



电磁屏蔽材料及其测试技术研究

史有强 吴昕昱 张 何山 贾汶锦 刘伟峰

Research of Electromagnetic Interference Shielding Materials and Test Techniques

SHI You-qiang, WU Xin-yu, ZHANG Yi, HE Shan, JIA Wen-jin, LIU Wei-feng

引用本文:

史有强, 吴昕昱, 张, 等. 电磁屏蔽材料及其测试技术研究[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(6): 426-434. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6214.2021.06.012

SHI You-qiang, WU Xin-yu, ZHANG Yi, et al. Research of Electromagnetic Interference Shielding Materials and Test Techniques[J]. Failure analysis and prevention, 2021, 16(6): 426-434. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6214.2021.06.012

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6214.2021.06.012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[C_f/SiC复合材料的氧化及抗氧化技术研究进展](#)

Research Progress of Oxidation and Oxidation Resistance of C_f/SiC Composites

失效分析与预防. 2018, 13(1): 54 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6214.2018.01.010>

[我国轨道交通齿轮材料及热处理技术的发展现状与趋势](#)

Present Situation and Development of Gear Materials and Their Heat Treatment Technology for Rail Transport in China

失效分析与预防. 2021, 16(5): 339 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6214.2021.05.009>

[纳米压痕技术在工程材料研究中的应用](#)

Application of Nano-indentation in Engineer Materials Research

失效分析与预防. 2018, 13(4): 255 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6214.2018.04.012>

[航空材料组织与残余应力评价对中子散射与同步辐射技术的需求](#)

Requirements of Microstructure and Residual Stress Evaluation of Aeronautical Materials for Neutron Scattering and Synchrotron Radiation Techniques

失效分析与预防. 2019, 14(2): 133 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6214.2019.02.013>

[航空金属材料仿真加速腐蚀试验环境谱编制方法研究](#)

Preparation of Environmental Spectrum of Accelerated Corrosion Test for Aeronautical Metal Materials

失效分析与预防. 2019, 14(6): 357 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6214.2019.06.001>

[SiC_f/SiC复合材料原位分析研究进展](#)

Research Progress of In-situ Analysis of SiC_f/SiC Composites

失效分析与预防. 2019, 14(5): 350 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6214.2019.05.013>

电磁屏蔽材料及其测试技术研究

史有强, 吴昕昱, 张 映, 何 山, 贾汶锦, 刘伟峰

(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

[摘 要] 随着电磁污染及电磁波泄漏的日益严重, 以电磁干扰(EMI)屏蔽材料为代表的电磁防护材料已经广泛应用在军用、民用电子设备中。目前, 利用本征电磁性能制备的金属型 EMI 屏蔽材料, 将高导电层与绝缘基体相结合的涂覆型 EMI 屏蔽材料, 以及具有优良柔性的 EMI 屏蔽织物已经能够大批量生产。具有柔性、透明、可变形的新型 EMI 屏蔽材料日益增多, 满足市场对材料多功能性、极端环境适用性、加工装配便捷性的新需求。EMI 屏蔽测试技术在现有近场、远场测试技术基础上也呈现多元化、精细化的发展趋势。

[关键词] 电磁屏蔽; 复合材料; 屏蔽机理; 电磁屏蔽测试技术

[中图分类号] TB34

[文献标志码] A

doi: 10.3969/j.issn.1673-6214.2021.06.012

[文章编号] 1673-6214(2021)06-0426-09

Research of Electromagnetic Interference Shielding Materials and Test Techniques

SHI You-qiang, WU Xin-yu, ZHANG Yi, HE Shan, JIA Wen-jin, LIU Wei-feng

(AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: With the severe electromagnetic pollution and microwave leakage, electromagnetic interference (EMI) shielding materials as a representative role of electromagnetic protection materials have been widely used in military and civilian electronic equipment. At present, metallic EMI shielding materials benefiting from their intrinsic electromagnetic properties, coated EMI shielding materials combining a highly conductive layer with an insulating substrate and EMI shielding fabrics with excellent flexibility have been able to be mass-produced. More and more new EMI shielding materials that are flexible, transparent, and deformable are invented to meet the new requirements of the shielding market for versatility, environmental applicability, and ease of processing and assembly. EMI shielding test technology also presents a diversified and refined development trend based on existing near-field and far-field test technologies.

Key words: electromagnetic interference shielding; composite materials; shielding mechanism; test technology of EMI

0 引言

计算机技术的飞速发展促进了各类电子产品技术的迭代提升。利用电磁波作为长距离信号传输的主要载体, 其合理使用给人们生产生活提供了巨大方便, 但同时也不可避免地会产生电磁辐射问题。强烈的电磁辐射不但影响精密电子器件的正常工作, 而且还会影响人们的身体健康。尤其是通过使用高强度电磁波所制造的电磁脉冲武器, 将新型电子对抗技术运用于现代的高技术作战中, 可以进行精确攻击电力设备、电子远程检测

系统和信息通讯装置, 从而使武器及电子设备陷入瘫痪状态, 严重威胁国家安全和民众生命。

电磁屏蔽材料作为电磁防护材料的重要成员, 可以有效降低雷达散射截面、抑制电磁波的辐射、干扰, 改善电磁环境, 提高武器装备的战场生存能力, 已经应用于军用飞机、民用客机和直升飞机的雷达舱、电子仪器舱、驾驶舱、工作舱、休息舱等部位。高性能电磁屏蔽材料有利于解决电磁波引起的电磁干扰问题, 应对电磁脉冲武器打击, 提升通讯网络、信息传输、武器装备等的安全性, 对国家安全、社会生活以及经济发展具有重大意义。因此, 世界各国研究人员投入大量精力研发

[收稿日期] 2021 年 9 月 11 日 [修订日期] 2021 年 11 月 12 日

[基金项目] 中国航发自主创新资金项目(CXPT-2018-37)

[作者简介] 史有强(1986 年-), 男, 高级工程师, 主要从事吸波材料的制备等方面的研究。

高性能的电磁屏蔽材料。

1 电磁屏蔽材料研究现状

在交变电磁场中, 电场与磁场相互依存, 控制其中之一往往可以实现对电磁能的有效控制。因此, 具有优异电导率与磁导率的材料适宜用作电磁屏蔽材料。下面详细介绍各种类型的电磁屏蔽材料。

1.1 金属型电磁屏蔽材料

金属型电磁屏蔽材料主要有高电导率金属和高磁导率金属, 两种金属在高频和低频电磁场中的使用有所侧重。高电导率金属具有丰富的自由电子, 在高频电磁场的作用下, 自由电子沿一定方向运动形成感应电流, 形成与原有磁场方向相反的磁场, 抵消原有磁场的变化, 实现电磁场的屏蔽。对于小于 100 kHz 的低频电磁场, 需要远高于空气磁导率的铁磁性材料, 使磁力线向低磁阻方向移动, 集中在磁性材料内部, 实现磁屏蔽。除本征电磁属性外, 还需要考虑材料内部结构对电磁波的作用。Huang 等^[1]利用泡沫材料内部孔洞结构复杂的特点, 制备了 Fe-Ni 开孔泡沫, 在 0.03~1500 MHz 频段内, 电磁屏蔽性能最高可以达到 85 dB。这种金属泡沫一方面将更多电磁波引入材料内部, 另一方面, 电磁波在材料内部孔洞中发生多次反射和吸收, 大大增强材料的损耗能力。发现屏蔽效能 (Shielding effectiveness, SE) 随开孔尺寸和孔隙率的减小而显著提高, 证实材料内部结构影响电磁屏蔽性能。

1.2 涂覆型电磁屏蔽材料

涂覆型电磁屏蔽材料具有屏蔽效果好、成本低廉、施工便捷等优点, 可以涂覆在各类复杂基底的表面赋予其电磁屏蔽性能, 是一种应用领域广阔的 EMI 材料。主要可以分为电磁屏蔽涂料、金属敷层材料和电磁屏蔽织物。

1) 电磁屏蔽涂料。电磁屏蔽涂料作为一种特种涂料, 主要有本征型涂料和掺混型涂料两种类型。

本征型涂料是利用高导电聚合物, 如聚苯胺 (PAN)、聚吡咯 (PPY)、聚乙炔 (PA)、聚(3,4-二氧乙基噻吩) (PEDOT) 等^[2]。这种材料具有密度低、电阻调节灵活的优点, 但是需要通过电化学、酸处理、热处理等方法提高聚合物的导电性, 制备过程需要严格控制催化剂、掺杂剂的比例, 容易出现电导率不稳定等问题, 限制了涂料的大批量制备。

与本征型导电涂料相比, 掺混型导电涂料应用较为广泛。掺混型导电涂料是将高导电填料掺入绝缘基体和黏合剂中, 从而获得良好的导电性。其中, 高导电填料通常为金属银粉、金属铜粉、炭黑、石墨烯、碳纳米管以及磁性金属铁粉、镍粉等。金属银粉导电涂料成本较高往往应用在高精尖仪器设备中。金属铜粉导电涂料导电性与成本较为合理, 但需要考虑其易氧化的问题。金属镍粉涂料化学性质稳定、导电性良好、价格合理, 目前应用较为广泛。碳系电磁屏蔽涂料密度小、耐化学腐蚀, 但导电性能略差于金属涂料。

2) 金属敷层材料。金属敷层屏蔽材料是将薄层导电金属层沉积在绝缘体或导体基底表面, 赋予或提高基底导电性, 从而实现电磁屏蔽。金属敷层屏蔽材料常见的制备方法有化学电镀、真空镀膜、磁控溅射、金属箔铺贴、金属熔射^[2]。通过各类物理化学方法制备的金属敷层具有厚度均匀、导电性能优异的特点, 使这种类型的电磁屏蔽材料具有优异的屏蔽效能, 但是镀层金属易从基底表面剥离。在实际应用中, 需要对基底表面处理, 提高两者的结合力。董艳晖等^[3]研究了金属化碳纤维纸的电磁屏蔽性能, 通过化学方法在碳纤维表面沉积金属镍层, 然后制备电磁屏蔽纸, 在 100~1200 MHz 频率范围屏蔽效能接近 50 dB。

3) 电磁屏蔽织物。电磁屏蔽织物具有高导电、低密度、加工便利的优势, 同时具备传统织物柔软、耐弯曲、可折叠的特点, 越来越多的研究关注于这类产品^[4]。电磁屏蔽织物通常由金属纤维与纺织用纤维混编而成, 或者在织物表面沉积金属镀层^[5]。以日本大和、东丽公司、美国的 Matasolg 公司、德国的 Baymetex 公司、荷兰的 Devex 公司为代表的导电织物生产商, 在 20 世纪 80 年代就实现导电织物的工业化生产。以低温等离子处理, 连续表面沉积制备的离子织物是目前最先进的电磁屏蔽织物。碳纤维具有导电性好、比强度高、质量轻等优势可以作为良好的屏蔽材料。碳纤维表面进一步包覆金属、SiC、石墨烯等, 可优化其屏蔽效能。据报道, 德国巴斯夫公司制备的具有 SiC 镀层的碳纤维电磁屏蔽效能在兆赫兹波段为 48 dB。上述这些纤维织物均具有优异的导电性和电磁屏蔽能力, 但是还存在怕揉搓、拉伸、洗涤等问题, 需要进一步研究解决。

1.3 复合型电磁屏蔽材料

复合型屏蔽材料是一种较为成熟的电磁屏蔽

材料,在国外已经能够批量化生产。这类屏蔽材料通常由高性能树脂、功能性填料和添加剂组成,均匀混合后通过挤出或注射成型工艺制备各类电磁屏蔽材料。功能性填料主要为导电粉末和导电纤维两类。

导电粉末具有质量轻、价位合理、吸收频率范围宽等优点。常用的超细粉末有 Fe、Ni、Co、炭黑等,尺寸一般为微米级或微米级以下。熊政专等^[6]等制备了纳米炭黑/ABS 树脂电磁屏蔽复合材料,随着炭黑添加量的增大,材料电导率提高,复合材料的电磁屏蔽能力明显改善。何和智等^[7]制备了铁粉/聚丙烯复合材料,研究发现铁粉粒度影响 EMI 的 SE,铁粉细度越高,复合材料的 SE 增大。

导电纤维分为金属纤维和非金属纤维。金属纤维的导电性好、屏蔽效能高、机械性能佳,但是价格较昂贵。添加了 10%(质量分数,下同)黄铜纤维的聚丙烯复合材料,EMI 的 SE 可达 60 dB。非金属纤维多为碳纤维,不仅能够提升树脂基体电性能还可以实现力学性能的同时提升。陈晓燕等^[8]在丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)复合材料中加入 2% 的碳纤维实现在 200~1800 MHz 频率范围 SE 达到 10 dB。

2 国外电磁屏蔽材料发展趋势

众所周知,传统金属材料如 Cu、Ag、Au 和 Pt 金属等,以其优异的导电性能可以用于电磁屏蔽。然而,随着电子设备的更新换代,这些金属材料不能满足应用需求。例如,Cu 制屏蔽体在储存或使用过程中会氧化,Ag、Au 或 Pt 耐候性好但成本过高^[9]。此外,新型电磁屏蔽材料还需要具有柔韧性、耐磨性、高温适用性、恶劣环境耐久性等。因此,业内长期以来一直在寻求更低的生产材料成本以及更大生产能力的电磁屏蔽材料制备方法。

国外电磁屏蔽材料针对不同应用领域,开发柔性多层电磁屏蔽薄膜、透明电磁屏蔽薄膜、热变形电磁屏蔽复合材料、适形电磁屏蔽材料等,这些电磁屏蔽材料能够一定程度上满足电子设备小型化、柔性化、多功能化的发展需求。

2.1 柔性电磁屏蔽薄膜

美国 3M 公司发明了高射频磁导率的多层电磁干扰屏蔽薄膜^[10]。与传统铁氧体相比,这种薄膜使用软磁合金,例如 NiFe、CoNbZr、FeCoB、

Fe 纳米晶基氧化物和氮化物的合金,以及硼基非晶合金,可在更高频率下获得更高的磁导率。通过软磁合金与丙烯酸酯类聚合物间隔层的多层铺排(图 1),可获得柔性屏蔽材料。柔性多层电磁干扰屏蔽,间隔层优选是介电层或非导电材料,以抑制涡电流效应。间隔层可以由具有相对较低磁导率的铁磁材料制成。此外,通过使用蒸汽冷凝的丙烯酸间隔层,屏蔽材料可以以连续的卷对卷方式制造。该发明中的柔性多层电磁屏蔽薄膜,可以在很宽的频率范围内屏蔽或/和抑制射频能量。通过调节间隔材料与铁磁材料的种类、层数和厚度,可以实现 1~6 MHz 范围内高频电磁干扰控制。这种材料能够解决电子设备和高频电子电路的小型化、柔性化的发展需求,还可以抑制源自设备和电路或源自环境的电磁干扰的降级效应。



图 1 高射频磁导率的多层电磁干扰屏蔽薄膜^[10]

Fig.1 Multilayer EMI shielding thin film with high RF permeability^[10]

2.2 透明电磁屏蔽薄膜

在美国 3M 公司的专利中,报道了由导电聚合物涂层与透明电介质层组成的超薄透明电磁干扰薄膜^[11]。这一发明专利解决了目前 EMI 屏蔽滤波材料中金属氧化物沉积速率极为缓慢的问题,提供了一种新型光学显示器用滤光材料。材料包括透明聚合物基板和与基板相邻功能性多层结构(图 2)。多层结构由具有第一表面和第二表面的导电层组成:第一表面接触的成核层和与第二表面接触的阻挡层,以及与该结构相邻的透明介电层。所提供的滤光材料具有抗反射层,内置于其中的组件可以增加可见光的透射。当滤波材料放置或包含于显示面板、触摸面板、电子设备中时,该滤波材料还可提高 EMI 屏蔽功能,突出优点为

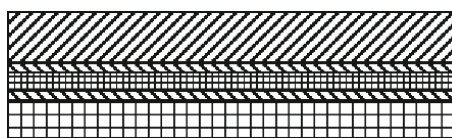


图 2 具有透明电介质层的超薄透明电磁干扰屏蔽膜^[11]

Fig.2 Ultrathin transparent EMI shielding film comprising transparent dielectric layer^[11]

轻质、成本低。所述薄膜可容易地应用于电子显示装置, 平均有效 EMI 屏蔽薄层电阻小于 $300 \Omega/\text{m}^2$ 。相应滤波材料可用于多种电子设备, 尤其可用于液晶显示面板和触摸屏面板。

在超薄透明电磁干扰屏蔽薄膜基础上, 采用蒸汽涂覆方法将氧化锌、氧化铟多晶种子直接沉积在透明介电层表面, 接着涂覆金属或其合金导电层, 获得具有一定耐腐蚀性的具有 EMI 屏蔽功能的滤光器(图 3)^[12]。这一改良的方法保持了小于 8% 的平均光化辐射, 超过 80% 的平均透射率。同时, 超薄透明 EMI 屏蔽薄膜的导电性能明显提升, 平均电阻低于 $100 \Omega/\text{m}^2$ 。

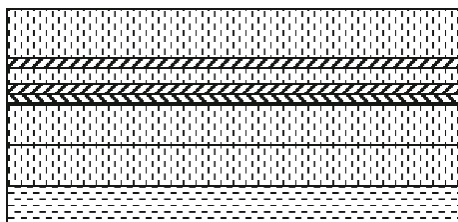


图 3 具有屏蔽功能的滤光器^[12]

Fig.3 Optical filter with EMI shielding performance^[12]

2.3 适形电磁屏蔽材料

传统的金属屏蔽外壳具有优异的屏蔽性能, 但是面临价格昂贵、密度大并且难以制造复杂异形件的问题。模塑塑料外壳的内部可以通过真空金属化涂覆薄金属膜获得屏蔽效能, 但是该过程产生的屏蔽层通常较脆, 柔性较差。为了解决上述问题, 美国帕克·汉尼芬公司利用非导电热塑性弹性体^[13], 如硅氧烷, 氨基甲酸酯或柔性环氧树脂, 与导电填料如镀镍碳粉、碳粉、银粉、铜粉、银/铜粉、银/铝粉、镀银玻璃球和镍粉等均匀混合制备导电纤维。然后, 连续纤维表面涂覆金属获得更优异的导电性。这种纤维可以直接挤出造粒并注塑成型, 直接制造 EMI 屏蔽垫圈和电子元器件外壳, 具有优异的电气和机械性能。基于该思路, 一种用于屏蔽电子设备的电路免受电磁干扰(EMI)的镍-铝填料组件也被发明出来(图 4)^[14]。与传统的银基、镍或镍-石墨填充材料相比, 在相当的体积负荷水平下, 用于该组件的镍-铝填料材料表现出相当或改进的 EMI 屏蔽效果和耐腐蚀性, 既具有成本效益又具有抗腐蚀耐用性。

2.4 热变形电磁屏蔽复合材料

为了解决有源设备的电线、电缆、软线或其他细长导体的电磁干扰, 美国帕克·汉尼芬公司报道了一种可热变形的 EMI 屏蔽套, 可套在给定外

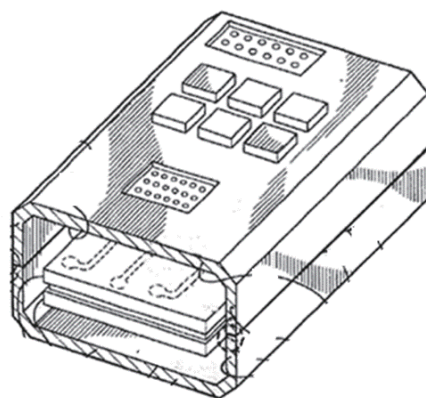


图 4 电子设备电磁屏蔽护套^[14]

Fig.4 EMI shields for electronic devices^[14]

径范围内的一般细长物体上^[15]。护套由管状外部构件组成, 该管状外部构件具有不定长度和扩展内径, 该内径大于物体的外径, 导体内部构件在外部构件内并与同轴且可共同延伸, 两者间通常是连续的热塑性中间层并可与两者共同延伸(图 5)。中间层大致沿着制件长度将内部构件粘合到外部构件内, 以将两者固结成整体结构。外部构件又可热变形回收, 即内径可收缩, 该内径小于扩展内径, 以使夹套基本上与物体的外径范围相符。这种柔韧且简便的屏蔽材料具有衰减 EMI 的效应, 同时屏蔽套将 EMI 能量限制在源设备中, 实现与其他有源设备的隔离。对于热变形电磁屏蔽材料, 美国 Laird 公司也发明相关专利, 他们将热收缩聚乙烯与 EMI 层复合, 获得纵向收缩横向不收缩的电磁屏蔽复合材料^[16]。将 EMI 屏蔽层与被保护物体相邻, 对可热收缩外层加热, 复合材料便缠绕物体周围, 实现电磁屏蔽。

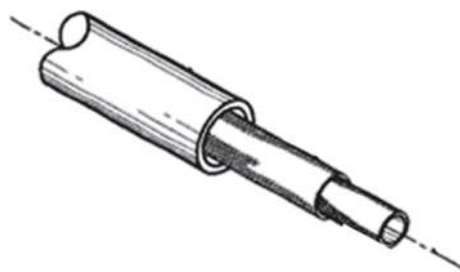


图 5 用于电磁干扰屏蔽的热缩护套^[15]

Fig.5 Heat-shrinkable jacket for EMI shielding^[15]

2.5 多功能电磁屏蔽复合材料

为了提高极端环境下的适用性, 美国艾奇逊工业公司发明了一种含有银颗粒和特殊附加颜料组分的导电涂料组合物。这种涂料组合物具有耐高温、耐温变、柔韧等优点, 并且可以直接涂覆于

塑料薄膜基体上获得屏蔽性能。进一步将细碎的银颗粒与特殊耐火铁合金共混,可克服许多现有技术的缺陷,沉积膜的导电性接近纯银涂料组合,并且暴露于热、湿或其它恶劣的环境条件下涂料也能保持高导电性^[17]。磁性金属 Ni 纳米颗粒与特殊耐火铁合金共混后,也可以作为良好的屏蔽涂料^[18]。并且长期暴露在 $\geq 200\text{ }^{\circ}\text{F}$ 的高温或明显温变过程 ($160\text{ }^{\circ}\text{F}/30\text{ min}$; 室温/ 5 min ; $-40\text{ }^{\circ}\text{F}/30\text{ min}$; 室温/ 5 min) 后,依然保持良好的导电性能,是一种耐候性优异的电磁屏蔽涂料。

电子设备使用过程中不可避免地产生热辐射,为了使电子设备维持正常使用温度,亟需兼具导热性能的电磁屏蔽材料。美国 Laird 公司将具有优异导热性能的相变材料与电磁吸收材料相结合制备出应用在集成电路与散热器间的兼有导热与电磁屏蔽性能的复合材料^[19]。复合材料基体相对介电常数小于 4,损耗角正切小于 0.1,可使电磁波透过基质。导热和电磁吸收材料可选用球形、粉末、纤维、薄片或其各类颗粒组合体,均匀分散在基体中(图 6)。这种导热电磁屏蔽复合材料有助于从设备传递热能,并且减少设备产生的电磁辐射。

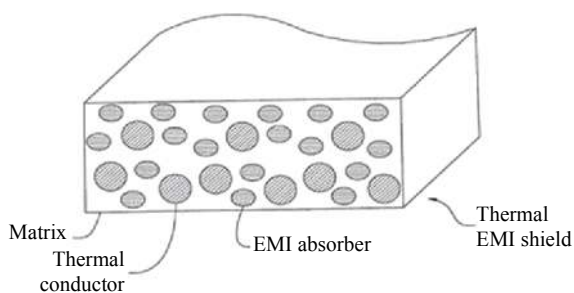


图 6 导热电磁屏蔽复合材料^[19]

Fig.6 Electromagnetic shielding composite materials with thermal conductive property^[19]

考虑涂覆屏蔽材料的环保需求,美国艾奇逊工业公司制备出适用于在聚酯或聚碳酸酯膜上印刷和固化的水基导电聚合物厚膜制剂。这种水基导电墨水由水溶性热塑性聚合物、分散剂、乙二醇干燥-缓凝剂以及导电填料组成。导电填料为银薄片、碳粉、石墨粉及其混合物。解决水基油墨流变性、粘合性和柔韧性差的问题^[20]。

3 电磁屏蔽测试技术

3.1 电磁屏蔽原理

电磁屏蔽即通过导电或导磁材料限制或阻断

电磁波的传播路径,抑制电磁辐射对敏感设备或生物体的伤害。当电磁波遇到电磁屏蔽材料,材料的表面和内部产生感应电荷、感应电流与各类极化作用,切断电磁场原有耦合途径,将电磁能转化为热能,实现电磁波的衰减或吸收^[8,21]。按照电磁屏蔽的原理,可以分为电场屏蔽、磁场屏蔽与电磁场屏蔽。在交变电磁场中,电场与磁场相互依存,需要考虑对两者同时屏蔽。屏蔽效能 SE 是定量表征电磁屏蔽材料削弱或衰减电磁能的物理量^[22],其定义为屏蔽前后电场强度或磁场强度的比值:

$$SE=20\lg(E_0/E_S) \text{ 或 } SH=20\lg(H_0/H_S)$$

其中: SE、SH 分别表示电场中屏蔽效能与磁场中屏蔽效能; E_0 、 E_S 分别表示屏蔽前与屏蔽后的电场强度; H_0 、 H_S 分别表示屏蔽前与屏蔽后的磁场强度。屏蔽效能的大小表征材料的电磁屏蔽性能(表 1)^[22]。

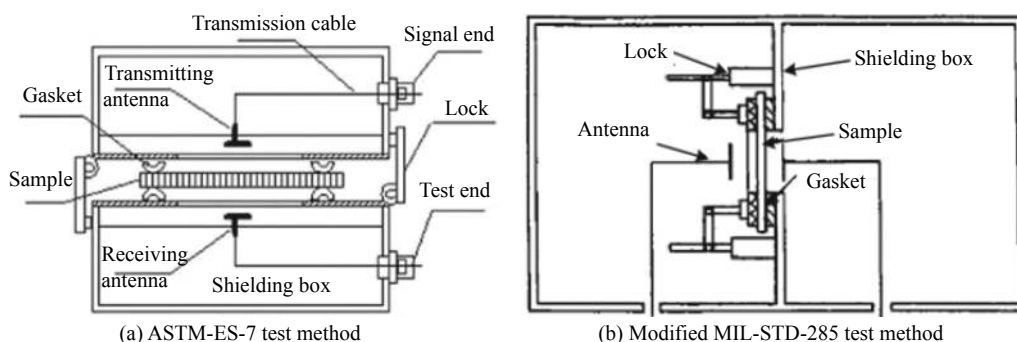
表 1 屏蔽效果的评价^[22]

EMI SE /dB	<10	10~30	30~60	60~90	>90
Performance of EMI shielding	Bad	Poor	Medium	Good	Excellent

电磁屏蔽材料对电磁波的衰减损耗可以分为反射损耗、传输或吸收损耗、多次反射损耗 3 个部分。反射损耗通常发生在屏蔽材料表面,由于良导体与自由空间的阻抗失配出现明显的电磁波反射;传输或吸收损耗通常发生在电磁波进入材料内部过程中,屏蔽材料与电磁波通过各类极化相互作用,产生传输损耗或吸收损耗;电磁波在材料内部继续传输,遇到屏蔽材料的不同界面,在界面间不断反射延长其传输路径,形成第三部分的多次反射损耗。因此,材料自身的电性能、磁性能、厚度、内部结构等以及电磁波的频率、场源属性等,均影响屏蔽效能。在研究电磁屏蔽材料时,需要综合考虑上述因素。

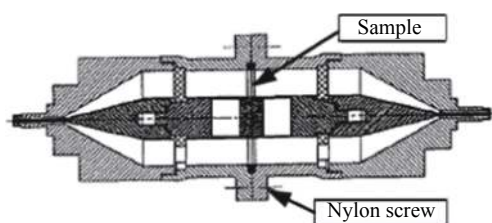
3.2 电磁屏蔽测试方法

根据测试距离与波长的相关关系,屏蔽效能测试方法可以分为近场法、远场法和屏蔽室法^[2,21-22]。在测试距离小于等于 $\lambda/2\pi$ 的近场环境,电磁屏蔽材料适于选用离子型与本征型屏蔽材料,利用电偶极子和磁偶极子近场屏蔽理论损耗电磁波。近场测试方法有 ASTM-ES-7 双盒法和改进的 MIL-STD-285 法(图 7)^[23]。近场双盒测试法主要由发射端、试样、接收端 3 部分组成,测试方法较为便捷,但是主模易受到测试产生的谐振频率干扰,测

图7 ASTM-ES-7 双盒测试法和改进的 MIL-STD-285 测试法结构示意图^[23]Fig.7 Schematics of ASTM-ES-7 test method and modified MIL-STD-285 test method^[23]

试结果重复性也易受弹性衬垫的影响。改进的 MIL-STD-285 法测试过程需要注意样品与垫片、屏蔽室开孔位置等密闭良好, 避免电磁能泄露造成测试误差。

在测试距离大于 $\lambda/2\pi$ 的远场环境, 主要采用同轴传输线和法兰同轴法进行测试(图8)。同轴传输线为双导体结构, 电磁波在内外导体间传输, 不受外界信号干扰。这种方法可以模拟电磁波在自由空间内远场传输的过程。法兰同轴法与同轴传输线法原理相似, 进一步改进了样品与同轴线的连接方式, 减小两者的接触电阻, 测试结果稳定, 重复效果好。

图8 法兰同轴腔结构示意图^[23]Fig.8 Schematic of flange coaxial cavity test method^[23]

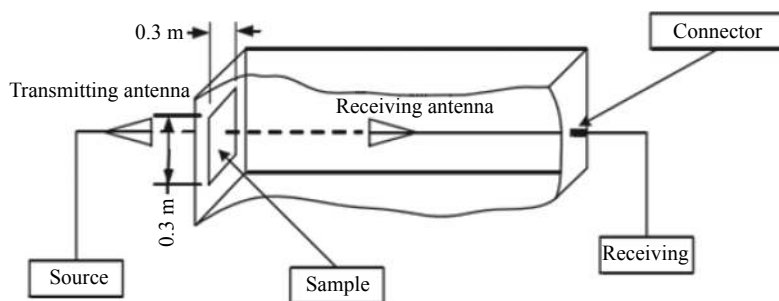
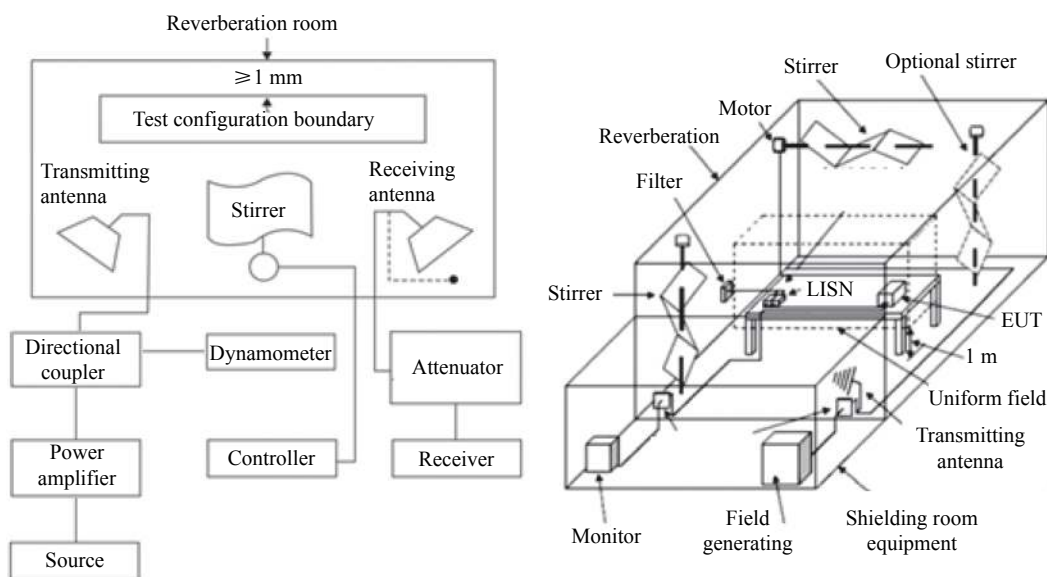
在实际工作环境中, 电磁波发射源多为近场源或介于近远场之间, 适合采用屏蔽室法进行测试(图9)。该方法通过测试有无电磁屏蔽材料时, 发射型号与接收信号场强和功率的差值来确定 SE。屏蔽室测试法提供的电磁信号更接近真实的电磁环境, 可以测试宽频率、多角度入射的电磁波, 对样品形状限制小, 适用范围较为广泛。但在测试过程中也要避免测试谐振对测试结果的影响^[23]。

近年来, 随着各类新型电磁材料的出现, 我国也开始针对具体应用开展电磁屏蔽材料测试技术的研究。中国电子科技集团光电研究院的吴一超^[24]为应对光电设备发展带来的复杂电磁环境,

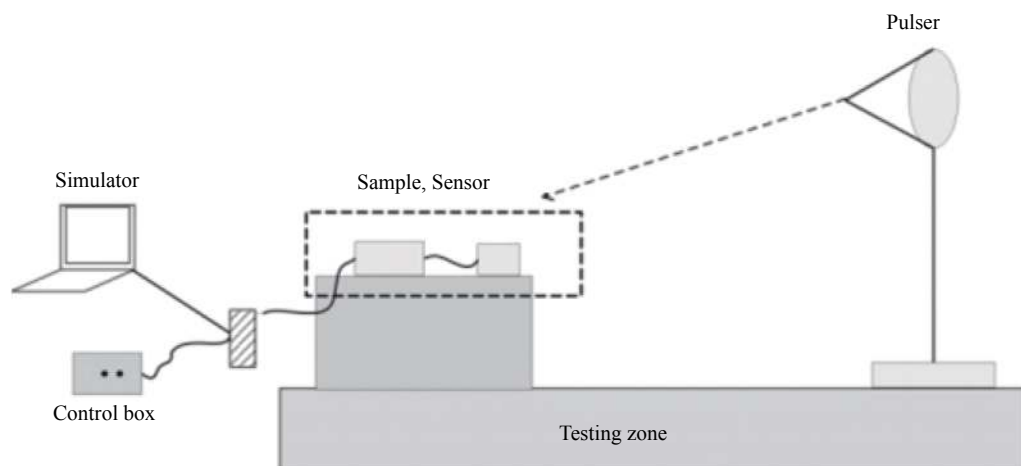
开展高强辐射场电磁效能测试技术研究。通过内场实验法与外场试验法相结合的方式, 验证屏蔽效能, 并引入合理的线性外推(图10)。这种方法已通过试验验证其有效性, 有利于验证光电设备在舰船等复杂环境中的电磁屏蔽效能。

针对军用车辆方舱、直升机机体等大型结构件屏蔽效能测试, 石广军等^[25]分别采用使用功放测试、测试设备布置、舱内设备位置安装式、舱内电缆束敷设等方法对直升机机体结构屏蔽效能进行测试。测试结果发现功放测试由于放大信号在狭窄空间形成的驻波、折射与反射, 测试结果存在较大误差。其他3种方法除个别频点出现小范围波动外, 整体数据结果相似。舱内设备不同安装方式或仅安装设备支架的测试结果基本一致, 线缆 L 型敷设方式屏蔽效能最佳。多种方法并行测试有利于剔除不确定点数据, 掌握机体结构全频段屏蔽效能。熊熠明等^[26]详细介绍了车辆方舱通讯接口窗屏蔽效能测试方法, 通过减小屏蔽窗缝隙、调节紧固螺钉间距、改进导电氧化涂覆层的工艺以及电缆单独屏蔽等手段, 保证屏蔽体的导电连续性, 从而获得稳定的电磁屏蔽效能。

在微电子领域, 吕磊等^[27]聚焦于晶圆级微波测试工艺。由于微波传输距离短, 空气中传播损耗大的特点, 常规测试方法难以测试微波器件。通过引入微波探针(图11), 可以测试封装前芯片的高频特性, 能够对微波器件进行定量分析, 测试频率、反射系数、功率、衰减、阻抗、介电常数等参数, 对提升芯片质量具有重大意义。陈超婵等^[28]分析了电磁屏蔽薄膜效能不确定性的来源, 基于新型法兰同轴测试装置分析评定薄膜屏蔽效能测试结果, 并建立屏蔽效能测量不确定度评定的数学模型, 对后续电磁屏蔽薄膜测试技术具有指导意义。

图 9 屏蔽室法结构示意图^[23]Fig.9 Schematic of shielding chamber test method^[23]

(a) Schematic diagram of infield test

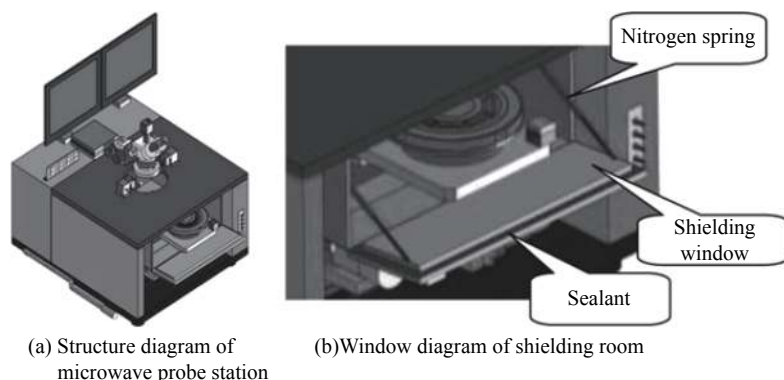


(b) Schematic diagram of outfield test

图 10 高强度辐射场的测试示意图^[24]Fig.10 Schematic diagram of high intensity radiation field test^[24]

为应对电磁辐射对人体的影响,电磁辐射防护织物及服装研究也日益丰富。肖红^[29]介绍了电磁辐射防护织物的设计原理,提出在保证穿着舒适度的前提下,尽量减少电场极化方向与服装的

垂直开缝,并且在服装接缝、开缝部位确保完整的电连接。电磁屏蔽织物多采用法兰同轴法和屏蔽室法进行测试。相较于法兰同轴法,屏蔽室法对织物材料、形状、厚度等具有较大的包容性,测试

图 11 微波探针台结构示意图和屏蔽室窗口示意图^[27]Fig.11 Structure diagram of microwave probe station and window diagram of shielding room^[27]

频段宽可以覆盖千赫兹到吉赫兹的高低频波段。在 10~40 GHz 频段, 正方形样品边长要大于 0.6 mm。对于屏蔽织物还需要考虑其维护保养周期, 洗涤前后屏蔽效能稳定性等问题。

4 总结与展望

从国外电磁屏蔽材料的发展趋势来看, 金属材料依旧活跃在电磁屏蔽领域, 但已从传统块状金属屏蔽盖/壳朝向轻量化与定制化电磁屏蔽材料方向发展, 金属颗粒作为导电组分添加在电磁屏蔽涂料中, 涂覆在车辆、飞机、舰船等的被屏蔽设备或器件表面。通过蒸汽涂覆、磁控溅射、化学气相沉积等方法制备导电透明薄膜, 应用在电子设备显示器、滤光器、特种玻璃等表面。金属材料与聚合物复合制备多功能电磁屏蔽材料, 适用于应对极端环境、复杂外型甚至智能材料的特殊屏蔽场景。相应的电磁屏蔽测试技术也呈现多元化、精细化发展趋势。在现有测试技术基础上, 通过优化测试组件、采用多方法测试、引进测试辅助设备等方法, 提高屏蔽效能的准确性与可信度, 为新型电磁屏蔽材料的研制与开发提供技术测试保障。

参 考 文 献

- [1] HUANG X L, WU G H, JIANG L T, et al. Electromagnetic shielding properties of open-pore Fe-Ni foams [J]. Rare metal materials and engineering, 2021, 39(4): 731-734.
- [2] 刘琳, 张东. 电磁屏蔽材料的研究进展 [J]. 功能材料, 2015, 46(3): 3016-3022.
- [3] 董艳晖, 张美云, 钟林新. 镀镍碳纤维屏蔽纸性能的研究 [J]. 中国造纸, 2009, 28(3): 15-19.
- [4] 吴昕昱, 张好斌. 聚合物基纳米复合材料结构与电磁屏蔽性能研究 [J]. 高分子学报, 2020, 51(6): 573-585.
- [5] 马飞祥, 丁晨, 凌忠文, 等. 导电织物制备方法及应用研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34(1): 01114-01125.
- [6] 熊政专, 段海平, 段玉平. 纳米炭粉、ABS 复合材料屏蔽效能的研究 [J]. 塑料工业, 2005, 33(7): 46-48.
- [7] 何和智, 刘玥彤, 姚衍东, 等. 铁粉/聚丙烯复合材料的电磁屏蔽性能 [J]. 塑料, 2011, 40(2): 12-15.
- [8] 陈晓燕, 董发勤, 杨玉山, 等. 炭黑/碳纤维/ABS 电磁屏蔽复合材料的制备及其性能研究 [J]. 功能材料, 2010, 41(4): 570-572.
- [9] 杜斌, 杨双合, 赵团, 等. 电磁辐射屏蔽材料的研究进展综述 [J]. 科技信息, 2010(26): 418-419.
- [10] LE J D, FITZER R C, BRUZZONE C L, et al. Multilayer EMI shielding thin film with high rf permeability: US, US20120236528 A1 [P]. 2012-09-20.
- [11] BRIGHT C I, LE J D, FITZER R C, et al. Ultrathin transparent EMI shielding film comprising a polymer basecoat and crosslinked polymer transparent dielectric layer: US, US8350451 [P]. 2013-01-08.
- [12] BRIGHT C I, FITZER R C, LE J D. Antireflective transparent EMI shielding optical filter: US, US20120127578 [P]. 2012-05-24.
- [13] PARKER HANNIFIN COMPANY. Composite polymeric material for EMI shielding: US, US7589284 B2 [P]. 2009-09-15.
- [14] PARKER HANNIFIN COMPANY. EMI shielding materials: EP2291446 [P]. 2009-12-30.
- [15] PARKER HANNIFIN COMPANY. Heat-shrinkable jacket for EMI shielding: US, US6005191 [P]. 1999-12-21.
- [16] COOK KELLY G, CREAMY JR LARRY D, LAIRD TECHNOLOGIES INCORPORATED COMPANY. EMI shielding heat shrinkable tapes: US, US8691393 [P]. 2014-04-08.
- [17] ACHESON INDUSTRIES INCORPORATED COMPANY. Silver coating composition for use in electronic applications: US, US4518524 [P]. 1985-05-21.
- [18] ACHESON INDUSTRIES INCORPORATED COMPANY. New nickel coating composition for shielding electronic equipment: US, US4517118 [P]. 1985-05-14.
- [19] LAIRD TECHNOLOGIES INCORPORATED COMPANY. Thermally conductive EMI shield: US, US7842381 [P]. 2010-11-30.

- [20] ACHESON INDUSTRIES INCORPORATED COMPANY. Water-based polymer thick film conductive ink: US,US5389403 [P]. 1995-02-14.
- [21] 赵敏,常伟. 电磁屏蔽室测试区屏蔽效能测试方法探讨 [J]. [电子质量](#),2021(5):119-124.
- [22] 宫永翔,曹自力,张志伟,等. 塑料表层电磁屏蔽材料制备方法研究进展 [J]. [科技创新与应用](#),2018(35):1-7.
- [23] 罗显云. 材料电磁屏蔽性能测试技术研究 [D]. 成都:电子科技大学,2018:2-3.
- [24] 吴一超. 高强辐射场电磁兼容设计及测试技术 [J]. [光电技术应用](#),2018,33(3):62-73.
- [25] 石广军,夏睿. 直升机复杂机体结构屏蔽性能测试方法研究 [J]. [安全与电磁兼容](#),2021(3):31-40.
- [26] 熊熠明,兰德福,耿海贤. 车辆方舱通讯接口窗电磁屏蔽效能设计与测试 [J]. [电子测试](#),2018(14):13-17.
- [27] 吕磊,胡晓霞,郑如意. 晶圆级微波测试工艺研究 [J]. [电子工业专用设备](#),2021(2):46-51.
- [28] 陈超婵,祝思婷,蔡青. 电磁屏蔽薄膜屏蔽效能的测量不确定度分析与评定 [J]. [科学技术创新](#),2020(29):35-36.
- [29] 肖红. 电磁辐射防护织物及服装的技术特点和标准分析 [J]. [纺织导报](#),2017(s1):87-93.

(上接第419页)

润滑,润滑油一旦溢出将会混入试验介质去离子水中。在液压强度试验后,将金属波纹管一端竖起,使金属波纹管内的去离子水从一端流出。在此过程中,混入水中的润滑油极易附着于管壁,经过后续烘干工序的高温环境就会形成黑斑。

根据以上分析,将液压强度试验台电泵与水箱分开放置,同时对水箱进行除油处理,选取内壁无黑斑缺陷的金属软管,按照工艺要求进行液压强度试验及后续工序后,采用内窥镜观察金属软管内壁,无黑斑出现。

根据以上分析,提出以下预防措施:

1)改进强度试验台,将水箱与电增压泵分开放置,去除电增压泵中油落入水中的隐患。

2)更改工艺流程,在液压强度试验与烘干工序之间增加氮气双向吹除^[12],促进管内液体排干净,同时在后续的气密试验完成之后的清洗过程中增加除油工序,确保在最终一道烘干前去除管内油性物质。

4 结论

1)金属软管产品波纹管内壁黑斑为润滑油。

2)润滑油是由液压强度试验台上的电增压泵中溢出落入试验台水箱,混入去离子水中的润滑油在液压强度试验结束后附着于波纹管内壁,在液压强度试验后的高温烘干环境中与空气作用后

产生了黑色斑迹。

3)在金属软管的生产过程中,应严格控制生产环境及设备的清洁,避免多余物的引入。

参 考 文 献

- [1] 韩淑洁,郭兆海,吴虹,等. 金属软管的非线性有限元分析 [J]. [机械](#),2004,31(7):38-41.
- [2] 颜婧,冯继军,张鑫明,等. 排气系统缠绕式金属软管断裂原因分析 [J]. [失效分析与预防](#),2017,12(1):43-47.
- [3] 盛冬平,朱如鹏,王心丰,等. 基于 ANSYS 的金属软管的静态有限元分析 [J]. [压力容器](#),2007,24(1):32-36.
- [4] 王得成,李勇,李洪宇,等. 航天产品增压输送系统多余物防控方法与应用 [J]. [现代制造技术与装备](#),2020(9):157-158.
- [5] 蒙益林,高帅,颜京,等. 高频燃烧-红外吸收法测定金属铅中碳含量研究 [J]. [失效分析与预防](#),2019,14(1):18-23.
- [6] 熊涛. 航天器总装多余物控制方法探讨 [J]. [航天器环境工程](#),2006,23(5):277-281.
- [7] 马玉环,朱亦峰,王杰. 航天产品多余物控制的几点思考 [J]. [东方企业文化](#),2015(5):188.
- [8] 赵畅畅,陈闽杰,丘晖饶. 合成润滑油基础油的红外光谱分析与特征峰辨识 [J]. [润滑与密封](#),2013,38(10):102-104.
- [9] 化岩,史永刚,任连岭,等. 红外光谱技术在润滑油分析中的应用 [J]. [合成润滑材料](#),2008(2):127-128.
- [10] 马兰芝,褚小立,田松柏,等. 润滑油红外光谱专家识别系统研究 [J]. [润滑与密封](#),2012,37(10):95-98.
- [11] 杜亚明. 利用付里叶红外光谱测定润滑油结构族组成 [J]. [当代化工](#),2002,31(3):176-179.
- [12] 邓维鑫,杨顺华,张弯洲,等. 高超声速流动的气体吹除控制方法研究 [J]. [推进技术](#),2017,38(4):759-763.