

碳纤维复合材料的屏蔽效能

陈曦¹ 曹雷团¹ 吴强¹ 李健芳² 张俊楠¹

(1 北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 碳纤维复合材料的屏蔽效能对系统抗电磁脉冲设计具有重要影响。本文通过理论分析建立了碳纤维复合材料的屏蔽效能模型,研究了频率、厚度等因素对碳纤维复合材料屏蔽效能的影响。结果表明,碳纤维复合材料具有较为良好的屏蔽效能,屏蔽效能在频率拐点以下随频率变化较小,在频率拐点以上随频率增大迅速增大,并通过了试验验证。

关键词 碳纤维,复合材料,屏蔽效能,电磁脉冲,电磁兼容

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.01.012

Shielding Effectiveness of Carbon Fiber Composite Material

CHEN Xi¹ CAO Leituan¹ WU Qiang¹ LI Jianfang² ZHANG Junnan¹

(1 System Division of China Academy of Launch Vehicle, Beijing 100076)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Carbon fiber composite material is gaining wider use in aerospace systems. Its shielding effectiveness is limited due to the conductivity. The shielding effectiveness is theoretically modeled and its result is verified by experiments. The influence of frequency, thickness is analyzed on the basis of the model.

Key words Carbon fiber, Composite material, Shielding effectiveness, Electromagnetic pulse, Electromagnetic compatibility

0 引言

碳纤维复合材料在复杂大系统中的应用日益广泛^[1],其屏蔽效能对系统屏蔽设计具有重要的影响。首先,材料本身屏蔽效能的大小决定了舱体所能达到的最高屏蔽效能,从而影响舱体屏蔽效能指标的制定;其次,材料厚度对屏蔽效能有何影响,不同铺层方式下屏蔽效能是否存在很大差别,也影响着试验结果的普遍性;第三,由于国军标规定的测试频段有限,需要由测试频段估计其他使用频段的屏蔽效能;最后,电磁数值分析中,碳纤维材料的等效处理方法,也是抗电磁脉冲和电磁兼容设计所关心的问题。虽然文献[2-4]研究了碳纤维复合材料或其他复合材料的屏蔽效能,但由于目的是材料设计,因而主要侧重于试验研究,没有展开对复合材料的屏蔽效能的机理研究。本文通过理论模型与试验研究碳纤维复合材料的屏蔽效能。

1 理论分析

碳纤维复合材料壳段由预浸料按照一定的角度及顺序在模具上铺制后,在热压罐内加热、加压固化成型。它可以被看作由不同方向的碳纤维叠合而成。本文所使用的国产 T300 碳纤维电导率为 $6.25 \times 10^4 \text{ S/m}$, 尽管比良导体低约三个数量级(铜为 $5.81 \times 10^7 \text{ S/m}$, 铝为 $3.54 \times 10^7 \text{ S/m}$),但也具有相对较好的导电性。

1.1 模型主要假设

碳纤维复合材料本质上是一种非均匀、各向异性的有损媒质,精确分析非常复杂。为了分析屏蔽效能特性,引入以下假设:

首先,将复合材料近似为均匀媒质。复合材料中既包含不同取向纤维也包含环氧树脂,因此在不同位置电磁特性实际上是不同的。但由于碳纤维直径很小,单层厚度仅为 0.15 mm,而电磁脉冲主要频谱分

量在 1 GHz 以下,也就是说波长大于 300 mm,远大于碳纤维网格。由于电磁波的衍射作用,电磁脉冲不能分辨出纤维网格结构。因此,可以近似将复合材料视为均匀媒质,即材料的电磁特性不随位置发生变化,可假设复合材料是具有某一数值的平均介电常数的均匀、各向异性有损媒质。

其次,对各向异性的处理。复合材料本质上是各向异性材料,其介电常数应用张量表示,但在分析中可以适当简化。第一、复合材料具有较强的导电性,按照电磁波理论,当平面电磁波入射到具有较强导电性材料平板中时,无论入射方向怎样变化,其在媒质内传播方向均与材料表面垂直,由于电磁波是横电磁波,即电磁场矢量与传播方向垂直,从而电场和磁场矢量均与材料表面的法线垂直,因此,与材料表面法线方向的相关分量对材料的介电常数张量几乎没有影响,相关的只有与法线垂直的两个方向的介电常数;第二,在与法线垂直的两个方向上,通过对张量矩阵的特征值分解,可以得到两个本征极化方向,尽管材料对这两个极化方向电磁波的衰减可能有一定数量上的差别,但不会由一个极化方向的电磁波激励出另一个极化方向的电磁波。因此,本节分析假设入射电场沿这两个本征极化方向之一,分析中所用的电导率 σ 也是对该方向的电导率。实际入射情况下的电磁波极化方向是任意的,可视为这两种本征极化方向电磁波的线性组合。在这一假设基础上,复合材料可进一步简化为均匀、各向同性有损媒质。

最后,将复合材料按强导电性材料进行分析。对于导电介质,在电磁波的求解中使用复介电常数 ε 来描述材料特性,其定义是

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (1)$$

式中, ε_0 是真空介电常数, ε_r 是复合材料的相对介电常数, σ 是电导率, ω 是角频率。由于电磁脉冲主要频率在兆赫兹到百兆赫兹量级,因此复介电常数的虚部远大于实部,因此,复介电常数近似可以由电导率和电磁波频率唯一确定。

$$\varepsilon \approx -j \frac{\sigma}{\omega} \quad (2)$$

基于上述分析,下面在计算过程中可将复合材料按均匀各向同性强导电性材料进行分析。

$$SE = \left| \frac{1}{T_{\text{空气} \rightarrow \text{材料}} LT_{\text{材料} \rightarrow \text{空气}} + T_{\text{空气} \rightarrow \text{材料}} LT_{\text{材料} \rightarrow \text{空气}} R^2 L^2 + T_{\text{空气} \rightarrow \text{材料}} LT_{\text{材料} \rightarrow \text{空气}} R^4 L^4 + \dots} \right| \quad (10)$$

使用等比级数化简可得式(11):

$$SE = \left| \frac{1 - R^2 L^2}{T_{\text{空气} \rightarrow \text{材料}} LT_{\text{材料} \rightarrow \text{空气}}} \right| \quad (11)$$

1.2 理论计算

电磁波进入复合材料平板,会先经过空气与材料界面之前的一次反射,再经过材料内部的往复折射、反射传输,最后透射出材料的另一面。因此下面首先分别计算从空气向材料界面的透射率,从材料向空气界面的透射率、反射率和在材料内部的传输损耗,最后组合成材料的屏蔽效能。

1.2.1 界面的反射损耗

平面电磁波在空气与复合材料界面发生的折射与反射可视为平面电磁波在两种媒质间的折射与反射。

由于 $|\varepsilon| \gg |\varepsilon_0|$,对于入射方向垂直于材料表面的电磁波,从空气入射进材料的透射率为^[5]

$$T_{\text{空气} \rightarrow \text{材料}} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon}} \approx 2\sqrt{\frac{\varepsilon_0 \omega}{\sigma}} \quad (3)$$

从材料出射到的空气透射率为^[5]

$$T_{\text{材料} \rightarrow \text{空气}} = \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon}} \approx 2 \quad (4)$$

从材料出射进空气的反射率为(5)式,在反射界面移相 0° 。

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon} - \sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon} + \sqrt{\varepsilon_0}} \approx 1 - 2\sqrt{\frac{\varepsilon_0 \omega}{\sigma}} \quad (5)$$

1.2.2 复合材料内的传输损耗

由于复合材料的电导率是有限的,因此电磁脉冲在材料中是衰减平面波,其电场波函数为^[5]:

$$E = E_{m0} e^{j\varphi} e^{-\alpha r} e^{-j\beta x} \quad (6)$$

$$\beta = \alpha = \frac{1}{\delta} \quad (7)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (8)$$

式中, E_{m0} 为材料内紧邻表面处的场强幅度, φ 为该处相位, δ 是趋肤深度, x 为传输距离, μ 为磁导率,频率越高趋肤深度越小。传输损耗 L 为,

$$L(\omega) = e^{-\frac{d}{\delta}} e^{-j\frac{d}{\delta}} \quad (9)$$

1.2.3 复合材料的屏蔽效能

电磁波进入复合材料后,在两个表面间来会部分反射,出射波为经过多次反射的电磁波的叠加。屏蔽效能 SE 为入射波强度与出射波强度的比值。

将式(3)~(6)代入(11)可计算出材料的屏蔽效能。

1.3 模型推论

通过上述公式可分析频率对屏蔽效能的影响。

当频率较低时(材料厚度远大于趋肤深度),电磁波在材料两个表面间有明显的多次反射,对于碳纤维所处的电导率量级,式(11)给出的屏蔽效能 SE 可简化为(12)式,可见,当频率较低时,屏蔽效能对频率的变化不敏感。

$$SE = \sqrt{\frac{\mu\sigma^2 d^2}{4\epsilon_0}} \quad (12)$$

在此频段,屏蔽效能正比于材料厚度,这实际上意味着材料厚度的影响并不显著,因为厚度提高一倍,屏蔽效能仅提高 6 dB。

当频率较高(材料厚度远小于趋肤深度)时,电磁波在材料内快速衰减,多次反射效应很弱,此时屏蔽效能主要取决于电磁波在材料体内传输的损耗, SE 的分子项几乎为 1,由于材料厚度和频率均在指数项上,屏蔽效能随频率的升高或材料厚度的增大快速升高。

2 试验结果验证

2.1 试验内容及结果

采用 GJB6190—2008^[6] 规定的同轴测试方法,对三块典型复合材料试片进行了测量。GJB6190—2008 除规定了同轴线法外,还规定了屏蔽室法。本文选用同轴线法,主要有两个原因:第一,复合材料具有相对良好的屏蔽效能,在较高频率,屏蔽效能很快超过 80 dB,屏蔽室法的干扰信号已超过此量级;第二,试片窄边边长均小于 300 mm,无法在屏蔽室窗口上安装。

试片厚度分别为 1.5、2.7、1.0 mm。三块试片均采用预浸料手工铺层,前两块为单向带按照一定的角度铺制,第三块为单向带与碳布交替铺制。屏蔽效能试验结果如图 1 所示。图 1 中,双虚线内的部分是 GJB6190—2008 规定的同轴法的适用范围(30 MHz~1.5 GHz),虚线之外的测试数据,可供参考。

由于复合材料的等效电导率未知,MT300 纤维本身电导率为 6.25×10^4 S/m,分别按等效电导率为 5×10^3 、 1×10^4 、 6.25×10^4 S/m 使用式(11)仿真计算的厚度为 1.5 mm 的试片的屏蔽效能。计算结果如图 1 所示。图中同时列出了试验测量的结果,以便将计算结果与试验结果进行对比。由图可见,理论计算结果与试验结果在 1 MHz~1.5 GHz 的趋势是大体符合的,电导率为 5×10^3 和 1×10^4 S/m 的曲线与实测数据较接近。

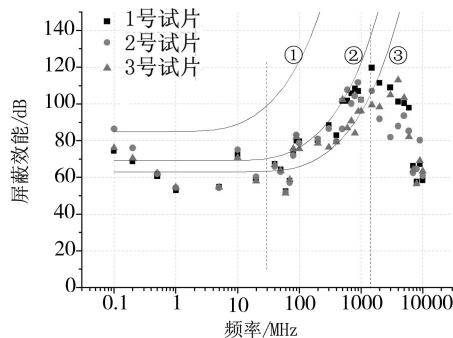


图 1 试验结果与理论分析对比

Fig. 1 Comparison of experimental and theoretical result

曲线①、②、③分别代表以电导率为 5×10^3 S/m, 1×10^4 S/m, 6.25×10^4 S/m 使用式的(11)仿真计算结果。

2.2 对试验误差的分析

2.2.1 低频段误差分析

在比 1 MHz 更低的频率下,观察到屏蔽效能随频率下降而升高。这是由于试片表面不导电中断了装置的同轴线,因此随着频率降低,实测屏蔽效能会比实际屏蔽效能高。同轴线测试夹具本身是一段特征阻抗 $Z_c = 50 \Omega$ 的传输线;碳纤维试片是电阻性的,可视为传输线之间的小电阻 R ;而试片中所含树脂的表面不导电中断了同轴线,相当于同轴线与试片之间的两个端面构成了一个平行板电容器 C 。因此测试状态(含信号源与负载)的等效电路见图 2。

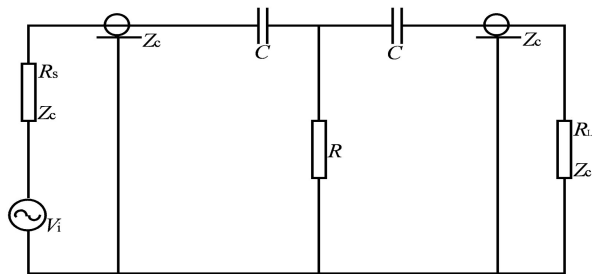


图 2 测试装置的低频等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of experiment at low frequency

该电路的传输函数为,

$$V_0 \approx \frac{R}{Z_c + \frac{1}{j2\pi fC}} V_i \quad (13)$$

式中, V_0 是负载上的输出电压, f 是频率。这是一个一阶高通滤波器的传输函数,其转折频率为,

$$f_c = \frac{1}{2\pi C Z_c} \quad (14)$$

按 GJB6190—2008 中规定的测试夹具内导体直
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 2 期

径 $d=33.10\text{ mm}$, 外导体内径 $D=76.2\text{ mm}$, 法兰盘外径 133 mm ^[6], 可计算得到等效平行板电容的极板其截面积 $S=1.02\times 10^4\text{ mm}^2$ 。如果按 0.05 mm 估算夹具与试片之间的绝缘间隙 d , 可计算得到等效电容 C 为:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} = 1.8\text{ nF} \quad (15)$$

代入式(14), 可得截止频率为 1.8 MHz , 与测试结果在同一数量级。

2.2.2 高频段误差分析

在 1.5 GHz 以上的频率, 由于同轴线的高次模和试片表面的漏波, 实测屏蔽效能可能会降低。同轴线传输具有频率范围, 一般只能应用在它的基模, 即横电磁模(TEM 模)。一旦信号频率过高, 超过高次模的截止频率, 将激励起高次模, 特性阻抗将发生畸变, 信号使传输损耗显著增大。一般同轴电缆直径较细, 可以应用到 10 GHz 以上的频率, 但测试夹具构成的同轴线内外径很大, 因此, 它的截止频率很低。截止频率最低的高次模是横磁模, 即 H₁₁ 模, H₁₁ 模的截止频率 $f_{c(H11)}$ 就是同轴线的最高工作频率, 可计算出测试夹具的 H₁₁ 模截止频率为,

$$f_{c(m1)} = \frac{190.8}{D+d} = 1.74\text{ GHz} \quad (16)$$

在实际测试中, 当信号频率超过 2 GHz 后, 同轴线本身(未插入试片)的传输损耗迅速增大, 在 $20\sim 50\text{ dB}$ 波动。按 GJB6190—2008 规定, 屏蔽效能是插入试片与未插入试片时的传输损耗之差, 前者受频谱仪动态范围限制一般不超过 100 dB , 如果后者过大会导致测出的屏蔽效能比实际的小。

同轴线的基模电磁波与自由空间传播的电磁波均为 TEM 模。在频率超过 $f_{c(m1)}$ 后, 传输线中激励起 H₁₁ 模, 电磁场的分布已经与自由空间的电磁波相差甚远。因此, 在 $f_{c(H11)}$ 以上的测试结果只供定性分析, 不代表真实的屏蔽效能。

因此, 如果除去频率较大和较小的部分, 实测屏

蔽效能与理论结果在变化规律上是一致的, 对理论分析的正确性提供了支撑。

3 结论

试验结果表明, 碳纤维复合材料具有较为良好的屏蔽效能, 但不及金属良导体。

对于厚度的影响, 基于理论分析, 在几十兆赫兹频段, 增大一倍厚度理论上仅增加 6 dB 屏蔽效能。因此材料厚度的影响极有可能被测试装置自身固有的不确定度所掩盖。在测试数据中, 可见较厚的试片比较薄的试片具有更高的屏蔽效能, 但未见材料厚度使屏蔽效能产生数量级的变化。

屏蔽效能在某频率拐点以下(趋肤深度远大于材料厚度), 屏蔽效能随频率变化较小; 反之当屏蔽效能在某频率拐点以上(趋肤深度远小于材料厚度), 屏蔽效能随频率增大迅速增大。对于 GJB6190—2008 规定频率外的频段, 试验的不确定度很大, 如果没有更好的测试解决方案, 可用本文理论分析的结论外推屏蔽效能测试数据。

在数值分析碳纤维复合材料屏蔽效能随频率厚度等变化时, 可近似将复合材料等效为电导率略低于纤维电导率的均匀导电媒质。

参考文献

- [1] 李瑞杰, 何安荣, 徐超, 等. 碳纤维增强复合材料结构阻尼性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(4): 70-73
- [2] 孙天厚, 邓建国, 张军华. 填充型电磁屏蔽复合材料[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(5): 8-13
- [3] 倪玉婷. 碳纤维在电波屏蔽材料中的应用[J]. 现代纺织技术, 2007, 15(5): 56-58
- [4] 王光华, 董发勤, 司琼. 电磁屏蔽导电复合塑料的研究现状[J]. 材料导报, 2007, 21(2): 27-30
- [5] 龚中麟. 近代电磁理论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010
- [6] GJB6190—2008. 电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法[S]. 2008

(编辑 任涛)