

**GORE®汽车防水透气产品**

适用于外部照明车灯

# 逾30年的专业经验和创新 解决方案，助力客户应对 车灯凝露管理挑战

车灯凝露解决方案白皮书

*Together, improving life*



# 目录

|   |    |
|---|----|
| 执行摘要 .....                                | 1  |
| 介绍 .....                                  | 2  |
| 一、个性化智能交互成未来车灯设计主流，但耐用性仍是基石 .....         | 3  |
| 1.1 智能电动趋势下，车灯个性化及智能交互价值日益凸显 .....        | 3  |
| 1.2 光启未来：戈尔专家深度解读未来车灯的设计趋势 .....          | 3  |
| 1.3 耐用性的关键之一：实现车灯全生命周期的凝露管理 .....         | 6  |
| 1.4 汽车电动化进程中的车灯凝露管理四大挑战 .....             | 11 |
| 二、多维剖析凝露成因矩阵，专业铺就车灯“出海”坦途 .....           | 12 |
| 2.1 车灯凝露背后的科学机理与关键影响因素 .....              | 12 |
| 2.2 实测和调研数据说话：电动趋势下的车灯凝露挑战 .....          | 17 |
| 2.3 物理实验及仿真模拟，BEV车灯透气方案的综合评估与优势体现 .....   | 19 |
| 三、戈尔实验室的秘密：企业标准缘何成为行业事实标准？ .....          | 22 |
| 3.1 护航适用性、可靠性和一致性的严苛测试体系 .....            | 22 |
| 3.2 戈尔标准缘何成为行业事实标准？ .....                 | 24 |
| 3.3 戈尔：领跑车灯凝露管理，致力于成为车灯凝露管理的全生命周期伙伴 ..... | 25 |
| 3.4 顺应车灯设计趋势的服务承诺 .....                   | 25 |
| 四、结束语：戈尔，车灯凝露解决方案的首选！ .....               | 25 |
| 五、致谢 .....                                | 26 |

# 执行摘要

随着汽车电动化和智能化浪潮的到来，车灯设计正经历着从单一照明工具向集成多种先进功能的智能组件的转型。车灯的多元化、电子化和交互化趋势日益凸显，但这也带来了新的挑战，其中车灯凝露管理问题尤为突出。

毕竟，这一切都需要建立在车灯在汽车全生命周期中长久、安全使用的基础上。事实上，车灯凝露是汽车照明领域长期存在的难题。一方面，车灯凝露的形成机理复杂，涉及材料特性、车灯设计、密封性能、环境温湿度变化、热管理等多维度；另一方面，凝露不仅会导致车灯光线模糊，降低驾驶员视线，还会引发车灯内电子元器件的失效，这两点均会引发汽车驾驶的安全性。可以说，电动化和智能化的加速发展，促使车灯凝露管理变得愈发严峻。

作为ePTFE（膨体聚四氟乙烯膜）材料的发明者和车灯防水透气膜应用的全球先行者，戈尔凭借30多年的车灯凝露管理的开发和测试经验积累，为车灯行业提供了一系列高性能的防水透气膜解决方案。戈尔防水透气膜产品具有卓越的水汽散发率（MVTR）和耐水压（WEP）性能，能够在各种复杂环境下有效清除车灯凝露，并防止水分进入车灯内部，从而提升车灯的清晰度、可靠性和耐用性。

此外，戈尔不仅提供高质量的凝露解决方案，还致力于成为车灯制造商和OEM厂商在车灯凝露管理维度可信赖的长期合作伙伴。通过先进的实验室测试设备和车载测试能力，戈尔深入剖析了车灯凝露的成因矩阵，揭示了电动化趋势对车灯凝露管理的挑战，并能够为客户提供专业的质量检测服务，帮助客户精准定位车灯设计潜在问题，提供有效的解决方案。

未来，戈尔致力于伴随汽车产业变迁共成长，成为车灯制造商和OEM厂商在车灯凝露解决方案的首选合作伙伴，为客户提供更加可靠、高效和创新的产品和服务，助力行业向更加绿色、智能、可持续的方向发展，共同开创汽车照明领域的美好未来！

# 介绍

在当前汽车行业快速发展的背景下，车灯凝露问题已成为影响驾驶安全、车辆可靠性和用户体验的关键因素。本白皮书深入剖析了车灯凝露现象的成因及其对行业的深远影响，并为包括车灯制造商以及主机厂呈现了一套旨在提升车灯性能的创新解决方案。

基于这份白皮书，戈尔力求在产业链中就车灯凝露问题对车灯性能表现乃至整车驾驶体验的影响达成一致，进一步：

- **帮助客户提升驾驶安全与用户体验：**通过深入的科学研究和详实的数据展示，我们助力整个产业链深入洞察车灯凝露对照明效果及驾驶安全的潜在影响，旨在全面提升客户驾驶体验，为行业创造更高价值。
- **助力汽车行业应对电动化和智能化的挑战：**面对电动汽车带来的热力学特性和车灯设计变化，戈尔凭借本白皮书为产业链上下游揭示了如何有效应对这些挑战，确保车灯在电动化、智能化趋势下依然保持优异性能，进一步优化用户体验，为汽车行业的持续发展和创新贡献自身力量。

- **共享专业经验，推动技术进步：**我们试图通过这份白皮书分享戈尔公司30多年的车灯凝露管理经验，旨在为行业提供宝贵的参考，共同推动车灯凝露管理技术的发展。
- **携手传承专业智慧，引领技术创新前沿：**本白皮书承载了戈尔公司逾30年的车灯凝露管理专业知识与实践经验，旨在为行业同仁提供一份宝贵的资源手册。戈尔希望基于此，共同促进车灯凝露管理技术的进步。
- **携手打造产业协同共赢新篇章：**本白皮书不仅是一份有关知识和专有技术的分享，更是一个促进产业深度合作的桥梁。我们致力于与车灯制造商及OEM伙伴紧密联手，共同探讨车灯凝露问题的创新解决方案，齐心协力推动产业链各环节的协同发展，实现资源共享，共创行业共赢的未来。

为客户创造价值，推动行业向前发展，是戈尔撰写这份白皮书的初衷。站在汽车行业掀起风起云涌变化的时间节点上，戈尔更希望能通过这份白皮书中分享的独家研究成果，以技术创新为内核，与产业链伙伴共同迎接挑战，携手打造更加繁荣、可持续发展的未来。

# 一、个性化智能交互成未来车灯设计主流，但耐用性仍是基石

## 1.1 智能电动趋势下，车灯个性化及智能交互价值日益凸显

在汽车的百年变迁历程中，车灯的发展同样引人瞩目。从最初的煤油灯、卤素灯、氙气灯到现代的LED灯以及激光灯，车灯的设计不断创新，功能不断完善——从简单的照明到品牌个性凸显，从提升安全性能到个性化交互，甚至不少车前大灯内集成了新的传感器和通信设备，例如激光雷达，也在一定程度上辅助实现了智驾功能。客观地说，车灯已成为OEM弘扬品牌个性和链接消费者的关键抓手。未来，在智能电动化趋势的推动下，车灯将不仅是汽车的必备配件，更是展现科技与美学完美结合的汽车零部件细分优质赛道。

根据Yole Développement预测，2027年全球汽车照明市场规模将达到422亿美元，前景可观。

随着电动汽车科技的迅速演进以及消费者对于独特性需求的逐渐增长，传统的车灯设计已经无法满足当前市场的需求。当今的消费者不仅寻求汽车在性能和环保特性上的卓越，同时也希望其外观设计能够展现出独特的个性和时尚元素。这催生了车灯设计从单一的照明功能转向更加多元化和个性化的方向。LED、激光等技术的广泛应用，使得车灯在能耗更低的同时，提供更强的光照效果，为车灯的形状和功能性，比如光型、照射范围、矩阵变换、车灯的明暗变换精度等提供更多的拓展可能性。

在智能交互方面，得益于物联网（IoT）和人工智能（AI）科技的飞速发展，车灯的功能也在不断拓展。现代智能车灯不仅能够根据环境光线和周围路况自动调节亮度，还能够通过与车辆的其他智能系统集成，实现更加复杂的交互功能。例如，车灯能够通过闪烁或变色来提醒驾驶员注意周围的行人或障碍物，或者通过特定的灯光模式与外部环境进行交互，从而提高行车的安全性。

展望未来，随着自动驾驶科技的发展，车灯的智能交互功能将在车与车、车与人之间的通信中发挥更加重要的作用，车灯的设计和也将进入一个快速发展的阶段。而这一切，都将以车灯在汽车全生命周期中的长久、安全使用为基础。

## 1.2 光启未来：戈尔专家深度解读未来车灯的设计趋势

“车灯是一辆汽车的视觉标识。所有的OEM厂商都在努力通过独特的车灯设计来彰显自身品牌个性。在新能源汽车浪潮中脱颖而出的中国OEM们正在参与到这场竞争中，并积极出走海外，向世界展示他们的设计理念和实力，车灯设计正是其中一个锚点。”

——戈尔创新方案事业部中国区  
商务运营总裁 苏翔

作为ePTFE材料<sup>1</sup>的发明者和车灯防水透气膜应用的全球先行者，戈尔一直紧密关注电动化和智能化的发展趋势对车灯设计的影响和重构。通过与全球，特别是中国车灯制造商以及主流OEM的深度交流，戈尔认为未来的车灯设计将主要呈现以下3大趋势：

- **多元化，车灯设计将成为品牌差异化的抓手：**随着消费者对汽车个性化追求的日益高涨，车灯设计正迅速演变成汽车制造商展现品牌独特性和满足用户定制需求的关键领域。一方面，现有车灯设计不断革新，例如向着更纤薄、更复杂的方向发展（图1-1）；又例如通过提供更多定制选项，OEM厂商赋予用户前所未有的自由度，自定义车灯的颜色、亮度乃至显示模式。



图1-1. 纤薄复杂的车灯设计已成主流趋势之一

注[1]：

1. ePTFE材料，中文全称膨体聚四氟乙烯膜，是由聚四氟乙烯树脂经过包括拉伸在内的一些特殊工艺加工而成。这种材料具备优异的生物兼容及化学惰性，同时拥有绝缘，阻燃，抗紫外线，防油疏水和极强的耐温性（-180°C到260°C）等特点。戈尔的生产的ePTFE材料具备其更加独特的优势：为汽车行业定制的防水透气产品材料拥有数十亿微孔，这些微孔比空气分子大700倍，同时比水滴小20,000倍，在有效阻隔液体和污染入侵的同时，确保了可靠的透气量和压力平衡。

另一方面，车灯的新增量市场也已形成，伴随电动化浪潮，传统格栅逐渐淡出，取而代之的是集科技感与艺术性于一体的格栅灯、星环灯和品牌Logo灯等照明型品牌标志的兴起，这些新颖的设计不仅强化了品牌的视觉辨识度，更成为吸引消费者目光的新焦点。(图1-2)



图1-2. 照明型品牌标志日渐兴起

当然，造型各异、空间纤薄狭窄也让车灯设计时兼具防水透气和压力平衡的凝露解决方案成为必需。毕竟，没有哪个OEM厂商愿意看到在如此引人注目的车灯中产生不易消散的凝露。

“在汽车电动化的进程中，中国本土OEM在电动化的领先趋势也进而带动了汽车照明系统的创新变革。毋庸置疑，中国电动车市场的蓬勃发展推动了具有中国特色的汽车照明设计，从而也推动了整个车灯行业的发展。即使对于国际主流的车灯制造商来说，引领其技术发展的潮流同样源自中国。”

—— 戈尔汽车事业部大中国区销售总监 陈赓

- **电子化，从单一的照明工具转型为集成多种先进功能的智能组件：**在汽车工业的百年变局中，电动化与智能化已成为不可逆转的发展潮流，特别是在中国，本土OEM厂商正以前沿的技术实力引领全球智能驾驶领域的革新。随着智能驾驶技术的飞速进步，车灯设计同样正经历一场深刻的变革，从单一的照明工具转型为集成多种先进功能的智能组件（图1-3），其重要性与日俱增。有数据表明（来源S&P），AHB（自动远光灯），ADB（自适应远光灯），AFS（自适应前照辅助灯）在中国车灯市场的配置会持续增长——到2029年，总量会突破5000万只。



图1-3. 车灯已从单一的照明组件变身多功能的智能组件

当前，车灯的电子化趋势显著，越来越多的电子元器件被巧妙地融入其中，赋予车灯前所未有的多功能性。例如，汽车前大灯已不再局限于基本的照明需求，而是集成了方向指示、交互，甚至作为环境感知的重要组成部分，协同自动驾驶系统精准感知周边环境变化。值得一提的是，一些前沿设计方案已将激光雷达模块嵌入车前大灯内，实现了照明与探测的完美结合，极大地提升了行车安全性和智能化水平。

电子化的推进，意味着车灯内部结构的复杂度显著增加，各类敏感电子元器件的加入对车灯的密封性和环境适应性提出了更高要求。尤其是在温湿度变化频繁的环境下，凝露现象可能对这些精密的电子元件造成潜在威胁，影响车灯的正常功能和使用寿命。因此，选择高效的凝露预防和管理方案，对于保护车灯内的电子元器件，确保其长期稳定运行，显得尤为重要。

“在车前大灯内融合激光雷达模块，也会使得前大灯内电子元器件数量增多，同时由于激光雷达对视觉清晰度有着极高要求，凝露问题的解决将更为关键，毕竟这会进一步影响到行车安全性以及激光雷达模块自身的正常使用。”

——戈尔汽车事业部电子产品线亚太区  
产品经理 马彦韵博士

- **交互化，从传统照明工具向交互性智能界面过渡：**如今，在汽车设计的前沿领域，车灯正逐步从传统的照明工具转变为具备高度交互性的智能界面，这一转变深刻地重塑了人与车辆，车辆与车辆之间的沟通方式。像素化大灯和OLED尾灯的广泛应用，标志着车灯设计进入了全新的交互时代，它们不仅能够提供精确的照明效果，还能够展示动态图案、文字信息，甚至是情感表达，从而增强了驾驶员与外部环境的互动体验。（图1-4）



图1-4. 正在展示动态图案的OLED尾灯，极大便利和周围行人交互

交互性功能的引入，对于车灯的清晰度和可靠性提出了更高要求。车灯作为传递信息的重要载体，任何影响其透明度和亮度的因素都将直接干扰信息的准确传达。凝露问题，由于其导致的光学表面模糊和光线散射，无疑是车灯交互的一大挑战。特别是在雨雾天气或多变的温湿度环境中，凝露的产生不仅会降低车灯的视觉效果，还可能阻碍关键信息的及时传递，进而影响行车安全和驾驶者的信心。



图1-5. 戈尔的防水透气膜（图中红色线圈标出）已成为主流的车灯凝露解决方案之一

总之，随着车灯设计向交互化趋势的不断发展，凝露解决方案的重要性日益凸显。它不仅是维护车灯清晰度和可靠性的基础，更是确保人机交互顺畅进行、提升驾驶体验和安全性的重要保障。（图1-5，图1-6）



图1-6. 戈尔防水透气膜（如图中红色线圈标出）应用于Tesla Model 3大灯当中

### 1.3 耐用性的关键之一：实现车灯全生命周期的凝露管理

自1958年，戈尔就致力于创新型防水透气膜技术和产品的商业化，并于1991年将此技术应用于车灯中。在30多年的车灯防水透气膜方案的专业开发和测试过程中，戈尔可以说贴身陪伴整个车灯业发展，同时也目睹了不少汽车OEM由于车灯凝露问题而面临信誉危机。

“车灯凝露的确是所有车灯制造商以及汽车OEM厂商非常关注的问题。同时，汽车的售后质量标准也对此有明确要求。如果某一特定车型的车灯出现大面积凝露，甚至在一定时间内无法完全消散，将可能引起大量的质量投诉。”

——戈尔汽车事业部车灯产品线亚太区  
技术经理 方树源

过去几年中，某国际OEM厂商曾经因为部分车型的前大灯凝露问题而引发了一定程度的公关危机。一些车主反映他们的车辆前大灯出现凝露现象，这一问题不仅影响了车辆的外观美观度，更重要的是可能影响到驾驶员的视野，尤其是夜间行车的安全性，存在一定的安全隐患。

为应对这一危机，该OEM厂商采取了积极的应对措施，首先召回受影响的车辆进行维修，确保车前大灯的正常使用。此外，也通过向消费者道歉、提供免费维修等方式，尽力恢复消费者对品牌的信任和声誉。

事实上，一些国际OEM都曾因为部分车型的车灯存在凝露问题而进行过车辆召回，而这些召回案例通常也是由于车灯凝露影响到了车灯的整体性能甚至是消费者的安全保障。

“由于部分车型的尾灯出现凝露问题，我们遇到了大量的保修问题。但在我们采纳戈尔的建议一年半后，我们的保修索赔稳步下降。这对我们来说是一笔可观的支出节省，更不用说客户满意度和品牌忠诚度的提高了。”

——某德系OEM中国合资工厂首席工程师

起初，该OEM发现他们某款车型的量产车灯出现了严重的进水和凝露问题，这使得他们饱受售后保修索赔困扰和品牌力受损的影响。因此，客户找到戈尔希望明确问题发生的根源。

戈尔的应用工程师团队在接到该客户咨询后，基于科学严谨的测试方法抽丝剥茧，逐步找到“隐藏的真相”。首先，他们指导客户收集潜在故障点的车灯样件，并进行实验室测试分析。在实验室中，戈尔在显微镜下发现在这批车灯的防水透气膜上，出现了一些压痕和凹陷，同时，部分车灯的壳体上也存在着裂痕（图1-7）。但是，到这一步，还无法断定车灯进水和凝露产生的具体原因。

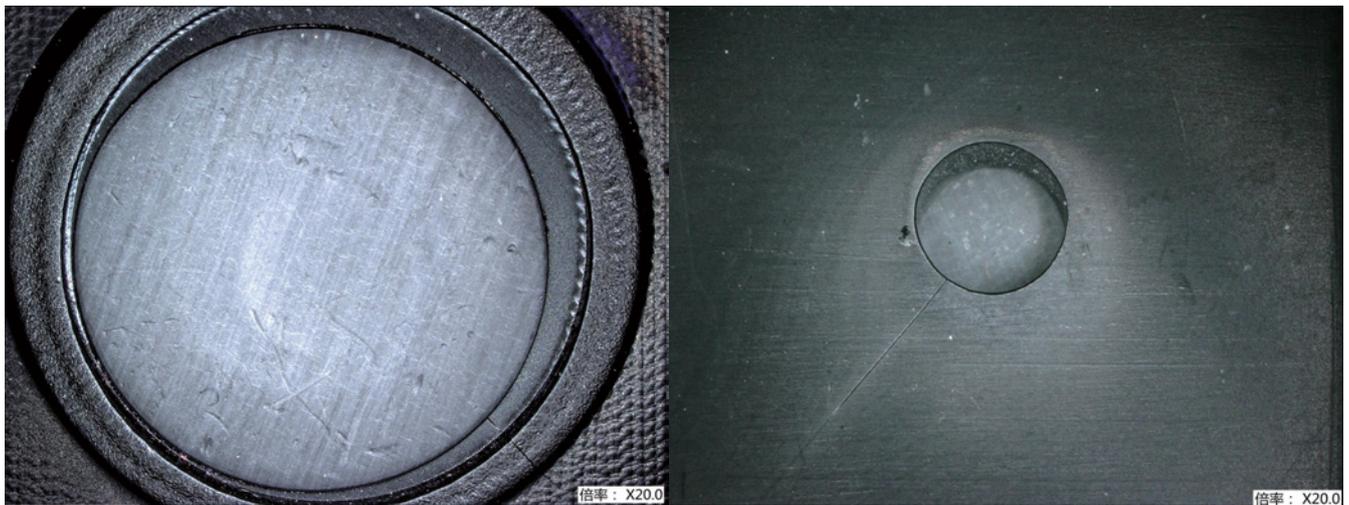


图1-7. 戈尔在显微镜下发现防水透气膜有明显的压痕和凹陷（如上图左图所示），车灯壳体也存在着裂痕（如上图右图所示）

于是，他们继续深入，对使用了戈尔防水透气膜的车灯壳体样品进行了一系列的专业测试，包括Airflow和eWEP测试。这两种测试分别用于评估防水透气产品的透气性能和密封性能。结果发现，有3个安装在车灯壳体切割件上的防水透气产品未能通过耐水压测试（图1-8）。然而，此时还不能确定问题的根源，因为这时还存在两种可能：一是车灯壳体本身存在问题，二是防水透气膜出现了故障。

最后，为了找出真正的原因，戈尔的团队决定对防水透气膜本身进行单独测试。他们精心地从6个车灯壳体上取下防水透气膜，然后进行实验室测试（图1-9）。结果所有的防水透气膜都通过了测试，这说明戈尔的产品性能良好。



图1-8. 一部分安装在车灯壳体切割件上的防水透气产品未能通过eWEP测试

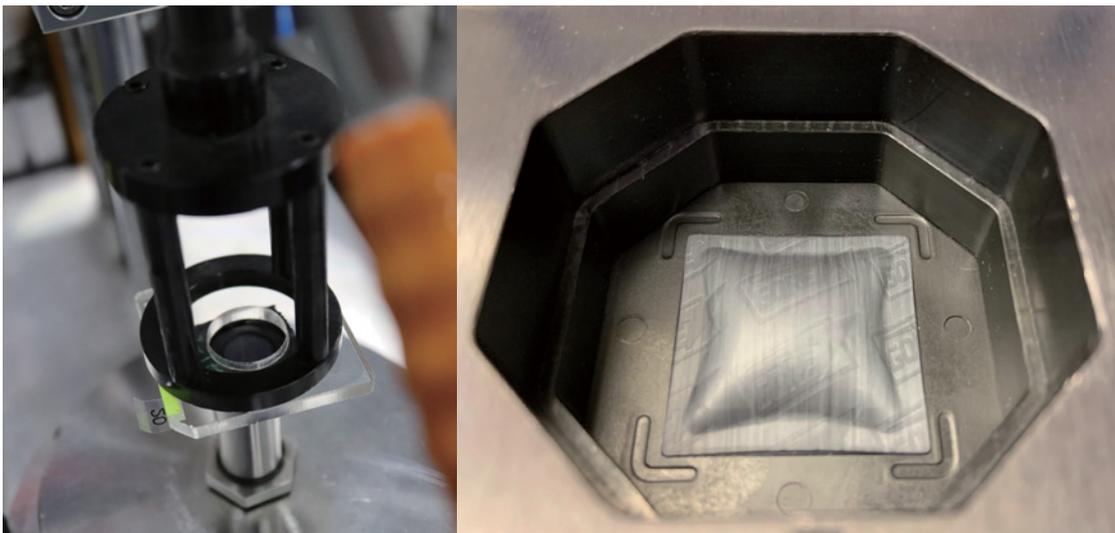


图1-9. 气流透气测试（如上图左图所示）和WEP防水测试（如上图右图所示）

经过这一系列严谨的测试，戈尔团队最终得出结论：车灯的进水和凝露问题的根本原因来自于车灯壳体上的裂痕。这些裂痕破坏了车灯的密封性，使得水分和灰尘等外界物质可以更容易地侵入车灯内部。

在得到这个结论后，OEM基于戈尔的专业分析，找到了车灯壳体生产工艺的潜在风险，并进行了改进，从而真正解决了这个问题。

车灯进水和凝露问题的根源通常错综复杂，这个案例正好展示了一个复杂问题的解决过程，只有通过科学严谨的测试，才能找到问题的根源，从而有效地解决问题。

在过去的数年中，不乏许多最初未采用戈尔防水透气膜方案的客户，因车灯凝露问题转向戈尔求助。即使在此情境下，戈尔仍会和上述案例一样，基于自身深厚的车灯凝露管理理论研究，实践应用背景，以及设备齐全、业界领先的实验室设备，例如双环境测试箱（图1-10）、SEM扫描电

镜（图1-11）、Polytec TMS 3D 表面轮廓仪（图1-12）、傅里叶红外光谱仪（FITR）（图1-13）等，通过完善的分析问题流程和专业的实验室测试能力，以评估在车灯模具已投产的前提下，该车灯的凝露方案还有多少改进的空间和可能性。



图1-10. 双环境测试箱（DCC）及测试场景

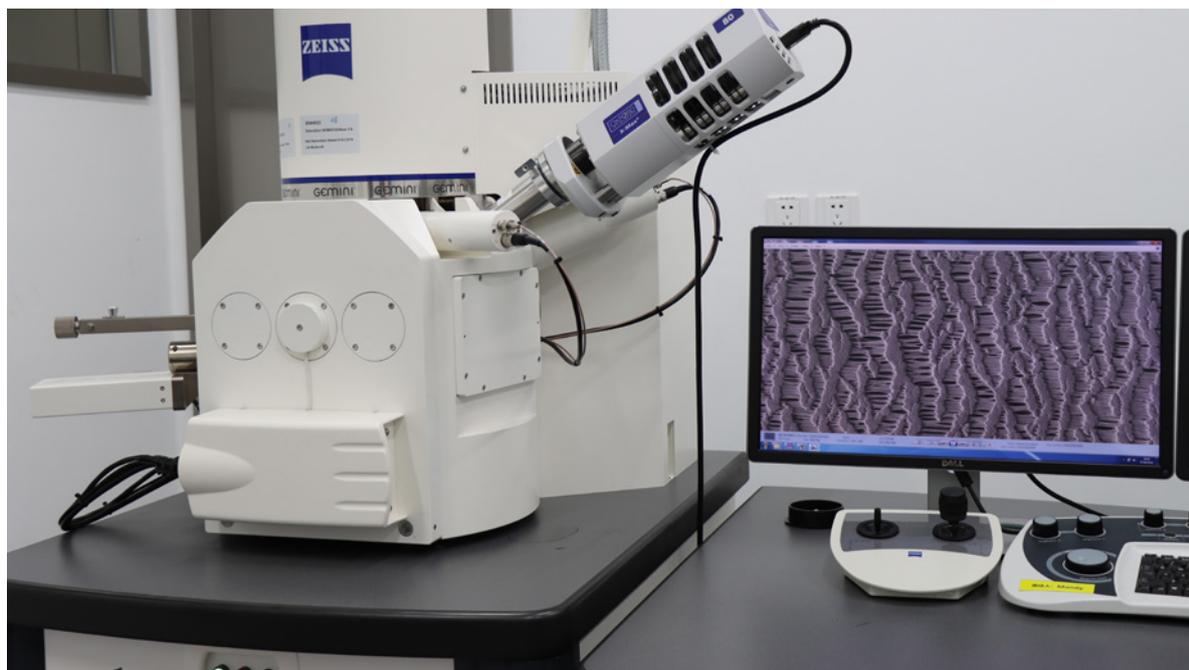


图1-11. 用于材料和元素分析的SEM/EDS (扫描电镜/能谱仪)

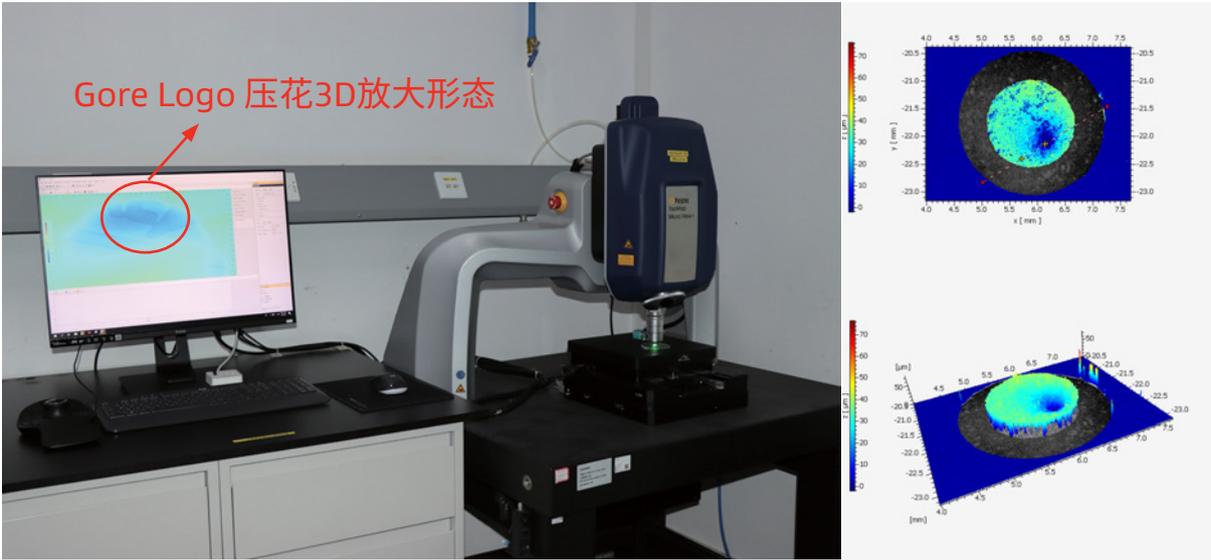


图1-12. Polytec TMS 3D 表面轮廓仪及戈尔防水透气膜品牌标识压花3D放大形态图片

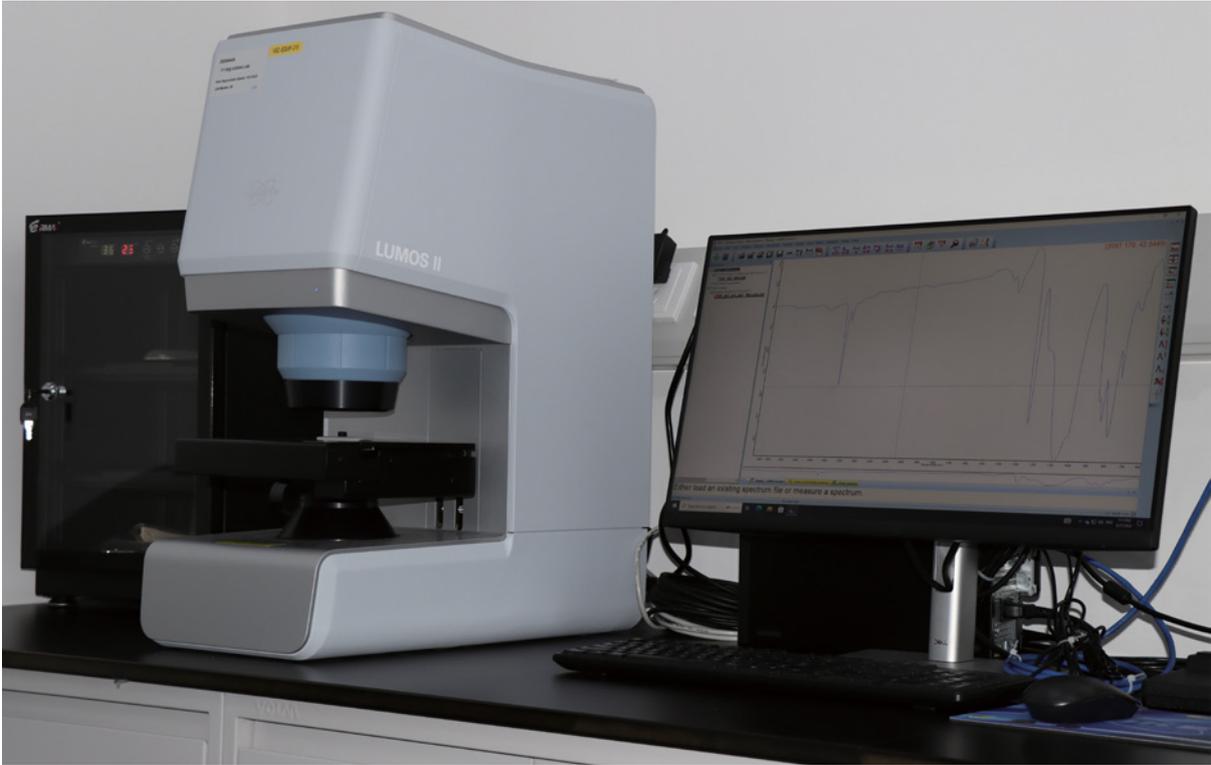


图1-13. 常用于材料失效分析的傅里叶红外光谱仪 (FITR)

与许多仅提供防水透气产品的供应商不同，戈尔不仅提供高效高质量的产品，还对凝露管理和凝露产生机制有着系统理论总结，并基于先进的实验设备进行理论验证，这正是戈尔的优势所在。车灯凝露问题并没有标准化的解决方案，每个案例都存在其独特性，只有通过坚实的理论和系统的精确测试，才能在车灯的全生命周期内为客户提供持续的支持。(图1-14, 图1-15)

同时，在汽车市场智能化、电动化加速发展的阶段，车灯的凝露问题将不仅影响照明性能，更将带来安全隐患。

- 对于OEM制造商而言，车灯凝露问题不仅会损害品牌声誉，还可能导致售后索赔数量激增，影响产品的整体质量稳定性的同时，进而引发消费者对其产品的质疑，影响产品的市场竞争力。
- 而对车灯供应商而言，车灯凝露问题直接与车灯产品设计及安装的认可度挂钩，可能导致其质量稳定性下降，影响其产品竞争力及市场口碑。同时引发OEM对其产品的追溯索赔，停供整改，最终造成实际的经济损失。
- 对于车主而言，车灯凝露问题不仅会影响汽车的美观度，更会带来维修费用的增加，以及降低驾驶的安全性。

因此，车灯凝露是一个复杂的问题，涉及多个利益相关方，对于OEM厂商、车灯制造商以及车主来说都是“牵一发而动全身”。针对上述问题，OEM制造商需要加强对供应链的管理，优化生产工艺，提升产品质量，以确保消费者获得可靠、高质量的汽车产品；车灯供应商则要加强车灯防水透气方案的设计创新，提升凝露解决方案质量，改进生产工艺，确保产品与电子元件兼容性良好，安装牢固可靠，以满足市场需求，提升市场竞争力；同样，车主在购买汽车时同样需要关注车灯质量，选择质量一致性较高的品牌，定期检查和维护车灯，以确保驾驶安全。



图1-14. 戈尔AVS600系列防水透气膜助力车灯在全生命周期中实现凝露管理



图1-15. 上汽大众ID.6 X在尾灯中采用了戈尔防水透气膜方案（从图中红圈标注可见，防水透气膜的实际应用环境和工况恶劣，对产品的可靠性提出更高要求）

而对于生产车灯防水透气方案的上游供应商来说，需要在汽车工业日新月异的变革中，始终敏锐洞察车灯市场趋势，积极应对多元化、电子化、交互化带来的全新挑战。据戈尔专家透露，由于车灯设计“三化”趋势的共同演进，为满足日益精细化的功能需求和严苛的环境适应性标准，当下一辆汽车中所需的防水透气膜数量已大幅提升到约12片左右。

戈尔深谙新时代汽车开发的潮流脉络与客户需求，持续在产品研发领域深耕细作，即将在今年推出一款防水透气新方案。这款防水透气膜不仅在兼顾整个车辆生命周期内耐用性的基础上更为轻薄，更在环保性能上实现了重大突破——大幅降低了碳足迹，没有使用硅酮材料，同时减少了2/3的PFAS（全氟烷基和多氟烷基物质）消耗，采用更少的氟聚合物以及非氟化衬底。并且，戈尔独创的产品标识技术，能够在膜上压印清晰的品牌logo而不影响其卓越的透气性能，彰显了戈尔对细节精益求精的态度。

此外，新品在材料利用率上进行了深度优化，提高了约13%的材料生产率，确保在不牺牲性能的前提下，提供更加经济、更具供应链安全性、更具成本竞争力的解决方案，满足全球，特别是亚洲甚至是中国OEM和产业链的迫切需求。

可以说，戈尔的每一次产品迭代，都是对行业标准的一次重新定义，展现了公司对技术创新的执着追求和对市场趋势的精准把握。面对未来，戈尔将以更加前瞻的视角，持续探索新材料、新技术，致力于打造更加环保、智能、高效的车灯防水透气方案，为推动汽车行业向更高层次发展贡献力量。

## 1.4 汽车电动化进程中的车灯凝露管理四大挑战

据中国汽车工业协会数据显示，2023年中国新能源汽车产销分别完成958.7万辆和949.5万辆，同比分别增长35.8%和37.9%，市场占有率达到31.6%，预计2024年中国新能源汽车销量将达到1150万辆。中国是全球新能源汽车先锋军，年销量超过1000万辆关口，预示着电动时代的真正到来。电动化趋势已成大潮流，这对车灯凝露管理又带来哪些新挑战？

戈尔基于大量车载测试表明，由于特殊的热力学特性，纯电动汽车（BEV）的车灯和工作温度更高的内燃机汽车（ICE）一样容易出现凝露现象。

虽然BEV中没有内燃机产生的热量，可以降低因塑料外壳吸附水分而引发的凝露风险，但在低温下频繁的驾驶循环可能会增加车前大灯中的含水量——这反而会延长凝露清除的时间（图1-16）。同时，由于BEV车前大灯周围愈加拥挤的空间区域，也使其需要更透气、更高效的方式来清除凝露！



图1-16. BEV汽车前大灯的凝露问题更难清除

### BEV车灯凝露管理面临着4大挑战：

- **挑战一：汽车造型设计影响空气流通。**  
汽车的外形设计往往会影响到车灯内部的空气流通，例如，流线型的设计可能会阻碍空气的流动，这将导致车灯内部的湿气无法有效排出，从而产生凝露。为了解决这个问题，设计师需要在保持汽车美观的同时，考虑到空气流通的需求，可能需要进行一些创新的设计，例如加入特殊的通风口，或者使用特殊的材料来帮助空气流通。
- **挑战二：车灯设计/几何造型与内部热量的积累。**  
车灯的设计和几何造型也可能影响到内部热量的排放。如果热量无法有效排出，可能会导致内部温度升高，从而产生凝露。为了解决这个问题，需要考虑使用高导热性能的材料，或者在设计时考虑到热量的排放问题。
- **挑战三：LED大灯普及加剧车灯凝露问题。**  
伴随当前LED大灯的普及，车灯凝露问题变得更加严重。由于LED大灯的工作温度较低，这会导致内部湿气更容易凝结。而为了解决这个问题，可能需要对LED大灯进行特殊处理，例如加入除湿功能，或者使用特殊的材料来防止湿气凝结。
- **挑战四：随着终端消费者对汽车设计细节的高标准，车灯内的污垢、昆虫、灰尘和水等污物已经无法被容忍。**  
在电动车市场竞争日益激烈的当下，年轻消费者不仅要求车灯外观设计新颖吸睛，独具个性，更是对车灯中的污物侵入呈现“零容忍”的高要求。而为了确保车灯始终处于“干净清爽”的工作环境，就必须采用高性能的防水透气解决方案。可以说，今天的防水透气解决方案正在解决当下年轻消费者“既要又要还要”的极限需求。

因此，我们可以得出结论，凝露清除问题在BEV汽车上比在内燃机汽车上更为严峻。在深入探索的过程中，戈尔发现这些新挑战都需要通过大量精密的实验室测试和实地车载验证，才能逐渐透析其复杂性。幸好，戈尔已经成功地将这一复杂过程梳理并编纂成册，以便行业内对其有更深入的理解。

在白皮书后面的章节中，我们将首先分析车灯凝露的具体成因，然后逐一探讨电动化趋势对这一问题的影响。戈尔的目标是通过实验验证这些挑战，并寻找有效的解决方案。这一过程充满了挑战，但也充满了机遇，因为戈尔期待着在电动化的大潮中，找到解决车灯凝露问题的新途径。

## 二、多维剖析凝露成因矩阵，专业铺就车灯“出海”坦途

“自诞生之初，车灯就是汽车价值的关键承载，持续塑造着汽车的独特魅力。同时，车灯又是‘脆弱’的，需要精心呵护。稍有不慎，温湿度的变化就能令车灯起雾，如慧眼蒙尘般令人不快。”

——欧洲某顶级车灯供应商研发总监

### 2.1 车灯凝露背后的科学机理与关键影响因素

车灯凝露现象是汽车照明科技领域存在已久的技术顽疾，其背后的成因错综复杂，涵盖了车灯材料特性、密封性能、环境温湿度变化、车灯使用过程中的热管理等设计、材料、环境交互等多重因素。

凝露问题看似微小，但却难以根治，最主要原因是涉及到一系列相互关联的工程设计、材料特性和环境因素的综合作用。多维深入剖析车灯凝露的成因矩阵，全面考虑可控与不可控因素的优化，并结合先进的材料科学、透气技术和热管理设计，有望实现最佳的水分管理效果。

#### 2.1.1 凝露形成和清除机理

车灯凝露的形成和清除机理主要涉及4种主要的水分转移途径。概括地说，水分主要通过吸附、渗透方式进入车灯内部，成为灯内水汽的主要来源；而通常，业内主要通过对流、扩散等水分转移方式，将车灯内部多余水汽排出灯体之外，从而达成清除凝露的目的。

#### 水汽进入车灯内部的主要方式：

- **吸附：**车灯外壳通常是塑料材质。由于其表面性质、孔隙结构以及对环境变化的响应性，如同微型“海绵”，会发生水分吸附现象。当温度急剧变化时，吸附在塑料表面或内部的水分会发生脱附现象，形成凝露。
- **渗透：**塑料材料还具有一定的透湿性，即允许水分通过其内部结构从高湿度环境向低湿度环境迁移。当车灯外壳内外湿度差加大时，水分会通过渗透机制进入车灯内部，遇到低温表面就会凝结成水滴。

凝露是指水蒸气在空气中达到饱和度的程度时，在温度相对较低的物体上凝结的一种现象。凝露不仅会阻碍车灯光线的均匀传播，导致灯光模糊不清，严重的甚至会引发电子元件的腐蚀、造成车灯内部电路短路等故障，既损伤用户体验、增加维修成本、损害品牌形象，同时也降低了行车安全性。

深入研究车灯凝露产生的原因并开发有效的管理防控策略，对于优化车灯设计、延长使用寿命以及保障驾驶安全具有至关重要的意义。

#### 清除车灯内水汽的主要方式：

- **对流：**主要发生在车辆行驶期间。由于车辆运动造成气压差，通常车灯内的空气（包括其携带的水分）将得以在车灯内外循环流动，可以带走车灯内部多余的水分。
- **扩散：**扩散是一个持续的、不受车辆运动状态影响的水分转移过程，即水分会从高浓度区域向低浓度区域自然扩散。戈尔于1991年首创车灯防水透气膜产品时，即是充分考虑应用扩散原理，让车灯内的水分子全天候、自由穿越防水透气膜向外扩散，将多余水汽有效排出车灯外。（图2-1）

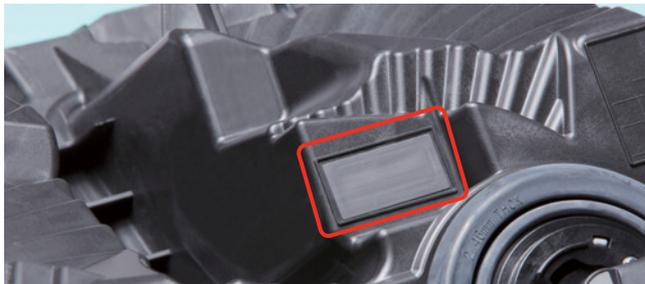


图2-1. 戈尔于1991年首创车灯防水透气膜产品并持续创新

解决车灯凝露问题的核心策略在于深入理解水分来源和转移机制，采取针对性的技术和设计改进，优化水分转移中的可控因素，减少不可控因素的不利影响，以确保在不同环境和使用条件下维持车灯乃至汽车驾驶的最佳状态。

## 2.1.2 掌握关键的可控因素

- **材料选取与结构设计：**塑料材料作为车灯外壳的主要组成部分，其自身的吸附、渗透特性对凝露形成有着直接影响。工程实践证明，选择具有低吸附系数和低水蒸汽渗透率的塑料材料，可以显著减少车灯内部水分的积累。(图2-2)

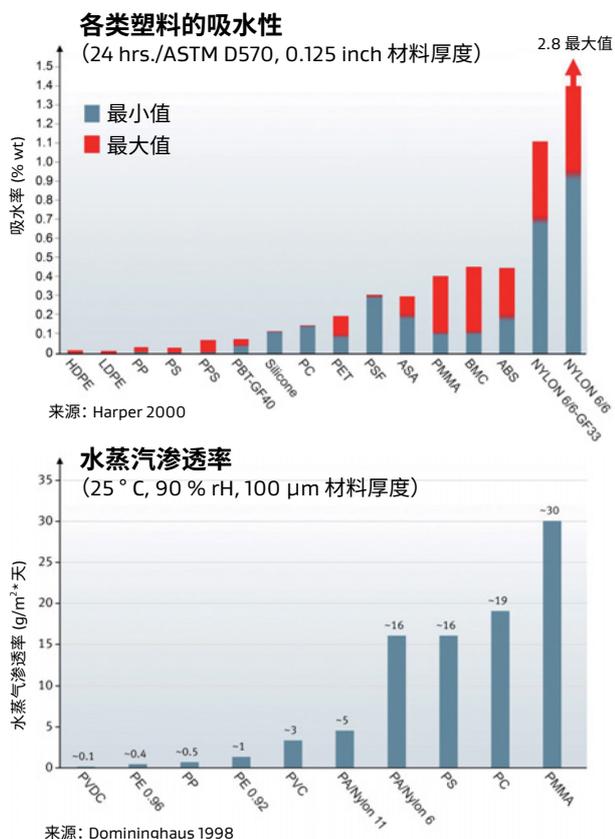


图2-2. 各种塑料的吸水率和水蒸汽渗透率

间隙测量：车灯A紧密；车灯B限制较小。



图2-3. 戈尔对车灯内部结构间隙的测量及分析

同时，车灯外壳的厚度、车灯及部件的整体设计的优化，也有利于优化气流走向，加强内部散热和湿度控制，进而影响凝露的发生概率。例如优化透镜区域、腔室结构及其间的连接，可以确保良好的气流循环和温度均匀。

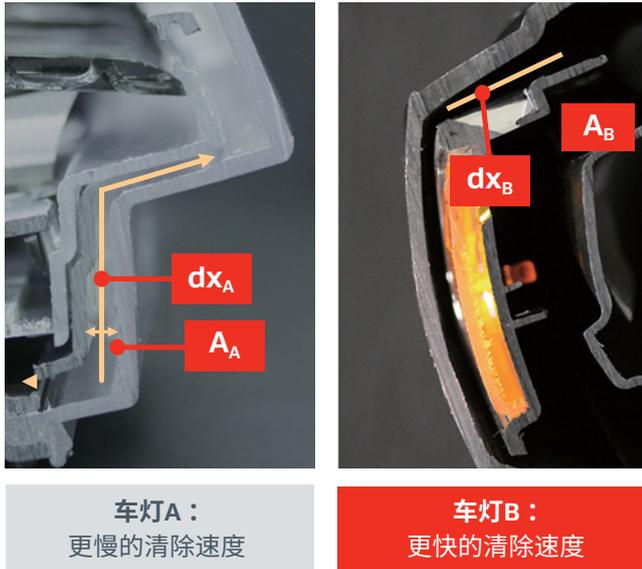
戈尔不仅着眼于防水透气膜技术的创新突破，更凭借其在行业内的深厚积淀与先进的测试设施，积极探究车灯凝露的多元影响因素和整体解决方案。

戈尔的工程师团队积极主动地对市场上表现极端（既包括表现优异，亦涵盖表现不佳）的车灯产品进行深入测试与分析，归纳总结了结构设计对车灯凝露清除效果的影响规律。例如，如下图所示，车灯A采用了一种复杂几何造型的边框设计，该设计呈现多层结构并横贯整个车灯前后的特性，导致气流路径曲折、流通受阻；多层结构间紧密而狭窄的间隙——多处扩散通路间隙宽度仅为1-2mm，极大地阻碍水汽的有效扩散，进一步延长了凝露清除时间。

相比之下，车灯B在设计上展现出更多增强水汽扩散并加快凝露清除的设计特征。其特点包括采用单层边框结构、精简的内部构造，以及设计了直接通往车灯背面的开放路径。尤为值得注意的是，该扩散路径即使在最狭窄的转角处也预留了至少3.5毫米的间隙，这一设计极大地促进了水汽的有效扩散。此外，车灯B创新采用的一部分黑色外壳，对内部组件起到了良好的遮蔽作用，且无需延伸内部边框，进一步优化了水汽的扩散路径，提升了整体的凝露清除性能。(图2-3)

戈尔的实验数据有力地证实，在应用同一款高性能防水透气解决方案（GORE®防水透气产品AVS 9）的前提下，车灯B展现出显著的高效性，其凝露消散时间缩短至不足18分钟，相较于车灯A所需的130分钟，效率提升幅度达到了86%。这一显著差异主要得益于上述车灯B内部结构的精心设计，该设计有效最大化了高湿度区与低湿度区之间湿度梯度的变化率，从而强有力地促进了水汽的扩散效应，加速了凝露的清除过程。（图2-4）

### 从透镜到防水透气产品的扩散路径



- 车灯A和车灯B使用了相同的防水透气解决方案（GORE®防水透气产品 AVS 9）。
- 车灯B的凝露清除时间加快了 86%（不到 18 分钟，而车灯A的凝露清除需要 130 分钟）。
- 车灯B的凝露清除时间归因于它的内部设计因素，这些因素增强了扩散/使清除速度更快（即该设计使高湿度浓度和低湿度浓度区域之间的 A/dx 比率最大化）。

图2-4. 戈尔积极探究车灯设计对凝露清除的影响因素

- **透气系统的选择和放置：**车灯防水透气解决方案的选择和实际放置，将直接影响水分进出车灯的速率。自然状态下，水分扩散遵循菲克第一定律，即在稳态扩散条件下，单位时间内通过垂直于扩散方向的单位截面积的扩散物质流量与该截面处的浓度梯度成正比，即与浓度间距离或称扩散距离成反比（注：被动系统中内外浓度差无法直接更改）。更直观的表述：

$$\text{水蒸汽的扩散速率 } (V_D) = \text{扩散常数 } (-D) \times \text{交换表面积 } (A) \times \text{浓度梯度 } (dc/dx)$$

其中浓度梯度为内外浓度差dc与浓度间距离dx的比值。

对于车灯系统而言，可以通过相对便捷地调节交换表面积、浓度间距离，改善车灯凝露现象。例如，基于戈尔长期的车灯工程经验，在合适的位置放置GORE®防水透气膜产品，能够增大水蒸汽扩散的交换表面积（A）、减小浓度间的距离（dx），从而显著提高水分扩散速率，降低凝露的频率和严重程度。（图2-5）

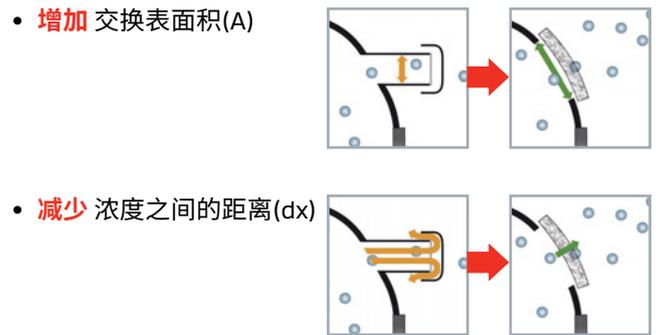


图2-5. 戈尔防水透气膜产品能有效提高扩散速率

- **内部热管理：**车灯的光学、电子系统等在工作时会产生热量，这部分热量若未能有效散出，将提高车灯内部露点，在相对低温的透镜表面产生凝露。设计合理的散热路径和优秀的热管理系统，能有效抑制内部热增量，使车灯内外温度均衡，从而减少因温差过大导致的凝露现象。

### 2.1.3 减轻不可控因素影响

- **环境的温湿度：**这是车灯凝露问题中极为重要的一个不可控因素。例如，早晚温差、季节变换以及局部地区的湿度过高等，都会导致车灯内部温度低于周围空气的露点温度，促使车灯产生凝露。
- **车辆运行状态：**车辆在行驶过程中的路况、发动机舱内辐射热量等均会影响车灯。例如，走走停停的城市交通、高速公路疾驰、山区行驶导致的海拔变化等，对车灯周围的气流状态和温度变化影响不同，也会间接影响凝露的形成。以及汽车工作时，发动机舱的高温环境和热辐射也会使车灯外壳温度升高，在停车后快速冷却（尤其是阴雨天或低温环境下）带来的急剧温差变化，容易诱发凝露。

虽然车灯设计/制造方无法改变汽车使用时的自然环境条件、也无法直接控制车辆使用时的运行状态，但通过在设计时充分考虑到这些场景，结合先进的透气技术、材料和优越的设计经验，能够增强车灯对环境变化的适应性，尽可能减轻这些因素对车灯的不利影响。

### 2.1.4 戈尔经验：量化与实证

当下，车灯凝露解决方案主要以扩散式和对流式透气两种机制为主。为直观对比呈现扩散式透气和对流式透气在解决车灯凝露问题中的实际效果，戈尔通过ASTM E96M测试（国际通行的材料水蒸气透过性试验方法），对九种扩散式和对流式透气产品应用于车外灯具时的水汽转移率进行了量化评估。

实验数据显示，GORE®防水透气产品AVS 113在车外灯具中表现出卓越的水汽散发率(MVTR)，确保水分迅速排出。同时，耐水压(WEP)测试实验也表明，GORE®防水透气产品AVS 113在WEP防护性能上也同样优秀，可以有效地阻隔水分进入。(图2-6，图2-7)

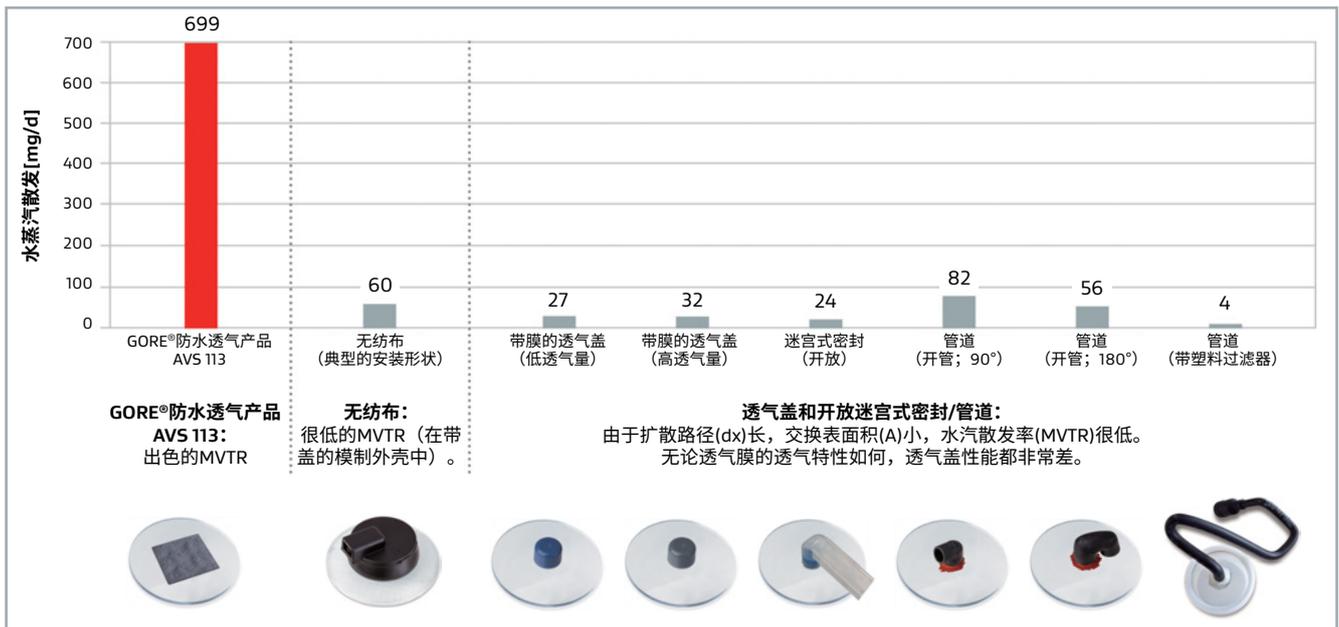
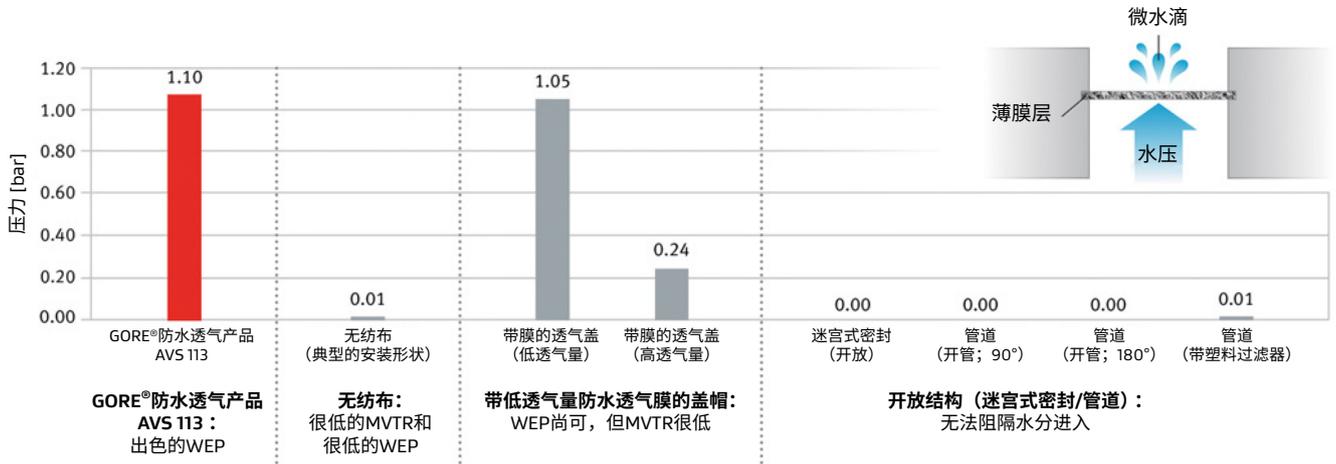


图2-6. ASTM E96M测试表明戈尔防水透气产品具有卓越MVTR



为了比较阻隔水进入的有效性，戈尔还对这些相同的透气产品进行了透水压(WEP)测试。

图2-7. 耐水压防护性能测试表明戈尔防水透气产品具有出色WEP

戈尔还进行了行驶/停车周期的双环境模拟测试实验，以一片戈尔扩散式车前大灯防水透气产品与2根透气管(180°)进行LED车前大灯露点比较。结果显示，由于扩散式透气在整个周期内持续运行，其去除水汽的性能远远优于对流系统。(图2-8)

通过这些深入的研究与严格的实验数据支撑，戈尔不仅展示了对车灯凝露周边的塑料材质选择，这些看似外围但会对凝露管理有关键作用的领域等问题的深刻理解，也为业界提供了宝贵的技术专长，即通过科学选择材质和优化透气产品的设计，可以有效管理车灯内部的水分循环，从而提高车灯的耐用性和视觉清晰度，确保在日益普及的BEV领域中提供一流的车灯凝露解决方案。

双环境模拟测试实验：行驶/停车周期 — LED车前大灯露点比较：

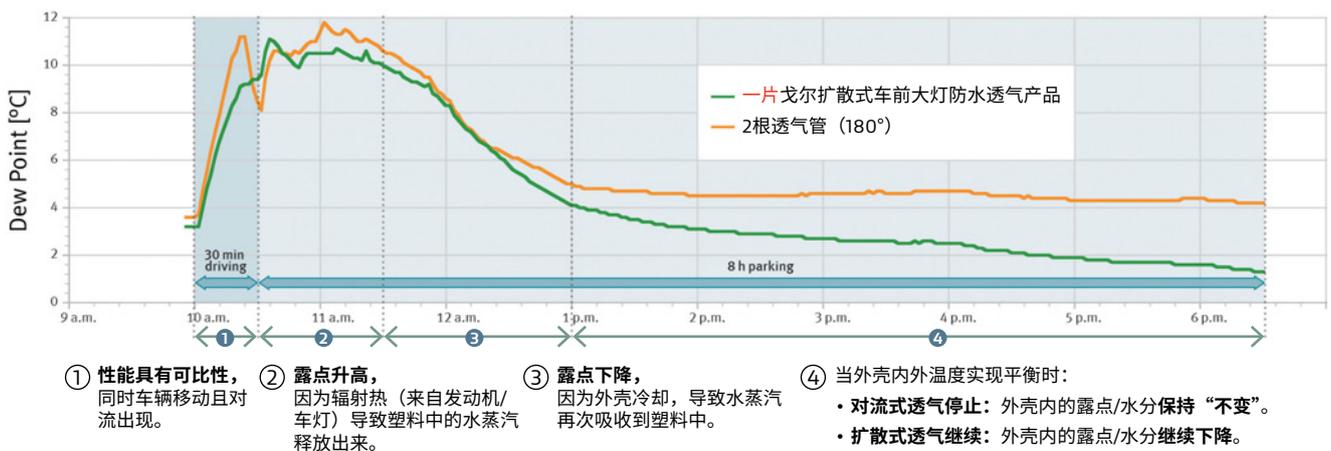


图2-8. 双环境模拟测试实验表明戈尔防水透气产品去除水汽性能更优

## 2.2 实测和调研数据说话：电动趋势下的车灯凝露挑战

如前所述，作为防水透气解决方案行业领导者，戈尔前瞻性预见电动趋势带来的全新挑战，依托其30多年的车灯防水透气产品专业开发及测试经验，持续不断投入研究和实测试验，深入探究BEV车灯环境特性、凝露成因和针对性解决策略，以期为客户提供更贴合电动趋势的高性能防水透气解决方案，最终提升BEV车灯的安全性、耐用性和用户体验，助力全球汽车产业向着更高品质的电动化时代稳步迈进。

### BEV热力学开拓性测试

2019年至2021年间，戈尔在德国、美国和中国等多地开展开拓性的车载测试，以量化评估BEV车外照明系统热力学效应。通过大量的车载测试，戈尔有如下关键发现：

- 传统内燃机汽车的车前大灯温度可能比环境温度高20°C至50°C，相比之下，BEV前大灯温度升高幅度较小，通常仅比环境温度高8°C至13.5°C，峰值温度最高也仅比环境温度高27°C。（图2-9，图2-10）
- 同时，由于BEV车前大灯缺乏发动机舱废热影响，其周围环境温度较低，可能导致凝露清除时间显著延长。

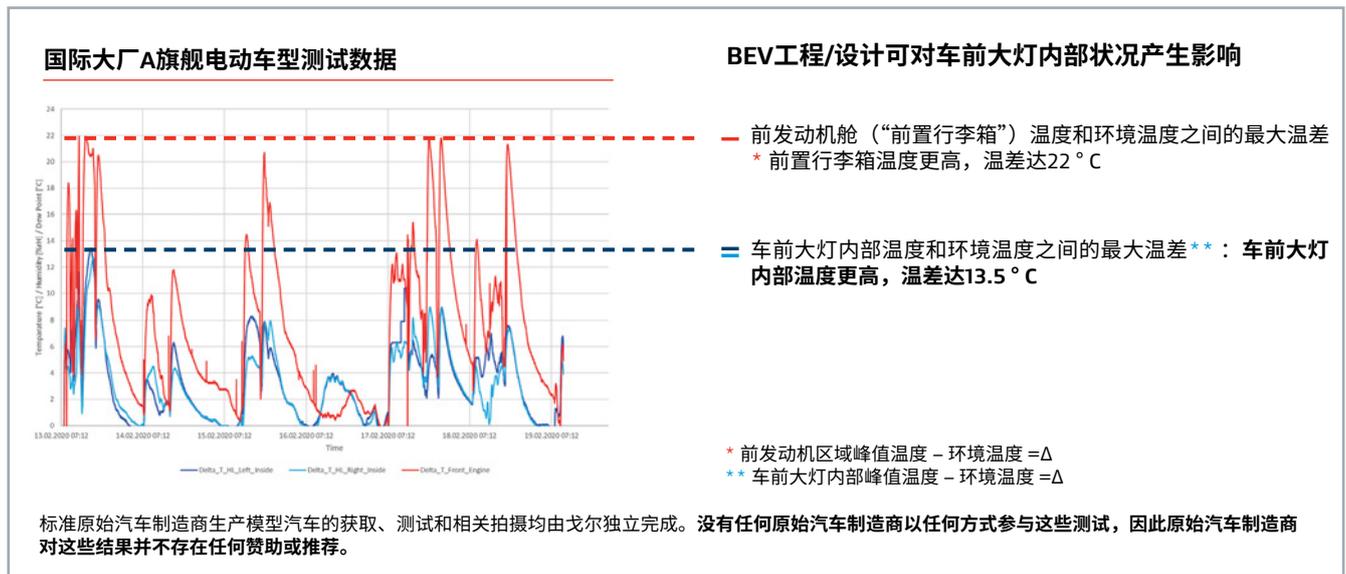


图2-9. BEV热力学测试-国际大厂A旗舰电动车型

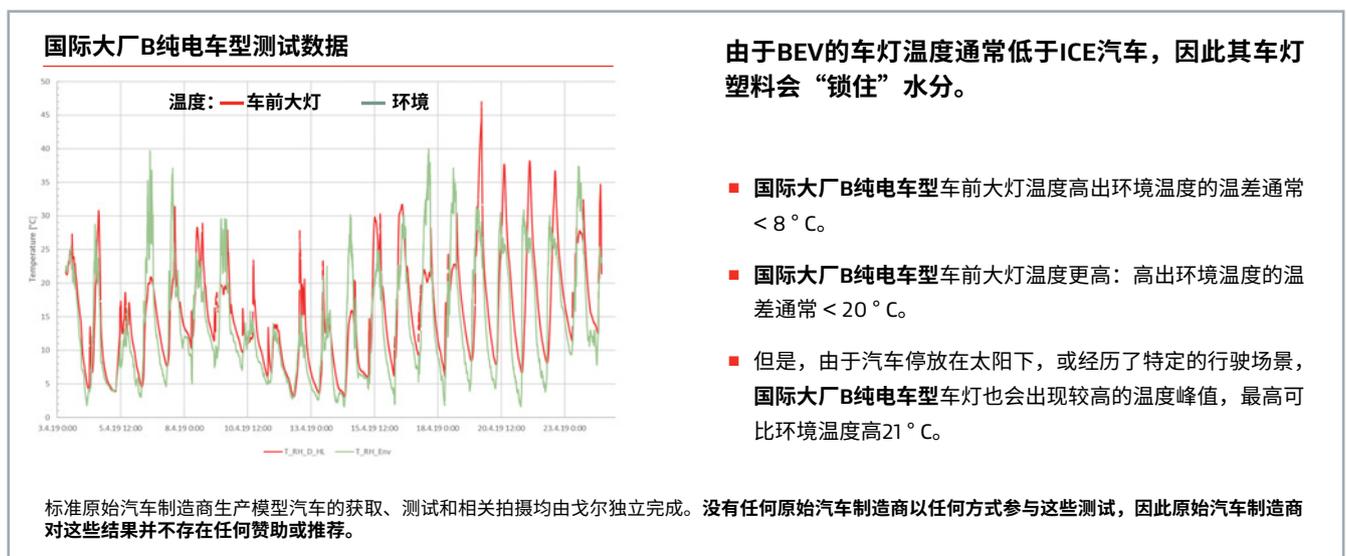


图2-10. BEV热力学测试-国际大厂B纯电车型

- 驾驶循环会影响车灯温度与环境温度的关系，包括空转、停车后以及高速公路行驶与快速充电相结合等情况。(图2-11)

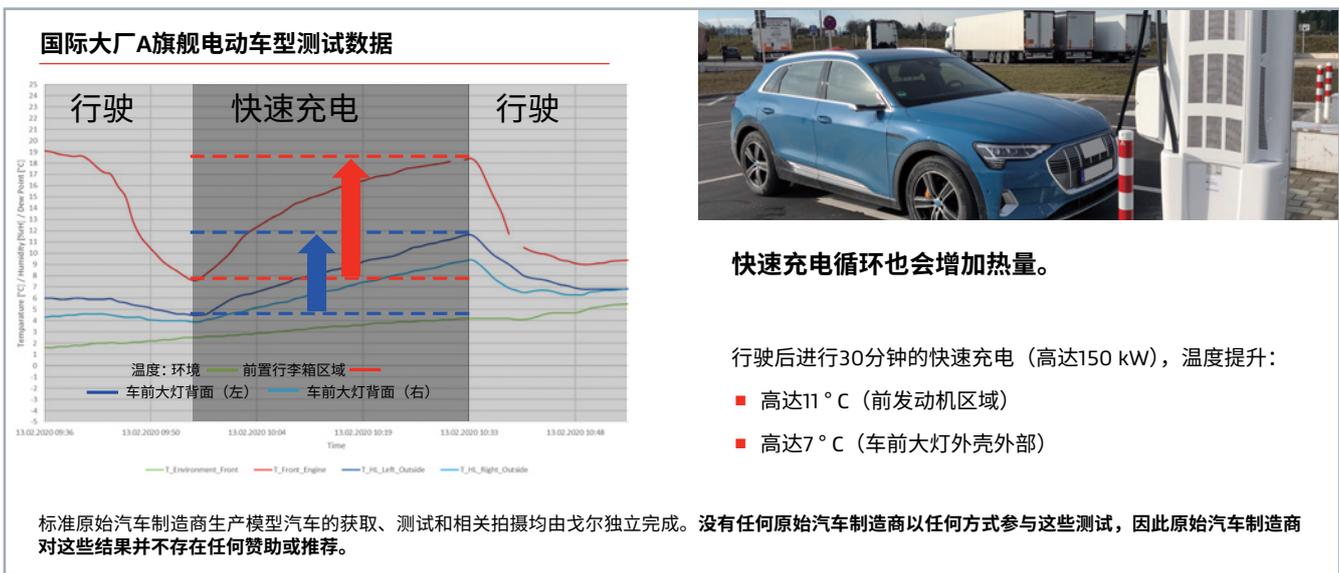


图2-11. BEV热力学测试-国际大厂A旗舰电动车型快速充电状态测试

- 当车灯内部温度因阳光照射或快速充电而升高后，若遭遇快速外部冷却，可能导致难以清除的凝露形成，需要更加有效的透气解决方案来加强凝露清除，以降低车灯凝露风险。(图2-12)

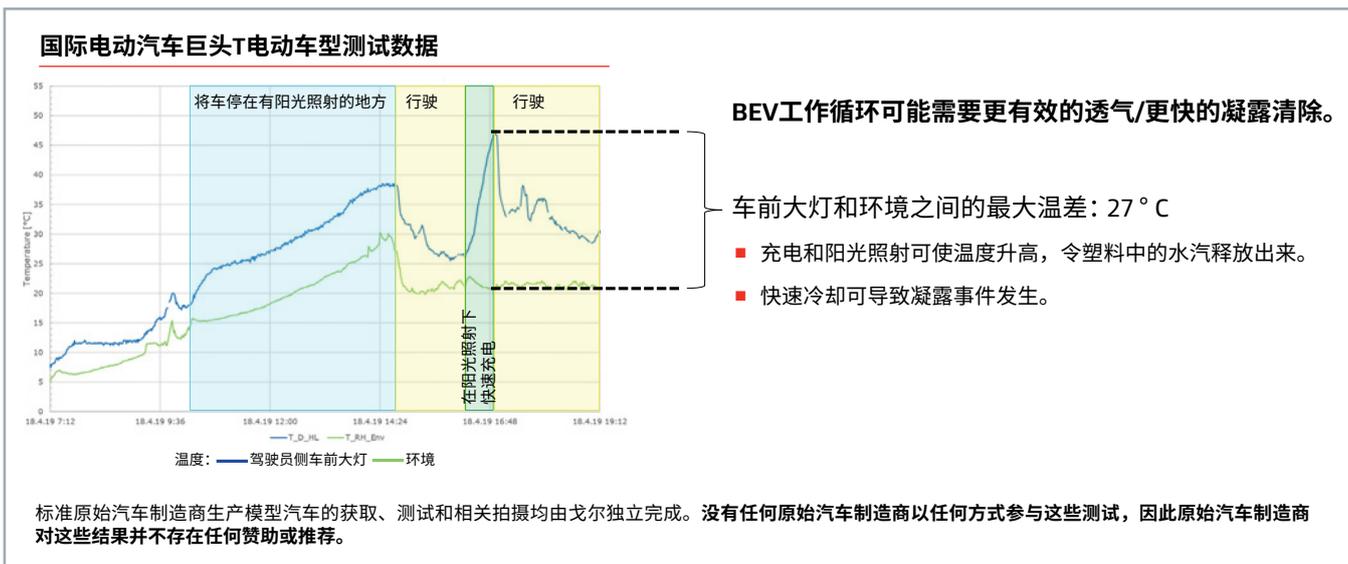


图2-12. BEV热力学测试-国际电动巨头T电动车型工作循环状态测试

## BEV照明趋势及挑战全球调查

在积极开展理论与严谨的测试论证之余，戈尔于2020至2021年之间，在全球范围内开展了一次大规模的产业调研，聚焦于“BEV车外照明趋势及其独特挑战”，调查对象涵盖了众多国际领先的汽车制造商及各级供应商。

通过系统性收集和分析全球第一手反馈，结合理论研究和车载测试数据，戈尔进一步明晰了在电动化趋势下，包括车前大灯在内的车外照明对凝露管理的独特需求与最新挑战，为后续成功推出性能领先同类产品的车灯凝露解决方案夯实了基础。

## 2.3 物理实验及仿真模拟，BEV车灯透气方案的综合评估与优势体现

评价一款BEV车灯防水透气解决方案的优越性，关键在于将其置于多元化的现实工况中进行全面检验，包括但不限于行驶、停车状态下的复杂环境影响，并对不同情景下其抗凝露性能进行多维度评测。

除了真实物理实验测试，计算机辅助工程（CAE）仿真技术也已被广泛应用于BEV车灯设计抗凝露性能评估。利用计算流体动力学（CFD）仿真软件，工程师可以在虚拟环境中精确地模拟空气流动、温度分布和湿度变化，从而准确评估防水透气解决方案在特定条件下的表现。

### 2.3.1 国际领先的DCC实验详解和案例

2021至2022年，戈尔凭借深厚的专业背景和技术积累，精心制定了针对BEV车灯特定需求的测试计划，分别在德国、美国和中国执行了大量模拟实际应用场景的单/双环境模拟测试实验研究项目，以及深入针对BEV车灯凝露问题的专项清除测试。

通过这些专业、严谨的测试研究，戈尔旨在揭示电动趋势下车灯凝露管理的细分市场诉求，明确展示行业尖端解决方案在应对此类难题时所能实现的卓越性能阈值，进而赋能车灯制造业把握上游新技术趋势，基于更加高效、耐用

且适合新能源汽车市场的高水平防水透气产品，提升车灯整体质量和用户驾驶体验。

双环境模拟测试实验是车灯行业领先的环境工况模拟实验手段，主要用于模拟和重现真实行驶与停车条件下的车灯环境变化，以精确评估车灯的凝露清除效能及对环境因素的耐受能力。这种大型实验设备能够分别精确调控车灯前后腔体的温度和湿度，以模拟车灯在不同时间段和行驶状态下的热力学环境，如行驶过程中的热量产生、停车时的快速冷却，以及快速充电带来的温度波动等。（图2-13）



图2-13. 戈尔国际领先的双环境测试箱

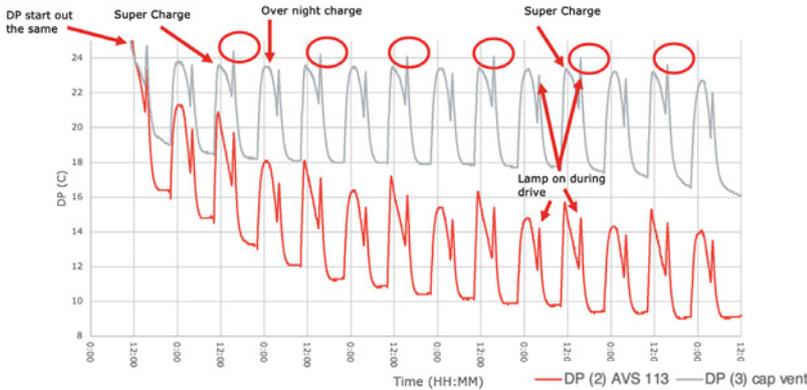
在针对BEV车灯的研究中，戈尔运用双环境模拟测试实验在多款国际车厂大灯上，对不同透气解决方案进行了对比测试。

如在国际电动汽车巨头T的前大灯上进行的3个原始汽车制造商使用的薄膜型透气盖产品与2个GORE®汽车防水透气产品AVS 113的对比测试。

具体操作流程是：首先通过对车灯和测试箱的严格前序处理，保证除防水透气对比产品外的各种条件完全一致；其次，在前后腔均为22 °C/50% rH的测试环境下，连续7天，每天模拟2次30分钟时长的驾驶；最后，连续7天，每天模拟两次充电活动，分别为发动机侧温度为60 °C条件下的30分钟快充，以及发动机侧温度为40 °C条件下的5小时110V夜间充电。（图2-14）

## 热曲线对比

### (2)片AVS 113透气膜与(3)个薄膜型透气盖对比



基于国际电动汽车巨头T的电动车型测试：每天在22 °C/50% rH的环境温度下驾驶

- AVS 113透气膜的露点迅速降至透气盖露点以下，并呈持续下降趋势。
- 车灯打开对露点有显著影响。
- 车灯打开过程中，透气盖的露点在每次快速充电后达到最高（红色圆圈所示）。
- 车灯打开过程中，AVS 113的露点在快速充电后较低。
- 在22 °C/50% rH条件下，透气盖令水汽滞留在车前大灯中。

图2-14. DCC实验-国际电动巨头T电动车型行驶、停车及充电状态测试

实验结果显示，在凝露清除速度和效率上，2个GORE® 汽车防水透气产品AVS 113比3个薄膜型透气盖对比产品表现出明显的优势——模拟每日驾驶循环的数据显示，戈尔AVS 113在行驶过程、停车过程中的内部露点都更低，因此车灯内的水分总含量较少。

得益于丰富的戈尔双环境模拟测试实验数据，我们见证了戈尔防水透气产品在不同复杂环境条件下的出色表现，尤其是在极端气候与常规行车状况下，其高效的凝露消除能力、对车灯内部湿度的精密调控，以及确保车灯长久稳定运行的突出效果，皆得到了有力验证。

### 2.3.2 走出仿真误区，科学选择除凝露方案

随着现代CAE（计算机辅助工程）仿真技术的不断进步与成熟，其在车灯设计领域的应用日益广泛。例如，Ansys的Fluent和西门子的FLOEFD等仿真工具（排名不分先后）已被广泛应用于实际设计中。

采用CAE仿真技术可以显著减少物理原型测试的次数，从而避免后期设计修改所带来的成本和时间浪费。实际应用效果表明，车灯制造商普遍认为CAE仿真模拟结果与物理实验验证结果基本吻合，这一技术可极大地辅助车灯设计方案的选择，缩短设计开发周期，并确保产品符合生产和法规要求，从而提升产品的综合市场竞争力。

车灯起雾模拟是车灯设计过程中一个至关重要的评估环节。利用CFD仿真工具，工程师能够精准地模拟多种复杂环境条件，如停驶状态、温度变化和湿度波动等，进而分析不同车灯设计可能出现的凝露问题并进行针对性优化，从而提升车灯设计的抗凝露性能，确保所开发的车灯系统

在各种气候条件下都能保持稳定的工作状态，为用户提供更加可靠、安全的照明保障。

然而，在实际操作过程中，尤其是在选择不同透气方案和材料时，车灯设计工程师需要警惕一个常见的误区——即仅关注气流量这一单一参数。事实上，气流量主要影响对流机制下的除雾效果，即在汽车行驶或车灯周围产生较大空气流动时的表现；相比之下，如前所述，扩散则是一个持续的、不受车辆运动状态影响的水分转移过程，即使在汽车停驶状态下也在发挥作用。

据戈尔对比研究，评估防水透气解决方案扩散性能的“水汽扩散率”，才是决定车灯除雾效果的决定性因素。

#### ■ 案例对比：气流量与水汽扩散率的差异

以戈尔的两款透气膜（“AVS9”黑膜与新款“EMV740”白膜）为例，尽管它们的气流量表现几乎相同（均为22升每小时），但在水汽扩散率方面存在显著差异。新款EMV740透气膜每天可以额外扩散超过100mg的水分。这意味着，在相同的使用条件下，新款EMV740透气膜能够更有效地去除车灯内部的雾气。（图2-15）



| GORE® 车灯防水透气膜                        | AVS 9 黑膜  | EMV 740 白膜 (新品) |
|--------------------------------------|-----------|-----------------|
| 水汽扩散率                                | 610mg/天   | 740mg/天         |
| 最小透气量 (单片)<br>*在70 mbar (1 psi)压强条件下 | 22.2 L/小时 | 22.0 L/小时       |

图2-15. 两款戈尔防水透气膜的性能对比

因此，如果车灯设计工程师在模拟仿真时仅依赖透气量这单一参数，那么在实际表现中存在显著差异的两款产品，在早期仿真阶段将被视为同一性能水平。这种做法将导致仿真结果的不准确性，甚至可能产生误导性的结论。为了避免这种情况，工程师应在仿真过程中综合考虑多个关键参数，以确保仿真结果的可靠性和有效性。

■ 优化建议：多参数综合考虑

为了更准确地模拟车灯的除雾性能，戈尔综合自身经验及客户反馈，建议车灯设计工程师应当综合考虑“气体渗透系数”和“水蒸汽扩散系数”这两个关键参数。

为了更精确地评估车灯的除雾性能，戈尔基于多年的应用实践认知以及丰富的成熟服务经验，建议车灯设计工程师在仿真过程中应综合考虑“气体渗透系数”和“水蒸汽扩散系数”这两个关键参数。（图2-16）

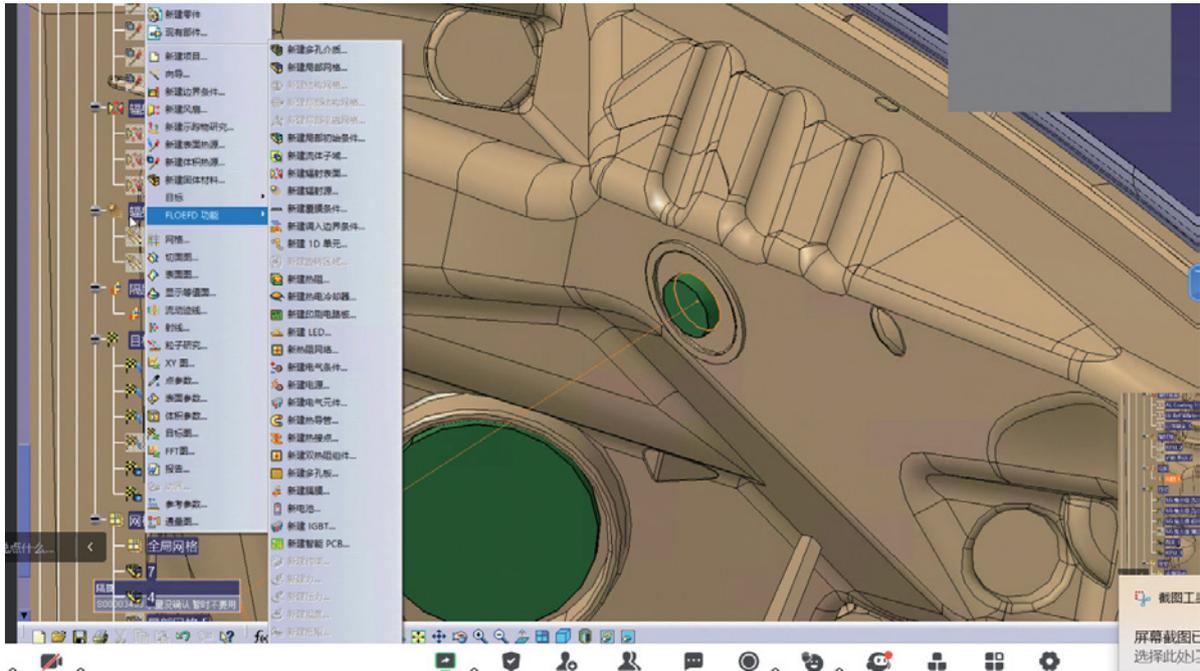


图2-16. FLOEFD仿真中的参数选取（除雾性能）

其中，“气体渗透系数”代表防水透气膜的气流量输入，而“水蒸汽扩散系数”则是防水透气膜的水汽扩散率输入。后者正对应戈尔独有的MVTR参数，即影响车灯雾气去除效果的关键因素。通过全面考虑这两个参数，可以确保车灯设计的除雾仿真结果更加贴近实际，避免了因参数选取不当而导致的误判，有力地保证了车灯产品的实际市场竞争力。

戈尔的这一系列创新，极大地增强了车灯制造商解决凝露问题的信心，更为提升驾驶安全性、优化驾驶体验、确保车灯系统在各种复杂环境下的稳定运行做出了实质贡献。

更为重要的是，戈尔还成功推动了汽车照明系统防凝露技术的迭代升级，并为全球车灯行业面对电动趋势带来的独特挑战时，提供了更加高效、可靠的凝露管理解决方案，助力整个产业的技术水平提升和可持续发展。

综上所述，戈尔在车灯凝露管理技术领域展现出深厚的专业素养和敏锐的行业洞察力。作为行业创新的引领者，戈尔行业首创的防水透气膜产品，不仅在实验室严格遵循国际标准进行的测试中表现出色，而且在真实环境应用中也展现出了卓越的性能。同时，戈尔率先在车灯设计的CAE仿真过程中引入了水蒸汽扩散系数（对应戈尔独有的MVTR参数），这一前瞻性的举措极大地提升了仿真结果的准确性和可靠性。

# 三、 戈尔实验室的秘密： 企业标准缘何成为行业事实标准？

通过大量精密的实验室测试和车载验证， 戈尔公司成功地揭示了车灯凝露成因和电动化趋势对其挑战的复杂性。然而， 戈尔的实验室不仅仅是一个进行科学实验的地方， 更是一个创新和领导行业标准的发源地。 戈尔的企业标准， 经过严格的实验验证和实践检验， 已经成为了行业内公认的事实标准。

## 3.1 护航适用性、可靠性和一致性的严苛测试体系

基于30多年的车灯防水透气方案专业开发技术底蕴和测试经验积淀， 戈尔已经构建了一套自己的系统质量管理体系。在戈尔实验室， 其目标不仅是为了满足汽车行业的严苛测试标准， 更是通过大量内部实验室检测和车载验证测试， 建立严谨的生产检验流程和标准化的检验频次， 从而确保产品性能的可靠性和一致性。(图3-1)

事实上， 戈尔建立的一些标准和系统测试方法已经被行业广泛接受， 而与之配套的领先测试设备， 比如业界领先、 堪比主流车灯厂验证水平的双环境测试箱 (DCC)， 常用于材料失效分析的傅里叶红外光谱仪(FITR)， SEM扫描电镜， Polytec TMS 3D表面轮廓仪等均是“戈尔实验室的秘密武器”。

如之前所述， MVTR (水汽散发率) 是解决车灯凝露问题的关键， 也是最基本的产品参数和指标——MVTR越高， 清除车灯凝露所需的时间也就越短。

由于MVTR与防水透气材料的透气量直接相关， 因此车灯制造商通常对防水透气材料的透气量性能指标有着严格

### 戈尔的适用性承诺

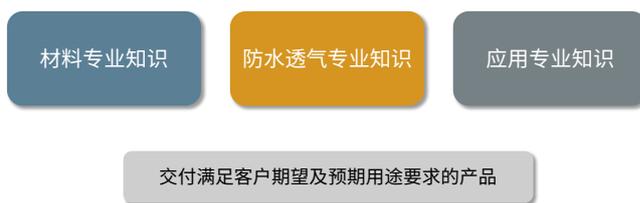


图3-1. 戈尔的专业性塑造其对客户和产业的承诺

要求。然而， 在实际材料选择和生产的过程中， 提高透气量和水汽扩散率性能可能会牺牲材料的另一个关键指标： WEP (耐水压)。因而， 为了确保批量生产的防水透气产品的可靠性和一致性， 需要系统地平衡透气量和耐压性能， 满足市场对防水透气产品更高MVTR性能的要求。(图3-2)

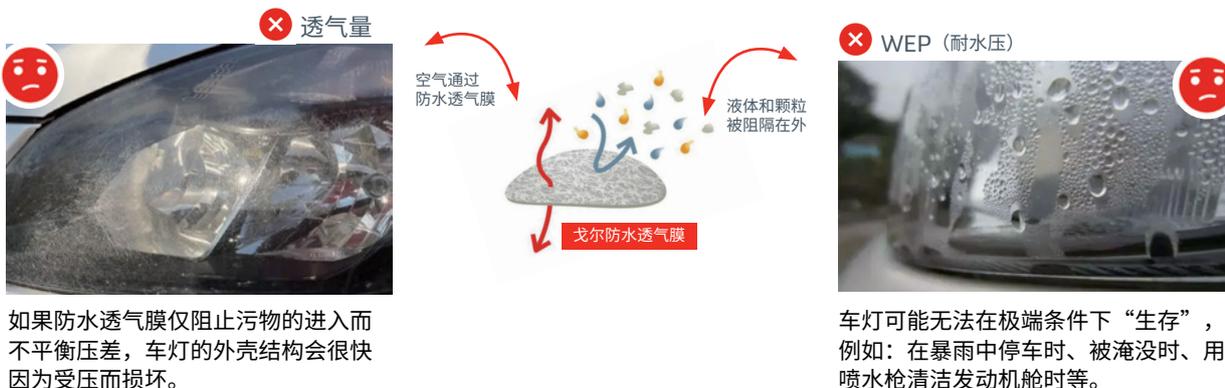
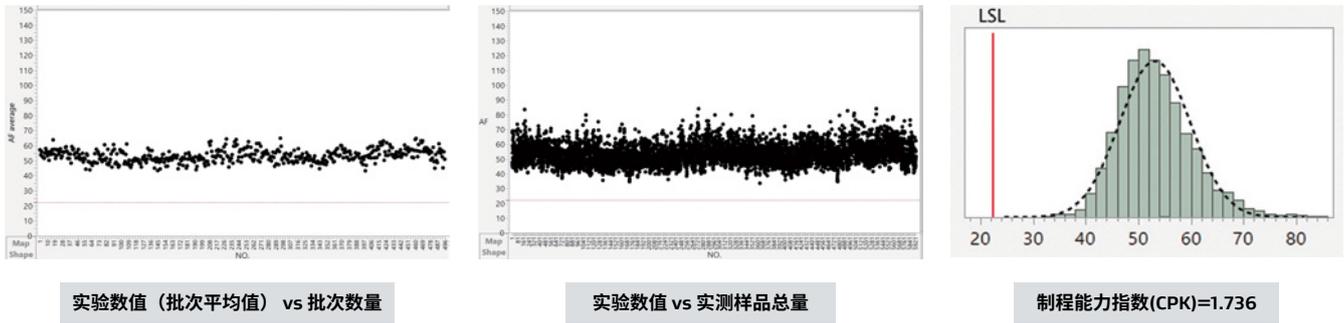


图3-2. 防水透气材料的透气量与耐水压性能之间的关系

戈尔实验室采用了系统的透气量和瞬时耐水压测试，例如，选用了适合汽车前照灯和尾灯应用、同时也是戈尔在前照灯和尾灯应用中测试量最大的典型产品——AVS 9和

AVS 2作为测试样品。在70mbar背压下，根据戈尔内部的测试标准批量检测产品的透气量。(图3-3, 图3-4)

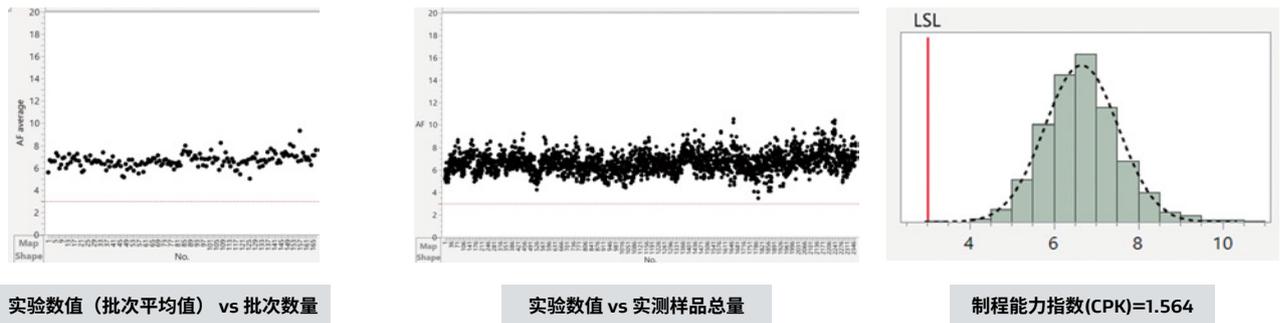
**透气量：最小22.2L/小时（在70mbar压强下）**



\*测试样本量：随机连续1年测试量（5921件）

图3-3. 前照灯防水透气产品AVS 9的透气量表现

**透气量：最小3L/小时（在70mbar压强下）**



\*测试样本量：随机连续1年测试量（2341件）

图3-4. 尾灯防水透气产品AVS 2的透气量表现

而在耐水压测试中，戈尔通常采用QATM 725（戈尔内部测试标准）“台阶斜面”持续升压的测试方案（如图3-5所示）。据悉，戈尔是首家在透气膜和车灯产品层面进行两次深度防水测试的企业，这将进一步完善并巩固客户所进行的可靠性测试。毕竟，在透气膜层面进行测试，可以确定透气膜能够承受的最大水压级，从而有助于开发出可靠的产品。经过大量的实验验证，戈尔的防水透气膜的最小爆裂透水压力为5.0psi。许多人可能并不知道，这个5.0psi的标准最初是由戈尔公司设定的。然而，随着行业的持续发展，这个标准逐渐被行业普遍接受并采用，并最终演化成行业的通用标准。(图3-5)

**装配耐水压压力斜面**



图3-5. 测量产品瞬时耐水压所采用的QATM 725台阶斜面方案

### 3.2 戈尔标准缘何成为行业事实标准？

在瞬息万变的科技领域，新的概念、新的技术层出不穷，而能够成为被广泛接受的行业标准的却寥寥无几。这需要的不仅是技术的革新，更需要市场的深度洞察，以及行业的广泛认可。

戈尔标准无疑是一个成功案例。它不仅仅是一项技术规范，更是车灯防水透气膜行业的里程碑，它的出现进一步推动了整个细分行业的发展。然而，这个看似顺理成章的过程背后，都是反复精密验证的理论积淀和深入市场和客户钻研的专业知识总结。

- 1958年，戈尔开启了创新型防水透气膜技术和产品的商业化之路；
- 1991年，戈尔首创将防水透气膜产品应用于车灯，随之开启30多年的专业开发及测试经验，并一路引领了整个车灯防水透气膜细分行业的发展。

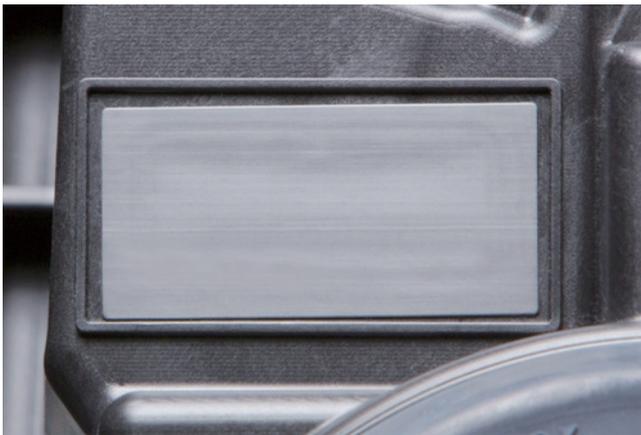


图3-6. 车灯设计中通常会预留相同尺寸大小的框

在车灯设计生产过程中，相信很多车灯制造商乃至OEM都会习惯看到在车灯设计方案中预留一个特定尺寸的框架，如上图3-6所示。这个框架的尺寸实际上已经成为了一个行业标准，而这个标准正是由戈尔首创。(图3-6)

即使在使用非膜类透气方案的车灯设计中，同样会预留这样一个特定尺寸的位置。如此一来，即使后期车灯出现无法及时清除凝露的情况，也能更方便用户在售后时寻求更多解决方案。据戈尔专家介绍，这个框架尺寸标准的建立可以追溯到1991年，当时戈尔首先发明了车灯防水透气膜，自那时起，这个标准就被业内广泛采用。

“由于戈尔在车灯防水透气膜解决方案的首创性和领先性，业界沿用了我们的系列产品和测试标准作为整个行业的准入标准。”

——戈尔汽车事业部车灯产品全球负责人  
Ulrike Geissler博士

此外，在验证防水透气膜产品一致性的过程中，戈尔通常会通过系统测试来明确一系列产品规格。例如，在70mbar下的典型透气量测试，以及在345mbar下，5.0psi，持续60秒的耐水压测试等——目前，都已经成为任何一家主流车灯制造商进行车灯防水透气膜解决方案是否达标的测试中均会参照的测试标准，而它同样是由戈尔最先设定的。(图3-7)

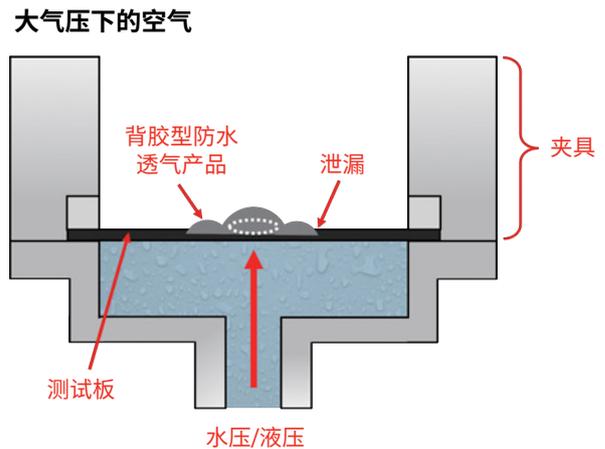


图3-7. 有关防水透气膜的耐水压测试典型装置图

### 3.3 戈尔：领跑车灯凝露管理，致力于成为车灯凝露管理的全生命周期伙伴

“我们致力于成为车灯制造商以及OEM厂商在车灯凝露管理维度可信赖的全生命周期伙伴。”

——戈尔汽车事业部亚太区市场战略经理  
万然

30多年车灯防水透气产品的专业开发及测试经验，使得戈尔成为该领域毋庸置疑的先行者。在过去的30多年间，不乏一些甚至没有采用戈尔方案的客户因凝露清除失败遭到投诉，前来求助于戈尔，希望在已经生产的车灯模具基础上找到改善的空间和可能性。

毕竟，车灯制造商由于对售后质量有着明确要求，极为关注凝露清除的实际解决情况；而对于OEM厂商来说，其品牌产品上市后如果遇到凝露消散不了的情况，更会引起消费者的大量投诉。

“车灯凝露没有标准解决方案，我们只能比客户提前一步对车灯未来趋势做更系统、更全面的研究。”

——戈尔汽车事业部车灯产品线亚太区  
产品经理 江乐平

## 四、结束语：戈尔，车灯凝露解决方案的首选！

在构筑绿色、智能出行的未来道路上，戈尔不仅仅是防水透气产品供应商，更是一种对卓越和创新不懈追求的承诺。戈尔的车灯凝露管理旅程，起始于60多年的创新型防水透气膜技术研发，构筑于30多年在车灯防水透气产品领域的专业积累，每一步都凝聚着戈尔对技术精湛和品质卓越的执着追求，其每一项车用产品，都经过了业界最严格的测试标准，以及戈尔内部实验室的严苛检测和车载验证，从而确保每一件产品都能在性能上超越期待。

在车灯设计领域，戈尔已经成为凝露解决方案的首选合作伙伴，凭借卓越的技术优势和创新精神，为客户提供了一流的产品和服务。戈尔的优势不仅体现在高品质的产品，更体现在与客户紧密合作的态度。随着汽车产业变迁共成长的持续学习的精神和伴随车灯全生命周期的服务管理，基于先进的质量检测设备和测试方法，戈尔致力于为客户

无论是前期设计导入，还是售后补救阶段，许多车灯制造商都在戈尔这里寻求到了相应的解决方案，而这都是需要完备、先进的实验室测试以及车载测试能力作支撑；需要对凝露管理和产生机制理论的长期研究；更需要对汽车电动化和智能化趋势对车灯凝露清除带来新挑战、新局面的深刻洞察，只有将这三个维度的能力合而为一，才能真正做到“先客户之忧而忧”，方能成就长久的行业领先性。

### 3.4 顺应车灯设计趋势的服务承诺

在当今汽车行业中，车灯设计已经超越了简单的功能性需求，成为展示品牌形象和科技创新的关键元素。作为车灯防水透气膜的领先制造商，戈尔坚定地站在行业变革的前沿，为客户提供超越期望的服务承诺。

我们深谙车灯设计的大趋势，不断追踪行业动态，致力于为客户提供符合最新设计潮流的解决方案。我们的团队由行业专家组成，具备丰富的经验和创新思维，能够为客户量身定制满足其需求的高品质产品。

与OEM和车灯制造商的合作关系对我们而言意义重大。我们视合作伙伴为战略伙伴，致力于共同探索创新之路，实现双方的共赢发展。通过与合作伙伴紧密合作，我们努力优化产品性能，提升生产效率，为客户提供更具竞争力的解决方案。

选择戈尔，选择卓越、创新、共赢！

提供专业的质量检测服务，帮助客户精准定位成品车灯的潜在问题，并提供有效的解决方案。依托戈尔积淀数十年的应用专长、多项国际行业认证、出色的法规遵从以及稳定的全球供应链，向客户提供覆盖全球的技术服务和支撑。戈尔始终坚守共赢共享的理念，致力于为车灯制造商和OEM厂商创造更长远的价值。

在未来，戈尔将继续携手行业伙伴，不断探索和创新，引领车灯凝露管理技术的发展，为汽车照明领域带来更多可能。我们相信，通过共同努力和不懈追求，戈尔将继续巩固其在车灯凝露解决方案领域的领导地位，为客户提供更加可靠、高效和创新的产品和服务，引领行业向更加绿色、智能、可持续发展的方向发展，共同开创汽车照明领域的美好未来！

# 五、致谢

本白皮书由戈尔编著。

白皮书在编写过程中得到了多位专家的宝贵建议和指导，在此感谢所有专家对本白皮书所做的贡献（排名不分先后）。

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| 张鑫                | 马瑞利车灯项目主任工程师        |
| 吕浩                | 华域视觉热学工程师           |
| 忻丁蕾               | 三立车灯设计师             |
| 苏翔                | 戈尔创新方案事业部中国区商务运营总裁  |
| 陈走                | 戈尔汽车事业部大中国区销售总监     |
| 马彦韵博士             | 戈尔汽车事业部电子产品线亚太区产品经理 |
| 方树源               | 戈尔汽车事业部车灯产品线亚太区技术经理 |
| Ulrike Geissler博士 | 戈尔汽车事业部车灯产品全球负责人    |
| 万然                | 戈尔汽车事业部亚太区市场战略经理    |
| 江乐平               | 戈尔汽车事业部车灯产品线亚太区产品经理 |

仅限工业用途。不适用于食品、药品、化妆品或医疗设备等制造、加工或包装作业。

本文所有技术信息和建议都依据戈尔先前的经验和 / 或实验结果给出。戈尔公司尽力提供这些信息，但对此不承担法律责任。客户应检查具体应用中的适应性和可用性，因为只有具备了所有必要的工作数据才能判断本产品的性能。上述信息可能会不时变更，不作为产品规格使用。戈尔公司的销售条款适用于戈尔产品的销售。

W. L. Gore & Associates, Inc. (戈尔公司) 通过了 IATF 16949、ISO 9001 和 ISO 14001 标准认证。

GORE、戈尔、*Together, improving life* 及其设计是 W. L. Gore & Associates (戈尔公司) 的商标。版权所有 © 2024, W. L. Gore & Associates, Inc. 保留所有权利。

戈尔(深圳)有限公司上海分公司  
地址: 中国上海市南京西路1468号中欣大厦43楼  
电话: 86-21 5172 8299 传真: 86-21 6247 9199 电邮: info\_china@wlgore.com  
gore.com.cn/autovents

关注<戈尔创新方案>  
微信公众号, 获取最新资讯

