紫外线漆层对车灯密封胶黏结性能的影响研究

方敏 王子铭 张宇飞 王晓丹

（常州星宇车灯股份有限公司，常州 213022）

摘要：为研究紫外线（UV）漆层对车灯聚丙烯壳体与聚碳酸酯灯罩黏结性能的影响，针对室温固化密封胶（冷胶）与热熔胶（热胶）2种车灯行业中主流的胶黏剂，制备了无UV漆层和喷涂UV漆层的2种标准剪切试样，系统评估了2种密封胶在6种严苛环境中处理后的剪切强度。结果表明，冷胶与热胶在所有环境条件下的剪切强度均大幅超过设计要求，说明喷涂UV漆并不会对冷胶和热胶的黏结性能造成负面影响。

关键词：UV漆 密封胶 黏结性能 剪切力强度

中图分类号：TQ430.5 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250286

Effect of UV Coating on the Bonding Performance of Automotive Lamp Sealants

Fang Min, Wang Ziming, Zhang Yufei, Wang Xiaodan

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

Abstract: To investigate the influence of an ultraviolet (UV) coating on the bonding performance between the polypropylene housing and the polycarbonate lens of automotive lamps, this study prepares standard shear specimens with and without a sprayed UV coating. Two mainstream adhesive types in the lamp industry including a room-temperature curing sealant (cold adhesive) and a hot-melt adhesive (hot adhesive), which are evaluated by systematically assessing their shear strength after exposure to six harsh environmental conditions. The results show that the shear strengths of both the cold and hot adhesives under all environmental conditions significantly exceed the design requirement, indicating that the presence of a UV coating doesn't negatively affect the bonding performance of either adhesive type.

Key words: UV coating, Sealant, Bonding performance, Shear strength

1 前言

汽车车灯作为集照明、信号与装饰于一体的关键总成，其可靠性直接关系到行车安全与整车品质[1]。车灯内部组件的长期稳定性依赖其内部环境的有效密封，而壳体与灯罩之间的长期稳定密封是保障车灯内部环境稳定的关键[2]。因此，实现灯罩与壳体之间稳定的黏结性能是保障车灯整体性能与使用寿命的关键[3]。

目前，车灯采用的主流黏结工艺为室温固化型密封胶（冷胶）与热熔胶（热胶）[4]。冷胶通常具有优异的黏接强度、耐候性及弹性，热胶具有极快的固化速度、优异的自动化适配性[5]。然而，热胶与冷胶的最终黏结强度依赖于黏结基材的表面特性[6]。为提升车灯的外观质感与耐候性，壳体与灯罩的边缘区域通常会喷涂紫外线（Ultraviolet, UV）漆层[7]，改变了基材的表面性能、化学极性及微观形貌[8]。

作者简介：方敏（1988—），男，初级工程师，学士学位，研究方向为车灯表面处理与组装工艺的应用研究。

参考文献引用格式：

方敏, 王子铭, 张宇飞, 等. 紫外线漆层对车灯密封胶黏结性能的影响研究[J]. 汽车工艺与材料, 2026(4): 50-57.

FANG M, WANG Z M, ZHANG Y F, et al. Effect of UV Coating on the Bonding Performance of Automotive Lamp Sealants[J]. Automobile Technology & Material, 2026(4): 50-57.

UV漆固化后表面的自由能与化学键是决定漆层和胶黏剂界面键合强度的关键。喷涂UV漆可将C、N、O等元素引入基材表面[9],增加了表面能和极性,有利于提高胶黏剂与灯罩-壳体表面间的附着力[10]。

此外,胶黏剂的化学性质也会对界面产生影响[11]。车灯常用的冷胶多为以硅橡胶为基料的胶黏剂,是一种以硅氧键(Si-O-Si)为主链的高分子量弹性体,因此,冷胶的热稳定性更高,高温下化学键不易断裂和分解[12]。热胶的分子链中常含有氨基甲酸酯基团(-NHCOO-)或异氰酸酯基(-NCO),这2种官能团遇到多羟基化合物会发生固化反应,使其具有优良的黏结性能。但热胶在高温下极易发生热分解反应,分子链中的功能团易发生热降解,分子链断裂生成CO_2,使胶体强度下降[13]。喷涂UV漆能改善漆层与胶黏剂的界面相容性,且其化学交联反应能有效提高胶接件的界面结合力[14]。因此,黏结性能取决于漆层性质、胶黏剂的性能及固化机理间的协同作用[15]。

然而,业界对于胶黏剂的研究方向多为新胶黏剂研发,以期改善黏结性能[16],对于常用的2种胶黏剂在包含UV漆涂装的制造过程中的性能表现认知有限,特别是模拟真实环境的系统对比研究偏少,缺乏基于试验数据的研究与结论[17]。

针对上述问题,本文制备未喷漆和喷涂UV漆的聚丙烯(Polypropylene, PP)-聚碳酸酯(Polycarbonate,PC)剪切试样,采用冷胶与热胶进行黏结,并将试样置于6种典型环境条件中进行模拟验证,采用对比试验研究喷涂UV漆后灯罩与壳体的黏结强度能否在各种严苛环境下保持稳定,持续满足技术规范要求,以及对喷涂UV漆前、后的灯罩与壳体采用热胶和冷胶2种密封工艺的性能是否存在差异。

2　试验

2.1　材料准备及设备

本文采用的试验材料是尺寸为100 mm×25 mm×4 mm的PP样片、PC样片各120块。

采用的涂层材料是型号为UVHC5000的UV漆,该UV漆为车灯行业常用油漆,其标准膜厚为8~14 μm,固化温度为65~95 ℃,恒温时间为1.5~6 min,固化能量为3 000~8 000 mJ/cm^2,光强大于200 mW/cm^2。

采用的胶黏剂为7091冷胶(单组分硅胶)与750-2热胶(单组分湿气固化反应型聚氨酯热熔胶(Polyurethane Reactive,PUR))。

采用的处理设备为自动喷涂装置、等离子处理设备、高温烘箱、紫外光固化装置、拉伸试验机、数显恒温水浴锅。

2.2　试验方法与步骤

为对比UV漆对灯罩-壳体黏结性能的影响,分别采用无UV漆与喷涂UV漆2种方案进行试验。将样板按冷胶和热胶分为2类,每类60对样板,再按试验设计分为无UV漆与喷涂UV漆2组,每组30对样板,按照6种试验条件分为6组,每组包含5对PP-PC黏结试样,分别命名为001、002、003、004、005。

2.2.1　UV漆喷涂与固化处理

采用生产线上的自动喷涂装置对预处理后的60个灯罩试样进行UV漆喷涂,UV喷涂线洁净度等级为10 000级。喷涂完成后,使用紫外光固化装置按工艺设置条件进行固化。

2.2.2　样件预处理

为模拟实际生产中灯罩和壳体在喷涂UV漆前的等离子处理工艺,对所有试样进行等离子处理,以提高胶水黏结强度并提高UV漆附着力。采用的PG-1000Z/D等离子设备的关键参数为:气源压力为0.4~0.6 MPa(使用外置空压机),等离子火焰输出功率为700~800 W,喷枪处理速度为30~90 m/min,火焰顶端与试样表面距离为15~20 cm。等离子处理后,将样板置于干燥洁净环境中待用。

2.2.3　黏结试样制备

使用黏结工装黏结灯罩与壳体样片,如图1所示。将壳体样片置于专用工装上,使用定量涂胶设备(涂胶量约为0.7 g)沿宽度方向在壳体样片上均匀涂覆,黏结面积为25 mm×25 mm,随后迅速将灯罩样片置于专用工装上,与壳体样片黏

结。通过紧固螺栓对黏结部位施加恒定且均匀的压力，控制样片之间的胶水厚度为(1±0.2) mm，确保两样片平行，胶层均匀分布，直至密封胶完全固化，所有试样在相同初始条件下形成黏结层，试样黏结示意如图2所示。此外，在施加压力过程中，少量胶黏剂会从搭接区边缘挤出，使试样的实际有效黏结面积略小于理论面积，由于所有试样的制备工艺参数严格一致，该偏差不影响试验结果。

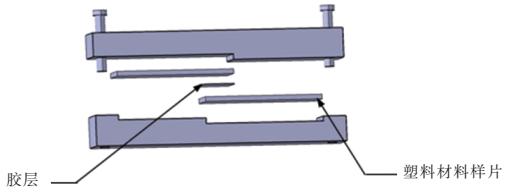


图1 专用工装示意

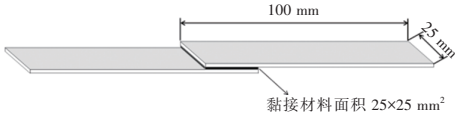


图2 试样黏结示意

2.2.4 试验处理

将样片分别放置于6种试验环境中，分别为：

a. 在初始状态下对样片进行拉伸剪切力测试，如图3a所示；

b. 在高温状态下，将样片置于高温烘箱中保温2 h，设置烘箱温度为80 ℃，如图3b所示，取出后30 s内进行拉伸剪切力测试；

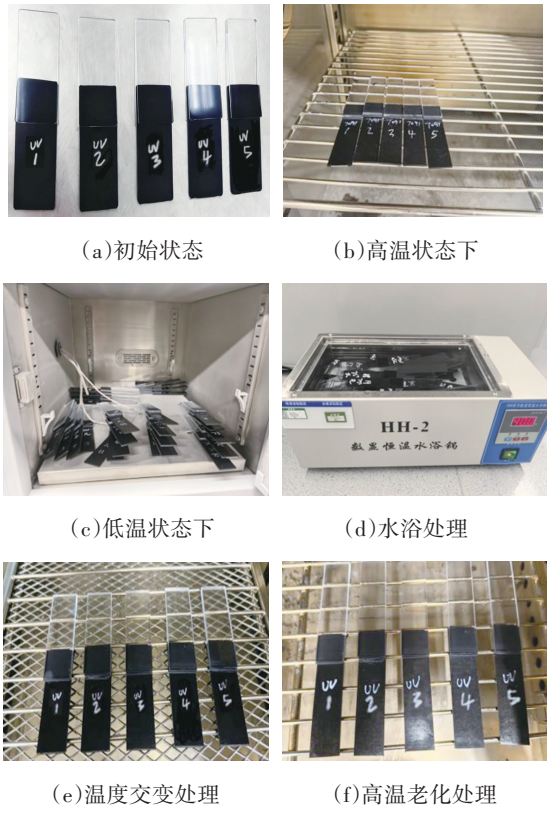
c. 在低温状态下，将样片在-40 ℃温度下保温2 h，取出后30 s内进行拉伸剪切力测试，低温预处理过程如图3c所示；

d. 耐水性测试，将试样在40 ℃的恒温水浴锅中浸泡14天，如图3d所示，取出后30 s内进行拉伸剪切力测试；

e. 温度交变测试，按照大众汽车PV1200《汽车零件气候交变稳定性试验》要求，进行20个循环后，进行拉伸剪切力测试，温度交变处理如图3e所示；

f. 高温老化测试，试样在90 ℃温度下存放14天，取出后进行拉伸剪切力测试，高温老化过程如图3f所示。

6种试验环境的黏结强度要求如表1所示。



(a)初始状态 (b)高温状态下

(c)低温状态下 (d)水浴处理

(e)温度交变处理 (f)高温老化处理

图3 6种试验环境示意

表1 试验条件及黏接强度要求[18]

试验条件	剪切力/N	
	冷胶	热胶
初始状态	≥600	≥900
高温状态下	≥400	≥400
低温状态下	≥1 000	≥1 000
耐水性	≥500	≥900
温度交变	≥400	≥900
高温老化	≥600	≥1 000

2.3 拉伸剪切力测试

本文采用拉伸剪切强度作为核心评价指标，该测试可有效表征材料在平行于黏结面方向的载荷下的失效抗力，核心是通过万能试验机施加平行于黏接面的拉伸载荷，直至试样脱离[19]。

本次试验的黏结强度测试参照ASTM D3236-15(2021)《Standard Test Method for Apparent Viscosity of Hot Melt Adhesives and Coating Materials》和ASTM D2452-15《Standard Test Method for Extrudability of Oil- and Resin-Base Caulking Compounds》[20]进行。使用配备自动对中夹持系统和自动记录装置的拉伸试验机对黏接试样施加拉

伸载荷,试验时的最大负荷是其量程的15%~85%,力值示值误差小于1%。所有测试均在标准实验室环境23 ℃±1 ℃温度中进行。

拉伸试验过程如图4所示,将制备好的标准试样对称地夹持于拉伸试验机上,确保载荷方向平行于黏结面,设置拉伸试验机以50 mm/min的拉伸速度对试样进行拉伸,直至试样破坏。记录此时的最大剪切力。每组有效试样为5个,结果取平均值。

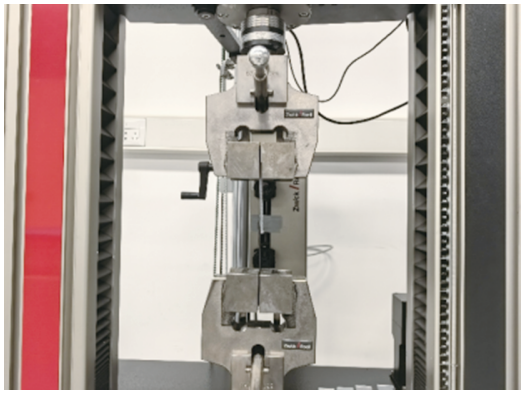


图4　拉伸试验过程

3　结果与讨论

3.1　剪切强度性能测试

对经过6种不同环境处理后的2种黏结试样进行了拉伸剪切力测试,以评估UV漆对冷胶和热胶黏结性能的影响[21]。冷胶和热胶的测试结果分别如表2、表3所示,冷胶与热胶在6种试验环境下,无论是否喷涂UV漆,剪切力均显著高于要求剪切力。

每组试验的剪切力均远超设计标准,表明UV漆层未对冷胶与热胶的黏结性能产生负面影响,UV漆层通过改变基材的表面特性,为密封胶提供了新的附着基础[22],使2种密封胶均表现出优异的界面适应性和环境耐受性。

表2　冷胶的拉伸剪切测试结果

油漆	试验条件	样品编号	剪切力/N	是否合格
无	初始	001	813	合格
		002	836	合格
		003	802	合格
		004	867	合格
		005	752	合格
	高温状态下	001	453	合格
		002	595	合格
		003	461	合格
		004	612	合格
		005	457	合格
	低温状态下	001	1 230	合格
		002	1 670	合格
		003	1 040	合格
		004	1 040	合格
		005	1 010	合格
	耐水性	001	720	合格
		002	667	合格
		003	729	合格
		004	715	合格
		005	792	合格
	温度交变	001	739	合格
		002	720	合格
		003	584	合格
		004	683	合格
		005	656	合格
	高温老化	001	886	合格
		002	823	合格
		003	950	合格
		004	823	合格
		005	870	合格
UV漆	初始	001	853	合格
		002	969	合格
		003	931	合格
		004	914	合格
		005	1 000	合格
	高温状态下	001	602	合格
		002	735	合格
		003	585	合格
		004	647	合格
		005	603	合格
	低温状态下	001	1 760	合格
		002	1 450	合格
		003	1 420	合格
		004	1 300	合格
		005	1 510	合格
	耐水性	001	926	合格
		002	857	合格
		003	737	合格
		004	877	合格
		005	689	合格

续表

油漆	试验条件	样品编号	剪切力/N	是否合格
UV漆	温度交变	001	695	合格
		002	805	合格
		003	766	合格
		004	683	合格
		005	873	合格
	高温老化	001	1 050	合格
		002	1 070	合格
		003	881	合格
		004	991	合格
		005	1 080	合格

表3 热胶的拉伸剪切测试结果

油漆	试验条件	样品编号	剪切力/N	是否合格
无	初始	001	2 110	合格
		002	2 110	合格
		003	2 110	合格
		004	1 940	合格
		005	2 220	合格
	高温状态下	001	475	合格
		002	581	合格
		003	513	合格
		004	484	合格
		005	501	合格
	低温状态下	001	2 810	合格
		002	3 270	合格
		003	2 600	合格
		004	3 730	合格
		005	3 200	合格
	耐水性	001	1 520	合格
		002	1 600	合格
		003	1 370	合格
		004	1 500	合格
		005	1 330	合格
	温度交变	001	1 860	合格
		002	1 720	合格
		003	2 130	合格
		004	1 780	合格
		005	1 880	合格
	高温老化	001	2 080	合格
		002	2 210	合格
		003	2 400	合格
		004	2 010	合格
		005	2 600	合格
UV漆	初始	001	1 920	合格
		002	2 610	合格
		003	1 760	合格
		004	2 040	合格
		005	1 770	合格
	高温状态下	001	505	合格
		002	492	合格
		003	464	合格
		004	466	合格
		005	618	合格
	低温状态下	001	4 050	合格
		002	3 680	合格
		003	2 530	合格
		004	2 950	合格
		005	3 250	合格
	耐水性	001	1 340	合格
		002	1 360	合格
		003	1 540	合格
		004	1 370	合格
		005	1 420	合格
	温度交变	001	1 460	合格
		002	1 800	合格
		003	1 580	合格
		004	1 580	合格
		005	1 940	合格
	高温老化	001	2 480	合格
		002	2 320	合格
		003	2 240	合格
		004	2 180	合格
		005	2 210	合格

3.2 统计分析

为评估喷涂UV漆是否对黏结性能有统计学意义上的显著影响，本文采用单因素方差分析分别对冷胶和热胶进行假设检验，通过比较组内差异和组间差异判断样本均值是否存在显著差异。以冷胶为例，通过比较冷胶在是否喷涂UV漆条件下的剪切强度均值，判断UV漆层对黏结性能的影响。

3.2.1 基础参数

本检验因素为是否进行喷涂UV漆处理，试验

总次数 n=12，因素水平数 m=2，单水平重复试验次数 r=6。

3.2.2　指标总和与平方和

指标总和 T 表达式为：

$$T = \sum_{n=1}^{12} Y_n \tag{1}$$

式中：n 为试验环境序号，Y_n 为第 n 组试验环境的平均剪切力。

指标的平方和 Q_T 表达式为：

$$Q_T = \sum_{n=1}^{12} Y_n^2 \tag{2}$$

3.2.3　偏差平方和与自由度

总偏差平方和 SST 反映了所有数据的波动，可分解为组间平方和 SSA 和组内平方和 SSE。

总偏差平方和 SST 表达式为：

$$SST = Q_T - \frac{T^2}{n} \tag{3}$$

组间偏差平方和 SSA 表达式为：

$$SSA = \sum_{i=1}^{2} \frac{T_i^2}{r} - \frac{T^2}{n} \tag{4}$$

式中：i 为因素的水平数，r 为单水平重复试验次数，T_i 为第 i 水平下的平均剪切力之和。

组内平方和为：

$$SSE = SST - SSA \tag{5}$$

总自由度 df$T$ 为：

$$\mathrm{df}T = n - 1 \tag{6}$$

组间自由度 df$A$ 为：

$$\mathrm{df}A = m - 1 \tag{7}$$

组内自由度 df$E$ 为：

$$\mathrm{df}E = \mathrm{df}T - \mathrm{df}A \tag{8}$$

组间均方 MSA 为：

$$MSA = \frac{SSA}{\mathrm{df}A} \tag{9}$$

组内均方 MSE 为：

$$MSE = \frac{SSE}{\mathrm{df}E} \tag{10}$$

冷胶的统计量 F_1 为：

$$F_1 = \frac{MSA}{MSE} \tag{11}$$

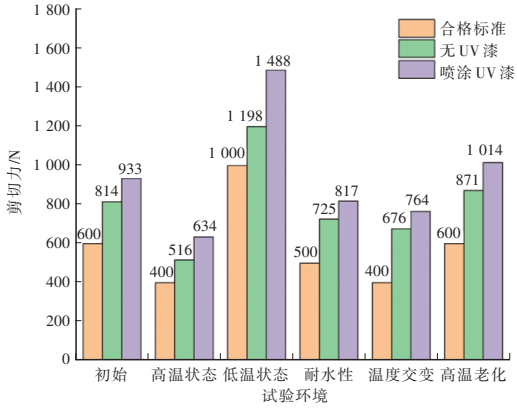
经计算，df$T$=11，df$A$=1，MSA=60 208.33 N^2，MSE=71 085 N^2，F_1=0.85。同理可得，热胶的统计量 F_2 = 0.000 3。

3.2.4　显著性检验

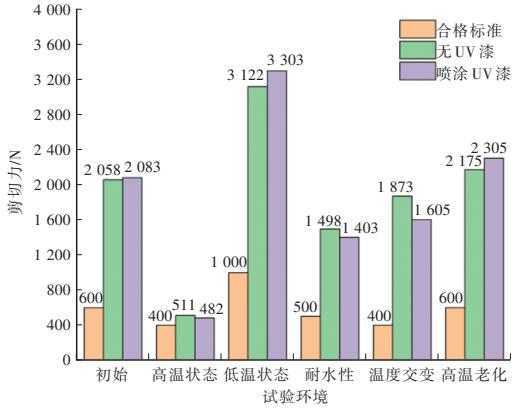
选取显著性水平 α=0.05 作为判断标准，查询 F 分布临界值表得 $F_{0.05}(1,10)$=4.96。由于 $F_1<F_{0.05}(1,10)$、$F_2<F_{0.05}(1,10)$，故对于冷胶和热胶而言，喷涂 UV 漆与不喷涂 UV 漆试样的剪切强度均值在统计学上无显著差异。

3.3　分析与讨论

为分析不同的胶黏剂在车灯生命周期内的表现，本文分析了冷胶和热胶对是否喷涂 UV 漆的不同性能特征，如图 5a、图 5b 所示。



(a)冷胶



(b)热胶

图 5　冷胶和热胶是否喷涂 UV 漆的剪切力对比

冷胶黏结的试样的试验结果趋势基本一致：在 6 种试验环境下，喷涂 UV 漆层试样的剪切力均大于未喷涂 UV 漆试样，特别是在低温状态，数值大幅超过合格标准。因此，对于冷胶体系，喷涂 UV 漆改善了界面性质[23]，提高了黏结可靠性和耐久性，原因为冷胶有效提升了界面极性，UV 漆层与冷胶之间具有优异的界面相容性，充分证明了“UV 漆层＋冷胶”工艺的可靠性。

热胶黏结的试样试验结果与冷胶试验结果存

在明显差异，表现出对试验环境的依赖性。在初始状态、低温状态和高温老化环境下，喷涂UV漆层试样的剪切力略大于未喷涂UV漆层的试样，在高温、耐水性、温度交变条件下，喷涂UV漆层的剪切力略小于未喷涂UV漆层的试样剪切力，但均满足合格标准。产生该现象的原因为热胶与复合界面的相互作用。热胶作为聚氨酯胶黏剂，其对水和高温较为敏感[24]，当温度升高时，热胶软化，导致内聚强度大幅下降，此时黏结性能多依赖于复合界面的作用力。UV漆层固化后形成的表面更为光滑，其与热胶之间的相互作用力可能弱于未喷涂试样[25]。因此，在胶体本身强度变弱的前提下，相对较弱的界面相互作用力导致喷涂UV漆的试样剪切力略低。温度交变试验通过循环冷热应力反复改变界面的性质，放大界面结合劣势，导致剪切力更低。水汽对于不同界面的渗透效应存在差异，但剪切力仍满足合格标准。因此，试验充分证明“UV漆层+热胶”工艺的可靠性。

综上，不论采用热胶还是冷胶，是否喷涂UV漆均能保证黏结性能。在模拟整车生命周期的各种严苛环境下，冷胶在喷涂UV漆的样件上具有更强的环境稳定性，对于工作环境复杂且对长期耐久性有较高要求的车灯产品，“UV漆层+冷胶”为优选方案。当产品应用环境以常温为主，或对生产效率、成本控制有更高要求时，“UV漆层+热胶”为可靠且经济高效的方案。

4 结束语

本文针对车灯制造中UV漆层对车灯壳体（PP）与灯罩（PC）黏结性能的影响，设计了对比试验，考察了UV漆层对车灯常用冷胶与热胶在6种典型环境下黏结性能的影响。通过对2种密封胶的灯罩和壳体黏结试样进行UV漆喷涂处理，并分别置于初始状态、高温状态、低温状态、耐水浸泡、温度交变及高温老化试验环境中进行拉伸剪切测试，获得以下结论：

a. 无论是否喷涂UV漆层，冷胶与热胶黏结试样的剪切强度在所有模拟环境中均大幅超过设计标准。因此，在灯罩上预先喷涂UV漆不会对后续密封黏结性能产生负面影响。

b. 冷胶体系与UV漆层协同效应显著，尤其在热应力相关的严苛环境下表现出更卓越的稳定性，是实现长期密封可靠的优选方案，特别适用于工作环境复杂的前照灯等。热胶体系性能达标，其价值在于为注重生产效率、成本控制与自动化生产的应用场景提供了可靠且高效的工艺选项。

参考文献：

[1] CHEN C F. Epoxy Adhesive Technology: Latest Developments and New Trends[J]. Progress in Adhesion and Adhesives, 2024, 8: 251-282.

[2] 任小军, 张强, 温旭东, 等. 有机硅密封胶在汽车车灯上的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2013(8): 53-54+60.

[3] 李涛, 刘鑫, 李牧松, 等. 单组分有机硅密封胶在汽车车灯领域的研究进展[J]. 化工科技, 2022, 30(2): 89-94.

[4] 陈建生, 刘海涛. 汽车车灯用胶概述[J]. 汽车零部件, 2012(4): 69-71+76.

[5] VITALE A, TRUSIANO G, BONGIOVANNI R. UV-Curing of Adhesives: A Critical Review[J]. Progress in Adhesion and Adhesives, 2018, 3: 105-161.

[6] BELINGARDI G, BRUNELLA V, MARTORANA B, et al. Thermoplastic Adhesive for Automotive Applications[J]. Adhesives - Applications and Properties, 2016(11).

[7] PENDAR M R, RODRIGUES F, PÁSCOA J C, et al. Review of Coating and Curing Processes: Evaluation in Automotive Industry[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(10).

[8] KANCHANA R, PONNUCHAMY M, KAPOOR A, et al. Coatings in the Automobile Application[J]. Functional Coatings for Biomedical, Energy, and Environmental Applications, 2024: 343-361.

[9] 徐智宝, 于壮壮, 陈俊宏, 等. 表面处理工艺对聚碳酸酯与聚氨酯密封胶黏接性能的影响[J]. 机械工程材料, 2025, 49(2): 86-91.

[10] 王大伟, 李晔, 刘志浩, 等. 低温等离子体表面改性对CFRP胶接性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2026-2037.

[11] HORIUCHI S, TERASAKI N, MIYAMAE T. Introduction-interfaces in Adhesion and Adhesive Bonding[J]. Interfacial Phenomena in Adhesion and Adhesive Bonding, 2023(10): 1-15.

[12] 郑英, 张斌, 罗思彬, 等. 车灯用密封胶耐久性的研究[J]. 有机硅材料, 2015, 29(4): 313-316.

[13] 郭一民, 刘忠侠, 蔡彬. 关于常用汽车胶粘剂的调

研[J]. 中国胶粘剂, 2018, 27(2): 47-50.

[14] 杨曼, 姜宏伟. -NCO基硅氧烷底涂剂对聚氨酯密封胶粘接性能的影响[J]. 中国胶粘剂, 2011, 20(6): 42-46.

[15] 丁超, 王旭. 黑色UV漆工艺研究及设备改进[J]. 广东化工, 2015, 42(19): 137-138.

[16] YE J, ZHANG Z H, HUANG S J, et al. UV-Curing Silicone-Based Adhesives with Improved Adhesion Strength and Aging Resistance[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(49): 21300-21311.

[17] MARURI T, ISOZAKI M, TAKEDA S, et al. Evaluation of True Bonding Strength for Adhesive Bonded Carbon Fiber-Reinforced Plastics[J]. Materials, 2024, 17(2): 11.

[18] POCIUS A V. Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction[M]. Carl Hanser Verlag, 2021.

[19] BUDZIK M K, WOLFAHRT M, REIS P, et al. Testing Mechanical Performance of Adhesively Bonded Composite Joints in Engineering Applications: An Overview[J]. The Journal of Adhesion, 2022, 98(14): 2133-2209.

[20] WYPYCH G. Handbook of adhesion promoters[M]. Elsevier, 2018.

[21] GAN J, ZHANG X, ZHANG W, et al. Research Progress of Bonding Agents and Their Performance Evaluation Methods[J]. Molecules, 2022, 27(2).

[22] COMYN J. Adhesion Science[M]. 2nd Edition. Royal Society of Chemistry, 2021.

[23] KRISTIANSSON S. UV Light Bonding in Manufacturing of Transparent Displays[D]. Helsinki: Metropolia University of Applied Sciences, 2023.

[24] DU L, LIU Z, YE Z, et al. Dynamic Cross-Linked Polyurethane Hot-Melt Adhesive with High Biomass Content and High Adhesive Strength Simultaneously[J]. European Polymer Journal, 2023, 182.

[25] LIU B, Yang J, Tang Y X, et al. Experimental Study on Structural Adhesive Properties of Aluminum Plate and Carbon Fiber-Reinforced Polymer Heterogeneous Materials[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2025, 239(3): 1453-1464.

AT&M