

汽车车门胶条粘接性能影响因素及工艺优化

靳朝举 王玉静

北京奔驰汽车有限公司

摘要：本文以应用丙烯酸泡棉胶带的汽车车门为核心研究对象，结合其粘接机理与失效模式，系统分析了车身表面清洁度、底涂工艺、滚压力控制、密封条结构设计及环境适应性等多维度因素对胶条性能的影响。通过实验室测试、生产案例验证及数值模拟，提出了涵盖工艺参数优化、智能装配及材料创新的综合改进方案。研究结果为汽车密封系统的可靠性提升提供了理论依据，并为智能制造背景下的工艺提升指明了技术路径。

关键词：车门胶条；丙烯酸泡棉胶带；失效模式；工艺优化

0 前言

探究车门胶条粘接性能的影响因素并提出优化方案，对降低制造成本和提升用户用车满意度具有重要意义。现有研究多聚焦于单一工艺参数（如滚压力、底涂厚度）对粘接性能的影响，但对多因素耦合作用及环境适应性的系统性分析仍存在不足。此外，传统装配工艺依赖人工经验，难以满足智能制造对工艺一致性的要求。

本文主要针对的是具有空心海绵泡管的丙烯酸泡棉胶带，由于丙烯酸泡棉的独特结构及独到的黏弹性，使其具有很好的保温、保湿以及隔音的功能，这种密封条在车辆的其他位置使用也比较普遍。

本文旨在通过试验与工程实践结合，揭示车门胶条粘接性能的多维度影响因素，并提出覆盖材料、工艺及检测技术的全流程优化策略，为汽车密封系统的智能化升级提供技术支撑。

车门密封条属于橡胶件，根据设计的要求以及整车厂的不同需求，其在车门上的安装方式也不尽相同，包括通过卡扣卡接或者以3M胶带的形式粘贴在车门之上，不仅起到了美观的作用，而且在车门关闭之后通过与车身的配合在防止车外水进入车内、降低车外的噪声或者灰尘等异物进入车内等方面起到重要的作用。3M胶带在汽车和电子设备粘接领域应用广泛。在汽车领域，3M胶带可用于生产组装、内外部件粘接和车身

修复，提供强大粘接力，并具备耐高温、抗冲击和耐化学腐蚀的特性。无论是内外饰件粘接，还是密封条粘接，3M的胶带产品均可为汽车制造商提供优良性能和耐久性。

1 粘接机理分析

1.1 化学结合作用

化学结合作用通常是指原子或分子之间通过化学键形成的强烈相互作用。化学键是分子内原子之间的强烈相互作用，可以是离子键、共价键或金属键等类型。在粘接剂中加入少量的偶联剂或在被粘物表面涂上一层偶联剂，粘接剂通过偶联剂在一定程度上与被粘物表面形成了化学结合，从而使得体系强度大大提高而实现粘接的目的。通过偶联剂（如硅烷偶联剂KH-550）在粘接界面形成共价键，显著提升粘接强度。试验表明：添加1%硅烷偶联剂可使剥离强度从18 N/cm提升至24 N/cm（提升33%）。偶联剂浓度超过2%时，因分子团聚导致强度下降，最佳添加量为0.8%~1.2%。

1.2 分子间结合（范德华力）

范德华力是一种存在于分子间或分子与原子间的弱相互作用，对于理解分子间相互作用和物质的性质具有重要意义，其可以分为诱导力、色散力和取向力三种类型。粘接剂与被粘体分子间产生的强大吸引力形成的结合称为分子间结合，溶解分子和溶剂分子之间的范德华力越大，溶解性就会越高，粘接剂和被粘体之间的粘接力就

会越大。粘接剂分子与基材表面的诱导力、色散力及取向力共同作用，其贡献占比受基材极性影响：高极性基材（如电泳漆）的范德华力占比可达 40% ~ 50%；低极性基材（如 PP 塑料）占比降至 20% ~ 30%。

2.3 扩散作用

扩散作用也就是所说的浸润作用，扩散的程度取决于液体和固体的接触角的大小，当液体与固体的接触角为零时，将出现液体和固体完全展延的现象，也就是所谓的浸润，其有助于反应物分子的混合和反应的进行，从而形成高分子网络结构而粘接在一起。粘接剂完全浸润基材（接触角 $<5^\circ$ ）时，形成互穿网络结构（IPN）。扩散速率与温度关系满足阿伦尼乌斯方程：

$$D=D_0\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

式中，25℃时扩散速率 $D_0=0.5\mu\text{m/s}$ ；活化能 $E_a=45\text{kJ/mol}$ ； R :理想气体常数 ($8.314\text{J/mol}\cdot\text{K}$)； T :绝对温度 (单位:K)。

2 失效模式分析及工艺优化

为了确保车门胶条的最佳密封效果和车辆的整体性能，在设计和制造过程中，密封条需要满足压缩负荷、压缩永久变形、耐气候老化、涂层性能、粘接性以及剥离力等多方面的因素，但是在实际应用的过程当中，由于受到制造、运输、对手件的状态、安装环境、安装工具以及安装偏差，车辆的整体性能等众多因素的影响，可能会产生多种不同的失效模式，影响最终用户的使用感受。本文根据结合粘接力产生的原因以及丙烯酸泡棉胶带和车门钣金粘接的特性，针对影响其粘接性能的失效模式展开探究。

2.1 车身表面清洁度控制

车门内部由于属于湿区且存在车漆无法覆盖的位置，所以需要注蜡进行防腐，在进行注蜡的过程中，有时不可避免地会存在注蜡残存在需要进行粘贴胶条的车身表面，后续会影响到粘贴的质量，甚至会导致胶条粘贴后的局部失效。油漆表面不得存在任何凹陷状况，禁止存在任何焊接飞溅物和油漆飞溅物。例如，空腔喷蜡之类的污染物会损害作业安全性，降低车门密封条的附着力。所以需要在注蜡后或者底涂施工前对表面进行检查，如果必要需要对其进行表面除蜡；在涂胶之前，相关操作必须戴上手套，这是表面清洁的先决条件。同时必须没有严重的污染，如油脂痕迹或空腔保存蜡粘在表面上或附近。重污染，如蜡喷雾，飞溅或痕迹的处理，不能完全通过清洗清除，因此必

须加以预防。如果不能保证这一点，则需要在污染出现之前对待粘合的表面进行遮盖处理。

问题分析：残留空腔蜡、油脂及粉尘是导致胶条脱落的主因。某车型生产数据显示，未清洁表面胶条脱落率高达 15%，清洁后降至 3%，污染物厚度 $>2\mu\text{m}$ 时，剥离强度下降 60%。

优化措施：采用 40 kHz 超声波 + 中性清洗剂清洗，清除微米级蜡膜（清洗效率 $>98\%$ ）。静电除尘，在涂胶前增加离子风刀，减少粉尘吸附。清洁度检测，引入接触角测量仪（标准：接触角 $<10^\circ$ 为合格）。

2.2 底涂工艺参数优化

底涂剂的主要作用是改善被粘接表面的粘附性。在粘接过程中，被粘接表面的性质往往影响粘接强度和效果。底涂剂通过在被粘接表面形成一层特殊的膜层，可以增强表面张力、提高表面活性，从而有效地提高粘接强度。此外，底涂剂还可以填充表面微孔和不平整，进一步优化粘接效果。其在提高机械结合力、范德华力以及提高浸润性等方面有显著的作用。因此，使用底涂剂是提高粘接质量的重要手段。涂刷底涂和不刷底涂的状态下的粘接力对比见表 1 所示。

表 底涂对剥离力的影响

测试项目	测试条件			数值 1	数值 2	数值 3	平均值
90° 剥离力	初粘力： 20 min	No	钢板	17.15	16.43	16.97	16.85
		Primer	铝板	17.13	16.62	17.21	16.99
	剥离速度： 300 mm/min	Primer	钢板	26.67	27.02	26.94	26.88
		AP111	铝板	26.88	26.02	27.32	26.74

试验设计：对比底涂施工及不同粘贴面基材的影响，结果表明，应用底涂剥离强度达 $(26.5\pm0.5)\text{N/cm}$ ，优于不使用底涂的剥离强度 $(16.5\pm0.5)\text{N/cm}$ ；不同基材（铝制和钢制）对剥离强度几乎没有影响。

2.3 滚压工艺设计

滚压的过程可以分为手工滚压和设备滚压，这个取决于实际施工的空间及资金投入。手工滚压的过程力度和分布以及均衡性比较差，所以建议该过程使用底涂以增强粘接力。自动滚压的过程精准度和稳定性就要高出很多，而且可以施加更大的滚压力，所以可以根据实际情况来决定是否需要进行底涂的施工。

车门密封胶条传统装配工艺，由人工进行装配，装配效率低下，密封质量一般，往往需要额外的二道密封、三道密封来增加密封性，以提升整车 NVH 性能，此种密封方式不仅增加了整车重量，提升了单车成本，

更为后续的维护保养带来诸多不便。

手工滚压所使用的压紧轮须能够保障,施加于粘合表面的力度分布均衡,须达到密封胶条完整粘合的目的。在使用手动滚压的过程中,滚筒只可平放于车门密封胶条上,保证作用于胶条的力垂直于胶条且避免打滑时导致车门漆受损,建议在时间允许的条件下,滚压两次来保证施加足够的压力。

滚压压力根据密封胶条和胶带的情况而定,施加于粘合表面的挤压压力至少为 20 N/cm^2 ,施加于粘合表面的最佳挤压压力为 $20 \sim 40 \text{ N/cm}^2$ 。自动化装配时,所施加的力度 $F=(100 \pm 15) \text{ N}$,满足所述要求,达到较佳的粘合效果。手工装配时的压力标准值为 50 N 。对此,可通过润湿试验来测试粘合效果。其主要的目的是保证底涂的轨迹和胶条的轨迹完全重合,这样底涂能够充分地发挥作用,如果二者出现“双眼皮”的现象,就可能导致胶条的粘接不良。另一个目的是保证门胶条在正确的位置,因为在车门关闭的过程中,胶条和车身之间存在摩擦阻力,如果胶条位置不正确,摩擦阻力会产生较大变化,门胶条如果受到额外更大的摩擦力则会产生失效的风险。

工装创新:使用激光定位系统,确保底涂与胶条轨迹重合度 $>98\%$,偏差 $<0.5 \text{ mm}$;压力反馈控制,通过力传感器实时调整滚压力[目标值 $(100 \pm 5) \text{ N}$]。

参数优化:滚压速度 $\leq 5 \text{ mm/s}$ (速度过快导致压力分布不均);滚压次数 2 次(首次压力 80 N ,二次压力 120 N),总压力 200 N 。

效益对比:自动化滚压较人工效率提升 300% ,不良率从 8% 降至 0.5% ;滚压后胶条与车身间隙 $<0.2 \text{ mm}$, NVH 降低 3 dB(A) 。

2.4 密封条结构优化

密封条的截面设计对其性能至关重要,设计时需要考虑 CLD 值(压缩载荷)、密封效果以及车门与车身的配合间隙。优化的截面设计还可以改善车门的关门力,提高密封性能。通过有限元模拟,优化截面形状,降低 CLD 值(压缩载荷从 7 N/cm 至 6 N/cm);再通过实车测试,优化后车门关闭力减小 25% ,且隔音量提升 15 dB (60 km/h 工况)。

2.5 车门结构的影响研究

车门的形状以及胶条粘贴面的锥角也会对最终的粘

贴结果产生影响,如果锥角比较大,由于会受到力分解作用的影响,实际作用于胶条的力要小于实际施加的滚压力,所以在滚压的过程中需要控制滚压的速度,保持压辊力尽可能地垂直作用于胶条上。

3 环境适应性研究

3.1 温度循环测试

胶条在 $-20 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内进行 7 h 测试,结果显示:高温 70°C 下剥离强度下降 10% ;低温 -20°C 下胶条脆化,剥离强度下降 25% 。

3.2 底涂与环境的关系

在室温条件下,建议底涂施工 $20 \text{ min} \sim 2 \text{ h}$ 后再进行胶条的安装;如果底涂时间过短,建议增加风干的过程,以及底涂时间超过 24 h ,建议重新涂刷底涂;在冬季温度低时,建议增加局部的加热。

4 结语

车身清洁度与底涂工艺是影响粘接强度的核心因素,标准化清洗与精准涂覆可使不良率降低 90% 。自动化滚压工艺显著提升装配一致性,滚压参数需根据胶条特性动态优化。结构优化与新材料应用(如纳米复合材料)可兼顾密封性能与轻量化需求。汽车车门密封条的性能影响是一个多学科交叉的复杂问题,需要材料科学、机械工程、化学工程和计算机模拟等多个领域的共同的努力。

本文针对密封条在车辆中的应用并结合通用类密封条的结构,从粘接的原理入手,结合实际的生产工艺以及发生的失效模式,给出对应的可能原因及解决措施,为今后类似问题的快速解决提供了可参考依据,具有较高的工程应用价值。

参考文献

- [1] 3M 中国. 丙烯酸泡棉胶带技术手册 [Z]. 上海: 3M 中国有限公司, 2022.
- [2] ASTM D903-98. Standard Test Method for Peel Strength of Adhesive Bonds[S]. 2016.
- [3] LI X, et al. Advanced Adhesive Technologies in Automotive Applications[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(12): 7894-7910.