

高性能双组分有机硅灌封胶的研究进展

赵宏岩 何振培 白高翔 李云峰 丁适跃 邵向东 李剑浩 余建华 周青 杨雷

Research progress of high performance two-component silicone potting adhesive

ZHAO Hongyan, HE Zhenpei, BAI Gaoxiang, LI Yunfeng, DING Shiyue, SHAO Xiangdong, LI Jianhao, YU Jianhua, ZHOU Qing, YANG Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240903.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于单轴拉伸有机硅凝胶超弹性性能参数的确立及结构有限元仿真

Establishment of hyperelastic parameters and structural finite element simulation based on uniaxial tensile for silicone gel
复合材料学报. 2022, 39(2): 823–833 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210420.002>

碳化硼-有机硅二维层状复合材料的制备与动态力学性能

Preparation and dynamic mechanical properties of boron carbide and organosilicon two-dimensional laminated composites
复合材料学报. 2022, 39(3): 1091–1101 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210609.003>

纳米增强微胶囊复合相变材料的研究进展

Research progress of nano-enhanced microcapsule composite phase change materials
复合材料学报. 2024, 41(8): 3968–3986 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240314.002>

有机硅烷功能化碳点的制备及应用进展

Progresses in preparation and application of organosilane functionalized carbon dots
复合材料学报. 2022, 39(3): 884–895 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210816.001>

有机-无机复合气凝胶的制备及其阻燃性能研究进展

Research progress on preparation and flame retardant properties of organic-inorganic composite aerogel
复合材料学报. 2021, 38(7): 2056–2069 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210324.002>

一种灌封结构用环氧树脂的固化行为表征和模拟

Characterization and simulation on the cure behavior of epoxy resin for encapsulation structure
复合材料学报. 2022, 39(4): 1824–1833 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210726.004>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240903.005

高性能双组分有机硅灌封胶的研究进展



分享本文

赵宏岩¹, 何振培¹, 白高翔¹, 李云峰², 丁适跃², 邵向东³, 李剑浩²,
余建华², 周青^{*1,4}, 杨雷^{1,4}

(1. 浙江理工大学 纺织科学与工程学院 (国际丝绸学院), 杭州 310018; 2. 浙江科峰有机硅股份有限公司, 海宁 314400;

3. 衢州科峰新材料有限公司, 衢州 324000; 4. 浙江理工大学绍兴柯桥研究院有限公司, 绍兴 312000)

摘要: 随着工业技术的发展, 对封装材料如高性能双组分有机硅灌封胶的需求日益增长, 尤其是在航空航天、电子电气及汽车工业中, 其优异的电气绝缘性、热稳定性及化学惰性使得它成为研究热点。本文综述了高性能双组分有机硅灌封胶的制备方法、固化机制与性能表征, 重点对比了国内外在该领域的最新进展。通过对近年来发表的文献的系统分析和整理, 揭示了目前双组分灌封胶性能提升的关键因素及影响机制, 为制备高性能的此类材料提供了趋势借鉴。本文发现, 通过纳米填料的加入和交联密度的优化, 可显著增强灌封胶的综合性能。综合考虑性能与成本后, 本文提出了灌封胶未来研究的方向和潜在的应用前景, 为相关领域的学术研究与工业应用提供有益的参考。

关键词: 有机硅灌封胶; 双组分体系; 固化机制; 性能表征; 纳米填料

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)04-1838-10

Research progress of high performance two-component silicone potting adhesive

ZHAO Hongyan¹, HE Zhenpei¹, BAI Gaoxiang¹, LI Yunfeng², DING Shiyue², SHAO Xiangdong³,
LI Jianhao², YU Jianhua², ZHOU Qing^{*1,4}, YANG Lei^{1,4}

(1. College of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk), Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Kefeng Silicone Co., Ltd., Haining 314400, China; 3. Quzhou Kefeng New Material Co., Ltd., Quzhou 324000, China; 4. Shaoxing Keqiao Research Institute Co., Ltd. of Zhejiang Sci-Tech University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: With the development of industrial technology, the demand for packaging materials such as high-performance two-component silicone potting adhesives is growing, especially in the aerospace, electronic and electrical and automotive industries. Its excellent electrical insulation, thermal stability and chemical inertness make it a research hotspot. In this paper, the preparation, curing mechanism and characterization of high performance two-component silicone potting adhesives were reviewed, with emphasis on the latest progress in this field at home and abroad. Through systematic analysis and collation of the literature published in recent years, the key factors and influencing mechanism of improving the performance of two-component potting adhesives were revealed, which provided a trend for the preparation of such materials with high performance. It was found that the comprehensive properties of potting adhesives could be significantly enhanced by the addition of nano-fillers and the optimization of crosslinking density. After considering the performance and cost comprehensively, this paper puts forward the future research direction and potential application prospect of potting adhesive, hoping to provide useful reference for academic research and industrial application in related fields.

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-08-20; 录用日期: 2024-08-25; 网络首发时间: 2024-09-04 11:02:36

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240903.005>

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”项目 (2023C01103); 浙江理工大学绍兴柯桥研究院有限公司项目 (KYY2023006HD)

"JianBing" "LingYan" Project of Zhejiang Province (2023C01103); Project of Shaoxing Keqiao Research Institute Co., Ltd. of Zhejiang Sci-Tech University (KYY2023006HD)

通信作者: 周青, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为有机硅新材料 E-mail: qingzhou1@zstu.edu.cn

引用格式: 赵宏岩, 何振培, 白高翔, 等. 高性能双组分有机硅灌封胶的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 1838-1847.

ZHAO Hongyan, HE Zhenpei, BAI Gaoxiang, et al. Research progress of high performance two-component silicone potting adhesive[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(4): 1838-1847(in Chinese).

Keywords: silicone potting compounds; two-component systems; curing mechanisms; performance characterization; nano-fillers

随着现代工业技术特别是航空航天、电子电气及汽车工业的迅猛发展，对各类材料的性能要求持续提高。在众多材料中，高性能双组分有机硅灌封胶以其卓越的电气绝缘性、热稳定性和化学惰性，被广泛应用于电子封装、组件保护和结构粘接等领域，为关键技术的实现提供了有力的材料保障^[1-6]。然而，随着应用环境的复杂多变及性能要求的不断升高，传统有机硅灌封胶的性能已经难以满足更高级别的工业应用需求，因而针对其性能的改进和优化成为了材料科学领域中一个紧迫且有价值的研究方向^[7-12]。

本文旨在全面梳理和分析高性能双组分有机硅灌封胶的制备方法、固化机制与性能表征，重点探讨国内外对该领域的研究进展，揭示提升材料性能的关键因素和影响机制。通过对近年来重要文献的综合分析，着眼于纳米填料的应用和交联密度的调控对灌封胶性能的影响，旨在为未来的材料研发提供坚实的理论基础和实践指导。进一步地，本文就综合性能与成本的考量提出未来研究的新方向和潜在应用前景，为了促进有机硅灌封胶的产业和科研的发展，提供参考意见，并加强材料科学和工业技术的协同创新。

因此，深入探究和总结高性能双组分有机硅灌封胶的优化路径和发展趋势，对于推动相关领域的科学研究和技术创新具有重要意义。本文以此为核心，拟通过系统化分析国内外研究的差异与交叉，构建起材料研究和工业应用之间紧密的

联系，为实现更高性能的有机硅灌封胶的设计和应用奠定基础。

1 高性能双组分有机硅灌封胶概述

1.1 定义与分类

高性能双组分有机硅灌封胶由于其卓越的物理化学性质，在众多高科技领域中扮演着重要角色。这一类材料通常由灌封胶基质、交联剂、催化剂和各种填料组成，能够在室温或加热条件下固化，形成具有优异绝缘、防水、耐热、耐气候及某些情况下的阻燃性能的三维网络结构^[13-15]。

双组分有机硅灌封胶的定义可以归纳为一种需要通过两种不同组分混合后才能进行固化的灌封材料。这两种组分通常被称为A组分和B组分，其中，A组分包含聚硅氧烷预聚体和填料，而B组分则包含交联剂和催化剂。在使用时，A和B两组分按照一定比例混合，混合物随后在室温下或加热条件下固化成型。这种材料的固化时间根据配方的不同，可以从几分钟到几小时不等。

根据固化机制，双组分有机硅灌封胶可分为加成型和缩合型两大类，如图1所示^[16]。加成型灌封胶是通过硅氢加成反应固化的，具有无副产物、固化收缩率低、固化速度可控等特点；而缩合型灌封胶通常是通过水解缩合反应固化，可能会产生少量的低分子副产物如醇或酸。每种固化机制的灌封胶都有其独特的应用场景和性能要求^[2]。

在分类上，高性能双组分有机硅灌封胶还可

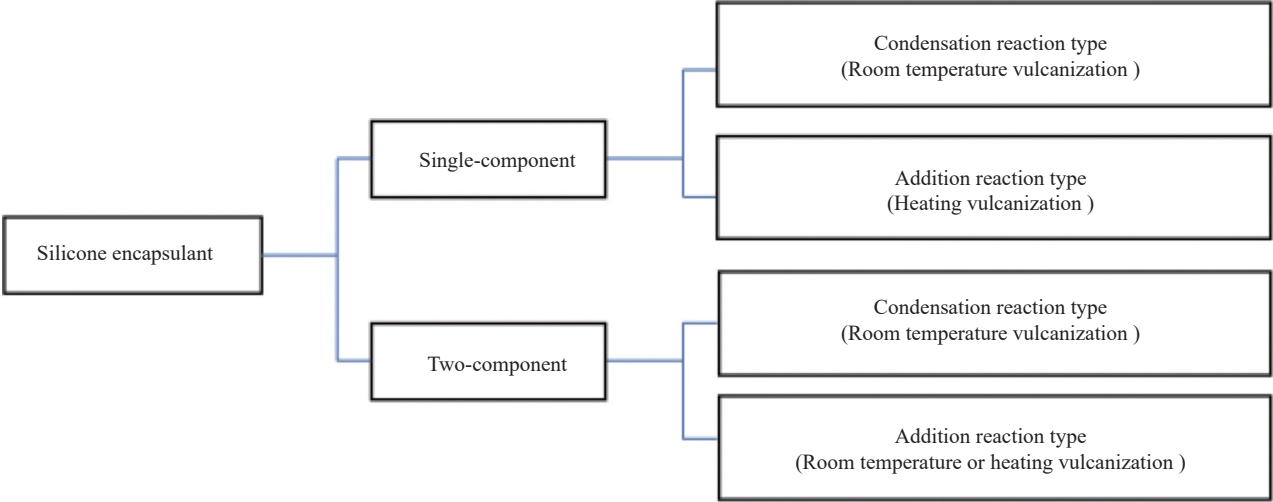


图1 有机硅灌封胶种类

Fig. 1 Silicone encapsulant type

可以根据其使用的领域和性能要求进一步细分。如电子电气行业中，常用的有耐高温和导电性能优异的灌封胶^[17]；在航天航空领域，对材料的轻质化、耐极端环境性能要求更高^[18]，因此会使用到特殊配方的灌封胶；而在建筑行业，防水和防潮功能是灌封胶需要重点满足的性能。

全球范围内，对高性能双组分有机硅灌封胶的研究始终处于不断发展状态。在材料的基础研究方面，科研人员致力于探索新型有机硅预聚体、交联剂以及催化剂的合成，以实现更好的综合性能。例如，通过引入纳米填料，可以显著提高灌封胶的力学强度和导热性能^[19]，这对于电子封装材料来说是极其重要的。同时，也有研究专注于催化体系，旨在降低固化温度、缩短固化时间，以及提高固化物的热稳定性和电性能。

国内外学者在双组分有机硅灌封胶的应用研究上也取得了一系列进展。例如，一些研究聚焦于提高灌封胶的环境适应性，通过改进配方和工艺，使其能够抵御更加极端的温度、湿度和化学介质的侵袭^[20]。在某些高端应用领域，如航空航天和深海探测，对材料性能的要求更为苛刻，研发团队通过创新配方和制备工艺，开发出了能够满足这些领域特定需求的双组分有机硅灌封胶。

未来的研究方向可能会围绕提高灌封胶的环保性能、降低生产成本、提升生产效率以及开发新的应用场景。在环保方面，开发无溶剂或低挥发性有机化合物 (VOC) 含量的产品^[21-23]，以减少对环境的影响，是研究的重要方向之一。同时，通过优化合成路线和生产工艺，实现成本的进一步降低，也是行业持续关注的焦点。

高性能双组分有机硅灌封胶在定义、分类及其研究进展方面呈现出多样性和复杂性。从材料的基础研究到应用开发，再到未来的研究方向，这一领域都充满了挑战和机遇。随着科研技术的不断进步和市场需求的日益增长，可以预见，高性能双组分有机硅灌封胶将会在未来的科技发展中扮演越来越重要的角色。

1.2 应用领域

高性能双组分有机硅灌封胶在多个领域有着广泛的应用，这得益于它卓越的物理和化学性能。其中包括良好的耐温性、耐气候性、电气绝缘性和化学稳定性，能够在多种恶劣环境下提供有效的保护。本节将对高性能双组分有机硅灌封胶的

主要应用领域进行详细介绍。

电子与电气领域是双组分有机硅灌封胶应用最为普遍的一个领域^[24]。在电子元件的封装过程中，灌封胶被用来保护组件免受潮湿、灰尘、化学腐蚀和机械冲击的影响，从而提高产品的可靠性和使用寿命^[25]。例如，LED 封装是灌封胶的一个重要应用方向。根据市场研究机构的数据，全球 LED 封装市场对硅灌封胶的需求在过去五年内增长了约 15%。高透明度的灌封胶能够有效提高光输出效率，而且具有较好的耐热性和耐气候性，有利于 LED 产品在户外或高温环境下长期稳定工作。图 2 为灌封前的 LED 用驱动电源，图 3 为装了灌封胶的 LED 驱动电源。



图 2 LED 驱动电源
Fig. 2 LED drive power



图 3 装了灌封胶的 LED 驱动电源
Fig. 3 LED drive power containing encapsulant

在光伏行业，双组分有机硅灌封胶同样占有一席之地。光伏模块在户外使用需承受紫外线、温度变化和潮湿等环境因素的影响，材料要达到这些条件的高标准，稳定性是关键。高性能双组分有机硅灌封胶以其优异的耐气候性和耐久性，成为了光伏组件封装材料的首选^[26-27]。据统计，使用有机硅灌封胶可使光伏模块的使用寿命提高 20% 以上，这对于延长光伏发电系统的整体经济寿命具有重要意义。

汽车行业是高性能灌封胶技术发展的另一个重点领域^[28-29]。汽车电子化进程的不断加快,要求汽车内部电子元件必须具有更高的稳定性和耐久性^[30]。双组分有机硅灌封胶在汽车传感器、电子控制单元 (ECU) 等关键电子元件的封装中发挥着重要作用^[31]。它不仅能够保护电子元件免受振动和冲击的影响,还能防止油、水和盐雾等腐蚀性物质的侵蚀。随着新能源汽车的快速发展,电池管理系统 (BMS) 对于硅基灌封材料的防护需求也日益增长,这为高性能双组分有机硅灌封胶提供了新的市场机会。

双组分有机硅灌封胶在医疗领域也有重要的应用价值^[32]。医疗设备对材料的生物相容性和化学稳定性要求极高,高性能双组分有机硅灌封胶能够满足这些要求。在诸如心脏起搏器、植入式传感器等高端医疗设备中,灌封胶用于保护敏感的电子元件不受体液的腐蚀,确保设备的稳定工作。

在建筑领域,双组分有机硅灌封胶因其优良的粘接性和密封性而被广泛应用于门窗结构、幕墙系统以及其他建筑接缝的封装^[33]。它不仅能够吸收结构的微小移动,防止水气渗透,还能够抵抗紫外线和温差引起的老化,提高建筑的整体耐久性。

航空航天领域对材料的性能要求极为苛刻,双组分有机硅灌封胶在这一领域也得到了应用^[34]。它能够在极端的温度和压力条件下保持稳定性,因此被用于保护航天器上的精密部件。

总而言之,高性能双组分有机硅灌封胶以其独特的性能满足了各种应用领域的需求,成为了一个跨行业的关键材料。随着科技的不断进步和新应用领域的不断开拓,预计未来其应用范围将进一步扩大。

2 国内外研究现状

2.1 国内研究进展

国内关于高性能双组分有机硅灌封胶的研究起步于上世纪 90 年代,近年来随着电子、电力等领域的迅速发展,对有机硅灌封胶的性能要求越来越高,国内的学者和机构在相关研究方面做了大量工作并有所突破。

在材料合成方面,李言^[5]通过调整灌封胶的分子结构和交联密度,提高了灌封胶的热稳定性和力学性能。例如,中国科学院上海硅酸盐研究所的余晓桃等^[6]通过引入含有苯环结构的硅烷偶

联剂,增强了灌封胶的耐热性和力学性能。同时,采用多官能团硅氧烷交联剂替代传统的双官能团交联剂,提高了交联密度,从而增强了材料的抗撕裂强度和抗压缩永久变形能力。

在固化技术方面,国内研究者致力于开发更为高效的固化体系。传统的有机硅灌封胶多采用室温固化或加热固化^[35],固化时间较长,效率不高。为此,美乐仕油墨有限公司研发了一种新型快速固化体系,该体系通过引入特殊的催化剂,能够在较低的温度下迅速完成固化过程,显著缩短了固化时间,并且固化后的灌封胶仍保持了良好的综合性能^[36]。

对于提高灌封胶的环境适应性,合肥工业大学周正发团队^[37]通过在有机硅基体中引入纳米填料,如纳米 SiO₂、纳米 Al₂O₃ 等,不仅提高了灌封胶的热导率,而且改善了其在恶劣环境下的稳定性。通过表面改性技术^[38],进一步提高了纳米填料与灌封胶基体的相容性,有效防止了填料的团聚现象,进而确保了灌封胶的长期可靠性。

在应用开发方面,国内研究者针对不同应用场景的需求,开发了多种功能型有机硅灌封胶。例如,在电子封装领域,为满足高性能电子元器件在高温长时间工作条件下的稳定性需求,研究人员开发了具有优异耐热性和电气性能的灌封胶^[39-41]。在电力行业,为了保证电缆接头和终端绝缘效果的稳定,特别是在户外极端天气条件下的使用,开发了耐气候性更强、耐电晕放电性能更好的有机硅灌封胶。

国内在高性能双组分有机硅灌封胶的研究方面取得了一系列成果,从材料合成、固化技术到应用开发,均体现了国内科研人员在该领域的创新能力和技术积累。

2.2 国外研究动态

在高性能双组分有机硅灌封胶的研究领域,国外学者和研究机构长期以来对材料的改性、性能提升以及应用拓展进行了深入研究^[42-43]。在这一过程中,不仅发现了新的有机硅材料体系,而且对已有材料的性能进行了优化,使之更好地满足了航空航天、电子电气、建筑等领域的高标准要求^[44-45]。

美国、德国、日本等国家的研究者在高性能双组分有机硅灌封胶的研究上做出了显著成果^[46]。例如,美国的研究团队通过引入纳米填料如 Al₂O₃、

SiO₂ 等，成功提升了灌密封胶基灌密封胶的热导率、电绝缘性及机械强度^[47]。通过在分子层面上调控有机硅聚合物的交联密度，实现了对灌密封胶网络结构的精细控制，从而获得了更好的热稳定性和耐气候性。

在欧洲，特别是德国，研究人员通过引入特殊的共聚物如含氟硅油或是改性的硅树脂，显著提高了双组分有机硅灌密封胶的耐化学品性和耐油性，使其能够在极端的化学环境中保持性能稳定^[48]。此外，他们通过研究不同的催化体系，成功缩短了有机硅灌密封胶的固化时间，提高了其在快速制造过程中的应用可能性。

日本的研究者在有机硅材料的微观结构与性能关系方面进行了深入探索。他们利用高分辨率的成像技术和分子动力学模拟，详细研究了灌密封胶的分子链在不同条件下的排列和运动情况，从而揭示了影响材料物理性能的微观机制。这些研究对于设计出具有定向性能的双组分有机硅灌密封胶提供了理论基础^[49]。

除了上述国家，其他国家如韩国和澳大利亚的研究也不容忽视。韩国的 Cho 等研究团队^[50] 专注于提高有机硅灌密封胶的环境适应性，他们开发了能够在宽温度范围内保持性能的灌密封胶配方，并通过引入特殊的交联剂，提高了材料在高湿环境下的稳定性。Liu 等^[51] 则在灌密封胶的生物相容性方面取得了进展，开发出了适用于生物医学领域的双组分有机硅灌密封胶，其优异的生物相容性和可调节的力学性能使其在医疗器械封装中展现出广阔的应用前景。

国外的研究不但在提升材料性能上取得了阶段性成果，而且在环保和可持续发展方面也展现出了积极的探索。例如，一些研究团队正在开发不含有害溶剂的水性有机硅灌密封胶，这些材料既减少了对环境的影响，又保持了出色的性能，为绿色制造和可持续工业发展贡献了力量^[52]。

国外在高性能双组分有机硅灌密封胶的研究上已经取得了一系列的成果，无论是材料的性能提升，还是应用领域的拓展，亦或是在环境友好型材料的开发上，国外的研究都为我们提供了宝贵的经验和启示。

3 关键技术与性能优化

3.1 有机硅基体材料的改性技术

有机硅基体材料因其极佳的耐温性、电绝缘

性能以及化学稳定性，在封装材料领域得到了广泛的应用。然而，为了满足特定的应用需求，有机硅材料的性能往往需要通过改性技术得到进一步提升。有机硅基体材料的改性技术主要包括交联密度的调控、填料的增强以及功能化处理等方面^[53-54]。

交联密度是影响有机硅材料力学性能与热稳定性的关键因素。通过改变灌密封胶中交联剂的种类和用量，可以有效调整交联密度^[54]。研究表明，使用过氧化物作为交联剂可以在较高的温度下形成三维网状结构，从而提高材料的热稳定性和机械强度。但过氧化物交联体系在加工过程中易产生副产品，影响材料的透明性和电性能。近年来，以等离子体表面处理技术为代表的无副产品交联方法受到研究者的关注，该技术能在室温下发生交联且不产生副产品，是一种环境友好且高效的交联方法^[55]。图 4 是不同交联剂用量下有机硅密封胶的硫化深度。

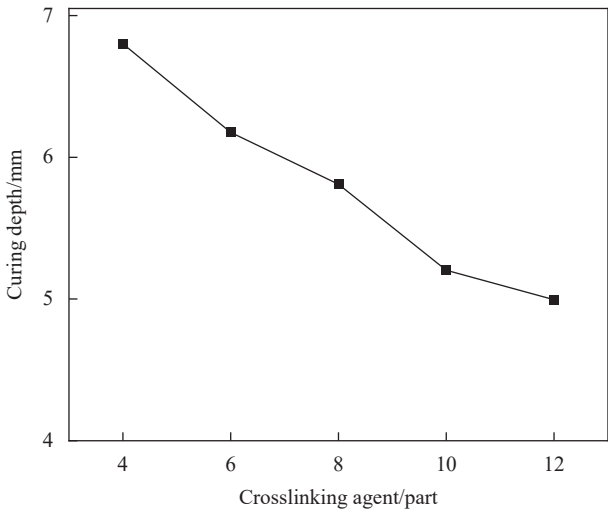


图 4 不同交联剂用量下有机硅密封胶的硫化深度

Fig. 4 Curing depth of silicone sealant at different crosslinker dosages

填料的增强是提升有机硅基体材料性能的重要途径。硅胶的力学性能与热导性能可以通过引入不同类型的无机填料得到显著改善^[55-56]。SiO₂ 是最常用的填料之一，它能提高灌密封胶的硬度和耐磨性能。尤其是纳米 SiO₂，因其高比表面积和独特的表面性质，能在较低填充量下就显著改善灌密封胶的力学性能。此外，金属氧化物如 Al₂O₃、ZnO 等也常被用作填料，它们不仅能提升灌密封胶的机械强度，还能改善其热导性能，满足特定的应用需求^[7]。

功能化处理是有机硅基体材料改性的另一关键技术。通过在灌封胶分子链上引入特定的官能团，可以赋予材料特定的功能，如增强的粘接性、改善的疏水性或者特定的光电性能。例如，通过引入含氟官能团可以显著提升灌封胶的疏水性和耐化学品性能^[57]。同时，含硼烷基团的灌封胶被发现具有独特的自愈合特性。此类功能化灌封胶在封装材料中具有潜在的应用前景。

在实际应用中，改性技术的选择需根据具体的应用目的和性能要求综合考量。例如，在电子封装领域，对材料的热稳定性和电绝缘性能有较高要求，这时可以采用无机填料增强和等离子体交联技术相结合的方法。在航空航天领域，材料可能面临极端的温度变化和机械应力，因此选择高交联密度和高强度填料的改性技术更为合适。

此外，改性技术的发展也受到了环保法规的影响^[9]。随着对环境友好型材料需求的增加，绿色改性技术比如生物基填料的使用和溶剂自由的表面改性技术等，正逐渐受到研究者的青睐。这些技术不仅减少了对环境的负担，而且在一定程度上提升了材料的综合性能。

有机硅基体材料的改性技术正在朝着高性能化、功能化和绿色环保化的方向发展^[10-11]。通过合理的设计和选择适当的改性途径，可以开发出更为高效和环境友好的有机硅灌封胶，以满足日益严苛的应用需求。

3.2 固化体系与性能调控

在探讨高性能双组分有机硅灌封胶的研究进展时，固化体系和性能调控是一个不容忽视的关键环节。有机硅灌封胶的固化体系通常包括交联剂、催化剂、填料等组分，它们的种类和配比直接影响灌封胶的最终性能^[12]。性能调控则涉及通过对固化体系的精细控制来实现预期的力学性能、热稳定性、电气特性以及环境耐受性等。

交联剂是决定有机硅灌封胶网络结构的关键因素^[57]。市场上常用的交联剂有室温交联和加热交联两种类型。室温交联型通常采用含有烯基的有机硅预聚物和有机过氧化物或者锡类催化剂作为交联剂，能在常温下快速固化。加热交联型则多使用带有氢键的硅油和含有烯基的交联剂，在加热条件下通过硅氢加成反应固化。研究表明，通过调整交联剂的种类和用量，可以有效调节灌封胶的交联密度，进而影响其硬度、拉伸强度和

伸长率等力学性质^[13]。

催化剂的选择和用量对固化速率和固化体系的工作时间有着至关重要的影响^[58]。例如，常用的二丁基锡二辛酸酯作为催化剂，可以有效催化室温交联型有机硅灌封胶的固化反应。然而，催化剂的过量会导致固化速度过快，使得操作时间缩短，影响灌封胶的质量。因此，合理控制催化剂的用量，以及探索新型的催化体系，成为近年来研究的热点。

填料的加入是提升灌封胶性能的有效手段。不同种类和粒径的填料可以显著改善有机硅灌封胶的热导率、电绝缘性、阻燃性及抗化学腐蚀能力。例如，添加纳米 SiO₂ 可以增强灌封胶的力学性能和耐磨性。而石墨烯、碳纳米管等导电填料的引入，可赋予灌封胶优异的导电性能，拓宽其在电子封装领域的应用。此外，针对特定应用需求，研究人员通过引入 Al(OH)₃、Mg(OH)₂ 等无机阻燃剂，有效提升了灌封胶的阻燃性能^[14]。

在性能调控方面，除了上述固化体系内的组分调节外，研究者们还关注于固化过程中的条件控制。温度、湿度和光照等外界条件均会对固化过程及灌封胶性能产生影响。例如，较高的固化温度可以加速反应速度，但过高的温度可能会导致灌封胶内部产生应力，影响其最终性能。在某些情况下，紫外光固化体系被引入以实现更快的固化速率和更好的操作性。

国内外研究表明，通过分子设计和纳米技术的应用，可以进一步优化有机硅灌封胶的固化体系与性能。例如，引入具有特定功能基团的硅烷偶联剂，不仅可以增强填料与聚合物基体的界面相容性^[15]，还可以引入额外的功能，如抗紫外老化等。纳米技术的运用，如通过表面改性的纳米填料，可以在不显著增加黏度的情况下提升填料的分散性和界面作用，从而进一步提高灌封胶的整体性能。

固化体系的组成和性能调控策略是影响高性能双组分有机硅灌封胶性能的关键因素。通过对交联剂、催化剂、填料等关键组分的科学配比及工艺条件的精确控制，可以得到满足不同应用需求的高品质灌封胶产品。

4 结语

本文综述了高性能双组分有机硅灌封胶的研究进展，并通过对比国内外的研究动态揭示了材

料性能提升的关键因素及影响机制。归纳如下:

(1) 通过纳米填料的引入和交联密度的调控, 能够实现灌封胶性能的显著增强。然而, 纳米填料在改善性能的同时可能会影响有机硅灌封胶的加工性和成本效益, 这一问题的解决是未来研究需要着重考虑的方面;

(2) 环境因素对灌封胶性能的长期影响也是目前研究中相对欠缺的部分, 需要更深入的研究以保证材料在实际应用中的可靠性和稳定性。

展望未来, 高性能双组分有机硅灌封胶的发展存在如下趋势:

(1) 应更多地考虑环保和可持续性要求, 寻求生物基原料的应用以减少对环境的影响;

(2) 高通量实验方法与计算机模拟相结合的研究策略有望加速新型灌封胶材料的开发;

(3) 在实践应用上, 开发快速固化技术和更为经济的制备方法, 将更好地满足工业生产和市场需求。

本文的讨论和分析, 不仅仅为学术界提供了有价值的研究概览, 也为工业界在选择和开发新型材料时提供了实际的参考, 推动了双组分有机硅灌封胶技术的发展与应用。

参考文献:

- [1] 张荣荣, 张燕红, 杨秀丽, 等. LED 显示屏模块用双组分有机硅灌封胶的研制 [J]. *粘接*, 2018, 39(1): 63-66.
ZHANG Rongrong, ZHANG Yanhong, YANG Xiuli, et al. Preparation of two-component silicone pouring sealant for LED display module[J]. *Adhesion*, 2018, 39(1): 63-66(in Chinese).
- [2] 邱浩孟. 室温固化加成型有机硅灌封胶增粘剂的合成及性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
QIU Haomeng. Synthesis and properties of tackifier for room temperature curing addition-cure silicone encapsulant[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017(in Chinese).
- [3] 吴谦, 冯一峻, 裴勇兵, 等. 硅树脂改良阻燃材料的新进展 [J]. *中国材料进展*, 2018, 37(3): 185-190.
WU Qian, FENG Yijun, PEI Yongbing, et al. Research progress on application of silicone resin in flame retardant materials[J]. *Materials China*, 2018, 37(3): 185-190(in Chinese).
- [4] 王珏, 张伟君, 张晓臣, 等. 碳-有机硅复合材料研究进展 [J]. *化学与黏合*, 2018, 40(6): 452-456, 466.
WANG Yu, ZHANG Weijun, ZHANG Xiaochen, et al. Research progress of carbon-silicone composite materials[J].

Chemistry & Adhesion, 2018, 40(6): 452-456, 466(in Chinese).

- [5] 李言. 有机硅/环氧体系杂化网络设计、制备及其阻尼性能的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
LI Yan. Rational design and preparation of epoxy/poly-siloxane heterogeneous networks for achieving excellent damping properties[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018(in Chinese).
- [6] 余晓桃, 孙明辉, 李吉明, 等. 等比例缩合型双组分室温硫化有机硅密封胶的制备 [J]. *粘接*, 2018, 39(5): 37-39.
YU Xiaotao, SUN Minghui, LI Jiming, et al. Preparation of equal ratio condensation type two-component RTV silicone sealant[J]. *Adhesion*, 2018, 39(5): 37-39(in Chinese).
- [7] WANG J, MA H, REN F, et al. A study on the viscosity reduction mechanism of high-filled silicone potting adhesive by the formation of Al_2O_3 clusters[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(16): 10097-10104.
- [8] 范剑锋. (含氟) 有机硅热塑性弹性体的制备与研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
FAN Jianfeng. Preparation and study of (fluorine-containing) polysiloxane thermoplastic elastomer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021(in Chinese).
- [9] 雷帅. 有机硅微球与光散射材料的制备及其结构性能研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
LEI Shuai. Preparation and structure properties of silicone microspheres and light diffusing materials[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019(in Chinese).
- [10] 熊育资, 范鉴全, 谢成昌, 等. 117P 有机硅高粘结力灌封胶的制备及在风电电机槽口灌封中的应用 [J]. *绝缘材料*, 2018, 51(2): 30-34.
XIONG Yuzi, FAN Jianquan, XIE Chengchang, et al. Preparation of 117P organic silicone pouring sealant with high adhesive force and its applications on wind turbines notch pouring[J]. *Insulating Material*, 2018, 51(2): 30-34(in Chinese).
- [11] 陈凤娟, 刘罗, 张子露, 等. 可见光催化有机硅的合成研究进展 [J]. *有机化学*, 2023, 43(10): 3454-3469.
CHEN Fengjuan, LIU Luo, ZHANG Zilu, et al. Recent progress in synthesis of organosilanes driven by visible-light[J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2023, 43(10): 3454-3469(in Chinese).
- [12] 赵立伟. 自修复有机硅聚合物的结构设计及其性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
ZHAO Liwei. Structural design and properties of the self-healing silicone polymer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019(in Chinese).
- [13] 李嘉伟. 有机硅橡胶与冰表面的摩擦学性能研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.

- LI Jiawei. Study on tribological properties between silicone rubber and ice surface[J]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019(in Chinese).
- [14] 李连震. 船用有机硅改性聚氨酯阻尼材料的制备及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- LI Lianzhen. Preparation and properties of marine silicone modified polyurethane damping material[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019(in Chinese).
- [15] 王子豪, 刘永辉, 李刚, 等. 骨髓炎的分型, 诊断及治疗的研究进展[J]. *临床医学进展*, 2023, 13(11): 17023-17029.
- WANG Zihao, LIU Yonghui, LI Gang, et al. Research progress in classification, diagnosis and treatment of osteomyelitis[J]. *Advances in Clinical Medicine*, 2023, 13(11): 17023-17029(in Chinese).
- [16] 黄安民, 朱伟, 符玄, 等. 高性能有机硅灌封胶的制备与性能研究[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(4): 56-59.
- HUANG Anmin, ZHU Wei, FU Xuan, et al. Preparation and properties of high-performance organosilicone encapsulant[J]. *Insulating Material*, 2024, 57(4): 56-59(in Chinese).
- [17] 曹鹤, 柏卉芷, 赵洁. 大功率电气元件封装用有机硅灌封胶的研制[J]. *有机硅材料*, 2020, 34(6): 16-19.
- CAO He, BAI Huizhi, ZHAO Jie. Preparation of silicone encapsulant for high-power electrical components[J]. *Silicone Material*, 2020, 34(6): 16-19(in Chinese).
- [18] ABRAHAM N S, HASEGAWA M M, SECUNDA M S. Application of the molecular adsorber coating technology on the ionospheric connection explorer program[C]//Systems Contamination: Prediction, Control, and Performance 2016. California: SPIE, 2016, 9952: 105-119.
- [19] SEIDEL R, KATZER K, BIECK J, et al. Influence of carbon-based fillers on the electromagnetic shielding properties of a silicone-potting compound[J]. *Materials*, 2024, 17(2): 280.
- [20] WU J K, ZHENG K W, WANG Q Y, et al. Binary promoter improving the moderate-temperature adhesion of addition-cured liquid silicone rubber for thermally conductive potting[J]. *Materials*, 2022, 15(15): 5211.
- [21] 侯新瑞, 宋华锋, 刘美辰, 等. 无溶剂单组分有机硅浸渍树脂性能研究[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(9): 84-88.
- HOU Xinrui, SONG Huafeng, LIU Meichen, et al. Study on property of solvent-free one-component organosilicon impregnating resin[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(9): 84-88(in Chinese).
- [22] 侯新瑞, 宋华锋, 刘美辰, 等. 无溶剂有机硅浸渍树脂合成及性能研究[J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 19(1): 21-27.
- HOU Xinrui, SONG Huafeng, LIU Meichen, et al. Studies on the synthesis and properties of solvent-free organosilicon impregnating varnish[J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 19(1): 21-27(in Chinese).
- [23] 胡景. 高功率LED灌封用高折光指数有机硅树脂的合成与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- HU Jing. The synthesis and properties of high refractive index of siliconeresin for high power LED encapsulation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015(in Chinese).
- [24] 赵树民, 陈新, 尚军生, 等. 有机硅灌封材料对计控电子设备的保护应用[J]. *山东冶金*, 2022, 44(4): 79-80.
- ZHAO Shumin, CHEN Xin, SHANG Junsheng, et al. Application of organosilicone potting materials for the protection of computerized electronic devices[J]. *Shandong Metallurgy*, 2022, 44(4): 79-80(in Chinese).
- [25] 张培琳, 赵悦菊, 滕济林, 等. 有机硅密封胶材料在电气设备中的应用[J]. *电子世界*, 2016(11): 82.
- ZHANG Peilin, ZHAO Yueju, TENG Jilin, et al. Application of organosilicone sealant materials in electrical equipment[J]. *Electronics World*, 2016(11): 82(in Chinese).
- [26] 王聪, 周熠, 温子巍, 等. 光伏组件用双组分有机硅结构胶的研制[J]. *有机硅材料*, 2022, 36(6): 14-18.
- WANG Cong, ZHOU Yi, WEN Ziwei, et al. Preparation of two component silicone structural adhesive for photovoltaic modules[J]. *Silicone Material*, 2022, 36(6): 14-18(in Chinese).
- [27] 刘玉强. 有机及有机/硅异质结光伏电池的电荷复合调控研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- LIU Yuqiang. Charge recombination of organic bulk heterojunction and organic/silicon heterojunction photovoltaics[D]. Suzhou: Soochow University, 2019(in Chinese).
- [28] 李涛, 刘鑫, 李牧松, 等. 单组分有机硅密封胶在汽车车灯领域的研究进展[J]. *化工科技*, 2022, 30(2): 89-94.
- LI Tao, LIU Xin, LI Musong, et al. Research progress of one-component siliconesealant in the field of automobile lights[J]. *Science & Technology in Chemical Industry*, 2022, 30(2): 89-94(in Chinese).
- [29] 提雅媚, 陆文卿, 孙安邦, 等. 有机硅密封胶在汽车领域的应用研究进展[J]. *有机硅材料*, 2019, 33(1): 66-70.
- TI Yamei, LU Wenqing, SUN Anbang, et al. Research progress of silicone adhesive applied in vehicles[J]. *Silicone Material*, 2019, 33(1): 66-70(in Chinese).
- [30] 李俐. 电子技术在现代汽车上的发展与应用[J]. *内燃机与配件*, 2017(23): 142-143.
- LI Li. Development and application of electronic technology in modern automobiles[J]. *Internal Combustion Engine*, 2017(23): 142-143(in Chinese).
- [31] 李鹏洲, 陶小乐, 郑苏秦, 等. 双组分有机硅密封胶的研制及其

- 在车灯行业的应用 [J]. 有机硅材料, 2017, 31(S1): 124-126.
- LI Pengzhou, TAO Xiaole, ZHENG Suqin, et al. Preparation of two-component silicone adhesive and its application in vehicle lamp [J]. *Silicone Material*, 2017, 31(S1): 124-126(in Chinese).
- [32] MOJSIEWICZ-PIEŃKOWSKA K, JAMRÓGIEWICZ M, ŻEBROWSKA M, et al. Double layer adhesive silicone dressing as a potential dermal drug delivery film in scar treatment [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2015, 481(1-2): 18-26.
- [33] 潘科学. 有机硅粘接促进剂的合成及其增粘无卤阻燃导热加成型有机硅灌封胶的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- PAN Kexue. Synthesis of silicone adhesion promoters and their adhesion enhancement for halogen-free flame retardant and thermal conductive addition-cure silicone encapsulant [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014(in Chinese).
- [34] 赵怀东, 刘文静. 有机硅凝胶在灌封技术中的应用 [J]. 航天制造技术, 2002(2): 37-39, 52.
- ZHAO Huaidong, LIU Wenjing. Application of organosilica gel in potting technology [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2002(2): 37-39, 52(in Chinese).
- [35] 邱浩孟, 王坤, 曾幸荣, 等. 室温固化加成型有机硅灌封胶粘接性能研究 [J]. 广东化工, 2017, 44(17): 52-54.
- QIU Haomeng, WANG Kun, ZENG Xingrong, et al. Study on the adhesive of tackifier for room temperature curing addition-cure silicone encapsulant [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, 44(17): 52-54(in Chinese).
- [36] 李志诚, 胡新嵩, 夏文龙, 等. 一种快速深层固化的脱醇型有机硅灌封胶的制备 [J]. 中国建筑防水, 2016(17): 18-21.
- LI Zhicheng, HU Xinsong, XIA Wenlong, et al. Preparation of a kind of fast deeply cured dealcoholized organic silicone pouring sealant [J]. *China Building Waterproofing*, 2016(17): 18-21(in Chinese).
- [37] 王静. 基于 Al_2O_3 /有机硅灌封复合材料的制备与性能 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- WANG Jing. Preparation and properties of based on Al_2O_3 /silicone potting composites [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022(in Chinese).
- [38] 赵登云. 高导热填料表面改性的研究及其应用 [D]. 上海: 东华大学, 2022.
- ZHAO Dengyun. Research and application of surface modification of high thermal conductivity filler [D]. Shanghai: Donghua University, 2022(in Chinese).
- [39] 李艳飞, 徐惠明, 王徐超, 等. 高导热加成型有机硅灌封胶的制备研究 [J]. 绝缘材料, 2017, 50(8): 73-76.
- LI Yanfei, XU Huiming, WANG Xuchao, et al. Preparation of addition cure silicone potting compound with high thermal conductivity [J]. *Insulating Material*, 2017, 50(8): 73-76(in Chinese).
- [40] 李娟, 黄旭, 宋丽贤, 等. 铂催化加成型有机硅灌封胶的制备及性能 [J]. 绝缘材料, 2012, 45(1): 5-7.
- LI Juan, HUANG Xu, SONG Lixian, et al. Preparation of addition type organosilicon encapsulant catalyzed by platinum and its properties [J]. *Insulating Material*, 2012, 45(1): 5-7(in Chinese).
- [41] 李国一, 陈精华, 林晓丹, 等. 碳化硅晶须对导热有机硅电子灌封胶性能的影响 [J]. 有机硅材料, 2011, 25(3): 141-144.
- LI Guoyi, CHEN Jinghua, LIN Xiaodan, et al. Effect of silicon carbide whisker on properties of thermal conductive silicone encapsulant [J]. *Silicone Material*, 2011, 25(3): 141-144(in Chinese).
- [42] CHO H B, NAKAYAMA T, SUZUKI T, et al. Formation and structural characteristic of perpendicularly aligned boron nitride nanosheet bridges in polymer/boron nitride composite film and its thermal conductivity [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(1S2): 01B05.
- [43] HANU L G, SIMON G P, CHENG Y B. Thermal stability and flammability of silicone polymer composites [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91(6): 1373-1379.
- [44] LEWIN M. Unsolved problems and unanswered questions in flame retardance of polymers [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, 88(1): 13-19.
- [45] GILMAN J W, JACKSON C L, MORGAN A B, et al. Flammability properties of polymer-layered-silicate nanocomposites. Polypropylene and polystyrene nanocomposites [J]. *Chemistry of Materials*, 2000, 12(7): 1866-1873.
- [46] LI S, GUI D, XIONG W, et al. Preparation and characterization of a two-component silicone gel sealant [C]//2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Changsha: IEEE, 2015: 840-844.
- [47] WANG G, ZHOU Z, HU Q, et al. Preparation of eco-friendly natural rosin-based $\text{SiO}_2\text{-NH}_2\text{@GO}$ hybrid sealant and study on corrosion resistance of Fe-based amorphous coating for steel substrate [J]. *Carbon*, 2023, 201: 170-188.
- [48] SALLEH N G N, ALIAS M S, GLÄSEL H J, et al. High performance radiation curable hybrid coatings [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2013, 84: 70-73.
- [49] CHO H, ASHIDA Y, NAKAMURA S, et al. Improvement of heat-resistance of RTV silicone elastomers with reduce environmental impact by loading nano-silica and calcium carbonate [C]//Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Kyoto: IEEE, 2011: 345-348.
- [50] JANA R N, CHO J W. Silicone-based cholesteric liquid crystalline polymers: Effect of crosslinking agent on phase transition behavior [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 114(6): 3566-3573.

[51] LIU J, WANG R, WU S, et al. One-pot synthesis of silicon based nanoparticles with incorporated phthalocyanine for long-term bioimaging and photo-dynamic therapy of tumors[J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(13): 135601.

[52] WANG G, ZHOU Z, ZHANG X, et al. Synthesis of novel waterborne silicone modified acrylic sealant and its corrosion resistance in Fe-based amorphous coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 170: 106950.

[53] CHEMWENO M K, CERNOHLAVEK L G, JACOBY W A. Deactivation of titanium dioxide photocatalyst by oxidation of polydimethylsiloxane and silicon sealant off-gas in a recirculating batch reactor[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2008, 58(1): 12-18.

[54] GONZÁLEZ-PÉREZ G, BURILLO G. Modification of silicone sealant to improve gamma radiation resistance, by addition of protective agents[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2013, 90: 98-103.

[55] WANG K, WEI Z, WEI Z, et al. Enhanced corrosion resistance of subsonic plasma sprayed nanostructured Al_2O_3 -13 TiO_2 coating by ultrasound-assisted sealing[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(9): 13852-13859.

[56] 范志山. 增强导热阻燃有机硅灌封胶粘接性能的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

FAN Zhishan. Studies on adhesion enhancement of flame retardant thermal conductive silicone encapsulant [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012(in Chinese).

[57] 邢平平. 含氟聚硅氧烷改性聚丙烯酸酯粘合剂的制备及应用 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.

XING Pingping. Preparation and application of polyacrylate binder modified with polysiloxane containing fluorine [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017(in Chinese).

[58] 吴向荣, 程宪涛, 靳利敏, 等. 加成型有机硅灌封胶的粘接性能研究 [J]. *合成材料老化与应用*, 2016, 45(2): 12-15.

WU Xiangrong, CHENG Xiantao, JIN Limin, et al. Study on the adhesive properties of addition curable silicone encapsulant [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2016, 45(2): 12-15(in Chinese).