

# 宽频电磁屏蔽涂层材料仿真设计研究

王 喆<sup>1</sup>, 王月祥<sup>1,2</sup>, 张小刚<sup>1</sup>, 张存瑞<sup>1</sup>, 李 静<sup>1</sup>, 陈侯臣<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

<sup>2</sup>中国 - 白俄罗斯电磁环境效应“一带一路”联合实验室, 山西 太原

收稿日期: 2022年8月16日; 录用日期: 2022年9月9日; 发布日期: 2022年9月19日

## 摘 要

针对DC~18 GHz宽频电、磁屏蔽涂料, 应用CST仿真软件中电磁工作室、微波工作室模块进行屏蔽性能的仿真设计, 分别构建DC~10 kHz、100 kHz~50 MHz、1~18 GHz电、磁场屏蔽分析模型, 分析材料相对导磁率、导电率及厚度等参数对其屏蔽性能的影响规律。结果显示, 材料的屏蔽性能在DC~10 kHz磁场环境下, 与材料的导电率无影响关系, 由材料的相对导磁率、厚度决定, 且呈现准正比的上升趋势; 在100 kHz~50 MHz电磁场环境下, 由材料的导电率、相对导磁率和厚度决定, 且随导电率、相对导磁率、厚度的增加成上升趋势; 在1~18 GHz电磁环境下, 与材料的相对导磁率、厚度基本无影响关系, 由材料的导电率决定, 且随着电导率增加呈上升趋势。

## 关键词

宽频, 电磁屏蔽, 涂料, 仿真设计

# Simulation and Design of Wide Frequency Electromagnetic Shielding Coating

Zhe Wang<sup>1</sup>, Yuexiang Wang<sup>1,2</sup>, Xiaogang Zhang<sup>1</sup>, Cunrui Zhang<sup>1</sup>, Jing Li<sup>1</sup>, Yuchen Chen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NO. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

<sup>2</sup>China-Blarus Belt and Road Joint Laboratory on Electromagnetic Environment Effect, Taiyuan Shanxi

Received: Aug. 16<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 9<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 19<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

For DC-18GHz broadband electrical and magnetic shielding coatings, the electromagnetic studio and microwave studio modules in CST simulation software are used to simulate the shielding per-

formance. The electrical and magnetic shielding analysis models of DC~10 kHz, 100 kHz~50 MHz, 1~18 GHz are respectively constructed to analyze the influence laws of materials such as magnetic permeability, electrical conductivity and thickness on the shielding performance. The results show that the shielding performance of the material has no influence on the conductivity of the material in the magnetic field of DC~10 kHz, but is determined by the permeability and thickness of the material, and presents a quasi-proportional upward trend; The shielding performance of the material is determined by the conductivity, permeability and thickness of the material in the electromagnetic field of 100 kHz to 50 MHz, and it tends to rise with the increase of the conductivity, permeability and thickness; In the electromagnetic field from 1 GHz to 18 GHz, the shielding performance of the material is basically not influenced by the magnetic permeability and thickness of the material. It is determined by the conductivity, and tends to increase as the conductivity increases.

## Keywords

Wide Frequency Range, Electromagnetic Shielding, Coating, Simulation Design

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着 5G 通讯、新能源、高铁行业的快速发展,小型化、高功率类电子元器件实现了高度集成化应用,从而引起的电、磁辐射干扰及兼容问题愈发凸显,电、磁能量辐射引发的电子仪器设备电磁兼容性差,空间环境电磁污染严重等现象受到了广泛的关注[1] [2] [3]。在工程应用中,电、磁屏蔽涂层材料相对于金属材料具有易施工、重量小等优势,作为治理电磁污染最为简便和有效的方法得到了广泛的应用和发展[4] [5]。

传统电磁屏蔽涂层材料是以电场阻抗失配来实现电磁波反射,从而起到阻碍电磁波传输来实现电磁屏蔽的效果,材料设计时以提高导电率为首要目标,而对于磁场阻抗差较小的直流(DC~10 kHz)、低频(100 kHz~50 MHz)电、磁场屏蔽研究较少。因此,具有宽频(DC~18 GHz)、高屏蔽、轻质化等特征的新型电、磁屏蔽涂层材料的研制对于 5G 通讯、新一代高铁、新能源等终端设备的电磁防护及兼容设计具有重要的意义。

本文采用 CST 仿真软件中磁场工作室、微波工作室模块[6]分别构建了 3 种电、磁屏蔽效能仿真分析模型,研究涂层材料在 DC~18 GHz 频段范围内,其导电率、相对导磁率及厚度对新型宽频电磁屏蔽涂层材料屏蔽性能的影响,得到了设计指导原则,为新型宽频电磁屏蔽涂层材料的设计、应用提供了有效的理论支撑。

## 2. 分析模型

### 2.1. 屏蔽效能分析模型建立

1) 直流(DC~10 kHz)磁场屏蔽效能分析模型:依据 GB/T 30140-2013《磁性材料在直流/低频磁场中屏蔽效能的测量方法》建立模型。依据标准测试方法,采用 Helmholtz 线圈仿真测量模型,模型结构如图 1 所示:

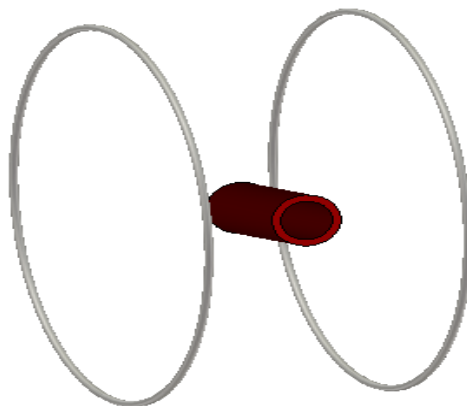


Figure 1. Structure of Helmholtz coil model

图 1. Helmholtz 线圈模型结构图

模型中心为管状涂层材料，其长径比为 5:1，材料进行参数化网格剖分并在试样中心部位设置场强测量点；在试样长度方向设置 2 个平行线圈，可进行 DC~10 kHz 电流输入设置。在场强测量点分别针对试样放入线圈前后的场强能量值，进行两次测量，再将测量结果按照电磁屏蔽理论公式计算出材料屏蔽效能[7]。

2) 低频(100 kHz~50 MHz)电、磁场屏蔽分析模型：依据 GJB 6190-2008《电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》建立模型。依据标准测试方法，采用小环天线仿真测量模型，其模型结构图如图 2 所示：

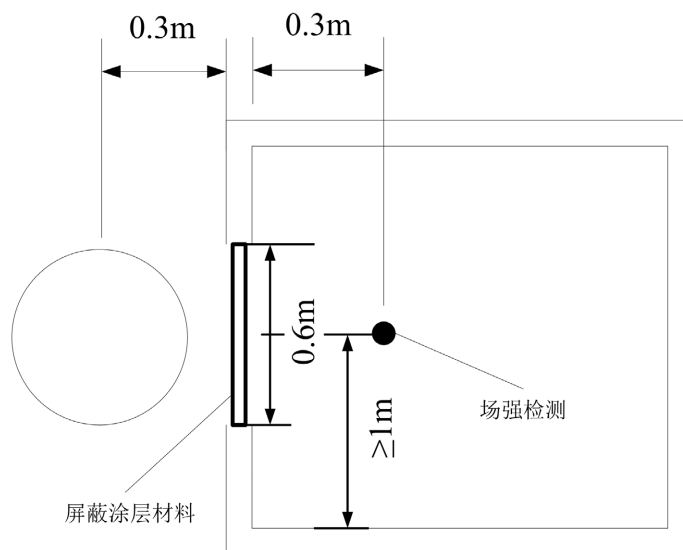
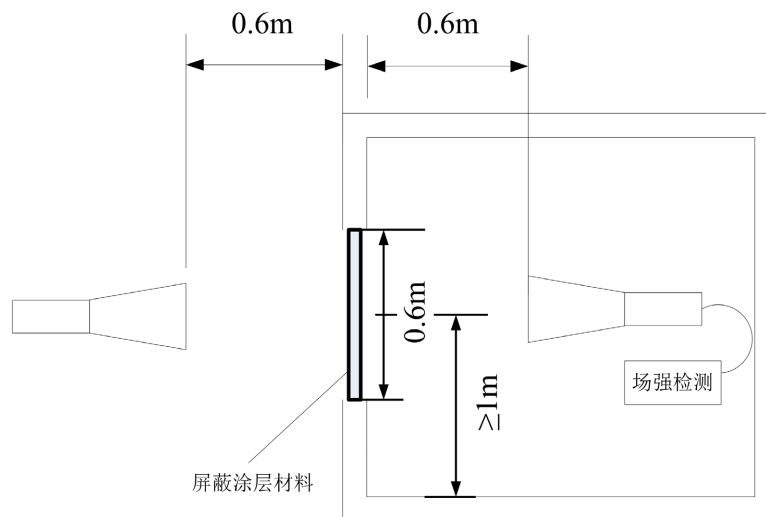


Figure 2. Structure of small loop antenna method model

图 2. 小环天线法模型结构图

屏蔽室窗口覆盖涂层材料，材料进行参数化网格剖分；屏蔽室外部设置发射环天线，内部设置接收环天线，2 个环天线采用同轴放置或水平(垂直)共面放置；发射环天线输入电流辐射低频磁场，在接收环天线测量点处分别测量覆盖涂层材料前后的场强能量值，再将测量结果按照电磁屏蔽理论公式计算出材料屏蔽效能。

3) 中、高频(1~18 GHz)电磁场屏蔽分析模型：依据 GJB 6190-2008《电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》建立模型。依据标准测试方法，采用双脊喇叭天线仿真测量模型，其模型结构图如图 3 所示：



**Figure 3.** Structure of horn antenna method model  
**图 3.** 喇叭天线法模型结构图

屏蔽室窗口覆盖涂层材料，材料进行参数化网格剖分；屏蔽室内、外部分别设置发射喇叭天线和接收喇叭天线，2 个喇叭天线呈水平相对放置；发射喇叭天线辐射中、高频电磁波，在接收喇叭天线处分别测量覆盖涂层材料前后的场强能量值，再将测量结果按照电磁屏蔽理论公式计算出材料屏蔽效能[8]。

## 2.2. 屏蔽效能仿真计算

1) 直流(DC~10 kHz)磁场环境下屏蔽仿真：设定测试标准中典型参考频率点 10 kHz 进行仿真，参数设置为：相对导磁率：25~500；导电率：2000~10,000 S/m；厚度：1~3 mm，仿真材料的屏蔽和影响关系。

2) 低频(100 kHz~50 MHz)电、磁场环境下屏蔽仿真：设定测试标准中典型参考频率点 200 KHz、2 MHz、20 MHz 进行仿真，参数设置为：相对导磁率：25~500；导电率：2000~10,000 S/m；厚度：1~3 mm，仿真材料的屏蔽和影响关系。

3) 中、高频(1~18 GHz)电磁场环境下屏蔽仿真：设定测试标准中典型参考频率点 2 GHz、6 GHz、18 GHz 进行仿真，参数设置为：相对导磁率：25~500；导电率：2000~10,000 S/m；厚度：1~3 mm，仿真材料的屏蔽和影响关系。

## 3. 仿真结果讨论

### 3.1. DC~10 kHz 直流磁场环境下，材料相对导磁率、导电率、厚度与屏蔽的关系

1) 10 kHz 磁场环境下，材料相对导磁率与屏蔽的影响关系

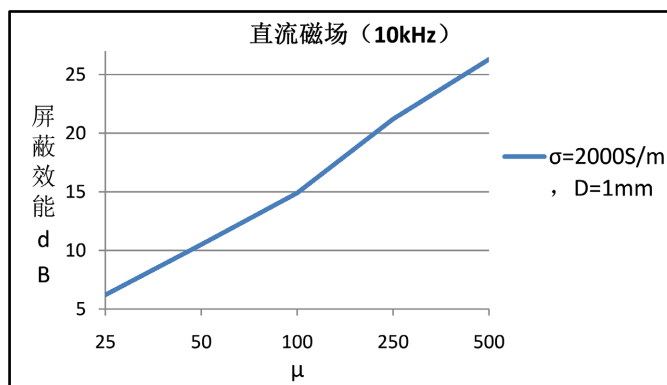
如图 4 所示，在 10kHz 磁场环境下，材料屏蔽随着相对导磁率的增大而升高，且与相对导磁率成准正比关系。

2) 10 kHz 磁场环境下，材料导电率与屏蔽的影响关系

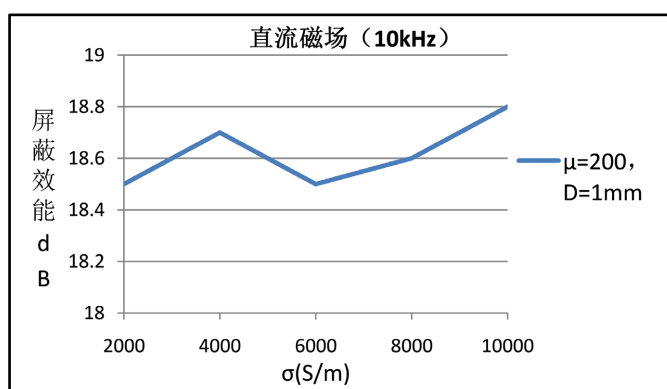
如图 5 所示，在 10 kHz 磁场环境下，材料屏蔽无变化，与导电率无影响关系。

3) 10 kHz 磁场环境下，材料厚度与屏蔽的影响关系

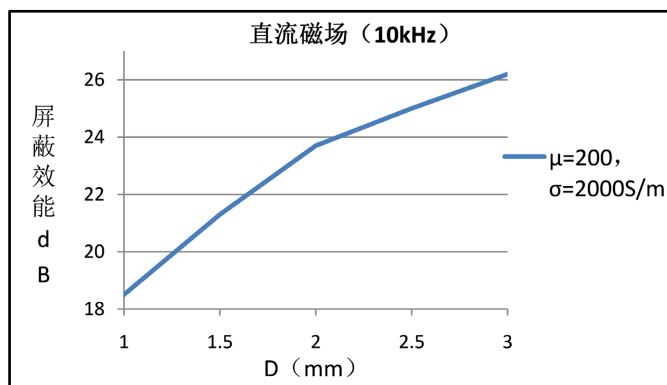
如图 6 所示，在 10 kHz 磁场环境下，材料屏蔽随着厚度的增大而升高，且与厚度成准正比关系。



**Figure 4.** The relationship between shielding effectiveness and magnetic permeability of materials in 10 kHz magnetic field  
**图 4.** 10 kHz 磁场环境下材料屏蔽与相对导磁率影响关系



**Figure 5.** The relationship between shielding effectiveness and electrical conductivity of materials in 10 kHz magnetic field  
**图 5.** 10 kHz 磁场环境下材料屏蔽与导电率的影响关系



**Figure 6.** The relationship between shielding effectiveness and thickness of materials in 10 kHz magnetic field  
**图 6.** 10 kHz 磁场环境下材料屏蔽与厚度的影响关系

### 3.2. 100 kHz~50 MHz 低频电、磁场环境下，材料相对导磁率、导电率、厚度与屏蔽的关系

1) 100 kHz~50 MHz 电、磁场环境下，材料相对导磁率与屏蔽的影响关系

如图 7 所示，在 100 kHz~2 MHz 电、磁场环境下，材料屏蔽随着相对导磁率的增大而升高，且相对导磁率对屏蔽的影响较大；而在 2~20 MHz 电、磁场环境下，材料屏蔽依然随着相对导磁率的增大而升高，但相对导磁率对屏蔽的影响逐渐变小。

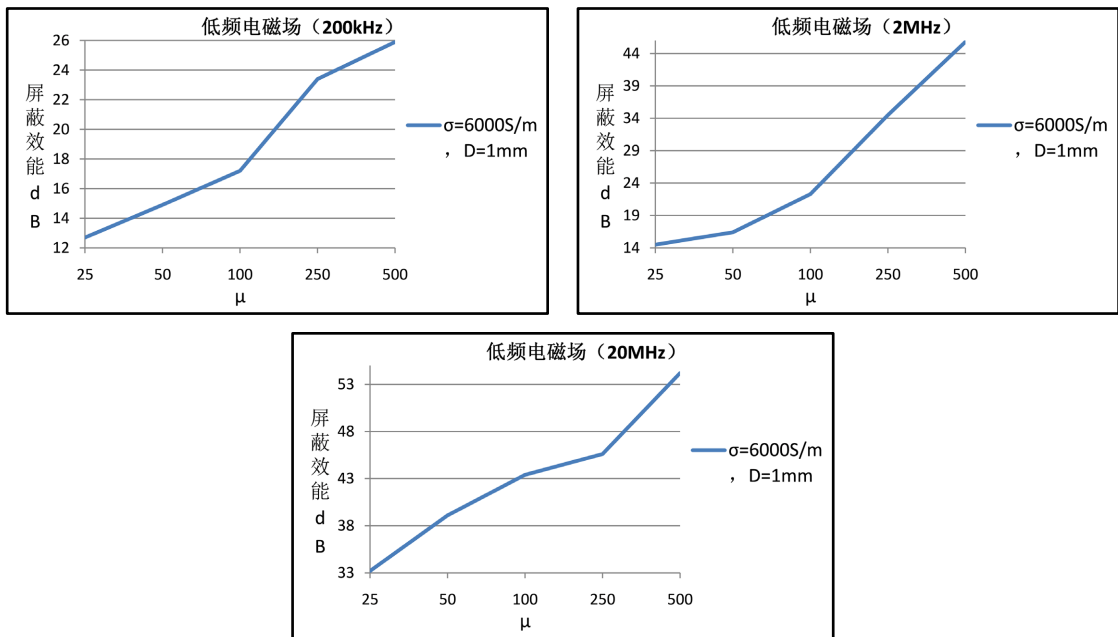


Figure 7. The relationship between shielding effectiveness and magnetic permeability of materials in 100 kHz~50 MHz electric and magnetic field

图 7. 100 kHz~50 MHz 电、磁场环境下材料屏蔽与相对导磁率的影响关系

2) 100 kHz~50 MHz 电、磁场环境下，材料导电率与屏蔽的影响关系

如图 8 所示，在 100 kHz~2 MHz 电、磁场环境下，材料屏蔽随着导电率的增大而升高，但导电率对屏蔽的影响不大；而在 2~50 MHz 电、磁场环境下，材料屏蔽依然随着导电率的增大而升高，且导电率对屏蔽的影响逐渐变大。

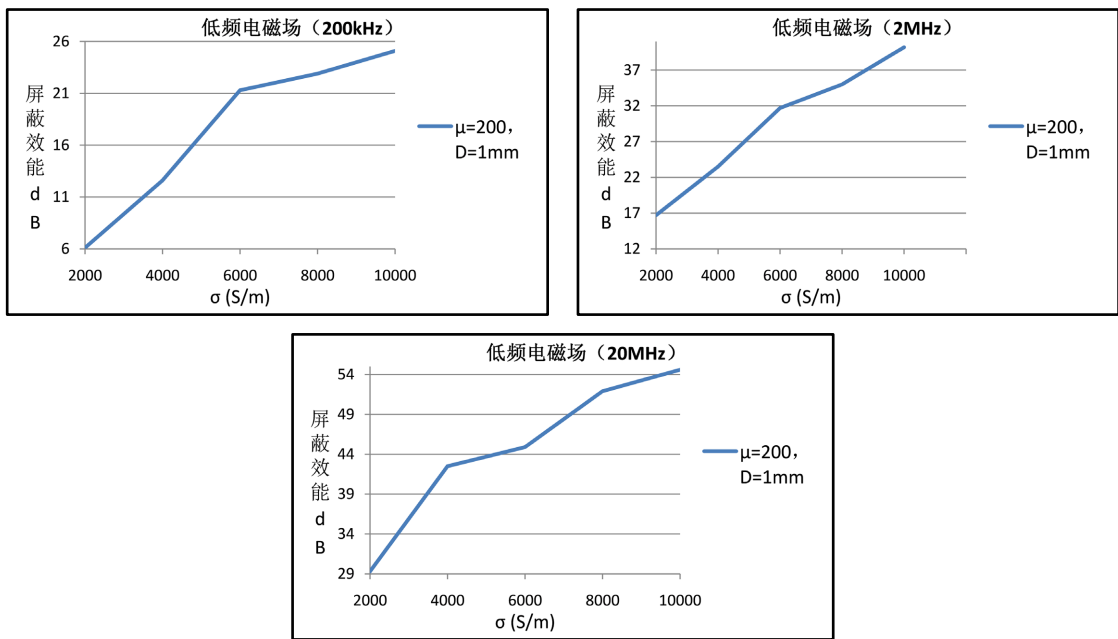
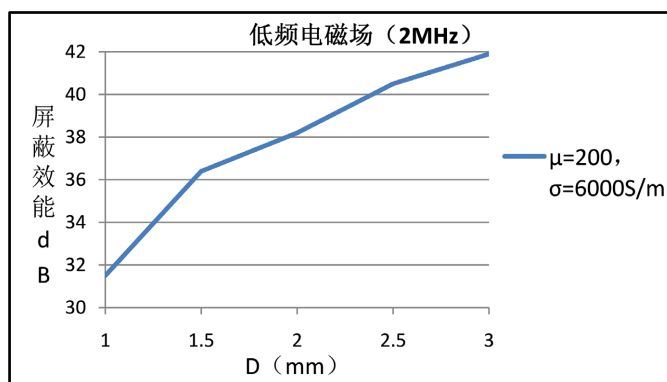


Figure 8. The relationship between shielding effectiveness and electrical conductivity of materials in 100 kHz~50 MHz electric and magnetic field

图 8. 100 kHz~50 MHz 电、磁场环境下材料屏蔽与导电率的影响关系

3) 100 kHz~50 MHz 电、磁场环境下，材料厚度与屏效的影响关系

如图 9 所示，在 100 kHz~2 MHz 电、磁场环境下，材料屏效随着厚度的增大而升高。



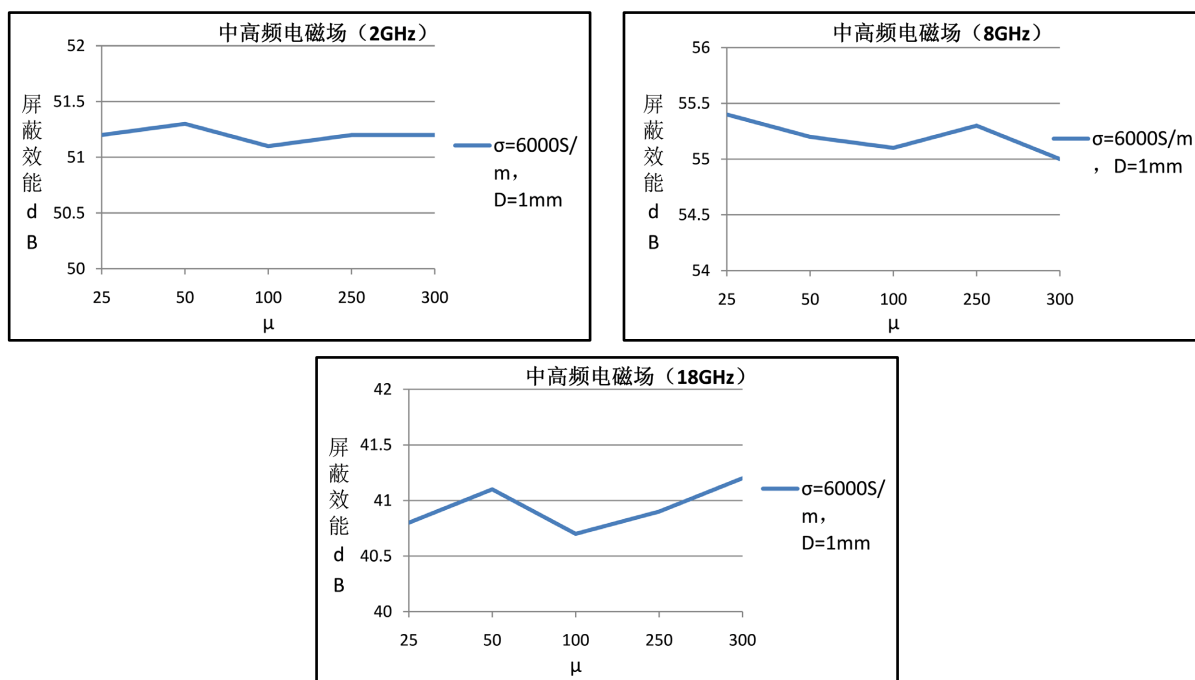
**Figure 9.** The relationship between shielding effectiveness and thickness of materials in 100 kHz~50 MHz electric and magnetic field

**图 9.** 100 kHz~50 MHz 电、磁场环境下材料屏效与厚度的影响关系

### 3.3. 1~18 GHz 中、高频电磁场环境下，材料相对导磁率、导电率、厚度与屏效的关系

1) 1~18 GHz 电磁场环境下，材料相对导磁率与屏效的影响关系

如图 10 所示，在 1~18 GHz 电磁场环境下，材料相对导磁率与屏效的无影响关系。

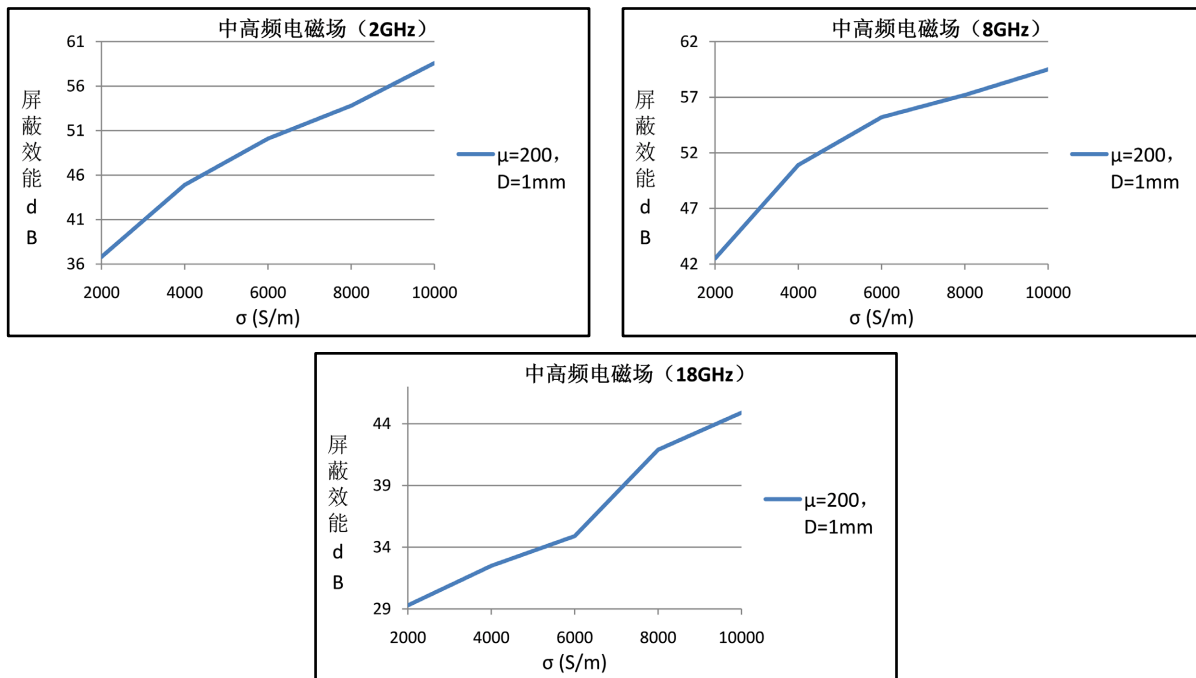


**Figure 10.** The relationship between shielding effectiveness and magnetic permeability of materials in 1~18 GHz electromagnetic field

**图 10.** 1~18 GHz 电磁场环境下材料屏效与相对导磁率的影响关系

2) 1~18 GHz 电磁场环境下，材料导电率与屏效的影响关系

如图 11 所示，在 1~18 GHz 电磁场环境下，材料屏效随着导电率的增大而升高。

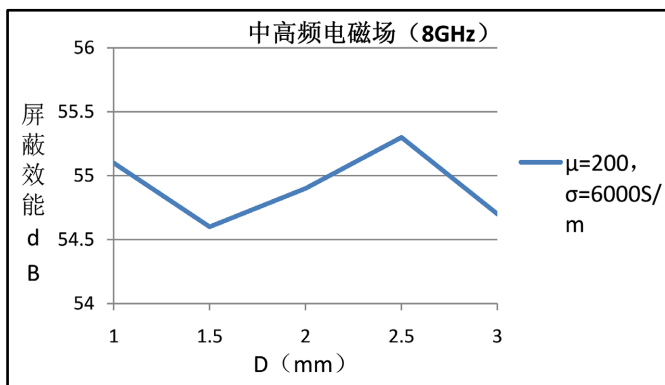


**Figure 11.** The relationship between shielding effectiveness and electrical conductivity of materials in 1~18 GHz electromagnetic field

**图 11.** 1~18 GHz 电磁场环境下材料屏蔽与导电率的影响关系

3) 1~18 GHz 电磁场环境下，材料厚度与屏蔽的影响关系

如图 12 所示，在 1~18 GHz 电磁场环境下，材料厚度与屏蔽的无影响关系。



**Figure 12.** The relationship between shielding effectiveness and thickness of materials in 1~18 GHz electromagnetic field

**图 12.** 1~18 GHz 电磁场环境下材料屏蔽与厚度的影响关系

## 4. 分析与讨论

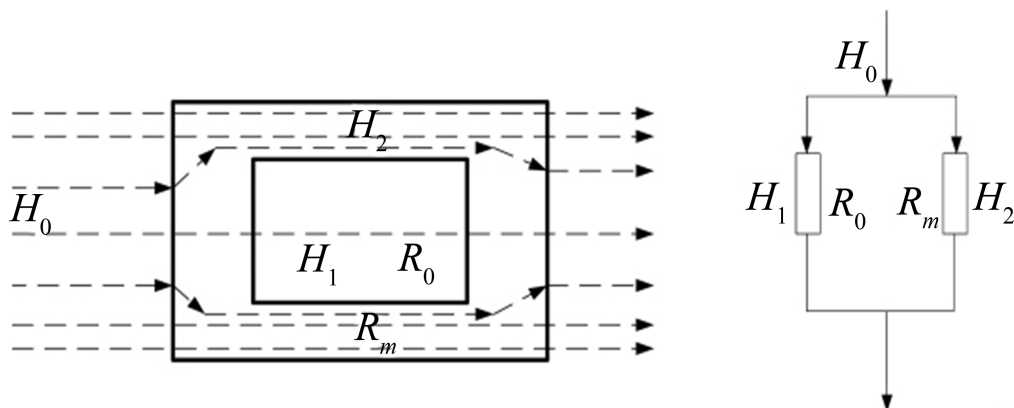
### 4.1. 直流(DC~10 kHz)磁场屏蔽效能分析

对于 DC~10 kHz 磁场的屏蔽主要是应用软磁性材料磁阻小的特点而对磁场能量进行导流来实现的，采用等效磁路的方法分析，如图 13 所示：

DC、低频磁场屏蔽是利用具有高导磁率特性软磁材料的低磁阻特性将磁场能量最大限度引入软磁材料内部传输，进而大大降低内部空间磁场能量，使内部空间磁场能量尽量减小，实现磁场屏蔽的效果。



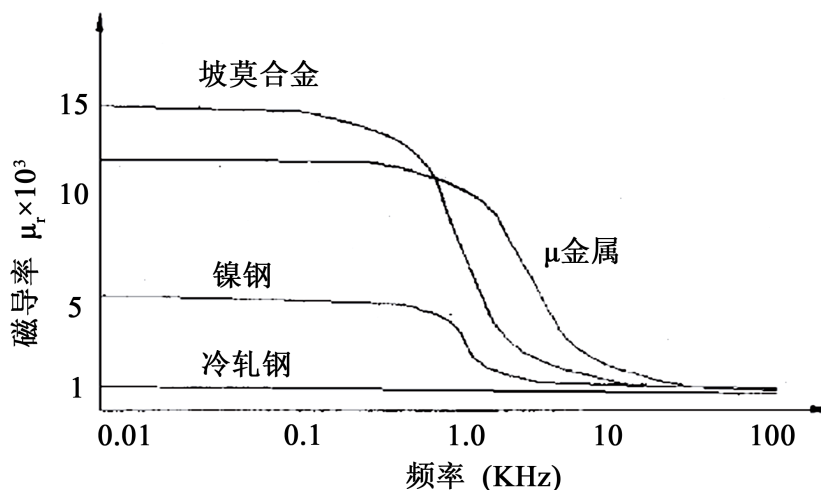
材料磁阻可表示为  $R_m = l/\mu s$ ，因此，材料  $\mu$  越大，厚度  $s$  越大，磁场屏蔽效能变好。



**Figure 13.** Principle of the magnetic shielding and equivalent magnetic circuit analysis method  
**图 13.** 磁场屏蔽原理及等效磁路分析法

#### 4.2. 低频(100 kHz~50 MHz)电、磁场屏蔽效能分析

对于 100 kHz~50 MHz 电、磁场的屏蔽结合了磁场分流原理及导电表面涡流损耗原理来实现。当电、磁场频率  $\leq 2$  MHz 时，材料导磁率依然为主导屏蔽机制，主要以磁场能量导流形式实现较好的屏蔽。当电、磁场频率  $\geq 2$  MHz 时，材料的导磁率由于频散效应，会随着电、磁场频率升高而下降，如图 14 所示，因此，材料导磁率对于屏蔽的贡献会逐渐减弱。



**Figure 14.** Regular pattern of the permeability changes with frequency  
**图 14.** 相对导磁率随磁场频率变化规律

同时，随着电、磁场频率的升高，具有高导电率的屏蔽材料表面会产生感应电流以抵消外部磁场，从而对屏蔽效能有所贡献。其屏蔽原理为利用涡流反向磁场对于原骚扰磁场的排斥作用，抑制或抵消屏蔽体外的磁场。如图 15 所示：

可见，在低频电、磁场环境下，屏蔽原理是多种损耗机制并存，随着频率的升高，磁场屏蔽机理逐渐丧失了主导优势，屏蔽对导磁率的要求变小；随着频率的升高，屏蔽对导电率的要求也越来越高。涡流效应屏蔽机制起到了主导作用，频率越高，导电率越高，屏蔽越好。

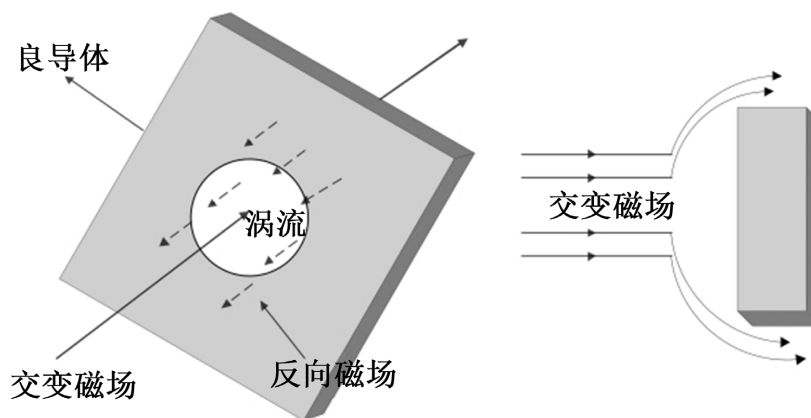


Figure 15. Shielding principle of the eddy current effect

图 15. 涡流效应屏蔽原理

### 4.3. 中、高频(1~18 GHz)电磁场屏蔽效能分析

对于 1~18 GHz 磁场的屏蔽主要是应用电磁波传输理论中电场阻抗失配原理,利用高导电材料的表面反射损耗机制来实现材料屏蔽效果的。依据传输线理论,中、高频电磁场屏蔽机理如图 16 所示:

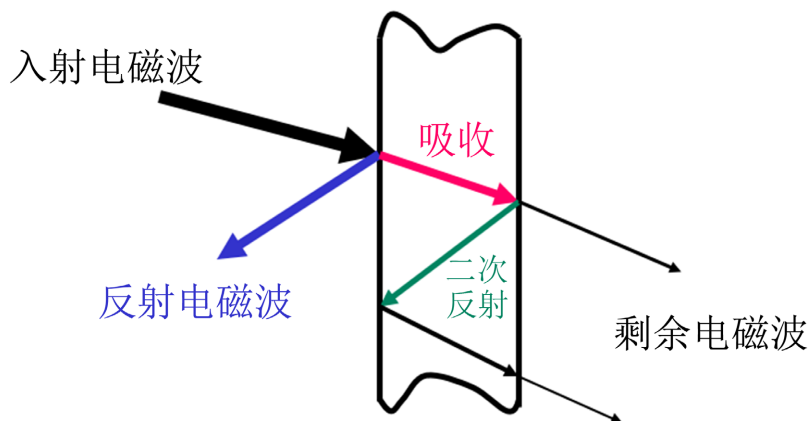


Figure 16. Shielding principle of the medium and high electromagnetic field

图 16. 中高频电磁场屏蔽原理

当材料的表面导电率达到一定水平,其趋肤深度会很小。因此,在材料厚度大于趋肤深度的情况下,其屏蔽与厚度无影响关系。

其中反射衰减可表示为:

$$R = 106 + 10 \lg(\sigma / f \mu_r) \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为导电率;  $\mu_r$  为相对导磁率;  $f$  为频率。通常在中、高频电磁场中,材料相对导磁率会很小,无法起到导磁分流的屏蔽作用。因此,材料在中、高频电磁屏蔽机制以反射损耗为主,且随着导电率的升高而增加。

## 5. 结语

1) 在直流(DC~10 kHz)磁场环境下,材料的屏蔽主要以磁场导流屏蔽机制为主,由材料导磁率及厚度参数决定,且随着其导磁率、厚度的增大而升高,与材料导电率无影响关系。

2) 在低频(100 kHz~50 MHz)电、磁场环境下, 材料的屏蔽出现多种屏蔽机制, 材料的屏蔽与其导磁率、导电率均有较大的影响关系。在频率 $\leq 2$  MHz 时, 磁场导流屏蔽机制起主导作用, 材料导磁率与其屏蔽有较大的影响关系; 在频率 $\geq 2$  MHz 时, 涡流效应屏蔽机制起主导作用, 材料导电率与其屏蔽有较大的影响关系; 频率越低, 导磁率对屏蔽影响越大; 频率越高, 导电率对屏蔽影响越大。

3) 在中、高频(1~18 GHz)电磁场环境下, 材料的屏蔽主要以反射损耗屏蔽机制为主, 材料导电率与其屏蔽有较大的影响关系, 其屏蔽随着导电率的增大而升高。基于屏蔽机制的变化和趋肤深度的影响, 材料的屏蔽与其导磁率、厚度无影响关系。

4) 在设计宽频(DC~18 GHz)电磁屏蔽涂层材料时, 要充分考虑材料导磁率和导电率的兼容和匹配问题。理想情况下, 同时提高材料的导磁率和导电率是设计宽频段、高屏蔽电磁屏蔽涂层材料的基本原则, 实际设计时, 可通过双层或多层材料的设计方法来实现。

## 参考文献

- [1] 管登高, 孙传敏, 孙遥, 等. 加强电磁环境保护, 提高城市电磁兼容水平[J]. 电讯技术, 2011, 51(4): 120-125.
- [2] Li, Y., Chen, C.X., Zhang, S., *et al.* (2008) Electrical Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding Characteristics of Multiwalled Carbon Nanotube Filled Polacrylate Composite Films. *Applied Surface Science*, **254**, 5766-5771. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.03.077>
- [3] 路宏敏. 工程与电磁兼容[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 100-105.
- [4] 张宁, 邵忠财, 李晓伟. 电磁屏蔽填料的制备及研究进展[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(3): 28-31.
- [5] 王建忠, 朱纪磊, 支浩, 等. 电磁辐射及其防护材料[J]. 材料导报, 2013, 27(4): 51-62.
- [6] 张敏. CST 微波工作室用户全书[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007.
- [7] 胡雪峰. 含超导的多层屏蔽体磁屏蔽的仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [8] 王录才, 张淑凯, 王艳丽. 基于 CST 泡沫铝通风窗屏蔽性能的有限元模拟[J]. 新技术新工艺, 2015(3): 10-14.