

# 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。

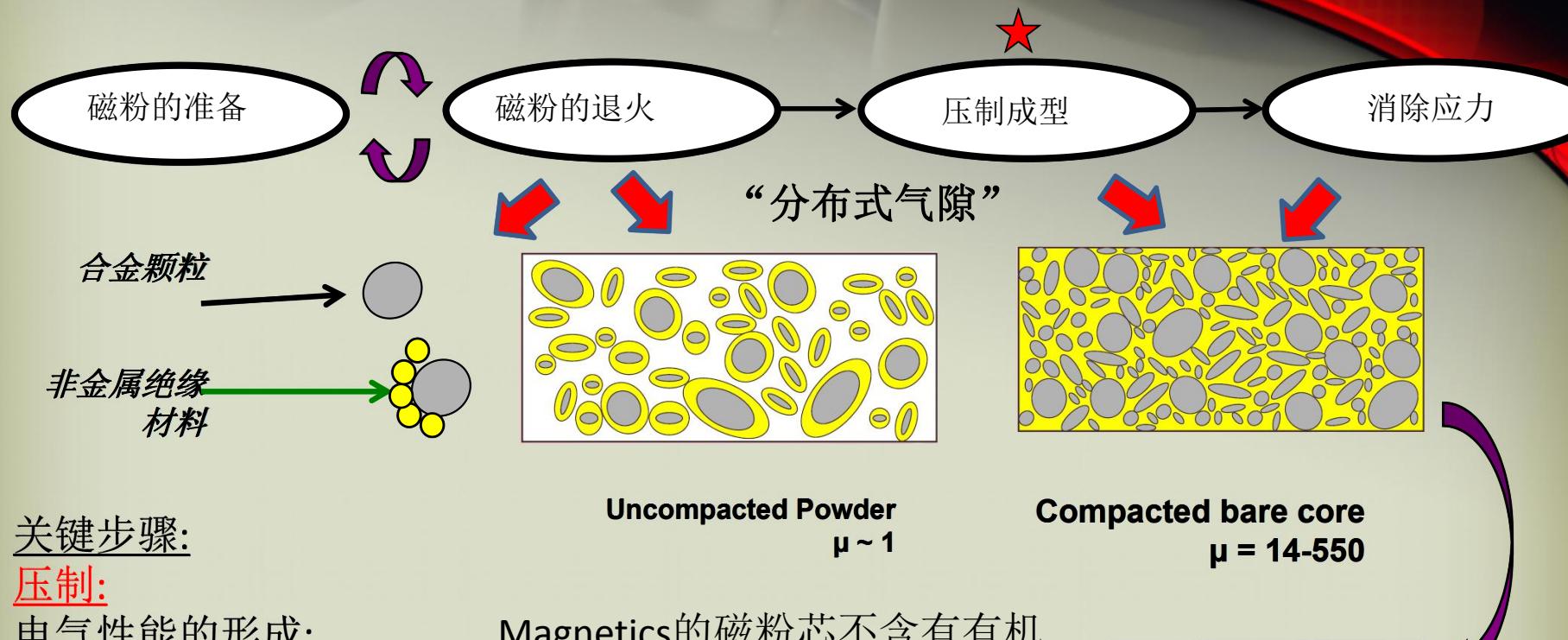
## B. 磁芯越来越大，电流越来越大

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。

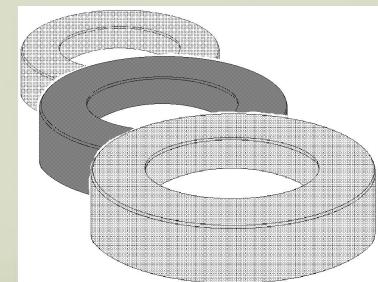
# 新能源逆变器中对电感元件的要求

- 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



Magnetics的磁粉芯不含有有机粘结剂，因此没有表现出任何类似于铁粉芯的热老化影响。



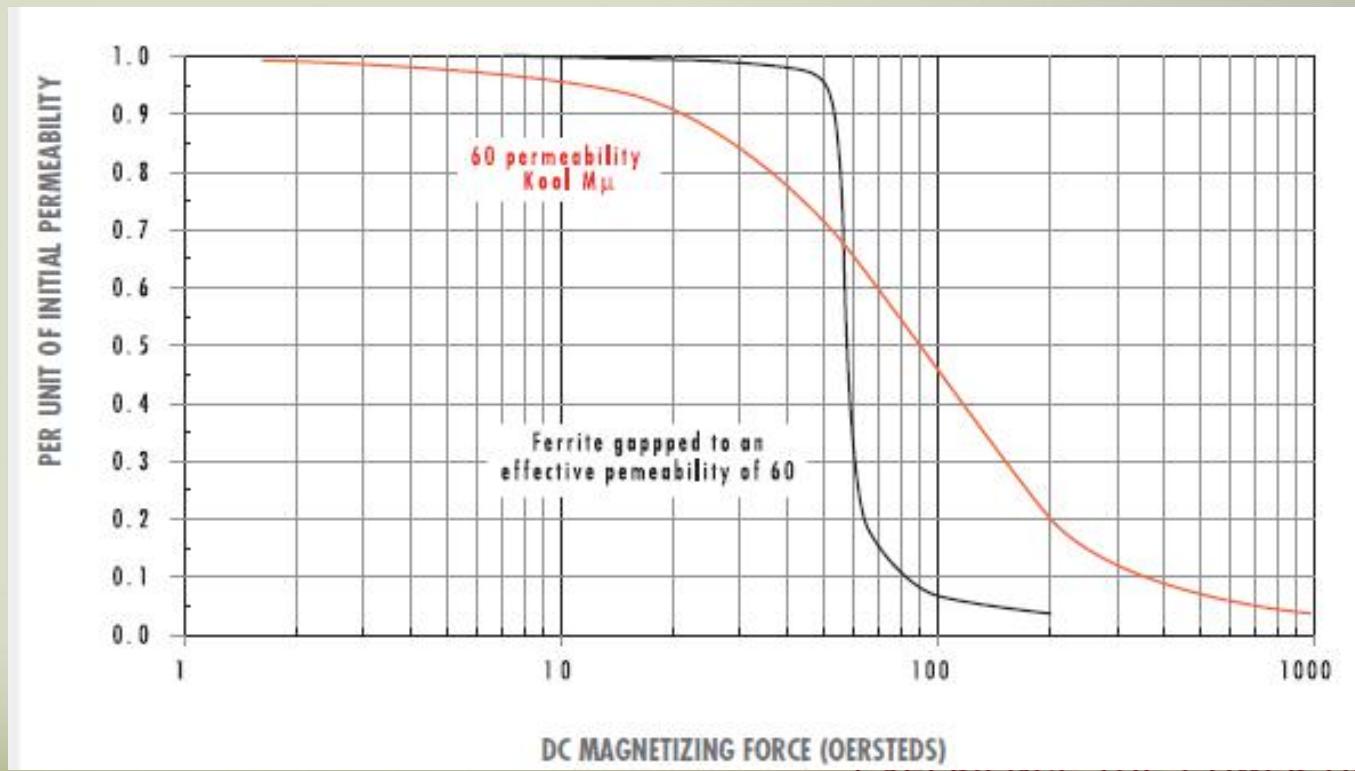
# 美磁磁粉芯纵览

|             | 钼坡莫<br>MPP | 高磁通<br>High Flux | 铁硅铝<br>Kool M $\mu$ <sup>®</sup> | 新一代铁<br>硅铝<br>Kool M $\mu$ <sup>®</sup><br>MAX | 铁硅<br>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 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

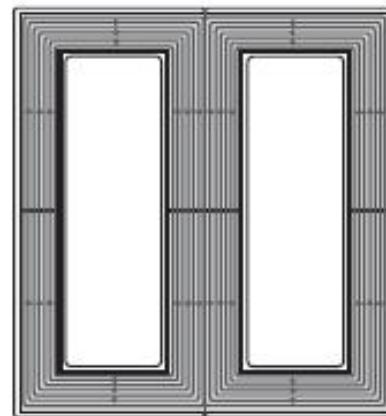


- 容错: 软饱和曲线使设计本身具有容错能力

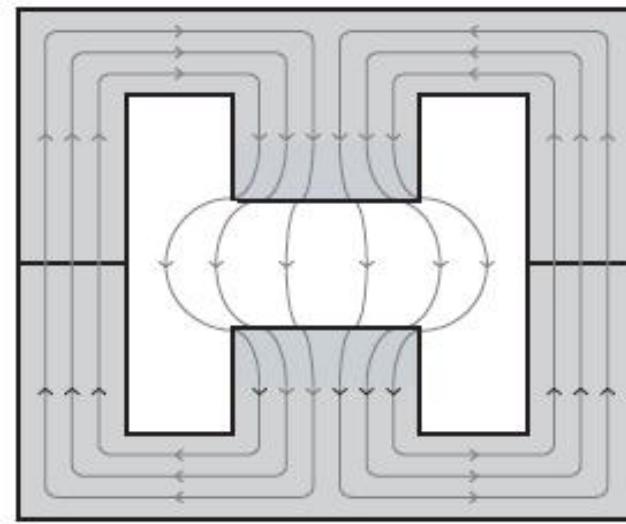
- 无边缘损耗

### 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 Mu

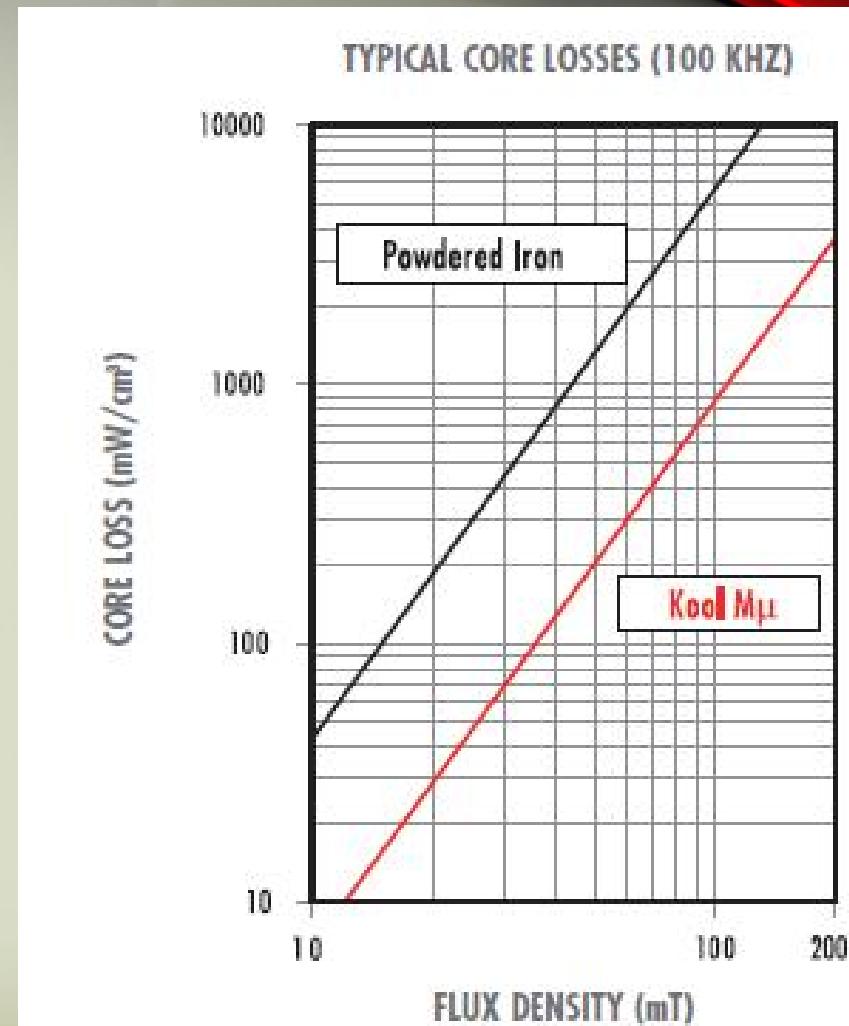


GAPPED FERRITE

# 与铁粉芯对比

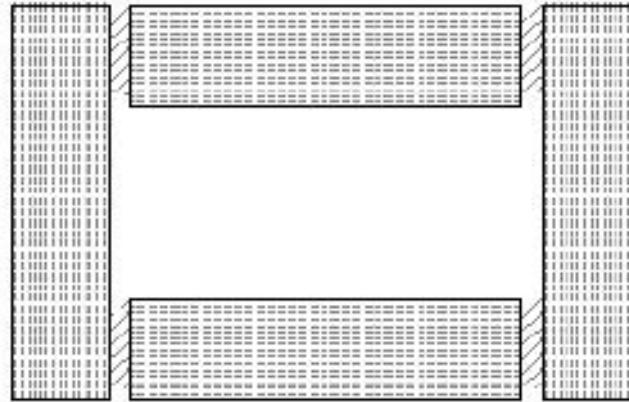
Kool Mu (铁硅铝) 优势:

- **磁芯损耗低:** 在10kHz to 300 kHz范围内, Kool 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



# 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

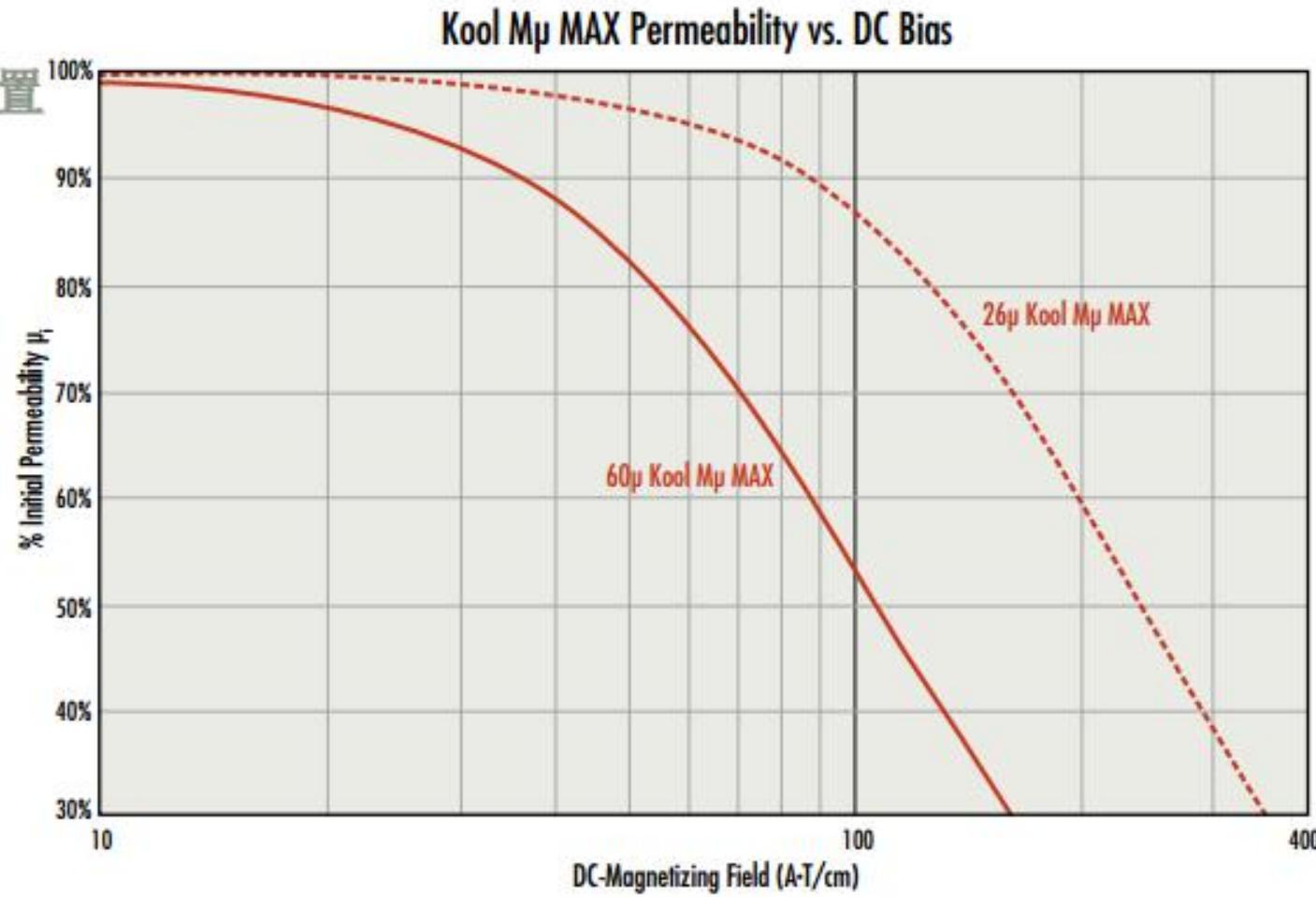
- Kool Mu® MAX 是美磁所推出的新一代铁 硅铝磁芯，包括磁导率26μ和60μ，尺寸 从外径13.5 mm至134 mm。Kool Mu MAX的直 流偏置性能比Kool Mu材料好50%， 磁芯 损耗相比Kool Mu 也更低， 功率处理效果 更佳。所以使用Kool Mu MAX达到与Kool Mu 同样的感值， 所需圈数更少， 降低了 铜线成本， 也减少了温升， 优化了电感输出。当需要改变磁芯来改善电感 效率时， 选用Kool Mu MAX磁芯所 需的成 本， 相较于选用MPP磁芯的成 本要便宜许多。

# Kool Mu MAX 直流偏置曲线

磁导率 vs. 直流偏置

$$\% \text{ Initial Permeability} = \frac{1}{(a + bH^2)}$$

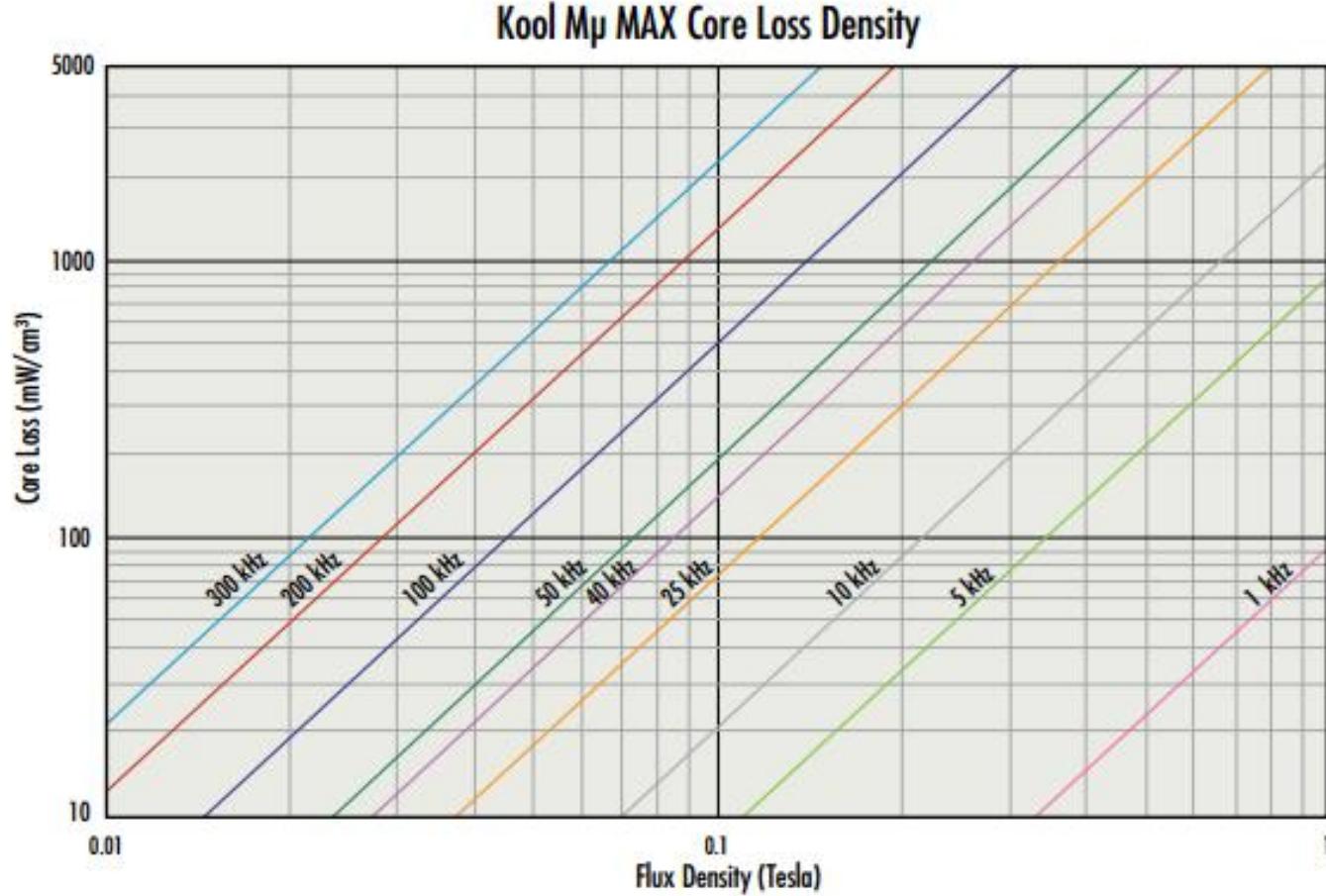
|          | a    | b        | c    |
|----------|------|----------|------|
| 26 $\mu$ | 0.01 | 6.10E-08 | 2.19 |
| 60 $\mu$ | 0.01 | 7.69E-07 | 2.03 |



# Kool Mu MAX 损耗曲线

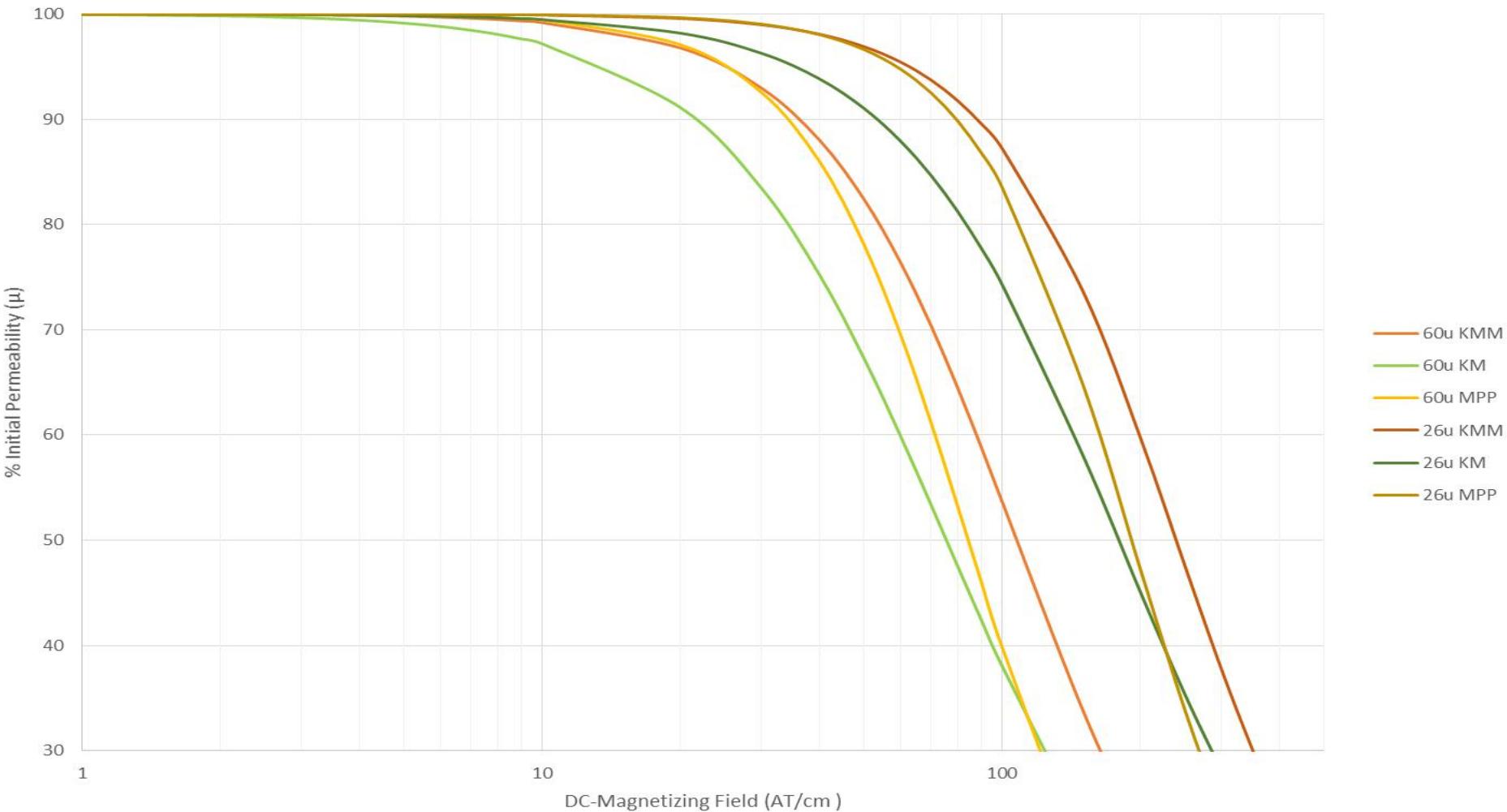
磁芯损耗密度

| $P = a(B^b)(f^c)$ |       |       |
|-------------------|-------|-------|
| 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> |            |
| <b>Kool Mu<sup>®</sup> MAX</b> | 68                   | 135 | 190                             | 500                          | 2.0        |
| <b>Kool Mu<sup>®</sup></b>     | 43                   | 95  | 212                             | 550                          | 1.0        |
| <b>75-Series</b>               | 70                   | 150 | 570                             | 1515                         | 1.2        |
| <b>XFlux<sup>®</sup></b>       | 89                   | 175 | 680                             | 1550                         | 1.5        |
| <b>High Flux</b>               | 87                   | 165 | 353                             | 900                          | 4.0        |
| <b>MPP</b>                     | 60                   | 106 | 174                             | 450                          | 7.0        |

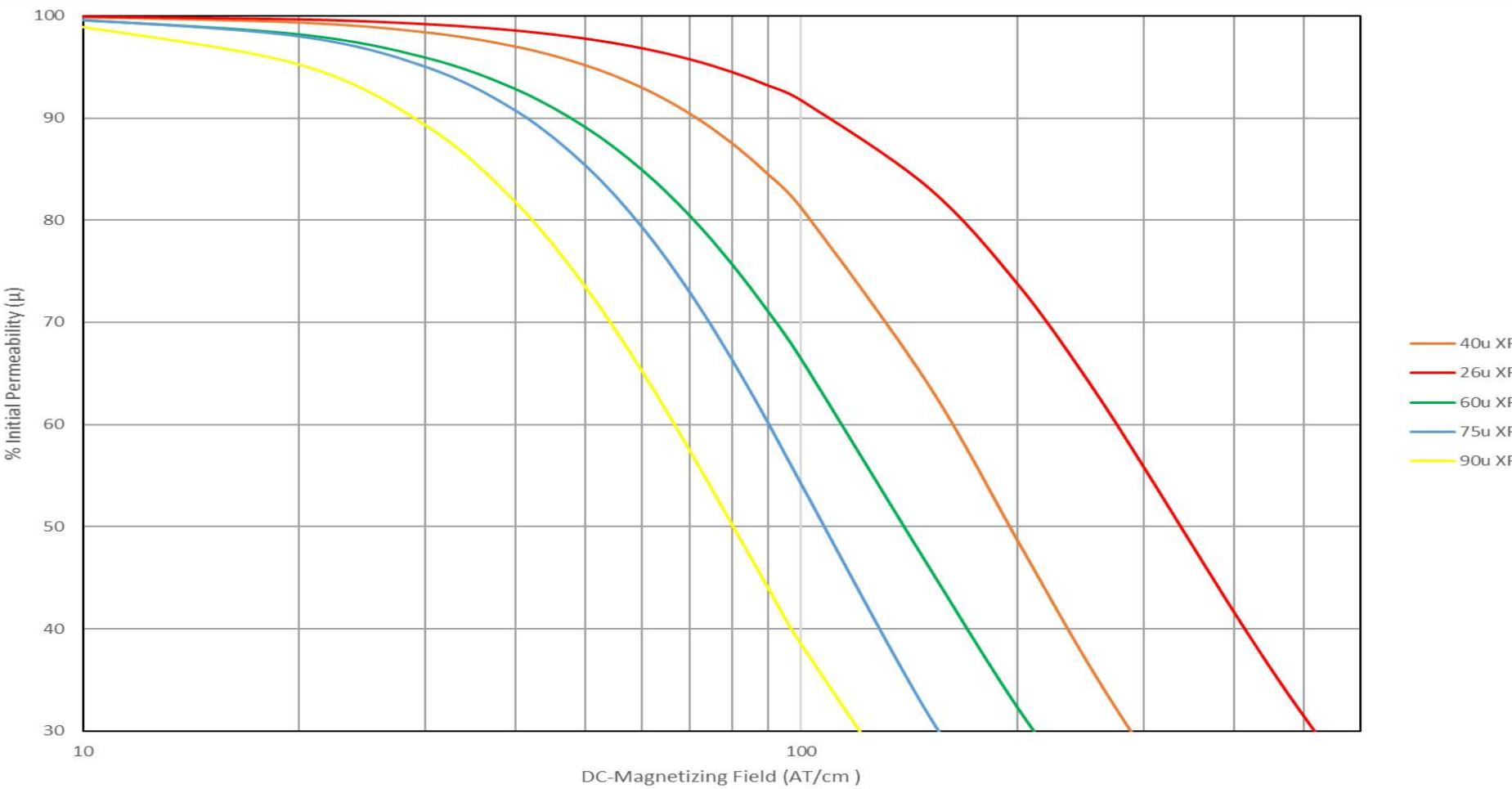
# 铁硅新材料扩展

- 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設計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

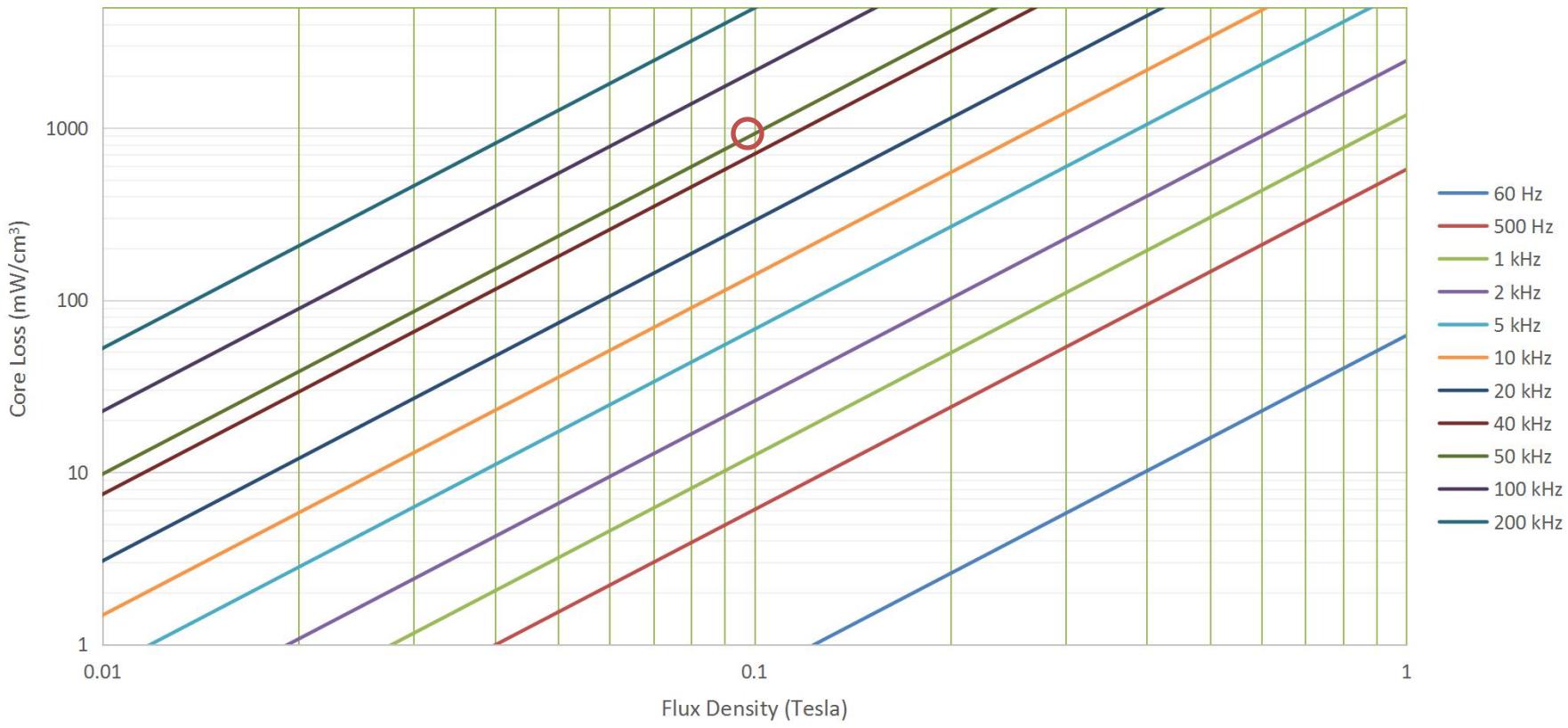
- 磁导率从60u增加至19u, 26u, 40u, 60u, 75u, 90u. 更多的选择可根据不同的电流需求进行设计，低磁导率更支持大电流的设计。
- 形状由环形扩展至超大尺寸环形(134mm), E型(114mm), 方块型(80mm), 通过组装可以支持大电流的设计。
- 直流偏置曲线和损耗曲线更新，损耗更低，曲线拟合更准确。

# 铁硅材料直流偏置曲线

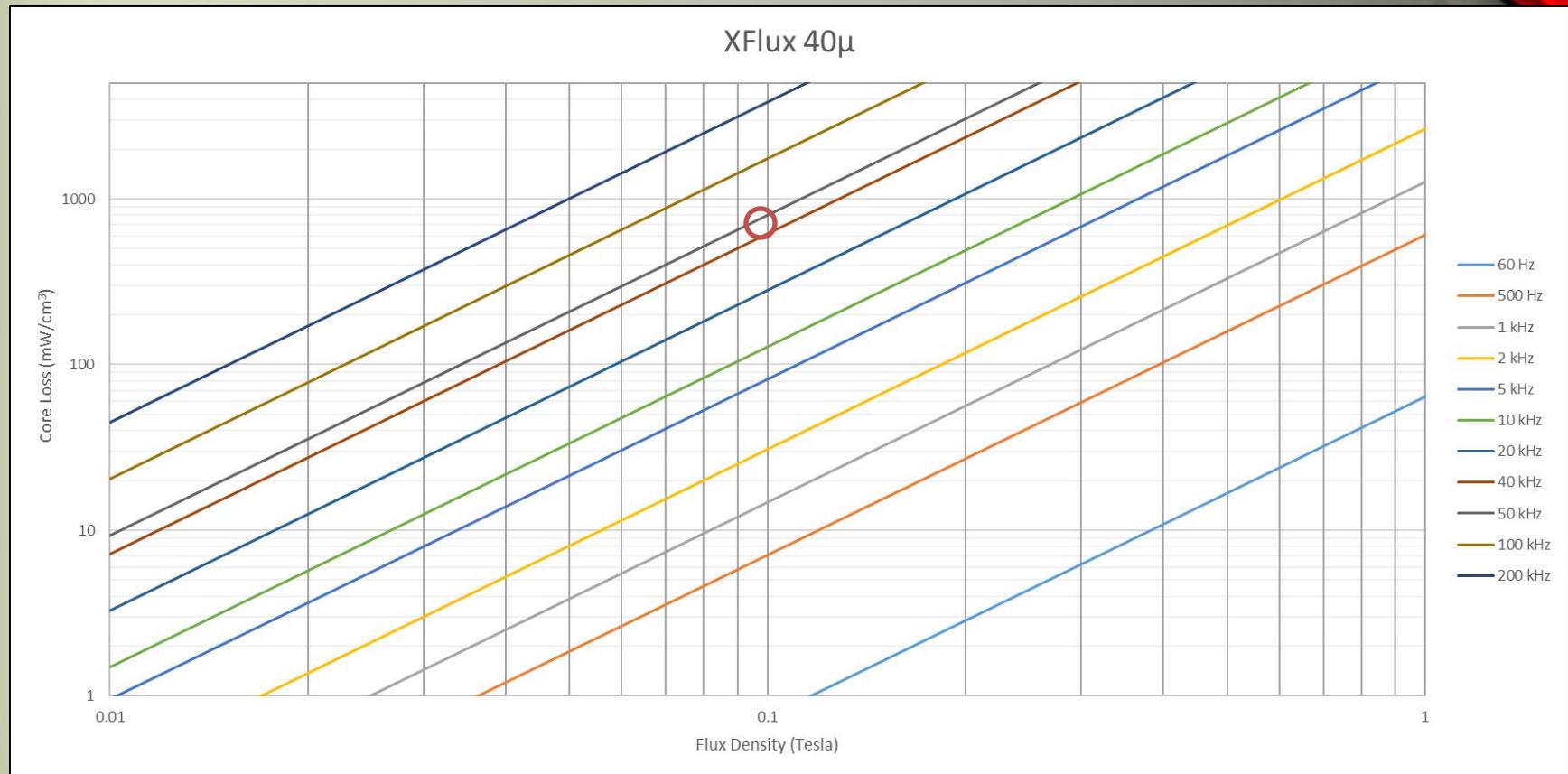


# 铁硅材料损耗曲线-26μ

XFlux 26μ



# 铁硅材料损耗曲线-40μ

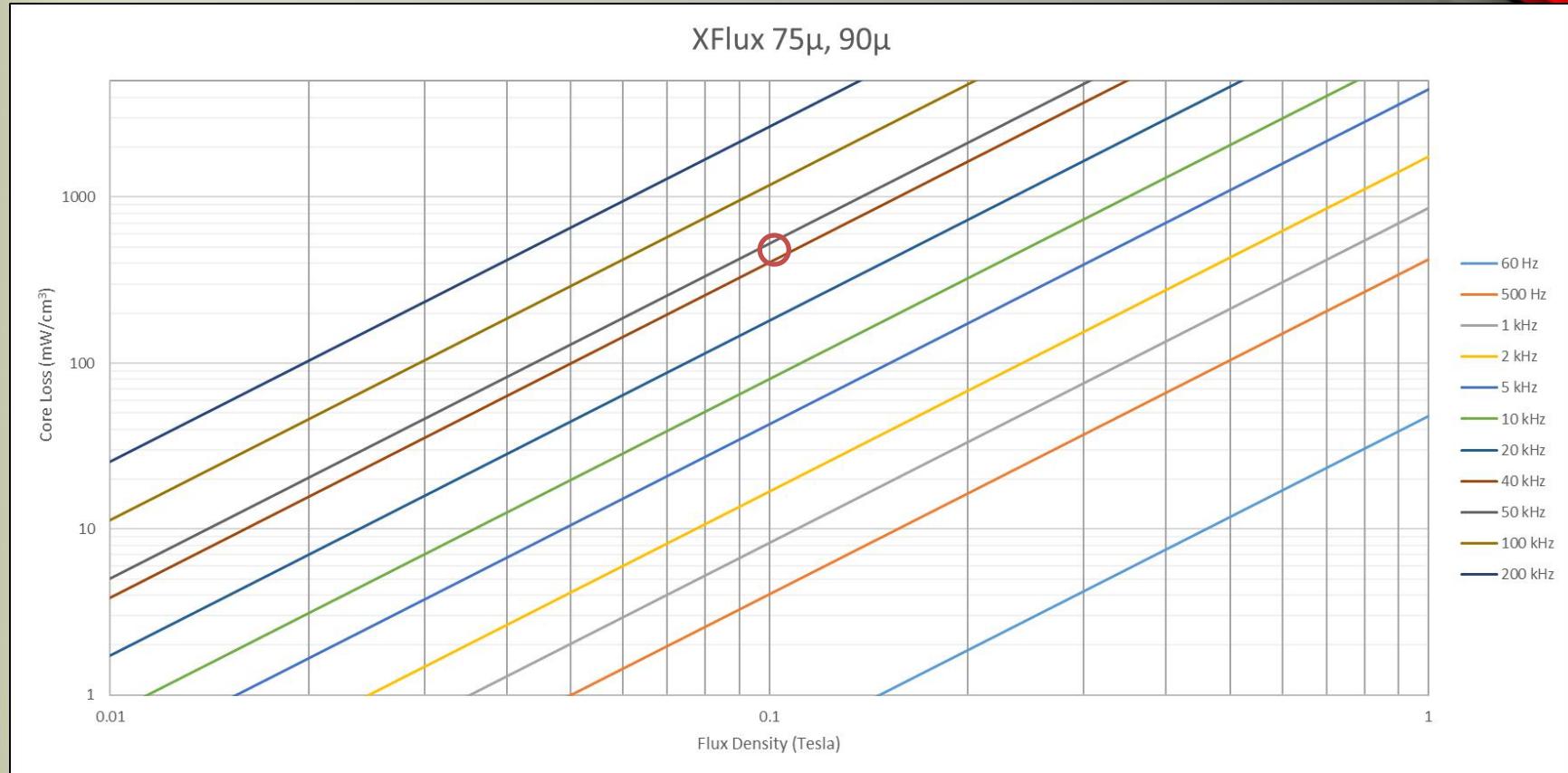


# 铁硅材料损耗曲线-60μ



# 铁硅材料损耗曲线-75μ,90μ

XFlux 75μ, 90μ



# 设计电感时的关键约束

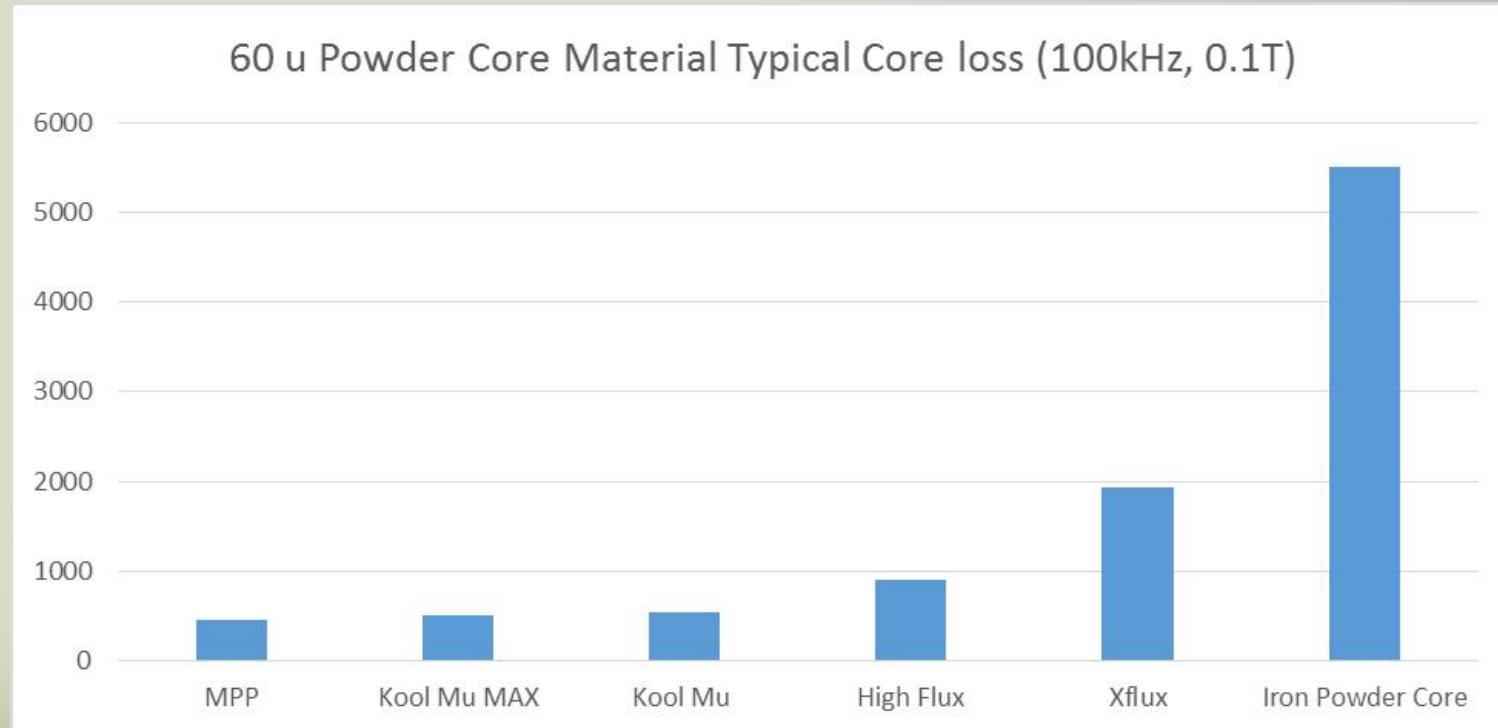
- ✖ 电流峰值时的所需感值
- ✖ 最小的设计尺寸
- ✖ 成本
- ✖ 损耗/效率

# 小功率高频的电感设计举例

## 小功率电感设计需求

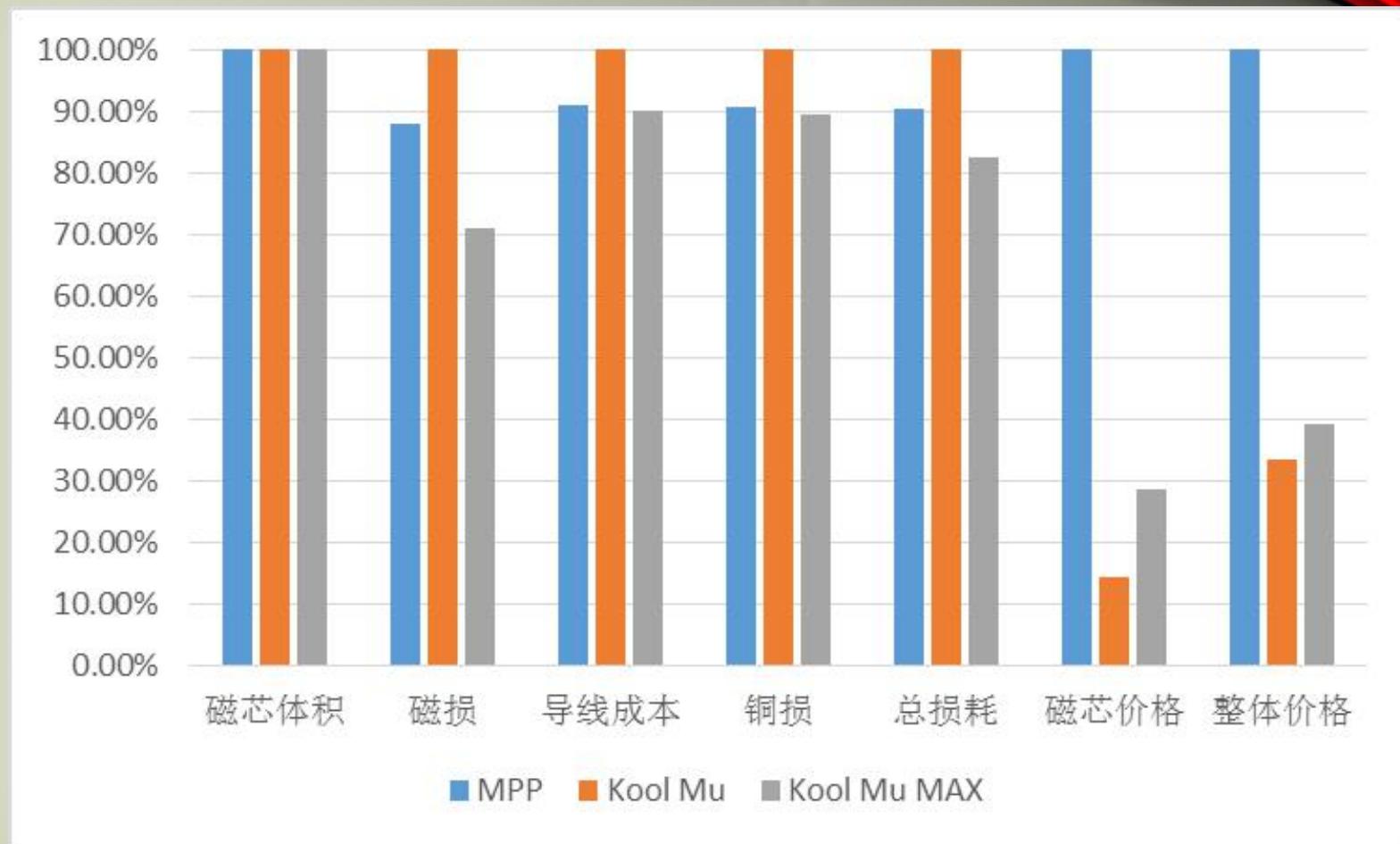
|              |         |
|--------------|---------|
| L @ 1.5 Amp  | >1.2 mH |
| I dc         | 1.5 Amp |
| I ripple     | 0.6 Amp |
| I peak       | 1.8 Amp |
| Frequency    | 100 kHz |
| Total Losses | < 1.5 W |

- 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 M $\mu$ | Kool M $\mu$ 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(℃)                          | 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 uH |
| I dc             | 205 Amp |
| I ripple         | 30 Amp  |
| I peak           | 220 Amp |
| Frequency        | 15 kHz  |
| Temperature Rise | <70 °C  |

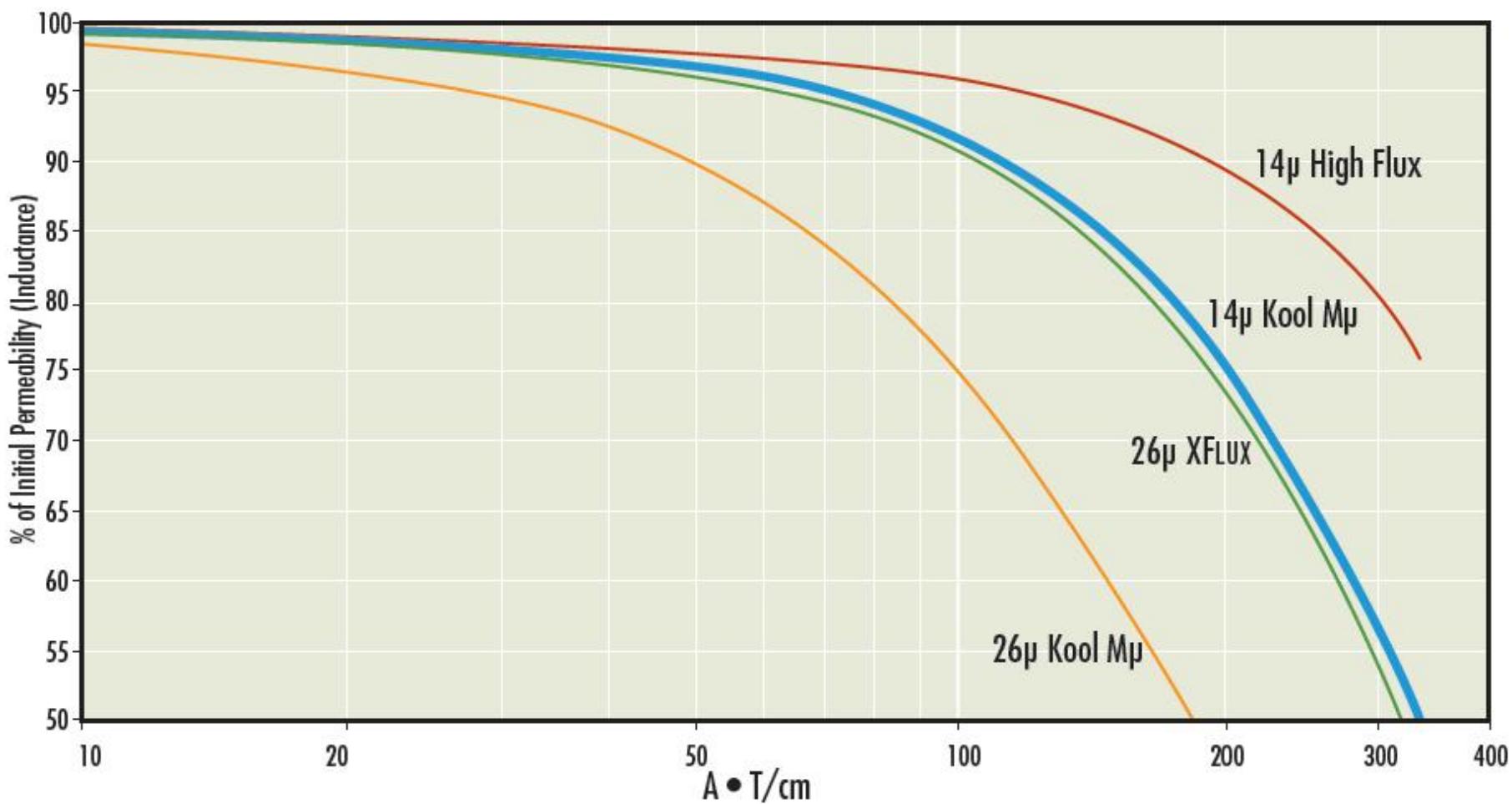
- 单个磁芯无法达到足够大的 $LI^2$
- 考虑环形磁芯堆叠的解决方案

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

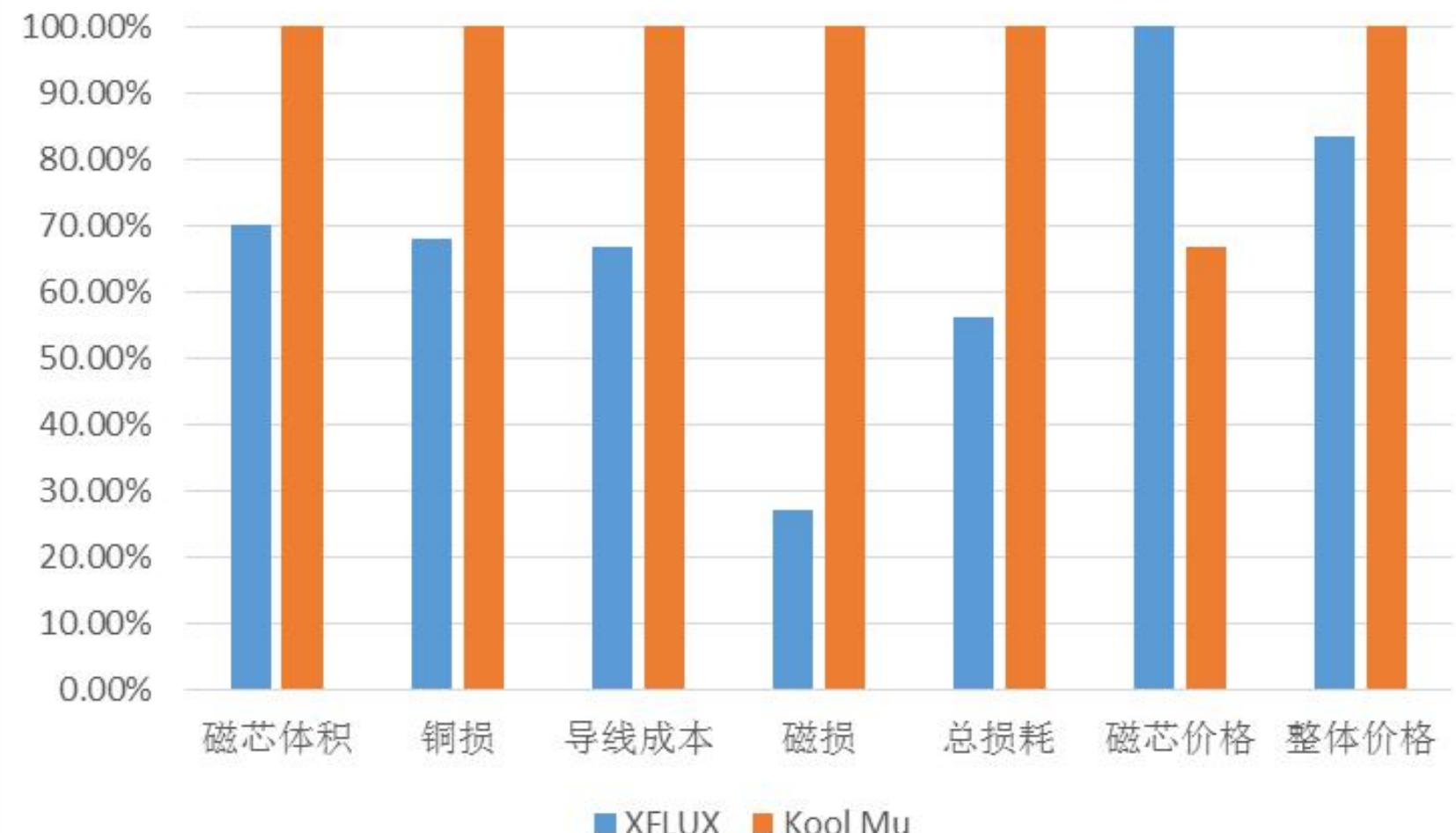
# 铁硅与铁硅铝的直流偏置对比

## Typical DC Bias Performance



| 磁芯信息                           | 设计 #1    | 设计 #2        |
|--------------------------------|----------|--------------|
| 零件号                            | 78337    | 77337        |
| 磁芯数                            | 5        | 8            |
| 材料                             | XFLUX    | Kool M $\mu$ |
| 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(℃)                          | 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

Inductor Design Tool


 Toroid Design | **E Shape Design**

Help

Plot

## Step 1: Design Input

Material Selection **MPP**  
 DC Current **1.5** Amps  
 Peak to Peak Ripple **0.6** Amps  
 Frequency **100** KHz  
 Full Load (L) **1.2** mH  
 Specified Current **1.8** Amps  
 Temp Rise  °C  
 Stack Cores **1**

**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 | 27.7 | mm | HT | 12.0 | mm | U | 60 |
|----|------|----|----|------|----|---|----|

|    |      |    |    |    |  |
|----|------|----|----|----|--|
| ID | 14.1 | mm | AI | 75 |  |
|----|------|----|----|----|--|

## Design Output

|                            |        |     |
|----------------------------|--------|-----|
| Inductance @ Full Load min | 1.208  | mH  |
| Inductance @ No load nom   | 1.534  | mH  |
| Specified Current          | 1.21   | mH  |
| Inductance min             |        |     |
| Core Loss                  | 0.54   | W   |
| Copper Loss                | 0.78   | W   |
| Total Loss                 | 1.32   | W   |
| Temperature Rise           | 21.8   | °C  |
| Number of Turns            | 143    |     |
| Wire Size                  | 22     | AWG |
| Winding Factor             | 35.4%  |     |
| DC Resistance              | 335.99 | mΩ  |
| Finished OD                | 32.3   | mm  |
| Finished HT                | 16.6   | mm  |
| Total Wire Length          | 6320.4 | mm  |

## Adjust

|               |     |
|---------------|-----|
| Adjust Turns  | 143 |
| Adjust AWG    |     |
| Adjust Strand |     |

**Request Quote****Request Sample**

**MAGNETICS**  
 ®

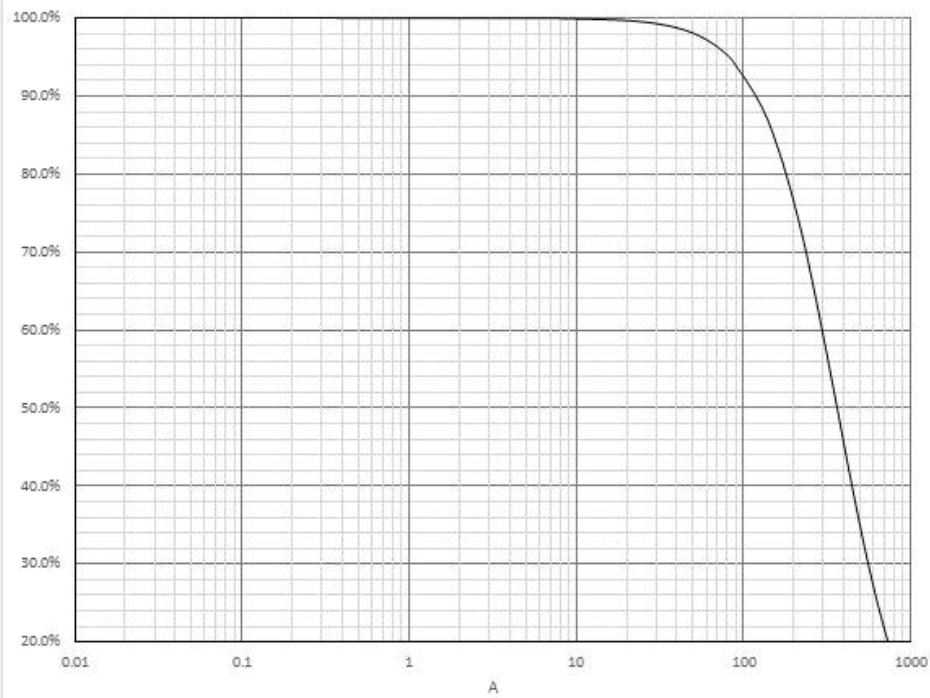
**Magnetics Headquarters**  
 110 Delta Drive  
 PO Box 11422  
 Pittsburgh, PA 15238 USA  
 Phone: 1.800.245.3984  
 +1.412.696.1333

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

EXPERIENCE THE POWER OF CONFIDENCE

DC Bias Curve

DC Bias Curve



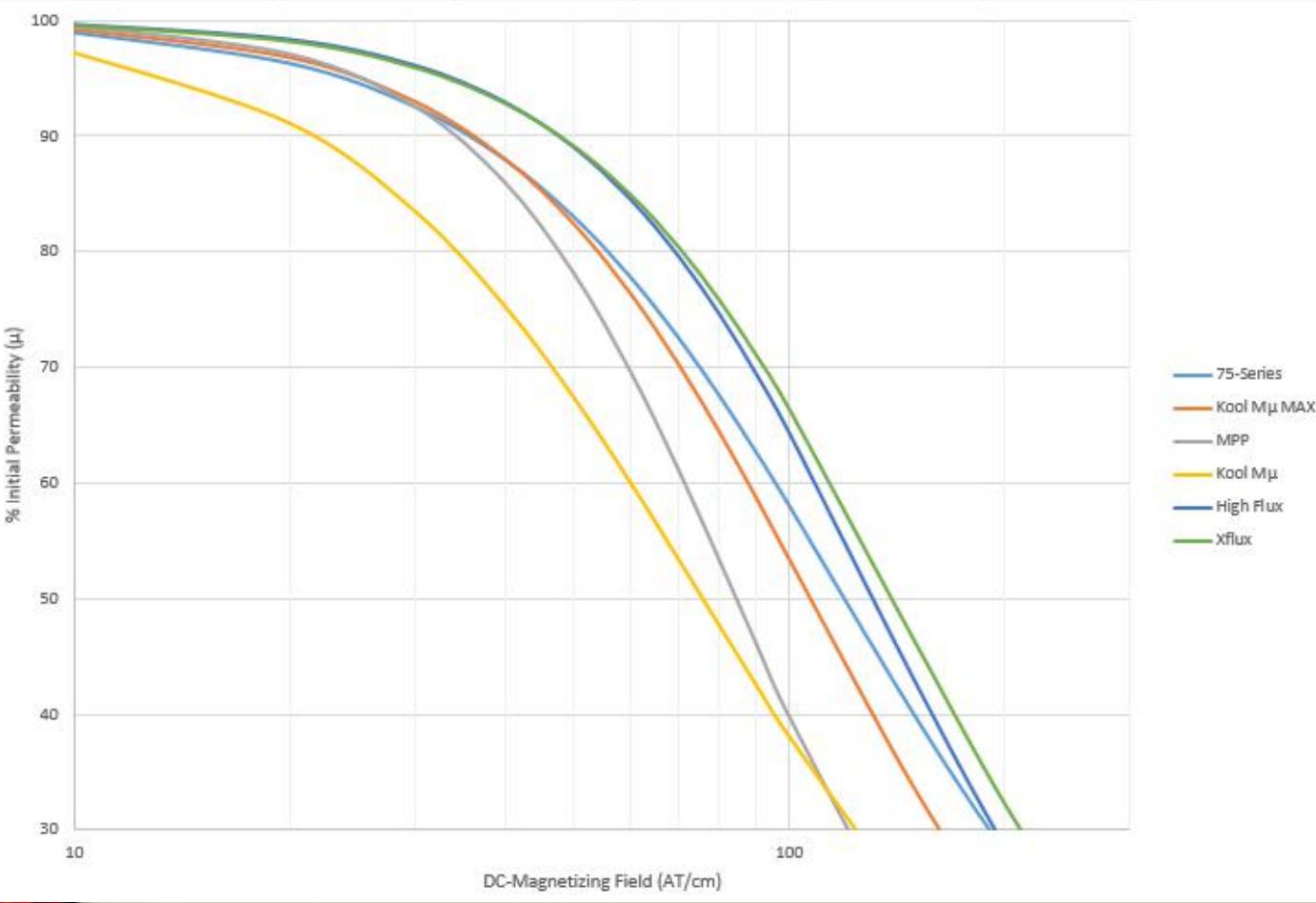
# 磁粉芯在大电流电感领域的应用

## 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



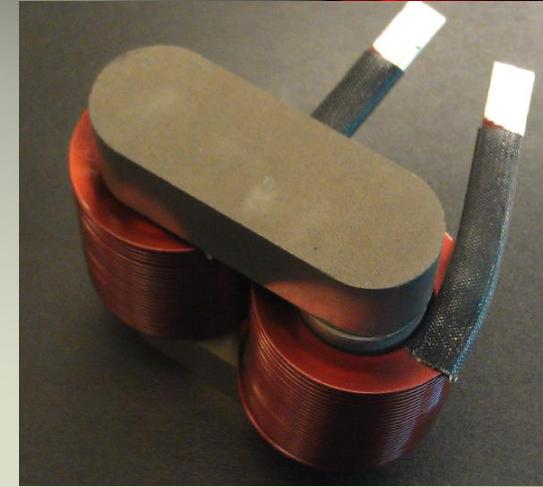
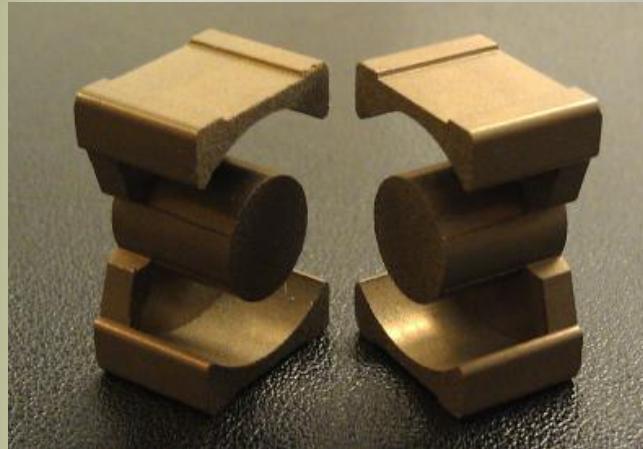
## 混合材料

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



EXPERIENCE THE POWER OF CONFIDENCE

# 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

感谢您的宝贵时间  
问题?