

# 新磁芯材料在优化电感设计中的应用

主讲人：

美磁公司工程高级电气设计工程师

董晟楠

# 概要

- 功率电感设计趋势
- 美磁磁粉芯的优势
- 美磁新材料Kool Mu Max
- 美磁铁硅材料新扩展
- 小功率电感设计举例
- 大功率电感设计举例
- 磁芯设计软件
- 美磁更多新材料
- 美磁公司



# 电感设计趋势

## A. 磁芯越来越小，集成化越来越高

随着开关频率的升高，磁芯体积要求更小，高频下损耗要求更低，实现整机的优化。

## B. 磁芯越来越大，电流越来越大

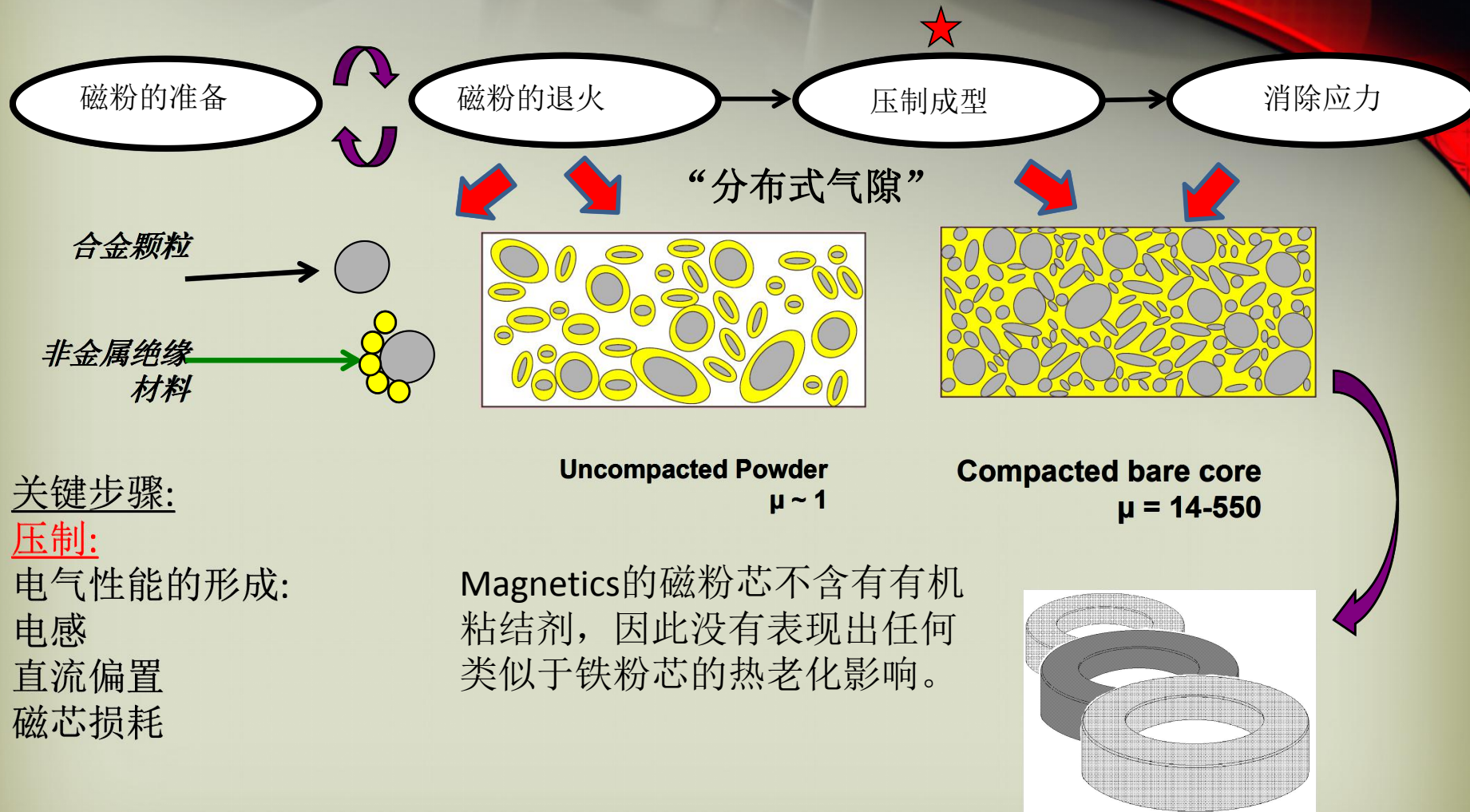
越来越多的新能源替代传统石油，电力传输要求磁芯更大可以承载更高的电流，大的环状磁芯，块状磁芯设计越来越多。

# 新能源逆变器中对电感元件的要求

- 提供不饱和情况下的电感的储能
- 展现EMI/RMI所需的性能
- 温度变化下磁芯的稳定性
- 没有热老化现象
- 低磁致伸缩—最大限度减少音频噪声
- 尽可能小的体积
- 降低成本



# 磁粉芯制作关键以及微结构



# 美磁磁粉芯纵览

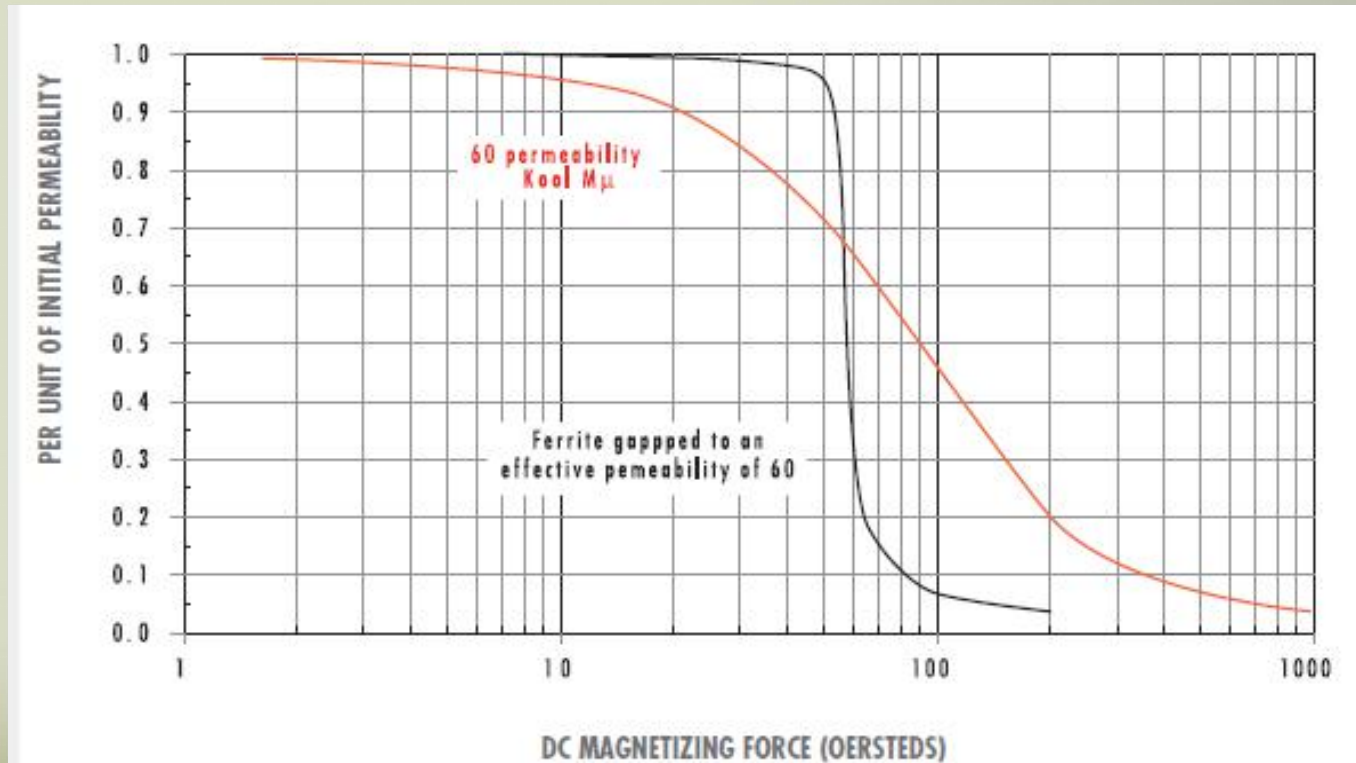
	钼坡莫 MPP	高磁通 High Flux	铁硅铝 Kool M $\mu$ <sup>®</sup>	新一代铁 硅铝 Kool M $\mu$ <sup>®</sup> MAX	铁硅 XF <sub>LUX</sub> <sup>®</sup>
磁导率	14-550	14-160	26-125	26-60	26-90
磁芯损耗	最低	适中	较低	低	适中
磁导率vs直流偏置	较好	最好	较好	好	最好
温度稳定性	最好	很好	很好	很好	好
饱和磁通密度(特斯拉)	0.8	1.5	1.0	1.0	1.6
镍含量	80%	50%	0	0%	0
相对成本	高	中	低	较低	较低



# 与开气隙铁氧体的对比

Kool M $\mu$ （铁硅铝） 的优势:

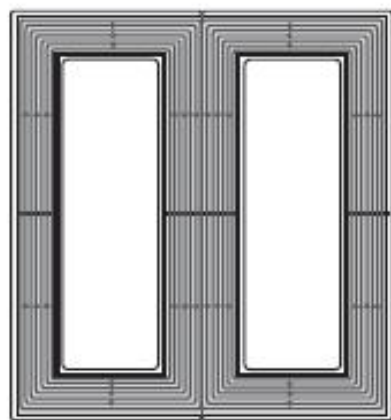
- 软饱和: 把工作范围设计在材料中受控制的局部下降曲线中,
- **磁通量**: 在通用50%下降设计点, 磁通量是铁氧体两倍以上, 磁芯尺寸可缩小35%
- 温度: 磁通量随温度变化保持相对恒定



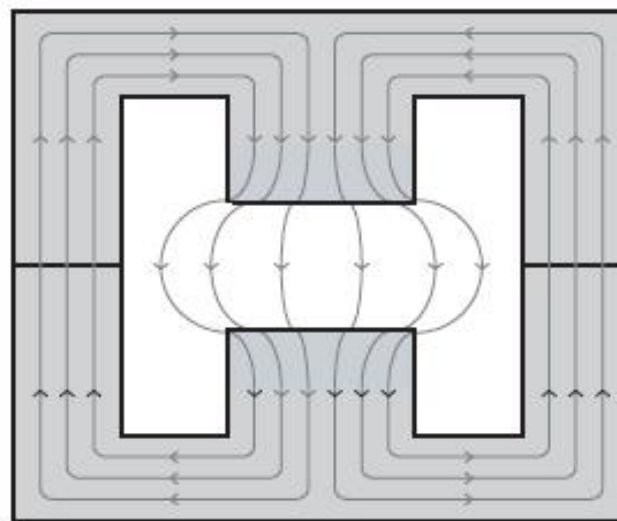
- 容错: 软饱和曲线使设计本身具有容错能力
- 无边缘损耗

铁氧体的优势:

- 具有较高的间隙有效磁导率: 适合相对较低偏置的应用
- 公差更小:  $\pm 3\%$  (铁氧体) vs  $\pm 8\%$  (磁粉芯)
- 铁氧体有更多的尺寸和形状可选



KOOL  $M\mu$



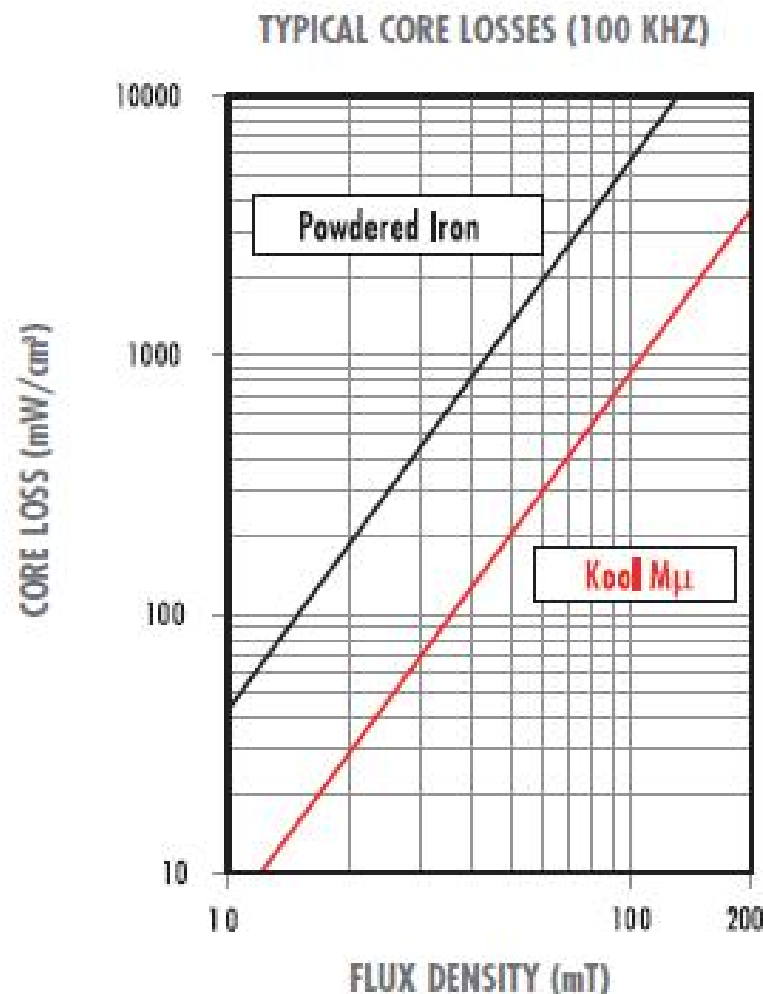
GAPPED FERRITE



# 与铁粉芯对比

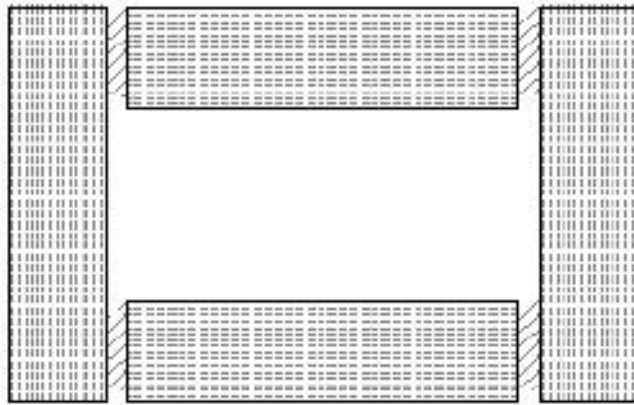
Kool M $\mu$  (铁硅铝) 优势:

- 磁芯损耗低: 在10kHz to 300 kHz范围内, Kool M $\mu$  效率更高和温度更低.
- 接近零的磁滞损耗: 非常适用于消除滤波电感中的音频噪音.
- 没有热老化: 没有使用有机粘结剂。可在200°C下连续工作。

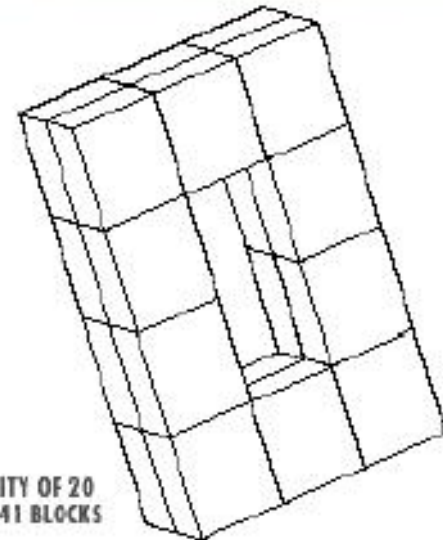


# 与硅钢对比

- 软饱和: 硅钢具有离散间隙, 与Kool M $\mu$  的分布式间隙不同, 因此随着电流的增加, 饱和的出现要快得多。Kool M $\mu$  可以对饱和曲线进行深入设计, 从而得到更小的电感器。
- 温度稳定性: 硅钢装配件中作用的环氧树脂一般不能像Kool M $\mu$ 那样在下200°C持续工作。
- 成本: Kool M $\mu$  磁芯成本低于同样大小的硅钢块。
- 磁芯损耗: Kool M $\mu$  的磁芯损耗远低于硅钢片。一般来说随着频率的增加, 这种差异变得越来越大



SILICON STEEL BLOCK CONFIGURATION



QUANTITY OF 20  
B-4741 BLOCKS



# 磁粉芯的总结

- 尺寸更加灵活  
    优于硅钢片和空气线圈
- 成本更低  
    优于硅钢片和空气线圈
- 较低的磁芯损耗  
    低于铁粉芯和空气线圈
- 高磁通饱和度  
    优于铁氧体
- 接近零的磁致伸缩  
    优于铁粉芯
- 无热老化现象  
    优于铁粉芯
- 软饱和  
    优于间隙铁氧体和硅钢片
- 尺寸更小  
    对比铁氧体，硅钢和空气线圈

# 新一代铁硅铝Kool Mu MAX

- Kool Mu<sup>®</sup> MAX 是美磁所推出的新一代铁 硅铝磁芯，包括磁导率26 $\mu$ 和60 $\mu$ ，尺寸从外径13.5 mm至134 mm。Kool Mu MAX的直流偏置性能比Kool Mu材料好50%，磁芯损耗相比Kool Mu也更低，功率处理效果更佳。所以使用Kool Mu MAX达到与Kool Mu同样的感值，所需圈数更少，降低了铜线成本，也减少了温升，优化了电感输出。当需要改变磁芯来改善电感效率时，选用Kool Mu MAX磁芯所需的成本，相较于选用MPP磁芯的成本要便宜许多。



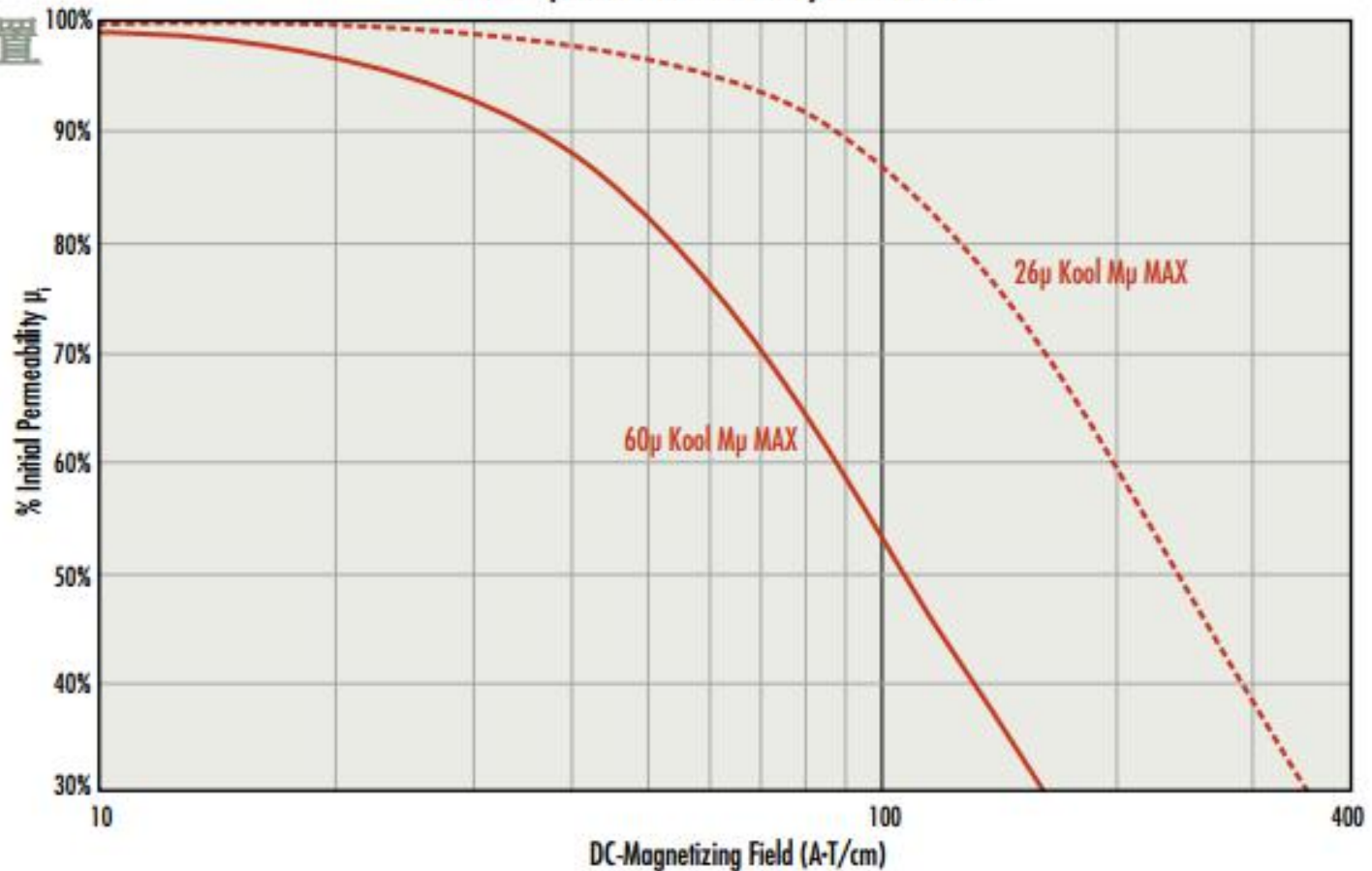
# Kool Mu MAX 直流偏置曲线

Kool Mu MAX Permeability vs. DC Bias

磁导率 vs. 直流偏置

$$\% \text{ Initial Permeability} = \frac{1}{(a + bH^c)}$$

	a	b	c
26 $\mu$	0.01	6.10E-08	2.19
60 $\mu$	0.01	7.69E-07	2.03

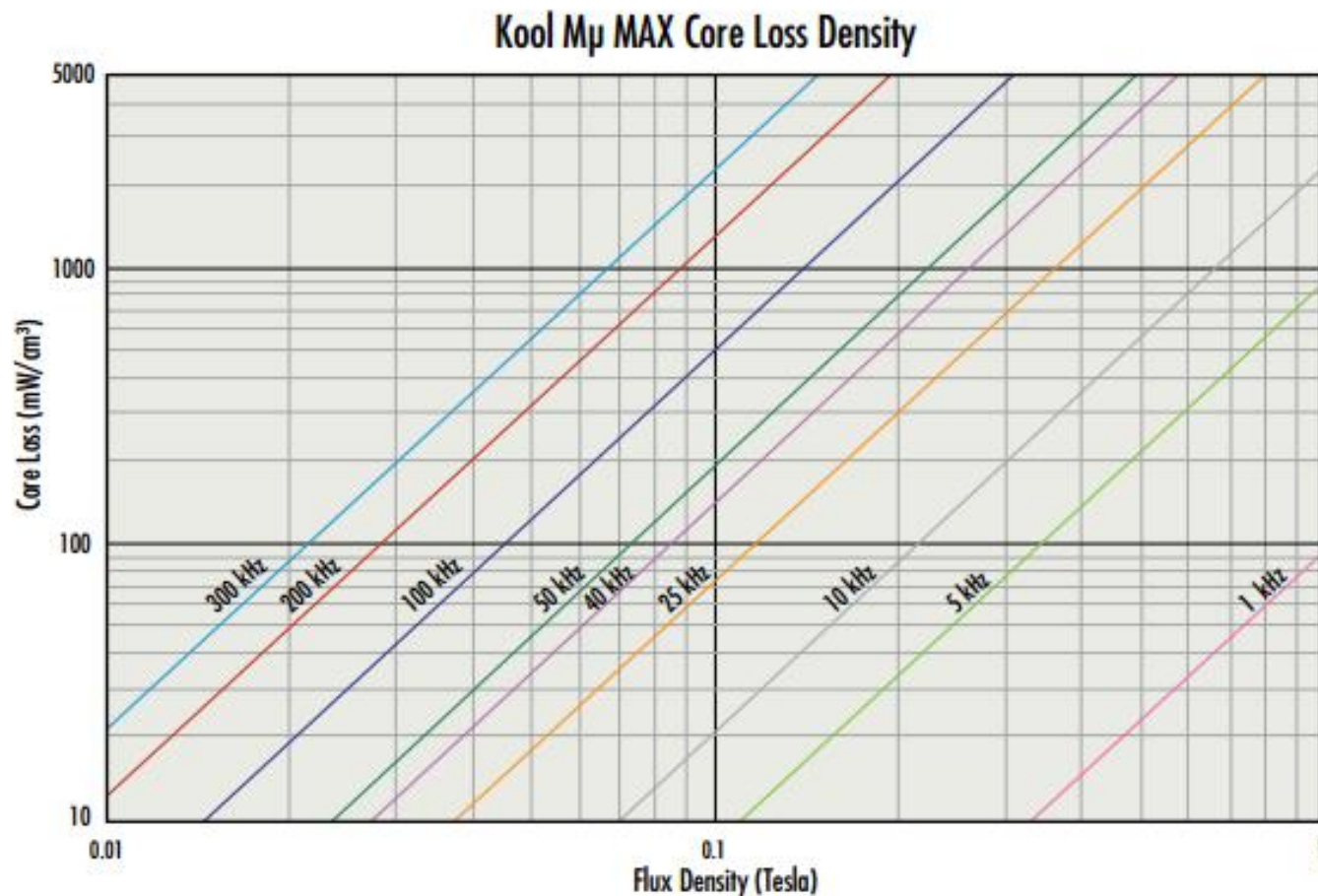


# Kool Mu MAX 损耗曲线

磁芯损耗密度

$$P = a(B^b)(f^c)$$

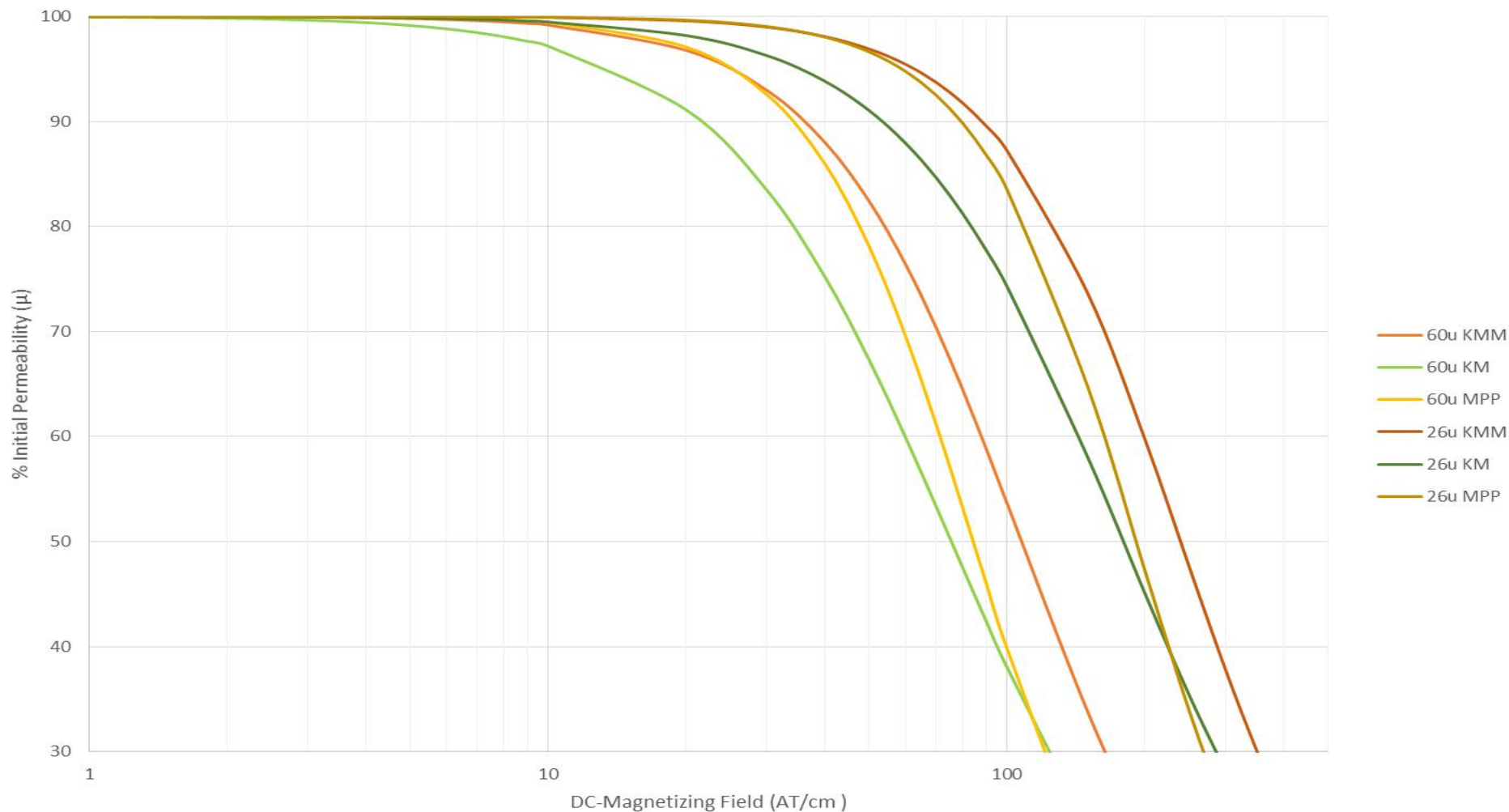
a	b	c
91.616	2.039	1.388





# Kool Mu MAX 直流偏置对比

Kool Mu MAX, Kool Mu和MPP的直流偏置对比



# Kool Mu MAX 与其他材料综合比较

Material	DC Bias at x Ls (Oe)		Core Loss (mW/cm <sup>3</sup> )		Cost Ratio
	80%	50%	W <sub>1000 G, 50 kHz</sub>	W <sub>1000 G, 100 kHz</sub>	Price Scale
Kool M $\mu$ <sup>®</sup> MAX	68	135	190	500	2.0
Kool M $\mu$ <sup>®</sup>	43	95	212	550	1.0
75-Series	70	150	570	1515	1.2
XFlux <sup>®</sup>	89	175	680	1550	1.5
High Flux	87	165	353	900	4.0
MPP	60	106	174	450	7.0



# 铁硅新材料扩展

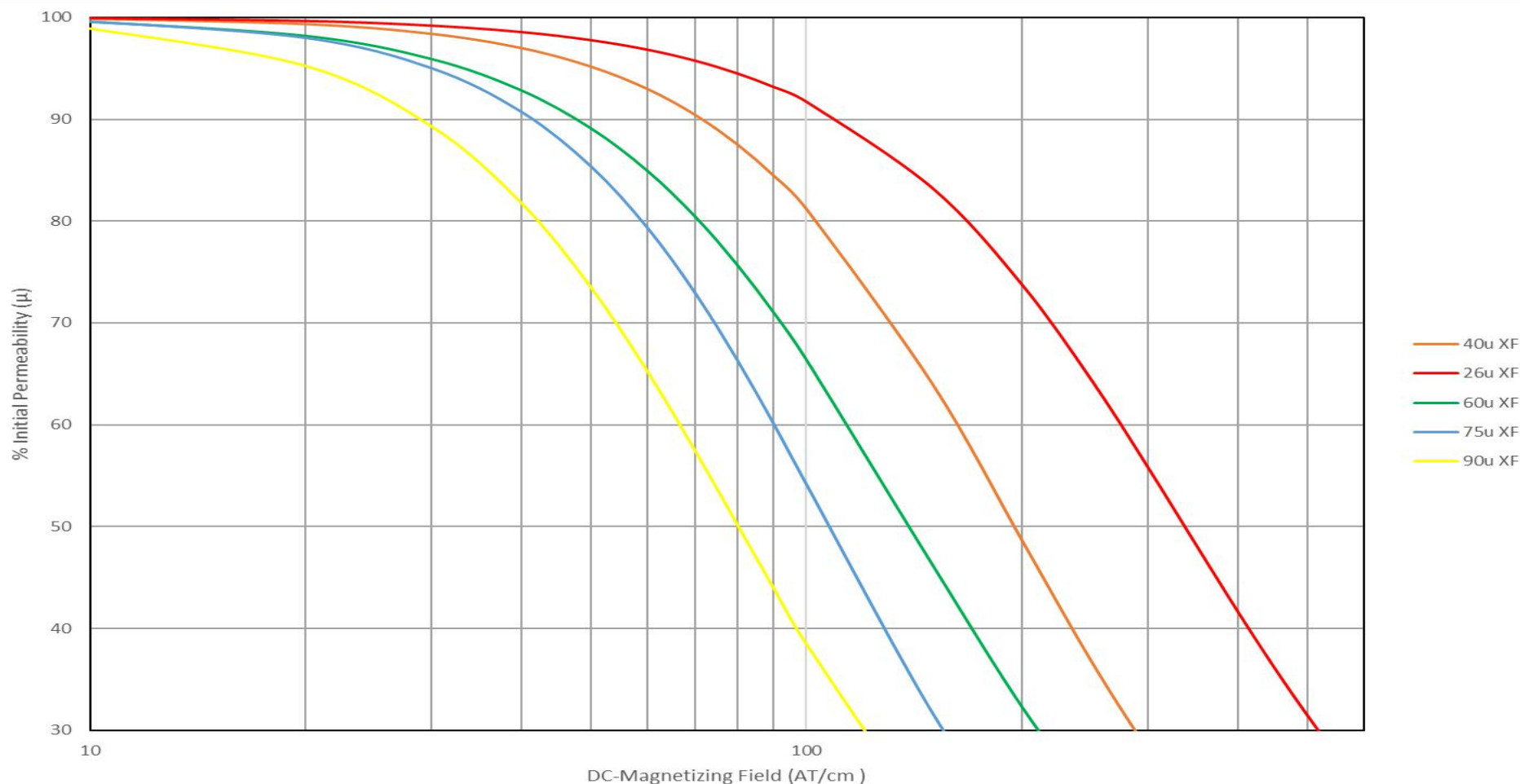
- 铁硅合金(XFLUX®)提供中低频率的电感器和扼流圈下一种经济型的高饱和度(1.6T) 解决方案。高饱和度有利于在负载设计下电感是关键的应用，如使用新能源(太阳能/风能/混合动力)的变频器，功率因数校正推动，和不间断电源UPS。

# 铁硅新材料扩展

- 磁导率从60u增加至19u, 26u, 40u, 60u, 75u, 90u.更多的选择可根据不同的电流需求进行设计，低磁导率更支持大电流的设计。
- 形状由环形扩展至超大尺寸环形(134mm), E型(114mm), 方块型(80mm), 通过组装可以支持大电流的设计。
- 直流偏置曲线和损耗曲线更新，损耗更低，曲线拟合更准确。

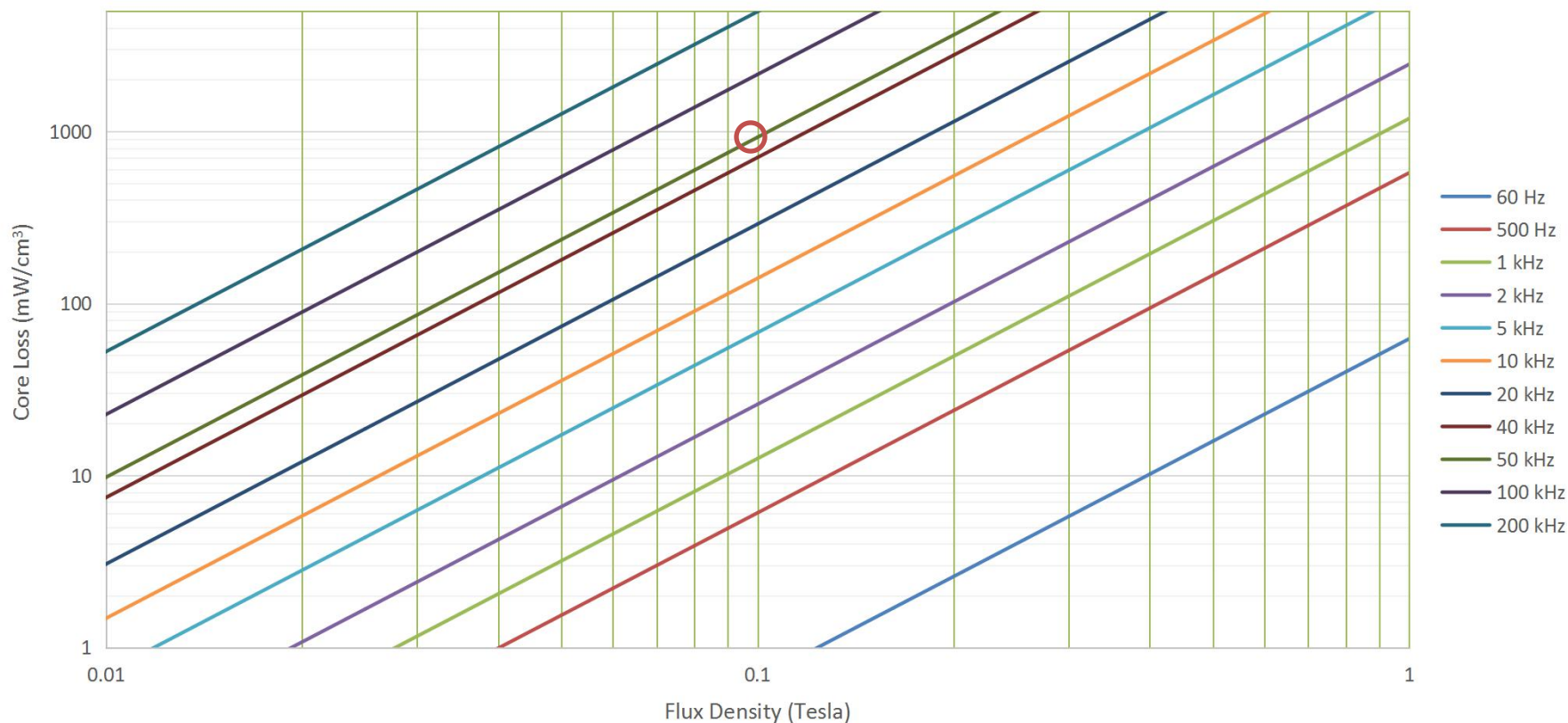


# 铁硅材料直流偏置曲线



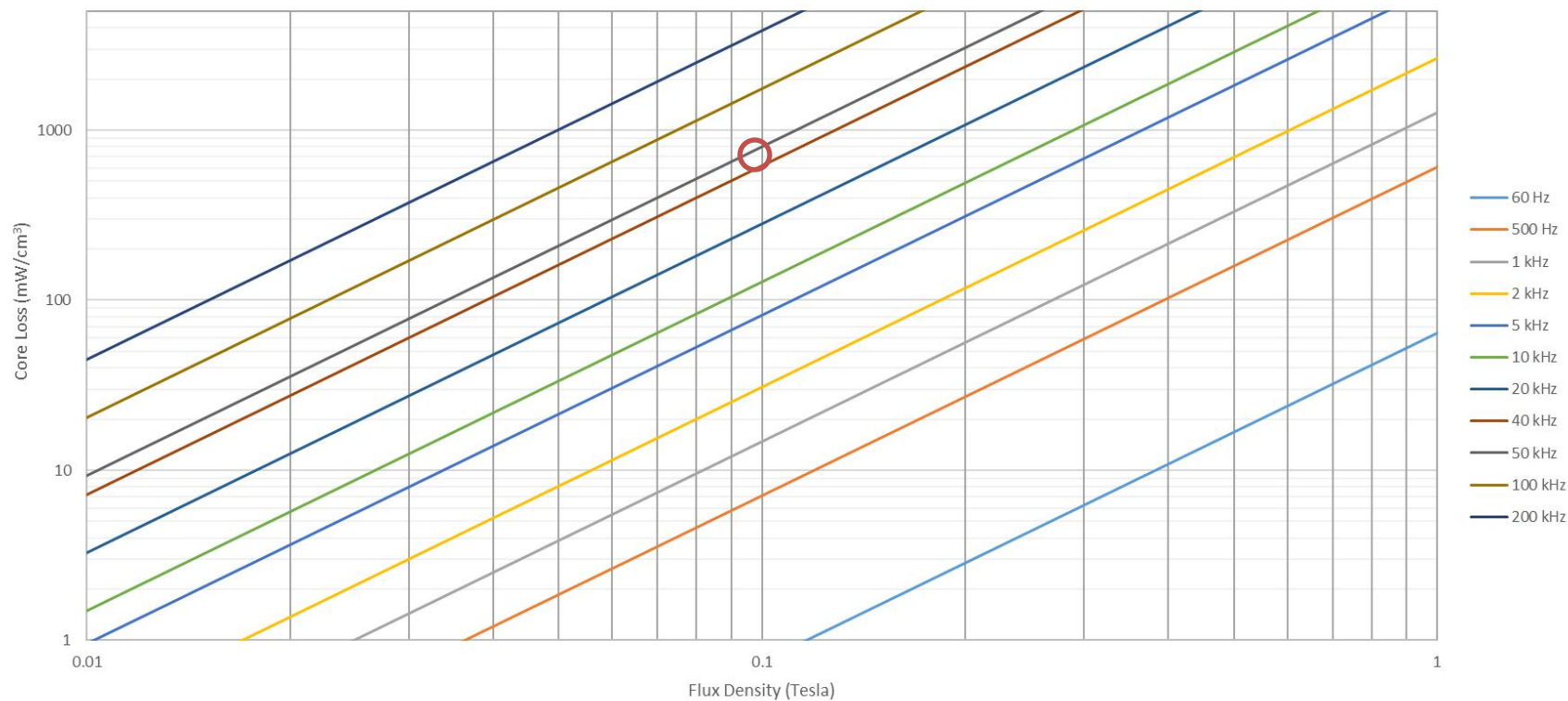
# 铁硅材料损耗曲线-26 $\mu$

XFlux 26 $\mu$

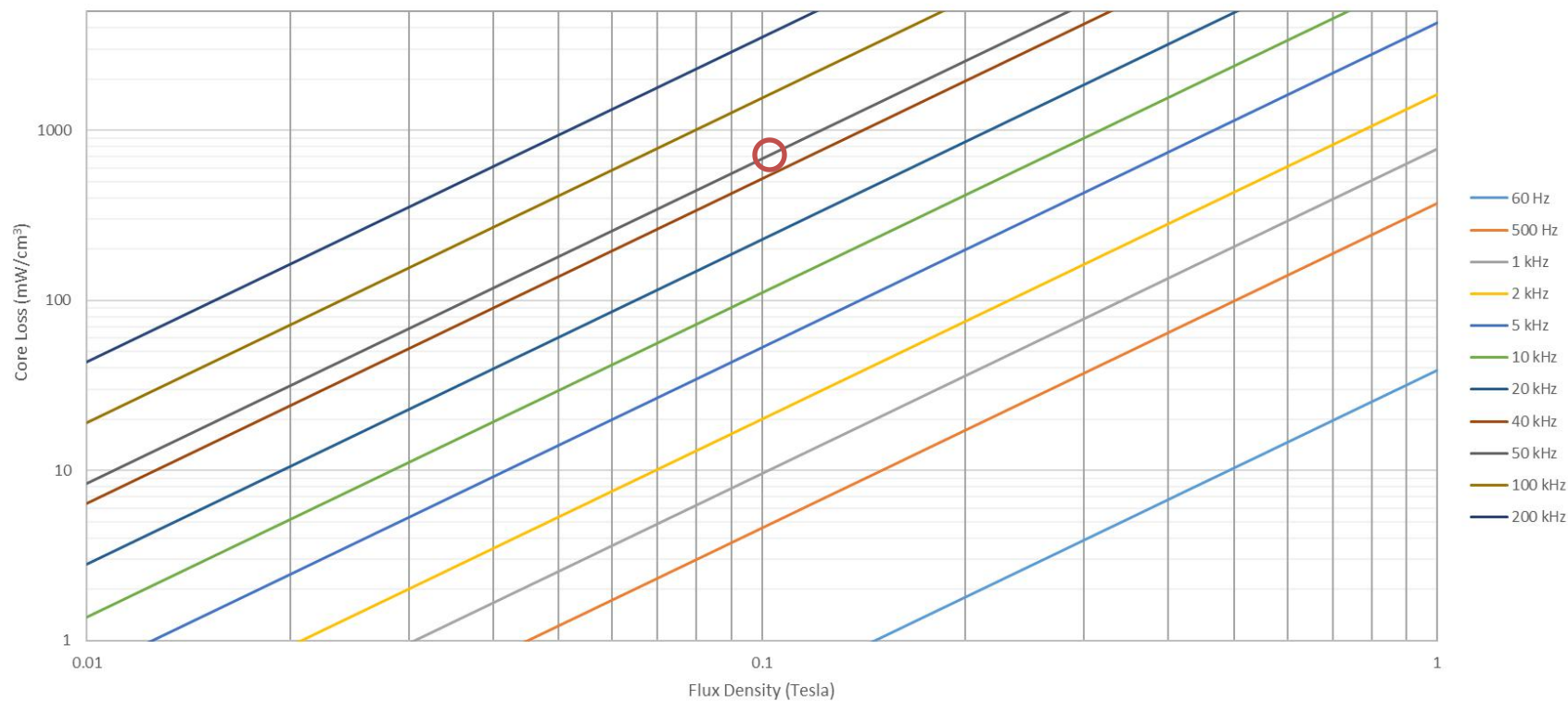




# 铁硅材料损耗曲线-40 $\mu$

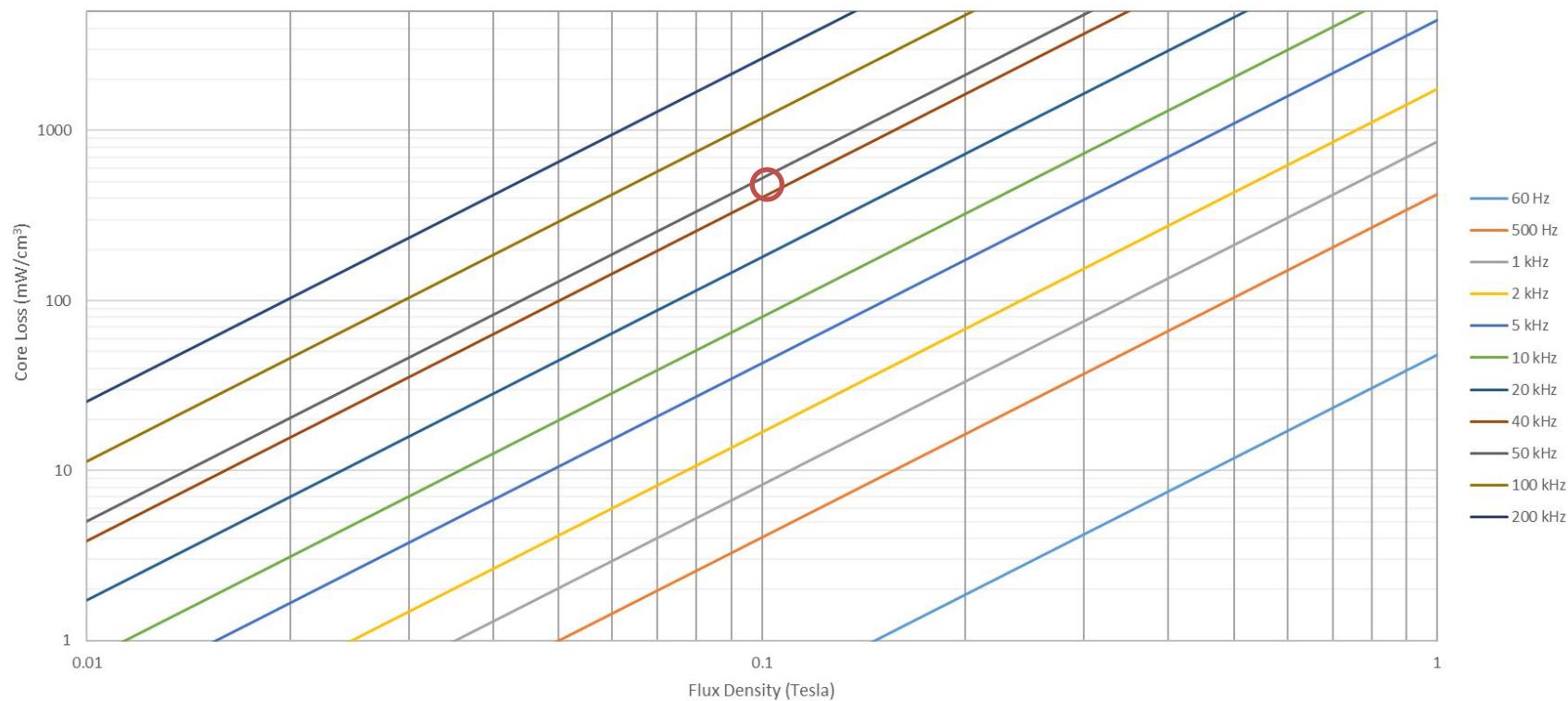
XFlux 40 $\mu$ 

# 铁硅材料损耗曲线-60 $\mu$

XFlux 60 $\mu$ 



# 铁硅材料损耗曲线-75 $\mu$ , 90 $\mu$

XFlux 75 $\mu$ , 90 $\mu$ 

## 设计电感时的关键约束

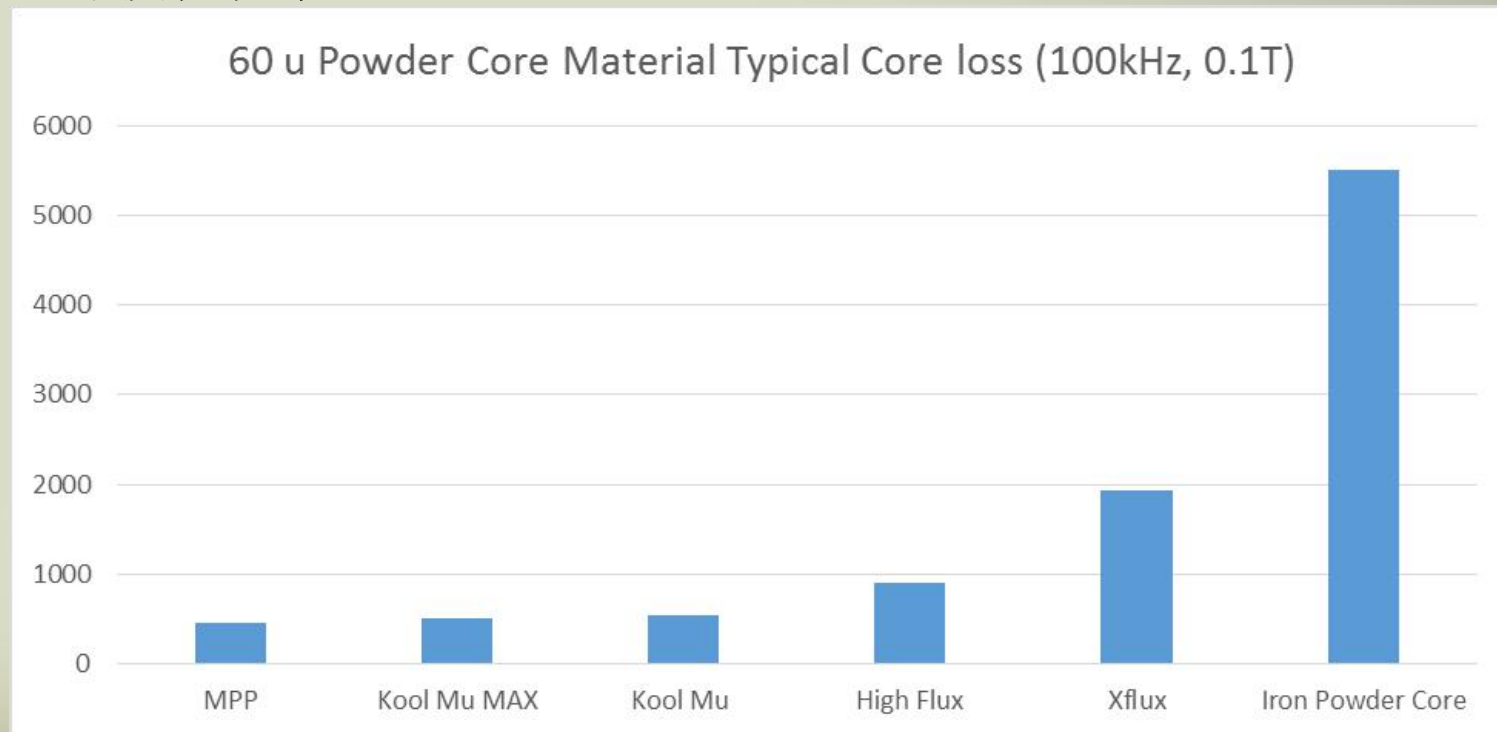
- × 电流峰值时的所需感值
- × 最小的设计尺寸
- × 成本
- × 损耗/效率



## 小功率高频的电感设计举例

小功率电感设计需求	
L @ 1.5 Amp	>1.2 mH
I dc	1.5 Amp
I ripple	0.6 Amp
I peak	1.8 Amp
Frequency	100 kHz
Total Losses	< 1.5 W

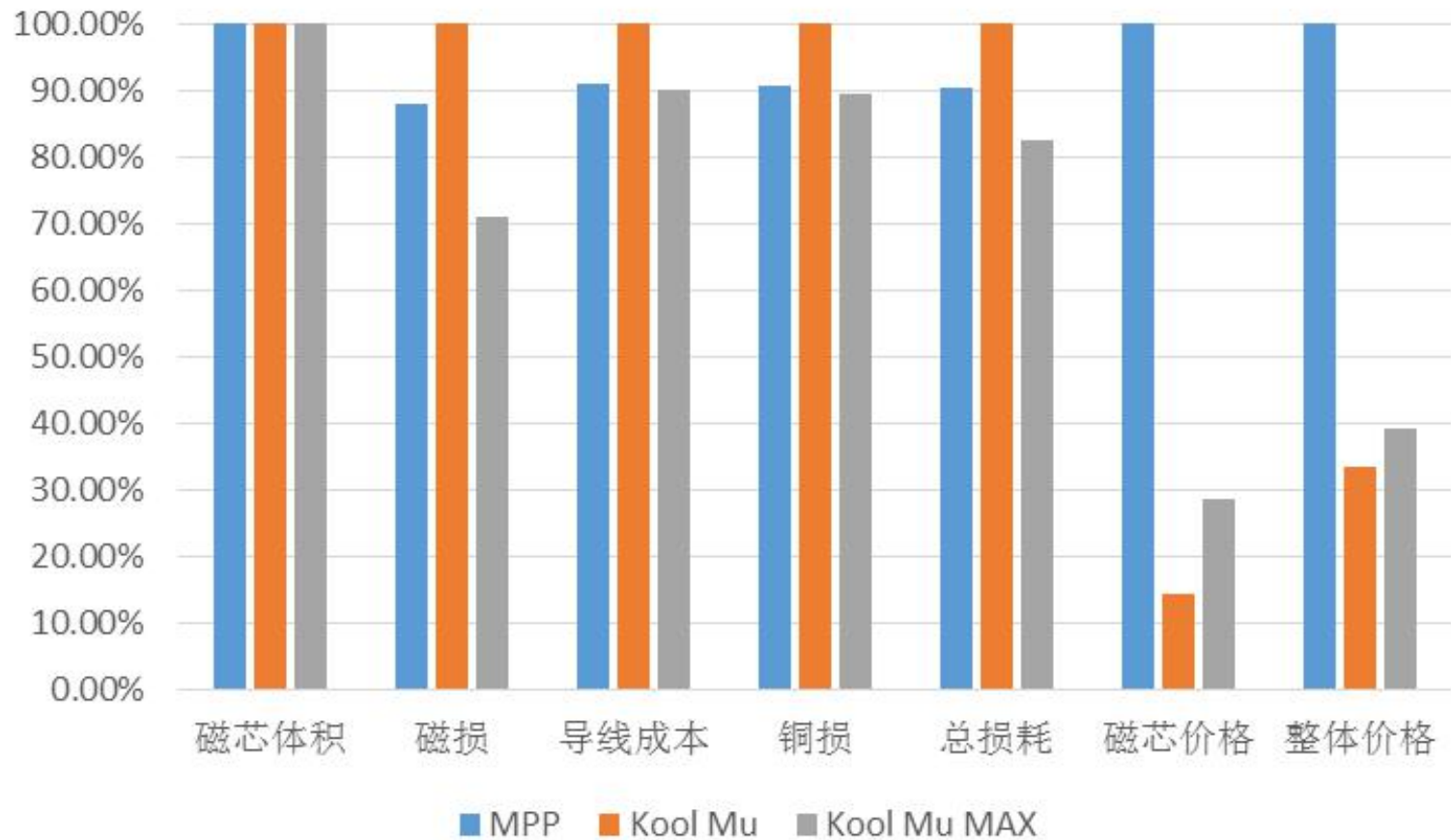
- 效率是微型逆变器设计中的关键。
- 提高微型逆变器的效率可通过采用 美磁高品质的磁芯材料来实现：  
High Flux，MPP，Kool Mu MAX。
- 80%镍铁MPP材料为AC滤波电感提供了最优化的磁芯损耗表现，并且不存在边缘损耗现象。





磁芯信息	设计 #1	设计 #2	设计 #3
零件号	55894	77894	79894
磁芯数	1	1	1
材料	MPP	Kool Mμ	Kool Mμ MAX
磁导率	60	60	60
AL (nH/T <sup>2</sup> ) +/- 8%	75	75	75
1.8A电流下电感最小值(mH)	1.21	1.2	1.21
空载电感值(mH) +/- 8%	1.534	1.802	1.491
磁损(W)	0.52	0.59	0.42
铜损(W)	0.78	0.86	0.77
总损耗(W)	1.3	1.44	1.19
绕组因数	35.40%	38.40%	34.90%
铜线尺寸 ( 22AWG )	0.7mm	0.7mm	0.7mm
铜线股数	1	1	1
绕组直流电阻(mOhms)	336	366	331
温升(C°)	21.5	23	20
匝数	143	155	141
绕线长度 (mm)	6320.4	6921.7	6220
导线成本	1.01	1.11	1
单个磁芯价格比	7	1	2
整体价格比	3	1	1.18
绕线后总高度(mm)	16.6	16.6	16.6
绕线后外径(mm)	32.3	32.3	32.3

# MPP/Kool Mu/Kool Mu MAX 设计对比总结





## 大功率电感设计

### 200A大功率电感设计需求

L @ 220 Amp	>200 $\mu$ H
I dc	205 Amp
I ripple	30 Amp
I peak	220 Amp
Frequency	15 kHz
Temperature Rise	<70 °C

- 单个磁芯无法达到足够大的 $LI^2$
- 考虑环形磁芯堆叠的解决方案

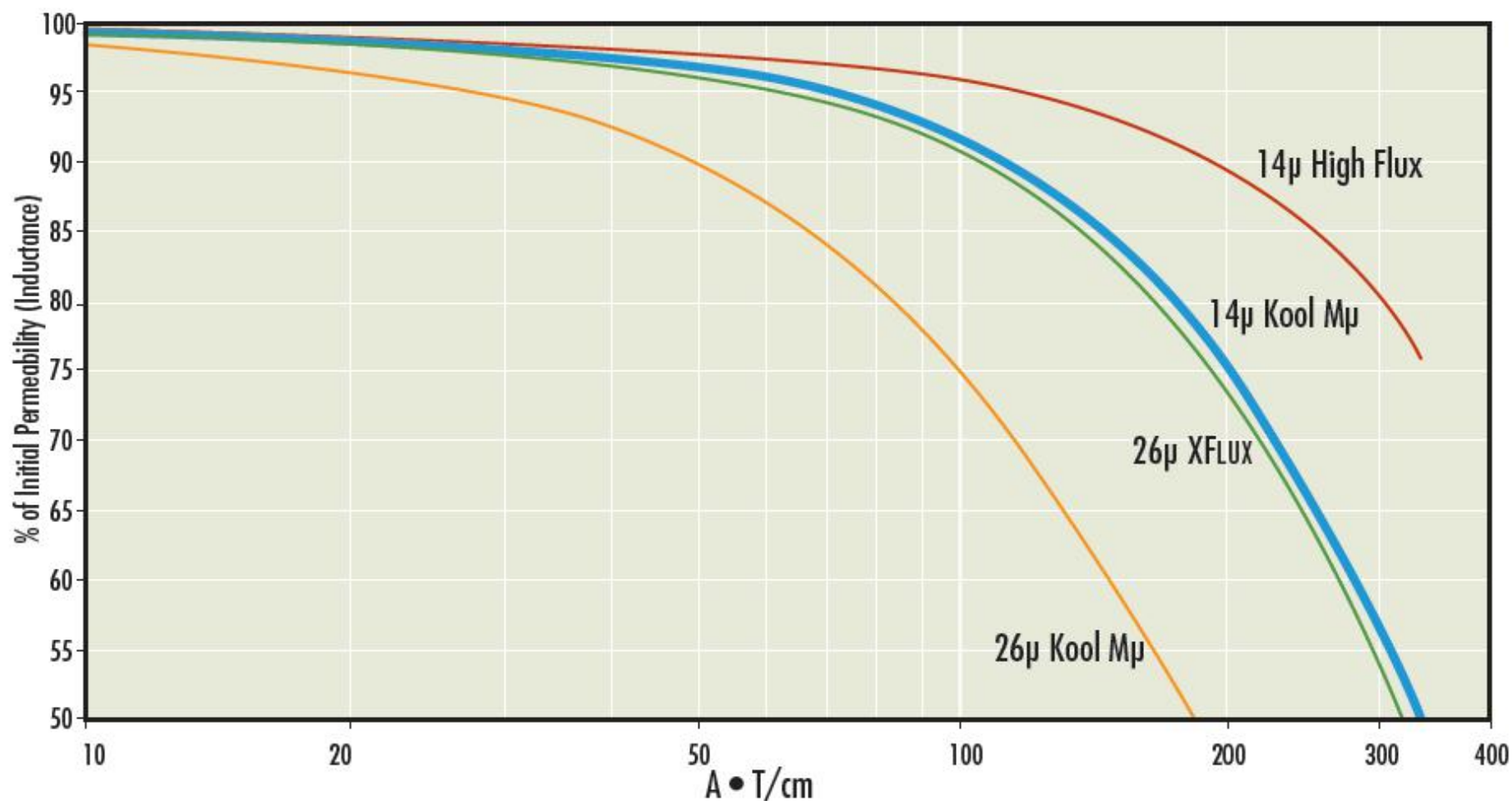
优点:

- ❖ 支持更大的电流
- ❖  $A_L$  加倍，从而减少了匝数和绕组直流电阻
- ❖ 更大的表面积使温升降低



# 铁硅与铁硅铝的直流偏置对比

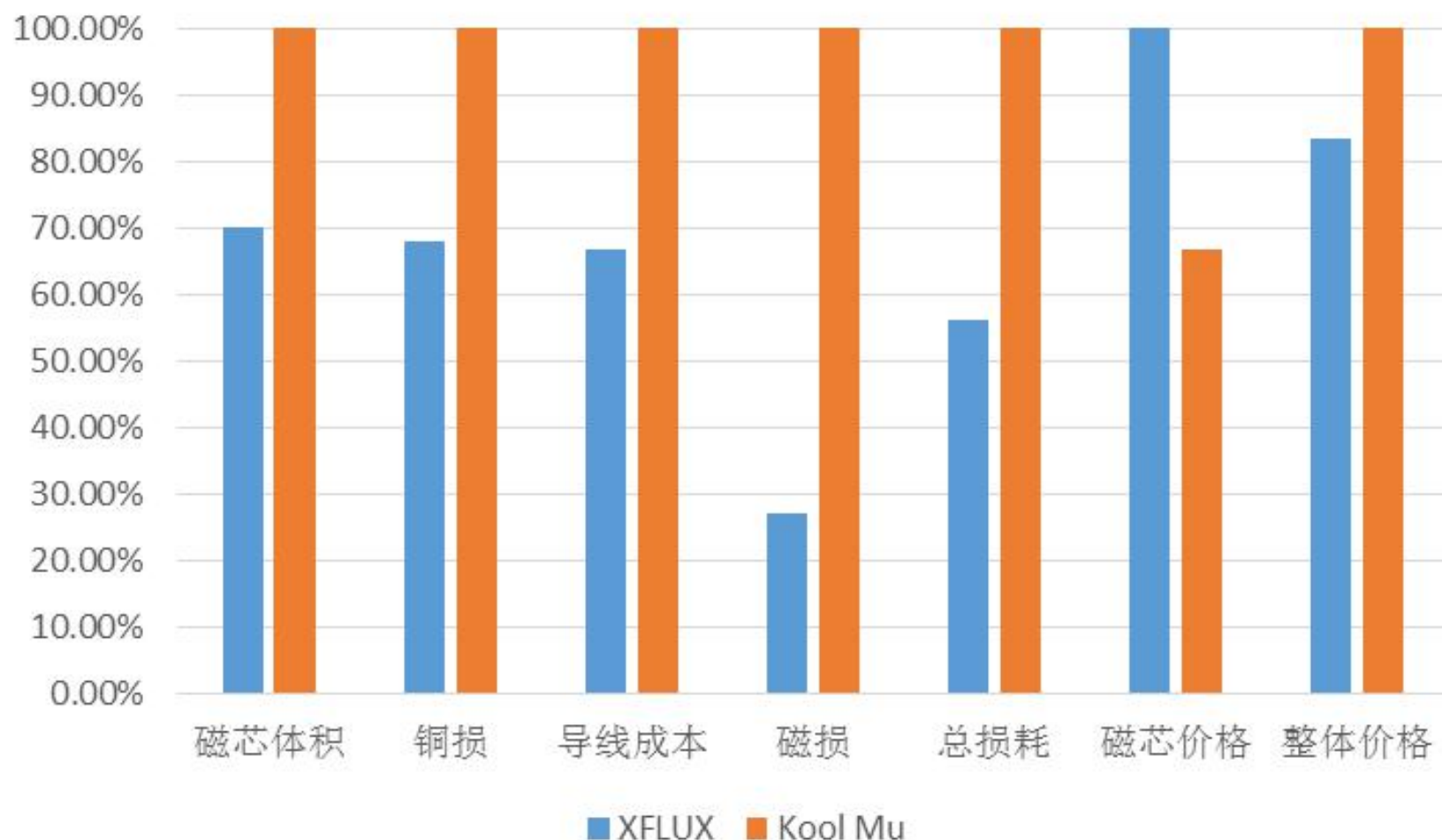
## Typical DC Bias Performance



<b>磁芯信息</b>	设计 #1	设计 #2
零件号	78337	77337
磁芯数	5	8
材料	XFLUX	Kool Mμ
磁导率	26	26
AL (nH/T <sup>2</sup> ) +/- 8%	340	544
220A电流下电感最小值(mH)	0.2	0.2
空载电感值(mH) +/- 8%	0.286	0.49
磁损(W)	16.9	62.6
铜损(W)	99.5	145.4
总损耗(W)	116.4	208
绕组因数	54.80%	56.70%
铜线尺寸 ( 11AWG )	2.38mm	2.38mm
铜线股数	20	20
绕组直流电阻(mOhms)	2.36	3.45
温升(C°)	39.1	48.5
匝数	29	30
绕线长度 (mm)	8151.856	16657
导线成本	1	1.5
单个磁芯价格比	1.5	1
整体价格比	1	1.2
绕线后总高度(mm)	181	261
绕线后外径(mm)	181	181



## 铁硅和铁硅铝设计对比总结



# 美磁电感设计软件

POWDER CORES • FERRITES • STRIP WOUND CORES



Inductor Design Tool

Toroid Design E Shape Design

## Step 1: Design Input

Material Selection

DC Current  Amps

Peak to Peak Ripple  Amps

Frequency  KHz

Full Load (L)  mH

Specified Current  Amps

Temp Rise  °C

Stack Cores

Reset

Find Part Numbers

## Magnetics Part Numbers

55350	55927	55545
	55924	55542
	55928	55546
	55929	55547
	55930	55548
	55894	55071

Core OD (mm)

23.6	26.9	32.8
------	------	------

## Step 2: Enter Selected Part Number

55894

Design Output

OD  mm HT  mm U

ID  mm AL

## Design Output

Inductance @ Full Load min  mH

Inductance @ No load nom  mH

Specified Current Inductance min  mH

Core Loss  W

Copper Loss  W

Total Loss  W

Temperature Rise  °C

Number of Turns

Wire Size  AWG

Winding Factor

DC Resistance  mΩ

Finished OD  mm

Finished HT  mm

Total Wire Length  mm

Help

Plot



### Magnetics Headquarters

110 Delta Drive  
PO Box 11422  
Pittsburgh, PA 15238 USA  
Phone: 1.800.245.3984  
+1.412.696.1333

### Magnetics International

13/F 1-3 Chatham Road South  
Tsim Sha Tsui  
Kowloon, Hong Kong  
Phone: +852.3102.9337  
+86.139.1147.1417

## Adjust

Adjust Turns

Adjust AWG

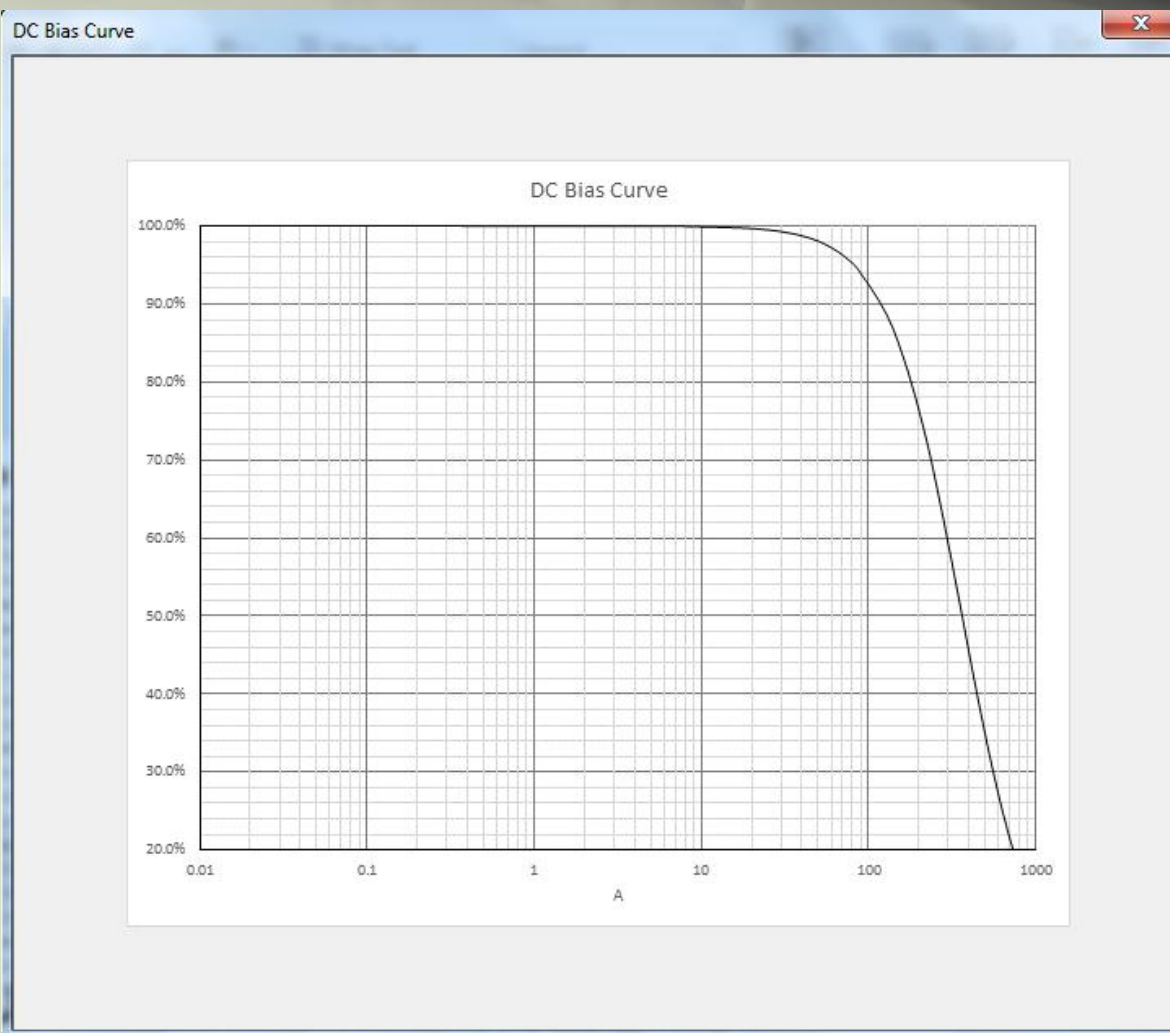
Adjust Strand

Request Quote

Request Sample

EXPERIENCE THE POWER OF CONFIDENCE





# 磁粉芯在大电流电感领域的应用

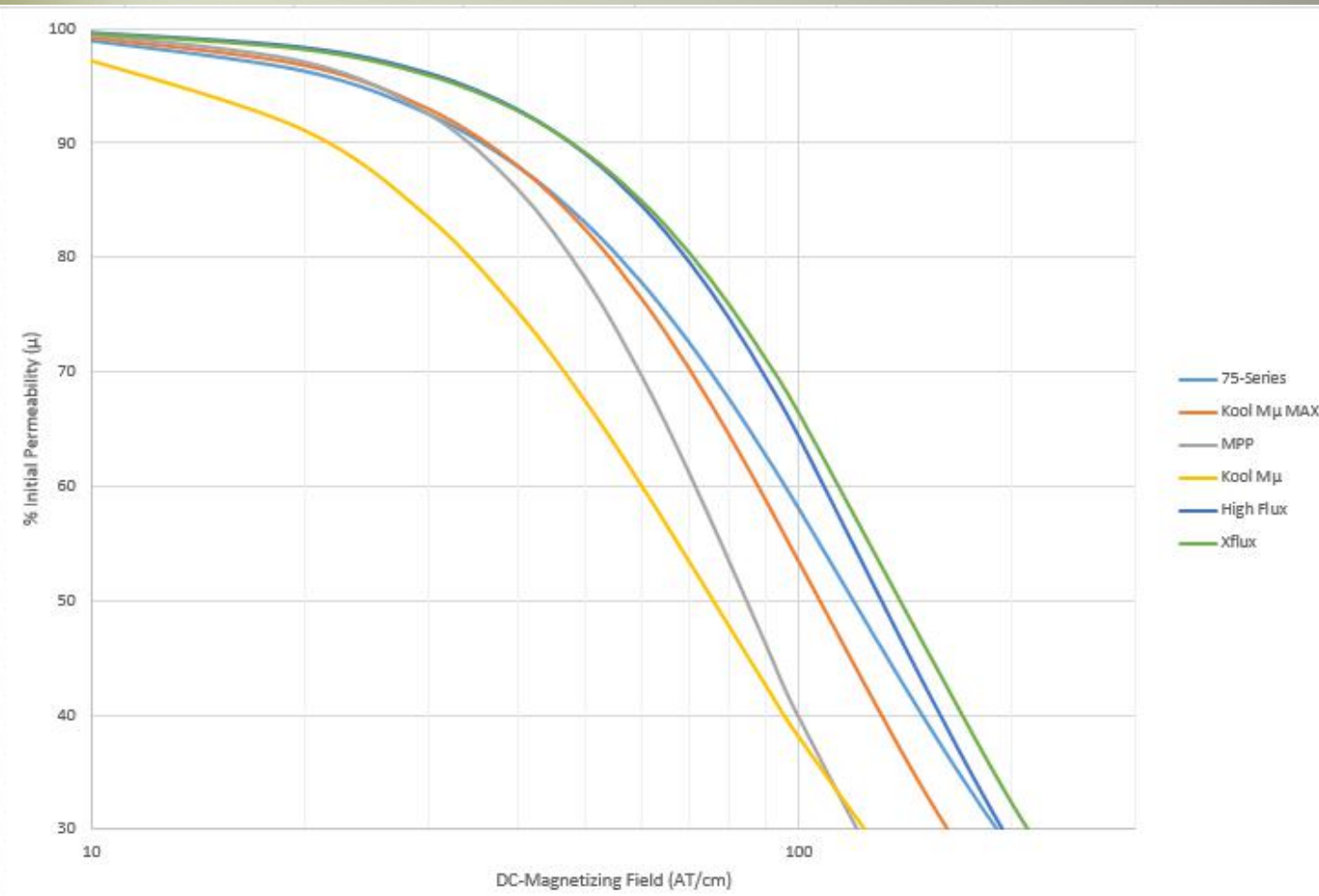
## 应用典型

- 太阳能变换器
- UPS
- 混合动力汽车
- 风能转换器
- 电力牵引
- 焊接
- 高能系统





# 美磁定制磁芯给您更多选择



混合材料  
混合不同的材料，  
以得到定制的专属  
性能，相应的增加  
直流偏置或降低磁  
芯  
损耗。  
定制的磁导率也让  
您的设计更加得心  
应手。



# 美磁定制磁芯给您更多选择



PQ



EQ





# MAGNETICS

从1949年起，Magnetics就作为开发和制造高性能软磁材料的行业领航者。

总部在宾夕法尼亚州匹兹堡市，在宾夕法尼亚州**East Butler**以及中国厦门有两个工厂生产制造适应于多种应用的磁粉芯，铁氧体磁芯，以及绕带磁芯。

我司技术中心设有一个试验工厂设施，是能够模拟广泛的粉末和制造工艺，以及快速生产客户评估所需的小数量的试验样品。

该中心拥有最先进的的设备可应用于合金的发展，陶瓷加工，粉末的物理，电气和电磁性能分析和成品部件。





## 联系美磁

- 浏览美磁网站 [www.mag-inc.com](http://www.mag-inc.com)

下载零件规格书、技术文档、申请样品、查询库存

- 电话联系 13911471417 （中国专线）

- 电子邮件

[asiasales@spang.com](mailto:asiasales@spang.com)



感谢您的宝贵时间  
问题?