

# 功能性硅橡胶在电磁屏蔽领域的应用现状及进展

邹华<sup>1,2</sup>, 赵素合<sup>2</sup>, 田明<sup>1</sup>, 张立群<sup>1,2</sup>

(1. 北京化工大学纳米材料先进制备技术与应用科学教育部重点实验室, 北京 100029;

2. 北京化工大学北京市新型高分子材料制备与成型加工重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 回顾了功能性硅橡胶在电磁屏蔽领域应用的发展背景, 并详细介绍了高导电硅橡胶和吸波硅橡胶的种类、应用场合及国内外发展现状及研究进展, 最后对国内的研究和开发提出了建议

**关键词:** 高导电硅橡胶; 吸波硅橡胶; 电磁屏蔽

## 1 电磁屏蔽硅橡胶的发展背景

自 1866 年世界上第一台发电机发电以来, 利用电磁效应的电气设备得到越来越广泛的应用, 但大量的负效应也随之出现, 电磁干扰、电磁信息泄露、环境电磁污染等问题也越来越突出, 从而催生了高导电硅橡胶、吸波硅橡胶等功能性硅橡胶在电磁屏蔽领域的应用。

随着电子、计算机与电信技术的迅猛发展及其广泛应用, 空间电磁环境变得日趋复杂, 出现了电磁干扰的问题。各种电子仪器、通讯器材和计算机本身就会产生电磁波, 影响其他设备的正常运行, 同时它们自身也会受到外来电磁波的干扰, 因此精密仪器、航空航天工程和导航设备、科学测量和医疗保健设备等重要系统存在巨大的潜在危害。在现代战争中, 电磁干扰还会影响尖端武器的操纵和运行, 通讯指挥系统也会因电磁干扰而发生重大障碍, 一些燃油系统的控制和现代武器的操纵均因受其影响而产生严重的后果。

随着信息产业的高速发展, 各种信息网络传播着数以亿计的军事、政治、经济等方面的重要情报和信息, 由于电磁波辐射而导致的信息泄露事件时有发生, 直接威胁到国家的政治、经济、军事安全。研究表明, 普通未采取屏蔽处理的计算机, 在工作时辐射出带信息的电磁波, 可在 1 000 m 外被接收和复现。若采用尖端的接收和解码设备, 则截获的最大距离会更远。

早在 20 世纪六七十年代, 科学家就开始研究

电磁场对生物体的作用, 结果表明, 电磁场会对人体组织产生不同程度的影响, 移动电话、计算机、微波炉等与人们日常工作和生活密切相关的电磁辐射源产生的强辐射会对人体健康构成威胁。电磁污染已被公认为大气污染、水质污染、噪声污染之后的第四大公害, 联合国人类环境大会已将其列入必须控制的主要污染物之一, 世界各国也纷纷开展电磁场对身体健康影响的研究工作以及对电磁辐射的检测和控制工作。

电磁辐射对社会正常运行构成的危害已引起人类的极大重视, 一些发达国家和国际组织纷纷通过立法和制定标准规范电磁辐射剂量。1944 年德国电气工程师协会制订了世界上第一个电磁兼容性规范 VDE0878; 美国联邦通讯委员会制定了抗电磁干扰法规 (FCC 法规) 和 Tempest 技术标准, 其中 FCC 规定大于 1 000 Hz 的电子装置要求屏蔽保护, 并持 EMI/RFI 合格证才允许投放市场。国际无线电干扰特别委员会 CISPR 也制定了抗电磁干扰的国际标准, 供各国参照执行。电磁辐射的危害也引起我国政府的高度重视, 1998 年, 我国推行了电磁兼容 EMC 标准, 于 2003 年 5 月 1 日起对涉及人类健康安全、环境保护和公共安全的产品强制实行包括电磁兼容认证 (CEMC 认证) 在内的 CCC 认证制度。

另一方面, 世界各国科学家还通过技术手段来抑制或消除电磁辐射, 最通用的方法就是对电磁波进行屏蔽, 从而促进了电磁屏蔽材料的发展,

世界各国都纷纷加大了电磁屏蔽材料的研究和开发力度,相继开发出金属非晶电磁屏蔽材料、发泡金属屏蔽材料、导电高分子屏蔽材料等。

电磁屏蔽是对两个空间区域之间进行金属的隔离,以控制电场、磁场和电磁波由一个区域向另一个区域的感应和辐射。其利用辐射电磁场在金属界面的反射和金属屏蔽层的吸收来抑制电磁辐射干扰,从而有效控制从屏蔽材料的一侧空间向另一侧空间传递电磁能量(见图1)。根据 Schelkunoff 电磁屏蔽理论,屏蔽效能可用式(1)表示:

$$E_s = R + A + B \quad (1)$$

式中  $E_s$  为屏蔽材料的总屏蔽效能(Shielding Effectness),  $R$  为表面反射损耗衰减,  $A$  为屏蔽材料内部吸收损耗衰减,  $B$  为屏蔽材料内部多次反射损耗衰减,单位为 dB。因而屏蔽材料必须具有高的导电性和(或)高的磁导率。

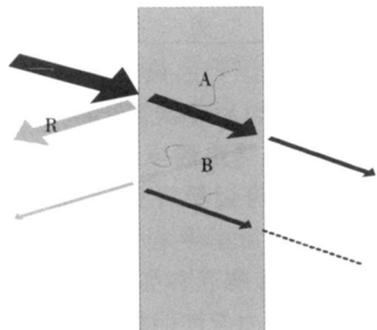


图1 屏蔽材料的屏蔽机理

普通硅橡胶本身为高绝缘材料,磁导率也很低,对电磁波起不到任何屏蔽和吸收作用,但由于硅橡胶具有其他橡胶无法比拟的优异的耐高低温( $-100 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ )、耐候老化、低加工粘度以及高填充能力等性能,可通过掺入大量导电填料或磁性填料等来实现硅橡胶复合材料的功能化,拓展了高导电或高导磁硅橡胶在电磁屏蔽领域的应用。用于电磁屏蔽的功能性硅橡胶主要有高导电硅橡胶和吸波硅橡胶两大类。

## 2 高导电硅橡胶

与传统的金属板、金属丝网等屏蔽材料相比,电磁屏蔽硅橡胶除能提供良好的电磁屏蔽能力外,固有的橡胶弹性还提供了对水汽密封的功能,因此广泛应用于航天航空、船舶、舰艇、战车、工作站、计算机、数据通讯、医疗、家用电器等电子电气

设备的密封系统中,起到环境密封和电磁屏蔽的双重目的,以实现电子电气设备与系统调和、相共存的电磁兼容环境,抑制电磁干扰,同时避免重要信息泄漏,保障国家政治、经济、军事等方面的安全。

用于电磁屏蔽硅橡胶的导电填料主要有以下几大类。

1. 碳系材料,主要包括导电炭黑、石墨、碳纳米管以及碳纤维等。碳系材料填充硅橡胶的导电性较差,很难获得体积电阻率低于  $1 \Omega \cdot \text{cm}$  的高导电硅橡胶,因而多用于抗静电材料或屏蔽效能要求不高的电磁屏蔽材料。

2. 金属填料,常见的是银、铜、铝等。铜、铝极易氧化而较少使用,银性质稳定不易氧化,能赋予硅橡胶复合材料优异的导电性和屏蔽效能,但存在价格昂贵的缺点。

3. 镀金属填料,这类填料是在金属填料的基础上发展起来的,主要是通过电镀、化学镀等方法,使高导电的银、镍等均匀涂覆于无机或有机的基材上,这类导电填料的突出特点是成本较低。

电磁屏蔽硅橡胶主要作为密封材料用于电子设备及系统屏蔽体的通孔或缝隙,防止电磁波从这些孔隙中泄露,从而保障整个设备或系统的电磁兼容性。据美国市场统计,电磁屏蔽橡胶密封件是该市场发展最迅速的产品,从2000年开始,其年增长率已达5.2%,远远大于其他密封件的增长速度。

目前国外有多家公司实现了电磁屏蔽硅橡胶的商品化,如美国 Chomerics 公司、Laird 公司和 Technit 公司,英国邓禄普航空精密橡胶公司等。这些公司开发的电磁屏蔽硅橡胶使用的导电填料主要有7类:纯银粉、镀银玻璃微珠、铝镀银、铜镀银、镍镀银、镍包石墨、炭黑等。按产品成型方式分,主要有模压制品、挤出制品、共挤制品、冲切制品等。根据产品的应用领域划分有民用、军用以及特殊用途的电磁屏蔽橡胶。美国军标 MIL-D-83528C 按照基体、导电填料种类、屏蔽效能以及连续使用温度把电磁屏蔽橡胶分为12类,我国也颁布了相应的军工标准 SJ 20673-1998《军用电磁屏蔽橡胶衬垫材料通用规范》。表1是几种典型的电磁屏蔽硅橡胶的性能。

表 1 电磁屏蔽硅橡胶的性能

项 目	导电填料						
	银	银铜	银-镍	银-铝	银-玻璃	镍包石墨	炭黑
<b>物理性能</b>							
邵尔 A 型硬度/度	65±5	5±5	75±5	65±5	65±5	65±10	65±7
拉伸强度/M Pa	≥2.07	≥1.38	≥1.38	≥1.38	≥1.03	≥1.38	≥3.80
拉断伸长率/%	≥200	≥100	≥100	≥100	≥75	≥100	≥100
压缩永久变形(70 h×100 °C)/%	≤45	≤32	≤32	≤32	≤30	≤30	≤45
最高使用温度/°C	160/200	125	125	160/200	160	150	200
<b>导电性能及电性能稳定性/(Ω·cm)</b>							
体积电阻率	≤0.002	≤0.004	≤0.005	≤0.008	≤0.01	≤0.1	≤8.0
热老化后电阻率	≤0.010	≤0.010	≤0.010	≤0.010	≤0.01	≤0.25	≤8.0
<b>屏蔽效能/dB</b>							
≥200 kHz(磁场)	70	70	70	60	50	NA	—
100 MHz(电场)	120	120	120	115	100	100	80
500 MHz(电场)	120	120	120	110	100	100	80
2 GHz(平面波)	120	120	115	105	90	100	60
10 GHz(平面波)	120	120	110	100	80	100	50
<b>性能特点对比</b>							
屏蔽效能	优	良	良	良	中	中	差
成本	最高	较高	较高	高	中	低	最低
耐腐蚀性	良	差	良	优	差	中	差

由上表可以看出,对于电磁屏蔽用高导电硅橡胶,其强度方面的要求并不高,一般情况下拉伸强度仅要求 1~2 MPa,拉断伸长率仅要求 100% 以上,而更关注的是其压缩永久变形、导电性能以及屏蔽效能等,这主要是因为电磁屏蔽硅橡胶大多用作密封衬垫,其受力多为压缩状态,不同填料体系的电磁屏蔽硅橡胶的性能特点和使用场合各不相同。

目前国外电磁屏蔽硅橡胶的制备和应用技术都很成熟,除了常规产品外,还有耐腐蚀、阻燃、现场成型等特殊的电磁屏蔽橡胶。最近的研究热点集中在如何提高现场成型电磁屏蔽硅橡胶的稳定性。这类电磁屏蔽硅橡胶被设计成流体状,多以缩合型或加成型液体硅橡胶为基体材料,使用时流体状态的未硫化导电橡胶从储罐挤出后接触空气中的湿气固化或现场混合后涂覆于屏蔽体的缝隙。这类产品存在的主要问题是储存寿命不长,美国产品一般仅能存放 3~6 个月。

国内电磁屏蔽硅橡胶的研究、开发和应用方面都与国外有很大差距,更多的研究工作集中在如何制备高导电硅橡胶,而对导电性能在不同环境下的稳定性、屏蔽效能等的研究鲜有关。生楚君用细银粉填充硅橡胶,制备出体积电阻率达  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$  的 LTX 型高导电性导电橡胶垫

片。冒彬等研究了国产乙炔炭黑、卡博特公司乙炔炭黑、卡博特公司超导炭黑 BP2000 和 200 目的银粉以及自制高导电粉末 G 填充硅橡胶的性能,发现添加 150 份银粉可获得  $0.0190 \Omega \cdot \text{cm}$  的体积电阻率。雷海军等采用银粉和镍粉分别填充硅橡胶,研究了金属粉种类、用量和粒径对高导电橡胶导电性能和力学性能的影响。李鹏等还对超细镍粉填充室温硫化硅橡胶的二次逾渗现象进行了研究。李跟华等研究了镀银铜粉填充硅橡胶的性能,发现乙烯基三过氧叔丁基硅烷偶联剂(VTPS)可作为镀银铜粉良好的表面处理剂,在改善导电硅橡胶的混炼工艺性能的同时还能提高硅橡胶的导电性能和导电稳定性。耿新玲等考察了镀银玻璃微珠的用量、硅烷偶联剂的种类及用量等对硅橡胶导电性能和力学性能的影响,发现添加 180 份经 VTPS 处理的镀银玻璃微珠,可获得体积电阻率小于  $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$  的高导电硅橡胶。沈玲等研究了镀银玻璃微珠的表面改性、粒径及用量对镀银玻璃微珠填充导电硅橡胶的结构与性能的影响。张继阳等对镀银玻璃微珠/硅橡胶导电复合材料的逾渗现象进行了研究。在电磁屏蔽硅橡胶的应用方面,随着 3G 和 4G 通讯技术的发展,国内对民用电磁屏蔽橡胶的需求越来越大,然而除北京北化新橡科技发展有限公司等少

数几家公司自主研发生产电磁屏蔽硅橡胶外, 大部分都是代销 Chomerics 公司、Laird 公司、Technit 公司等国外公司的产品。对于用于军工、航天航空等领域的高性能电磁屏蔽硅橡胶, 国外一直对我国实行封锁。

### 3 吸波硅橡胶

吸波硅橡胶作为另一种广义的电磁屏蔽橡胶, 与导电型电磁屏蔽橡胶靠反射电磁波或反射、吸收损耗相结合的屏蔽不同, 这类材料的突出特点是低反射、高吸收, 对入射电磁波实现强吸收, 将电磁波能量转换为热能或其他形式的能量而损耗掉。该材料在军事隐身技术领域中有广泛的应用, 能最大限度地减少或消除雷达、红外等对目标的探测。

用于吸波硅橡胶的吸波填料主要分为以下四大类。

1. 电阻型吸波填料, 主要包括特种碳纤维、碳化硅纤维、导电高聚物、石墨、炭黑、碳纳米管等, 这类材料具有较高的电阻损耗正切角, 电磁能主要衰减在材料电阻上, 以热能形式散发掉。

2. 电介质型吸波材料, 主要是钛酸钡, 其吸波机理主要是依靠介质的电子极化、离子极化、分子极化等迟滞、衰减电磁波。

3. 磁介质型吸波材料, 主要包括铁氧体、羰基铁、羰基镍、磁性合金粉等, 是目前使用最广泛的吸波粉体, 广泛填充于硅橡胶制备吸波硅橡胶。这类材料具有较高的磁损耗正切角, 依靠磁滞损耗、自然共振、涡流损耗及畴壁共振和后效损耗等磁极化机制衰减、吸收电磁波。

4. 纳米粉体, 主要依靠其小尺寸效应、表面与界面效应、量子尺寸效应来形成吸波通道, 既有极好的吸波特性, 又具备宽频带、兼容性好、质量小、厚度小等特点, 是最具发展前景的吸波材料。

吸波硅橡胶与高导电硅橡胶相比, 极少反射电磁波, 用于电子设备或系统内部时, 不会因反射电磁波而造成对设备自身的电磁干扰, 因而广泛应用于雷达天线附近、射频屏蔽箱、屏蔽机柜、微波暗室。在工业微波能设备内部, 吸收屏蔽可防止微波泄漏, 在通讯导航系统等高频电子电气设备上可抗干扰、防辐射, 建造无电波反

射的空间。

表征吸波硅橡胶性能优劣的最主要参数是反射率和电磁参数。反射率表征了吸波材料相对于金属平板反射的大小, 电磁参数(包括复数介电常数和复数磁导率)主要用于分析吸波机理。当前国外吸波硅橡胶的生产厂商主要有欧洲的 Emerson & Cuming 公司、韩国的 AMIC 公司等, 商业化的吸波硅橡胶中大多填充磁性非导电的铁氧体、羰基铁、磁性合金粉体或介电型粉体, 表 2 是 Emerson & Cuming 公司部分产品的性能对比, 图 2 是其 FGM-125 的反射特性曲线。

表 2 Emerson & Cuming 公司 ECCOSORB(r) 吸波硅橡胶的性能及特点

项 目	产品系列		
	SF	DSF	FGM-125
填料类型	磁共振型	介电型	磁性填料
吸波频率/GHz	1~18	3~17(窄频段)	2~12
反射率/dB	特定窄波段 ≤-20	特定窄波段 ≤-20	宽频段平 均值为-12
使用温度/°C	-54~163	-54~165	~218

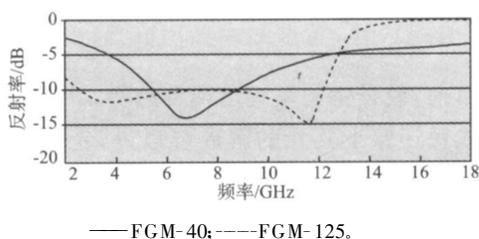


图 2 ECCOSORB(r) FGM-125 的反射特性曲线

国内吸波硅橡胶的研究少有报道, 以往的研究主要集中在其他吸波橡胶上。方鯤等把掺杂聚苯胺与三元乙丙橡胶(EPDM)进行熔融混炼, 经热压制成不同厚度的 PAN-DBSA/EPDM 吸波胶片, 在 X 频段呈现宽吸波效应。何燕飞等采用自制的磁性合金粉、石墨与氢化丁腈橡胶混合制备了在 X 波段反射率小于 -8 dB 的柔性吸波材料。冯永宝等研究了羰基铁粉用量对 EPDM 吸波复合材料力学和电磁性能的影响, 获得了在 8~18 GHz 频段反射率小于 -8 dB 的单层吸波橡胶片。在吸波硅橡胶的产业化方面, 大连东信微波吸收材料有限公司、深圳市吸波王防辐射科技有限公司等实现了吸波硅橡胶的量产, 但在产品种类、吸波频宽、吸波强度等方面与 Emerson & Cuming 公司还存在不小差距。

#### 4 结语

综上所述,国外已形成了包括高导电硅橡胶、吸波硅橡胶在内的完整的电磁屏蔽硅橡胶复合材料产业,而我国在该领域的基础研究和应用研究的起步较晚,与国外差距很大。为减少电磁辐射所造成的电磁干扰、电磁信息泄密和电磁环境污染,我国迫切需要进行自主研究和开发电磁屏蔽

硅橡胶复合材料,尽快形成屏蔽材料产业。重视和加强电磁屏蔽硅橡胶复合材料的应用基础研究,是我国国民经济可持续发展战略中材料领域的一个重要课题,它将为发展我国屏蔽材料产业,乃至电磁环境污染的综合治理提供科学基础。

参考文献:略

## 我国胶鞋行业要通过创新 谋求生存和发展

以劳动密集型为主的我国传统胶鞋制造业,面对世界金融危机等诸多不利因素,如何走出困境?

从胶鞋的发展方向和变化规律来看,我国低档胶鞋市场前几年是发展的,8亿农民的广大农村市场为胶鞋提供了广阔的发展空间,但是,随着人们生活水平的提高,低档胶鞋的市场占有率和覆盖面在逐年萎缩,发展趋势逐步同国际接轨。

目前,胶鞋销售呈现出两种趋势,一是除了极少数农民还穿十几元的解放鞋以外,走批发市场为主的低档劳动鞋主要消费群体是城市务工人员,价位在30~40元;二是以时尚、休闲、个性化为主的高档胶鞋产品,他们的主要消费群体是前卫、时尚、有个性的青少年。

从胶鞋的需求数量来讲,我国低档胶鞋市场逐步萎缩,总体销量逐步减少。从供求关系上讲,中国是个发展中国家,虽然农村人口众多,但随着农村人口逐步向城市转移,人们生活水平和审美观念的逐步提高,低档胶鞋市场的销量逐步减少,这是符合发展中国家的变化趋势的。

从鞋的产品变化来讲,旅游鞋、皮鞋、胶鞋、布鞋、体育专业鞋、注射鞋“六鞋渗透”已经改变了产品结构 and 市场导向,胶鞋的市场逐步被旅游鞋、休闲皮鞋、注射鞋所代替,过去中小学男生穿足球鞋、女生穿体操鞋,讲究的是结实、便宜;现在他们追求的是高档、时尚,这些人的市场几乎也被旅游鞋、休闲皮鞋、注射鞋所垄断。胶鞋产品需要不断更新换代、不断变化,这是人们生活水平提高的一

种表现,是人们对美的一种追求。

从胶鞋的销售渠道来讲,随着渠道的多元化和人们消费场所的改变,胶鞋以批发市场为主的销售渠道逐步转向以超市、商场、连锁店为主,城市中等消费群体已经把超市、商场、连锁店作为主要的消费场所。超市、商场、连锁店是最有发展前途的市场,是卖量最大的市场,是高利润的市场。

正是由于市场需求、销售渠道、产品价位、消费群体等发生变化,带来了胶鞋市场的整体萎缩滑坡,因此,我国胶鞋生产企业要打破老思维、老方法、老工艺、老路子,不断适应市场需求,求得生存和发展,卖杂牌,走低档次、低价位、低形象的路线是成不了品牌的,是没有希望的,必须转变思维观念、经营思路、经营方法,按品牌的规律去发展才能成功。

胶鞋要继续发展,产品要做出品位,传统产品的工艺要提高档次。虽然胶鞋的市场在逐年萎缩,但是胶鞋的市场还是有的,胶鞋传统产品要进一步提高档次,要注重调整产品结构,逐步与高档旅游鞋并轨,要改变帮面、大底材料来提高档次;在楦型选择上要转向以休闲运动、舒服的楦型为主,使胶鞋传统产品上水平、上档次。

胶鞋传统的设备、操作法要及时改变。如果沿用传统的老设备、老操作法,是做不出高品位的鞋。因此,高品位的鞋必须有高性能的设备、高标准的操作法和高标准工艺、高档次的设计来保证。

胶鞋设计人员要转变思维,提高水平。设计人员要调整设计思路,提高设计水平,要研究产品的消费群体,必须站在消费者的角度来认识和研究消费者心理变化,把握“休闲、时尚、个性”这个主流;要研究新型材料的应用;要研究鞋的卖点,从款式、花色和种类上不断创新,做到设计协调、