

# 镁及其合金的电磁屏蔽性能研究

## Electromagnetic Shielding Properties of Magnesium and Magnesium Alloys

张志华<sup>1</sup>, 潘复生<sup>1,2</sup>, 陈先华<sup>1,2</sup>, 刘娟<sup>1</sup>

(1 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044;

2 重庆大学 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

ZHANG Zhi-hua<sup>1</sup>, PAN Fu-sheng<sup>1,2</sup>, CHEN Xian-hua<sup>1,2</sup>, LIU Juan<sup>1</sup>

(1 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2 National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**摘要:** 采用同轴线法研究了纯镁及常见镁合金的电磁屏蔽性能, 比较了纯镁、不同系列镁合金与其他金属电磁屏蔽性能的差别。结果表明: 纯镁具有良好的电磁屏蔽性能, 合金化后, 根据合金元素的不同, 屏蔽性能有所改变, 其中 AZ 系镁合金具有最高的屏蔽效能。同时讨论了不同材料电磁屏蔽性能差异的原因以及厚度、电导率对电磁屏蔽性能的影响。

**关键词:** 镁; 镁合金; 电磁屏蔽; 屏蔽效能; 电导率

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.01.011

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)01-0052-06

**Abstract:** The electromagnetic shielding properties of pure magnesium, magnesium alloys and the difference with other metals were investigated by using the coaxial cable method. The results show that electromagnetic shielding property of pure magnesium is great, and those of magnesium alloys vary with the alloy elements. Among magnesium alloys, Mg-Al-Zn based alloys are the best for electromagnetic shielding. The cause of different shielding properties among different materials and the effects of thickness, electric conductivity on electromagnetic shielding property were also discussed.

**Key words:** magnesium; magnesium alloy; electromagnetic shielding; shielding effectiveness; electric conductivity

随着科技的发展, 电磁波引起的电磁干扰与电磁兼容问题日益严重。电磁波已成为一种继水源、大气和噪声之后新的具有较大危害性且不易防护的污染源, 它不仅影响通讯, 甚至直接威胁到人类健康。另外, 在现代战场上电磁波也被用于窃取机密, 破坏敌方军事设备<sup>[1-4]</sup>。研究和开发高性能电磁屏蔽材料已成为当今世界的重大课题。如今电磁屏蔽材料的研究主要集中在表层导电型屏蔽材料和填充复合型屏蔽材料等。然而前者主要是铜、镍等导电金属, 这些金属具有密度大的缺点; 后者制备工艺复杂, 成本高, 力学性能较差, 屏蔽效果一般<sup>[5-7]</sup>。

镁合金是工程应用中密度最低的金属结构材料, 具有高比强度, 高阻尼, 切削加工性能好等优点, 而且镁合金具有优良的电磁屏蔽性能<sup>[8]</sup>。而现在对镁合金电磁屏蔽性能的研究十分有限。姚路明等<sup>[9]</sup>研究了 AZ31

镁合金中挤压和轧制织构对电磁屏蔽性能的影响, 但是对电磁屏蔽性能的提高并不明显。另外鲜见其他系列镁合金的电磁屏蔽性能的文献。目前镁合金已开始应用于手机、电脑等 3C 产品以及航空航天领域<sup>[10]</sup>, 因此镁合金电磁屏蔽性能的研究显得很有必要。本工作主要对纯镁和常见镁合金的电磁屏蔽性能进行了研究。

### 1 实验

实验材料为一级纯镁 ( $\geq 99.87\%$ , 质量分数, 下同) 以及各个不同系列铸态镁合金 (AZ31, AZ61, ZK60, ZM61), 为了与其他屏蔽性能较好的材料进行比较, 还测试了工业纯铜 ( $\geq 99.9\%$ ), 工业纯铝 (1235), 以及工业纯镍 ( $\geq 99.9\%$ ), 所测材料均为铸态。镁合金的主要成分见表 1。

表 1 镁合金的主要成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of magnesium alloys  
(mass fraction/%)

| Alloy | Chemical composition |      |      |      | Mg  |
|-------|----------------------|------|------|------|-----|
|       | Al                   | Zn   | Mn   | Zr   |     |
| AZ31  | 3.92                 | 0.95 | 0.41 |      | Bal |
| AZ61  | 6.38                 | 0.88 | 0.34 |      | Bal |
| ZK60  |                      | 5.60 |      | 0.61 | Bal |
| ZM61  |                      | 5.77 | 1.00 |      | Bal |

用线切割从镁及镁合金铸锭上切取 15mm×15mm×20mm 的试样,将垂直于圆铸锭轴向的面在砂纸上磨成光亮的镜面后利用 4%硝酸酒精溶液腐蚀,然后在 Neophot-30 金相显微镜下进行组织观察。

用线切割从各材料上切割下 φ115mm 的圆形试样,将试样在粗砂纸上磨平至厚度为 2mm 或 3mm,并用细砂纸磨成光亮的镜面,最后达到试样表面各点厚度之差小于试样平均厚度的 5%。然后利用 Sigmascope Smp10 电导率测试仪对各材料进行相对电导率的测试,测试温度为 20℃。电导率测试时,在圆形试

样上 10 个不同部位进行测试,然后取平均值。电磁屏蔽性能在东南大学电磁兼容研究室利用同轴测试仪进行测试,测试按照 ASTM D4935—2010 标准进行,测试频段为 30~1500MHz。

2 实验结果

2.1 显微组织

图 1 为各系列镁合金的铸态金相形貌。从图 1(a)可以看到纯镁的晶粒较大,平均晶粒尺寸为 1mm 左右。经合金化后,各合金铸态组织变细小,呈现明显的枝晶状,均由灰白色枝晶状的基体组织和黑色的第二相组成。图 1(b),(c)显示 AZ 系镁合金铸态组织随着 Al 含量的增加,黑色骨骼状的  $Mg_{17}Al_{12}$  金属间化合物数量增多,呈连续的网状分布,枝晶间距变小。ZK60 镁合金中共晶产物沿晶界或枝晶边界分布,在晶内也有少量的黑色第二相颗粒。相对其他合金,ZM61 镁合金枝晶最细小,其第二相也呈网络状分布在基体上。

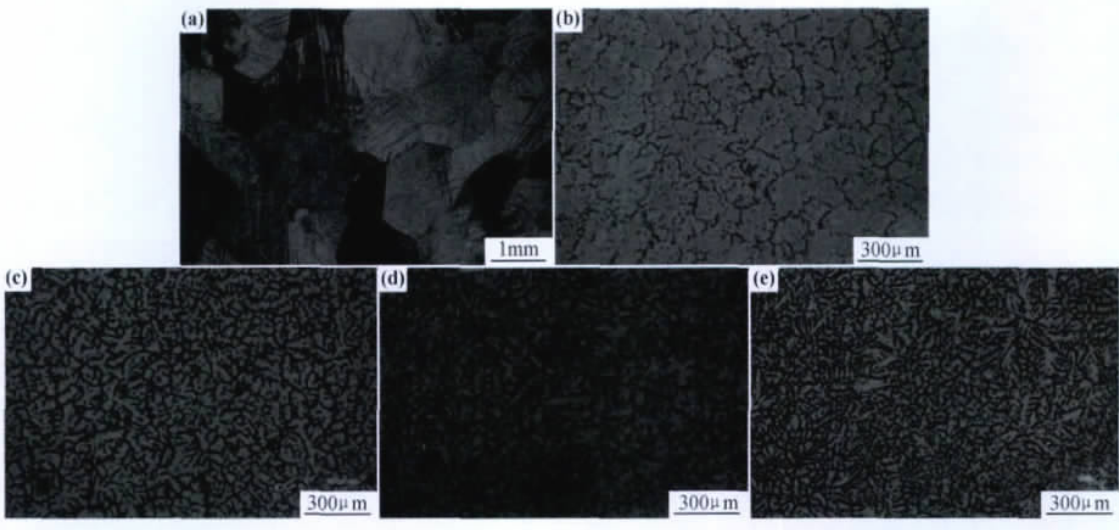


图 1 铸态纯镁及镁合金金相组织照片 (a)纯镁;(b)AZ31;(c)AZ61;(d)ZK60;(e)ZM61

Fig. 1 Microstructure of as-cast pure Mg and magnesium alloys (a)Mg;(b)AZ31;(c)AZ61;(d)ZK60;(e)ZM61

2.2 电磁屏蔽性能

为了定量描述屏蔽材料的屏蔽效果,通常采用屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)表示屏蔽材料对电磁波的衰减程度<sup>[1]</sup>。屏蔽效能定义如下:不存在屏蔽体时某处的电磁场强度( $E_o, H_o$ )与存在屏蔽体时同一处的电磁场强度( $E_s, H_s$ )之比,单位为分贝(dB):

$$SE=20lg \frac{|E_o|}{|E_s|} \text{ 或 } SE=20lg \frac{|H_o|}{|H_s|} \tag{1}$$

一般来说,SE 越大,则屏蔽效果越好。其分级标准见表 2<sup>[11,12]</sup>,当屏蔽效能在 60dB(电磁波能量衰减

99.9999%)以上时可以在航空航天及军用装备方面应用<sup>[13]</sup>。

表 2 电磁波屏蔽效果的分级标准

Table 2 Classification of shielding effect

| SE/dB          | <10  | 10-30 | 30-60  | 60-90 | >90       |
|----------------|------|-------|--------|-------|-----------|
| Classification | Less | Bad   | Middle | Good  | Excellent |

图 2 为纯镁、纯铜、纯镍以及纯铝的电磁屏蔽效能曲线。由图 2(a)可以看出,在 30~1500MHz 之间,纯

镁的电磁屏蔽效能为 60~75dB,屏蔽性能良好,而纯铝的屏蔽效能可在 30~67dB 之间。在低频段纯镁与纯铝的屏蔽效能接近;而在高频段,纯镁的电磁屏蔽效能则为纯铝的两倍左右。随着频率升高,纯镁的屏蔽效能变化整体比较平缓,而纯铝的屏蔽效能下降较快。在整个测试频段,纯镁的屏蔽性能都要优于纯铝。由图 2(b)可以看出,在测试频率范围内,纯镁的屏蔽效能为 50~70dB,纯铜的屏蔽效能为 45~80dB,纯镍的屏蔽效能为 58~75dB。随着频率的升高,三者的屏蔽效能都有所下降,但 Ni 和 Mg 在高频段反而略有

上升。总体上讲,在厚度相同条件下这四种金属的屏蔽性能高低排序为 Ni>Cu>Mg>Al。但是从图 2 中可以发现,3mm 厚纯镁的屏蔽效能与 2mm 纯铜和纯镍相比,在低频段纯镁略低,而当频率高于 600MHz 时,纯镁的屏蔽性能则更高。纯镁的密度为 1.738g/cm<sup>3</sup>,铜的密度为 8.890g/cm<sup>3</sup>,镍的密度为 8.908g/cm<sup>3</sup>,那么 3mm 纯镁的质量只有 2mm 纯铜、纯镍的 29%。因此在相同的屏蔽效果的情况下,纯镁具有更轻的优点,从这个角度讲,纯镁具有更好的屏蔽性能。

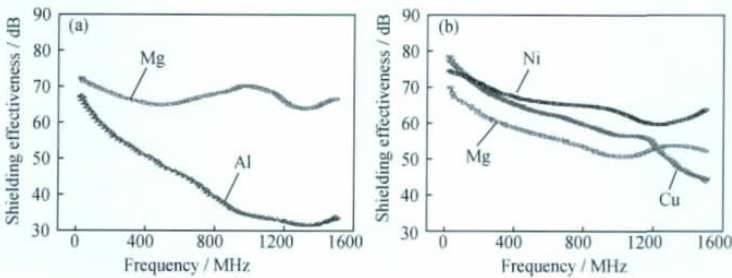


图 2 纯镁、纯铜、纯镍与纯铝的电磁屏蔽效能 (a)厚度为 3mm;(b)厚度为 2mm  
Fig. 2 Electromagnetic shielding effectiveness of Mg, Cu, Ni and Al (a)thickness is 3mm;(b)thickness is 2mm

图 3 为 2mm 厚的常见镁合金铸态屏蔽效能曲线。可以看出,AZ 系镁合金的电磁屏蔽效能比纯镁高,ZK60 镁合金与纯镁相近,ZM61 镁合金比纯镁低。在 AZ 系中,AZ31 镁合金的电磁屏蔽效能高于 AZ61 镁合金,同时也是测试材料中屏蔽效能最高的,其屏蔽效能为 55~73dB。从图 3 还可以看出,当频率低于 1200MHz 时,AZ31 镁合金的屏蔽效能高于 60dB,达到了等级良。屏蔽性能相对较低的 ZM61 镁合金的屏蔽效能为 45~65dB,屏蔽性能等级为中等。这四种合金的屏蔽效能随频率变化的趋势相同:随着频率上升,屏蔽效能下降。这是因为随着频率的上升,电磁波的

穿透能力增强<sup>[14]</sup>。总体上来说,镁合金能有效地屏蔽 1500MHz 以下的电磁辐射。

表 3 列出了本研究中测试材料以及部分铝合金、铝基复合材料<sup>[15]</sup>的屏蔽效能。由表 3 可见,镁合金在低频段屏蔽效能并不十分突出,而随着频率的升高,镁合金屏蔽效能的优势逐渐显现,当频率为 900MHz 和 1500MHz 时镁合金的屏蔽效能要明显高于其他材料,这是由于镁合金屏蔽效能随频率下降的速度较慢。手

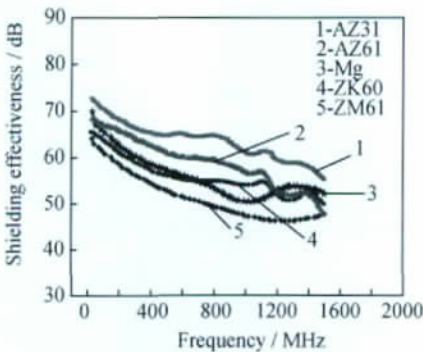


图 3 不同系列镁合金的电磁屏蔽效能  
Fig. 3 Electromagnetic shielding effectiveness of different series magnesium alloys

表 3 厚度 2mm 的纯镁、镁合金及其他材料的屏蔽效能  
Table 3 Electromagnetic shielding effectiveness of pure magnesium, magnesium alloys and other materials whose thickness is 2mm

| Material                           | SE/dB |        |         |
|------------------------------------|-------|--------|---------|
|                                    | 30MHz | 900MHz | 1500MHz |
| Pure magnesium                     | 70    | 51     | 52      |
| ZK60 Mg alloy                      | 65    | 55     | 50      |
| AZ31 Mg alloy                      | 73    | 64     | 55      |
| AZ61 Mg alloy                      | 70    | 59     | 47      |
| ZM61 Mg alloy                      | 65    | 49     | 47      |
| Pure copper                        | 77    | 57     | 45      |
| Pure aluminum(3mm)                 | 67    | 36     | 34      |
| 2024 Al alloy                      | 35    | 35     | 35      |
| Cenosphere fly ash/2024 Al alloy   | 75    | 35     | 31      |
| Precipitator fly ash/2024 Al alloy | 77    | 37     | 32      |

机的辐射频率有两种,分别为 900MHz 和 1800MHz,电脑的辐射屏蔽在 1000MHz 以下<sup>[16]</sup>,故镁合金对手机和电脑辐射的屏蔽效果要高于铝及其复合材料。

图 4 分别为 3mm 与 2mm 厚的纯镁和 ZK60 镁合金的屏蔽效能曲线,可以看出厚度对电磁屏蔽效能的

影响较大。纯镁 2mm 厚比 3mm 厚屏蔽效能低 5~20dB,而 ZK60 镁合金 2mm 厚比 3mm 厚屏蔽效能低 10~20dB,可见厚度对 ZK60 镁合金屏蔽效能的影响更大。3mm 厚的纯镁屏蔽效能随频率变化上下起伏,相对比较平缓,2mm 厚的纯镁呈下降趋势,ZK60 镁合金则都呈下降趋势。

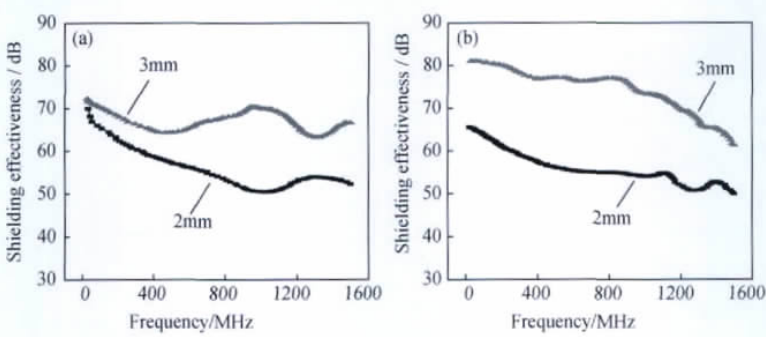


图 4 厚度对电磁屏蔽效能的影响 (a)纯镁;(b)ZK60 镁合金  
Fig. 4 Influence of thickness on electromagnetic shielding effectiveness  
(a)pure magnesium;(b)ZK60 magnesium alloy

3 分析与讨论

根据当前广泛采用的传输线理论<sup>[17-19]</sup>,屏蔽材料通过对电磁波的反射、吸收以及材料内部的多次反射来达到屏蔽电磁辐射的目的。Schelkunoff 利用传输线模型推导出了计算均匀屏蔽材料屏蔽效能的公式:

SE=R+A+B (2)

A=0.131t(fμ<sub>r</sub>σ<sub>r</sub>)<sup>1/2</sup> (3)

B=20lg(1-e<sup>-2t/δ</sup>) (4)

R=168-10lg(μ<sub>r</sub>f/σ<sub>r</sub>) (5)

式中:R 为表面单次反射损耗;A 为吸收损耗;B 为内部多次反射损耗;f 为电磁波的频率,Hz;t 为屏蔽材料的厚度,mm;μ<sub>r</sub> 为金属体相对于真空的磁导率;σ<sub>r</sub> 为金属体相对于理想铜的电导率;δ 为集肤深度,其中 δ=(πμ<sub>r</sub>σ<sub>r</sub>f)<sup>-1/2</sup>。

根据上述公式可以知道,材料的电磁屏蔽性能主要与材料本身的电导率、磁导率、厚度以及电磁波的频率有关。材料电导率增加,反射损耗和吸收损耗增加,总的衰减增加;材料磁导率增加,一方面使得吸收损耗增加,另一方面却又使得反射损耗减小。故影响材料电磁性质的因素都会影响其电磁屏蔽性能。

纯镁、纯镍、纯铜与纯铝的电导率排序为 Cu>Al>Mg>Ni。另一方面镍是铁磁性材料,而纯镁、纯铜、纯铝是顺磁性材料,相对磁导率为 1。根据 Schelkunoff 公式无法很好地解释纯镁、纯镍、纯铜、纯铝的电磁屏蔽性能差异。屏蔽性能的差异可能还与材料内部结

构有关,无法简单地采用电导率和磁导率来表征电磁屏蔽性能的高低。Ni, Cu, Al 都是面心立方结构,而 Mg 为密排六方结构。晶体中结构的紧密程度用致密度来表示,致密度是原子所占体积与晶胞体积之比。而金属中,由于外层电子将形成自由电子,自由移动,故金属结构中真正与紧密程度有关的为离子半径。用离子所占体积与晶胞体积之比来表示晶体的紧密程度,在本工作中定义为紧密度 K',其计算见表 4,根据结果显示紧密度排序为 Ni>Cu>Mg>Al。所测得的电磁屏蔽结果也刚好与此吻合。粒子穿越物质过程中,结构越紧密即空隙越小,粒子将越难以穿越。波具有波粒二相性,即波也是一种粒子,所以越紧密的结构波将更难以穿越,其屏蔽性能将更好。

表 4 Ni, Cu, Mg 及 Al 的紧密度对比

Table 4 K' of Ni, Cu, Mg and Al

| Metal | Crystal structure | Lattice parameter/pm | Ionic radius/pm | Atomicity in unit cell | K'     |
|-------|-------------------|----------------------|-----------------|------------------------|--------|
| Ni    | FCC               | a=b=c=352.4          | 72              | 4                      | 0.1428 |
| Cu    | FCC               | a=b=c=361.5          | 72              | 4                      | 0.1323 |
| Mg    | HCP               | a=b=320.9, c=521.05  | 65              | 6                      | 0.0495 |
| Al    | FCC               | a=b=c=404.9          | 50              | 4                      | 0.0315 |

在纯镁中添加合金元素形成不同系列的镁合金,这些镁合金的电导率都低于纯镁,各系列镁合金电导率见表 5。这主要是由于在纯镁中添加了合金元素

后,合金元素会以固溶的形式或第二相的形式存在于合金中。固溶原子破坏了金属晶体点阵排列的周期性,增加晶格畸变。一般晶体的晶格畸变越严重,对电子移动的阻碍越大,合金的电导率越小<sup>[20,21]</sup>。第二相的存在增加了其与基体之间的界面,界面会对电子起散射作用,导致电导率减小。AZ 系中 AZ31 镁合金的合金元素少于 AZ61 镁合金,另一方面正如图 1(b), (c)所示, AZ61 镁合金的枝晶比 AZ31 镁合金的发达,枝晶间距更细小,第二相也更多,其晶格畸变越严重,相界面也越多,故 AZ31 镁合金的电导率高于 AZ61 镁合金。不同系列的合金由于添加的合金元素不同,每种元素在镁中的固溶度不同而导致不同系列间即使添加的合金元素量相近,其电导率也会相差甚远。图 1(c), (d), (e), AZ61 合金中第二相数量远小于 ZK60 镁合金和 ZM61 镁合金,这是由于 Al 在镁合金中的固溶度高于 Zn<sup>[22]</sup>, Al 更多以固溶形式存在于基体中, Zn 更多以第二相形式存在。而合金元素以第二相存在时对合金电阻率的增大作用低于固溶态<sup>[23]</sup>, 所以 ZK60 镁合金和 ZM61 镁合金的电导率要高于 AZ61 镁合金。然而其电磁屏蔽性能与电导率并不统一,这可能是由于添加元素的磁化率各不相同:  $Mn > Zr > Al > Mg > Zn$ , 前四者为顺磁性而 Zn 为反磁性。添加了这些合金元素导致合金磁导率的不一致。另外晶体中会存在不均匀性、各向异性,而且晶体结构中会存在晶界、亚晶界、孪晶、相界、位错、层错等,这些微观的晶体结构都会影响金属的电磁性能,进而导致各系列镁合金电磁屏蔽性能的差异。

表 5 各系列镁合金的相对电导率

Table 5 Electric conductivity of different series magnesium alloys

| Material | Electric conductivity/(MS · m <sup>-1</sup> ) |
|----------|-----------------------------------------------|
| Mg       | 23.54                                         |
| ZK60     | 14.90                                         |
| ZM61     | 13.97                                         |
| AZ31     | 10.83                                         |
| AZ61     | 8.06                                          |

各系列铸态镁合金对电磁辐射的屏蔽性能依次为 AZ31, AZ61, ZK60, Mg, ZM61, 然而合金的相对电导率的变化与电磁屏蔽性能的变化并不一致。可见不同系列的镁合金由于添加的合金元素不同可能使合金磁导率变化较大,不能简单地根据合金的电导率来判断电磁屏蔽性能的高低。而 AZ 系列镁合金电磁屏蔽性能与相对电导率的变化规律一致,这

说明在相同的合金系列中,电磁屏蔽性能与电导率成正相关关系。

根据 Schelkunoff 公式计算可知镁合金多次反射损耗  $B$  可忽略不计。则公式(2)变为  $SE = R + A$ , 即屏蔽主要依靠反射损耗和吸收损耗。而反射损耗与材料的厚度  $t$  无关,只与材料电磁性质有关;吸收损耗与材料的厚度成正比。故  $SE_{(3mm)} - SE_{(2mm)}$  即为单位厚材料的吸收损耗,  $SE_{(2mm)}$  减去 2 倍单位厚度吸收损耗则为反射损耗。根据上述的计算即可得到纯镁和 ZK60 镁合金的单位厚度吸收损耗以及反射损耗如图 5 所示。

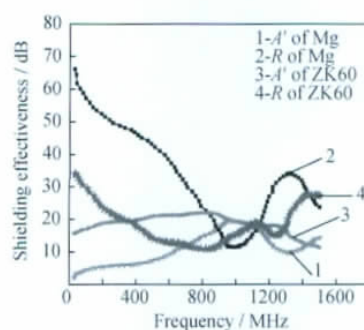


图 5 纯镁和 ZK60 镁合金单位厚度吸收损耗与反射损耗

Fig. 5 The absorption attenuation per millimeter ( $A'$ ) and the reflection attenuation ( $R$ ) of pure magnesium and ZK60 magnesium alloy

由图 5 可以看出纯镁的反射损耗要高于其吸收损耗,尤其在低频段,纯镁对电磁波的屏蔽主要依靠反射损耗。随着频率的上升,反射损耗呈现先下降后略上升的趋势,单位厚度吸收损耗呈先上升后略下降的趋势。ZK60 镁合金反射损耗和单位厚度吸收损耗的总体趋势与纯镁相同。但是 ZK60 镁合金反射损耗要远低于纯镁,而单位厚度吸收损耗要高于纯镁。

#### 4 结论

(1) 纯镁具有良好的电磁屏蔽性能,在 30 ~ 1500 MHz 频率范围内,2 mm 厚纯镁的电磁屏蔽效能可为 50 ~ 70 dB,稍低于纯镍和纯铜,但明显高于纯铝。

(2) 不同系列镁合金的电磁屏蔽性能存在较大差别。AZ31 合金的电磁屏蔽性能最好,且明显高于纯镁,当频率低于 1200 MHz 时,其电磁屏蔽效能高于 60 dB; AZ61 合金的电磁屏蔽效能稍低于 AZ31 合金。ZK60 合金与纯镁相当, ZM61 合金在所测镁合金材料中电磁屏蔽性能最低。

## 参考文献

- [1] 刘顺华,刘军民,董星龙,等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社,2007. 57—70.
- [2] HUNG Fei-shuo, HUNG Fei-yi, CHIANG Che-ming. Crystallization and annealing effects of sputtered tin alloy films on electromagnetic interference shielding [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(8): 3733—3738.
- [3] WEN Si-hai, CHUNG D D L. Electromagnetic interference shielding reaching 70dB in steel fiber cement[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 329—332.
- [4] CAO Jing-yao, CHUNG D D L. Use of fly ash as an admixture for electromagnetic interference shielding [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(10): 1889—1892.
- [5] 王锦成. 电磁屏蔽材料的屏蔽原理及研究现状[J]. 化工新型材料, 2002, 30(7): 16—19.
- WANG Jing-cheng. Mechanism and development of electromagnetic shielding materials[J]. New Chemical Materials, 2002, 30(7): 16—19.
- [6] 丁世敬, 赵跃智, 葛德彪. 电磁屏蔽材料研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(4): 30—33.
- DING Shi-jing, ZHAO Yue-zhi, GE De-biao. Research progress in electromagnetic shielding materials [J]. Material Review, 2008, 22(4): 30—33.
- [7] 万刚, 李荣德. 电磁屏蔽材料的进展[J]. 安全与电磁兼容, 2003, (1): 40—41.
- WAN Gang, LI Rong-de. Developments and applications of electromagnetic shielding materials [J]. Shielding Technology & Shielding Material, 2003, (1): 40—41.
- [8] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 24—26.
- [9] 姚路明. 镁合金组织和结构对其电磁屏蔽效能的影响[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2009. 29, 42—64.
- [10] 王渠东, 丁文江. 镁合金研究开发现状与展望[J]. 世界稀有金属, 2004, (7): 8—11.
- WANG Qu-dong, DING Wen-jiang. Research status and development of magnesium alloy [J]. World Nonferrous Metals, 2004, (7): 8—11.
- [11] 邱帖铁. 木质电磁屏蔽材料的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008. 5—6.
- [12] 徐步. 复合材料电磁屏蔽性能的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005. 18.
- [13] 谢鹏浩, 刘尚合. 电磁屏蔽材料的现状及其发展趋势[J]. 机械工程学院学报, 2006, 18(增刊): 303—307.
- XIE Peng-hao, LIU Shang-he. The current situation and development trend of electromagnetic shielding material [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2006, 18(S): 303—307.
- [14] XUAN Tian-peng, YANG Guang-zhou, YANG Li-lin, et al. Study on electromagnetic shielding effectiveness of Ni-P-La alloy coatings [J]. Journal of Rare Earths, 2006, 24(1): 389—392.
- [15] DOU Zuo-yong, WU Gao-hui, HUANG Xiao-li, et al. Electro-magnetic shielding effectiveness of aluminum alloy-fly ash composites [J]. Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(1): 186—191.
- [16] 夏长念, 吴超, 李明. 电脑和手机电磁辐射强度测试及防护对策 [J]. 安全与环境工程, 2006, 13(4): 26—29.
- XIA Chang-nian, WU Chao, LI Ming. Electromagnetic radiation intensity test of computers and mobile phones and the countermeasures [J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(4): 26—29.
- [17] AL-GHAMDI A A, EL-TANTAWY F, AAL N A, et al. Stability of new electrostatic discharge protection and electromagnetic wave shielding effectiveness from poly (vinyl chloride)/graphite/nickel nanoconducting composites [J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94(6): 980—986.
- [18] YU Xiao-zheng, SHEN Zhi-gang, CAI Chu-jiang. Millimeter wave electromagnetic interference shielding by coating expanded polystyrene particles with a copper film using magnetron sputtering [J]. Vacuum, 2009, 83(12): 1438—1441.
- [19] GAO Y, HUANG L, ZHENG Z J, et al. The influence of cobalt on the corrosion resistance and electromagnetic shielding of electroless Ni-Co-P deposits on Al substrate [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(24): 9470—9475.
- [20] 王桂芹, 刘顺华, 高洪吾, 等. 硼对工业纯 Al 导电性的影响 [J]. 金属学报, 2000, 36(6): 597—601.
- WANG Gui-qin, LIU Shun-hua, GAO Hong-wu, et al. Effects of boron on the electrical conductivities of commercial aluminum [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(6): 597—601.
- [21] 刘顺华, 王桂芹, 吴爱民, 等. 稀土元素对工业纯铝导电性的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 334—339.
- LIU Shun-hua, WANG Gui-qin, WU Ai-min, et al. Effects of rare earth elements on electrical conductivity of industrial aluminum [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(3): 334—339.
- [22] 张红菊. AZ 系镁合金相变及凝固组织分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007. 9—11.
- [23] 刘顺华, 王桂芹, 高洪吾, 等. 稀土元素对铝导体导电性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2005, 29(10): 46—49.
- LIU Shun-hua, WANG Gui-qin, GAO Hong-wu, et al. The influence of RE on the electric properties of aluminum conductors [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(10): 46—49.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAE22B04); 国家自然科学基金资助项目(51101173); 重庆市科委资助项目(2010CSTC-HDLS); 中国博士后科学基金特别资助项目(201104316)

收稿日期: 2012-02-20; 修订日期: 2012-11-10

作者简介: 张志华(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事镁合金材料方面研究工作, 联系地址: 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号重庆大学 A 区综合实验楼 312 室(400044), E-mail: zhangzh312@163.com