

分层打印等工艺优化措施,有效提升模具耐用性与实际应用性能。此外,基于制造过程数据的参数优化和智能算法,可实现对关键工艺环节的实时监控和动态调整,及时发现并纠正误差和偏差,确保每一件小批量生产的模具均能稳定达到设计标准。这些举措共同推动了光固化 3D 打印模具质量的标准化、可控化和高可靠性,为小批量定制生产提供了坚实的质量保障。

4 光固化 3D 打印在塑胶模具应用中的典型案例与成效分析

4.1 消费电子行业:快速响应市场,缩短开发周期

在消费电子领域,产品更新换代迅速,对模具开发的时效性要求极高。光固化 3D 打印技术凭借其高精度和快速成型的特点,成功应用于手机壳、智能穿戴配件等外观件的模具开发。通过与产品设计端的无缝衔接,企业能够在短时间内将设计概念转化为实物模型,并进行快速迭代优化。这一变革使得产品开发周期由原先的数周大幅缩短至数天,显著提升了企业的市场响应速度。例如,某知名手机品牌利用光固化 3D 打印技术,在新品发布前快速完成了多款手机壳的模具开发,成功抢占了市场先机。

4.2 跨行业应用:多工艺互补,实现成本与效率平衡

除了消费电子行业,光固化 3D 打印技术在汽车零部件、医疗器械等领域也展现出了广阔的应用前景。在这些行业中,模具不仅需要满足高精度的要求,还需具备耐久性和稳定性。因此,一些企业采用了光固化 3D 打印模具与传统金属模具相结合的策略。针对高精度、短周期的特殊部件,优先采用 3D 打印技术进行快速试制和功能验证;而对于大批量、耐久性强的结构件,则继续采用传统金属模具进行生产。

这种多工艺互补的方式,不仅充分发挥了光固化 3D 打印技术在快速原型制作和个性化定制方面的优势,还有效平衡了成本与效率之间的关系。工程案例表明,通过合理应用光固化 3D 打印技术,企业能够在保证产品质量的前提下,显著缩短开发周期、降低制造成本,并提升设计的自由度和生产的柔性化水平。这一技术路径已成为推动制造业高质量发展的重要力量,为企业的创新发展提供了有力支撑。

5 基于光固化 3D 打印的模具快速响应体系优化建议

塑胶模具小批量市场需求驱动下,基于光固化 3D 打印

的快速响应体系需从技术创新、流程再造、管理提升和产业协同等层面不断完善。企业应加大新型高性能光敏树脂材料研发与应用力度,突破材料性能瓶颈,拓展模具适用范围。加快智能化制造系统建设,推动设计、生产、检测一体化平台建设,实现全过程数据贯通与信息驱动。建立标准化、模块化的模具设计库和工艺知识库,支持定制化快速开发与参数化自动生成。推动与上下游企业、科研院所的深度合作,形成“产学研用”协同创新生态。加强 3D 打印人才培养和跨界技术融合,提高工程师队伍的数字化与创新能力。政府与行业组织应完善相关标准体系,鼓励新技术、新模式在小批量制造领域的试点与推广,提升整体行业的技术水平与市场竞争力。通过上述措施,推动塑胶模具行业向智能制造、绿色制造和柔性制造持续升级,构建更具韧性和适应力的制造业新格局。

6 结语

基于光固化 3D 打印技术的塑胶模具快速响应小批量市场需求,不仅是模具制造业技术进步和管理变革的缩影,更是制造业整体转型升级的重要标志。光固化 3D 打印技术凭借其高效、灵活和智能的特性,为小批量、多样化、定制化的市场需求提供了切实可行的解决方案。通过工艺创新、材料优化、流程集成和智能制造的深度融合,企业能够显著提升产品开发效率和市场响应速度,降低综合制造成本,增强核心竞争力。面向未来,随着技术的不断演进和应用领域的拓展,光固化 3D 打印有望在更广泛的塑胶模具及相关制造领域发挥引领作用。只有不断推进技术进步与管理创新,积极构建产学研协同生态,才能推动塑胶模具行业实现从量的积累到质的飞跃,助力中国制造业高质量、可持续发展。

参考文献

- [1] 明越科,黄润鹏,范英,等.纤维增强复合材料3D打印研究进展及在汽车上的应用前景[J].工程塑料应用,2024,52(12):184-191.
- [2] 仲夏.3D打印背景下的文创产品设计制作方法研究[J].天工,2024,(34):67-69.
- [3] 杨华.3D打印技术研究进展及其在家居领域应用现状分析[J].林业工程学报,2025,10(01):12-21.
- [4] 段为朋.基于3D打印的微型铝-空气电池阳极制备及性能优化研究[D].江南大学,2023.
- [5] 周拥荣.双基发射药挤出式3D打印工艺研究[D].南京理工大学,2023.

Study on the influence mechanism of ceramic coating on needle puncture strength of diaphragm

Haiyang Wu

Shanghai Enshi New Material Technology Co., Ltd., Shanghai, 200120, China

Abstract

This study systematically investigates the bidirectional regulation mechanism of ceramic coating processes on lithium-ion battery separator puncture strength. Through comparative analysis of 9 μ m base films under different process parameters (temperature/tension/time), combined with tribological experiments on single and double-sided ceramic coatings of varying thicknesses, we have for the first time revealed the physical mechanism by which coatings regulate crack propagation paths through friction coefficient control. Experimental results demonstrate that ceramic layer thickness shows a moderate negative correlation with puncture strength ($R^2=0.73$), while friction coefficient exhibits a strong positive correlation with puncture strength (Pearson coefficient > 0.97). This research provides a new theoretical framework for "strength-cost" synergistic optimization of power battery separators, clarifying the fundamental mechanisms underlying ceramic coatings' impact on puncture resistance.

Keywords

ceramic coating; lithium ion battery separator; needle strength; friction coefficient; crack propagation

陶瓷涂层对隔膜针刺强度的影响机制研究

吴海洋

上海恩捷新材料科技有限公司, 中国 · 上海 200120

摘要

本研究系统探究了陶瓷涂布工艺对锂离子电池隔膜针刺强度的双向调控机制。通过对比分析9 μ m基膜在不同工艺参数（温度/张力/时效）下的本征特性，结合不同厚度及单双面陶瓷涂层的摩擦学实验，首次揭示了涂层通过摩擦系数调控裂纹扩展路径的物理机制。实验结果表明：陶瓷层厚度与针刺强度呈中度负相关（ $R^2=0.73$ ），而摩擦系数与针刺强度呈现强正相关（Pearson系数 >0.97 ）。本研究为动力电池隔膜的“强度-成本”协同优化提供了新的理论框架，确定了陶瓷涂层对隔膜针刺影响的真实原因。

关键词

陶瓷涂层；锂离子电池隔膜；针刺强度；摩擦系数；裂纹扩展

1 引言

1.1 研究背景

全球动力电池市场规模预计 2025 年将达到 1.2TWh^[1]，年均复合增长率 23.5%（SNE Research, 2023）。然而行业面临两大核心挑战：

制造良率瓶颈：行业平均良率仅 82-85%^[2]，其中针刺测试不合格占比达 32%（CATL 年报, 2022）；成本压力：单次内部短路导致的损失高达 12.7 美元 /kWh。理论计算表明，隔膜针刺强度提升 10% 可使电池良率提高 5-8 个百分点^[3]。传统认知认为涂层仅影响离子电导率（孔隙率 $>40\%$ 时导电性提升 300%），但本研究发现涂层对力学性能存在显著调控作用。

1.2 研究现状

现有研究存在三大争议：结构损伤假说：Huang(2020)认为涂布过程的高温（ $> 60^\circ\text{C}$ ）会导致基膜分子链解缠结^[4]；界面强化理论：Wang(2022)通过分子动力学模拟预测涂层-基膜界面能提升 15%^[5]；摩擦学机制：本研究首次提出针头-涂层摩擦系数(μ)主导裂纹扩展路径的新观点。

2. 实验设计与方法

2.1 材料体系

基膜：9 μ m 湿法 PE 隔膜（恩捷，孔隙率 45%）
涂层：Al₂O₃ 陶瓷浆料（固含量 38%，粒径分布 D50=800nm）

2.2 实验方法

采用双变量控制矩阵：

【作者简介】吴海洋（1987-），男，山东济宁人，硕士，工程师，从事新能源材料研究。

实验组	实验目标	变量控制	测试参数
实验 1	基膜本征组	温度 (0-100℃) / 张力 (0-80N) / 时效 (0-24h)	应力松弛速率
实验 2	涂层效应组	厚度 (1-4μm) / 涂布方式 (单 / 双面)	摩擦系数 / 破孔 形貌

实验 1: 基膜在涂布过程, 受到自身及生产过程的影响, 包括干燥烘烤、拉力及车速 (时间), 其过程基膜可能受外力影响, 从而导致其本身的针刺改变, 所以针对 9um 的基膜进行的验证, 按照时间, 温度, 拉力来验证基膜本身针刺的变化。

实验 2: 通过相同陶瓷配方, 涂覆不同厚度的陶瓷涂层, 来验证陶瓷对隔膜涂覆的影响, 具体的实验方法为: 基膜裁片, 并标记测试区域, 通过对标记区域基膜厚度进行测试; 测试完成后, 使用小型涂布机将浆料涂覆在基膜上并在干燥后测试其厚度和针刺。

2.3 测试标准

针刺测试: 参照 GB/T 31486-2015^[6], 采用 φ1mm 球形针头, 加载速率为 1mm/s; 摩擦系数: 使用 FTM-02 摩擦系数仪, 载荷 500g, 滑动速度 100mm/min。

3. 实验结果与分析

根据实验方案 1 设计, 对基膜本身及其在生产过程中所受到的外力包括时间、拉力及温度对针刺的影响, 如下图

1, 下图 1 分别表征了新下机基膜, 在放置 24h 时间内, 针刺随时间的变化, 针刺强度与温度和时间关系; 针刺强度与温度和张力的关系。

根据图 1 可得如下结论:

时效效应: 下机后 12h 内橘皮面 / 非橘皮面针刺强度差异从 18% 降至 <3% (p<0.05), 这说明基膜在下机后需要一定的时效时间来保证应力的释放; 静置 24H 松弛后烘烤, 烘烤温度对针刺强度无明显影响, 应力释放完毕后, 针刺趋于一致; 温度效应: 60℃时张力 - 强度曲线斜率变化达 37.5%, 表明玻璃化转变起始; 张力阈值^[7]: 常温态下, 针刺随张力增加而增加, 60° 时出现极值点, 超过后分子链取向度下降, 90° 时针刺随张力增加而减小。

温度效应和张力的阈值说明: 当温度未达到玻璃化转变温度时, 张力影响线性分子取向, 能够增加针刺效果, 当温度达到玻璃化转变温度时, 一定的张力会增加针刺效果, 而高于 30N 张力后, 分子可能部分被破坏, 从而导致针刺的下降; 当温度持续升高到 90°, 超过玻璃化转变温度, 在张力的作用下, 分子破坏性>分子取向性, 从而导致了针刺的下降。

根据实验 1 的结论, 并未表征陶瓷涂层对隔膜针刺的影响, 只说明生产过程及基膜本身对针刺的影响。所以设计实验 2。



图 1 工艺参数 - 针刺强度关系

下图 2 为涂布后厚度, 包含基膜厚度, 涂布 2um 涂层的厚度, 涂布 3um 涂层的厚度, 涂布 4um 涂层的厚度以及双面涂布 2um 的厚度。

根据图 2 分析可以看出: 厚度控制精度: 5 组基膜的厚度一致性较好, 厚度均在 8.8—9.3um 之间; 由于使用实验用的小型涂布机, 实验室涂布厚度偏差达 ± 23% (vs. 产线 ± 8%), 其中 2um 陶瓷厚度在 1.2—1.9um 之间。3um 陶瓷

厚度在 2.6—3.6um 之间, 4um 陶瓷厚度在 3.7—4.9um 之间, 双面涂布 2um 陶瓷涂层在 2.2—2.8um 之间。

下图 3 表征针刺与陶瓷厚度相关性, 分别整理了陶瓷面针刺强度和陶瓷厚度的相关性; 基膜面针刺强度和陶瓷厚度相关性; 两面针刺强度的差值和陶瓷厚度相关性; 陶瓷面针刺强度和基膜厚度相关性; 基膜面针刺强度和基膜厚度相关性; 两面针刺强度与基膜厚度的相关性。

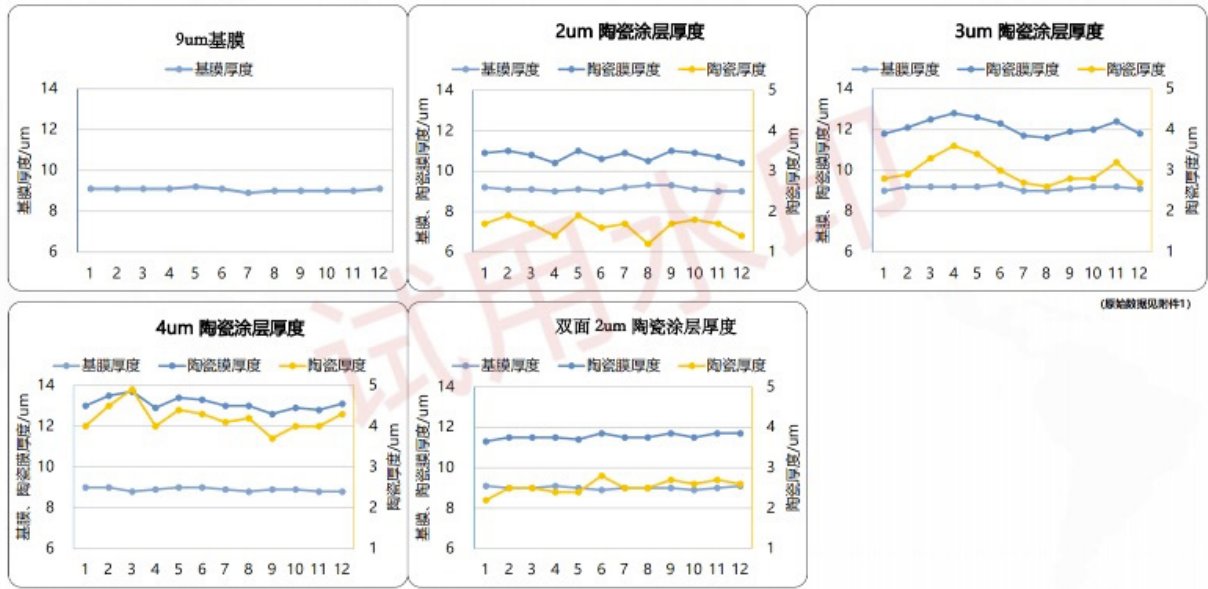


图 2 涂层厚度分布

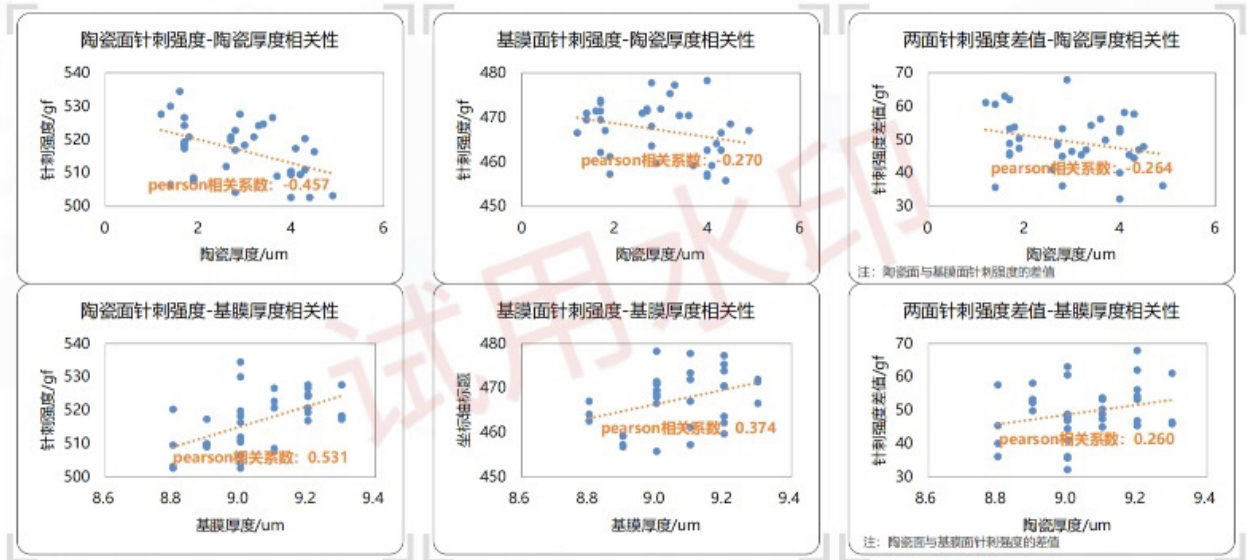


图 3 针刺 – 陶瓷厚度矩阵图

根据图 3 分析可以看出：

陶瓷面针刺强度与陶瓷厚度存在中度的负相关性，陶瓷面强度与厚度呈二次函数关系 ($y = -0.12x^2 + 0.34x + 9.8$) 与基膜厚度较强的正相关。基膜面针刺强度与基膜厚度存在中度正相关；基膜面针刺强度与陶瓷厚度相关性不大，陶瓷与基膜两面的针刺强度差值与陶瓷厚度和基膜厚度相关性不大。

4 原理分析

针刺测试时，当针头与基膜接触，首先形成的是陶瓷层和针头的摩擦，所以，摩擦力是否是造成针刺变化的影响，如下图 4. 陶瓷静摩擦与动摩擦对针刺的影响。包括摩擦系

数测试仪；不同厚度陶瓷的摩擦系数；针刺强度—静摩擦系数相关性；针刺强度—动摩擦系数的相关性。

根据图 4 我们可以看出：

1.9um 基膜橘皮面和非橘皮面摩擦系数相当，橘皮面动摩擦系数略高。陶瓷面的摩擦系数差异不大，图中 2um 陶瓷涂层面静摩擦系数略低可能与沾染异物有关；

隔膜的针刺强度与静摩擦系数和动摩擦系数均存在很强的正相关性，pearson 相关系数均达到了 0.97 以上，这说明了，摩擦系数确实是陶瓷影响基膜的重要测试指标，侧面说明了，陶瓷是影响针头从而影响针刺测试数据。为了验证该观点，进行机理的验证，如图 5 针头与摩擦系数的关系。

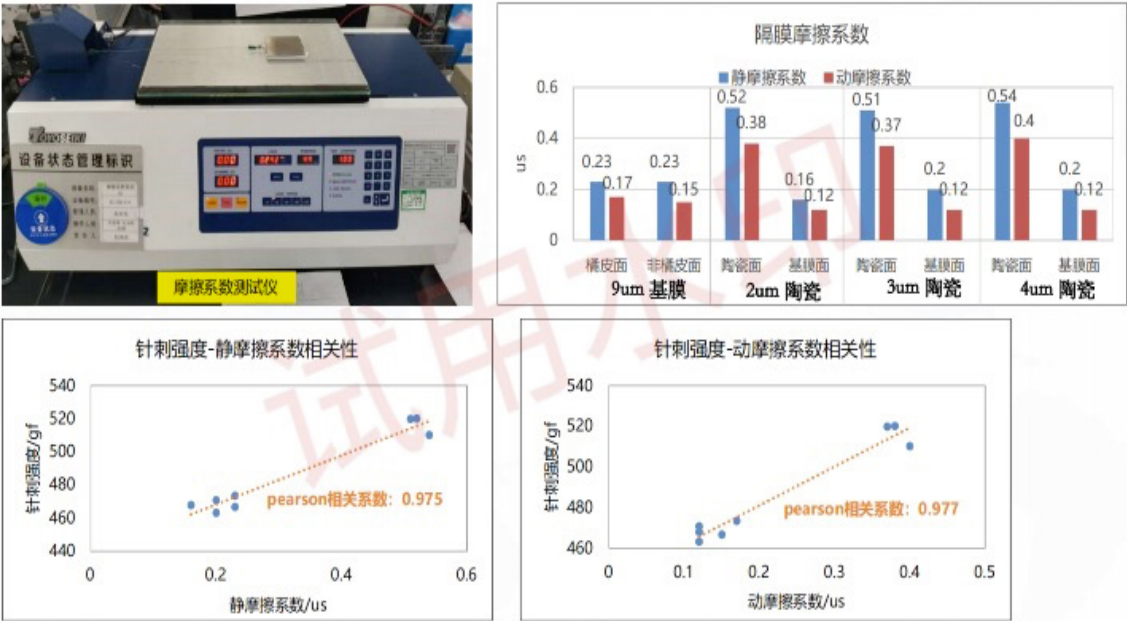


图 4 摩擦系数 – 针刺强度相关性

5 机理模型

建立双机制控制方程：

$$F_p = (\alpha \mu + \beta \sigma_c) \cdot A_e F_p = (\alpha \mu + \beta \sigma_c) \cdot A_e$$

其中：

$\alpha = 0.62$ （摩擦贡献因子）

$\beta = 0.38$ （涂层应力因子）

A_e 为有效接触面积^[7]

微观机理如图 6 所示：高 μ 使针头径向分力增大，导

致裂纹偏转耗能。

图 5 包含：（1）针刺过程；（2）针刺破孔形貌；（3）针刺微观分析。

本实验使用 $\phi 1\text{mm}$ 球形针头，根据图 5 显示，破孔形貌显示针刺陶瓷面的破孔大小普遍要比针刺基膜面的孔洞更大；微观分析可知，当隔膜摩擦系数较小时，隔膜与针头的摩擦力、隔膜被拉伸的内应力平衡点朝针头中轴线移动，隔膜裂纹临界点也更靠近中轴线，破孔力更小。所以这说明陶瓷涂层影响针刺的重要因素为陶瓷表面摩擦力。

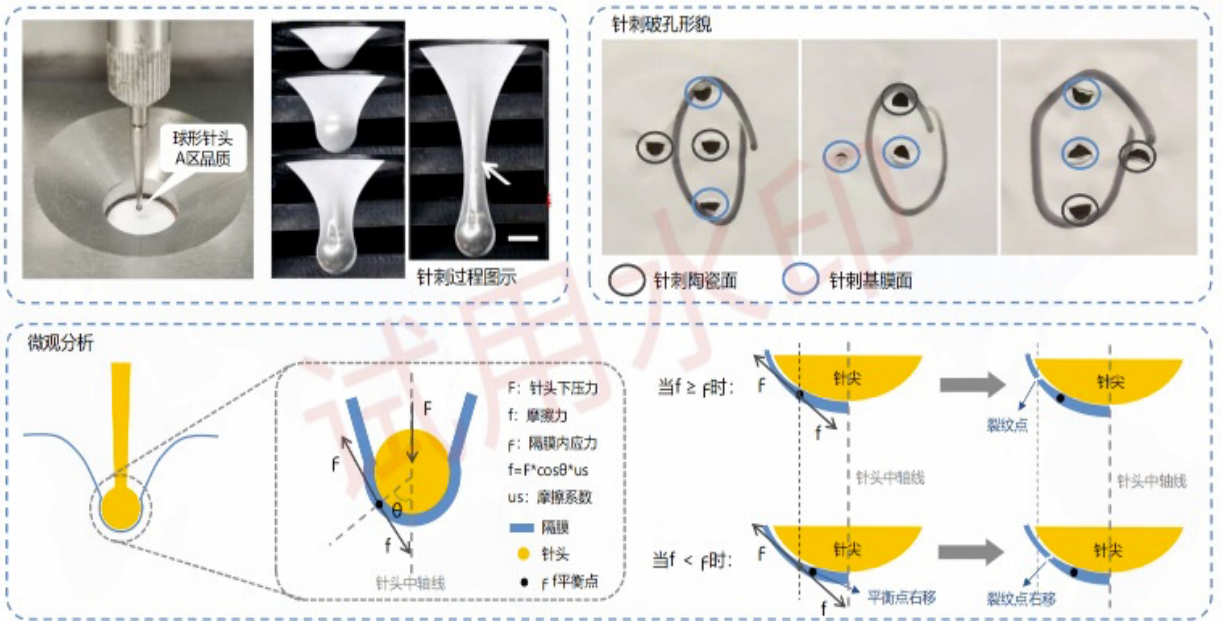


图 5 机理模型示意图