

# LED 支架金属-塑料复合界面结合强度影响因素试验研究

卢金清

浙江韩宇光电科技有限公司 浙江 温州 325000

**【摘要】**：LED 支架是光电封装核心承载与导电结构，其金属与塑料复合界面结合稳定性决定器件性能与寿命。本文基于机电工程材料界面作用机理，围绕 LED 支架金属与塑料复合成型过程，系统开展界面结合强度影响因素的理论推演与机理分析。研究从材料本征属性、界面物理形貌、化学作用机制、成型工艺参数和外部服役环境五个维度，解析各因素对界面结合能等的作用规律。通过多因素耦合推演，明确主导控制因子与协同调控路径，提出界面优化设计原则与工艺改进方向。研究成果可为 LED 封装界面强化等提供理论依据，对推动机电封装异种材料复合技术应用有参考价值。

**【关键词】**：LED 支架；金属-塑料复合；界面结合强度；作用机理；影响因素；机电封装

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.030

## 引言

随着半导体照明技术快速迭代，LED 封装结构对支架材料性能要求更严苛。金属 - 塑料复合支架因金属与高分子塑料的特性，成为中高端 LED 器件主流载体。但在生产与服役中，金属与塑料界面易出现失效现象，引发连锁问题，限制 LED 产品可靠性与竞争力。界面结合强度是衡量金属 - 塑料复合体系稳定性的核心指标，其受多维度因素影响。现有研究多聚焦单一因素，缺乏多因素耦合机理的系统理论推演。本文基于机电材料界面工程理论，以 LED 支架实际场景为背景，通过纯理论推导剖析各因素对界面结合强度的影响规律，构建作用体系与调控逻辑，旨在填补 LED 支架界面理论空白，为工程实践提供理论支撑。

## 1 金属 - 塑料复合界面结合基本机理

### 1.1 界面结合作用类型

金属 - 塑料复合界面结合由多种物理与化学作用主导，其贡献程度决定界面整体结合强度与失效模式。机械嵌合是界面结合基础，熔融塑料渗入金属表面凹凸结构，冷却后形成互锁结构，靠摩擦力与嵌锁力抵抗外力，强度依赖金属表面形貌与塑料填充密实度，是 LED 支架成型常见方式。物理吸附源于分子间力，金属表面自由能与塑料分子极性决定吸附层稳定性，高表面能金属与含极性基团塑料会增强吸附作用。化学键合是提升结合强度关键，金属活性原子与塑料官能团反应生成强结合键，实现原子级连接，不受宏观形貌限制，能提升耐热与抗老化能力，是高端 LED 支架界面强化核心。界面扩散依赖热运动与原子扩散，高温下塑料分子与金属原子相互扩散形成过渡层，可消除界面缝隙、降低应力集中。这四种作用协同构成界面整体结合体系。

### 1.2 界面结合强度的本质内涵

界面结合强度本质是界面抵抗外力破坏、维持完整的临界能力，对应分离时克服结合作用的最小能量。它包含剪切、剥离、拉伸与冲击强度等多维指标，不同指标对应不同服役场景。

LED 支架主要承受剪切与剥离应力，因此剪切与剥离结合强度是评价核心。结合强度稳定性取决于结合作用均匀性与缺陷分布。理想界面无缺陷、结合均匀、应力传递顺畅，但实际界面受多种因素影响存在缺陷，易引发应力集中导致失效。理论上，提升结合强度需强化主导作用、弱化不利因素、消除缺陷与优化应力分布。

## 2 材料本征属性对界面结合强度的影响

### 2.1 金属基材属性的影响

LED 支架常用铜合金、镍铁合金等金属基材。基材的晶体结构、表面能决定其与塑料的初始亲和性。弹性模量与热膨胀系数的匹配度影响界面热应力分布，差异过大会导致应力集中和疲劳失效。表面纯度与杂质含量会阻隔有效接触，降低结合强度。

### 2.2 塑料基体属性的影响

塑料基体的分子结构（极性官能团含量）决定其化学结合能力；熔融流动性影响微观填充效果；结晶度与固化收缩率决定界面残余应力大小。助剂体系中，填料过量会削弱结合，而偶联剂可显著提升界面强度。

### 2.3 材料相容性的耦合影响

金属与塑料相容性由表面能、化学亲和性与热性能匹配度决定，匹配度好可形成紧密界面、生成稳定结合键、减少热应力。相容性不足会引发界面早期失效，选材时需筛选良好组合，可通过改性、添加助剂与界面设计优化，是提升结合强度的基础。

## 3 界面物理状态对结合强度的影响

### 3.1 金属表面粗糙度的影响

适度粗糙度可通过微观凹凸结构增加接触面积，提升机械嵌合力；过于平滑则嵌合不足，过于粗糙则导致塑料填充不全、形成缺陷。微观形貌的均匀性直接影响应力传递的均匀性。

### 3.2 界面清洁度与杂质含量的影响

界面清洁度决定金属与塑料有效接触面积，表面污染物会形成弱结合夹层。油污等降低表面能，阻隔作用，大幅降低强度；氧化层过厚易开裂分层。界面杂质破坏连续性，形成应力集中点，降低抵抗能力。复合成型前需处理去除杂质与疏松氧化层，保留致密活性氧化层。清洁度越高，结合强度与可靠性越高。

### 3.3 界面过渡层结构的影响

界面过渡层介于金属与塑料间，由分子吸附层、化学反应层与原子扩散层组成，其厚度、均匀性与致密性影响应力传递与结合稳定性。理想过渡层应连续致密、厚度均匀、结合牢固，可缓解性能失配与应力集中。过渡层靠表面改性与高温扩散形成，处理后的金属易生成适宜过渡层，提升强度；未处理则薄弱不连续。过厚刚性下降，过薄无法缓解问题。通过理论推演优化参数可提升结合强度。

## 4 界面化学作用对结合强度的影响

### 4.1 表面化学活化的作用机制

金属表面化学活化是提升界面化学键合强度的核心手段，通过物理或化学方式改变表面化学组成，引入活性官能团与反应位点，增强与塑料分子的化学亲和性。常用活化方式有等离子处理、酸碱蚀刻、紫外线照射与臭氧氧化，机理各异。等离子处理生成极性基团，提升表面能与反应活性，刻蚀形成微观粗糙结构；酸碱蚀刻去除疏松氧化层，形成活性腐蚀坑；紫外线与臭氧氧化生成含氧活性基团。表面活化效果决定界面化学键合强度，活化不足会使活性位点少、化学键合薄弱，活化过度会引发表面过度腐蚀，降低界面力学稳定性。

### 4.2 偶联剂的界面桥接作用

偶联剂是含亲无机与亲有机基团的双官能团化合物，可在金属与塑料界面形成分子桥，稳定连接两类材料。亲无机基团与金属表面活性原子反应形成稳定化学键，亲有机基团与塑料分子链缠结或共聚。偶联剂可提升界面结合能、耐热性、耐湿性与抗老化能力，抑制界面分层与开裂。不同类型偶联剂适用于不同金属 - 塑料组合，涂覆厚度与均匀性影响桥接效果，过厚会降低界面力学强度，过薄无法发挥强化作用。选择适配偶联剂并优化涂覆工艺，可提升 LED 支架界面结合强度与服役寿命。

### 4.3 界面化学反应与键合类型

界面化学反应是形成高强度界面结合的核心，反应程度和键合类型决定界面结合强度与稳定性。高温高压成型时，金属表面活性原子与塑料分子链活性官能团发生缩合、加成和取代反应，生成共价键、氢键和配位键等强结合键。其中，共价键键能高、稳定性强；氢键作用强度适中、具可逆性；配位键结合强度稳定，适用于特定复合体系。界面化学反应程度受温度、

压力、时间和表面活性影响，温度不当会导致键合强度不足或产生界面气泡。确定最佳反应条件可促进高强度化学键生成，提升界面结合强度。

## 5 成型工艺参数对界面结合强度的影响

### 5.1 温度参数的影响

成型温度含模具、熔体与金属预热温度，是影响界面结合的核心参数。熔体温度决定塑料熔融状态与分子链活性，适宜温度使塑料分子链舒展，流动性和反应活性提升，易渗入金属表面发生反应；温度过低，塑料熔融不充分，流动性差；温度过高，塑料热降解、分子链断裂，形成界面缺陷。模具温度影响塑料冷却速率与结晶行为，适宜温度使塑料冷却均匀，收缩应力小；温度过低，塑料快速冷却，产生收缩应力；温度过高，延长成型周期，易粘模和热老化。金属预热可减少温差、降低热应力、提升表面分子活性，预热温度需与熔体、模具温度匹配。

### 5.2 压力参数的影响

成型压力包括注射、保压与模压压力，作用是推动塑料填充模具、压实界面、消除空隙。压力充足，塑料渗入金属表面，排出气体，形成致密结合层；压力不足，界面填充不密实；压力过高，金属变形，塑料产生内应力，冷却后翘曲开裂。保压压力与时间协同可补偿收缩，避免空隙。压力参数设定需结合塑料流动性、金属表面形貌与模具结构确定区间。

### 5.3 时间与速率参数的影响

成型时间含注射、保压与冷却时间，速率参数含注射速率与熔体流动速率，共同影响界面结合。注射时间过短易裹入空气，过长填充不充分；保压时间不足有收缩空隙，过长降低效率；冷却时间过短塑料未固化，过长降低效率。注射速率过快有界面缺陷，过慢填充困难。时间与速率参数需与温度、压力参数协同匹配，保证界面结合强度稳定。

## 6 服役环境因素对界面结合强度的影响

### 6.1 温度循环的影响

LED 器件服役时会经历频繁温度波动，温度循环产生的周期性热应力是界面疲劳失效主因。金属与塑料热膨胀系数差异大，温度变化时二者形变不同，界面产生循环剪切与拉应力，长期循环应力会使界面微裂纹萌生扩展，破坏机械嵌合与化学键合结构，降低界面结合强度，最终导致分层与剥离。

温度变化速率和极值温度也影响界面稳定性，快速升降温产生瞬时热冲击，加剧界面应力集中；高温极值加速塑料老化与界面键合松弛，低温极值增大塑料脆性，提升界面开裂风险。提升界面抗温度循环能力需优化材料热性能匹配、设计合理过渡层、消除界面缺陷，缓解热应力集中。

## 6.2 湿度与介质侵蚀的影响

高湿度环境下，水分子通过界面缺陷与塑料微孔渗透至界面区域，破坏分子间物理吸附与弱化学键，降低界面结合强度，还会引发塑料吸湿膨胀，增大界面应力，加速裂纹扩展。长期潮湿会使金属表面氧化锈蚀，锈蚀产物体积膨胀，破坏界面结构，导致界面分层与器件失效。

化学介质如酸碱溶液、有机溶剂、腐蚀性气体对界面有侵蚀作用。酸碱介质腐蚀金属表面，破坏界面过渡层结构；有机溶剂溶胀塑料分子链，降低界面结合力；腐蚀性气体氧化界面结构，生成疏松产物。提升界面抗介质侵蚀能力需选用耐候性材料、优化界面封闭设计、强化表面防护处理。

## 6.3 机械应力与老化的影响

LED 支架在装配、运输和使用中承受冲击、振动、弯曲等机械应力，界面易率先失效。冲击应力引发界面瞬时开裂，振动应力导致界面疲劳损伤，弯曲应力产生界面剥离力。机械应力与界面缺陷协同作用，大幅降低界面结合强度与服役寿命。

长期光热老化使塑料分子链降解、变色、脆化，引发界面键合松弛与缺陷扩展，降低界面结合稳定性。抗老化设计需从材料选型、界面强化、结构防护多方面提升界面抵抗外部环境与应力的综合能力。

## 7 多因素耦合作用与界面优化路径

### 7.1 影响因素的耦合作用规律

LED 支架金属 - 塑料界面结合强度受材料、界面、工艺、环境多因素耦合作用，各因素相互关联、制约，形成复杂体系。材料属性决定潜在结合强度上限，界面状态影响实际结合效果，成型工艺决定结合强度实现程度，服役环境影响结合强度稳定性与寿命。

单一因素优化无法根本提升界面性能，需多因素协同调

控。材料相容性与表面改性协同提升界面亲和性，粗糙度调控与工艺参数匹配增强机械嵌合，化学活化与偶联剂处理强化化学键合，温度压力协同消除界面缺陷。多因素耦合作用理论推演可为界面优化提供系统指导，避免单一因素调整的负面效应。

### 7.2 界面结合强度优化路径

基于前文分析，提出面向高可靠性 LED 支架的界面结合强度优化路径。选材选表面活性高、热性能匹配好的金属 - 塑料组合，助剂改性提升塑料极性与流动性，提升材料相容性。界面处理用粗化、清洁、活化与偶联剂涂覆复合工艺，构建理想界面状态。

工艺成型通过理论推演确定最佳工艺窗口，实现熔体充分填充等。结构设计引入圆角过渡等缓解应力集中。服役防护优化散热与密封结构，降低环境对界面的破坏。全流程系统化优化可提升界面结合强度与长期服役可靠性。

## 8 结论

本文基于机电工程界面理论，经纯理论推演与机理分析，系统研究 LED 支架金属 - 塑料复合界面结合强度的影响因素与规律并得出核心结论。界面结合强度由机械嵌合、物理吸附、化学键合与原子扩散协同决定，化学键合与机械嵌合是主导机制，界面缺陷与应力集中是失效主因。材料本征属性决定界面结合潜力，良好相容性可降低失效风险；界面物理状态影响接触面积，是高强度结合关键；界面化学作用可强化结合，提升耐热与抗老化能力；成型工艺参数协同控制界面填充过程，匹配不当会降低强度；服役环境会破坏界面结构，环境耐受性是长期稳定服役保障。多因素耦合决定界面性能，需全流程协同提升结合强度。本文未依赖量化数据与试验统计，构建了完整理论体系，可为 LED 支架界面强化提供纯理论支撑。未来研究可结合多尺度模拟与界面表征技术，深化多因素耦合机理与动态演化规律，推动机电封装领域异种材料复合技术发展。

## 参考文献：

- [1] 王亚溪,赵智源,黄国栋. 双螺杆挤出机共混改性工艺对高温尼龙基 LED 支架材料填料硅灰石分散的影响及改善[J]. 塑料工业,2024,52(10):157-162.
- [2] 苏佳兴,贺蕾. LED 支架结构优化设计[J]. 电子测试,2022(2):118-120.
- [3] 张维合. LED 支架全自动精密注塑系统开发研究[J]. 塑料工业,2017,45(7):65-68.
- [4] 王静,吴福培. LED 支架缺陷检测算法研究[J]. 汕头大学学报 (自然科学版),2020,35(4):54-62.