

低黏性粘结片加工工艺与性能研究

张殿朝，冯春明，杨天宇，金霞 *

(中国电子科技集团公司第四十六研究所，天津 300220)

摘要：粘结片(Prepreg)是多层印刷电路板(PCB)制造的关键基础材料，其厚度较薄但对表面平整度、力学性能和表面黏性要求极高。研究表明：张力对厚度均值有影响，张力、车速以及胶液黏度对材料的黏性有影响。采用DOE实验优化工艺参数，当张力25 N、车速13 m/min、胶液黏度410 cps时，材料具有良好的表面平整度(厚度标准偏差0.0071)、极低的黏性面积比(10%)，SEM显示无微裂痕，拉伸强度达到10.68 MPa，提升幅度超过35%，断裂伸长率达到74.1%，提升幅度超过33%。

关键词：粘结片；胶液黏度；拉伸强度；断裂伸长率

中图分类号：TQ330.387

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2025)12-0016-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.12.004

0 引言

随着电子设备向高性能、小型化方向发展，多层印刷电路板(PCB)的需求日益增长^[1]。粘结片(Prepreg)作为PCB层间粘合的关键材料，其性能直接影响PCB的可靠性^[2]。传统粘结片材料通常由树脂浸渍的玻璃纤维布构成，需在后续压合过程中完全固化以实现层间结合^[3]。这种材料的介质损耗受原材料及加工工艺限制，难以低于0.0015。PTFE材料因其损耗极低(理论损耗值为0.0009)而受到日益关注^[4]。但是PTFE具有自光滑性，无黏性，直接采用该材料难以实现粘结性能^[5~7]。

王等人以可熔性聚四氟乙烯为基体树脂，经过烧结，制备氟树脂柔性覆铜板^[8]。在实际应用中，粘结片材料的厚度通常要求极薄(一般厚度要求低于120 μm)，但是对表面平整度要求极高，多层粘结片的两层或多层叠加使用也较为常见^[1]，但叠加时粘结片间的贴合错位、气泡及交叠褶皱会严重影响PCB的加工质量。因此，在粘结片的研究工作中，材料的力学性能(拉伸强度和断裂伸长率)以及黏性(Tackiness)的评估也至关重要^[9~10]，采用浸渍工艺制作粘结片在裁切、检验、包装及运输过程中易因黏性过高导致粘连报废，且在用户多层压合过程中极易出现因力学性能低下导致分层、爆板等问题，影响最终产品质量。

本研究通过系统分析浸渍工艺的关键参数对粘结片的微观形貌、表面平整度、黏性、拉伸强度和断裂伸长率的影响，提出优化方案，以实现低黏性、高平

整度、高拉伸强度、高断裂伸长率的粘结片材料的制备。

1 实验部分

1.1 主要材料与设备

所用原材料主要包括：PTFE薄膜(76 μm)，天津塑料研究所；碳氢树脂：聚丁二烯，北京燕山石化有限公司；交联剂：过氧化二异丙苯(DCP)，市售；硅烷偶联剂、助交联剂等助剂：市售。

所用设备主要包括：精密浸渍机(自研，工作宽度1 000 mm，最大车速30 m/min，张力(5~50 N)，高温烘箱(最高温度500 °C)，上海博迅。

1.2 工艺参数设计

实验选取张力(10~40 N)、车速(5~15 m/min)、胶液黏度(250~450)作为变量，采用DOE实验设计方法，研究张力、车速、胶液黏度对粘结片厚度均值、厚度均匀性和表面黏性面积比的影响，工艺参数设计见表1所示。

1.3 性能测试与表征

不同工艺参数所制样品性能测试见表2。

表面平整度：采用X射线厚度检测系统测量粘结片厚度，1 000 mm幅宽内每米测试35点，计算均值和标准偏差，标准偏差代表其表面平整度。

作者简介：张殿朝(1982-)，男，硕士，高级工程师，主要从事复合材料在电子行业应用方面研究工作。

表 1 工艺参数设计表

序号	张力 /N	车速 /(m·min ⁻¹)	胶液黏度 /cps	序号	张力	车速	胶液黏度 /cps
1	25	10	350	7	10	5	450
2	40	15	250	8	10	15	450
3	10	15	250	9	40	15	450
4	25	10	350	10	10	5	250
5	25	10	350	11	40	5	450
6	40	5	250	/	/	/	/

表 2 不同工艺参数所制样品的厚度和黏性测试

序号	厚度均值 /mm	表面平整度 /mm	黏性面积比 /%	序号	厚度均值 /mm	表面平整度 /mm	黏性面积比 /%
1	0.097	0.002	15	7	0.097	0.010	10
2	0.082	0.005	40	8	0.099	0.009	10
3	0.082	0.005	20	9	0.091	0.009	10
4	0.097	0.003	15	10	0.098	0.009	50
5	0.099	0.002	15	11	0.118	0.010	10
6	0.084	0.007	50	/	/	/	/

胶液黏度：博勒飞 LVDVS+ 黏度计测试表征。

黏性测试：按照 IPC-TM-650 2.4.1 的测试方法，将长度 50 mm 的压敏胶带牢固压到试样表面，挤走内部夹留的空气，贴上和揭下胶带之间的时间间隔为 30 s。目视检查胶带和测试区域，检查是否有任何测试材料部分从试样上剥离，如有剥离，记录剥离的面积比（%），如无剥离，记录为 0。

力学性能：根据 GB/T 1040.2—2006，采用万能拉力机测试薄膜的拉伸强度和断裂伸长率，选用 5A 标准试样。

微观形貌：德国蔡司公司 SUPPRA 55VP 场发射扫描电镜观察粘结片微观表面粗糙情况。

2 工艺参数对粘结片性能的影响分析

2.1 微观形貌分析

图 1 为不同工艺参数制作的粘结片表面微观形貌，图 1(a) 为样品 7、图 1(b) 为样品 11、图 1(c) 为样品 9、图 1(d) 为样品 2。扫描电镜显示：工艺参数对表面质量有较大影响，当张力较小时，表面出现微观凹凸不平图 1(a)；张力较大时，材料表面存在因过度拉伸产生微裂纹图 1(b)；随车速增加，微裂纹的尺寸和数量都有显著增加图 1(c)；随黏度降低，微裂纹的深度有加深趋势图 1(d)。

2.2 工艺参数对粘结片材料厚度均值和均匀性的影响

张力、车速、胶液黏度是浸渍过程中的关键参数，直接影响材料厚度均值及均匀性，间接影响材料的力学性能等关键指标。其中，张力通过影响材料的形变程度，间接影响胶液的流平性。适中的张力可确保材

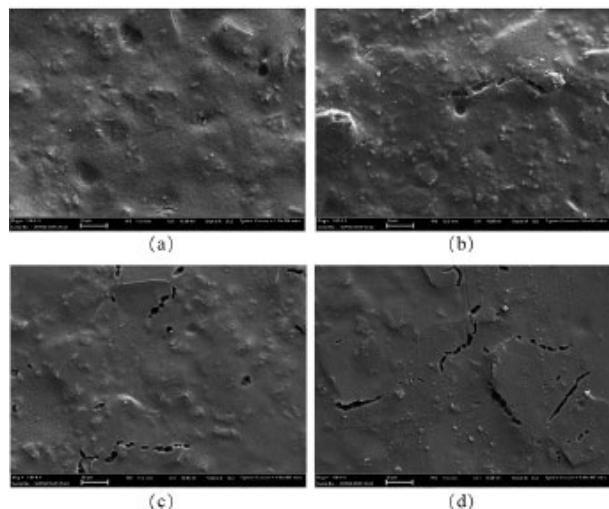


图 1 样品的表面微观形貌

料平整，为胶液提供稳定的涂覆表面。车速直接影响胶液流平时间，从而影响上胶量最终影响材料厚度及均匀性。胶液黏度直接影响树脂的黏度和反应活性，进而影响胶液在浸渍过程中的流动性。

实验结果表明：张力对厚度均值的影响较大（见图 2 左厚度均值主效应图中张力与厚度均值的斜率关系），但是对厚度均匀性的影响略小（见图 2 右厚度均匀性主效应图中张力与厚度均匀性均值的斜率关系）。张力过低会导致材料松弛，当张力较低时（10 N），材料易出现局部微小区域内波浪形状的变形，上胶后胶液难以均匀流平，导致局部出现微观的凹凸不平，见图 1(a) 所示。随着张力增大（25 N），有利于保持材料稳定，胶液均匀铺展，厚度均匀性良好，但是过高张力（45 N）会导致材料因过度拉伸产生微裂纹，见图 1(b) 所示，影响粘结片的机械强度。

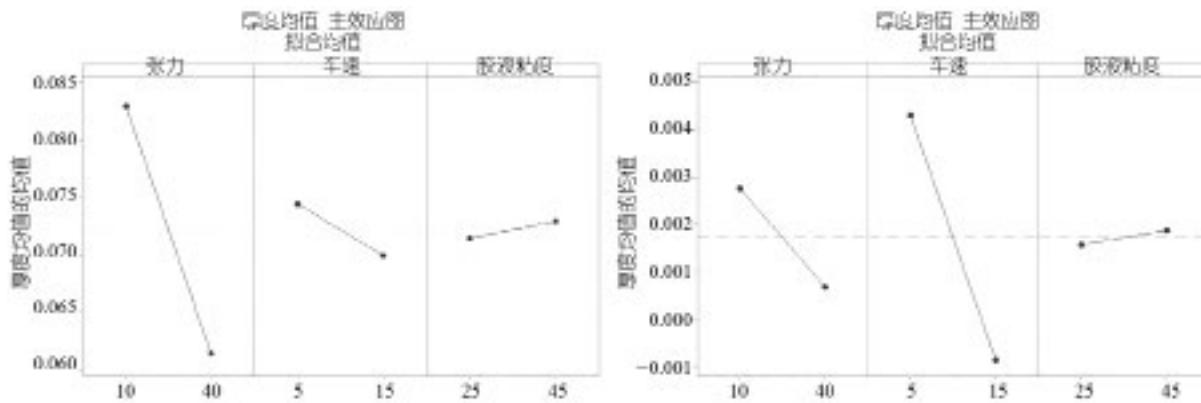


图 2 工艺参数对厚度均值和均匀性影响的主效应图

车速对厚度均值和厚度均匀性都有一定影响(见图 2 左厚度均值主效应图中车速与厚度均值的斜率关系和图 2 右厚度均匀性均值主效应图中车速与厚度均匀性均值的斜率关系)。车速过快可能导致胶液未充分流平即固化, 形成表面缺陷; 车速过慢则可能因胶液过度渗透导致材料局部增厚。优化车速可平衡生产效率和表面质量。当车速较低时(5 m/min), 胶液有充足时间流平, 但是过低的车速会导致胶液局部风干固化, 不利于表面平整度, 当车速增加, 胶液流平性与固化速度达到平衡, 表面平整度较好。当车速过高时, 胶液流平时间不足, 出现局部“橘皮开裂”现象, 见图 1(c) 所示。

胶液黏度对厚度均值和厚度均匀性都有一定影响(见图 2 左厚度均值主效应图中胶液黏度与厚度均值的

斜率关系和图 2 右厚度均匀性均值主效应图中胶液黏度与厚度均匀性均值的斜率关系)。黏度过高则导致胶液流动性差, 材料厚度明显增厚, 且厚度不均匀。随着黏度降低, 胶液流动性增强, 厚度均匀性有一定的提升。

2.3 工艺参数对粘结片材料黏性的影响

通常意义上, 胶液是对材料黏性影响最大的因素, 特别是胶液黏度的变化会影响树脂的黏度和反应活性, 继而影响材料的黏性。通过 DOE 实验设计的数据分析, 张力、车速对材料的黏性也有影响(见图 3 左黏性主效应图中张力、车速与黏性均值的斜率关系), 值得注意的是张力与车速之间还存在一定的交互作用(见图 3 右黏性交互作用图中左上位置张力、车速图中二者的延长线会交叉)。

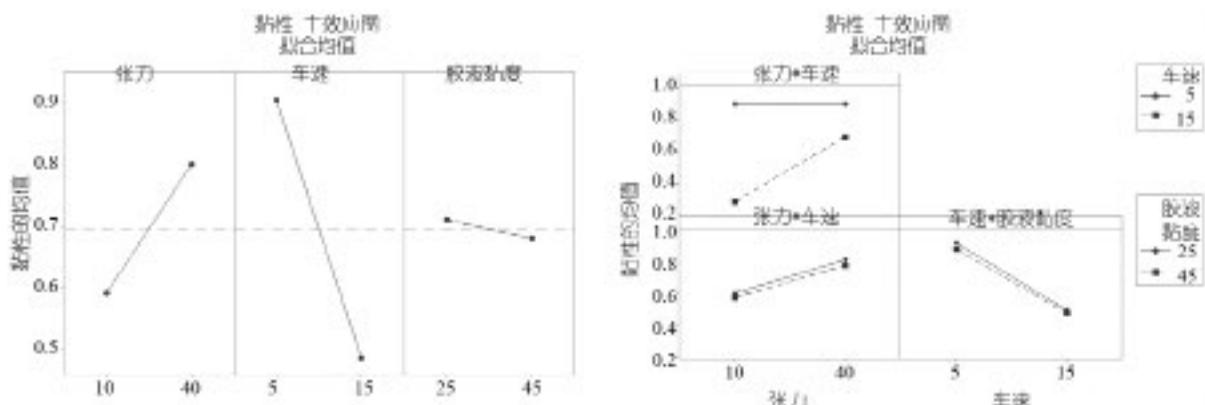


图 3 工艺参数对黏性影响的主效应图和交互作用图

实验结果表明: 与张力相比, 车速对材料黏性的影响略显著。当车速较低时容易导致树脂过度渗透, 从而增加材料黏性。当胶液黏度较低时, 浸渍后材料表面黏性较高。随着胶液黏度进一步升高, 树脂表面

出现预固化现象, 局部开裂更加明显, 见图 1(d) 所示, 不利于后续加工与使用, 在优化张力和车速工艺参数时需要特别注意工艺匹配性调整。

根据图 1、图 2、图 3 的表征与分析结果, 通过

控制张力和车速以及胶液黏度，可以改变树脂的流变特性，进而改进材料表面质量的基础上，对厚度均值、均匀性与表面黏性实现三个关键指标共同优化的目标。

3 低黏性粘结片的优化工艺与性能验证

基于张力、车速、胶液黏度对材料厚度和表面黏性的综合影响，采用统计分析工具的 DOE 响应优化器，寻找三者的匹配参数，通过控制张力和车速以及胶液黏度，改变树脂的流变特性从而改进材料厚度均匀性与表面黏性。通过响应优化器得到如下仿真结果，见图 4 所示。当张力为 25 N，车速为 13 m/min，胶液黏度 410 cps 时，仿真结果达到预期目标。预期可以得到表面黏性 12.07 %、厚度均匀性（标准偏差）0.006 9 mm，厚度均值 0.0 956 mm 的粘结片材料，可实现材料表面黏性、厚度均匀性、厚度均值的共同优化。

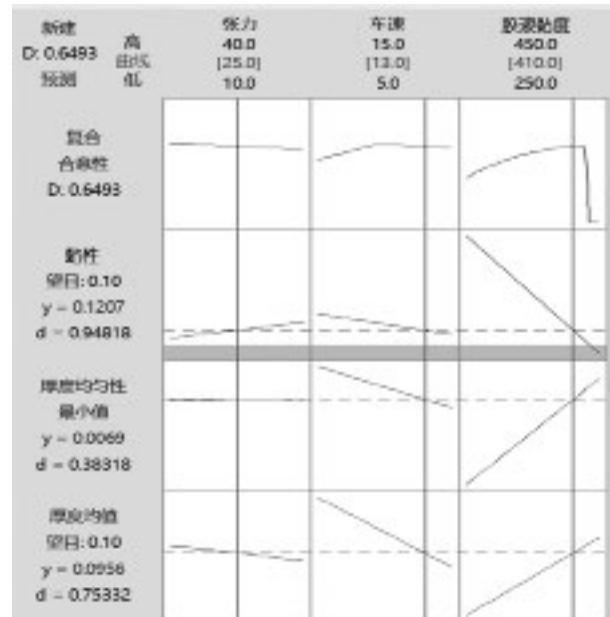


图 4 DOE 响应优化器

采用上述参数连续生产制作低黏性粘结片材料，并进行微观形貌、厚度均值、厚度均匀性、表面黏性、拉伸强度、断裂伸长率等测试。微观形貌测试结果见图 5 所示，其他测试结果见表 3 所示。其中工艺验证品命名为 PP，其他以表 1 中序号为准。

图 5 为优化工艺参数制作的低黏性半固化型粘结片表面微观形貌。扫描电镜显示：在 1 000 倍、200 倍条件下观测粘结片表面微观凹凸不平明显减少，无微小裂痕。对比图 1 中四个工艺参数的样品表面微观形貌均有改进效果。

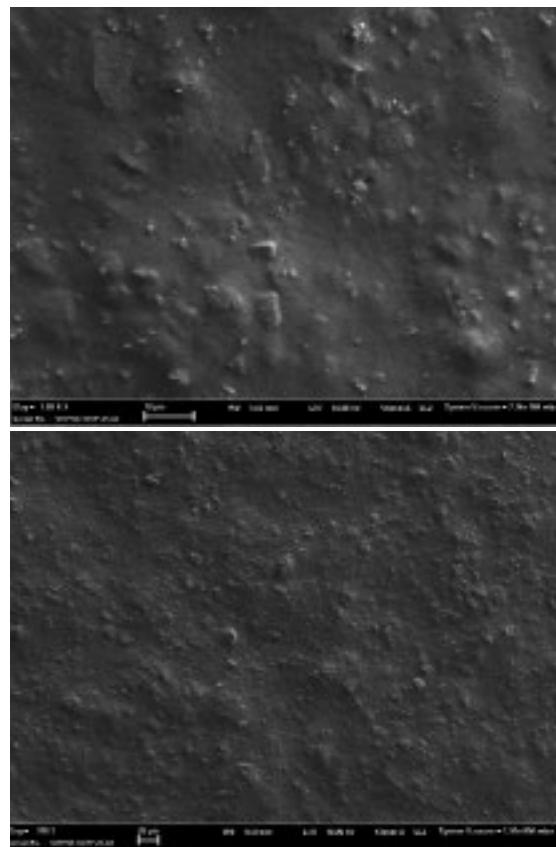


图 5 样品的表面微观形貌

表 3 不同工艺参数所制样品的性能测试结果

序号	厚度均值 /mm	表面平整度 /mm	黏性面积比 /%	拉伸强度 /MPa	对比 1# 变化幅度	断裂伸长率 /%	对比 1# 变化幅度
PP	1.005	0.007 1	10	10.68	35%	74.1	33%
7	0.097	0.010	10	7.89	/	55.6	/
11	0.118	0.010	10	7.51	/	23.9	/
9	0.091	0.009	10	6.99	/	27.0	/
2	0.082	0.005	40	6.28	/	10.1	/

4 结论

(1) 扫描电镜结果表明：当张力、车速、胶液黏度进行匹配性调整后（参数组合为 25 N、13 m/min、410 cps），在 1 000 倍数下观测，粘结片表面微裂痕

显著减少，在 200 倍数下观测，微观形貌连续且紧凑，表面质量良好。

(2) DOE 实验及验证性实验数据分析表明：张力对厚度均值的影响较大，但是对厚度均匀性的影响略

小；车速和胶液黏度对厚度均值和厚度均匀性都有一定影响；张力、车速对材料的黏性也有影响，并且张力与车速之间还存在一定的交互作用，调整时需要重点关注张力、车速和胶液黏度工艺参数的匹配性。

(3) 根据各因子主效应与交互作用的影响情况，采用 DOE 响应优化器寻找更优参数组合，在张力为 25 N、车速为 13 m/min、胶液黏度 410 cps 的工艺参数组合条件下，制作的粘结片材料具有较薄的厚度水平（厚度均值 1.005 mm）、良好的表面平整度（厚度标准偏差 0.007 1）、极低的黏性面积比（10%），特别是拉伸强度达到 10.68 MPa，提升幅度超过 35%，断裂伸长率达到 74.1%，提升幅度超过 33%。

(4) 研究成果实现了表面质量、黏性、力学性能等多指标的共同优化，为低黏性、高平整度粘结片的工业化生产提供了可行的工艺方案。

参考文献：

- [1] 杨维生 . 微波多层化构建之热塑性粘结片压合技术 [J]. 印制电路信息, 2018, 26(10):17–27.
- [2] 单斌, 臧晓 .5G 通信网络中毫米波传输技术的应用研究 [J]. 中国宽带, 2025,21(06):13–15.
- [3] 李彤 . 聚四氟乙烯乳液在高频覆铜板中的应用 [J]. 有机氟工业, 2019,(01):23–27.
- [4] 林金堵 .5G 通信对 PCB 基材的要求 [J]. 印制电路信息, 2021,29(01):7–12.
- [5] 李成才, 朱登辉, 朱海霖, 等 . 聚四氟乙烯膜的超疏水改性及应用研究进展 [J]. 纺织学报, 2024,45(08):65–71.
- [6] 连衍成, 梁富源, 贺建超, 等 . 超疏水聚四氟乙烯材料制备工艺的研究进展 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023,43(02):231–241.
- [7] 杜钟思, 李攀 . 基于 DOE 的 PTFE 基复合材料涂布工艺优化研究 [J]. 橡塑技术与装备, 2025,51(07):32–37.
- [8] 王洋, 张黄平, 徐莎 . 低介电损耗高力学强度氟树脂膜及其柔性覆铜板的制备研究 [J]. 绝缘材料, 2023,56(08):22–26.
- [9] 唐浩兴 . 板料成形过程压缩与拉伸失稳特性的理论与实验分析 [D]. 重庆大学, 2022.
- [10] 徐凡, 汪婷, 杨易凡 . 薄膜拉伸褶皱失稳力学进展 [J]. 力学季刊, 2020,41(02):207–220.

Research on processing technology and properties of low-viscosity adhesive sheets

Zhang Dianchao, Feng Chunming, Yang Tianyu, Jin Xia*

(The 46th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220, China)

Abstract: As a crucial basic material in the manufacturing of multilayer printed circuit boards (PCB), prepreg, despite its relatively thin thickness, demands high standards for surface flatness, mechanical properties, and surface tackiness. Research indicates that tension can affect the average thickness, while tension, vehicle speed, and adhesive viscosity all influence the tackiness of the material. Through DOE experiments to optimize process parameters, the material exhibits excellent surface flatness (with a thickness standard deviation of 0.0071) and an extremely low tacky area ratio (10%) when subjected to a tension of 25 N, a vehicle speed of 13 m/min, and an adhesive viscosity of 410 cps. SEM examination reveals no microcracks in the material, with its tensile strength reaching 10.68 MPa, an increase of over 35%, and its elongation at break reaching 74.1%, an increase of over 33%.

Key words: adhesive sheet; glue viscosity; tensile strength; elongation at break

(R-03)

