

# 超高频铈锌铁氧体的研究

王 鵬 殷 之 文

(中国科学院硅酸盐化学与工学研究所)

## 摘 要

研究了工艺因素和镧、铈、镍、钴添加物对铈锌铁氧体磁性能的影响。实验结果得出：(1)添加镧、铈氧化物对改进给定组成铈锌铁氧体的电、磁性能影响不大；(2)采用适当的工艺条件有利于样品电、磁参数的提高；(3)添加适量镍、钴氧化物可以提高铈锌铁氧体的品质因素，从而提高其使用频率。

超高频铁氧体是无线电电子工业发展中日益需要的一种半导性铁磁材料。以往应用于超高频段的磁性材料大都是羰基铁，由于羰基铁制造困难、价格贵，因而对超高频铁氧体的需要就更为迫切。

根据一般文献介绍，应用于超高频段的铁氧体主要有镍锌铁氧体和铈锌铁氧体两类。与镍锌铁氧体相比，铈锌铁氧体的原料便宜（铈用量小）、烧成温度低、制造工艺简单，此外铈铁氧体的磁致伸缩系数小、室温时饱和磁感应强度大，有利于高频损耗的降低。因此，不论从工业生产和磁性能来考虑，以铈锌铁氧体为基本系统来试制超高频铁氧体是一条较为适宜的途径。

关于铈锌铁氧体的磁性，1952年Robert<sup>[1]</sup>和1957年Валеєв<sup>[2]</sup>等都曾进行了工作，并指出随着铈铁氧体对锌铁氧体的比量的增长，所组成的铈锌铁氧体的使用频率也可逐步提高。一般来说，铈铁氧体与锌铁氧体的比量在4以上能适合于高频下使用，但使用频率最高也不超过75兆赫。本工作企图在此基础上一方面改进工艺，一方面根据尖晶石结构的特点，利用离子替代和离子填隙的方法来增加铈锌铁氧体的饱和磁矩，从而提高共振频率，降低高频损耗，以利于使用频率的增高。整个试验分三部分：

## 一、镧、铈氧化物对铈锌铁氧体磁性能的影响

铈锌铁氧体是一种尖晶石型的铁氧体磁性材料。它具有正、反尖晶石混合型的结构。铈铁氧体属反尖晶石结构，锌铁氧体属正尖晶石结构。在尖晶石型铁氧体中，除锌铁氧体以外，镧铁氧体也具有正尖晶石结构，而铈铁氧体则根据组成条件可以是正尖晶石，也可以是反尖晶石。为此，在一定组成的铈锌铁氧体中，用氧化镧、氧化铈替代部分氧化锌，以改变正尖晶石型锌铁氧体的组成，从而观察其磁性能的变化。

## 1. 样品制备

根据高频使用的要求，拟选了两个鋰鋅鐵氧体料方为基础，其分子式分别为 $4[\text{Li}_2\text{O} \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_6] \cdot (\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 和 $4.4[\text{Li}_2\text{O} \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3)_{4.8}] \cdot (\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 。在此二化学组成的基础上分别用氧化鎂和氧化鋇代替20%的氧化鋅。表1列出所进行試驗的料方編号和化学組成。

表1 料方編号和化学組成

料方編号 化学組成	LZ-1	LZ-2	LZ-3	LZ-4	LZ-5	LZ-6	备 注
$\text{Li}_2\text{O}$	15.4	16.0	15.4	16.0	15.4	16.0	化学組成 为克分子 百分数
$\text{ZnO}$	3.8	3.6	3.0	2.9	3.0	2.9	
$\text{CdO}$	—	—	0.76	0.72	—	—	
$\text{MgO}$	—	—	—	—	0.76	0.72	
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	80.8	80.4	80.8	80.4	80.8	80.4	

按照各个料方的化学組成，用上海氧化鐵紅厂出品的115号氧化鐵（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量在98%以上）、工业用碳酸鋰（純度99.5%以上）、化学純氧化鋅、氧化鋇和氧化鎂进行配料。以酒精为介质在鋼球磨筒中混磨4~6小时，然后烘干。把烘干的坯料分为两半，将其中一半以每平方厘米1吨的压力压成圓片，而后进行預燒，預燒温度为 $750^\circ\text{C}$ 保温3小时左右。預燒后的样品再放入鋼球磨筒中以水为介质进行細磨，直至大部分的顆粒达 $5\mu$ 以下为止，然后烘干备用。經預燒和不預燒的坯料，分别以每平方厘米1吨的压力做成 $\phi 5 \times 16$ 毫米的試样，以 $950^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C}$ 、 $1050^\circ\text{C}$ 三种不同的温度燒成，測其有效导磁率和有效品质因素并进行比较。

## 2. 測試結果和討論

样品的有效导磁率 $\mu_e$ 和有效品质因素 $Q_e$ 在BoonTon Q表上測得。用涂銀銅絲繞成繞圈測量了25兆赫、50兆赫和75兆赫三个頻率。进行25兆赫和50兆赫測量时用同一繞圈，75兆赫用另一繞圈。样品在測得有效导磁率和有效品质因素后，再測量气孔率和体积比重。表2列出各个坯料在不同燒成温度下的有效导磁率和有效品质因素，表3列出相应的气孔率和体积比重。

观察表2、表3可以得出：

1) 有效导磁率（ $\mu_e$ 值）的变化有如下的关系：

(1) 在 $950^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C}$ 、 $1050^\circ\text{C}$ 三种不同的燒成温度下，不論在25兆赫、50兆赫或是75兆赫的頻率下測試，經預燒的样品均較不經預燒的样品具有較高的有效导磁率。

(2) 在同一燒成温度下，LZ-2和以LZ-2为基的含鋇、鎂样品的有效导磁率，除少数例外外，均較LZ-1和以LZ-1为基的含鋇、鎂样品的为高。含鋇样品的有效导磁率較不含鋇样品的为高。含鎂样品与不含鋇鎂样品相比无显著差别。

表 2 預燒、燒成溫度對各個坯料的有效導磁率 and 有效品質因素的影響

編 号	25MC				50MC				75MC				備 注
	不經預燒		經 750°C 預 燒		不經預燒		經 750°C 預 燒		不經預燒		經 750°C 預 燒		
	$\mu_e$	$Q_e$	$\mu_e$	$Q_e$	$\mu_e$	$Q_e$	$\mu_e$	$Q_e$	$\mu_e$	$Q_e$	$\mu_e$	$Q_e$	
LZ-1	1.26	1.15	1.39	1.20	1.28	1.00	1.42	1.03	1.14	0.98	1.21	0.99	950°C 燒成, 保溫 2 小時
LZ-2	1.29	1.16	1.48	1.26	1.31	0.99	1.50	1.02	1.17	0.98	1.25	1.00	
LZ-3	1.32	1.20	1.67	1.37	1.34	1.03	1.72	1.01	1.18	0.99	1.35	0.91	
LZ-4	1.35	1.22	1.80	1.29	1.38	1.01	1.85	0.76	1.20	0.96	1.43	0.62	
LZ-5	1.42	1.25	1.44	1.26	1.43	1.02	1.46	1.03	1.22	0.98	1.23	1.00	
LZ-6	—	—	1.45	1.27	—	—	1.46	1.03	—	—	1.23	0.98	
LZ-1	1.51	1.30	1.65	1.34	1.55	0.98	1.70	0.97	1.29	0.85	1.34	0.86	1000°C 燒成, 保溫 2 小時
LZ-2	1.52	1.27	1.71	1.37	1.56	0.87	1.76	0.91	1.29	0.72	1.39	0.75	
LZ-3	1.55	1.31	1.84	1.16	1.60	0.87	1.92	0.36	1.31	0.66	1.47	0.31	
LZ-4	1.65	1.33	1.99	0.71	1.69	0.84	2.05	0.15	1.35	0.62	測不出		
LZ-5	1.59	1.27	1.71	1.38	1.61	0.77	1.76	0.95	1.32	0.59	1.37	0.78	
LZ-6	1.62	1.28	1.71	1.39	1.66	0.75	1.76	0.92	1.33	0.59	1.38	0.69	
LZ-1	1.75	1.33	1.97	0.62	1.83	0.42	測不出		1.43	0.31	測不出		1050°C 燒成, 保溫 2 小時
LZ-2	—	—	1.98	0.54	—	—	測不出		—	—	測不出		
LZ-3	1.72	1.30	2.05	0.32	1.77	0.47	測不出		1.41	0.38	測不出		
LZ-4	1.76	1.00	2.06	0.31	1.80	0.24	測不出		1.43	0.27	測不出		
LZ-5	1.74	1.26	2.10	0.57	1.78	0.37	測不出		1.41	0.32	測不出		
LZ-6	1.75	1.45	1.99	0.53	1.80	0.32	測不出		1.42	0.30	測不出		

( 3 ) 各个樣品的有效導磁率均隨燒成溫度的增高而增大。

( 4 ) 各个樣品以同一綫圈在 25 兆赫和 50 兆赫兩種不同頻率測量時，頻率對  $\mu_e$  值的影響不大。

2) 有效品質因素  $Q_e$  值的變化要視測試頻率和樣品的燒結溫度而定。在所測試的頻率範圍內， $Q_e$  值隨測試頻率的增高而降低。當測試頻率高於 25 兆赫時， $Q_e$  值隨所進行的燒成溫度的增高普遍下降，其中含鎳樣品  $Q_e$  值的降低更為顯著。當測試頻率為 25 兆赫時， $Q_e$  值的變化主要由樣品的燒結溫度來決定。顯然，在 1050°C 的溫度下燒成時，樣品的  $Q_e$  值已普遍地降低到比 1 小很多的數值。

3) 比較各个料方在不同燒成溫度和不同測試頻率下的  $\mu_e$  值和  $Q_e$  值得出：含鎳樣品在 950°C 左右溫度下燒成時，在測試頻率 50 兆赫以下有較高的  $\mu_e$  值和  $Q_e$  值，宜用於頻率較低的範圍。不含鎳鎂的樣品在 950°C~1000°C 溫度下燒成時，雖  $\mu_e$  值沒有含鎳樣品的高，但在 50 兆赫以上的頻率下，其  $Q_e$  值較高，宜用於 50 兆赫以上的頻率。在 LZ-1 或 LZ-2 基礎上以鎂代鋅對  $\mu_e$  與  $Q_e$  值的提高無顯著效果。

4) 從樣品的气孔率和體積比重可以看出，經預燒的樣品均較不經預燒的樣品具有較低的气孔率和較高的體積比重，在同一燒成溫度下含鎳的和以 LZ-2 為基的各樣品的體積比重又較不含鎳的和以 LZ-1 為基的各樣品的體積比重大。這些經預燒的，含鎳的和以 LZ-2 為基的各樣品的較高的體積比重，可以部分地說明它們較相應樣品具有較高

表 3 各个坯料在不同燒成溫度下的實業性能

編 号	气 孔 率 (%)		吸 水 率 (%)		体 积 比 重		备 注
	不經預燒	經 預 750°C 燒	不經預燒	經 預 750°C 燒	不經預燒	經 預 750°C 燒	
LZ-1	57.4	37.9	29.3	12.9	2.0	3.0	} 950°C 燒成, 保溫 2 小时
LZ-2	56.8	35.3	28.3	11.6	2.0	3.1	
LZ-3	54.7	22.4	25.8	6.2	2.1	3.6	
LZ-4	53.2	5.9	24.3	1.4	2.2	4.3	
LZ-5	—	38.3	—	13.2	—	2.9	
LZ-6	52.7	38.5	34.0	13.3	2.2	2.9	
LZ-1	42.0	15.8	15.4	4.0	2.7	4.0	} 1000°C 燒成, 保溫 2 小时
LZ-2	42.9	11.4	15.5	2.7	2.7	4.2	
LZ-3	37.3	6.6	12.6	1.6	3.0	4.2	
LZ-4	30.0	0.3	9.2	0.1	3.3	4.6	
LZ-5	38.4	15.7	13.2	3.7	2.9	4.0	
LZ-6	36.0	14.5	12.1	3.6	2.9	4.1	
LZ-1	18.6	0.5	4.8	0.1	3.8	4.6	} 1050°C 燒成, 保溫 2 小时
LZ-2	16.8	0.1	4.4	0.1	3.9	4.6	
LZ-3	17.9	—	4.7	—	3.9	4.5	
LZ-4	11.3	0.2	2.8	—	4.1	4.5	
LZ-5	15.9	0.3	4.1	0.1	3.9	4.6	
LZ-6	13.2	0.4	3.4	0.1	4.0	4.6	

的 $\mu_e$ 值。当燒成溫度提高到1050°C时，除个别者外，各个样品的气孔率和体积比重均相接近，而它們的 $\mu_e$ 与 $Q_e$ 值也相接近了。这說明了預燒和鎳鎂添加物的引入主要在于影响鋰鋅鐵氧体的燒結性，因而影响了它們的磁性参数的变化。

## 二、某些工艺因素对鋰鋅鐵氧体磁性的影响

鐵氧体磁性能的改进除采用添加物外，制造工艺条件也是一項較为重要的因素<sup>[8]</sup>。为了进一步改进鋰鋅鐵氧体的磁性参数，进行了不同預燒溫度和不同成形压力的試驗。

### 1. 样 品 制 备

根据鎳、鎂氧化物对鋰鋅鐵氧体磁性能影响的試驗結果，选择了LZ-2和LZ-3两个料方进行了試驗。預燒溫度是根据鋰鋅鐵氧体的燒結溫度和起始反应溫度而拟定，分为750°C和850°C两种。成形压力也分为每平方厘米1吨和每平方厘米2吨两种。在正式成形前又分預压和不預压两类，預压的压力为1吨/平方厘米。

試样做成 $\phi 12 \times \phi 6 \times 2$ 毫米的小圓环和 $\phi 35 \times 2$ 毫米的圓片。最終燒成溫度为 $1000^\circ \pm 10^\circ \text{C}$ 左右。

### 2. 測試結果和討論

样品的导磁率和品质因素是用小圓环在頻率为50KC/S~50MC/S的Marconi Q表上

測得。測試頻率為 5 兆赫。測試時用 26<sup>#</sup>漆包綫繞成綫圈。樣品導磁率溫度系數的測量是在 LCCG-1 型電容電感測試儀上進行。樣品放在小型的管型爐中加熱，溫度由與樣品放在一起的玻璃溫度計直接讀出。每隔 20°C 測量一次電感，共測量了 20°C、40°C、60°C 三個溫度，從而算出其溫度系數。樣品的電阻系數是用圓片在 S. W. 1 型的萬用電橋上測得。測量時在銅極和樣品間另加一層錫薄作為電極。樣品在測好導磁率 and 品質因素後，再測量氣孔率和體積比重。表 4-7 列出預燒溫度、成形壓力對樣品導磁率、品質因素、電阻系數、導磁率溫度系數和氣孔率、體積比重的影響。

從表 4 看出，當預燒溫度從 750°C 提高到 850°C 時，樣品的導磁率稍有提高，品質因素  $Q$  值變化不大。樣品在最終成形前的預壓也可提高樣品的導磁率。對燒結溫度較低的含錫樣品來說，預壓會略為降低其  $Q$  值。樣品的成形壓力從每平方厘米 1 噸增大至每平方厘米 2 噸時，一般來說無顯著影響。

從樣品的體積電阻系數來看，不論經那種溫度預燒，成形前進行預壓和成形壓力對它均無顯著影響，提高預燒溫度可使 LZ-2 樣品的體積電阻系數略為降低。

從表 7 所示樣品在不同工藝條件下的氣孔率和體積比重可以看出，預壓和較高溫度預燒將幫助樣品加速反應，有利於樣品的燒結，因而提高了它們的導磁率。然而對於含錫的 LZ-3 料方來說，經 1000°C 燒成後其氣孔率已不很大。預壓和提高預燒溫度可以使它

表 4 預燒溫度、成形壓力對樣品導磁率和品質因素的影響

編 號	5 兆 赫				備 注
	750°C 預 燒		850°C 預 燒		
	$\mu$	$Q$	$\mu$	$Q$	
LZ-2-1	7.2	—	9.9	85	樣品在正式成形前不經預壓，成形壓力為 1 噸/平方厘米
LZ-2-2	7.5	94	10.5	90	樣品在正式成形前不經預壓，成形壓力為 2 噸/平方厘米
LZ-2-1'	12.9	93	12.4	92	成形前經預壓，成形壓力為 1 噸/平方厘米
LZ-2-2'	12.7	92	—	—	成形前經預壓，成形壓力為 2 噸/平方厘米
LZ-3-1	16.4	77	19.2	77	同 上
LZ-3-2	16.6	76	20.1	74	
LZ-3-1'	28.0	60	31.0	62	
LZ-3-2'	—	—	32.8	64	

表 5 預燒溫度、成形壓力對樣品電阻系數的影響

編 號	750°C 預 燒 $\Omega\text{-cm}$	850°C 預 燒 $\Omega\text{-cm}$	備 注
LZ-2-1	$2.2 \times 10^7$	$1.7 \times 10^8$	編號說明同表 4
LZ-2-2	$2.5 \times 10^7$	$2.7 \times 10^8$	
LZ-2-1'	$3.9 \times 10^7$	$8.8 \times 10^8$	
LZ-2-2'	—	—	
LZ-3-1	$3.9 \times 10^4$	$3.9 \times 10^4$	
LZ-3-2	$3.5 \times 10^4$	$2.6 \times 10^4$	
LZ-3-1'	—	$3.7 \times 10^4$	
LZ-3-2'	$3.8 \times 10^4$	$3.6 \times 10^4$	

們反应得更为完善,气孔率更趋降低。这样,导磁率虽有增大,而品质因素却相应降低了。

綜合本實驗的結果可以作出結論：預压、預燒对加速反应和提高样品电、磁参数肯定是有利的,但对所采用的預压压力,特别是它們的預燒溫度必須与样品的最后燒成溫度相配合,不掌握这一規律,也不可能获得滿意的結果。

表 6 預燒溫度、成形压力对样品导磁率溫度系数的影响

編 号	750°C 預燒	850°C 預燒	備 注	編 号	750°C 預燒	850°C 預燒	備 注
	$\frac{\Delta\mu_{\alpha}}{\Delta T^{\mu_{\alpha}}} \times 10^6$	$\frac{\Delta\mu_{\alpha}}{\Delta T^{\mu_{\alpha}}} \times 10^6$			$\frac{\Delta\mu_{\alpha}}{\Delta T^{\mu_{\alpha}}} \times 10^6$	$\frac{\Delta\mu_{\alpha}}{\Delta T^{\mu_{\alpha}}} \times 10^6$	
LZ-2-1	715	785	編号說明同表 4	LZ-3-1	1,400	1,600	編号說明同表 4
LZ-2-2	765	1,050		LZ-3-2	1,600	1,550	
LZ-2-1'	1,015	1,170		LZ-3-1'	—	1,600	
LZ-2-2'	—	1,000		LZ-3-2'	1,600	1,500	

表 7 預燒溫度、成形压力对样品气孔率和体积比重的影响

編 号	气 孔 率 (%)		体 积 比 重		備 注
	750°C 預 燒	850°C 預 燒	750°C 預 燒	850°C 預 燒	
LZ-2-1	—	27.4	3.1	3.5	編号說明同表 4
LZ-2-2	—	23.1	—	3.6	
LZ-2-1'	11.6	14.8	4.2	4.0	
LZ-2-2'	15.2	13.8	4.0	4.0	
LZ-3-1	9.8	9.5	4.3	4.4	
LZ-3-2	7.2	5.6	4.4	4.5	
LZ-3-1'	2.1	1.9	4.5	4.6	
LZ-3-2'	1.7	1.3	4.6	4.6	

### 三、鋰-鎳-鋅混合鐵氧体磁性能的研究

从以上两部分工作可以看出,通过鎳、鎂氧化物的替代和工艺上的某些改进,还不足以提高給定組成鋰鋅鐵氧体的使用頻率。根据共振頻率与飽和磁矩的关系:

$$\omega_0 = KM_S / \mu_0$$

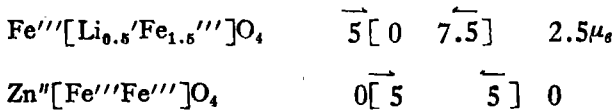
$\omega_0$  共振頻率

$\mu_0$  起始导磁率

$K$  通用常数

可以看出,当 $\mu_0$ 相同时, $M_S$ 越大, $\omega_0$ 就越大,也就是說高频損耗越小。因此如果能提高給定組成鋰鋅鐵氧体的飽和磁矩,就有可能提高使用頻率。

根据聶尔<sup>[4]</sup>的理論,鐵氧体的磁矩可以用尖晶石結構中四配位和六配位亚晶格上所佔有的d-电子数来計算。例如鋰鐵氧体的磁矩为 $2.5\mu_B$ (玻尔磁子),鋅鐵氧体的磁矩为零可用下式表示:



可以看出, 如果用具有 $d$ -电子的其他元素替代锂或在六配位亚晶格上增加 $d$ -电子, 有可能增加饱和磁矩。

一般知道, 阳离子在尖晶石结构中具有64个四配位和32个六配位的位置, 而对具有反尖晶石结构的铁氧体来说, 仅有16个六配位位置被三价铁离子及二价或一价其他阳离子所填隙, 尚有16个六配位位置是空着的。因此, 如果能在这16个未被填隙的六配位里, 使它被带有 $d$ -电子的离子所占据, 则根据海森堡的理论有可能提高铁氧体的磁矩。由此可以推得, 如果在组成中添加过量具有 $d$ -电子的离子, 就有可能提高给定组成的磁矩。

在一般尖晶石型铁氧体中, 虽然锰铁氧体( $\text{Mn}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ )和铁铁氧体( $\text{Fe}_2^{++}\text{Fe}_4\text{O}_9$ )在液态空气温度下的饱和磁矩都很大, 但锰铁氧体的居里温度低, 在室温时的饱和磁矩已大大下降, 而铁铁氧体的电阻极小( $\rho_r = 10^{-2}\Omega\text{-cm}$ ), 即使在550KC/S下也要产生涡流, 都不适于本工作的要求。钴铁氧体的饱和磁矩虽也较大, 但导磁率低, 磁致伸缩系数大, 也不宜于大量应用。镍铁氧体的饱和磁矩虽不高, 但没有其他尖晶石铁氧体那许多的缺点, 显然用镍替代部分锂和同时添加过量镍有可能提高饱和磁矩, 有利于使用频率的提高。

根据以上分析, 进行了微量氧化钴和过量氧化镍(用量不超过20%)对锂镍锌混合铁氧体磁性能的影响的研究。

### 1. 样品制备和测试结果

试样制备与前述两部分的制造工艺相同。按照料方的化学组成进行配料, 然后混磨、烘干、制成样品, 在750°C温度下预烧, 再用钢球磨筒粉碎烘干, 以每平方厘米1吨的压力进行预压, 粉碎后过20号筛, 以每平方厘米2吨的压力最后成形。

试样做成 $\phi 5 \times 16$ 毫米的小圆棒、 $\phi 12 \times \phi 6 \times 2$ 毫米的小圆环和 $\phi 35 \times 2$ 毫米的圆片三种, 最终烧成温度为950°C。

用小圆棒测量有效导磁率 $\mu_e$ 和有效品质因素 $Q_e$ , 小圆环测量导磁率 $\mu$ 和品质因素 $Q$ 值, 圆片测量电阻系数。所有导磁率和品质因素 $Q$ 值均在天津无线电器材厂出品的YK-1型 $Q$ 表上测得, 用同一线圈测量了70MC/S、80MC/C、90MC/S、100M/S、110MC/S五个频率。图1示出锂镍铁氧体LZ-2中加入20%(克分子百分数)镍铁氧体和20%(克分子百分数)过量氧化镍后, 氧化钴对其在各测试频率下的有效品质因素和有效导磁率的影响。

图2示出氧化钴用量对80( $\text{Li}_2\text{O} \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) $\cdot$ 20( $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) $\cdot$ 20NiO铁氧体在各测试频率下的 $\mu_e$ 值和 $Q_e$ 值的影响。图3示出在固定添加1%氧化钴( $\text{Co}_2\text{O}_3$ )和20%过量氧化镍(NiO)时, 镍铁氧体在锂铁氧体中的百分含量对各测试频率下的有效导磁率和有效品质因素的影响。图4—6示出在固定组成的锂-镍-锌和锂-镍混合铁氧体中, 添加氧化镍对其在各测试频率下的 $\mu_e$ 值和 $Q_e$ 值的影响。

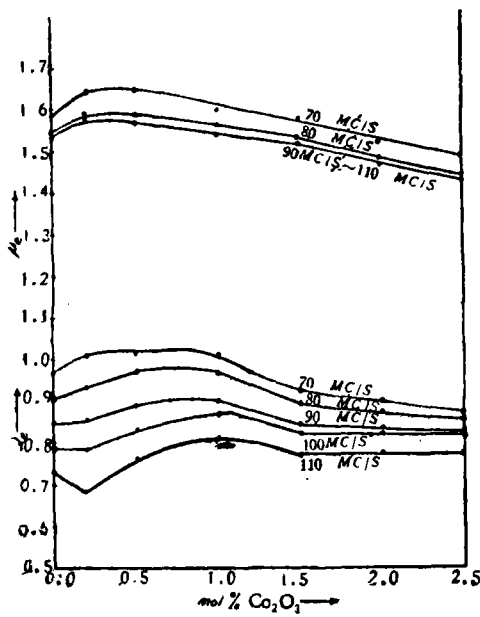


图 1 氧化鈷对LZ-2基鋰鋯鐵氧体有效品质因素和有效导磁率的影响

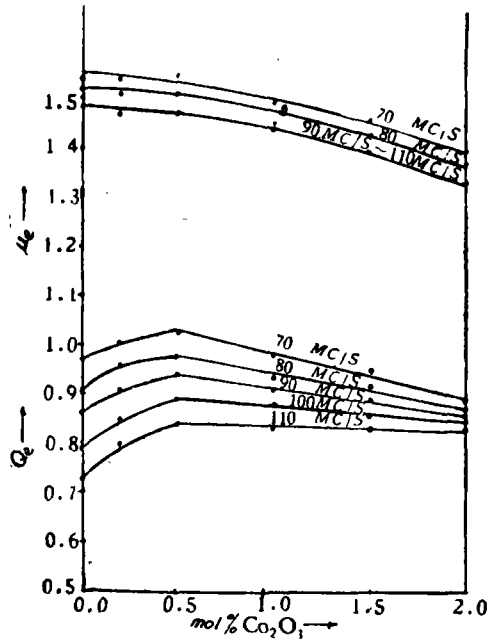
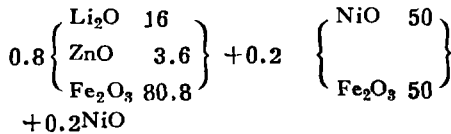
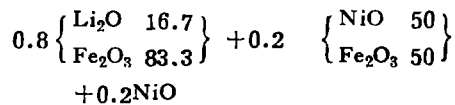


图 2 氧化鈷用量对80(Li<sub>2</sub>O·5Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)·20(NiO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)·20NiO 鐵氧体有效品质因素和有效导磁率的影响



## 2. 討 論

从图 1 和图 2 可以看出在鋰-鋯-鋯和鋰-鋯混合鐵氧体中加入少量的氧化鈷可以提高高频时的有效品质因素。不論是鋰-鋯-鋯混合鐵氧体或是鋰-鋯混合鐵氧体均显出当氧化鈷添加量在0.5~1.0%时, 可以获得高频下較高的有效品质因素。随着氧化鈷添加量的增加, 在各频率下Qe值的变化漸趋平稳和稍有降低。在图 3 中显出当固定添加1%氧化鈷和20%氧化鋯时, 在鋰鐵氧体中添加5~20%的

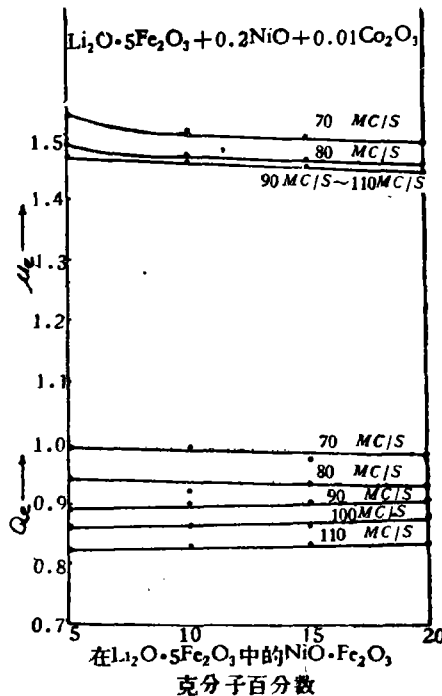


图 3 在固定 Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和NiO添加下, 鋯鐵氧体在鋰鐵氧体中的百分含量对試样有效导磁率和有效品质因素的影响



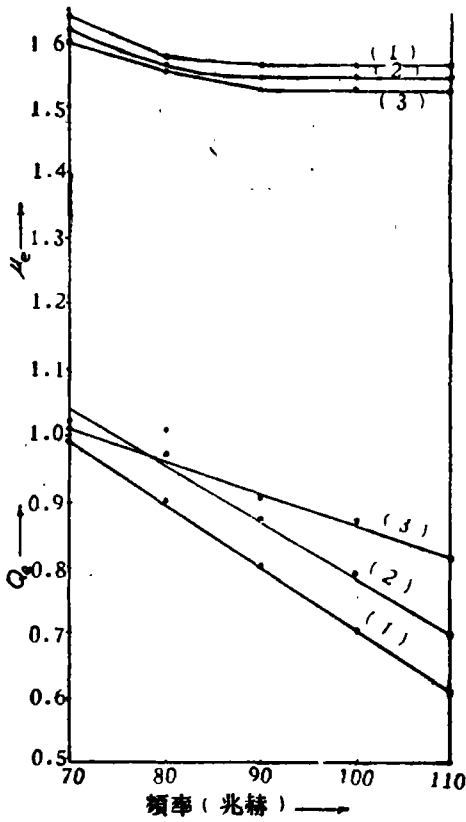


图 4 氧化镍对固定组成锂-镍-锌铁氧体在不同频率下有效导磁率和有效品质因数的影响

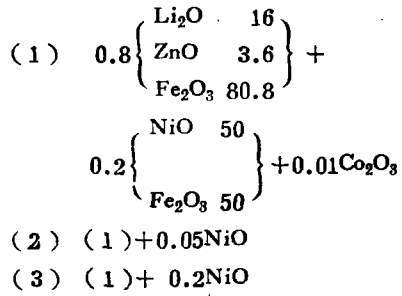
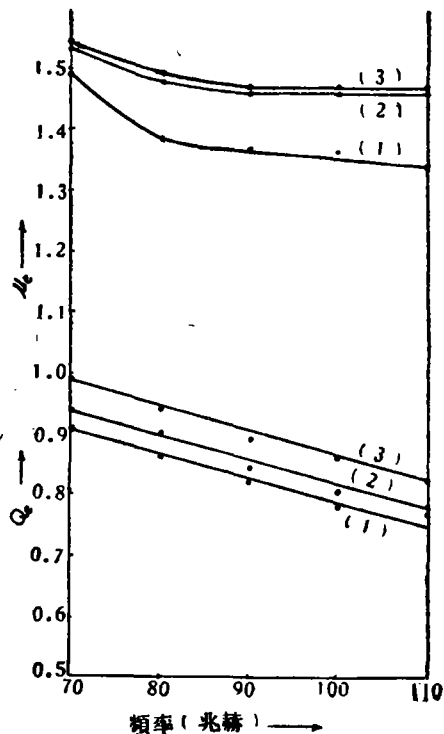
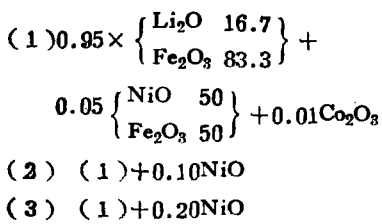


图 5 氧化镍对固定组成锂镍铁氧体在不同频率下有效导磁率和有效品质因数的影响



鎳鐵氧体，其有效品质因素 $Q_e$ 和有效导磁率 $\mu_e$ 变化不大。在图4~6中可以看出在此类混合鐵氧体中添加氧化鎳可以提高高频下的 $Q_e$ 值，随着氧化鎳添加量的增加，各频率下的 $Q_e$ 值逐步增大。各个不同的混合鐵氧体有着与其本身适合的氧化鎳添加量，一般来说，当添加氧化鎳至20%时， $Q_e$ 值随频率变化的斜度逐渐减小。

綜合氧化鋯、氧化鎳添加試驗的結果得到：在所研究的鋰-鎳-鋅混合鐵氧体和两种鋰-鎳混合鐵氧体（鎳鐵氧体的含量为5%和10%）中添加1%氧化鋯和20%氧化鎳可以获得高频下較高的有效品质因素。为了进一步比較和了解这两类混合鐵氧体的性能，在此二类混合鐵氧体中选择编号为LZ-8<sub>s</sub>和LZ-16<sub>s</sub>两个料方測量了它們的复数导磁率 $\mu'$ 和 $\mu''$ 以及导磁率温度系数和体积电阻系数。图7示出該二混合鐵氧体复数导磁率随频率变化的曲线，表8列出它們的导磁率温度系数和体积电阻系数。

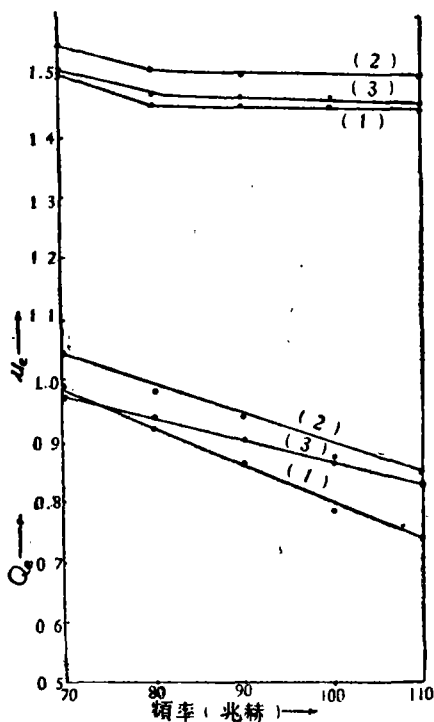


图6 氧化鎳对固定組成鋰鎳鐵氧体在不同频率下有效导磁率和有效品质因素的影响

- (1)  $0.90 \times \left\{ \begin{matrix} \text{LiO}_2 & 16.7 \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 & 83.3 \end{matrix} \right\} +$
- $0.10 \left\{ \begin{matrix} \text{NiO} & 50 \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 & 50 \end{matrix} \right\} + 0.01\text{Co}_2\text{O}_3$
- (2) (1) + 0.10NiO
- (3) (1) + 0.20NiO

表8 鋰-鎳和鋰-鎳-鋅混合鐵氧体的导磁率温度系数和体积电阻系数

編 号	导磁率温度系数 $\frac{\Delta\mu_a}{\Delta T\mu_a} \times 10^6$	体积电阻系数 $\rho_{rr}$ 欧姆-厘米	备 注
LZ-8 <sub>s</sub>	210	$5 \times 10^8$	
LZ-16 <sub>s</sub>	180	$5 \times 10^7$	

