

# 温度对 Mn-Zn 铁氧体材料高频功率损耗的影响

**Effecte of Temperature on Mn-Zn Ferrite Power Loss at High Frequency**

薛蕙 编译

**摘要** 文章介绍在磁感应强度在 25mT，频率达到 1MHz 时所观测到的 Mn-Zn 铁氧体材料之高频功率损耗特性与温度的依赖关系。检测得知，在 100kHz 频率时，Mn-Zn 铁氧体材料最小的功率损耗点出现在 70 ℃ 温度附近，在 500kHz 时的最低功率损耗点在 50 ℃ 附近，而 1MHz 时的温度更低。观测可见，在 1MHz 时，Mn-Zn 铁氧体材料的电阻率不受温度影响，所以，涡流损耗对材料总功耗与温度之间的影响程度可以忽略不计。在 1MHz 高频下，由于材料内部的磁旋转产生的剩余损耗明显增大，并且它受温度的影响强烈。观测发现，剩余损耗开始增大时的频率与材料复数磁导率损耗开始时的频率相当一致。

**关键词** Mn-Zn 铁氧体，高频功率损耗，温度，磁滞损耗，涡流损耗，剩余损耗

中图分类号：TM27 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2014)09-3-141

## 1 引言

Mn-Zn 铁氧体材料在高频开关电源变压器磁芯等电力电子技术中有着广泛的应用。在这些应用场合，使器件的功率损耗达到最小值以及因功率损耗产生的温升得以减小及控制，是其设计的基本要求。在实际应用中，磁芯损耗和绕组损耗都会产生热量，从而使器件的温度上升。温度升高将增大器件损耗更使温度升高，以致导致发热失控，甚至使器件损坏。这是高频开关电源设计中极为严重的问题。为此，在设计时，应把功率损耗的最低温度( $T_m$ )设定在工作温度附近。众所周知，Mn-Zn 铁氧体材料的化学成分和其制造过程中的氧化程度是限止  $T_m$  值的最重要的参数。Mn-Zn 铁氧体材料如在低频下工作，化学成分中增加亚铁含量，则  $T_m$  将移向较低温度，这和获得起始磁导率的第二个最大值的温度相吻合。随着材料进一步的氧化，即其中亚铁含量相应有所减少。在低频情况下，材料的磁滞损耗起主导作用，而在高频时(7500kHz)，则是涡流损耗和剩余损耗起主导作用。在本文中，我们将通过分析剩余损耗研究其对  $T_m$  的影响及其程度，尤其是高频时的  $T_m$  变化。

## 2 试样的实验制备

实验试样的 Mn-Zn 铁氧体材料的组成是  $Mn_{0.71}Zn_{0.22}Fe_{2.07}O_4$ ，磁芯采用传统的陶瓷粉末加工技术制备。工艺过程为：将环形磁芯放置在气分控制管式炉中，加热到 1150 ℃ 烧结三小时。在冷却区域，用 Morineau 平衡氧分压方程来控制气分，氧参数设为 7.8。烧结成功的环形磁芯样品的外径约 17mm，内径 8mm，高度为 5mm。磁参数采用 Iwatsu 8232 B-H 分析仪测量功率损耗，测量中的温度范围为 20 ℃ ~100 ℃ 之间。使用惠普公司的阻抗分析仪测量磁导率随频率变化的曲线。为了方便测量材料的电阻率，将样品切成一个圆盘形，并涂以 In-Ga 软膏作电极。

## 3 试验结果讨论

图 1 中的曲线示出了在不同工作(测试)频率下的功率损耗与温度的相互关系。由于功率损耗与频率有关，所以功率损耗的绝对值随频率的升高而增大。但在图中还可看到，随着频率的上升， $T_m$  则移向低温区。以上我们提到，总功率损耗分为三部分：磁滞损耗( $P_h$ )、涡流损耗( $P_e$ )和

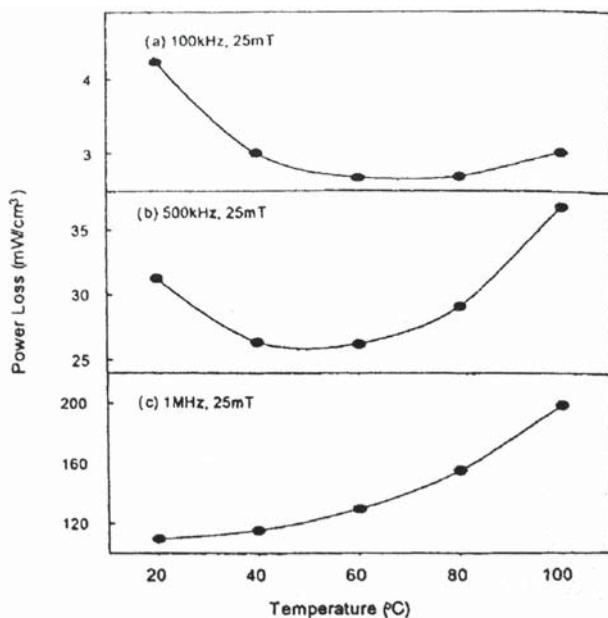


图1 测量频率分别为(a)100kHz,(b)500kHz和(c)1MHz时的功率损耗与温度的关系曲线

剩余损耗( $P_r$ )。在低频时，总功率损耗主要来源于磁滞损耗，在磁晶各向异性常数( $K_1$ )接近于零的温度下，得到 $T_m$ 值。当测量频率升高时[如图1(a)和图1(b)所示]， $T_m$ 移向较低的温度区。这个最小值 $T_m$ 的漂移意味着，在高频段的功率损耗起主导作用的不是磁滞损耗。在高于500kHz的频段，涡流损耗和剩余损耗更为显著。

铁氧体磁芯涡流损耗的表达式如以下式(1)：

$$P_e = C_e f^2 B_m^2 / \rho \quad (1)$$

式中， $C_e$ 是尺寸常数， $\rho$ 是在测量频率上的电阻率。由此可以预测，涡流损耗会随着温度的升高而增大，因为Mn-Zn铁氧体材料的电阻率随温度的升高而减小。交流(AC)电阻率与温度的相互关系显示于图2。当测试频率从10kHz上升到1MHz时，电阻率严重下降。但是，电阻率在1MHz时的情况与10kHz时完全不同，它几乎是与温度无关。这就说明，由于在高频时热绝缘的电容性质，使得电阻率晶界被短路。根据式(1)的计算结果， $T_m$ 的漂移与涡流损耗无关。

剩余损耗与畴壁驰豫、旋转共振和尺寸共振有关。在本文案例中，没有分析尺寸共振，因为被测磁芯的尺寸比电磁驻波的共振尺寸小得多。磁共振和驰豫损耗导致磁导率虚部( $\mu''$ )的形成， $\mu = \mu' + j\mu''$ 。虚部和实部之比用 $\tan\delta$ 表述。利用这个量值可以确定与外磁场(H)有关的磁感应强度(B)的

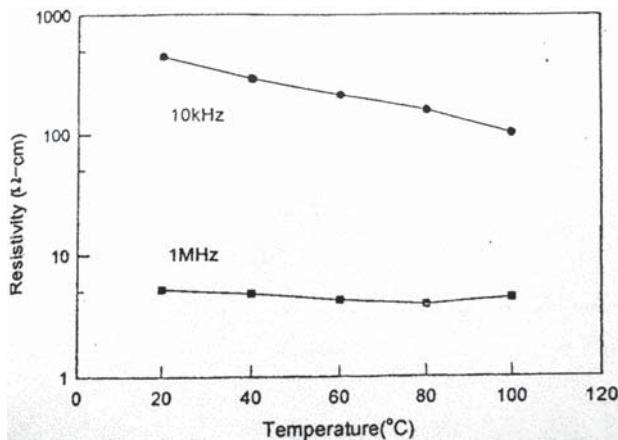


图2 在不同频率下，电阻率与温度的关系曲线(电阻率是采用两点AC技术测试的)

相位滞后状况。磁驰豫对这些损耗的影响归因于通过施加AC磁场而产生的畴壁激励。AC磁场不能即时跟随外加磁场，因此在磁感应和磁场间产生一个相移。当激励频率和磁化旋转自然频率发生共振时出现旋磁共振导致在功率吸收中出现一个大的峰值。在1MHz频率时，这个共振控制铁氧体材料的损耗，而铁氧体的共振频率由以下式(2)计算：

$$f_r = \frac{rB_s}{3\pi\mu_0(\mu_r - 1)} \quad (2)$$

式中， $B_s$ —饱和磁感应强度； $\mu_r$ —自旋产生的起始磁导率； $r$ —旋磁比。在高频范围(>500kHz)，旋转损耗的影响比畴壁驰豫更大些。对于功率铁氧体材料，畴壁驰豫在各频段上通常并不重要。图3所示为在不同温度下的复数磁导率与频率之关系曲线。图中可见，起始磁导率 $\mu_r$ 随温度的升高而增大，而共振频率( $\tan\delta = \mu''/\mu' = 1$ )和损耗( $\mu''$ )开始增加的频率随温度的升高而下降。这和式(2)给出的 $f_r$ 和 $\mu_r$ 之间的关系一致。表1概括地列出了每个温度下的共振频率 $f_r$ 和磁导率 $\mu_r$ 。从中可以发现， $f_r$ 和 $\mu_r$ 的乘积几乎是一个与测量温度无关的常数。这与式(2)的表述非常一致。我们还应该注意到，共振频率和依赖温度的各向异性场是成比例的。

表1 磁导率与共振频率

温度(°C)	磁导率( $\mu_r$ )	共振频率( $f_r$ /MHz)	乘积( $\mu_r \times f_r$ )
100	2171	2.10	4559.10
80	2171	2.28	4959.56
60	1937	2.45	4745.65
40	1737	2.70	4689.90
20	1545	3.00	4635.00

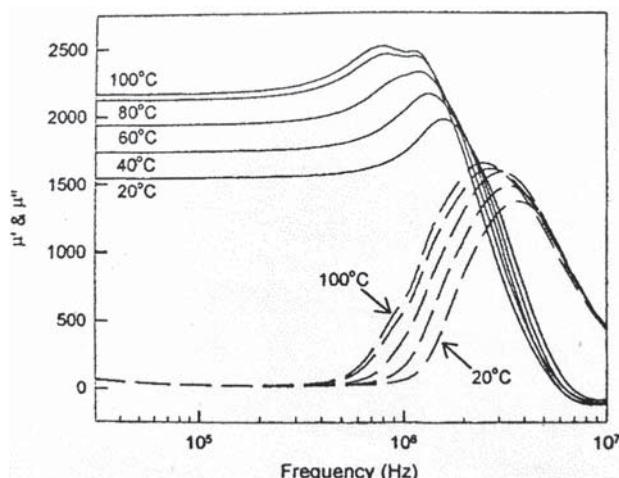


图3 磁导率实部 ( $\mu'$ , 图中的实线所表示) 和虚部 ( $\mu''$ , 虚线的频谱)

图4所示为，在各个温度作为一个频率的函数时，每个频率的总功率损耗 ( $P_L/f$ ) 与频率的关系曲线。磁滞损耗 ( $P_h$ ) 和涡流损耗 ( $P_e$ ) 分别通过零频率截止和起始磁导率的线性部分推导出来。线性度的偏差来自于剩余损耗。表示磁滞损耗的零频率截止随温度升高而减小，这和在100kHz时的功率损耗特性相吻合，图1(a)所示为，在100kHz时，磁滞损耗起主导作用。非线性开始出现的频率与测量温度相关，它随温度的升高而降低，如图3所示，这个开始频

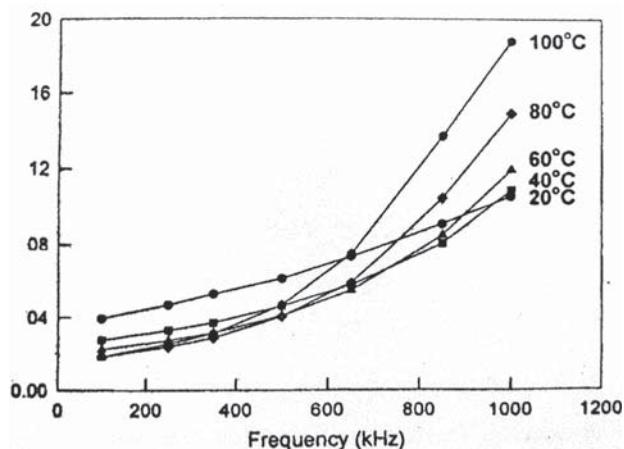


图4 在不同温度下，每个周期的功率损耗与频率的关系曲线

率和损耗开始的频率一致。复数磁导率与温度的关系和高频下的功率损耗特性相吻合，这是由于旋转共振的原因。

图5所示为各种损耗机制在不同温度下所产生的影响：在1MHz时，随着温度的升高，剩余损耗对总损耗的贡献最大。因为共振频率与温度相关的各向异性场成正比，所以，科技工作者在寻找某些氧化物作添加剂，以抑制剩余损耗。此外，工程师们开发了一种烧结技术来控制含有单磁畴的细晶粒结构 ( $< 5 \mu m$ )，也能够降低剩余损耗。

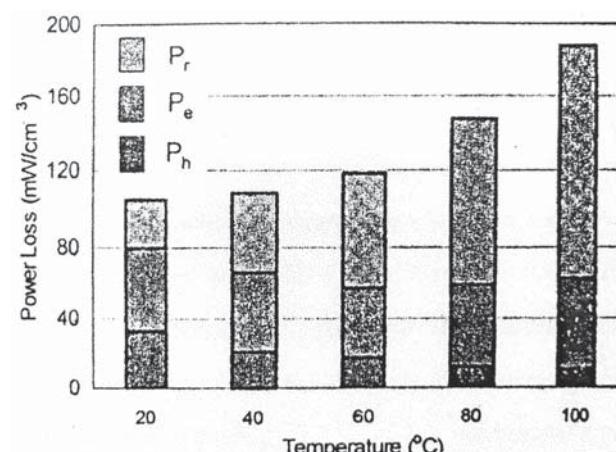


图5 在不同温度测量频率为(1MHz)下，功率损耗分为剩余损耗 ( $P_r$ )、涡流损耗( $P_e$ )和磁滞损耗( $P_h$ )

#### 4 小结

文章介绍了频率在1MHz，磁感应强度在25mT时所观测得到的Mn-Zn铁氧体磁芯的功率损耗随温度变化的情况。在低频时，出现功率损耗最小值的温度 ( $T_m$ ) 和磁晶各向异性接近零时的温度一致。当测试频率升高时， $T_m$ 移向低温区。涡流损耗对变压器总损耗的影响很小，可以忽略不计，这是由于在1MHz频段时，材料的电阻率与温度无关。在1MHz频段时，由于磁旋转的原因，剩余损耗对总损耗的影响最大，而且，其与温度存在密切的关系。剩余损耗开始增加的频率与磁导率下降开始的频率非常一致。

(参考文献略)