

提升汽车门挤出密封件性能： 使用低摩擦、高耐久的水基涂料 以减少摩擦噪音

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

摘要：本文讨论了提升汽车门密封件性能的方法，特别是通过使用低摩擦、高耐久水基涂料来减少摩擦噪音。文中详细介绍了三元乙丙橡胶（EPDM）作为汽车风雨密封件的首选材料，并探讨了其带来的挑战，如高摩擦系数导致的噪音问题。文章还评估了不同干膜厚度的水基耐候密封涂料对涂层性能和噪音的影响，并通过实验数据展示了涂层厚度与噪音减少之间的关系。

关键词：密封性能；水基涂料；涂层厚度；噪音

中图分类号：TQ336.42

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2025)02-0073-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.02.016

在汽车工程领域，有许多用于车辆开口（车门、车窗、发动机罩、行李箱/舱口、天窗、敞篷车）的密封件，通常统称为密封件或密封条。防风雨密封件的功能不仅仅是将外部环境挡在车外，它们也是确保乘客舒适度的关键部件。三元乙丙橡胶（EPDM）是汽车防风雨密封的首选材料，因为 EPDM 具有优异的性能，不仅限于在恶劣环境中具有高稳定性，还具有合适的弹性、强度和耐用性，以及良好的耐热性和耐候性；EPDM 也是一种成本相对较低的材料。

然而，三元乙丙橡胶耐候密封件给汽车行业带来了挑战。具体而言，当防风雨密封件与其配合面发生相对移动时，高静摩擦系数和动摩擦系数会导致车厢内产生不必要的噪音。通常，这些不必要的噪音可能与车辆在路上撞到颠簸、转弯和制动/加速有关。这种不必要的噪音会大大降低车辆的感知价值。随着几代车辆的内部噪音技术完善，车内变得更安静，无论是通过电力推进系统的进步和/或对噪音、振动和不平顺性（NVH）问题的关注，防风雨密封的重要性都在增加。

滑动涂层水性涂料由 GBIE 于 1989 年首次推出，作为解决汽车防风雨密封相关噪声问题的方案，目前可以在几乎所有北美和欧洲原始设备制造商制造的车辆上找到。许多水基和非水基涂料都在市场上销售，

因为 EPDM 的差异带来了独特的问题，如黏附性、伸长率和美学问题，这些问题可能需要各种涂料解决方案。为了达到最佳的涂层性能，众多水基涂料需借助交联剂。这类系统被称为双组分系统（2K）。其他涂层可作为单组份（1K）系统提供，但这些涂层的性能通常较低和/或保质期明显较短。耐候密封涂层分为两大类：光滑涂层和纹理涂层。纹理涂层如果应用良好，可以提供非常耐用的涂层，并且应该持续到车辆的使用寿命。因此，它们应该在车辆的使用寿命内减少或消除不必要的噪声。相反，如果涂层不耐用，则涂层会失效并露出未涂层的 EPDM，从而导致不必要的噪声再次出现。涂层纹理为美学设计提供了丰富的可能性，因为纹理种类繁多。同样，不同的纹理可以解决车辆上的不同问题。

众所周知，在一定范围内，涂层厚度与涂层耐久性成正比。尚不清楚的是噪声与纹理涂层的涂层厚度之间的关系。假设液体涂层的均匀性恒定（在使用时总是被搅拌），液体涂层中的颗粒以每单位体积的固定

作者简介：章羽（1991-），男，本科，主要从事橡塑技术装备方面的研究，已发表论文多篇。

原文：RUBBER WORLD No.5/2024, by Joe Bencsik, Cassie Gage, Anthony Cervi and David Bareich, G. Bareich Import-Export (GBIE).

量存在。因此，每单位面积施加更多的液体体积不仅会增加干膜厚度，还会增加每单位面积的颗粒数量。本文评估了标准纹理化水基汽车耐候密封涂层中涂层厚度（基本上是每单位面积的颗粒数量）与不必要噪声之间的关系。

1 耐候密封涂料

某客户同意使用其工业生产设备在标准的 EPDM 天窗耐候密封条上涂布标准的纹理水性耐候密封涂料、GBIE 的 2K 系统：ARC-13/P5-UV-HSLV+B7 组分（ARC 指耐磨涂层），以不同的干膜厚度制备 10 个试品。B7 部分是一种水基交联剂，用量为 A 部分（ARC-13/P5-UV-HSLV）的 5%（质量分数）。试验的目的是使干膜厚度从非常低到高于原始设备制造商的规定。为此，将蠕动泵的泵设定值从低到高递增，以将液体涂料推入喷枪。每个泵设置都保留了一个天窗密封涂层样本。

2 干膜厚度标准

假设液体涂层中的颗粒在整个液体涂层中都是均匀的，那么固化涂层的干膜厚度（DFT）将与单位面积上的颗粒数量成正比。涂层试品在 EPDM 平板上制备，每个平板上都贴有一小块塑料薄膜（DFT 标签）。使用手持喷枪将涂料涂抹到多个测试板上，使每个测试板表面均匀接受不同量的涂料。然后在实验室烤箱中以 180 °C 的温度固化 8 min。用溶剂擦拭 DFT 标签的背面，以及 DFT 标签正面一角的一小部分。先用球形千分尺（球接触涂层面）在清洁过的 DFT 片角上归零，然后在 DFT 片涂层区域的表面测量五次，取平均值来确定涂层测试板的 DFT。然后获得每个测试板的放大表面图像。

3 干膜厚度比较评估

将放大的表面图像与使用球形千分尺对 DFT 标签进行量化的涂层测试板的放大表面图像进行对比，可以估算出生产部件的干膜厚度。测试包括一系列为涂层分析而开发的非常特殊的测试。

4 丁酮耐溶剂性测试

用一根 15 cm 长的木质棉签（Q 签）沾满甲乙酮（MEK），在一小块涂有甲乙酮的区域来回擦拭，称为双擦。测试区域必须始终保持溶剂湿润。末端显示出

底层的 EPDM。如果双擦 500 次仍未达到终点，则结果记录为 500+。

5 湿法耐磨测试

在待测涂层表面滴几滴水。将一枚固定在木钉上的一角硬币推入水中，与表面成 45° 角，在测试区域内以恒定的压力拉动。一个周期只在拉的方向上进行；然后将硬币提起，回到相同的起始位置，进行下一个周期。终点被认为是涂层的第一次失效，暴露出底层的三元乙丙橡胶；如果在 500 次循环中没有达到终点，结果将被重新记为 500+。

6 干法耐磨测试

将一块玻璃切割并打磨成半径约为 5 cm 的斜面。对玻璃面的接触面进行处理，以获得一致的表面粗糙度（GBIE 专利工艺）。试品被固定在玻璃面正下方的移动板上。移动板来回移动，行程长度为 8 cm。将凿子放到试品上，然后在玻璃凿子顶部放置一个砝码。细腻的海绵三元乙丙橡胶可能只能承受 0.5 kg 的砝码；一般的海绵橡胶可承受 1 kg 的砝码；致密的三元乙丙橡胶可承受 3 kg 的砝码。循环计数器在每个前进和后退的循环后进行计数，当测试轨道上有一小块涂层失效时就达到了终点。如果涂层在 100 000 次循环后仍未失效，则结果记录为 100 000+ 次循环。

7 声学测试

在隔音室内，将涂层试品放置在长约 80 cm 的半刚性臂上。配合面（汽车玻璃和汽车喷漆金属板）固定在一个固定平台上，平台升高直到涂层部件表面均匀地接触到配对表面，然后在涂层部件顶部放置一个重物，使密封件的球体被压缩到其原始高度的一半左右。将机械臂安装在一个可控的振动源上，并赋予其速度和振幅的随机模式。使用麦克风记录产生的声音，并使用软件确定产生的平均（等效）、最小和最大声音，单位为分贝。测试持续 1.5 min，在开始和结束时记录 30 s 的声音。结果取平均值。测试首先在干燥条件下进行，然后在潮湿条件下进行，即在涂层试品和配合面之间加水进行测试。

8 结果与讨论

汽车防风雨密封件是一种标准的天窗密封件（图 1），涂有标准的水基涂层；在这种情况下为 ARC-13/

P5-UV-HSLV+ 部分 B7。GBIE 的研发实验室通过手动喷涂将相同的涂层以一系列干膜厚度 (DFT) 涂覆在有 DFT 标签的平板上。使用球形干膜尺确定应用于每个测试板的 DFT, 并对每个板拍摄放大的表面图像 (图 2)。正如预期的那样, 每单位面积的颗粒数量与 DFT 成正比。



图 1 标准天窗防风雨密封件 (涂有 ARC-13/P5-UV-HSLV+ 材料, 零件 B7) 的横截面

还对在工业生产设备上以不同 DFT 涂覆的试品拍摄了表面图像 (图 3), 并通过与用球形干膜尺量化的测试板的表面图像进行比较来确定估计的 DFT。正如预期的那样, DFT 在所有样本中都有所增加。

对涂有汽车涂料的金属板测试板以及汽车玻璃面板进行了声学测试 (表 1)。进行了定性 (技术人员听力) 和定量测量 (微型电话录音的计算机评估)。技术人员仔细聆听噪声的定性评估通过颜色编码显示; 这仅适用于 L 最大值, 黄色 (微弱 / 很少) 和红色 (响亮 / 频繁)。定量结果以 L 当量报告, 这是一个报告整个测试期间平均噪声的单一值; L 最小值和 L 最大值, 分别是测试期间记录的最安静和最响亮的噪声。测试条件包括在涂有汽车涂料的金属板测试板和一块扁平的汽车玻璃上的干燥和湿润条件。定性和定量结果相互吻合。在潮湿和干燥条件下, 无论是涂漆金属板还是玻璃, 未涂层的 EPDM 耐候密封件都被发现噪音最大 (表 1, 图 4 和 5)。比较在不同 DFT 下涂覆的试品, 很明显, 与未涂覆的 EPDM 耐候密封相比, 即使少量

表 1 在工业设备上制备的 ARC-13/P5-UV-HSLV+B7 部分试验试品的声学测试结果

| ID# | 试品 | 噪声测试分贝 (dBA) | | | | | |
|-------|---------------|--------------|------|-------|------|-------|------|
| | | 等效 L | | L 最小值 | | L 最大值 | |
| | | 干燥 | 湿润 | 干燥 | 湿润 | 干燥 | 湿润 |
| 涂漆金属板 | | | | | | | |
| 1 | 无涂层 | 43.7 | 45.4 | 32.7 | 32.5 | 55.7 | 53.2 |
| 2 | 试品 1 ~3 μm | 39.6 | 37.3 | 36.4 | 35.2 | 44.5 | 44.3 |
| 3 | 试品 2 ~3 μm | 39.8 | 37.1 | 36.9 | 35.6 | 44.8 | 43.3 |
| 4 | 试品 3 5 μm | 38.9 | 37.9 | 35.4 | 34.7 | 40.4 | 39.2 |
| 5 | 试品 4 ~6 μm | 37.7 | 36.7 | 35.2 | 34.7 | 41.0 | 40.1 |
| 6 | 试品 5 ~8 μm | 36.7 | 35.2 | 34.6 | 32.9 | 39.4 | 38.5 |
| 7 | 试品 6 ~10 μm | 36.2 | 34.9 | 33.5 | 32.0 | 40.0 | 39.1 |
| 8 | 试品 7 ~13 μm | 35.9 | 35.5 | 33.3 | 33.5 | 38.6 | 38.8 |
| 9 | 试品 8 ~15 μm | 36.8 | 36.3 | 34.3 | 33.3 | 39.9 | 39.8 |
| 10 | 试品 9 ~17 μm | 37.3 | 35.6 | 34.6 | 33.3 | 38.8 | 39.3 |
| 11 | 试品 10 ~20 μm | 37.9 | 36.7 | 35.1 | 33.7 | 39.0 | 40.0 |
| 玻璃面板 | | | | | | | |
| 12 | 无涂层 | 48.7 | 45.3 | 37.6 | 36.9 | 57.7 | 54.0 |
| 13 | 试品 1 ~3 μm | 38.2 | 37.9 | 35.5 | 34.8 | 44.0 | 44.5 |
| 14 | 试品 2 ~31 μm | 38.2 | 38.3 | 35.1 | 34.7 | 44.3 | 44.8 |
| 15 | 试品 3 ~5 μm | 36.8 | 37.3 | 35.6 | 35.0 | 40.2 | 40.3 |
| 16 | 试品 4 ~6 μm | 37.5 | 36.9 | 35.1 | 34.2 | 40.9 | 40.3 |
| 17 | 试品 5 ~8 μm | 37.7 | 35.0 | 34.4 | 32.7 | 41.7 | 38.3 |
| 18 | 试品 6 ~10 μm | 35.9 | 35.9 | 33.3 | 33.1 | 39.1 | 39.6 |
| 19 | 试品 7 ~13 μm | 34.7 | 36.6 | 32.9 | 33.1 | 37.6 | 40.4 |
| 20 | 试品 8 ~15 μm | 39.3 | 35.6 | 33.8 | 32.5 | 39.7 | 39.9 |
| 21 | 试品 9 ~17 μm | 38.4 | 35.2 | 35.5 | 33.0 | 39.1 | 38.3 |
| 22 | 试品 10 约 20 μm | 36.5 | 36.2 | 33.9 | 33.9 | 38.3 | 38.1 |

的涂层也会降低噪音。噪声随着 DFT 的增加而继续改善 (降低), 在 8~13 μm 的 DFT 范围内变得听不见 (见表 1 中干测试的 L 最大值, 以及图 4 和图 5 中的总杆高度)。

在表 1 中, 所有值都是在随机振动器控制下, 使用 Brüel&Kjaer2270 分析仪在 30 s 的测试期内以分贝为单位记录的两次独立运行的平均值。黄色突出显示的结果表明, 技术人员很少听到微弱的噪音。红色突

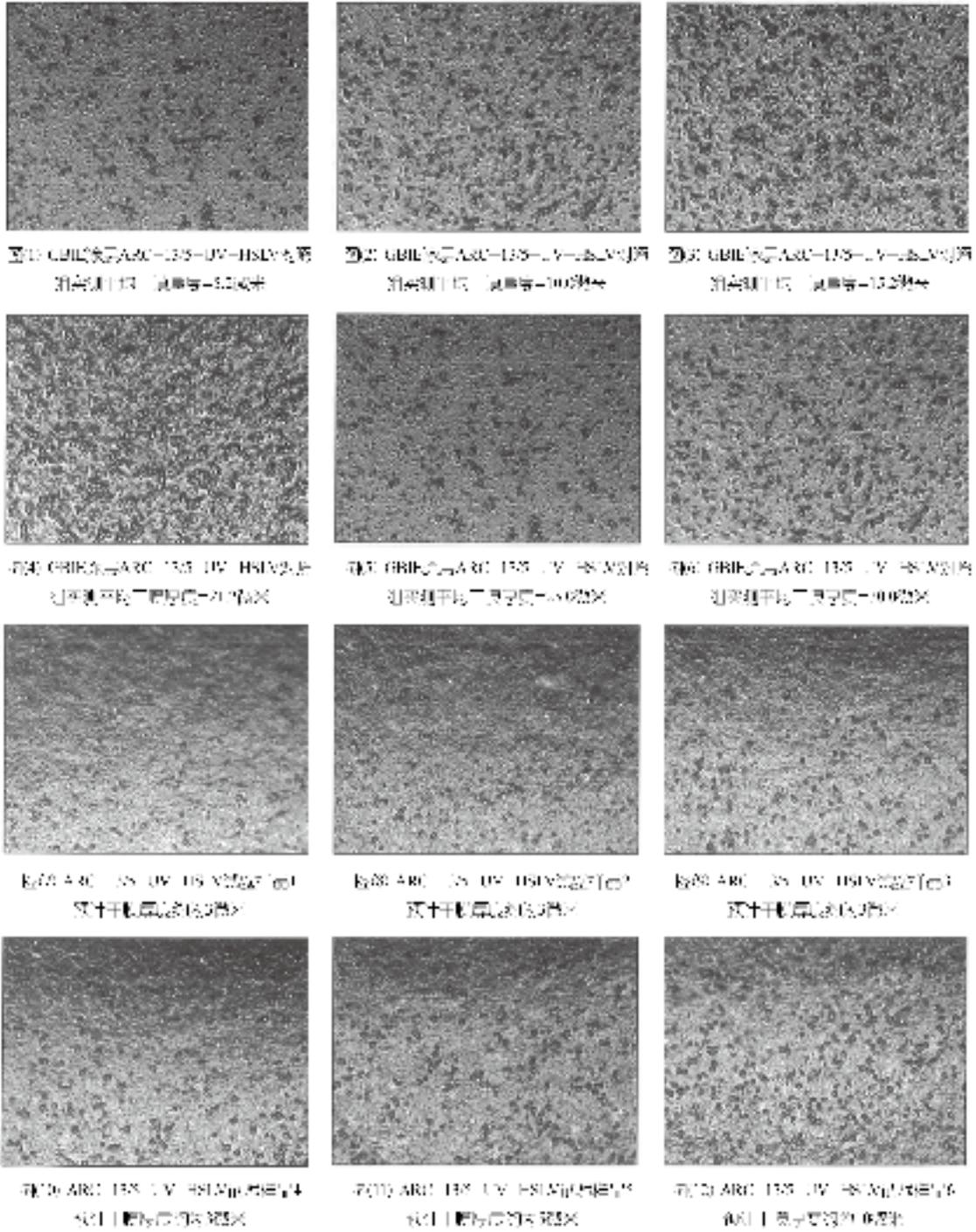


图2 GBIE涂层的ARC-13/P5-UV-HSLV+B7部分在不同干膜厚度下的放大表面图像，用球形千分尺量化（图像放大70倍）

出显示的数字表示技术人员经常听到巨大的吱吱声。没有突出显示表示技术人员没有听到任何噪音。

涂层性能通过三项测试进行评估：甲基乙基酮（MEK）耐溶剂性、湿磨损（用水刮角）和干磨损（玻

璃窗磨损）（表2）。在表2中，所有数据都是两次独立运行的平均值。当结果旁边显示+时，表示在指定的循环/摩擦次数下尚未达到销毁终点。在进行破坏性测试时，涂层的厚度对涂层性能很重要。

表 2 在标准 EPDM 天窗密封件上, 使用工业设备涂覆 ARC-13/P5-UV-HSLV+B7 部分的涂层性能结果

| ID# | 试品 | 预计干膜厚度 (μm) | MEK 耐溶剂性 (双摩擦) | 用水刮 (摩擦) | 玻璃啣磨损 (1 kg 以下循环次数) |
|-----|----|-------------|----------------|----------|---------------------|
| 23 | 1 | ~3 | 300 | 350 | 4 345 |
| 24 | 2 | ~3 | 415 | 470 | 8 498 |
| 25 | 3 | ~5 | 400 | 495 | 12 573 |
| 26 | 4 | ~6 | 470 | 500+ | 10 968 |
| 27 | 5 | ~8 | 490 | 500+ | 18 630 |
| 28 | 6 | ~10 | 500+ | 500+ | 24 073 |
| 29 | 7 | ~13 | 500+ | 500+ | 33 465 |
| 30 | 8 | ~15 | 500+ | 500+ | 42 848 |
| 31 | 9 | ~17 | 500+ | 500+ | 80 223 |
| 32 | 10 | ~20 | 500+ | 500+ | 82 998 |

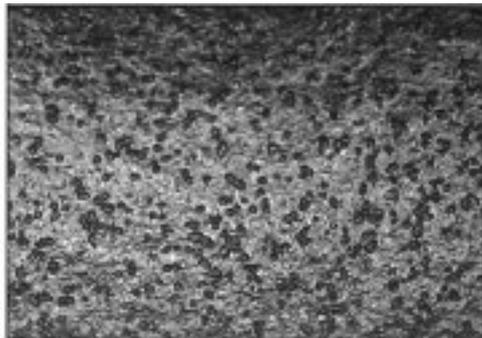


图13) 试品7估计干膜厚度约为13微米

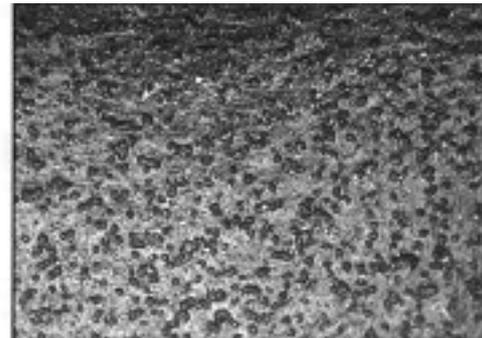


图14) ARC-13/PD-UV-HSLV试品估计干膜厚度约为14微米

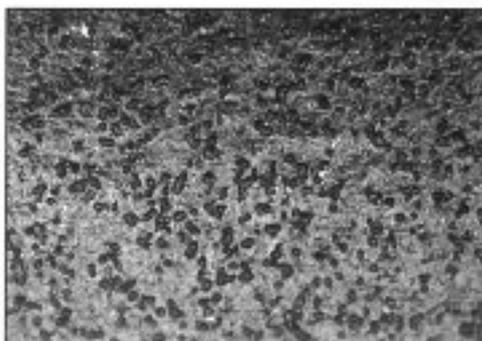


图15) ARC-13/PD-UV-HSLV试品9估计干膜厚度约为17微米

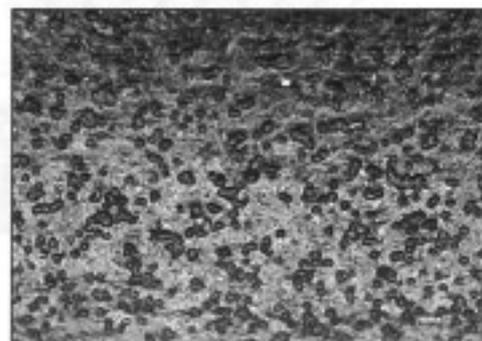


图16) ARC-13/PD-UV-HSLV试品10估计干膜厚度约为20微米

图 3 展示了涂有 ARC-13/P5-HSLV+PartB7 的试验试品的放大表面图像 (图像放大 70 倍), 估计的干膜厚度 (DFT) 是通过与测量 DFT 的 GBIE 对照试品进行视觉对比得出的 (如图 2 所示)

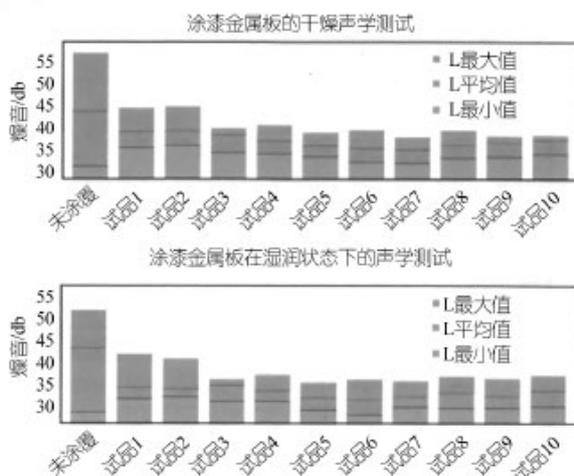


图 4 在不同 DFT 条件下, 每个工业涂层试品在干式和湿式条件下对涂漆金属面板的声学测试结果

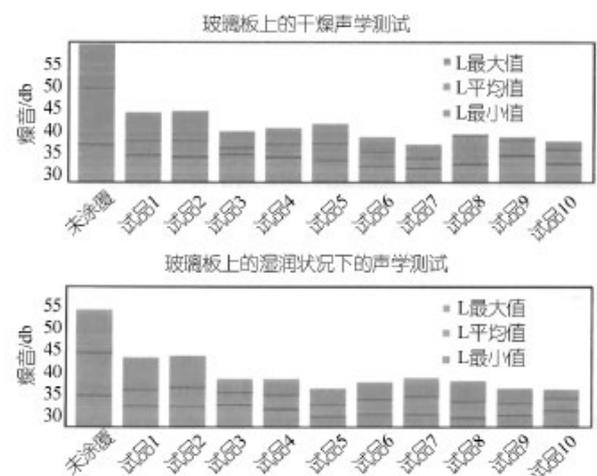
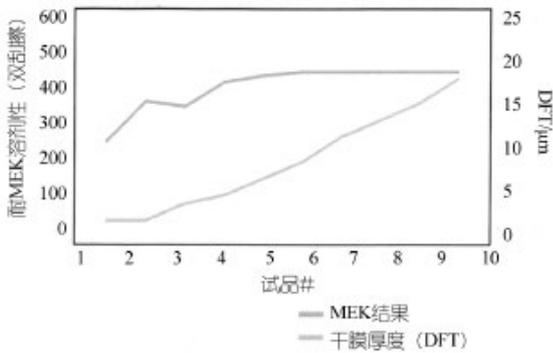
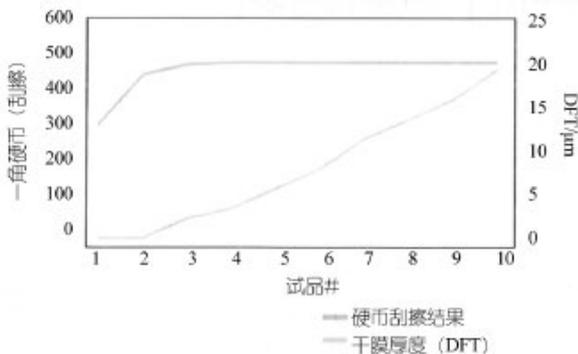


图 5 在不同干膜厚度条件下, 每个工业涂层试品在干和湿条件下对玻璃面板的声学测试结果



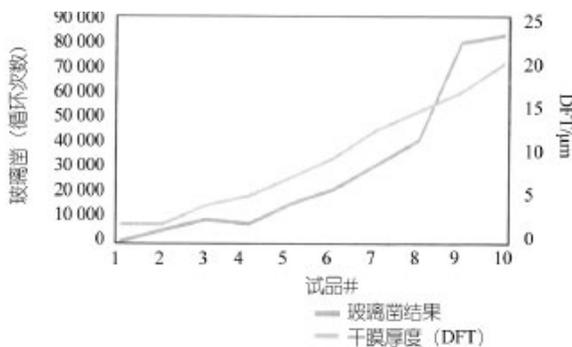
注：测试完成的终点为测试区域涂层首次出现完全失效迹象或达到 500 次双刮擦

图 6 工业涂料试验试品的耐湿磨性和干膜厚度，其中涂料的干膜厚度各不相同



注：测试完成的终点为试验区涂层出现完全失效迹象或第 500 次刮擦

图 7 工业涂料试验试品的耐湿磨性和干膜厚度，其中涂料的干膜厚度各不相同



注：试验终点是试验区涂层首次出现失效迹象或 100 000 次循环

图 8 工业涂料试验试品的干膜耐磨性和干膜厚度，其中涂层的干膜厚度各不相同

所有三项测试都显示出对 DFT 的一定程度的敏感性（图 6、7 和 8）。耐 MEK 溶剂性 100 以上良好；300 以上很好；500+ 是优秀的。比较不同 DFT 的结果，耐溶剂性在 10 μm 处趋于平稳（图 6）。湿式耐磨性测试非常善于发现灾难性的涂层故障，例如涂层起泡或涂层施加前表面有其他污染物。然而，它不善于区分

好的涂层，以及显示哪种涂层更好。对于角刮，300 次以上的湿磨效果良好，500 次以上的效果极佳。湿耐磨性在 6 μm 处达到平台，表明测试看不到良好涂层之间的差异（图 7）。干磨损结果通常对 DFT 非常敏感，平均 10 000 次循环，30 000 次循环良好，50 000 次以上非常好，100 000 次循环表现出色。干耐磨性随着干膜厚度的增加而提高，并且在试验样品中的任何干膜厚度上都不会趋于平稳；但在 13 μm 及以上达到良好结果（图 8）。车辆行驶的环境在世界各地差异很大；但在世界大部分地区，主要条件是干燥条件，因此应更加重视干磨损结果。

9 结论

在汽车行业，感知价值在车主的购买决策中非常重要，它影响着汽车生产线以及汽车 OEM 的声誉。施加汽车防水涂层的原因有很多；例如，涂层直接增加了质量参数，如密封的耐久性和磨损，以配合和隐藏缺陷，如挤出物和模制品之间的分模线。然而，涂层耐候密封件的最重要原因是减少或消除耐候密封件和配合面之间相对运动时产生的不必要的噪音，这些噪音可能来自车辆在行驶条件下经历的振动和扭转。车内不必要的噪音大大降低了车辆的感知价值。

本文评估了标准 EPDM 天窗耐候密封件的涂层干膜厚度与涂层性能和 unnecessary 噪音之间的关系。虽然本文中对工业涂层密封件的 DFT 评估只是估计值，但观察到涂层性能随着估计 DFT 的增加而增加，不必要的噪音随着估计 DFT 增加而减少的趋势。由于涂层可以减少或消除不必要的噪音，因此涂层在车辆的使用寿命内持续使用至关重要，这样不必要的噪音就不会随着驾驶时间的推移而回来。因此，涂层性能或耐久性也是一个关键因素。

使用特定 2K 涂层 ARC-13/P5-UV-HSLV+PartB7 的结果表明，在 8~13 μm 范围内降低不必要的噪声方面有所改善。然而，涂层性能还能继续提高，甚至远远超过 13 μm 。影响决策的另一个因素是成本，因为成本与涂覆的涂层量成正比。然而，相对于用于制造零件的 EPDM 的成本，3~5 μm 的涂层额外成本（例如从 10~15 μm ）可以忽略不计。当然，噪声特性和涂层性能等因素将取决于许多因素，包括涂层应用于零件时的加工条件；而且也影响涂层本身。本文所呈现的结果是针对 GBIE 的一种标准纹理水性涂料；其他涂层的结果可能大不相同。

