

# 一种车载用宽温抗应力铁氧体材料的研究

朱晏军, 聂敏, 尉朗, 林艺冰

深圳顺络电子股份有限公司, 深圳 518110

**摘要:** 本文研究了一种车载用宽温抗应力镍锌铁氧体新材料, 并与传统铁氧体材料做性能对比。要求新材料磁导率 $\mu_i$ 在100KHz下为800, 比温度系数 $\alpha_{\mu_{ir}}$ 较小, 呈现宽温特性, 在80N下压力磁导率变化率 $<10\%$ , 居里温度 $T_0$ 大于 $140^\circ\text{C}$ , 微观结构致密, 晶粒细小均一。压环实验数据表明: 新材料磁导率 $\mu_i$ 在100KHz下为800,  $20^\circ\text{C}$ – $60^\circ\text{C}$ 的比温度系数 $\alpha_{\mu_{ir}}$ 为 $-0.1 \times 10^{-6}$ , 呈现宽温特性, 在80N下压力磁导率变化率 $<8.5\%$ , 居里温度 $T_0$ 为 $200^\circ\text{C}$ , 微观结构致密, 晶粒细小均一。用该新粉料生产的ACW4532B车载共模电感, 端头附着力、盖板磁体强度、磁芯抗弯曲强度、高频振动、产品温度特性、产品高频特性等性能均非常好。现正在批量生产, 为公司创造了良好的经济效益。

**关键词:** 铁氧体粉料, 喷雾造粒, 性能

## 1 引言

近年来汽车市场的电子化日趋明显, 新能源汽车的普及以及附加功能越来越丰富, 每台汽车中搭载的电子设备的数量也相应增加, 并且电子设备的种类也越来越多样化。而这些电子设备所使用的材料多为车载宽温抗应力材料, 因为汽车是移动的产品, 可以到处行走, 从南北极到赤道, 且季节不限, 这就要求车载用的电子产品必须具有宽温特性, 必须在 $-40^\circ\text{C}$ ~ $+125^\circ\text{C}$ , 产品的电性能不变; 又由于电子产品在车中颠簸, 不能出现破碎现象, 且汽车电子产品一般塑封在塑胶里面, 起到保护作用, 塑封时电性能不能有较大偏差, 且电子产品不能破碎等; 这些都为车载用的铁氧体材料提出了更高的要求。

公司以前只专注民品用的电子产品和常规的铁氧体材料, 随着公司的向深度和广度的进一步发展, 目前正在涉足车载用电子产品, 这就必须要有相应的原材料作保证, 由于车载电子产品所用的原材料要具有宽温抗应力特性, 并不是一般的铁氧体材料, 这为我们研发车载电子产品所用的原材料提出了更高的要求和挑战, 本论文正是基于此而研究的。

## 2 实验部分

### 2.1 配方的设计

#### ①制备浆料<sup>[1]、[2]</sup>

铁氧体原粉的制备。铁氧体原粉包括氧化铁、氧化镍、氧化铜和氧化锌等。设计了车载用的宽温抗应力新材料配方和传统材料配方。

将氧化铁、氧化镍、氧化铜、氧化锌按照各自的组分进行混合球磨, 在 $850^\circ\text{C}$ 预烧成铁氧体原粉, 然后将铁氧体原粉放在砂磨机中砂磨, 并同时按照配方进行添加小料, 将粒度控制在D50为 $0.7 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 即可。在此粒度下, 铁氧体原粉的活性好, 可进行有效烧结。

铁氧体粉体喷雾造粒浆料的制备。该步骤是在搅拌球磨机中进行, 将铁氧体原粉和水以及分散剂溶液以一定的比例放入球磨机中球磨, 同时将粘结剂溶液、增塑剂溶液、脱模剂溶液加入到球磨机中球磨, 按如下比例加入: 铁氧体原粉的固体质量: 粘结剂溶液的固体质量: 分散剂溶液的固体质量: 增塑剂溶液的固体质量: 脱模剂溶液的固体质量 = 98:1.0:0.3:0.3:0.4。

#### ②制备铁氧体粉料<sup>[3]</sup>

将上面两种铁氧体的浆料运输至喷雾造粒机, 喷雾造粒机的生产控制参数为进口温度为 $190^\circ\text{C}$ ; 出口温度为 $105^\circ\text{C}$ ; 塔内负压为 $-5\text{Pa}$ ; 雾化器转数为 $750\text{rpm}$ ; 供料泵转数为 $21\text{Hz}$ , 制得所需的铁氧体粉料。

### 2.2 制备铁氧体磁环

将上面两种喷雾造粒后的粉料分别放入同一台干压机中, 模具为 $\phi 14.60\text{mm}$ 磁环, 进行压制成型, 得到铁氧体磁环坯体。分别进行烧结( $1020^\circ\text{C}/2\text{h}$ 、 $1050^\circ\text{C}/2\text{h}$ 、

1080℃ /2h、1100℃ /2h)，得到烧结后的磁环。

### 2.3 磁环测试

采用排水法测量样品的烧结密度；采用 Agilen 4990 阻抗分析仪测量绕线磁环（用直径 0.40mm 的漆包铜线绕磁环 26 圈，留 15mm 尾线，以便引出测试）电感量  $L_s$  及品质因数  $Q$ ，测试频率为 10kHz ~ 100MHz，再由电感量  $L_s$  计算磁导率  $\mu_i$ ；采用 VEGA 3 EPH 扫描电子显微镜观察磁环表面和截面形貌。

## 3 结果与分析

为了比较起见，这里首先给出两种粉料未烧结磁环的密度，均为 3.23g/cm<sup>3</sup>。

### 3.1 密度

磁环密度与烧结温度的关系如图 1 所示。

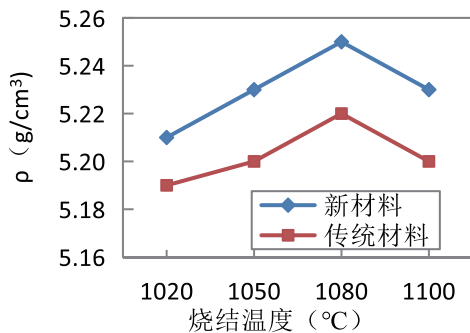


图 1 不同烧结温度磁环的密度

两种粉料压制的磁环整体呈现出随着烧结温度的提升，密度逐渐增大，当烧结温度为 1080℃，密度呈现最大值。后面磁环样品表面和截面微观结构观察将表明，这些磁环空隙很少，出现致密化、晶粒细小均一。其后，随着烧结温度的提升，磁环样品的密度呈现下降趋势，致密化程度下降，晶粒会异常长大。

### 3.2 磁导率

磁环 100kHz 下的磁导率随烧结温度的变化如图 2 所示。

两种粉料压制的磁环整体呈现出随着烧结温度的提升，样品的孔隙不断减少，逐渐致密化，磁环的磁导率  $\mu_i$  (100kHz) 有所上升。从图中可以看出，传统粉料在烧结温度 1050℃ 以前，磁导率  $\mu_i$  (100kHz) 基本符合要求，在 800 左右；但是烧结温度升到了 1100℃，温度只

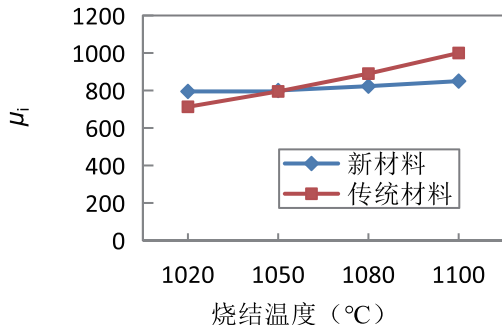


图 2 不同烧结温度磁环的磁导率

升高了 20℃，其磁导率  $\mu_i$  (100kHz) 到了 1000，磁导率波动较大。新材料在烧结温度 1050℃ 以前，磁导率  $\mu_i$  (100kHz) 基本符合要求，在 800 左右；即使烧结温度升到了 1100℃，其磁导率  $\mu_i$  (100kHz) 也为 800 左右，磁导率波动较小，并且符合理想的磁导率。可见新材料在烧结温度为 1080℃ 时，其磁导率  $\mu_i$  (100kHz) 为 800 左右，具有相对较好的电磁性能。

烧结温度影响材料的微观结构，根据 H.Rikukawa 模型<sup>[4]</sup>，起始磁导率与气孔率、晶界厚度成反比，与晶粒尺寸成正比。烧结温度较低时，固相反应和烧结致密化不能完全进行，造成晶界厚、均匀性差、气孔较多，因而起始磁导率较低。随着烧结温度的升高，晶粒逐渐长大，晶界变薄，气孔减少，晶粒趋于均匀，气孔呈球形，烧结密度趋于最大，晶界附近的内应力减小，畴壁移动阻力减小，故磁导率提高。

### 3.3 频谱特性

两种粉料压制的磁环的磁导率  $\mu_i$  和  $Q$  值与频率  $f$  的关系分别如图 3、图 4 所示。

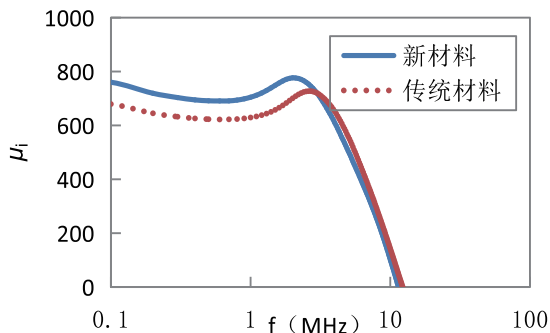


图 3 不同烧结温度磁环的  $\mu_i$ - $f$  图

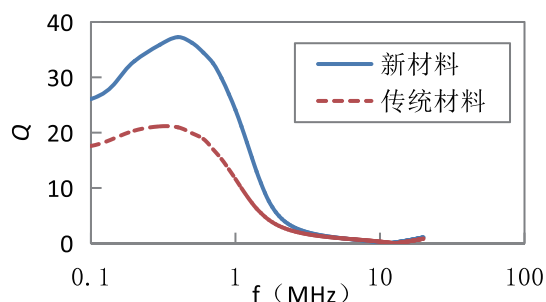


图 4 不同烧结温度磁环的  $Q$ - $f$  图

从图中可以看出，新材料的  $Q$  值明显高于传统材料的  $Q$  值。电感的  $Q$  值越高，其损耗越小，效率越高。

### 3.4 磁环压力磁导率变化率

车载电感要求抗应力作用，要求在压力作用下磁导率变化率较小，本实验借助磁环进行评估。利用推拉力计和频谱测试仪对两种磁环样品进行测试，用  $\phi$  0.4mm 的漆包线绕 12 圈，铜线对称绕，中间留有约 10mm 的间距，便于推拉力计测试头压在上面；对称的中间也留有约 10mm 的间距，以免铜线压坏，铜线两边的尾线约长 300mm，以便将其引在频谱测试仪上测试。设定测试条件为 100KHz/1V，不断对磁环施加压力，测试其电感量，然后根据公式计算相应的磁导率，观察在不同压力下磁导率的变化率，希望变化率越小越好。

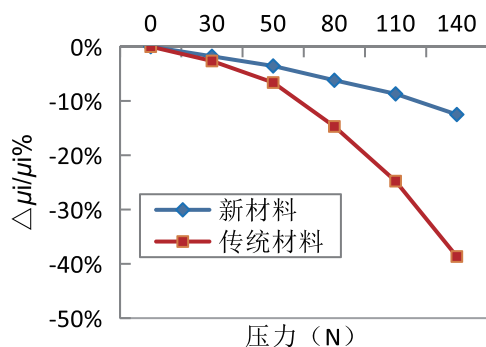


图 5 不同烧结温度磁环的压力-磁导率变化率图

从图 5 可以看出，车载用的宽温抗应力新材料所压的磁环，在不同压力下其磁导率变化率最小，在 100N 以前，其磁导率变化率小于 10%，是一种理想的抗应力材料。而传统材料的压力磁导率变化非常大，不具有抗应力作用。

### 3.5 磁环温度特性分析

各取两种粉料制作的磁环，测试  $\mu_i$  与温度  $T$  的关系。

用  $\phi$  0.40mm 的铜线绕磁环 20 圈，留有尾线长度为 1m，以便引出测试。测试条件：电感量 100KHz/1V；测试温度： $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$ 、 $40^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$ 、 $120^{\circ}\text{C}$ 、 $140^{\circ}\text{C}$ 、 $160^{\circ}\text{C}$ 、 $180^{\circ}\text{C}$ 、 $200^{\circ}\text{C}$ 。

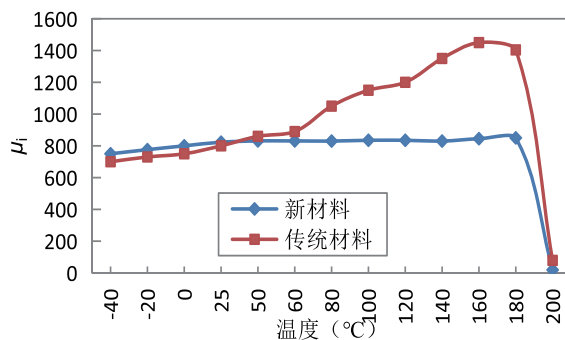


图 6 两种磁环的  $\mu_i$ - $T$  图

从图 6 中可以看出，新材料具有宽温特性， $20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$  的比温度系数  $\alpha_{\mu ir}$  为  $-0.1 \times 10^{-6}$ ，居里温度  $T_0$  为  $200^{\circ}\text{C}$ ；而传统的粉料并不具有宽温特性，这对于车载电子产品至关重要。汽车电子设备所使用的材料必须具有宽温特性，必须在  $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ ，产品的电性能不变。

### 3.6 磁环 SEM 分析

磁环表面和截面形貌的 SEM 观测结果如图 7 所示。

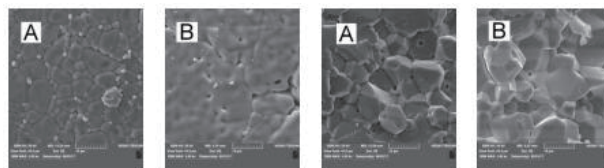


图 7 两种粉料做成的磁环表面和截面的 SEM 照片

图 7 为两种磁环样品的表面和截面微观结构，其中 A 为车载宽温抗应力新材料，B 为传统材料。从图片上看，新材料所压的磁环烧结后空隙很少，出现致密化、晶粒细小均一；而传统材料空隙较多，晶粒相对大一些。

### 3.7 粉料制作磁芯电感样品

由于前面对两种粉料的基础电磁性能进行了研究，用这两种粉料制作车载共模 ACW4532 磁芯电感产品作相应的性能对比。分析得出车载用宽温抗应力新材料，其电磁性能最佳，使用其粉料制作车载共模 ACW4532B 磁芯电感产品，端头附着力、盖板磁体强度、磁芯抗弯曲强度、高频振动、产品温度特性、产品高频特性等性能均非常好。

### 3.7.1 端头附着力

取新材料和传统材料做成的 ACW4532B 磁芯电感，将其贴片于 PCB 板上回流焊，对贴片后的磁芯进行端头附着力测试（测试工具：P-861 推拉力计），将 PCB 板贴于档板上，取相应的测试头装仪器上，自上而下接触磁芯 5sec ± 1 内完成测试。

新材料和传统材料制作的 ACW4532B 磁芯电感，其端头附着力测试如图 8 所示、测试数据如表 1 所示。

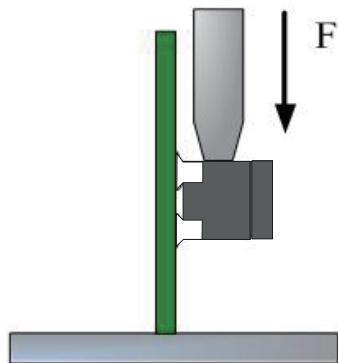


图 8 磁芯端头附着力测试示意图

### 3.7.2 盖板磁体强度

取两种粉料做成的 ACW4532B 磁芯盖板，将盖板放于贴片后磁芯背面台阶上，测试头自上而下匀速接触盖板 5sec ± 1 内完成测试。

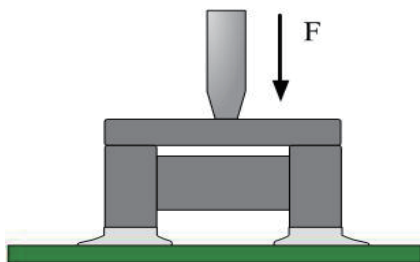


图 9 盖板磁体强度测试示意图

新材料和传统材料制作的 ACW4532B 盖板磁体，其盖板磁体强度测试示意图如图 9 所示、测试数据如表 2 所示。

### 3.7.3 磁芯抗弯曲强度

取两种粉料做成的 ACW4532B 磁芯电感，贴片于 PCB 板上过回流焊两次，对贴片后的磁芯进行端头附着力测试（测试工具：UTM6104 电子万能试验机），测试方法为将 PCB 板贴于档板上，取相应的测试头装仪器上，自上而下接触磁芯 60sec ± 5 内完成测试，测试完成后在显微镜下观察磁芯是否有裂纹或破损。其磁芯抗弯曲强度测试示意图如图 10 所示、测试数据如表 3 所示。

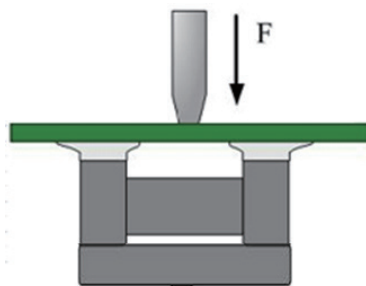


图 10 磁芯抗弯曲强度测试示意图

### 3.7.4 高频振动试验

取新材料和传统材料制作的 ACW4532B 磁芯电感贴片于 PCB 板上过回流焊两次，并记录贴片后产品电感量 Ls1；磁芯贴片后的 PCB 板置于设备上上进行高频震动试验；测试完成后在显微镜下观察磁芯是否有裂纹或破损；试验 PASS 后进行电感量 Ls2 测试；试验 PASS 后进行端头附着力测试，测试条件为 10~2000~10Hz，振动加速度为 5g，振动周期（10~2000~10Hz 的时间）为 20min，按 X、Y、Z 三个方向，每方向振动 12 循环 4h，共计 36 个循环。

表 1 两种材料制作的磁芯电感端头附着力测试数据

项目名称	端头附着力 (N)												判定
	SPEC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	AVG	
新材料	> 17.7	54.3	59.9	50.2	64.8	62.8	56.1	65.2	46.9	56.2	53.7	57.0	新材料制备的磁芯电极强度大于传统材料制备的磁芯
传统材料	> 17.7	33.6	35.4	40.3	36.7	45.2	42.9	36.7	38.9	37.3	40.9	38.8	

新材料制作的磁芯端头附着力要好于传统材料制作的 ACW4532B 磁芯。

表 2 两种材料制作的磁芯盖板磁体强度测试数据

项目名称	盖板磁体强度 (N)												结论
	SPEC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	AVG	
新材料	> 17.7	121.6	124.2	157.9	123.9	159.1	150.4	143.7	143.9	140.9	144.7	141.0	新材料制备的磁芯强度大于传统材料制备的磁芯
传统材料	> 17.7	100.1	99.3	101.3	95.4	103.5	105.9	96.8	91.9	110.2	99.7	100.4	

新材料制作的磁芯盖板磁体强度要好于传统材料制作的 ACW4532B 磁芯。

表 3 两种材料制作的磁芯抗弯曲强度测试

项目名称	极限弯曲值测试 (mm)											结论
	SPEC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
新材料	6mm	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	新材料压制磁芯满足 6mm 需求，而传统材料只能满足 2mm。
传统材料	2mm	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	

新材料压制磁芯满足 6mm 变形量需求，而传统材料只能满足 2mm 变形量。

表 4 两种粉料制作的 ACW4532B 磁芯高频振动试验数据

料别	实验前 电感量 (μH)	实验后 电感量 (μH)	变化率 (%)
新材料	11.10	11.00	0.90%
传统材料	11.15	11.03	1.08%

新材料制作的 ACW4532B 磁芯电感高频振动电感量的变化率要小于传统材料制作的 ACW4532B 磁芯电感。

12h。要求高频振动试验后测试前后电感量变化在 3% 左右 (测试条件: 100KHz/0.1V)。

### 3.7.5 产品温度特性

取新材料和传统材料做成的 ACW4532B 磁芯电感产品，测试电感量 μH 与温度 T 的关系，如图 11 所示。

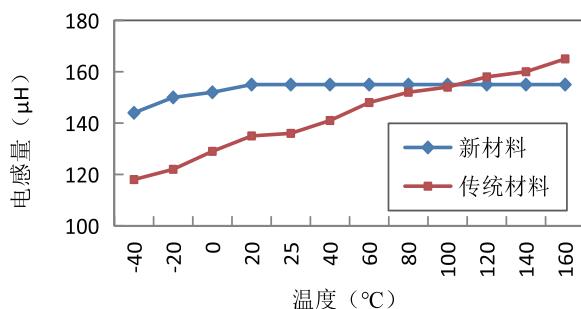


图 11 产品电感量-温度图

车载用的电子产品必须具有宽温特性，必须在 -40°C ~ +125°C，产品的电性能不变。从上图可以看出，采用新材料所生产的电感产品电性能非常温度，温度的影响非常小；而传统材料生产的电感，其电性能受温度波动较大。

### 3.7.6 产品高频特性

取新材料和传统材料做成的 ACW4532B 磁芯电感产品，测试产品的共模阻抗和差模阻抗，如图 12 所示。

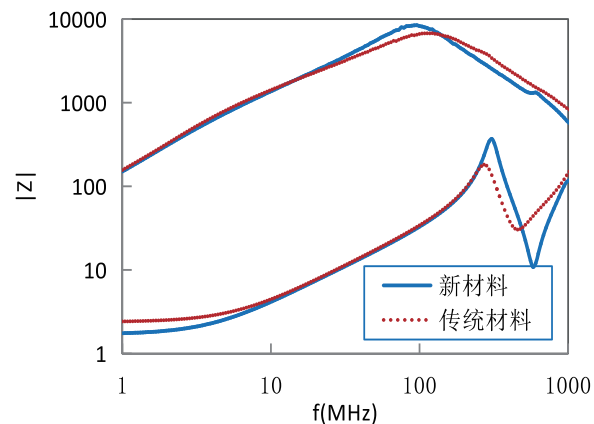


图 12 产品共模差模阻抗图

两种材料生产的 ACW4532B 电感产品，在 100MHz 下新材料共模阻抗比传统材料共模大，而差模阻抗在低频段新材料比传统材料小。因此，产品在滤波电路中既可以

下转170页