

叠片式滑环绝缘隔片半固化成型工艺研究

施英莹 刘国民 王永松 贺晓斌 赵利顺 周建成

(上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

文 摘 空间柱式导电滑环的制造过程中,环体组件成型质量直接影响滑环的绝缘性能和电传输稳定性。为提升叠片式滑环环体组件在电镀过程中的密封性与绝缘可靠性,本文提出了一种基于绝缘隔片半固化处理的防浸渗工艺。该方法在组件组装前于隔片端面涂覆环氧胶膜并进行半固化处理,通过轴向加载形成预封闭结构。实验设计了专用涂覆工装,系统分析了膜层厚度控制与粘结性能,并通过清洗效率、EDS能谱分析和组件剖切实验验证该技术的有效性。结果表明,该工艺显著提升了组件电镀阶段的密封性能,清洗效率提高约5倍,环间绝缘值稳定提升至1 500 M Ω 以上。研究结论认为,绝缘隔片半固化工艺具备良好工艺适应性和推广前景,为高压长寿命空间滑环提供了有效的制造工艺支撑,是一种提高高可靠空间滑环制造质量的有效技术路径。

关键词 环体电镀,绝缘隔片,半固化工艺,防浸渗技术

中图分类号:TB3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.S1.013

Research of Semi-cured Molding of Laminated Slip Ring Insulation Spacers

SHI Yingying LIU Guomin WANG Yongsong HE Xiaobin ZHAO Lishun

ZHOU Jiancheng

(Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200245))

Abstract In the manufacturing process of space column conductive slip ring, the molding quality of the ring body assembly affects the insulation performance and electrical transmission stability of the slip ring directly. In order to improve the sealing and insulation reliability of the ring body assembly of the laminated slip ring during the electroplating process, this paper proposes an anti-infiltration process based on semi-curing treatment of insulating spacers. This method includes coating epoxy film on the end surface of the spacer before assembly and performing, and forming a pre-closed structure through axial loading. A special coating tool was designed experimentally, and the film thickness control and bonding performance were systematically analyzed. The effectiveness of the technology was verified by cleaning efficiency, EDS spectrum analysis and component sectioning experiments. The results show that the process significantly improves the sealing performance of the component during the electroplating stage, the cleaning efficiency is increased by about 5 times, and the insulation value between the rings is stably increased to more than 1 500 M Ω . The research conclusion believes that the semi-curing process of insulating spacers has good process adaptability and promotion prospects, provides effective manufacturing process support for high-voltage and long-life space slip rings, and is an effective technical path to improve the manufacturing quality of high-reliability space slip rings.

Key words Ring plating, Insulating separator, Semi-curing process, Anti-impregnation technology

0 引言

空间导电滑环是航天器中实现旋转结构间电功率和信号传输的关键部件,其绝缘可靠性直接关系到整星能源系统的安全性。随着低轨和同步轨航天器使用寿命延长,特别是在高电压、长寿命、高可靠

性要求下,滑环系统面临严峻挑战^[1]。柱式导电滑环因其结构紧凑、通道多、载流强等优势被广泛应用,其环体组件由导电环与绝缘隔片交替叠装组成,是实现多通道导电的核心结构。为获得优异的电接触性能,该组件需在灌封固化以及机加工后进行环槽

收稿日期:2025-05-23

第一作者简介:施英莹,1986年出生,硕士,主要从事导电滑环设计与制造研究工作。E-mail:syy1986@126.com

电镀,但此阶段导电环与隔片之间可能由于装配原因存在微小缝隙,电解液易通过毛细作用渗入环间,若清洗不彻底将导致绝缘性能下降甚至出现击穿失效^[2]。

针对此问题,提出在环体组件成型初期引入绝缘隔片“半固化”处理工艺,即在隔片端面涂覆一层厚度可控、材质匹配的环氧类胶膜,并在一定温度下进行预固化^[3],使其在轴系加载后形成具有封闭效果的界面层^[4-6]。该工艺一方面与后续灌封胶材质兼容,避免界面材料应力相互不匹配^[7-8],另一方面通过预加载消除结构间隙,阻断电解液渗透路径,实现制造全过程的绝缘保护^[9]。

为验证该防浸渗工艺的实效性,本文从工艺原理出发,系统研究膜层厚度控制技术、涂覆设备设计与参数控制方法,开展胶膜性能试验及拉脱力检测,进一步通过组件实物加载、电镀清洗、剖切分析及EDS元素分析等手段,对比评估采用半固化工艺前后组件绝缘性能与清洗效率的差异。

1 工艺原理与设计方案

1.1 环体组件结构与电镀风险

如图1所示,柱式滑环的环体组件由多层导电环与绝缘隔片交错叠装而成,依靠隔片外径与导电环内孔的精密配合完成径向定位,通过整体轴向压紧保证结构刚性。环体灌封及环槽机加工后进行电镀,其环槽电镀质量是影响电接触性能的关键因素。电镀后需采用多频次超声波清洗环体组件去除残留电解液,但在叠片式滑环环体组件结构中,导电环与隔片之间微小缝隙无法有效阻止电解液渗透,存在一定绝缘失效风险。

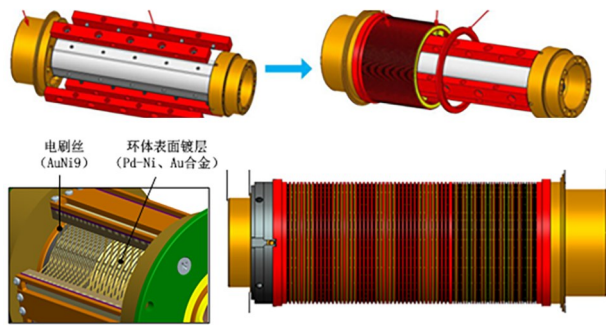


图1 导电滑环环体组件示意

Fig. 1 Schematic diagram of the conductive slip ring assembly

影响环间渗透的主要因素包括:1)隔片端面与导电环贴合不严密造成毛细通道;2)灌封固化前结构稳定性弱,缝隙易变形扩大;3)清洗不彻底造成电解液残留。这些问题不仅降低绝缘电阻,还可能在轨期间引发局部击穿,成为可靠性瓶颈。所以提出

绝缘隔片半固化工艺以消除环间电解液渗透风险,通过组环预紧消除环间间隙,实现电镀环节电解液无渗透的目标。

1.2 绝缘隔片半固化及工艺流程参数设定

为消除电镀过程中的渗透风险,提出一种在环体组件叠装阶段前对绝缘隔片进行表面半固化处理的工艺。采用与灌封材料一致的30334/30335双组分环氧胶(如果灌封材料为E51或其他胶类,半固化胶则替换一致),通过质量比4:3调配后在隔片双面涂覆形成极薄胶膜,控制单面膜层厚度为 $(20\pm 5)\mu\text{m}$,并进行 $60\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ 的预固化处理。

此类胶膜因与后续灌封材料体系一致,固化后可与整体灌封胶形成统一界面,避免因材料不兼容导致界面失效。半固化膜层在环体预紧过程中被压入微间隙中,形成有效物理密封屏障,阻止电解液在电镀阶段渗入相邻层。同时,该膜层不影响后续加工及绝缘间隙控制,兼顾结构稳定性与可靠性。

半固化胶膜的工艺流程主要包括:表面预处理、胶液配比、真空脱泡、胶膜涂覆、刮涂整形、低温烘干和半固化。操作顺序如图2所示。

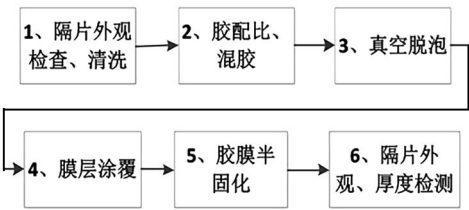


图2 绝缘隔片半固化工艺流程

Fig. 2 The process of pre-curing the insulating separator

①隔片预清洗:采用无水乙醇超声波清洗20 min,清除表面油污,确保膜层附着;

②胶液配比与脱泡:按4:3质量比调配30334与30335胶液,混合后 $(80\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下真空脱泡15 min;

③涂覆与刮涂:使用专用涂胶工装与 $20\mu\text{m}$ 刮刀控制胶层厚度,刮涂均匀性通过丝网印刷模板辅助实现;

④烘干与半固化:胶膜涂覆后于 $(60\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下烘干20 min,再半固化1 h,确保成膜稳定性;

⑤质量控制:使用千分尺对厚度进行批量检测,外观检查确认无裂纹、气泡、杂质,最终确保胶膜均匀、连续、透明;

⑥关键工艺参数如温度、时间、膜厚等经多轮试验优化确定,确保胶层稳定性与可重复性。

2 半固化胶膜涂敷工艺试验与验证分析

为验证绝缘隔片半固化工艺在提高环体组件电镀防浸渗性能方面的实际效果,围绕工装优化、试样

制备与性能测试以及浸泡实验三个方面展开系统性试验与数据分析。

2.1 涂覆工装与胶膜厚度控制优化

在实际工艺过程中,胶膜厚度的一致性与涂覆均匀性是影响绝缘隔片性能稳定性的关键因素。初期工艺采用手工刮涂方式进行胶膜处理,存在以下主要问题:一是涂覆厚度波动大,难以精准控制在单面 20 μm 的目标范围内;二是涂膜局部堆积与薄涂现象并存,导致隔片外形偏差和局部性能不均。



图3 手工涂覆试片
Fig. 3 Manually coated specimens

为提高涂覆质量与重复性,针对绝缘隔片特性设计了专用涂覆工装。该工装包括隔片定位夹具、钢制限位丝网以及定制刮刀三部分组成。其中丝网开孔精度控制在 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 以内,保障了膜层厚度均匀性。刮刀采用非磁性不锈钢材质加工,提升了涂膜均匀性与防污染性能。工装可对隔片正反两面进行稳定夹持和双面顺序操作,显著降低了人工操作的不确定性。

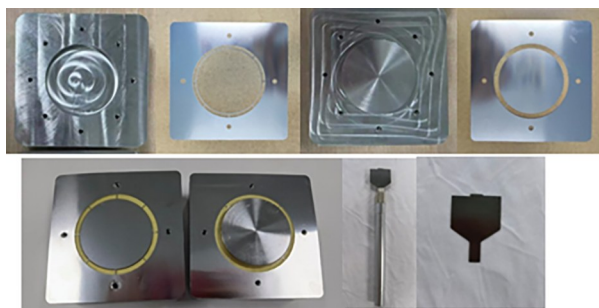


图4 涂覆工装、专用刮刀及 20 μm 厚度丝网
Fig. 4 Coating tooling, special scraper and 20 μm thickness wire mesh

通过对 20 件隔片进行工装涂覆验证,所得单面胶膜厚度控制在 19~21 μm ,标准差小于 2 μm ,厚度一致性优于传统手工方法,极大提升了叠片式环体组件装配间隙控制的精度,为后续电镀阶段的防渗透效果提供了工艺保障。

2.2 试样制备与性能测试

为进一步评估半固化处理后绝缘隔片的机械性和结构稳定性,开展了系统的试件性能测试。选用 10 件信号类绝缘隔片与 10 件功率类绝缘隔片,采用上述工装进行双面胶膜涂覆与半固化处理,固化温

度控制在 $(60\pm 2)\ ^\circ\text{C}$,时间为 1 h。

首先进行隔片外观质量检验。通过 3~5 倍放大镜与透光检查手段观察隔片表面。结果表明,无裂纹、针孔、起泡等缺陷,涂层呈均匀淡灰半透明状,显示出良好的工艺一致性,如图 5 所示。



图5 绝缘隔片半固化试件检测
Fig. 5 Inspection of insulating spacer pre-cured specimens

其次进行隔片厚度检测。使用千分尺对 20 件试样进行三点测量,数据表明:信号类隔片厚度集中分布在 553~572 μm ,功率类隔片厚度集中分布在 1 053~1 070 μm ,均符合设计要求。其中单层胶膜平均厚度为 19 μm ,验证了工艺设定的合理性,如图 6 所示。

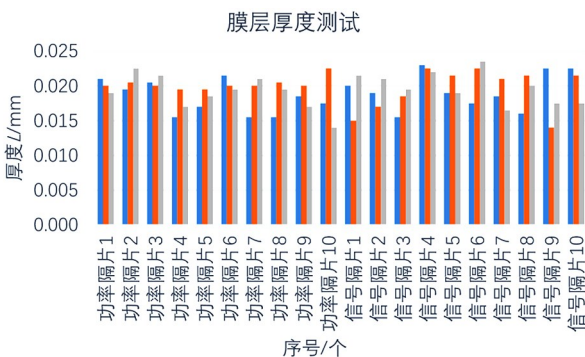


图6 膜层厚度测试
Fig. 6 Layer thickness test

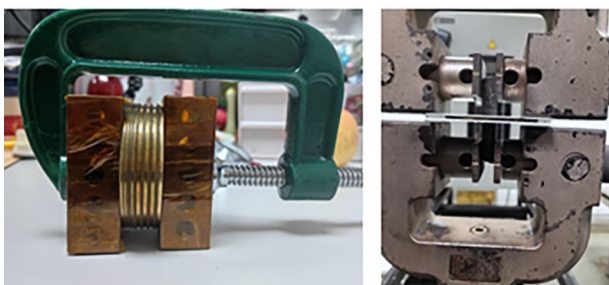


图7 绝缘隔片半固化试件拉脱力测试
Fig. 7 Pull-off force test of insulating spacer pre-cured specimen

进一步通过拉脱力测试分析绝缘隔片与导电环片的贴合强度。如图 7 所示,采用等载加压后夹具拉脱,记录最大破坏载荷。考虑到单层试件难以试验,采用四件半固化样件叠装作为拉脱力试件。结果显示:信号类隔片最小拉脱力为 50.8 N,功率类隔片最小拉脱力为 91.6 N,拉脱后无明显层间脱胶或边缘

翘起现象,表明胶膜的粘接性能与弹性恢复能力优良。

2.3 浸泡实验防渗性能分析

考虑到环体组件最终需经历环槽电镀与多次清洗等复杂液相环境,为验证半固化方案在实际工况下的密封效果,开展了模拟环体组件组装及电镀液浸泡试验。选用标准导电环片与已半固化的绝缘隔片进行交替叠装,形成叠片式环体组件结构。组件完成叠装后,采用高温预热与专用装配工装施加轴向力矩至 230 N·m 预紧,模拟实际环体成型过程中的力学压紧状态。随后组件不经灌封、不焊导线,直接浸泡于标准 Pd/Ni 电

镀液中 30 min,并依照常规流程完成有机保护剂清洗、超声波清洗、自然干燥等步骤。

为判断电解液是否渗入绝缘界面,分别对浸泡电镀液前后的导电环内圆处进行能谱分析(EDS)。如图 8 所示结果显示:仅在功率环清洗区域检测到微量 S、O 残留,未检测出 Pd、Ni 成分,信号环处亦未检测到 Pd、Ni 残留,表明电解液已完全清除,说明未发生电镀液渗漏。由此可判定,在模拟实际环体成型过程中,半固化工艺可在环体组件成型前有效封闭导电环与隔片间的毛细通道,有效抑制电解液渗入风险。

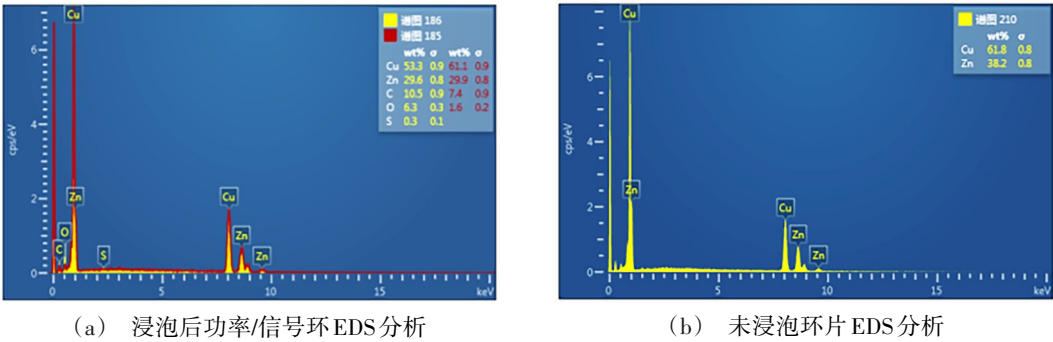


图 8 浸泡后功率/信号环 EDS 分析、未浸泡环片 EDS 分析

Fig. 8 EDS analysis of power/signal loop after immersion and EDS analysis of unsoaked rings

3 工艺试验验证对比分析

为验证绝缘隔片半固化工艺在实际环体组件中的工程适应性和性能提升效果,围绕某型叠片式滑环产品,开展包括加载响应、清洗效率、绝缘性能以及结构变化在内的一系列实物对比试验,并通过组件剖切分析胶液渗入行为的差异。

3.1 实物环体组件对比装配实验

3.1.1 装配加载过程及轴向应变分析

制备两套叠片式环体组件,分别编号 2023001(未采用半固化工艺)和 2023002(采用半固化工艺),开展装配加载、清洗时间与绝缘性能测试,并记录加载过程中的轴向力矩响应变化。

装配前,两套环体组件均按相同流程进行导电环与绝缘隔片的交替叠装,装配完成后置于 80℃ 恒温烘箱中进行 30 min 中温软化处理,便于后续轴向预紧力加载。加载采用螺母锁紧配合专用加载工装,在轴系两端施加最大 230 N·m 的轴向力矩,模拟组件成型过程中的压紧预载状态。

与非半固化组件相比,采用半固化隔片的 2023002 组件在达到 230 N·m 预紧力矩时,整体轴向长度增加 2.89 mm,换算可知每层隔片间存在一层 195 μm 左右的胶膜层,实现了环间微隙的有效填充与压缩封闭。该结构变化间接验证了半固化胶膜在

加载过程中未发生显著塑形流动,具备良好的压缩保持能力和微间隙填充能力。

3.1.2 清洗及绝缘性能测试

环体组件完成电镀后,如图 9 所示,立即进行去离子水超声波清洗,并采集清洗溶液电阻率进行绝缘性能判断。采用 R_{m1} 与 R_{m2} 比值评价清洗效果, R_{m1} 为环体组件电极两端间的绝缘电阻, R_{m1} 为清洗前值, R_{m2} 为清洗后值,要求 $R_{m1}/R_{m2} \geq 0.8$ 为合格标准。



图 9 环体组件电镀后清洗

Fig. 9 Cleaning of ring body components after plating

测试结果显示,非半固化组件 2023001 超声波清洗 48 h, R_{m1}/R_{m2} 值为 0.83,绝缘恢复边界性明显。而半固化组件 2023002 在清洗 8 h 后, R_{m1}/R_{m2} 值为 0.85,体现出环间残留电解液少、环槽清洗效率高的特点。说明半固化工艺在环体电镀后的清洗阶段可有效缩

短操作时间,减轻清洗强度并提升工艺可靠性。

对两套组件在清洗后进行电气绝缘性能测试。采用兆欧表对信号通道、功率通道与地之间进行绝缘电阻检测,测试电压为 500 V,要求所有通道间绝缘值 $\geq 1\,000\text{ M}\Omega$ 。测试结果如下:非半固化组件 2023001 中,有两个信号通道与功率通道之间绝缘值波动明显,仅为 $1\,100\text{ M}\Omega$ 边界水平;半固化组件 2023002 所有测试通道绝缘值均稳定在 $1\,500\text{ M}\Omega$ 以上,表现出更优的环间电绝缘能力。说明绝缘隔片半固化工艺在组环加载后能有效压紧环间缝隙,并在电镀、清洗等工序中显著降低电解液渗透与残留,提升组件成型后的整体绝缘性能。

3.2 剖切分析与胶液渗入情况验证

为进一步分析环体组件内部结构成型后的胶液分布状态及灌封胶在电镀后清洗环节的渗透行为,分别对两套组件进行实物剖切,对绝缘隔片与导电环的胶液残留进行对比观察与分析,如图 10、图 11 所示。

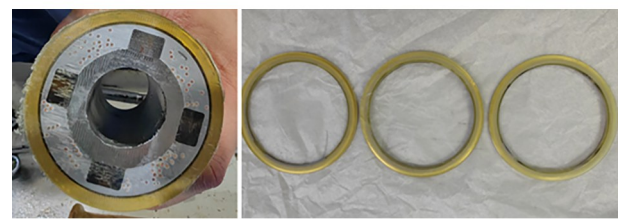


图 10 2023001 环体组件绝缘隔片胶液渗透情况

Fig. 10 Penetration of the glue of the insulating spacer of the 2023001 ring assembly

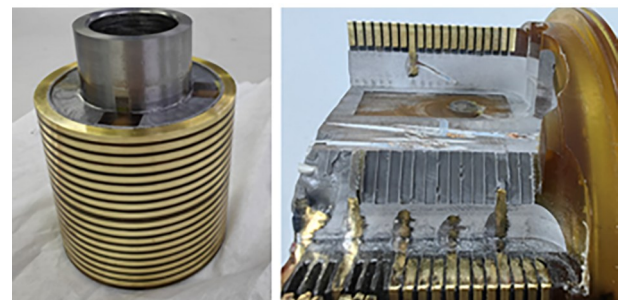


图 11 2023002 环体组件绝缘隔片胶液渗透情况

Fig. 11 Glue penetration of the insulating spacer of the 2023002 ring assembly

剖切采用径向 1/4 与轴向 1/4 交叉切面方式,精确控制剖切平面穿过信号通道与功率通道交界区域,观察不同隔片面的胶液渗透行为。随后对暴露界面进行手工清胶并逐层拆解,结合放大镜观察胶液渗入层间的深度、形态及分布范围,分析工艺封闭效果。

非半固化组件 2023001:存在轻微胶液渗入现象。部分绝缘隔片表面可见灌封胶毛细渗透痕迹,宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025 年 增刊 1

特别是未设凸台的一侧渗入深度超过 0.3 mm,且在多个环面出现边缘胶液堆积。说明装配缝隙未完全封闭,胶液可能在灌封及电镀后的热环境下,通过毛细通道或微隙迁移进入环间界面。

半固化组件 2023002:在所有剖切界面均未发现灌封胶液渗入痕迹,绝缘隔片表面洁净,隔片与导电环片间保持明显界限。说明采用半固化胶膜在组环预紧力作用下形成了高密闭性的物理隔离屏障,阻止了胶液迁移。

剖切验证结果表明,非半固化方案下环体组件成型过程存在一定程度的镀液渗透风险隐患,而半固化方案可在成型阶段实现环间有效隔断,从根本上抑制渗透行为,保护组件的绝缘结构完整性。

4 结论

(1)提出新型防浸渗工艺路径:通过对绝缘隔片端面涂覆与灌封胶相容的环氧胶膜,并进行预固化处理,有效封闭环间毛细通道,构建全过程电解液屏障。

(2)实现膜层厚度精密控制与一致性提升:设计专用涂覆工装,实现胶膜厚度控制在 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 范围内,解决传统手工涂覆膜层不均的问题。

(3)显著提升组件电镀工艺效率与绝缘可靠性:采用该工艺的环体组件清洗时间缩短至原来的 1/6,环间绝缘值显著提升,剖切分析证实无胶液渗入现象。

该方法具有材料体系兼容性强、操作过程可控性高、适配批量装配的特点,适合在高可靠空间滑环产品中推广应用,未来可进一步结合自动化装配、多点测厚与视觉检测手段,提升工艺一致性控制水平。

参考文献

[1] 李聪慧,张燕燕,曾泽祥,等. 载流摩擦磨损研究进展[J]. 润滑与密封,2022,47(7):153-167.
LI C H,ZHANG Y Y,ZENG Z X, et al. Research progress on current-carrying friction and wear [J]. Lubrication and Sealing,2022,47(7):153-167.
[2] 王鹏超,杜元晖,孙二双,等. 航天器用导电滑环局部放电影响因素试验研究[J]. 航天器环境工程,2025,42(1):91-97.
WANG P C,DU Y H,SUN E S, et al. Experimental study on factors affecting partial discharge of conductive slip rings for spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2025, 42 (1):91-97.
[3] 耿蕴娜,马贵春,刘洋,等. 复合材料构件热压罐成型模具温度场优化[J]. 兵器装备工程杂志,2024,45(12):240-246.

GENG W N,MA G C,LIU Y, et al. Optimization of mold temperature field in autoclave forming of composite components

[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(12):240-246.

[4] 赵海波,王海洋,王斌,等. 覆铜板用环氧树脂浇铸体脱泡方案对比研究[J]. 塑料科技,2022,50(10):70-73.

ZHAO H B, WANG H Y, WANG B, et al. Comparative study on defoaming schemes of epoxy resin castings for copper-clad laminates [J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(10):70-73.

[5] 温振雄,梁秋果,刘飞,等. 半固化片凝胶时间自动测试方法的研究[J]. 印制电路信息,2019(9):35-37.

WEN Z X, LIANG Q G, LIU F, et al. Study on automatic test method for gel time of prepreg sheets [J]. Printed Circuit Information, 2019(9):35-37.

[6] 程飞鹏,文昕,向艳,等. 叠层片式热敏电阻表面绝缘处理技术的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2025, 44(1): 110-119.

CHENG F P, WEN X, XIANG Y, et al. Research progress on surface insulation treatment technology of laminated chip thermistors [J]. Electronic Components and Materials,

2025,44(1):110-119.

[7] 倪洪江,邢宇,戴霄翔,等. 航空发动机用聚酰亚胺树脂基复合材料固化工艺及热稳定性能[J]. 材料工程杂志, 2022,50(7):102-109.

NI H J, XING Y, DAI X X, et al. Curing process and thermal stability of polyimide resin matrix composites for aero-engines [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(7):102-109.

[8] 于光. 磷系阻燃环氧电子封装材料研究进展[J]. 高分子通报,2024,37(5):630-639.

YU G. Research progress on phosphorus-based flame-retardant epoxy materials for electronic packaging [J]. Polymer Bulletin, 2024, 37(5):630-639.

[9] 李少敏,隋鹏,彭海春,等. 先进复合材料制造过程仿真技术研究现状[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(29): 12399-12410.

LI S M, SUI P, PENG H C, et al. Research status of simulation technology for advanced composite materials manufacturing processes [J]. Science Technology & Engineering, 2024, 24(29):12399-12410.