汽车灯具用塑料件UV胶水粘接性能研究

谢乐贤 黄伟 武竹雨 马佳焱

（常州星宇车灯股份有限公司，常州 213022）

摘要：目前汽车灯内部零部件主要通过卡扣或锁附等方式进行固定，但是卡扣装配存在材料脆化断裂风险，机械锁附结构具需预留空间设计螺孔结构导致空间浪费，为此，提出一种基于紫外线固化（UV）胶水的车灯组件粘接方案。对不同粘接材料的拉伸强度、耐湿、耐高温、抗温度交变等性能，以及等离子体处理对粘接界面的强化效果进行了测试，结果表明，UV胶水固定塑料零件时可获得10 MPa左右的粘接强度，具备一定的工程可行性，为车灯制造工艺升级提供了新的技术路径。

关键词：汽车车灯 UV胶 粘接性能 等离子体处理

中图分类号：U465.4+1 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250319

UV Adhesive Bonding Performance of Plastic Parts in Automotive Lamp

Xie Lexian, Huang Wei, Wu Zhuyu, Ma Jiayan

(Changzhou Xingyu Automotive Lighting Systems Co., Ltd., Changzhou 213022)

Abstract: Currently, internal components of automotive lamps are primarily secured by methods such as snap-fit or mechanical fastening. However, snap-fit assemblies carry risks of material embrittlement and fracture, while mechanical fastening structures require reserved space for screw holes, leading to inefficient space utilization. These issues constrain the improvement of weight reduction and reliability in automotive lamps. To address these challenges, this paper proposes an adhesive bonding solution for lamp components based on ultraviolet (UV)-curable adhesive. Tests were conducted on the tensile strength, moisture resistance, high-temperature resistance, and thermal cycling performance of different adhesive materials, as well as the reinforcing effect of plasma treatment on the bonding interface. The test results indicate that UV adhesive can achieve a bonding strength of approximately 10 MPa when bonding plastic parts, demonstrating certain engineering feasibility. This provides a new technical pathway for upgrading automotive lamp manufacturing processes.

Key words: Headlight, UV-curable adhesive, Bonding performance, Plasma treatment

1 前言

目前，应用较为广泛的车灯内部零件装配技术主要有卡接（Snap-fit）和螺丝锁附（Screw Fastening）。卡扣装配通过预制弹性结构实现无工具快速连接，具有显著的成本优势（模具改造时无需额外零件投入）和较高的装配效率（无需安装工具且单件装配时间≤3 s），同时还支持专业工具辅助下的无损拆卸。然而卡扣设计时需预留0.2~0.5 mm的公差补偿空间[1]，造成零件连接界面存在微观缝隙，在频率15~200 Hz的整车振动环境下，啮合处可能产生异响（声压级>45 dB(A)）[2]，经历2 000次温度循环（-40~120 ℃）后，卡扣连接强度衰减约30%[3]。

机械锁附采用M3~M6的标准紧固件实现刚性连接，其抗剪切强度可达15~30 MPa[4]，显著优于卡

作者简介：谢乐贤（1979—），男，助理工程师，硕士学位，研究方向为车灯组装工艺及零部件表面处理工艺。

参考文献引用格式：

谢乐贤, 黄伟, 武竹雨, 等. 汽车灯具用塑料件UV胶水粘接性能研究[J]. 汽车工艺与材料, 2026(5): 47-52.

XIE L X, HUANG W, WU Z Y, et al. UV Adhesive Bonding Performance of Plastic Parts in Automotive Lamp[J]. Automobile Technology & Material, 2026(5): 47-52.

接装配(5~8 MPa),支持±0.5 mm 的装配公差补偿,零件连接紧密不易松动,且可重复调整安装。但使用螺丝锁附在一定程度上会增大产品质量,以使用 M4 规格组装的灯具为例,单个螺丝组件(含垫片)质量约 2.5~3.8 g,在 LED 模组化灯体中占比 5%~8%[5]。在前期设计时需预埋金属嵌件或设计加强筋,模具成本提升 20%~35%[6],对外露螺丝还需要额外进行物理气相沉积(Physical Vapor Deposition,PVD)镀层或激光蚀刻处理(单件成本增加 1.2~1.8 元)。

数据显示,87% 的车灯故障采用总成更换方案[7]。鉴于车灯售后维修采用模块化更换趋势,本研究拟提出一种基于紫外线固化(Ultraviolet Curing,UV)胶水粘结剂的新型装配方案,并完成车灯典型材料组合的粘接性能数据库建立、湿热老化等极端工况下的耐久性验证以及等离子体表面处理对粘接强度的提升效能量化验证,旨在为车灯制造工艺升级提供理论依据与技术验证。

2 试验部分

2.1 试验方案

不同材料间的粘接强度测试试验方法如下:

a. 取定量 UV 胶水滴于样板表面。

b. 放置塞规,用于确定 2 块样板间距及胶水厚度;

c. 放置另一块样板,并轻轻按压。

d. 使用紫外光源(波长 395 nm)照射 20 s 进行固化,固化完成后取出塞规。

e. 经过不同的耐久性能试验后,使用万能拉力机测量 2 块样板之间的结合强度。

样板制作步骤如图 1 所示。

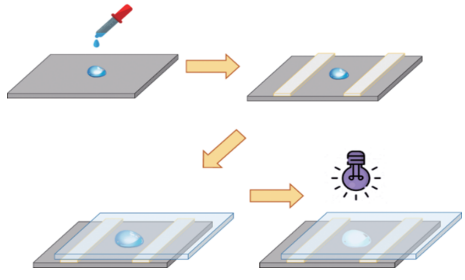


图 1 样板制作步骤

2.2 试验材料

试验选用的胶水为某款 UV 胶水(丙烯酸类胶水)。本试验主要验证透明件与不透明件之间的粘接效果,调研收集了在车灯中主流使用的塑料材料,所用样板型号如表 1 所示,样板规格为 100 mm×50 mm×3 mm。

表 1 试验材料型号

材料	牌号	色号	颜色
PC LS1	LED2245	550207	透明
PMMA	Opitical-HT	clear	透明
PMMI	TT50	clear	透明
PC	LS1	701	黑色
PBT-GF30	T104G	BK	黑色
LCP-MD30	KG300-D01	JSBK002	黑色
PPA-GF35	Vincyl 435	BKO13	黑色
ABS XR404	XR404	9001	黑色
PC+ABS C1200HF	C1200HF	BK2G024	黑色
PP-GF30	HS	BK011	黑色

3 试验过程及分析

3.1 初始粘接强度测定及原理分析

选取不同材料的样板,按照上述试验方法对胶水粘接强度进行测试,结果如表 2 所示。

表 2 不同材料胶水初始粘接强度 MPa

材料	PC LS1	PBT GF30	LCP MD30	PPA GF35	ABS XR404	PC+ABS C1200HF	PP GF30
PC LED	23.82	6.11	4.98	5.22	12.86	12.57	0.19
PMMA HT	14.00	5.60	6.23	7.55	18.30	19.41	2.00
PMMI TT	16.46	6.58	5.72	6.51	15.32	18.86	3.74

UV 胶水中的光引发剂在受到紫外线照射时,会产生高活性自由基,使胶水中的活性单体(如丙烯酸酯类)和低聚物(如环氧丙烯酸酯、聚氨酯丙烯酸酯)发生链式反应,形成交联网络结构。当被粘接材料表面含有如羟基、羧基等,能够与胶水形成氢键或共价键时,即可获得较强的粘接强度。

聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)表面含有酯基(-COO-)及苯环结构,可通过多重作用实现有效粘结。酯基可与 UV 胶水的丙烯酸酯形成氢键或偶极-偶极相互作用,苯环结构可能通过 π-π 堆积增强界面吸附;聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl-

methacrylate，PMMA）含有酯基（-COO-）和α-甲基，与UV胶水的丙烯酸酯结构相似，易发生共溶和分子链纠缠，且酯基间的氢键能够强化界面，使PMMA与UV胶之间有较强的粘接强度；聚甲基丙烯酰亚胺（Polymethylmethacrylimide，PMMI）表面含有酰亚胺环（-CONCO-）、酯基，酰亚胺环极性高能与UV胶水产生较强的键合，但刚性大，可能限制分子链扩散，因此PMMI的结合强度略低；丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物（Acrylonitrile Butadience Styrene plastic，ABS）含有腈基（-CN）、苯环、丁二烯非极性链段，腈基的强极性有助于与胶水结合，但丁二烯链段疏水，因此ABS与胶水结合强度较佳；PC+ABS（聚碳酸酯/ABS合金）结合了PC和ABS的优点，与胶水的结合度很好。

30%质量分数玻纤增强聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT-GF30）表面含有酯基（-COO-）、苯环，酯基与丙烯酸酯反应性好，但玻纤导致表面不均匀，导致粘接强度不高；30%质量分数矿物填充液晶聚合物（LCP-MD30）含有芳香酯键（刚性主链）、少量末端羧基/羟基，其高结晶度和低表面能导致润湿性差，从而导致胶水粘接强度不佳；质量分数35%玻纤增强聚邻苯二甲酰胺（PPA-GF35）含有酰胺键（-CONH-）、苯环，酰胺键可与丙烯酸酯形成氢键，但玻纤削弱粘接，因此粘接强度一般。

质量分数30%玻纤增强聚丙烯（PP-GF30）表面仅有非极性烷烃链（$-CH_2-$），无活性基团，导致与胶水之间几乎没有化学键合作用，仅依靠物理锚固，但玻纤降低了胶水的润湿性，因此粘接强度差。

3.2　耐湿性能测试及原理分析

车灯在实际使用工况下，会遭遇连续阴雨的天气情况，同时，车灯工作时其内部空气会被加热至较高温度，停止工作后会迅速降温产生冷凝水，因此要对车灯内部零件的耐湿性能进行测试，确保其性能。

将试验样板放置于耐湿试验箱，在温度40 ℃、相对湿度100%的条件下放置48 h。取出晾干后使用万能拉力试验机测试胶水粘接强度，结果如表3所示。其中，NG表示粘接强度过低无法进行强度测试。

表3　不同材料耐湿试验后的粘接强度　　MPa

材料	PC LS1	PBT GF30	LCP MD30	PPA GF35	ABS XR404	PC+ABS C1200HF	PP GF30
PC LED	11.65	2.27	NG	NG	11.03	13.54	NG
PMMA HT	17.14	4.46	NG	NG	17.53	16.64	NG
PMMI TT	16.09	4.57	NG	NG	15.01	17.40	0.09

经历耐湿试验后，胶水粘接强度下降，主要原因包括：

a. 水分渗透导致界面破坏。对于吸水性较强的塑料，当水汽通过塑料表面或胶层缺陷（如微裂纹）渗入粘接界面，取代胶水与基材之间的氢键或范德华力（尤其是极性塑料如PC、PMMA）时，胶水粘接强度下降；对于含玻纤/矿物填充的材料（如PBT-GF30、PPA-GF35），水分可能沿填充物与基材的界面扩散，加剧界面分层。

b. 胶层水解反应。UV胶水中的酯基（丙烯酸酯类）在湿热环境下可能发生水解，导致交联网络断裂。反应方程式如下：

$$R\text{-}COOR'+H_2O\rightarrow R\text{-}COOH+R'\text{-}OH \quad (1)$$

c. 塑料基材的湿热形变。在高温高湿条件下，塑料会吸水膨胀（如尼龙类PPA吸水率可达1.5%），与胶层的热膨胀系数（Coefficient of Thermal Expansion，CTE）不匹配，产生内应力。玻纤增强材料（如LCP-MD30）因纤维与树脂界面吸水，可能引发微裂纹。

d. 界面化学键的退化。塑料分子中的极性基团（如酯基、腈基）与水分子竞争结合，导致胶水-基材界面键合减弱，从而导致胶水结合强度下降。例如PC的酯基与UV胶水的氢键被水分子破坏的反应方程式如下：

$$PC\text{-}COO\cdots H\text{-}O\text{-}glue+H_2O \rightarrow PC\text{-}COO\cdots H\text{-}OH+H\text{-}O\text{-}glue \quad (2)$$

3.3　耐高温性能试验及原理分析

传统燃油汽车在运行时，发动机会产生大量热量，靠近汽车发动机的车灯需长期耐受热辐射；车灯在工作时，LED灯在照明的同时也会散发较

高的热量，这些热量易积聚在车灯内部。因此，对于车灯内部零件的耐高温性能需进行测试，确保其符合要求。

将样板置于高温试验箱中，在120 ℃温度下放置240 h，待试验结束后将样板取出，在未冷却的情况下进行拉力测试。测试结果如表4所示。

表4 不同材料耐高温试验后粘接强度 MPa

材料	PC LS1	PBT GF30	LCP MD30	PPA GF35	ABS XR404	PC+ABS C1200HF	PP GF30
PC LED	17.67	4.78	4.47	7.26	21.43	17.71	NG
PMMA HT	18.76	13.59	8.97	15.48	30.54	18.34	NG
PMMI TT	22.95	8.66	8.99	9.47	17.62	19.45	NG

经过高温试验后，胶水的粘接强度获得了一定程度的提升，有如下原因：

a.UV胶水的后固化效应。UV胶水在固化过程中，可能会由于光照时间不足或光照功率较低导致深层固化不足。在高温环境下，这些单体会继续发生热引发聚合，增加交联密度，从而提升胶层的整体强度。

b.应力释放提升粘接面积。在胶水初始固化时，胶水与塑料之间因为收缩率的差异（PC收缩率约为0.6%~0.7%，丙烯酸酯胶约5%~7%）可能会导致内应力的产生。在高温环境下，胶层通过分子链段运动释放应力，减少界面微裂纹，提高有效粘接面积；同时，塑料基材（PC、ABS）在高温条件下会轻微软化，胶水可能进一步渗透表面微孔，冷却后形成更强的机械锚固。

c.界面化学键的重组与强化。在高温下，UV胶水的酯基（丙烯酸酯）与塑料的酯基（如PC、PBT）可能发生酯交换反应，使得胶水与塑料之间的化学键相互交联，形成更强的结合力，其反应方程式如下：

$$\text{胶水}-\text{COOR}+\text{塑料}-\text{COOR}' \rightarrow \text{胶水}-\text{COOR}'+\text{塑料}-\text{COOR} \quad (3)$$

3.4 高低温交变试验

为确保车灯在极端环境下的稳定性和可靠性，需要对其进行高低温交变试验，试验标准为：以12 h为一个周期，由室温（23℃、相对湿度30%）经1 h升温至80 ℃、相对湿度80%，维持4 h，经2 h降温至-40 ℃、相对湿度30%，维持4 h，最后经1 h升温至室温，一般试验需进行8个周期循环，结果如表5所示。

表5 不同材料高低温交变试验后粘接强度 MPa

材料	PC LS1	PBT GF30	LCP MD30	PPA GF35	ABS XR404	PC+ABS C1200HF	PP GF30
PC LED	0.89	0.05	0.30	0.29	15.85	9.12	NG
PMMA HT	7.24	0.00	0.26	0.67	16.92	12.47	NG
PMMI TT	5.05	0.25	NG	0.53	15.66	11.60	NG

在经历多次冷热循环交变时，塑料与胶水之间的收缩/膨胀比例存在较大差异，尤其是塑料内部使用玻璃纤维（Glass fiber，GF）或矿石（Mineral Fines，MD）填充进行增强后，其体积变化率会进一步减小，导致在循环过程中粘接界面脱离，从而使强度大幅下降，因此对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）、液晶聚合物（LCP）、聚邻苯二甲酰胺（PPA）、聚丙烯（PP）的粘接力几乎消失。

ABS、PC+ABS因其表面官能团与胶水较为适配，在高温时能不断发生官能团的重组，因此粘接强度较高。而PC材料吸水性较好，在高温高湿条件下吸水后会在低温条件下析出水分，造成粘接界面剥离，因此强度也较低。

3.5 材料粘接强度汇总

对上述测试所得的不同材料之间的粘接强度汇总，如图2~图4所示。

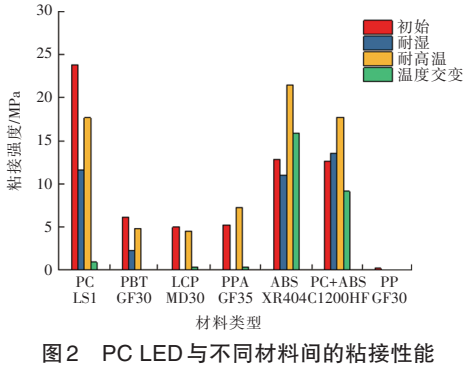


图2 PC LED与不同材料间的粘接性能

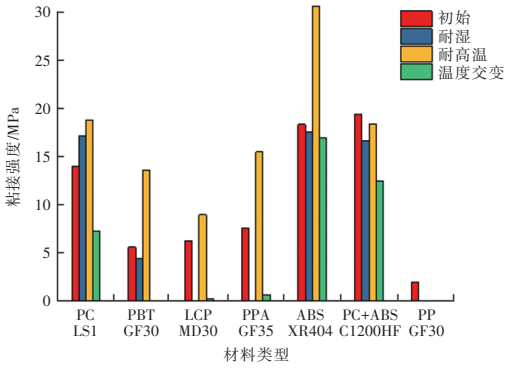


图3　PMMA HT与不同材料间的粘接性能

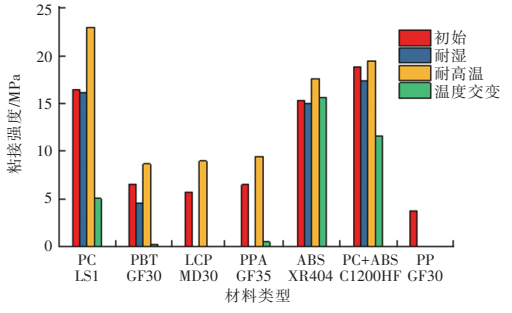


图4　PMMI TT与不同材料间的粘接性能

经测试,仅ABS、PC+ABS这2种材料在经过耐久试验后无明显的强度下降,PC材料在经过温度交变后强度明显降低,而其余材料的粘接强度均较低,无法满足汽车行业应用要求。

4　等离子体处理改性

采用等离子体处理材料表面是提升胶水粘接强度的常用方式,在低压环境下通过辉光放电产生大量等离子体轰击材料表面,一方面能够去除材料表面的油污、灰尘等杂质,留下细小微坑,另一方面等离子中的活性物质可与塑料表面发生反应,引入一些极性官能团(如-OH、-COOH、-NH_2等),从而提升材料表面活性[8],使胶水更易润湿表面且可与部分官能团进行反应。等离子体处理机理如图5所示。

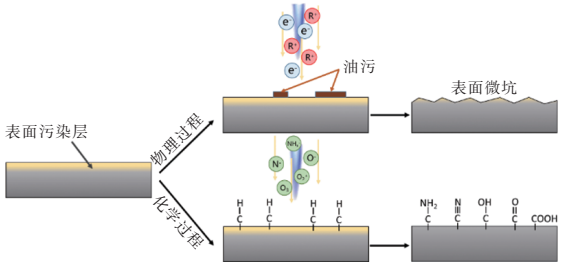


图5　等离子体处理机理

在真空度为30 Pa、功率400 W、时间300 s的条件下对样板进行等离子体处理,分别测试处理前与处理后的材料表面达因值,结果如表6所示。

表6　不同样板等离子体处理前后达因值对比　　mN/m

材料状态	PC LS1	PBT GF30	LCP MD30	PPA GF35	ABS XR404	PC+ABS C1200HF	PP GF30
处理前	<38	>60	<38	>60	<38	<38	<38
处理后	>60	>60	>60	>60	>60	>60	>60

在经过等离子体处理后,材料表面的达因值得到了显著提升。测量等离子体处理后板材的粘接强度,并对其进行耐高温、耐湿及高低温交变试验后,得到的粘接强度如表7和图6~图8所示。

表7　等离子体处理后不同材料的粘接强度　　MPa

材料	条件	PC LS1	PBT GF30	LCP MD30	PPA GF35	ABS XR404	PC+ABS C1200HF	PP GF30
PC LED	初始	8.96	10.74	9.72	9.61	10.56	10.03	5.84
	耐湿	9.70	7.73	8.61	5.06	9.35	9.55	6.79
	耐高温	16.96	13.73	13.94	17.58	11.40	18.40	NG
	温度交变	8.74	8.09	8.95	7.56	7.63	10.04	7.49
PMMA HT	初始	16.23	12.12	12.78	12.64	15.37	17.95	8.62
	耐湿	11.26	8.85	7.87	10.16	16.77	18.30	10.18
	耐高温	15.37	17.51	14.95	15.28	17.10	18.47	9.68
	温度交变	14.96	11.92	11.36	13.54	15.93	11.47	8.67
PMMI TT	初始	14.60	13.84	13.24	12.89	17.94	14.86	8.82
	耐湿	14.03	11.97	9.41	5.15	14.51	13.88	8.31
	耐高温	19.28	14.43	10.06	15.51	14.31	19.19	NG
	温度交变	13.11	8.50	10.84	13.32	12.42	12.07	6.43

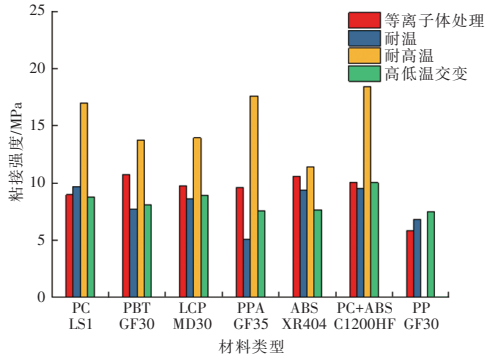


图 6 等离子处理后 PC LED 与不同材料间的粘接性能

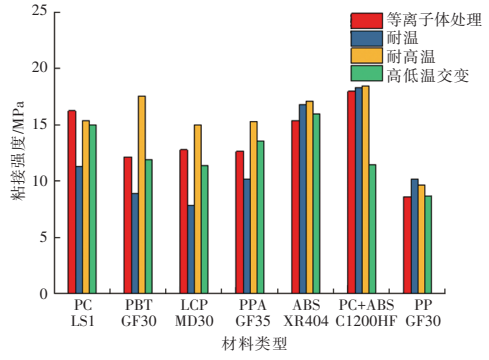


图 7 等离子处理后 PMMA HT 与不同材料间的粘接性能

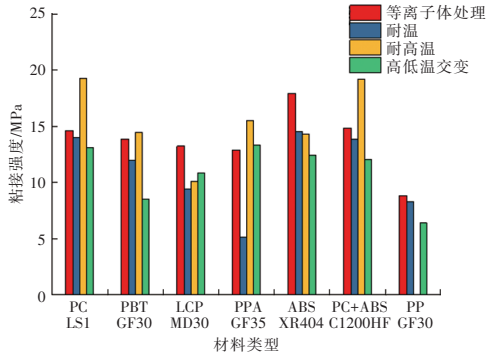


图 8 等离子处理后 PMMI TT 与不同材料间的粘接性能

由测试结果可知，通过等离子体处理的样板粘接强度得到大幅提升，并且能够通过相应的耐久性能试验。ABS、PC+ABS 的结合强度略有下降，原因是其表面易于与胶水反应的官能团（如羧基、羟基等）在等离子体处理后含量下降，被替换成了不易反应的官能团（如氨基等）。PP 材料无法通过耐高温试验，其原因可能一方面是由于 PP 材料与胶水的收缩率相差较大，另一方面是 PP 主要由小分子（丙烯）聚合而成，在高温环境下易分解，从而造成界面剥离。

5 结论

本文对 UV 胶水在车灯行业的应用可行性进行了测试分析，测试了在车灯行业主流塑料材料之间的粘接强度并对其进行了耐久性能测试。结果表明：在不使用等离子体处理的情况下，ABS、PC+ABS 能够与透明件进行较好的连接；使用等离子体处理后，PC、PBT、LCP、PPA 也能获得较好的粘接性能。在本文试验条件下，PP 材料用胶水粘接的强度无法达到使用要求。

参考文献：

[1] 叶盾. 基于力学分析的汽车车灯卡扣结构优化设计[J]. 汽车零部件, 2018(12): 54-58.

[2] 陈玉, 胡兰芳, 宋建华. 卡扣装配受力有限元分析及结构改进[J]. 日用电器, 2013(6): 39-40.

[3] 陈燕, 李世国, 宋娥. 基于 ANSYS 的塑料卡扣装配力学分析方法[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2007, 6(2): 226-227.

[4] 吴崇光. 螺纹锁紧剂的研究[J]. 工程塑料应用, 1980(2): 3-10.

[5] 李祥兵, 王春才, 肖义武. 汽车车灯轻量化技术研究[J]. 汽车电器, 2016(11): 5.

[6] 田正贤. 浅谈加强筋模具的设计[J]. 机械工人, 1988(3): 40-41.

[7] 莫仕彬. 基于客户满意度的汽车车灯售后服务质量提升策略研究[J]. 轻工科技, 2019, 35(9): 156-157.

[8] 欧阳宇飞. ABS 塑料等离子体清洗电镀预处理的工艺研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.

AT&M