



# 异形磁粉芯

## 技术公报

### Kool Mu<sup>®</sup>异形铁硅铝磁粉芯

异形铁硅铝磁芯 (Kool Mu) (包括E型磁芯、U型磁芯和块状磁芯) 适合用于大电流电感, 具备铁硅铝材料的全部优点: 低磁芯损耗、优异的温度性能、接近零的磁致伸缩和软饱和。大电流电感的典型应用有不间断电源 (包括不带变压器的不间断电源)、大功率PFC扼流圈、牵引装置和新能源的逆变器 (用于太阳能/风能/燃料电池转换)。

### XFLUX<sup>®</sup>异形铁硅磁粉芯

XFLUX材料亦提供E型和块状磁芯, 是中低频电感器和扼流圈的理想选择。XFLUX的高饱和磁通 (1.6特斯拉) 优势在大负载电感的设计和应用中, 得到了充分的体现。这些应用包括新能源逆变器、以及不间断电源。

铁硅铝 (Kool Mu) 和铁硅 (XFLUX) 磁芯的每种形状都具有不同的尺寸 (参见第2页表1), 与气隙铁氧体、铁粉芯和硅钢片相比具有优势。另外, 为了构造超大磁芯, 可通过定制和粘接这些异形磁芯来满足不同的定制设计。

#### 美磁国际

香港九龙尖沙咀漆咸道南路

1-3号13楼

电话: +852.3102.9337

+86.13911471417

13911471417@spang.com

#### 美磁总部

宾夕法尼亚州匹兹堡

邮编: 15238

电话: 1.800.245.3984

+1.412.696.1333

magnetics@spang.com



[www.mag-inc.com](http://www.mag-inc.com)

# 尺寸 表1

E型磁芯		A	B	C	D (最小值)	E (最小值)	F	L (平均值)	M (最小值)
1808E EI-187	mm	19.3±0.305	8.10±0.178	4.78±0.152	5.53	13.9	4.78±0.127	2.39	4.64
2510E E-2425	mm	25.4±0.381	9.53±0.178	6.35±0.102	6.22	18.7	6.35±0.127	3.18	6.24
3007E DIN 30/7	mm	30.10±0.457	15.0±0.229	7.06±0.152	9.55	19.8	6.96±0.203	5.11	6.32
3515E EI-375	mm	34.54±0.508	14.2±0.229	9.35±0.178	9.60	25.2	9.32±0.203	4.45	7.87
4017E EE 42/11	mm	42.85±0.635	21.1±0.305	10.8±0.254	14.9	30.30	11.9±0.254	5.94	9.27
4020E DIN 42/15	mm	42.85±0.635	21.1±0.330	15.4±0.254	14.9	30.35	11.9±0.254	5.94	9.27
4022E DIN 42/20	mm	42.85±0.635	21.1±0.330	20.0±0.254	14.9	30.35	11.9±0.254	5.94	9.27
4317E EI-21	mm	40.87±0.610	16.5±0.279	12.5±0.178	10.3	28.32	12.5±0.300	6.05	7.87
5528E DIN 55/21	mm	54.86±0.813	27.56±0.406	20.6±0.381	18.5	37.49	16.8±0.381	8.38	10.2
5530E DIN 55/25	mm	54.86±0.813	27.56±0.406	24.6±0.381	18.5	37.49	16.8±0.381	8.38	10.2
6527E Metric E65	mm	65.15±1.27	32.51±0.381	27.00±0.406	22.1	44.19	19.7±0.356	10.0	12.0
7228E F11	mm	72.39±1.09	27.94±0.508	19.1±0.381	17.7	52.62	19.1±0.381	9.53	16.8
8020E Metric E80	mm	80.01±1.19	38.10±0.635	19.8±0.381	28.01	59.28	19.8±0.381	9.91	19.8
8024E	mm	80.01±1.19	24.05±0.635	29.72±0.381	14.02	59.28	19.8±0.381	9.91	19.8
8044E	mm	80.01±1.19	44.58±0.635	19.8±0.381	34.36	59.28	19.8±0.381	9.91	19.8
114LE	mm	114.3±0.762	46.18±0.381	34.93±0.381	28.60	79.50	35.10±0.381	17.2	22.1
130LE	mm	130.3±3.81	32.51±0.305	53.85±1.27	22.1	108.4	20.0±0.762	10.0	44.22
160LE	mm	160.0±2.54	38.10±0.635	39.62±1.27	28.14	138.2	19.8±0.762	9.91	59.28

U型磁芯*		A	B	C	D	E	L
3112U	mm	31.24±0.51	11.2±0.26	12.1±0.39	2.54	14.2	8.26
4110U	mm	40.64±0.51	11.2±0.51	9.53±0.39	2.54	23.6	8.38
4111U	mm	40.64±0.51	11.2±0.26	12.1±0.39	2.54	23.6	8.38
4119U	mm	40.64±0.51	11.2±0.26	19.1±0.39	2.54	23.6	8.38
5527U	mm	54.86±0.64	27.56±0.51	16.3±0.39	16.7	33.78	10.5
5529U	mm	54.86±0.64	27.56±0.51	23.2±0.39	16.5	33.02	10.5
6527U	mm	65.15±1.4	32.51±0.31	27.00±0.41	22.1	44.22	10.0
6533U	mm	65.15±1.4	32.51±0.31	20.0±0.41	19.6	39.24	12.5
7236U	mm	72.39±0.89	35.56±0.64	20.9±0.39	21.3	43.68	13.9
8020U	mm	80.01±0.89	38.10±0.64	19.8±0.39	28.14	59.28	9.91
8038U	mm	80.01±0.89	38.10±0.64	23.0±0.39	22.4	49.27	15.4

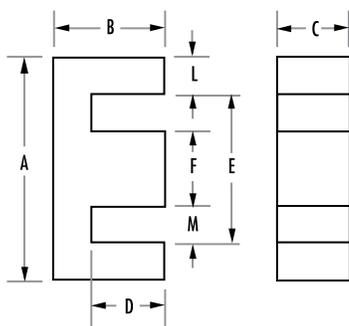
块状		A	B	C
4741B	mm	47.50±0.61	41.00±0.51	27.51±0.41
5030B	mm	50.50±0.51	30.30±0.30	15.0±0.26
5528B	mm	54.86±0.64	27.56±0.41	20.6±0.39
6030B	mm	60.00±0.51	30.00±0.25	15.0±0.25
7020B	mm	70.5±0.51	20.3±0.25	20.0±0.25
7030B	mm	70.5±0.5	30.3±0.25	20.0±0.2
8030B	mm	80.49±0.51	30.30±0.51	20.00±0.21
9541B	mm	95.00±0.61	41.00±0.51	27.51±0.41

\*目前仅提供铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 材料的U型磁芯。如需铁硅 (XFlux) 材料, 请联系美磁。

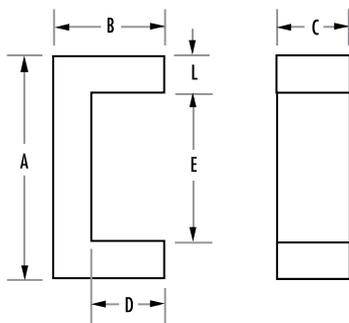
# 尺寸 图纸

# 磁性数据

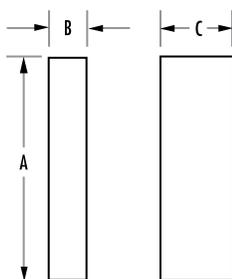
表2



E型磁芯



U型磁芯



块状

E型磁芯	$A_L \text{ nH/T}^2 \pm 8\%$				磁路长度 $l_e$ (mm)	截面积 $A_e$ (mm <sup>2</sup> )	体积 $V_e$ (mm <sup>3</sup> )
	26 $\mu$	40 $\mu$	60 $\mu$	90 $\mu$			
1808E	26	35	48	69	40.1	22.8	914
2510E	39	52	70	100	48.5	38.5	1,870
3007E	33	46	71	92	65.6	60.1	3,940
3515E	56	75	102	146	69.4	84.0	5,830
4017E	56	76	105	151	98.4	128	12,600
4020E	80	108	150	217	98.4	183	18,000
4022E	104	140	194	281	98.4	237	23,300
4317E	88	119	163	234	77.5	152	11,800
5528E	116	157	219	322	123	350	43,100
5530E	138	187	261	382	123	417	51,300
6527E	162	230	300	-	147	540	79,400
7228E	130	173	235	-	137	368	50,400
8020E	103	145	190	-	185	389	72,000
8024E	200	275	370	-	131.4	600	78,840
8044E	91	113	170	-	208	389	80,900
114LE	235	335	445	-	215	1,220	262,000
130LE	254	-	-	-	219	1,080	237,000
160LE	180	-	-	-	273	778	212,000

U型磁芯*	$A_L \text{ nH/T}^2 \pm 8\%$				磁路长度 $l_e$ (mm)	截面积 $A_e$ (mm <sup>2</sup> )	体积 $V_e$ (mm <sup>3</sup> )
	26 $\mu$	40 $\mu$	60 $\mu$	90 $\mu$			
3112U	-	92	111	179	65.6	101	6,630
4110U	-	56	78	109	85.2	80	6,820
4111U	-	72	95	138	85.2	101	8,600
4119U	-	110	151	218	85.2	159	13,600
5527U	67	-	-	-	168	172	28,900
5529U	85	-	-	-	168	244	41,000
6527U	89	-	-	-	219	270	59,100
6533U	82	-	-	-	199	250	49,800
7236U	87	-	-	-	219	290	63,500
8020U	64	-	-	-	273	195	53,200
8038U	97	-	-	-	237	354	83,900

块状	$A_L \text{ nH/T}^2 \pm 8\%$	磁路长度 $l_e$ (mm)	截面积 $A_e$ (mm <sup>2</sup> )	体积 $V_e$ (mm <sup>3</sup> )
4741B	**	**	**	53,600
5030B	**	**	**	23,000
5528B	**	**	**	31,200
6030B	**	**	**	27,000
7020B	**	**	**	28,600
7030B	**	**	**	42,800
8030B	**	**	**	48,800
9541B	**	**	**	107,200

\* 目前仅提供铁硅铝 (Kool Mu) 材料的U型磁芯。如需铁硅 (XFlux) 材料, 请联系美磁。  
\*\* 具体情况取决于配置设计方案。如需协助请联系美磁。

# 材料和直流偏置特性

开关调节电感器最重要的指标是它在直流偏置下提供电感量或保持有效磁导率的能力。磁导率与直流偏置图（图1）显示了铁硅铝（Kool M $\mu$ ）材料的磁导率随直流偏置的变化。随着直流偏置的增加，磁粉芯的分布式气隙使电感可以平缓的下降。在大多数应用中，这种摆动式电感是非常有用的，因为它提高了效率，减小了成品体积并扩大了工作频率范围。如果电流是恒定的，相对直流偏置曲线的软饱和和电感还增加了承受过载状况的能力。

铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 磁导率 vs. 直流偏置曲线

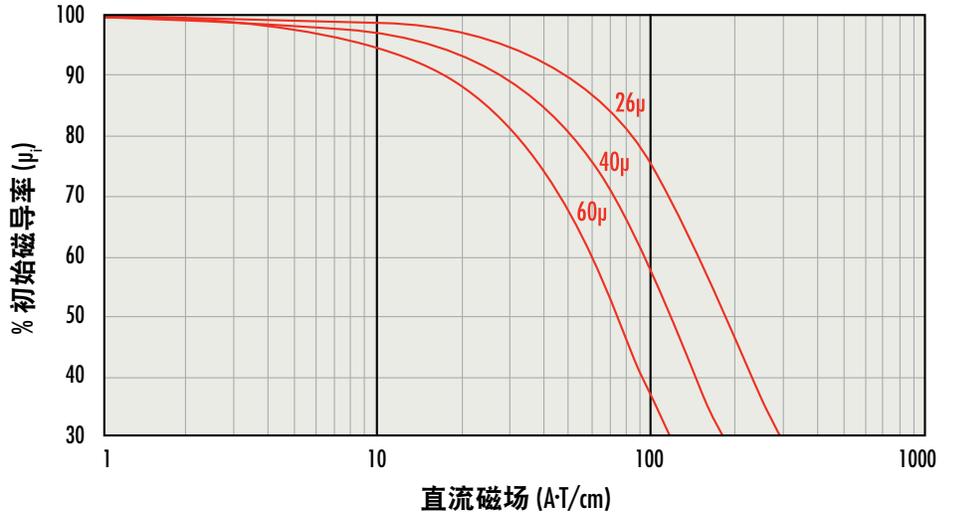


图1

## 漏磁通

当部分磁场超出了磁芯结构时，会产生漏磁通。所有变压器和电感器都具有一定量的漏磁。在无漏磁的理想磁芯中，电感值可通过以下公式计算得到：

$$L = \frac{.4 \pi \mu N^2 A_e 10^{-6}}{l_e}$$

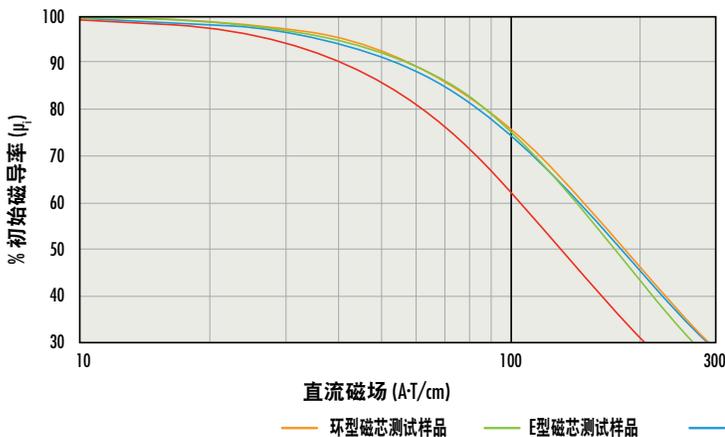
L = 电感 (mH)  
 $\mu$  = 磁芯磁导率  
 N = 匝数

$A_e$  = 有效截面积 (mm<sup>2</sup>)  
 $l_e$  = 磁芯磁路长度 (mm)

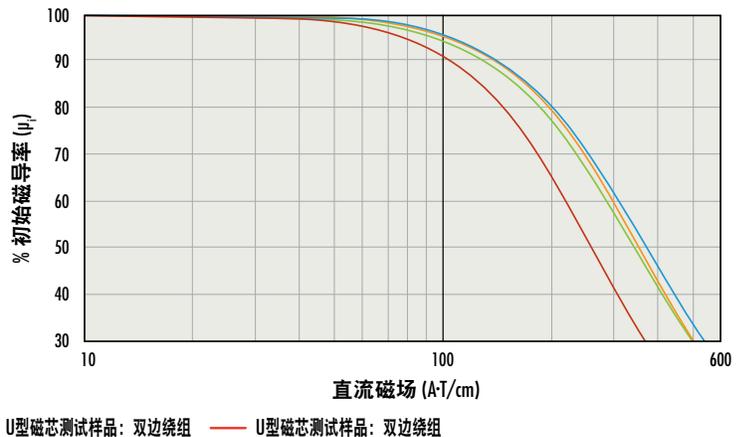
在低磁导率材料中，漏磁将导致测量电感比利用上述公式计算得到的电感值要高。漏磁导致高出的这部分电感明显会受到线圈匝数、线圈设计方案以及磁芯几何形状的影响。这些因素甚至还会影响直流偏置性能和磁芯损耗。

以下样品对比测试结果展示了不同形状或绕线的磁芯的直流偏置性能。对比双边绕线的U型磁芯，仅单边绕线其偏置性能明显逊色。双边绕线的U型磁芯和E型、环形磁芯偏置性能相当。

26 $\mu$ 铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 磁导率 vs. 直流偏置对比

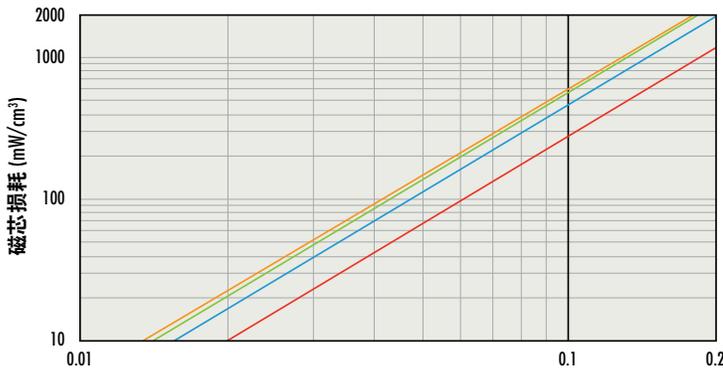


26 $\mu$ 铁硅 (XFlux®) 磁导率 vs. 直流偏置对比



通过以下测试结果，我们也可看到磁芯类型对磁芯损耗的影响。仅单边绕线的U型磁芯的磁芯损耗明显最低，其次是双边绕线的同类U型磁芯，再其次是E型磁芯，最后是环型磁芯。

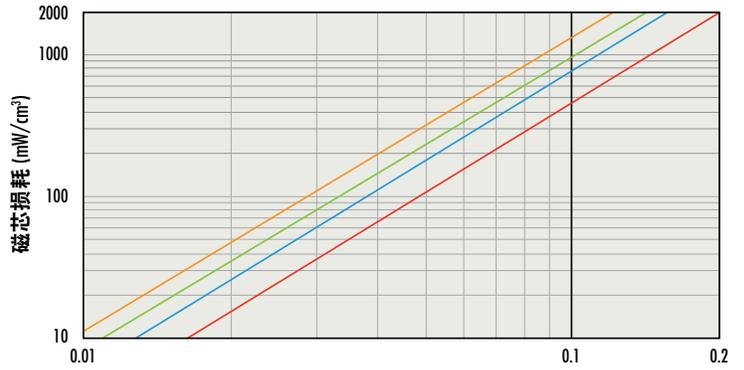
26μ铁硅铝 (Kool Mμ®) 磁芯损耗密度对比, 100 kHz



磁通密度 (特斯拉)

— 环型磁芯测试样品 — E型磁芯测试样品 — U型磁芯测试样品: 双边绕组 — U型磁芯测试样品: 单边绕组

26μ铁硅 (XFμ®) 磁芯损耗密度对比, 100 kHz



磁通密度 (特斯拉)

磁芯的形状尺寸也会影响漏感值。以E型为例，绕线覆盖越长磁通路径的设计会产生越少的漏感，反之亦然。对于同样长度的线包，绕线密度越大，线包漏感越少。举例来说，100圈的线包产生的漏感占总感值比例会远少于5圈的线包。所以美磁的E型磁芯通常是按照绕满100或200圈线包来测定 $A_L$ 值。U型磁芯的 $A_L$ 值是按照单边绕线的线包来确定的。

## 外部漏磁场

当使用E型磁芯、U型磁芯或块状磁芯时，必须考虑外部漏磁场，磁芯形状会影响漏磁通。对于异形磁粉芯形状（E型磁芯、U型磁芯和块状磁芯）而言，其大部分磁芯都围绕着绕组，因而外部漏磁场要大于绕组围绕铁心缠绕的环型磁芯。

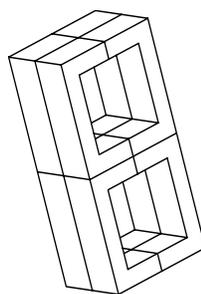
E型磁芯、U型磁芯和块状磁芯不能与金属支架组合，因为漏磁通可能会在支架中引起涡流加热，布置电路板时，必须考虑漏磁场。易受杂散磁场影响的元件应与磁芯隔开一定距离。有关本主题的更多信息，请访问美磁网站下载技术文件《铁硅铝 (Kool Mμ) E型磁芯的漏磁通问题》(Leakage Flux Considerations on Kool Mμ E Cores)。

## 特殊设计和组合问题

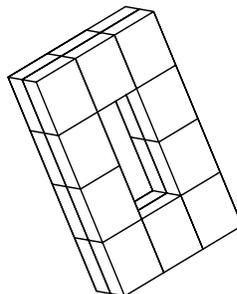
许多应用需要特定的装配件，甚至定制的磁芯。磁粉芯的材料特性以及形状的灵活性使此类磁芯成为定制组合配件的理想选择。

磁粉芯块状间通常不需要额外增加气隙，因为磁粉芯材料本身已存在分布式气隙。同时，不需要极端光滑的结合面（例如在铁氧体中所采用的）因为块状之间很小的附带间隙不会增加明显的额外气隙，对电感不会造成明显降低。

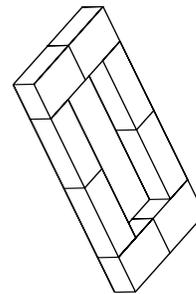
用于组合块体的粘接剂通常需要比那些用于组合铁氧体的粘接剂厚，因为磁粉芯表面更粗糙并且有更多孔。为确保粘接牢固，磁粉芯可能会需要使用双倍的粘接剂。



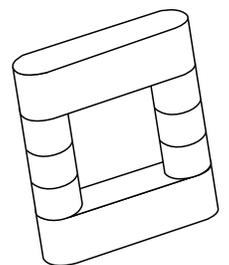
8个堆叠的6527U  
磁芯以制造 (1)  
130LE组  
 $A_L = 254 \pm 8\%$  (26μ)



20个4741B  
块状磁芯  
 $A_L = 189 \pm 8\%$  (26μ)



8个6030B  
块状磁芯  
 $A_L = 32 \pm 8\%$  (26μ)



圆柱和椭圆  
磁芯组合  
请联系美磁了解  
更多信息。

# 与开气隙铁氧体对比

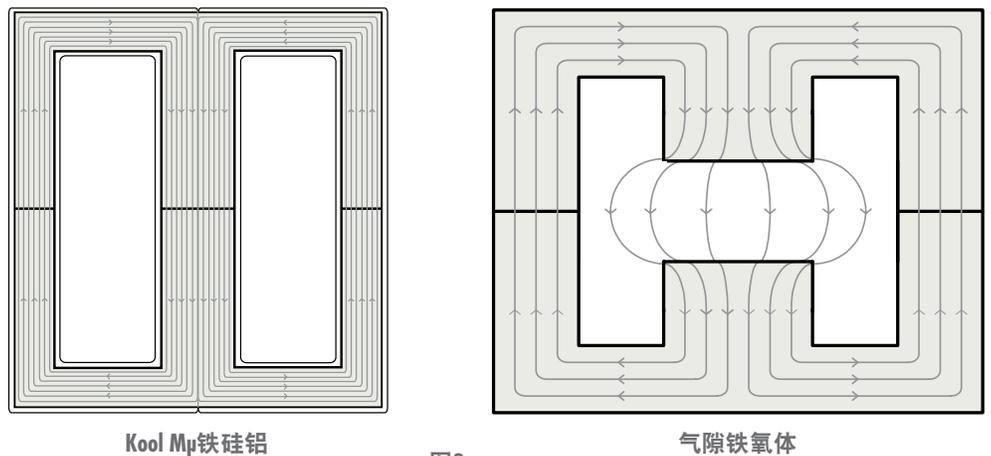
## 与开气隙铁氧体相比，磁粉芯的优点包括：

- **软饱和：**铁氧体必须设计在偏置曲线饱和点前的平坦安全区域内。磁粉芯则可将工作范围扩大到整个可控的平缓下降的区域（图3）。
- **磁通量：**磁粉芯在电感下降50%位置的磁通量超过铁氧体磁通量两倍以上。所以同样条件下，磁粉芯的设计尺寸相比铁氧体减少35%。
- **温度：**铁氧体的磁通量随温度下降，而磁粉芯的磁通量则保持相对恒定。
- **容错：**软饱和和曲线使磁粉芯设计本身具有容错能力，而开气隙铁氧体则没有。
- **边缘损耗：**磁粉芯不会发生边缘损耗，而间隙铁氧体有很大的边缘损耗。

尽管高品质铁氧体磁芯损耗低于磁粉芯损耗，但铁氧体通常需要降低有效磁导率，以防止在高电流下达到饱和。由于初始磁导率很高，所以铁氧体需要相对较大的气隙来降低有效磁导率。这种大气隙会导致气隙损耗，当比较材料损耗曲线时，通常会忽略这个复杂的问题。简单来说，由于气隙附近的边缘磁通，气隙损耗会极大地增加总损耗（图2）。同时边缘磁通与铜绕组相交，会在导线中产生涡流。

磁粉芯的优点包括软饱和，该特性旨在探索在材料中受控制的、平缓下降的工作范围；它们具有两倍于铁氧体的磁通量。这种平缓下降的设计还能够提高容错能力。此外，与铁氧体材料相比，磁粉芯的磁通量在温度变化时保持相对恒定。

公差方面，开气隙铁氧体磁芯相比磁粉芯更具优势。与大多数磁粉芯 $\pm 8\%$ 的公差相比，气隙铁氧体的电感通常只有 $\pm 3\%$ 的公差。气隙铁氧体有更多的尺寸和形状。由于铁氧体材料可具有较高的气隙有效磁导率，所以它非常适合相对较低偏置的应用，例如前馈变压器和低偏置电感器。



磁导率vs.直流偏置曲线

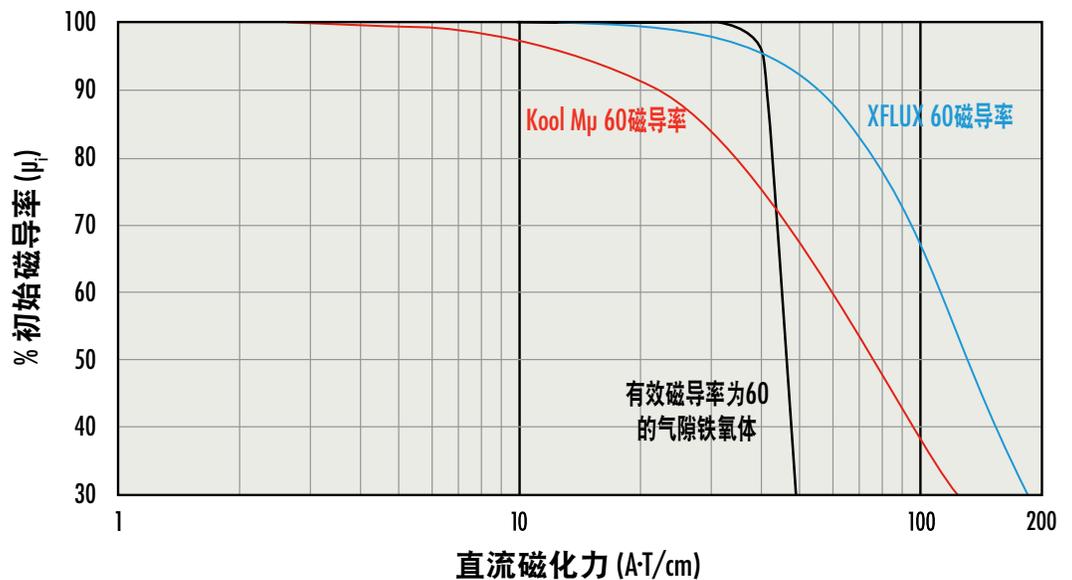


图3

# 与铁粉芯对比

与铁粉芯相比，磁粉芯的优点包括：

- **磁芯损耗**：磁粉芯的铁损低于铁粉芯（图4）。
- **接近零的磁致伸缩**：铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 非常适用于消除滤波电感中的音频噪音。
- **没有热老化**：磁粉芯无需使用有机粘结剂，因此不会发生热老化。所有带涂层的铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 和铁硅 (XFLUX) 环型磁芯的额定连续工作温度都为200°C。理论上来说，无涂层的磁粉芯可以在居里温度下使用，对于铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 而言，该温度为500°C；对于铁硅 (XFLUX) 而言，该温度为700°C。

铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 的优势包括低于铁粉芯的低磁芯损耗（图4），接近于零的磁致伸缩和，且没有热老化。

合金磁粉芯和铁粉芯（纯铁成分）具有类似的直流偏置特性，参见图5。除了承受直流偏置之外，开关调节电感器上还有一定的交流电流，一般为10kHz到300 kHz。这种交流电产生高频磁场，从而造成磁芯损耗并导致磁芯变热。这种效果在铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 磁芯上有所减弱，因此电感器的效率更高，温度更低。

100 kHz条件下60 $\mu$ 磁芯损耗密度对比

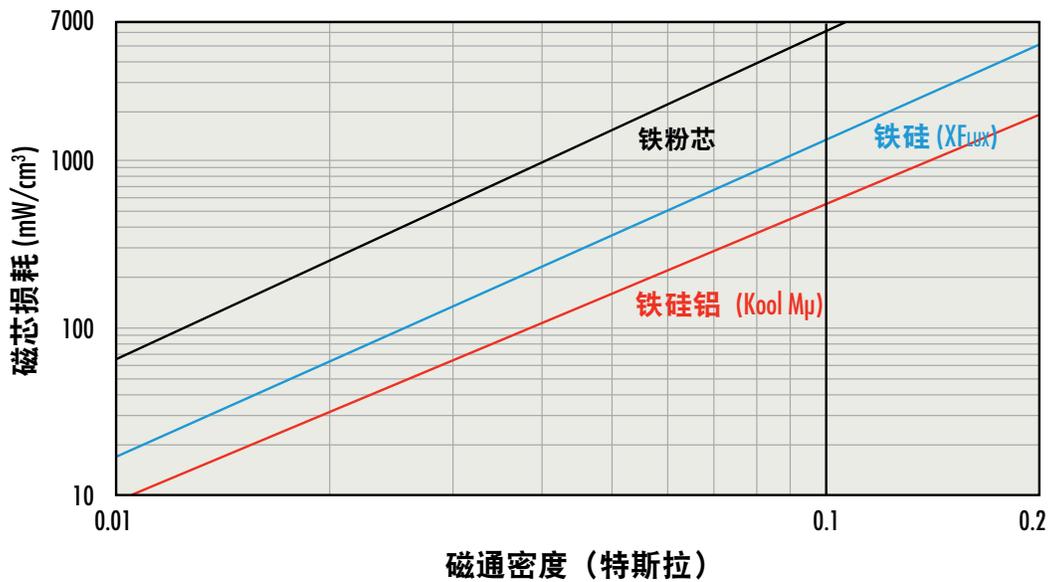


图4

60 $\mu$ 磁导率与直流偏置的对比

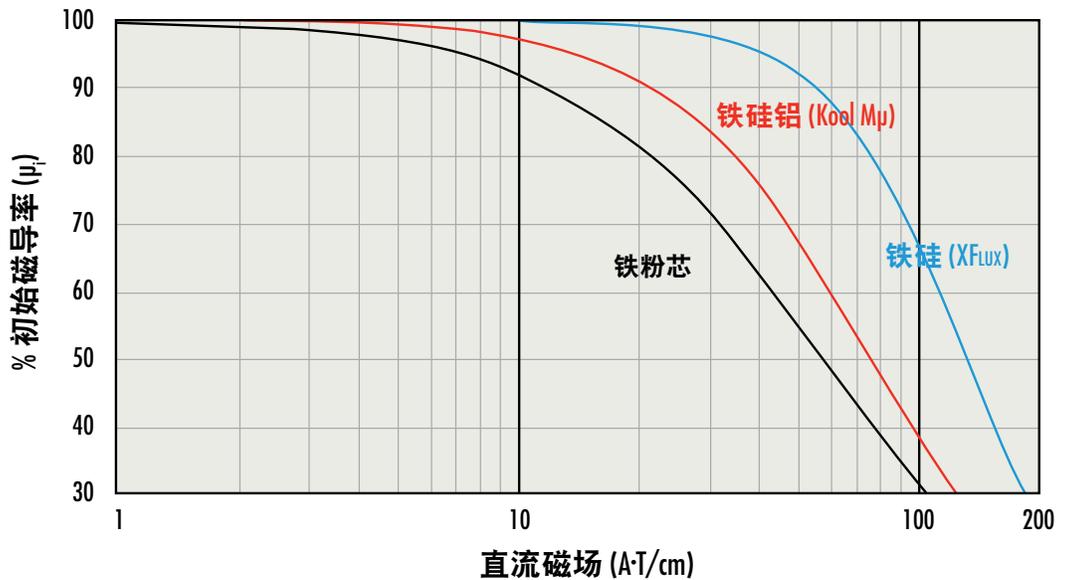


图5

# 与硅钢片对比

## 与硅钢片相比，磁粉芯的优点包括：

- **软饱和：**硅钢片具有离散的气隙，与磁粉芯的分布式气隙不同，所以随着电流增加，饱和的出现要快得多。
- **磁芯损耗：**相似尺寸下铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 的磁芯损耗远低于硅钢片。一般来说，随着频率增加，这种差异变得越来越大。
- **成本：**铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 磁芯的成本低于同类硅钢片。

相比硅钢片，铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 具有软饱和、明显更低的磁芯损耗、良好的温度稳定性和更低的成本。利用其软饱和特性，磁粉芯在设计中可达到更大的偏置范围，从而减小成品电感尺寸。异形磁粉芯 (E型磁芯、U型磁芯和块状磁芯) 还可以经过适当的粘接组合，用于大型电感器。

与之相反，硅钢片具有高饱和和磁通密度的优势。利用特级硅钢片，通常是块状或条状，可组成大型电感器参见图6。

块状硅钢片构造

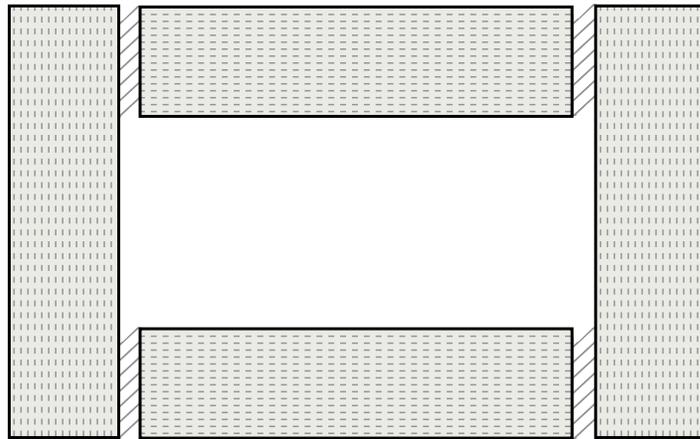


图6

## 磁芯选择

在选择磁芯时，可采用以下步骤确定磁芯尺寸和匝数。只需知道设计应用的两个参数：直流偏置所需的电感以及直流电流。

1. 计算 $LI^2$ 的乘积。其中： $L$  = 直流偏置所需的电感 (mH)， $I$  = 直流电流 (安培)。
2. 使用Magnetics 2017磁芯选型表 (第26-27页) 中查找 $LI^2$ 值。
3. 现在已经知道电感和磁芯尺寸。使用下列步骤计算匝数：
  - a) 从表2中获得磁芯的标称电感 ( $A_L$ ，单位为 $nH/T^2$ )。使用最坏情况的负公差 (-8%) 确定最低标称电感。有了这项数据之后，使用 $N = (L \times 10^6 / A_L)^{1/2}$  计算所需的电感 (mH) 对应的匝数。
  - b) 根据 $H = \frac{NI}{l_g}$  ( $l_g$  的单位为cm) 计算偏置 ( $A \cdot T/cm$ )。
  - c) 根据磁导率-直流偏置曲线 (图1)，确定计算偏置水平的初始磁导率的系数。
  - d) 通过将初始匝数 (根据步骤3a所得) 除以初始磁导率的系数来增加匝数。这将得到与所需的值接近的电感。最后的匝数可能需要反复迭代计算。
4. 选择一种导线或金属箔尺寸，并验证所得到的窗口占空比是否是可制造的。低于100%的负载循环可使用较小的导线尺寸和较低的绕组因数，但不可使用较小尺寸的磁芯。

磁粉芯产品目录所列的 $LI^2$ 值基于60%的绕组因数 (环形磁芯因数为40%) 和相对于直流电流较小的交流电流。 $LI^2$ 值基于所选磁芯尺寸的标称电感和磁导率 $26\mu$ 。导线电流密度为 $600 A/cm^2$ 。如果磁芯是用于相对于直流电流很大的交流电流，例如反激电感器，则可能需要略微更大的尺寸。这将有助于减小产生磁芯损耗的交流电流的工作磁通密度。 $LI^2$ 值仅适用于块状组合成闭合磁路的情况。