雷达罩材料对毫米波透波性能的影响

黄骏霖 吴旭 郭军朝 李亦琛 刘春华

（东风汽车集团有限公司研发总院，武汉 430058）

摘要：为研究汽车用毫米波雷达罩材料对毫米波透波性能的影响，阐述了材料透射损耗与电磁参数间的内在联系，测试了常用雷达罩塑料的电磁参数和透射损失以及不同聚丙烯（PP）材料厚度的透射损耗，结果表明，低极性材料一般有较小的介电常数和介电损耗，毫米波在保险杠面罩中的透射损耗与壁厚呈周期性关系，且厚度为半波长整数倍时透射损失最小。此外，通过分析不同油漆涂层、金属涂层的材料透射损耗，发现油漆成分中的铝粉和珠光粉对毫米波透波性能有明显的负面影响，物理气相沉积（PVD）镀铝不适用于自适应巡航（ACC）车型的车标，而适当膜厚的PVD镀铟对毫米波干扰小，满足透波要求。

关键词：毫米波 雷达 透射损失

中图分类号：U465 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250264

The Influence of Radar Cover Material on Millimeter Wave Transmission Performance

Huang Junlin, Wu Xu, Guo Junchao, Li Yichen, Liu Chunhua

（Dongfeng Motor Corporation Research&Development Institute, Wuhan 430058）

Abstract: To investigate the effect of automotive millimeter-wave radar radome matenvls on millimeter-wave transmittance performance, this paper inelaborates the intrinsic relationship between material transmission loss and electromagnetic parameters, and tests the electromagnetic parameters and transmission loss of several commonly used radar cover plastics, as well as the transmission loss of different Polypropylene (PP) material thicknesses. The results indicate that low polarity materials generally have lower dielectric constants and dielectric losses. The transmission loss of millimeter waves in bumpers exhibits a periodic relationship with wall thickness, and the transmission loss is minimal when the thickness is an integer multiple of half a wavelength. Furthermore, through analysis of the transmission loss of materials with different paint coatings and metal coatings, it is found that aluminum powder and pearlescent powder in paint components have a significant negative impact on the transmission performance of millimeter waves. Physical Vapor Deposition (PVD) aluminum plating is not suitable for Adaptive Cruise Control(ACC) vehicle logos, while appropriate film thickness PVD indium plating has minimal interference with millimeter waves and meets the transmission requirements.

Key words: Millimeter wave, Radar, Transmission loss

1 前言

随着全球汽车智能化水平的不断提升，传感器在智能驾驶系统中发挥着关键作用，既包括车载摄像头等视觉传感器，也包括车载毫米波雷达、激光雷达与超声波雷达等雷达类传感器。毫米波雷达因其成本较低、技术相对成熟，且是唯一能够实现全天候、全天时工作的传感器，已成为汽车先进驾驶辅助系统（Advanced Driver Assistance Systems，ADAS）和自动驾驶汽车不可或缺的核心传感器之一[1]。

目前，各国对车载毫米波雷达所用频段的规

作者简介：黄骏霖（1970—），男，学士学位，高级工程师，研究方向为汽车轻量化/绿色环保/智能化相关的塑料、复合材料应用开发。

参考文献引用格式：

黄骏霖，吴旭，郭军朝，等. 雷达罩材料对毫米波透波性能的影响[J]. 汽车工艺与材料，2026(2): 25-30.

HUANG J L, WU X, GUO J C, et al. The Influence of Radar Cover Material on Millimeter Wave Transmission Performance[J]. Automobile Technology & Material, 2026(2): 25-30.

定存在差异，主要集中于24 GHz与77 GHz，少数国家（如日本）采用60 GHz频段。由于77 GHz频段相对于24 GHz具备多项技术优势，未来全球车载毫米波雷达的频段有望统一于77 GHz频段（76~81 GHz）。从L2到L5不同级别的自动驾驶系统中，所需毫米波雷达的数量逐渐增加[2]。

车载毫米波雷达通常安装在车辆外部，如保险杠面罩内侧或车标后方，因此，雷达信号须穿过其外侧罩盖部件，且在此过程中能量损耗应尽可能低。本文对当前汽车毫米波雷达罩盖材料的透波特性展开研究，测试材料的复介电常数ε、损耗角正切（tanδ）及复数磁导率，并分析不同聚丙烯（Polypropylene，PP）基材厚度与表面油漆涂层对透射损耗的影响，并总结与分析雷达罩材料对毫米波透波性能的影响。

2 高聚物的介电与磁导性能

用于雷达罩的高分子聚合物（以下简称高聚物）在电磁场中的能量损耗机制主要来源于其介电特性，而非磁性。对于绝大多数非磁性的高聚物基材，其损耗可归因于介电损耗，仅当材料中掺入铁磁性填料时，才可能产生明显的磁滞损耗。

2.1 介电性能与介电损耗

高聚物的介电性能是指其在电场作用下存储和损耗电能的能力。在交变电场中，材料内部的电荷会发生位移或偶极子重新排列，以抵消外部电场，这一过程称为极化（主要包括电子极化、原子极化及取向极化）。在高频电场下，偶极子的转向可能无法与上电场的快速变化同步，导致极化响应滞后，从而将部分电能不可逆地转化为热能，即产生介电损耗，表现为电能转化为热能[3]。

介电性能通常由复介电常数描述：

$$\varepsilon=\varepsilon'-j\varepsilon'' \quad (1)$$

式中：实部ε'为介电常数，反映材料存储电能的能力；虚部ε''为损耗因子，反映材料损耗电能的趋势；j为虚数单位，$j^2=-1$。

介电损耗常用损耗角正切表示：

$$\tan\delta=\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2)$$

tanδ的值越大，表明材料的介电损耗越大。

在频率为77 GHz的电磁场中，塑料的能量损耗机制主要包括：

a. 欧姆损耗，对于添加了碳纳米管、石墨烯或金属粉末等导电填料的复合高聚物材料，在高频电场下会因电导率升高而产生涡流，引起显著的焦耳热损耗，其损耗强度与材料的有效电导率正相关。

b. 极化弛豫损耗，对于聚氯乙烯（Polyvinyl Chloride，PVC）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（Polyethylene Terephthalate，PET）等极性高聚物，其偶极子在超高频下仍可能发生部分转向弛豫，产生损耗。而聚乙烯（Polyethylene，PE）、聚丙烯（Polypropylene，PP）等非极性材料的极化响应微弱，固有损耗较低。

2.2 磁导率与磁滞损耗

高聚物本身的原子构成决定其不具有铁磁性，其复磁导率（$\mu=\mu'-j\mu''$）实部μ'通常接近1，虚部μ''接近0，因此，磁滞损耗可忽略不计。雷达罩选用该类非磁性高聚物，可最大限度避免电磁波引入额外的磁性损耗。

当为满足特定功能（如吸波、屏蔽）在高聚物基体中掺入铁氧体、金属磁性粉末等铁磁性颗粒时，所得复合材料会在交变磁场中表现出明显的磁滞效应，导致磁滞损耗，这部分损耗会转化为热能，从而降低透波率。

3 雷达罩材料电磁参数

为评估不同材料作为毫米波雷达罩的适用性，本研究选取9种外饰件材料，在77 GHz频段下测试其关键电磁参数，包括复介电常数ε与复磁导率μ。其中，复介电常数可分解为表示储能能力的介电常数ε'和表示耗能能力的损耗角正切（tanδ），测试结果如表1所示。

由表1可知，所有被测材料的介电常数ε'处于2.4~3.4范围内，损耗角正切tanδ数量级较低，此参数范围是材料具备良好透波性的基础。高聚物的分子极性是影响其电磁参数的关键因素。高聚物分子结构极性越强，ε和tanδ越大。非极性材料的极化程度越小，ε和tanδ越小。所有被测材料的复磁导率实测值均为$\mu'\approx1$、$\mu''\approx0$（即磁

表1　雷达环境件材料的电磁参数

零件	材质	介电常数ε′	介电损耗tanδ
保险杠面罩	15%滑石粉填充的三元乙丙橡胶(Ethylene Propylene Diene Monomer,EPDM)增韧聚丙烯(PP+EPDM-TD15)	2.432	0.001 13
保险杠面罩	20%滑石粉填充的三元乙丙橡胶增韧聚丙烯(PP+EPDM-TD20)	2.50	0.001 09
雾灯饰板	高亮黑丙烯酸酯-苯乙烯-丙烯腈共聚物(Acrylic-Styrene-Acrylonitrilecopolymer, ASA)	2.66	0.010 7
外饰板	聚碳酸酯(Polycarbonate,PC)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共混物(Acrylonitrile-Butdiene-Styrene,ABS)(PC+ABS)	2.77	0.008 42
前格栅	高亮黑聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate,PMMA)、丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸酯(Acrylonitrile-Styrene-Acrylate copolymer,ASA)共混物(PMMA+ASA)	2.65	0.009 95
保险杠装饰条	电镀级丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)	2.68	0.007 15
车标	聚碳酸酯(PC)	2.68	0.007 15
天线罩-雷达外壳	30%玻纤增强聚对苯二甲酸丁二醇酯(Polybutylene Terephthalate,PBT)(PBT-GF30)	3.37	0.011
天线罩-雷达外壳	30%玻纤增强聚丙烯(PP-GF30)	2.57	0.003 89

损耗正切tanδ≈0),表明在77 GHz频段,电磁波穿透非磁性高分子材料时的能量损耗完全来源于介电损耗,不存在磁滞损耗。本研究同时测试了数款角雷达支架用吸波材料(未在表1中列出),其ε′高达7~9,tanδ高达0.4~0.6,与雷达罩材料的低损耗特性形成鲜明对比,揭示了二者完全相反的设计目标:雷达罩材料追求极低的ε′和tanδ,吸波材料则追求较高的ε′和tanδ,使电磁波吸收最大化。

4　雷达罩材料的透射损耗

雷达罩材料的透射损耗试验方法参照DB31/T 1315—2021《车载毫米波雷达探测性能测试方法》,设备如图1所示。

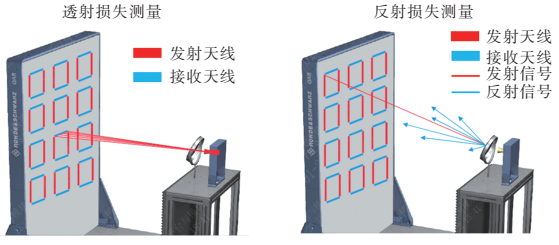


图1　透射损失和反射损失检测设备

4.1　不同材料对毫米波透射能力的影响

表2所示为常用的雷达周边塑料材料在77 GHz频率、厚度均为3.0 mm条件下的透射损耗。

表2　常用材料对毫米波的透射损耗

零件名称	材料品级	厚度/mm	透射损耗/dB
保险杠面罩	PP+EPDM-TD15	3.0	0.79
保险杠面罩	PP+EPDM-TD20	3.0	0.86
雾灯饰板	ASA-高亮黑	3.0	1.4
外饰板	PC+ABS	3.0	0.71
前格栅	高亮PMMA+ASA	3.0	1.39
保险杠装饰条	电镀级ABS	3.0	0.71
车标	PC	3.0	0.67
天线罩-雷达外壳	PBT-GF30	3.0	0.5
天线罩-雷达外壳	PP-GF30	3.0	1.13

由表2可知,高亮黑ASA以及PMMA+ASA材料对毫米波的透射损耗较大,其他材料影响相对较小。对比天线罩材料,PBT-GF30比PP-GF30表现出更好的透波性能。综合来看,PP基材料因其对毫米波的透射损耗相对较低,且兼具刚性、耐热性、耐低速碰撞性和低成本等综合优势,是保险杠面罩材料的理想选择。

4.2　保险杠材料壁厚对电磁波透射能力的影响

采用保险杠面罩材料PP+EPDM-TD20,注塑制备了厚度为1.5~3.5 mm的15种不同厚度样板,测试其在77 GHz频段下的透射损耗,结果如图2

所示，由图中内容可知：

a. 电磁波在介质中的透射损失随厚度呈周期性变化。

b. 透射损耗在厚度约为 1.8 mm、3.0 mm 时出现极大值，厚度约为 2.5 mm 时出现极小值（波谷），即透射损耗最低。

c. 相邻波峰的间距（周期）约为 1.2 mm。

d. 透射损耗波峰与波谷之间的差值约为 0.8 dB，对透波材料而言，此差值影响显著。因此，在实际设计中需选择合适壁厚以降低透射损耗。

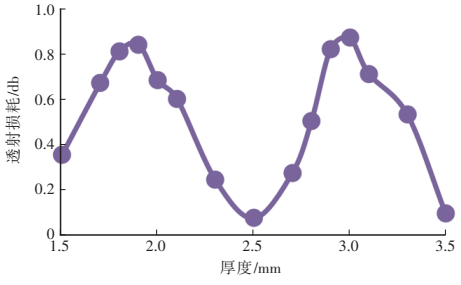


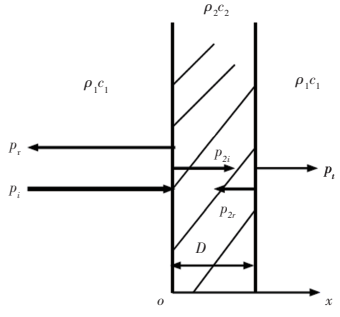
图 2 保险杠料面罩材不同厚度下的透射损耗

根据波在单层介质中的传输理论，透射损耗（传输损失）可表示为：

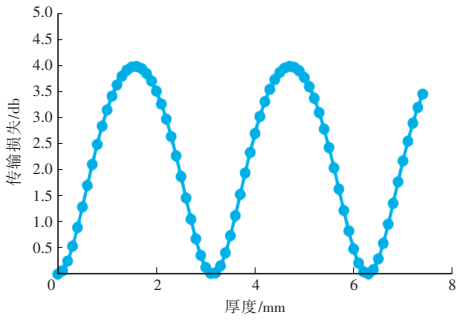
$$T_{loss} = 10\log\left[\cos^2 k_2 D + \frac{1}{4}(R_{12} + R_{21})^2 \sin^2 k_2 D\right] \quad (1)$$

式中：$k_2=2\pi/\lambda$ 为波数，λ 为波长，D 为材料厚度，$R_{12} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}$、$R_{21} = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}$ 为阻抗比，ρ_1、ρ_2 分别为介质 1 和介质 2 的密度，c_1、c_2 分别为波在介质 1 和介质 2 中的传输速度。

由式（1）可知，当 $k_2D=n\pi$（n=1,2,3,...）时，即材料厚度为电磁波在材料中半波长的整数倍时，理论透射损耗为 0。这表明透射损耗与介质厚度存在周期性关系，当厚度为半波长整数倍时透射损耗最小。例如，当 $(R_{12}+R_{21})^2=10$、$k_2=1$ 时，带入式（1）后可得到如图 3 所示的传输损失与介质厚度的对应关系。



（a）波在单层介质中的传输模型



（b）传输损失与介质厚度的对应关系

图 3 透波损耗与壁厚关系理论模型

电磁波在介质中的传输速度 $v=c/\sqrt{\varepsilon\mu}$[4]，其中，$c$ 为真空中的光速，ε 为材料介电常数，μ 为材料磁导率。

对于安装于保险杠面罩后的毫米波雷达，材料 PP+EPDM-TD20 的实测介电常数 ε 为 2.50，磁导率 $\mu\approx1$。77 GHz 毫米波在该材料中的波长 λ_m 为：

$$\lambda_m = \frac{c}{F\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (3)$$

式中：F 为电磁波的频率。

经计算，得 λ_m=2.46 mm，对应的半波长 $\lambda_m/2\approx$ 1.23 mm。

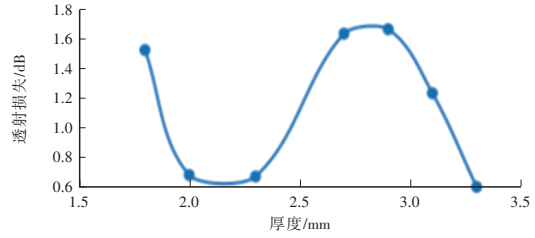
因此，从透波性能最优角度，保险杠面罩的壁厚应优选为 1.23 mm 的整数倍，结合注塑工艺性、制品刚性、耐低速碰撞性及材料流动性等因素，针对 77 GHz 毫米波，保险杠面罩材料的适宜壁厚可确定为 2.5 mm 左右。在实际应用中，由于不同材料商、不同牌号材料的介电常数存在差异，最佳壁厚应根据具体材料的实测介电常数进行计算。

4.3 保险杠面罩表面涂层对电磁波透射能力的影响

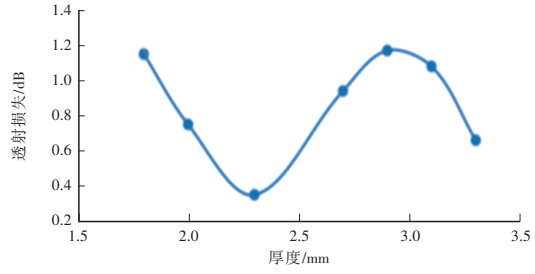
图 4 所示为 5 种不同颜色油漆涂层在不同基材厚度下对毫米波透射损耗的影响，表 3 所示为常见油漆中的铝粉和珠光粉含量。所有涂层结构均为：底漆厚度约 10 μm，色漆厚度 10~20 μm，清漆厚度 30~40 μm。不同颜色油漆中铝粉和珠光粉的含量不同。

分析可知，油漆中的珠光粉、铝粉对电磁波的透射均有较强的负面影响。5 种测试油漆使透射损耗增大 0.26~0.6 dB。其中，铝粉的影响比珠光

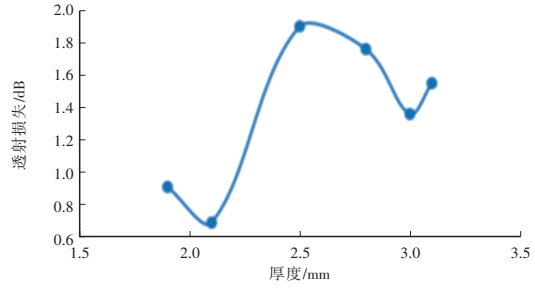
粉更为显著。此外,珠光粉(主要成分为云母)会使透射损耗随厚度变化的相位曲线发生偏移,推测原因为云母对电磁波具有较大的折射率,改变了波在涂层中的有效传播路径[5]。



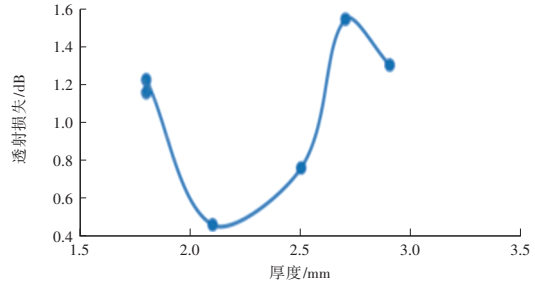
(a)某灰色1



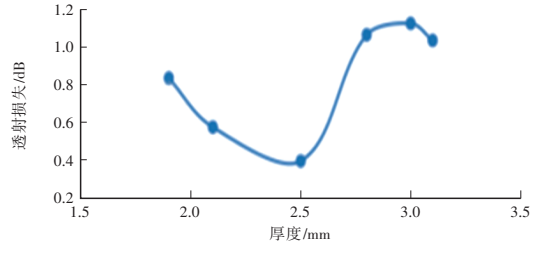
(d)某灰色2



(c)某金色



(d)某白色



(e)某黑色

图4　油漆涂层对电磁波的影响

表3　几种油漆中的铝粉和珠光粉含量

涂层种类	珠光粉的质量分数/%	铝粉的质量分数/%	最小透射损耗/db
无	0	0	0.09
某灰色1	0	6.30	0.67
某灰色2	0.05	1.50	0.35
某金色	1.30	4.00	0.69
某白色	5.90	0.00	0.46
某黑色	0.50	0.05	0.39

4.4　表面装饰对电磁波透射及反射能力的影响

不同表面装饰处理对材料电磁性能的测试结果如表4所示,可以发现:

a. 纯PC和纯ABS材料均具有很好的透波性能。

b. ABS板(厚度为3.0 mm)喷涂鲜亮的油漆后,透波性能基本无衰退,反而因厚度增加而略有提升。

c. ABS电镀铬处理后,反射全部电磁波。PC表面物理气相沉积(Physical Vapor Deposition,PVD)镀铝后,会反射绝大部分电磁波。两者均不适用于ACC车型的车标。

d. PC表面可以采用PVD镀铟,精确控制膜厚,达到外观与透波性的平衡,既具有金属镀层外观,又具有雷达波穿透特性[6]。

表4　表面装饰对电磁波的影响　dB

材料	表面处理	单向传输损耗	反射损耗
PC	无	0.67	−16.5
PC	PVD镀铝	34.38	−1.3
PC	PVD镀铟	1.01	−9.3
ABS	无	0.71	−8.4
ABS	电镀铬	50.35	0
ABS	黄色漆	0.57	−10
ABS	橙色漆	0.54	−10.2

5　结论

a. ADAS辅助驾驶功能大量采用毫米波雷达,其主流频率为77 GHz。为防止雷达漏报误报,对雷达前方区域的罩盖材料有较高的透波要求。

b. 聚丙烯材料对毫米波的透射损耗相对较

低，加上其刚性、耐热、低速碰撞、低成本等综合性，作为保险杠面罩材料具有综合性的优势。理论计算和试验结果均表明，毫米波在保险杠面罩中的透射损耗与壁厚呈周期性关系，当厚度为半波长整数倍时透射损失最小，且基于毫米波透波性能的保险杠面罩适宜壁厚约为2.5 mm。

c. 油漆中的珠光粉、铝粉对电磁波的透射均存在较强的负面影响，且铝粉对透射的影响因素大于珠光粉。为此，在汽车保险杠面罩油漆的颜色选型、油漆配方和工艺开发过程中，要平衡选择，使油漆颜色满足造型需求，避免油漆涂层使雷达毫米波产生过量的衰减。

d. 塑料表面附着金属层的种类和厚度对毫米波的透波性能影响不同，传统的电镀铬、PVD镀铝会反射绝大部分电磁波，不适用于ACC车型的车标。适当膜厚的PVD镀铟可避免对毫米波产生干扰，满足智能驾驶对ACC车型的车标的透波要求。

参考文献：

[1] 詹德凯. 自动驾驶汽车环境感知系统传感器技术现状及发展趋势[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2021, 23(3): 21-26.

[2] 徐霞艳. 5G毫米波技术与应用场景浅析[J]. 数字通信世界, 2022(3): 44-46.

[3] 程健, 邓俊杰, 刘凯. 汽车ACC毫米波雷达罩盖材料研究[J]. 装备维修技术, 2022(6): 34-38.

[4] 龚秀冰, 顾亚楠, 蒋湘粤, 等. 心电动力学图对急性冠脉综合征患者早期诊断的价值[J]. 中华危重病急救医学, 2024, 36(3): 266-272.

[5] 田海洋, 程晓雪, 莫林睿, 等. 汽车金属漆对毫米波雷达的影响研究[J]. 上海涂料, 2024, 62(4): 53-57.

[6] 宁波四维尔汽车智能科技有限公司. 一种镀铟ACC车标生产工艺: 202311243772.3[P]. 2023-12-26.

AT&M