

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)

硅橡胶, 又称聚硅氧烷, 是一种由硅氧烷 (—Si—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Si—O键的键能高于C—O键或C—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。

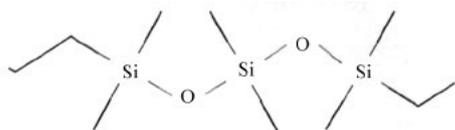


图1 含Si—O骨架的端基硅胶

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)。



图2 用于高压系统的耐用硅胶绝缘体

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

Si—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）。

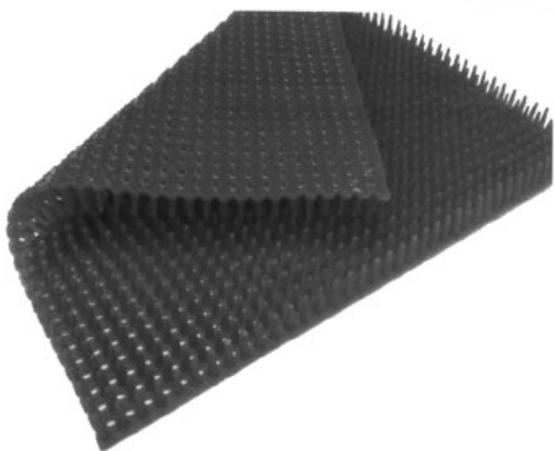


图3 医用柔软且可拉伸的硅胶手术垫

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涂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，这种底涂剂被广泛应用，但许多底涂剂含有有机溶剂，引发了环境问题。因此，

人们开发了水性底涂剂，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：



图5 硅胶与其他材料的粘接

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

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）。

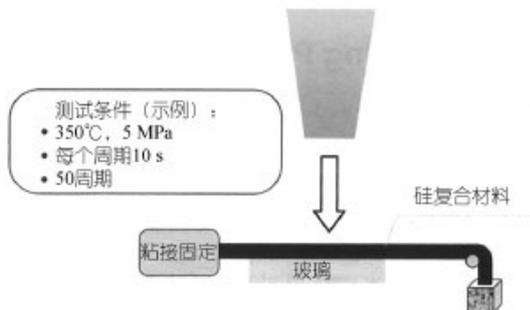


图6 硅胶的高温高压粘接测试

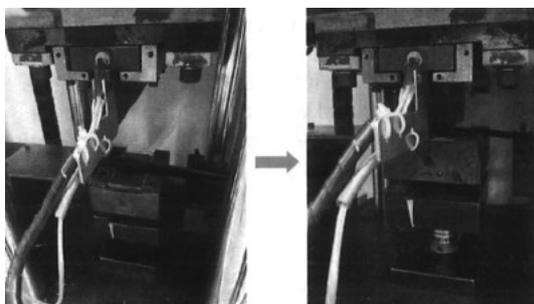


图7 高温高压粘接试验装置

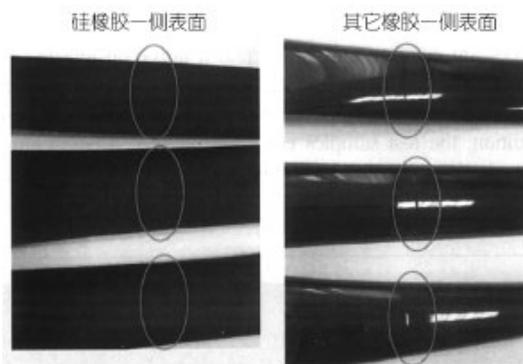


图8 粘合测试结果显示无材料分离

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）。

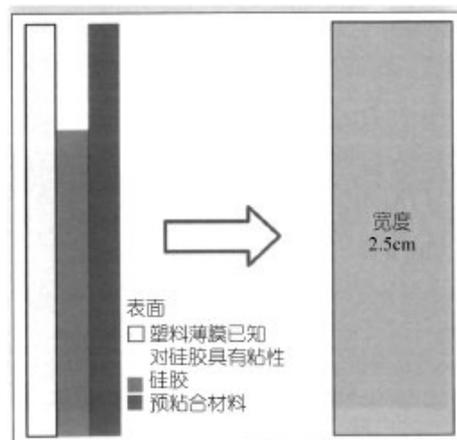


图9 General Silicones公司用硅胶粘合的材料示例

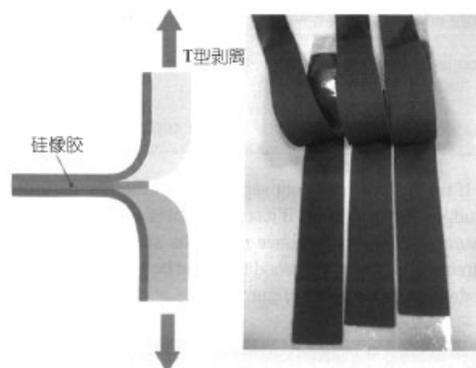


图10 附着力 $\geq 2 \text{ kgf/cm}$ 的拉伸试验结果

