材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251112001

陶封光电耦合器灌胶技术研究

李洪玉[1*]，金 晖[1]，黎元凯[2]，肖清惠[1]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；2. 广电计量检测集团股份有限公司，广州 511450）

摘 要： 陶封光电耦合器因尺寸小、密封腔体结构特殊，需通过灌胶工艺提升其绝缘性能以满足隔离电压要求。胶量过少难以有效提升绝缘强度，胶量过多则会影响密封封装可靠性，精确控制胶量是保证器件性能的关键。文章系统研究了灌胶材料选型、工艺流程及参数优化，提出一种采用45°斜针头从内瓷片中间倒角处灌胶的工艺方法，结合分层灌胶、真空除泡及精确气压控制，实现了胶量的精准调控与气泡的有效消除。结果表明，优化后器件的隔离电压从灌胶前的800 V提升至1 500 V以上，增幅超过87.5%，且通过热应力实验及批量产品筛选鉴定检验，验证了该工艺的可靠性与一致性。该研究为陶瓷器件密封腔体的灌胶工艺提供了可行方案与技术参考。

关键词： 陶封光电耦合器；隔离电压；控制胶量；灌胶工艺；热应力试验

中图分类号： TN36 **文章编号：** 1001－5868(2026)02－0340－05

Research on the Glue Filling Technology of Ceramic Sealed Photocouplers

LI Hongyu[1], JIN Hui[1], LI Yuankai[2], XIAO Qinghui[1]

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN;
2. GRG Metrology & Test Group Co., Ltd., Guangzhou 511450, CHN)

Abstract: A ceramic-sealed photocoupler, which is the core component for photoelectric conversion, must be filled with glue to increase its insulation performance and ensure that the isolation voltage meets the requirements. A low glue content limits the insulation performance, whereas a high glue content affects the device-sealing package. Therefore, accurately controlling the glue content significantly influences the performance of products. In this study, a gluing technology that can effectively control the amount of glue and eliminate bubbles is investigated. A 45°inclined needle is used for gluing from the chamfer in the middle of the inner porcelain plate to increase the isolation voltage by more than 87.5%（from 800 V to over 1 500 V）—this process ensures that the isolation voltage of the ceramic photocoupler meets the requirements. A reliability evaluation of the gluing effect is conducted through a thermal stress test, with the results demonstrating the ability of this gluing technology to meet the design requirements. This study provides a new concept for the cementing process of ceramic device-sealing cavities.

Key words: ceramic sealed photocoupler; isolation voltage; glue quantity control; glue filling process; thermal stress test

0 引言

光电耦合器是一种将发光芯片和光探测芯片集成于一体的光电器件，通过“电-光-电”转换实现输入与输出间的电气隔离。该器件具有尺寸小、抗干扰能力强以及工作温度宽等优点[1]，被广泛应用

收稿日期：2025－11－12.

*通信作者：李洪玉

于航空航天和计算机等系统中。随着电子器件向高压、高密度和高可靠性方向发展，光电耦合器面临的电气隔离强度和环境适应性要求也日益提高。

陶封光电耦合器以其优良的机械强度、热稳定性及气密性成为高压隔离应用的优选方案。而灌胶工艺技术作为陶封光电耦合器制造过程中的关键工艺，直接影响器件的绝缘性能、机械强度和长期可靠性。通过选择合适的灌胶材料、优化灌胶工艺参数和工艺方式，可提升陶封光电耦合器的隔离电压等级与环境适应性。

本文从灌胶材料选型、灌胶工艺流程及灌胶工艺参数等多个维度，系统阐述陶封光电耦合器灌胶技术的开发过程和最终效果。

1　问题及解决措施

1.1　陶封光电耦合器存在的问题

本文所涉及的光电耦合器采用表贴型金属陶瓷外壳，内部芯片采用胶粘接工艺，电极互连采用金丝键合工艺，整体封装则利用平行缝焊技术实现气密性密封，器件结构见图 1。

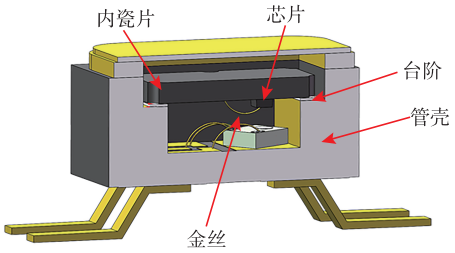


图 1　器件结构示意图

该器件在空封情况下，隔离电压为 800 V，不能满足器件隔离电压 1 000 V 的需求。因此，有必要在输入和输出端之间进行有效的绝缘隔离。为提高绝缘性能，采用灌封胶进行隔离处理。

1.2　灌胶材料的选择

灌胶材料的选择直接影响陶瓷光电耦合器的电性能，目前主流的灌封胶包括有机硅凝胶、环氧树脂和聚氨酯三大类，各类材料在性能指标上各具特点，其性能对比见表 1。

表 1　三类灌封胶性能对比

性能指标	有机硅凝胶	环氧树脂	聚氨酯
导热系数/[W/(m·K)]	0.6～3.5	1～4.5	＜1
介电强度/(kV/mm)	15～30	17～25	10～15
耐温范围/℃	－60～200	－60～150	－60～150，耐低温性能优异
固化收缩率/%	＜0.3	0.5～1.5	1.0～2.0
体积电阻率/(Ω·cm)	1×10^{15}	1×10^{14}～1×10^{15}	1×10^{12}～1×10^{14}
粘接强度	较低，但有利于应力释放	非常高，但内应力大	中等，介于有机硅和环氧树脂之间
典型应用	航空航天电子设备、高压电子器件	汽车点火器、变压器等	锂离子电池、电动车驱动器等

（1）有机硅凝胶

有机硅凝胶的主要优势在于宽泛的耐温范围（－60℃～200℃），能够有效抵御冷热冲击导致的内应力开裂问题。同时，有机硅凝胶固化后可以保持一定的弹性，以缓解陶瓷管座与芯片材料之间的热膨胀系数不匹配问题，从而提升器件在温度循环条件下的可靠性。

有机硅凝胶还具备优异的电气绝缘性能[2]，体积电阻率普遍高于 1×10^{15} Ω·cm，介电强度一般在 15～30 kV/mm 之间。有机硅凝胶可以支持室温固化或加温快速固化，并且具有良好的自排泡性能。通过真空脱泡，可以进一步消除气泡，提高灌胶质量。

（2）环氧树脂灌封胶

环氧树脂灌封胶因其优异的力学性能和粘接强度，在电子元器件灌封中被广泛应用。环氧树脂固化后具有较高的机械强度[3]，能够有效保护内部元件免受机械冲击与振动的影响。

在电气性能方面，环氧树脂灌封胶的介电强度可达 17 kV/mm，适用于高压场景。环氧树脂的导热系数范围一般为 1～4.5 W/(m·K)，通过添加氧化铝、氮化硼等导热填料，可进一步提升其散热能力，满足发热元件的散热需求。环氧树脂的主要局限性在于其固化收缩率较高且质地脆硬，这一特性使其在高温环境下难以有效释放热应力，从而极易诱发开裂。此外，环氧树脂通常是双组份，操作窗口较窄，混合后需要在一定时间内完成灌胶，否则会影响流动性和灌胶效果。

（3）聚氨酯灌封胶

聚氨酯灌封胶具有优异的耐低温性能，在

－60℃环境下仍能保持弹性，适用于户外低温设备。聚氨酯的导热系数普遍低于1 W/(m·K)，且耐湿热老化性能较差，长期使用后强度下降可能超过30%，不适用于高湿环境。此外，聚氨酯灌封胶固化后表面不平滑，需要进行后续打磨处理，导致工艺复杂度增加。

综合考量各类灌封胶的特性，结合陶封光电耦合器的实际需求，采用有机硅凝胶进行灌胶可以实现最佳的综合性能。同时，为了确保灌胶时胶体能够有效成型和满足流动性需求，选取了一种粘度约23 000 mPa·s的硅胶作为陶封光电耦合器的灌胶材料。

1.3 灌胶方案设计

灌胶工艺是决定陶封光电耦合器能否达到设计性能的关键所在，其流程复杂且涉及多道工序与关键参数的精细化控制。完整的灌胶工艺流程包括多个环节，如灌胶前准备、灌胶材料脱泡、灌胶操作和固化等，每个环节的控制都会直接影响最终产品的性能和可靠性。

灌胶操作流程是根据产品结构特点选择合适的工艺进行的。对于简单结构，可以采用一次灌胶工艺；对于复杂结构，则需要采用分层灌胶工艺。根据光电耦合器的结构特点，结合选取硅胶的流速，采用分层灌胶工艺。通过在内瓷片装配前先进行点胶，再在内瓷片装配后进行灌胶，灌胶操作流程如图2所示。

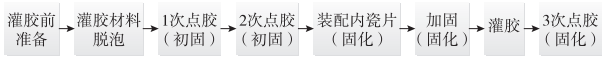


图2 灌胶操作流程图

在灌胶过程中，需要精确控制胶体流动速度和灌胶角度，以防止形成气穴或填充不满。需要进行控制的工艺参数包括使用的针头规格、针头形状及点胶机气压设置等。

溢胶控制对光电耦合器的性能至关重要，需先在管壳底部和瓷片上填充部分胶，装配后再进行灌胶，利用界面差和液体张力使管壳内部充满胶，从而精确控制溢胶范围。为了消除灌胶过程中出现的气泡，使用真空除泡方式进行灌胶后的气泡控制。

固化过程是灌封胶从液态转变为固态的关键阶段，固化条件直接影响灌封材料的最终性能。硅胶通常支持室温固化或加温快速固化。综合考虑材料性能和生产效率，选择加温快速固化工艺方式。

2 灌胶工艺研究

2.1 灌胶前准备

灌胶前的准备工作主要包括陶瓷管壳内部清洁、管壳表面处理等。管壳内部清洁主要是在显微镜下使用氮气枪进行吹扫浮动多余物或使用针、刀片剔除不易吹掉的多余物，芯片上的多余物采用金丝、芯片专用除尘胶粘除或采用无尘纸蘸取无水乙醇进行擦除。管壳表面处理主要是通过预烘排除管壳内部的潮气[4]，避免点胶时产生气泡，预烘条件为：150℃±5℃，10 min±5 min。

2.2 灌胶材料脱泡

有机硅凝胶使用前，需进行脱泡处理[5-6]，去除在混合和灌装过程中引入的空气气泡，以确保最终固化后的产品具有优异的电气性能、机械性能、光学性能和长期可靠性。脱泡方法采用真空搅拌脱泡机进行，搅拌脱泡条件为：2 000 r/min，5 min。

2.3 灌胶工艺参数研究与确认

灌胶工艺质量直接影响器件的最终性能，因此设计合理的灌胶操作流程、精确的灌胶工艺参数以及合适的固化工艺至关重要。

在装配内瓷片前先在管壳和内瓷片上进行一次点胶和二次点胶，对于管壳胶量需覆盖底部并包裹芯片和金丝，对于内瓷片胶量需包裹芯片和金丝，避免装配内瓷片后内瓷片上的胶和管壳腔体内的胶相连，如图3所示。

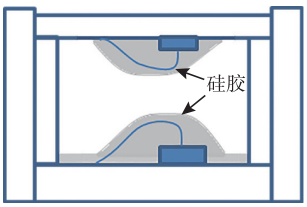


图3 装配后硅胶形貌示意图

由于胶体流动性较好，二次点胶后都需要先进行初固成型。根据胶的特性，当温度在80℃以上，时间超过5 min时，胶体较易成形。因此，初固温度定为90℃±5℃，初固时间定为5 min±2 min。

将内瓷片装配到管座里，以实现后续灌胶操作。由于瓷片和管座之间需要实现电气连接，选择采用具有导电功能的导电银胶进行装配。在显微镜下，在管壳内台阶位置处涂覆导电胶再把瓷片平整装配到管座内并进行导电胶固化。

为防止硅胶热胀冷缩对瓷片产生较大的应力，导致瓷片松动或脱落，可以使用环氧胶对内瓷片进行加固，环氧胶的热膨胀系数应尽量与硅胶热膨胀系数相近，点胶后需要进行固化。

灌胶的目的是将管腔内填满胶体，以满足光电耦合器隔离性能的要求。操作过程需要精确控制胶体填充位置，并确保灌胶后无气泡。胶体内颗粒均小于10 μm，且流动性较好，使用较小规格针头可保证出胶量的一致性，因此采用32 G的45°点胶针进行灌胶。为了便于观察和保证出胶量，两侧分开灌胶，将点胶针开口方向正对内瓷片一侧开口（倒角处）伸入管壳内部进行灌胶，灌胶后胶体高度不能超过台阶表面并留放气口，另一侧也按相同方式进行操作。点胶气压过大不易控制胶量，过小则影响生产效率。为控制胶量的一致性，点胶气压应设定在25±10 psi。为了不影响器件平行缝焊，灌胶后胶高度以不超过内瓷片高度为基准，宽度约为点胶针头下针位置到管壳台阶位置的3/4处，如图4所示。

为了消除灌胶过程中产生的气泡，使用真空箱进行除泡。经试验验证当真空度为－98.8 kPa、保持时间在5～10 min时，可有效消除气泡。

为避免电极边缘、棱角处电荷聚集，即局部电场强度过高导致尖端放电，在管壳和内瓷片连接的周围涂覆硅胶。涂覆完成后进行高温固化，推荐固化温度为150℃±5℃、固化时间为2 h，考虑到烘箱的升温时间在5～10 min，并留有一定的余量，将固化温度定为150℃±5℃，固化时间定为2 h±0.5 h。



图4　灌胶后示意图

2.4　不同灌胶参数对隔离电压的影响情况

根据试验结果，对隔离电压有较大影响的参数为胶量的真空除泡的真空度，其中胶量影响最大，具体影响如表2所示。

表2　不同灌胶参数的结果

胶量	真空度/kPa	真空时间/min	隔离电压/V	结论
内瓷片覆盖的腔体内约3/5充满胶			800～900	不合格
内瓷片覆盖的腔体内约3/4充满胶	－85	5	900～1 000	部分不合格
	－98.8	5	920～1 100	部分不合格
内瓷片覆盖的腔体内几乎充满胶，仅留2个放气口	－85	5	1 300～1 700	合格
	－98.8	5	1 500～1 800	合格
胶体不超过内瓷片上边缘2/3处	－98.8	5	固化后胶体高度超过封接环	无法封装

3　灌胶效果评价

灌胶后光电耦合器的性能测试与可靠性评估是验证灌胶技术有效性的关键环节[7]，主要包括隔离性能、热性能及环境适应性等[8-9]。隔离性能通过隔离电压测试进行评估，热性能主要通过热循环试验评估灌封胶与管壳、金属材料之间的热膨胀系数匹配性[10]，光电耦合器通常工作于恶劣环境中，需评估灌封胶的耐环境能力。

按照上述灌胶工艺方案制作50只灌胶样品，固化后进行封盖。对样品进行隔离电压测试（RH≤50%，t=60 s，I_{IO}≤0.5 mA），样品的隔离电压值都在1 500 V以上，灌胶前隔离电压在700～800 V，隔离电压提高了87.5%以上。

对样品进行热应力试验，包括高温烘烤（150℃，96 h）、温度循环（－65℃～150℃，10次）和电老炼试验（125℃，160 h），试验后参数性能正常。

选择该样品生产了一批产品（共计319套），生产完成后进行电性能测试、筛选试验和鉴定试验（环境温度：21℃～25℃，环境湿度：46%～50%），以验证灌胶工艺的可靠性。筛选和鉴定检验均合格，如表3和表4所示。

表3　筛选试验项目及结果

试验项目	试验条件	合格数	不合格数
电测试		319	0
稳定性烘焙	150℃，96 h	319	0
温度循环	65℃～150℃，10次	319	0
恒定加速度	Y_1方向，加速度29 400 m/s^2	319	0
PIND		319	0
电测试		319	0
电老炼	125℃，160 h	319	0
光电终测		319	0
密封		319	0

表4 鉴定检验试验项目及结果

分组	试验项目	试验条件	合格数	不合格数
B	PIND		5	0
	可焊性	245℃,10 s	4	0
	密封		15	0
C1	温度循环	65℃～150℃,10次	5	0
	耐湿		5	0
	恒定加速度	Y_1方向,加速度29 400 m/s^2	5	0
	随机振动	功率谱密度:30 (m/s^2)^2/Hz,加速度总均方根值:207.1 m/s^2	5	0
	密封		5	0
	终点测试		5	0
C3	稳态寿命	125℃,1 000 h	5	0
	终点测试		5	0
C4	静电放电敏感度	1 000 V	3	0
	终点测试		3	0

4 结论

本文研究了陶瓷光电耦合器灌胶技术的材料选择、工艺实现及性能评估等,得出以下结论:

(1)有机硅凝胶因其高电气绝缘强度、宽耐温范围及优异的缓冲弹性等综合性能,成为高压、高可靠光电耦合器灌封的首选材料。

(2)通过设计合理的灌胶流程、优化灌胶工艺参数包括精确控制点胶气压和溢胶位置并进行真空除泡工艺等,显著提升了陶瓷光电耦合器的隔离电压,同时确保光电耦合器良好的热性能和环境适应性。

该灌胶工艺主要适用于对电气安全、系统可靠性及信号完整性有严苛要求的场景,如高隔离电压与浪涌耐受、高海拔低气压环境,以及长期耐湿防污染工况。然而,该工艺也存在潜在风险:胶体内残留气泡易引发绝缘击穿、材料老化可能导致介电强度下降、工艺控制不当会使胶体变脆。因此,必须对工艺细节进行严格控制。

参考文献:

[1] 曹湘腾,李应辉,吴 健,等. 高压隔离光电耦合器的研制[J]. 半导体光电,2005,26(5):394-396.
Cao Xiangteng, Li Yinghui, Wu Jian, et al. High-voltage isolation optocoupler[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(5): 394-396.

[2] 章 坚. 有机硅灌封材料的研究进展[J]. 精细与专用化学品,2009,17(8):15-17.
Zhang Jian. The research progress of silicone encapsulating materials[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2009, 17(8): 15-17.

[3] 罗 刚. 电子器件灌封材料的现状及发展趋势[J]. 实验科学与技术,2010,8(3):20-22,33.
Luo Gang. Present situation and development trend of potting materials using in electron device[J]. Experiment Science & Technology, 2010, 8(3): 20-22, 33.

[4] 黄绍春,黄烈云,彭金萍,等. 多晶硅/硅界面处理工艺对硅光敏晶体管性能影响的比较研究[J]. 半导体光电,2025,46(1):70-74.
Huang Shaochun, Huang Lieyun, Peng Jinping, et al. Effects of polysilicon/silicon interface processing on phototransistor performance[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(1): 70-74.

[5] 徐文辉,陈 云,王 立. SiC混合功率模块封装工艺[J]. 电子与封装,2016,16(3):1-3,8.
Xu Wenhui, Chen Yun, Wang Li. Packaging process of SiC hybrid power module[J]. Electronics and Packaging, 2016, 16(3): 1-3, 8.

[6] 关亚男,王广奇. 微电路模块灌封工艺研究[J]. 微处理机,2021,42(1):23-26.
Guan Yanan, Wang Guangqi. Study on potting process of microcircuit module[J]. Microprocessors, 2021, 42(1): 23-26.

[7] 程甘霖,张芮萌,王 丹,等. 空间应用CMOS图像传感器寿命评估方法研究[J]. 半导体光电,2025,46(2):248-254.
Cheng Ganlin, Zhang Ruimeng, Wang Dan, et al. Life-evaluation method of CMOS image sensor for space application[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(2): 248-254.

[8] 肖诗满. 光电耦合器封装及相关失效机理[J]. 半导体技术,2011,36(4):328-331.
Xiao Shiman. Package and corresponding failure mechanism of optical couplers[J]. Semiconductor Technology, 2011, 36(4): 328-331.

[9] 许艳君,符佳佳,闫玉波,等. 金属陶瓷密封型光电耦合器结构分析研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2023,41(1):44-48.
Xu Yanjun, Fu Jiajia, Yan Yubo, et al. Research on construction analysis of photoelectric coupler with metal-ceramiac hermetic package[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2023, 41(1): 44-48.

[10] 黄姣英,何明瑞,高 成,等. 灌胶工艺对陶封隔离器键合点影响仿真分析[J]. 现代电子技术,2022,45(10):5-9.
Huang Jiaoying, He Mingrui, Gao Cheng, et al. Simulation analysis of influence of glue-potting workmanship on bonding point of ceramic seal isolator[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(10): 5-9.

作者简介:

李洪玉(1981—),女,高级工程师,主要从事微组装工艺方面的研究。