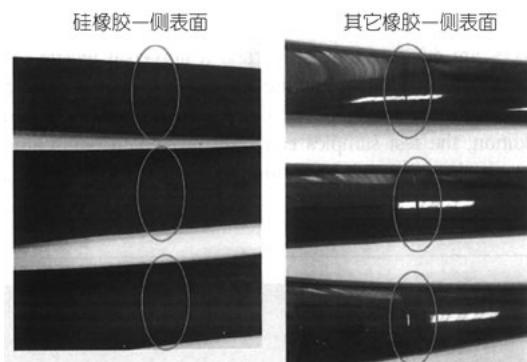


图 8 粘合测试结果显示无材料分离

5.2 直接拉伸测试

使用硅橡胶、预粘合材料和可粘附硅胶的塑料薄膜制备粘合测试片，将其切成长条后，在万能拉伸试验机上进行拉伸试验，测量粘合强度。当硅橡胶发生撕裂或粘合强度 $\geq 2 \text{ kgf/cm}$ 时，可视为粘合良好。此外，测试前还可对样品进行环境预处理（如热冲击、高温高湿），以验证其在恶劣环境下的长期可靠性（图 9 和 10）。

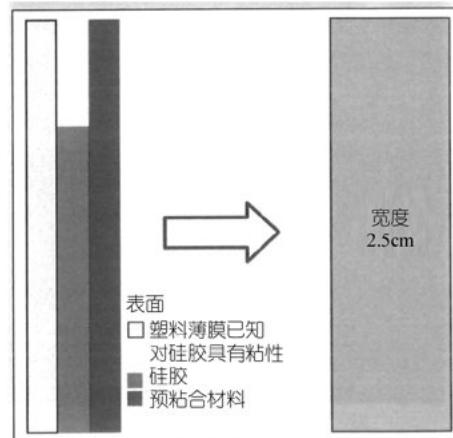


图 9 General Silicones 公司用硅胶粘合的材料示例

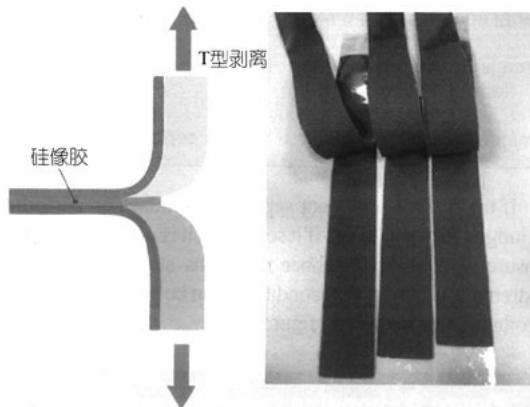


图 10 附着力 $\geq 2 \text{ kgf/cm}$ 的拉伸试验结果

5.3 直接沸煮试验

将复合材料反复置于热水中煮沸一段时间后，迅

速移至冰水中。冷热交替引起的温差及材料热膨胀系数差异将产生显著应力。若粘合不良，两种材料将发生分离。该方法操作简便、结果直观，适用于快速筛选与验证。

6 结语

硅橡胶凭借其优异的综合性能，已成为多个高端领域的关键材料。通过合理的表面处理与粘接技术，可实现其与金属、塑料等多种材料的稳定结合。未来，随着环保型表面处理技术与高效粘接方法的不断发展，硅橡胶在异质材料复合方面的应用前景将进一步拓展。

Heterogeneous bonding technology for silicone rubber

Zhang Yu, compiler

(National Machinery Information Center of Rubber & Plastics, Beijing 100143, China)

Abstract: This study investigated the effects of different types of additives (including antioxidants and impact modifiers) on the adhesive properties of liquid silicone rubber (LSR) and thermoplastic (polyamide PA, polybutylene terephthalate PBT) composites. The results showed that the compatibility, crystallization behavior, and melt flow index (MFI) of the additives and thermoplastics significantly affect the adhesive strength. Additives with poor compatibility lead to a decrease in adhesive strength, while high crystallinity and high viscosity are usually accompanied by lower adhesive forces. This study provides an important basis for optimizing the adhesive properties of LSR-thermoplastic composites.

Key words: liquid silicone rubber; thermoplastic; additive; adhesive strength; crystallinity

(R-03)

《橡塑技术与装备》投稿邮箱: crte@chinarpte.com

欢迎投稿，欢迎订阅，欢迎惠登广告