

铁氧体磁铁

具有较高矫顽力的铁氧体磁铁可用于包括扬声器、通信设备、电动机、继电器、传感器等在内的多种应用场合。



■ 标准材料特征和应用

各向同性和各向异性铁氧体磁铁之间并无较大差异。然而，各向异性铁氧体磁铁是通过旋转微粉颗粒（通过在其上施加外部磁场同时压模，然后根据压模方向形成晶体磁轴）制造而成的。因此，与各向同性铁氧体磁铁相比，各向异性铁氧体磁铁大大提高了磁性。单位重量的磁能与铸造磁铁相同。

通过在磁场内压制泥粉制造了湿式各向异性铁氧体磁铁。这些磁铁分成以下类别：Q6（钡型）、SR-1H、SR-2H、SR-1 和 SR-3（锶型）。当设计磁路（包括磁铁）时，如果电路中出现大规模断路或电路受到外部磁场的较大影响，或者必须避免极低温度下出现不可逆去磁现象，建议使用具有较大矫顽力的 SR-1H、SR-2H、SR-1 或 SR-2。如果需要较高磁通密度，建议使用具有较大能量乘积的 SR-3。

SR-30、SR-40 和 SR-40S 是通过在磁场中压制干燥磁粉制造的干式各向异性铁氧体磁铁，它们是大量生产小尺寸产品的理想选择。

■ 标准材料特征


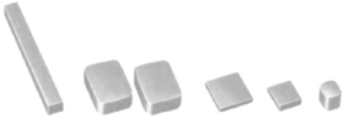





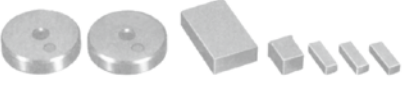
材料	类别		剩余磁通密度 Br T (G)	矫顽力 BHc kA/m (Oe)	最大能量乘积 (BH)max kJ/m ³	密度 g/cm ³	居里温度 (°C)	热膨胀系数 10 ⁻⁶ /°C
Q2	各向同性	钡型	0.20~0.24 (2000~2400)	127~160 (1600~2000)	7.1~10.4 (0.9~1.3)	4.9~5.0	460	0.9~1.5
Q6	湿式各向异性	钡型	0.40~0.43 (4000~4300)	143.3~175 (1800~2200)	28.8~32.0 (3.6~4.0)	5.0~5.2	450	0.9~1.5
SR-1H	湿式各向异性	锶型	0.34~0.37 (3400~3700)	254~279 (3200~3500)	22.4~27.2 (2.8~3.4)	4.75~4.95	460	0.9~1.5
SR-2H	湿式各向异性	锶型	0.38~0.41 (3800~4100)	262~287 (3300~3600)	27.0~32.0 (3.4~4.0)	4.75~4.95	460	0.9~1.5
SR-1	湿式各向异性	锶型	0.36~0.40 (3600~4000)	223~263 (2800~3300)	24.0~28.8 (3.0~3.6)	4.7~4.9	460	0.9~1.5
SR-2	湿式各向异性	锶型	0.38~0.41 (3800~4100)	223~263 (2800~3300)	27.2~32.0 (3.4~4.0)	4.8~5.0	460	0.9~1.5
SR-3	湿式各向异性	锶型	0.41~0.43 (4100~4300)	215~247 (2700~3100)	32.0~35.2 (4.0~4.4)	4.8~5.0	460	0.9~1.5
SR-30	干式各向异性	锶型	0.34~0.38 (3400~3800)	222~255 (2800~3200)	20.6~24.5 (2.6~3.2)	4.8~5.0	460	0.9~1.5
SR-40	干式各向异性	锶型	0.36~0.39 (3600~3900)	218~251 (2750~3150)	23.0~27.9 (2.9~3.5)	4.9~5.1	460	0.9~1.5
SR-40S	干式各向异性	锶型	0.38~0.41 (3800~4100)	214~247 (2700~3100)	27.0~31.9 (3.4~4.0)	4.9~5.1	460	0.9~1.5

■ 物质特征

项	范围	
比热 (J/Kg · K)	630~840	
导热性 (W/m · K)	~5.8	
横向强度 (Kgf/cm ²)	5~9	
抗张强度 (Kgf/cm ²)	2~5	
热膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)	各向异性方向 14~15	
	各向异性方向 9~10	
温度系数 (ΔBr/Br/°C) (ΔHc/Hc/°C)	-0.18~-0.20	
	+0.20~+0.50	
维氏硬度	400~700	
电阻 (Ω · cm)	>10 ⁴	
回复磁导率 (μ rec)	1.05~1.20	
磁化所需的磁化功率	(KOe)	10
	(A/m)	796

铁氧体磁铁

■ 铁氧体磁铁的应用示例

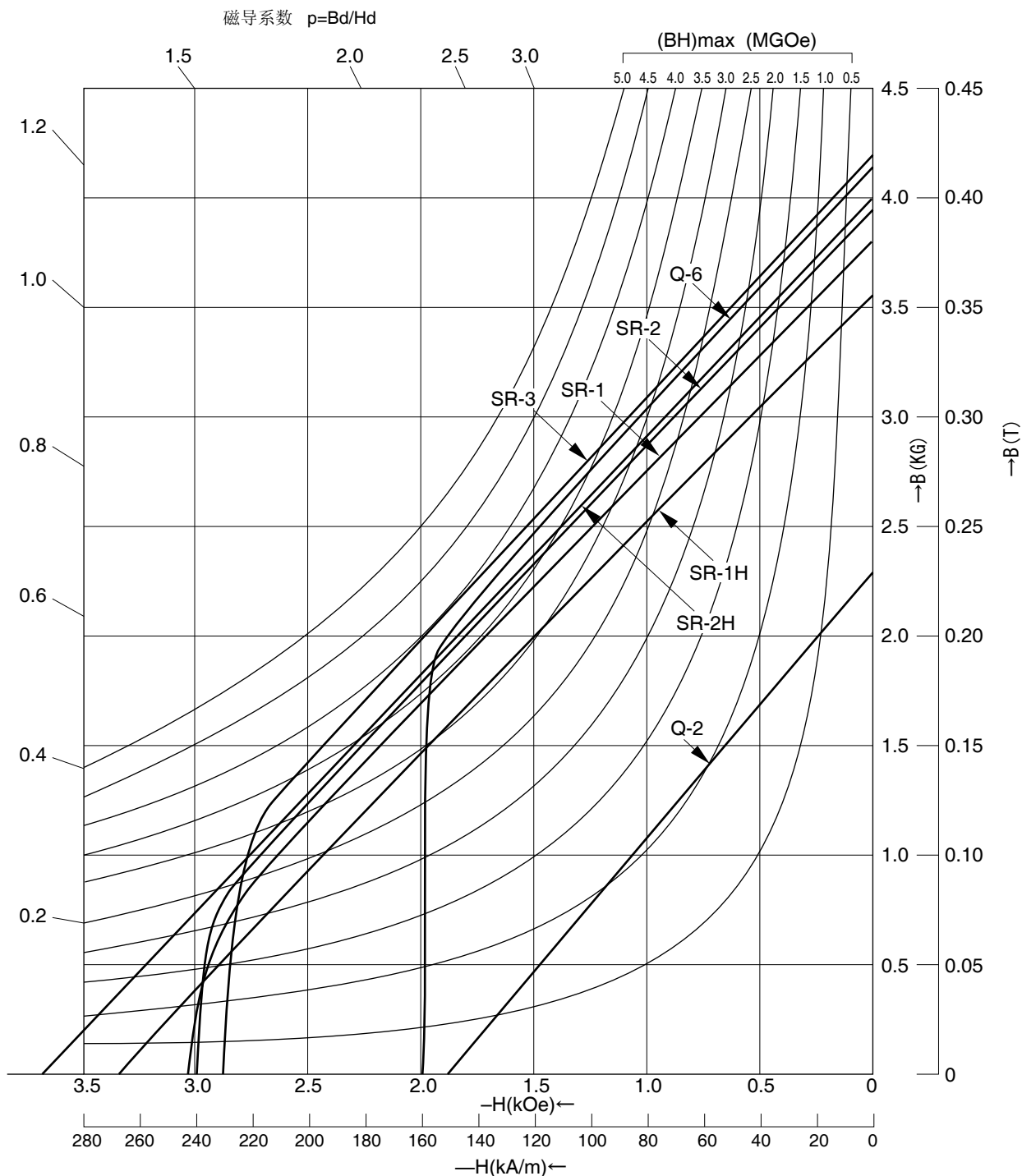
形状	材料	应用
	Q2	混响设备 电视的偏差修正设备 拾音器 测量设备 旋转传感器
	Q2 SR-30 SR-40	磁记录擦除器 磁性卡盘 工具 麦克风
	Q2 SR-30 SR-40	磁性门 电视的偏差修正设备
	Q2 SR-30 SR-40 SR-40S	玩具用电动机 精密电动机 测量设备
	Q2 SR-1 SR-2 SR-30 SR-40	教学材料、玩具 速度控制设备 绝缘体 循环器 传感器
	Q2 SR-30 SR-40	电动式扬声器 旋转传感器 微型电动机 极化继电器 行波管
	Q6 SR-2H SR-3 SR-30 SR-40	扬声器 电动机 磁性卡盘
	Q2 Q6 SR-1 SR-2 SR-3 SR-30 SR-40	极化继电器 传感器

铁氧体磁铁

去磁曲线

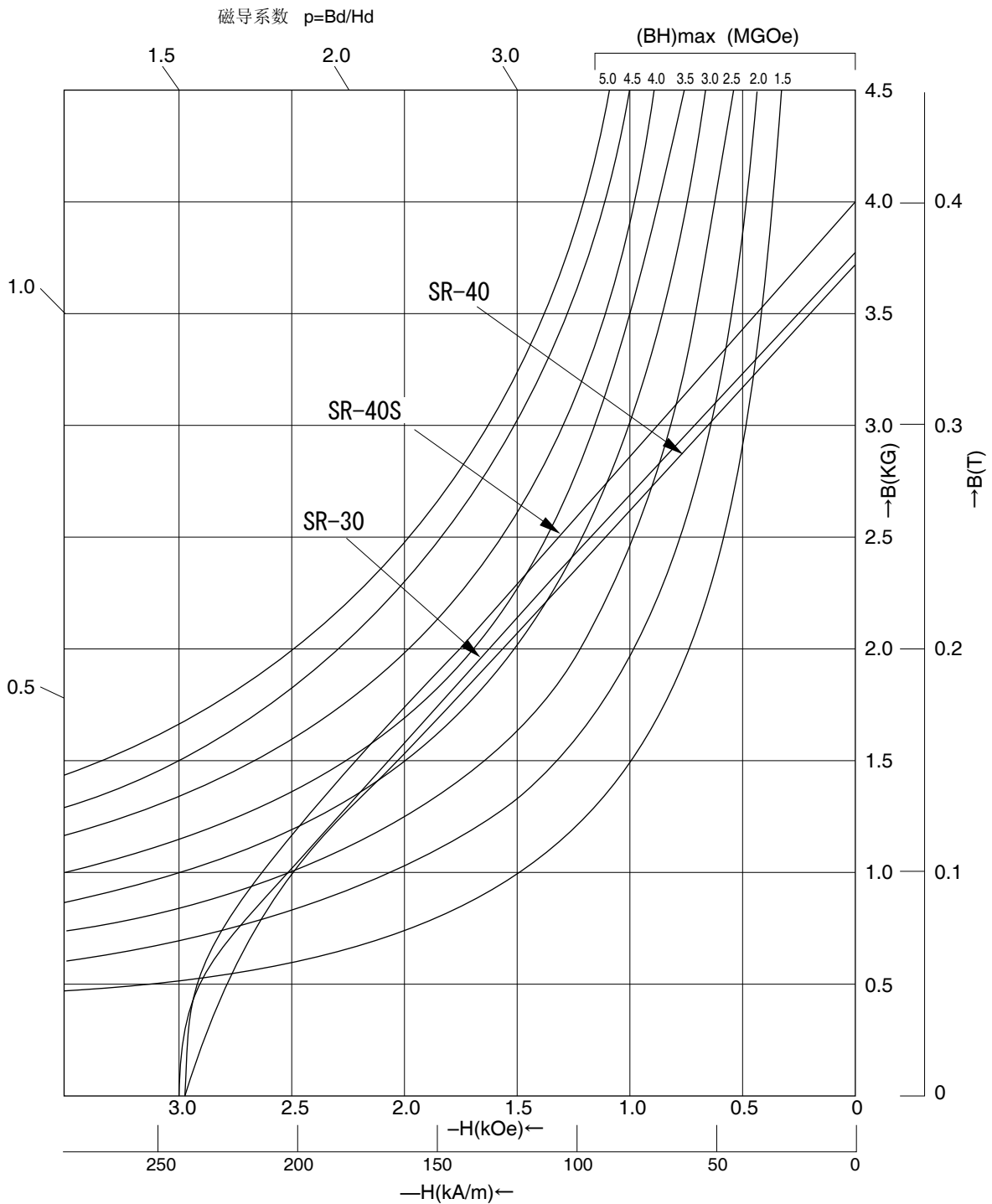
以下两幅图显示了不同类型铁氧体磁铁的去磁曲线。该图清楚显示了每个铁氧体磁铁的性能差异。操作期间的磁导系数 ($\mu=Bd/Hd$) 应低于铸造磁铁的磁导系数。理想值应介于 1.5 和 3 之间。通常磁铁形状为平直形状。

各向同性和湿式各向异性铁氧体磁铁的去磁曲线



铁氧体磁铁

■ 干式各向异性铁氧体磁铁的去磁曲线



铁氧体磁铁

■ 磁稳定性

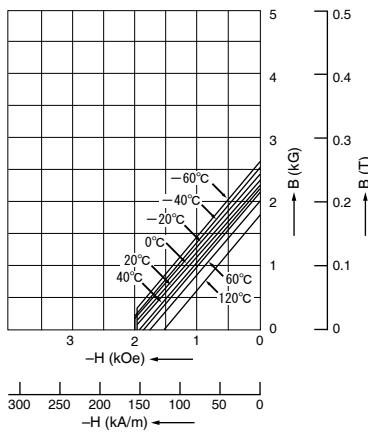
由于操作期间具有多种外部影响，磁性材料易于去磁。因此，使用一般磁铁时需要执行不同的稳定化处理。然而，由于铁氧体磁铁具有较大的矫顽力，因此该磁铁的磁稳定性较高，其磁性几乎不会因外部混乱磁场和机械冲击而降低。

• 温度变化

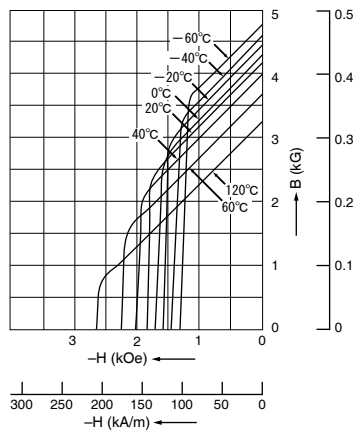
下表显示了不同铁氧体磁铁去磁曲线中的温度变化。铁氧体磁铁具有较大的剩磁温度系数（表观剩磁磁通密度），易于进行不可逆去磁。因此，您必须注意确定磁铁工作点。

■ 去磁曲线中的热变化

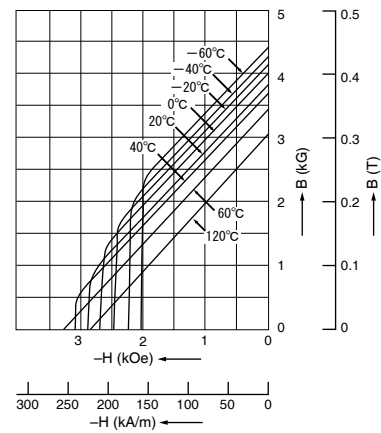
Q2



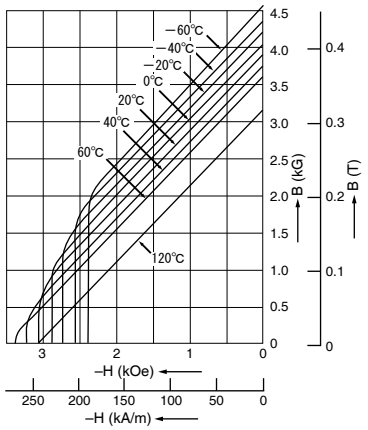
Q6



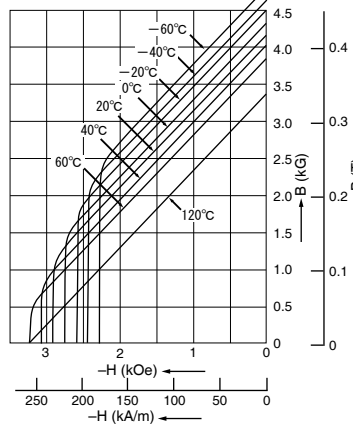
SR-1



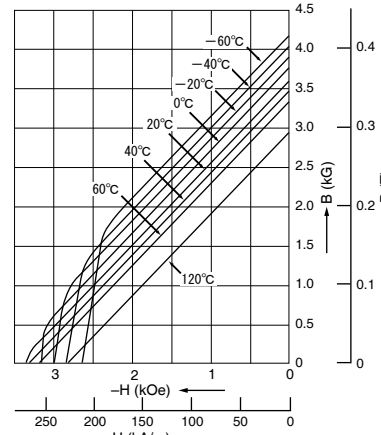
SR-2



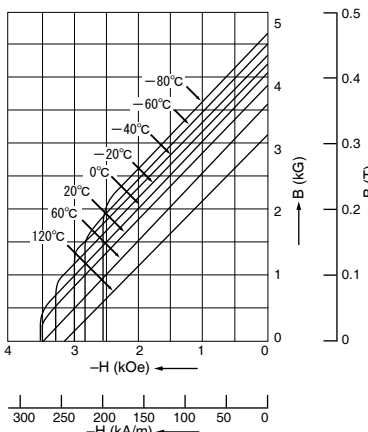
SR-3



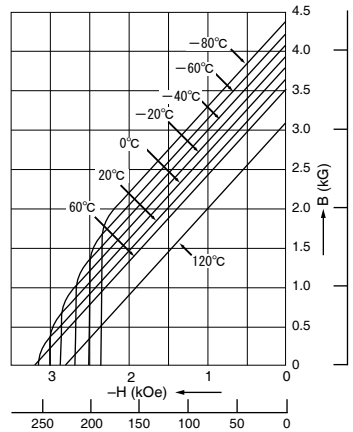
SR-1H



SR-2H



SR-30

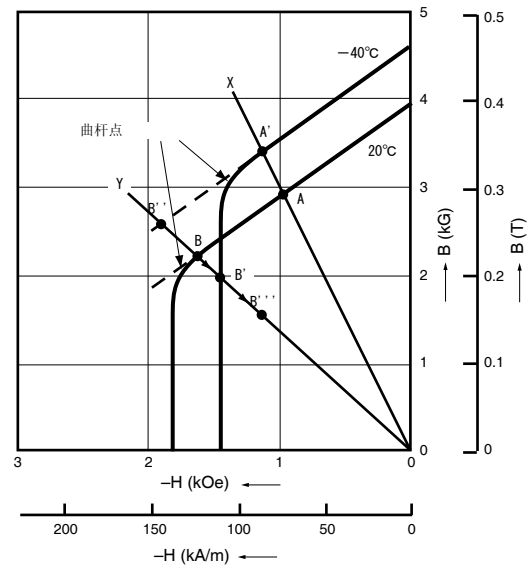


铁氧体磁铁

1) 工作点

右图显示了温度变化时的工作点行进（移动）状态的示例。
 A-B 显示了20°C时 Q6 材料的去磁曲线。A'-B'显示了40°C A-B时Q6材料的曲线。工作线 X-0 和 Y-0 中显示了两种工作状态。在X-0工作状态中，磁铁的工作点随着保持恒温系数（0.19%/°C）的X-0工作线进行不可逆变化。然而，在工作线更陡斜的Y-0工作状态中，工作点将从B移到B'，剩磁值等于不可逆衰减B"-B'的值。即使温度返回正常级别，此差异也不会改变。低温下不可逆去磁后，在 Y-0 工作线上，工作点移至 B'''。

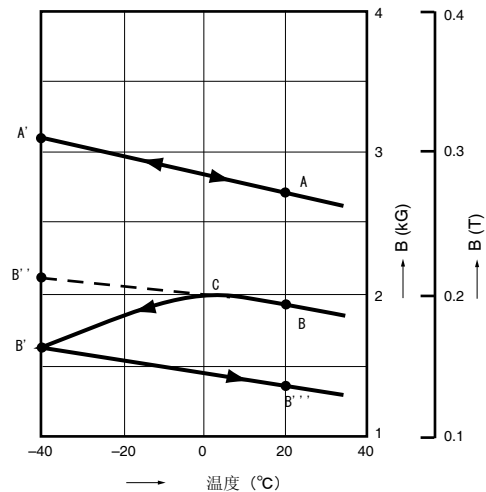
■ 温度与去磁特征



2) 工作点的剩磁曲线 (X-0、Y-0)

右图显示了上图另一比例工作线 X-0 和 Y-0 的剩磁值的变化。
 此图显示了低温下从 C 点开始不可逆去磁。
 此低温去磁受到材料或工作点（磁导系数）的影响。因此，若要避免低温去磁，应使用具有较大 Hc 的材料（如 Q2 ）。或者设置较高的磁导系数，以使在象限II中的材料最低使用限制时工作点位于去磁曲线曲杆点上方。

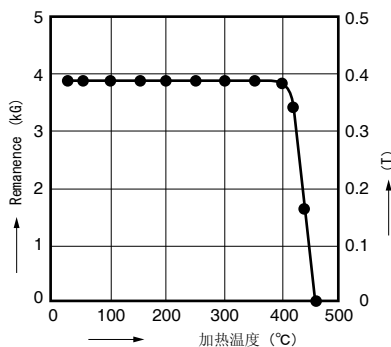
■ 温度与剩磁特征



高温加热特征

尽管在高达 400°C（低于居里温度）时剩磁将有不可逆变化，然而，加热至高温会造成的去磁很少。

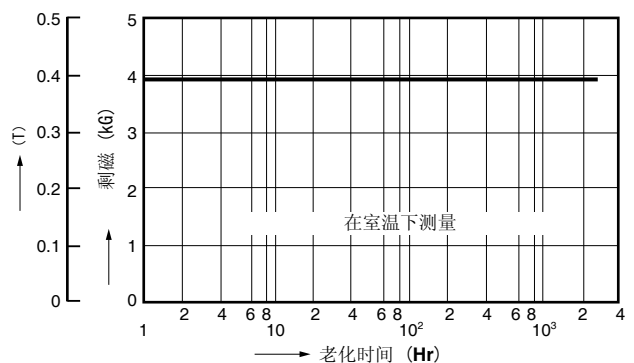
■ 高温加热与剩磁特征的关系



剩磁与时间的关系

剩磁几乎不会随着时间的消耗而改变。

■ 剩磁与时间的关系



铁氧体磁铁

■磁化与消磁

磁化

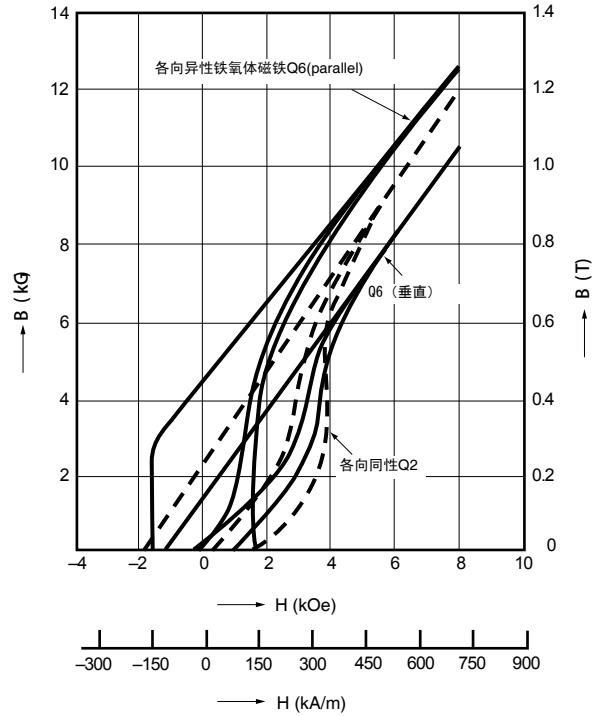
从右图所示的磁滞回线看，铁氧体磁铁要求的磁场比金属磁铁更大。若要达到饱和，必须增加超过 15,000 Oe 的磁场。但实际上，10,000 Oe 已经足够。

- a) 如右图所示，不考虑方向时各向同性铁氧体磁铁的磁滞回线几乎相同。无论在去磁之前还是之后安装铁氧体磁铁，磁化强度都不会改变。因此非常易于操作。
- b) 如右图所示，模塑期间无论铁氧体磁铁平行还是垂直于磁方向，各向异性铁氧体磁铁的磁滞回线都将完全不同。通常，方位角比率 $[Br(//)/Br(\perp)]$ 越大，各向异性铁氧体磁铁的各向异性越好。各向异性介于 3.0 和 4.0 之间。

消磁

每种材料的消磁需要等量反向磁场 H_c ，然而，对于任何材料，反向磁场过高则无法完全进行消磁。因此，若要安全地进行大量消磁，最佳方法是进行加热消磁（加热材料高于居里温度）。

■磁滞回线



■订购信息

当订购MARUWA铁氧体磁铁时，确保指定以下项。

- 材料和磁性特征
- 尺寸和公差
- 是否需要研磨
- 是否需要磁化；磁化方向
- 指明密封和标记
- 材料用途
- 其它相关规格

MARUWA所提供铁氧体磁铁的型号和尺寸如下：

材料	材料类别	形状	形状类别	尺寸	类型和尺寸
各向同性 Q2	M	块型	B	长度 (L) : 15 [mm]	各向同性 : MB-15×10×5
				宽度 (W) : 10 [mm]	干式各向异性 : BB-15×10×5
干式各向异性 SR-30 SR-40 SR-40S	B	段型	C	厚度 (T) : 5 [mm]	湿式各向异性 : WBB-15×10×5
				外径 R (R1) : 15 [mm]	各向同性 : MC-R15×R10×8-5
		内径 R (R2) : 10 [mm]	干式各向异性 : BC-R15×R10×8-5		
		长度 (L) : 8 [mm]	湿式各向异性 : WBC-R15×R10×8-5		
宽度 (W) : 5 [mm]	各向同性 : MD-φ15×5				
盘型	D	干式各向异性 : BD-φ15×5			
		厚度 (T) : 5 [mm]	湿式各向异性 : WBD-φ15×5		
湿式各向异性 Q6 SR-1H SR-2H SR-1 SR-2 SR-3	WB	环型	O	外径 (φ1) : 15 [mm]	各向同性 : MO-φ15×φ10×5
				内径 (φ2) : 10 [mm]	干式各向异性 : BO-φ15×φ10×5
				厚度 (T) : 5 [mm]	湿式各向异性 : WBO-φ15×φ10×5
杆型	R	各向同性 : MR-φ5×15			
		外径 (φ) : 5 [mm]	干式各向异性 : BR-φ5×15		
		厚度 (T) : 15 [mm]	湿式各向异性 : WBR-φ5×15		

※注：干式各向异性和湿式各向异性的厚度方向显示了容易磁化的轴向。

铁氧体磁铁

以下是描述使用铁氧体磁铁所需的磁量（由 SI 单位表示）术语。

■ 磁性

● 磁场

地球上存在着磁场。磁场不仅存在于铁氧体磁铁中，也存在于电导体周围。磁场由 H 表示，单位（SI）由 A/m 表示。例如，地球磁场约为 $24A/m$ 。使用电磁铁易于创建 $1.6MA/m$ 的磁场。然而，需要一些设备来创建更强的磁场。

● 磁化

当在磁场中放置磁性材料时，该材料将产生磁变。这被称作磁化。此瓦，磁化率被称作“磁化强度”。磁化强度由 M 表示，其单位为 T 。

● 饱和磁化

随着施加到磁性材料上磁场的增加，该材料磁性将达到饱和。此磁化程度被称作饱和磁化。例如，钡铁氧体磁铁的饱和磁化约为 $0.44T$ 。

● 充磁

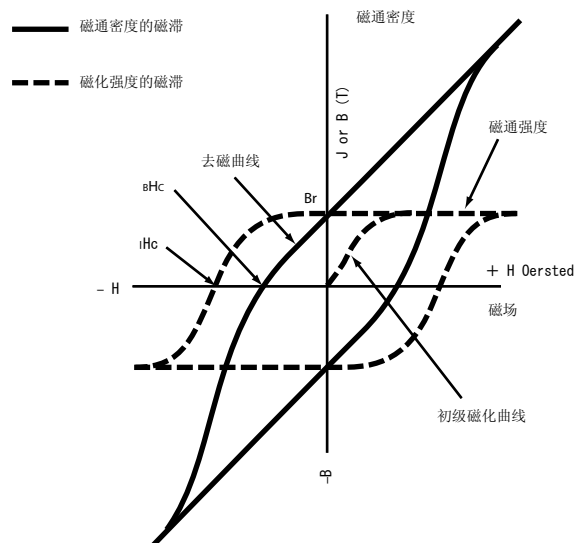
为磁性材料施加足够的磁场以达到饱和，此项操作被称作充磁。当从材料中清除用于充磁的磁场时，将保持充磁状态。经过此过程后，磁性材料将成为铁氧体磁铁。

● 磁通密度（磁感应）

如上所述，磁性材料通过充磁方式进行磁化。在这种情况下，磁通量通过材料。单位面积的磁通量被称作磁通密度（磁感应），由 B 表示，其单位为高斯（gauss），等于磁化强度的单位。此磁通密度由 $B = J + \mu_0 H$ 表示。简言之，该值等于施加到材料的磁场加上磁化强度。不考虑磁场强度，空气中的磁化强度接近于零（换言之，空气的 μ 接近于零）。因此，将用于磁化的磁铁带出磁场范围后，磁铁周围磁化强度将等于现场磁场。事实上，最重要的是此磁通密度的值。

● 剩余磁通密度

本部分介绍了在磁性材料上逐渐施加磁场或通过减小磁场执行逆过程时磁场强度和磁通密度的变化。首先，如之前部分所述，当在磁性材料上逐渐施加磁场时，它将逐渐磁化，最终达到饱和磁化。此过程被称作初级磁化过程。在下一阶段，通过减小磁场并消除施加到磁性材料上的外部磁场获取的磁通密度被称作剩余磁通密度 B_r （剩余磁感应）。此外，在没有反向外部磁场时通过将磁场施加到材料上，磁化和磁通密度将会减小。然后磁通量将不会通过磁性材料。在此阶段施加到材料的磁场强度被称作矫顽力 H_{cb} 。此外，当增加反向磁场时，磁通量将反向流动并将消除磁化强度。换言之，共有两种矫顽力。一种是通过将磁通密度 B 减小至零获取的磁场 H_{cb} 。另一种是通过将磁化强度 J 减小至零获取的磁场 H_c 。



■ 铁氧体磁铁的磁滞回线

当抗磁场增加到超过矫顽力 H_c 时，磁化强度将反向回转并与抗磁场方向相一致，最终磁化强度将饱和。描述这些过程重复的曲线被称作磁滞回线（请参考右图）。

铁氧体磁铁

●抗磁场

铁氧体磁铁通过 N 和 S 极产生外部磁场。另一方面，同一 N 和 S 极产生的磁场存在于磁铁内部。这被称作抗磁场（去磁场）。其尺寸和方向与磁铁内部的磁通密度有所不同。抗磁场易于降低自身的磁化强度。尽可能接近 N 和 S 极存在（磁铁长度较短），去磁场将变得更大。

●去磁曲线

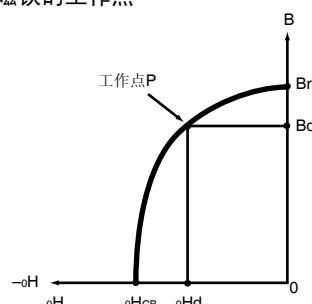
如磁通密度部分所述，铁氧体磁铁使用通过磁化过程产生的磁通量。因此，尽管抗磁场大，铁氧体磁铁中依然保持同样多的磁通密度，可以说此特征更为突出。由此可见，较大剩余磁通密度和矫顽力 B_{HC} 是优质铁氧体磁铁的重要条件。为了找出磁通密度如何根据抗磁场强度而变化，应使用去磁曲线。此曲线与磁滞回线的第二象限相同，该象限介绍了磁通密度和磁场之间的关系。

（请参考上一页的图）评估铁氧体磁铁的第一步是查看磁滞回线。

●工作点

当施加到铁氧体磁铁的抗磁场等于 H_d 时，磁铁生成在去磁曲线上符合 B_d 的磁通密度（磁感应）。由 H_d 和 B_d 表示的点被称作铁氧体磁铁的工作点。（请参考右图）。然而，在实际应用中，此点会根据环境条件而变化。例如，右图中磁化后磁铁的工作点位于 P，当在磁铁上放置铁工件时，它将移至抗磁场减小且磁通密度增加的范围。

■铁氧体磁铁的工作点



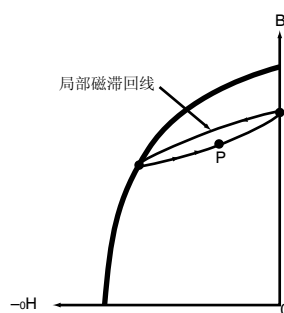
●最大能量乘积

如去磁曲线部分所述，判断铁氧体磁性的标准是查看去磁曲线。换言之，如果存在某个抗磁场 H_d ，只需查看有多少磁通密度 B_d 。因此，利用工作点上 $H_d \times B_d$ 的最大乘积是判断铁氧体磁性的最好方法。 $H_d \times B_d$ 与磁铁发射入外部空间的单位体积能量成比例，该值被称为最大能量乘积。最大能量乘积的单位是 J/m^3 。设计铁氧体磁铁的最佳方法是确保工作点与最大能量乘积的点相同。原因在于能够最小化获取必要能量所需的铁氧体磁量。

●局部磁滞回线

如之前部分所述，工作点根据铁氧体磁铁的工作条件而移动。这并不表示工作点完全在去磁曲线上移动。但它会在作为数据点与初级工作点一起形成的磁滞回线上移动，如右图所示。这种开始于去磁曲线的小磁滞回线被称作局部磁滞回线。通常，铁氧体磁铁的工作点应处于局部磁滞回线上。然而，如果工作点（例如扬声器所用磁铁的工作点）不移动，它自然会处于去磁曲线上。

■局部磁滞回线和工作点



■磁性的热变化

●不可逆热变化

高温之下，即使材料质量不变化，铁氧体磁铁的磁通密度也将下降。磁通密度的变化率将与磁铁处于高温下的时间长度渐渐缩小比例。在相当短的时间内会达到饱和并停止变化。符合磁通密度初级值的此阶段变化率被称作不可逆热变化。在任何铁氧体磁铁中均能发现或大或小的不可逆热变化。具有较大比例的变化程度根据保留温度和磁铁的工作点位置而有所变化。

●可逆热变化（温度系数）

目前，规定了室温下的磁性。在实际操作中，磁铁处于低温或高温时的磁性条件极其重要。为了求出磁性的热变化，需要每种温度下的去磁曲线。通过简化此过程，每 $1^{\circ}C$ 的工作点 B_d 变化被称作不可逆热变化率（温度系数）。此变化率应在每种温度下的不可逆热变化完成后进行测量。此外，对于一般磁铁而言，不可逆热变化率将根据磁铁工作点的位置而有所变化。然而，当此变化率由一个数字表示时，该值应基于最大能量乘积点（如可逆磁导率）的 B_d 变化。

铁氧体磁铁

■ 铁氧体磁铁的设计

无需使用电子计算器即可以较高精确比例设计铁氧体磁铁。以下是设计铁氧体磁铁的基本概念。

■ 设计铁氧体磁铁的基本概念

使用铁氧体磁铁创建磁场时，需要使用铁氧体和磁轭防止磁通势损耗。与设计磁路相关的问题是如何确定所需的最小铁氧体磁铁尺寸。共有两个等式可解决以上问题。

条件是：

- a) 铁氧体磁铁的磁通势等于空隙中的磁通势损耗。的

$$H_d \cdot L_m = H_g \cdot L_g \dots\dots (1)$$
- b) 通过铁氧体中心的总磁通量等于通过空隙的磁通量。

$$B_d \cdot A_m = B_g \cdot A_g \dots\dots (2)$$

使用CGS单位，因此可以说 $H_g = B_g$ 。因此，如果(1) × (2)

$$H_d \cdot B_d = \frac{B_g^2 \cdot L_g \cdot A_g}{L_m \cdot A_m}$$

- A_m : 磁铁的横截面
- L_m : 磁铁的长度
- B_d : 工作点的磁通密度
- H_d : 工作点的磁场强度
- A_g : 空隙的横截面
- L_g : 空隙的长度
- B_g : 空隙中的磁通密度
- H_g : 空隙中的磁场强度

因此，为了最小化铁氧体磁铁的 $L_m \cdot A_m$ ，需要选择 $B_d \cdot H_d$ 最小化时铁氧体磁铁去磁曲线上的最大能量乘积点。然后，在选择 H_d 和 B_d 后，需要检查是否可生成必要空隙（体积= $A_g \cdot L_g$ ）所需的磁场 B_d 。然而实际上，磁通势损耗和磁漏通量非常大，需要大量修改等式 (1) 和 (2)。此修改方法被称作磁通势（磁阻系数）的损耗系数和漏磁系数。

当这些值被表示为：

- f : 漏磁系数
- r : 磁阻系数

以下等式将建立：

$$F = H_d \cdot L_m = r \cdot B_g \cdot L_g \text{ (磁通势)} \dots (1)'$$

$$\phi = B_d \cdot A_m = f \cdot B_g \cdot A_g \text{ (磁通量)} \dots\dots (2)'$$

磁阻系数 r 是用于以下情况的校正系数：磁轭中或磁轭与磁铁之间的接缝部分消耗掉了铁氧体磁铁产生的磁通势。除了设计磁铁为非序数时，该值应介于 1.1 和 1.5 之间（通常为 1.3）。漏磁系数是用于以下情况的校正系数：铁氧体磁铁产生的磁通量在空隙或磁轭周围泄漏。此值随着磁路状态而所有变化。

示例1: 求出 B_g 值

现在，如果已经确定磁路的形状和尺寸并求出 f ，从(1)和(2)建立的等式将为：

$$\rho = \frac{B_d}{H_d} = \frac{L_m \cdot A_g \cdot f}{A_m \cdot L_g \cdot r}$$

由于已经确定 L_m 和 L_g ，因此也可确定磁导系数。另一方面，可从去磁曲线求出 B_d 和 H_d 。从(2)

$$B_g = \frac{B_d \cdot A_m}{f \cdot A_g}$$

因此可求出 B_g 值。只有使用类似磁路估计 f 时才能利用此等式求出 B_g 。

● 漏磁系数和磁导

通过精确假定磁通量流可求出漏磁系数 f ，并作为下表中相关等效电路将其计算出来。

■ 漏磁系数与磁路

磁通势 F	电动势 V
磁通量 ϕ	电流 I
磁阻 R_m	电阻 R
$R_m = \frac{1}{\mu S}$	$R = \frac{1}{\sigma S}$
磁导率 μ	电导率 σ
磁导度 P	电导度 G
$P = \frac{1}{R_m}$	$G = \frac{1}{R}$
$F = NI = R_m \mu \phi$	$V = R \cdot I$

铁氧体磁铁

■ 铁氧体磁铁的设计

在右图所示的电路中，外磁铁的磁导系数P被定义为 $P = \phi / F$.

另一方面，从等式 $F = Hd \cdot Lm$ 、 $\phi = Bd \cdot Am$ ，以下等式将建立：

$$\rho = \frac{Bd}{Hd} = P \cdot \frac{Lm}{Am} \dots\dots (3)$$

因此，磁导系数P等效于磁铁长度Lm和横截面Sm等于单位尺寸时的磁导系数P。因此也可称作单位磁导率。

下一步，如果外部磁路被分成两个系统，从右图中将建立以下等式。带有2个外部磁场的磁路

$$F = \phi g / Pg = \phi f / Pf$$

$$\phi = \phi g + \phi f$$

$$= F(Pg + Pf)$$

当总磁导率设为 P_T 时，

$$P_T = Pg + Pf$$

间隙中磁导率定义为Pg，漏磁部分磁导率定义为Pf时，漏磁系数f将定义为：

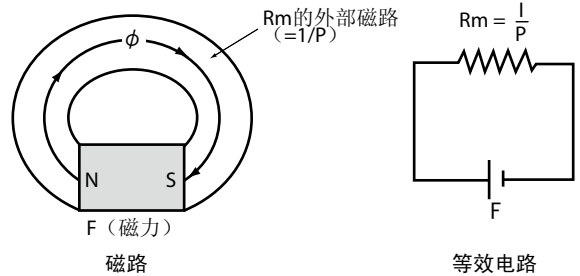
$$f = \frac{\text{总磁通量}(\phi)}{\text{间隙中的总磁通量}} = \frac{Pg + Pf}{Pg} = \frac{P_T}{Pg}$$

此外，铁氧体磁铁的磁导系数可从等式(3)定义：

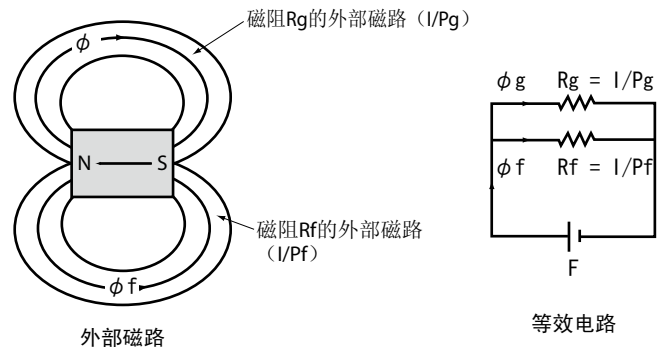
$$\rho = P_T \cdot \frac{Lm}{Am \cdot r}$$

右下图显示了磁路的漏磁状况示例。

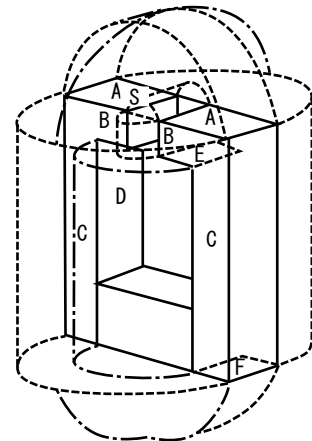
磁路和等效电路



具有2个外部磁场的磁路

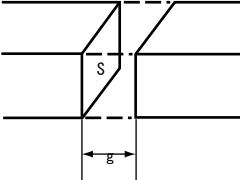
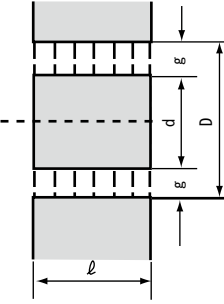
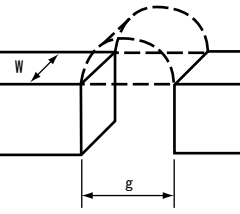
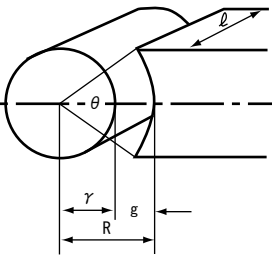
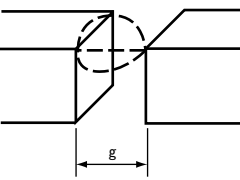
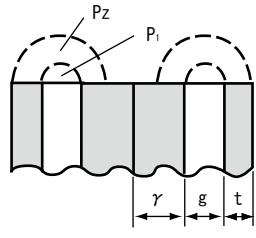
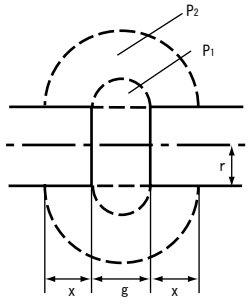
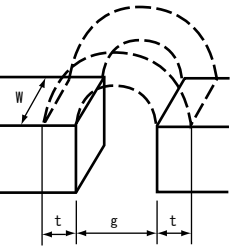


漏通量的示例



铁氧体磁铁

不同空隙的磁导率

位置	等式	位置	等式
平行、平坦 两个表面之间的磁导率 	S: 磁极面积 g: 空隙距离 $P = \frac{S}{g}$	同心管表面之间的磁导率 	$P = 2\pi \ell \ln \frac{D}{d}$ (当g小于d时 $g/d < 0.01 : P = \pi d \ell / g$)
来自直线的桶形磁导率 	W: 磁轭或磁铁宽度 $P = 0.264W$	圆形表面之间的磁导率 	$P = \Theta \ell \ln \frac{R}{Y}$ (当g小于Y时, $P = \Theta Y \ell / g$)
符合四分之一球的来自拐角的磁导率 	g: 空隙距离 $P = 0.077g$	圆柱形空隙的表面之间的磁导率 	$P = P_1 + P_2$ (Y > t) $= \left(\gamma + \frac{g}{2}\right) \{1.66 + 2 \ln(1 + 2t/g)\}$ (Y < t) $= \left(Y + \frac{g}{2}\right) \{1.66 + 2 \ln(1 + 2Y/g)\}$
符合四分之一球的来自侧线的磁导率 	t: 所需距离 g: 空隙距离 $P = \frac{t}{4}$	圆柱形侧板的表面之间的磁导率 	$P = P_1 + P_2$ $= 1.65(Y + 0.212g) + \{2r + \sqrt{g(g + 2x)}\} \ln(1 + 2x/g)$
来自侧板的桶形磁导率 	W: 磁轭或磁铁宽度 t: 所需距离 g: 空隙距离 ① 当 $g \geq 3t$ 时, $P = 0.637 \frac{W}{1 + g/t}$ ② 当 $g < 3t$ 时, $P = \frac{W}{\pi} \ell \ln \frac{g + 2t}{g}$		

铁氧体磁铁

示例2: 求出漏磁系数

磁导率平行并存在于较大数量时的设计方法:

- 1) 应将空隙周围的磁场流设置为尽可能接近上一页的图。(包括间隙)
- 2) 利用上一页的图求出每一部分的磁导率Pg、Pf1 ----- Pfm。
- 3) 求出 $P_T = P_g + P_{f1} + \dots + P_{fm}$
- 4) 求出 $f = P_T / P_g$
- 5) 求出 Am, 因此 $p = P_T \times (L_m / A_m)$ 是最佳去磁参数。在这种情况下, $L_m = (r B_g \cdot L_g) / H_d$ 。
- 6) 当确定尺寸时再次确认f。

该方法利用铁氧体磁铁被均匀磁化这样一个事实, 如果磁铁的强度为I, 横截面中单位面积的磁场密度与磁化方向垂直。根据库仑定律, 当一个位置具有磁极I时, 该位置(与初始位置的距离为R)的磁极产生的磁场如下:

$$H = \frac{I}{\ell^2}$$

因此, 如果表面密度1分配到直径为ro的圆盘上, 中心轴上该位置(距离为R)的磁场将为:

$$H = 2\pi \left(1 - \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + r_0^2}} \right) (\rho_e) \dots \dots (4)$$

磁极均匀分配是利用此方法的基本条件。因此, 仅当工作点位于45°磁化曲线角的区域时此方法才有效。换言之, 如果工作点位于磁化曲线的转向点上方, 此方法对所有铁氧体磁铁皆有效。

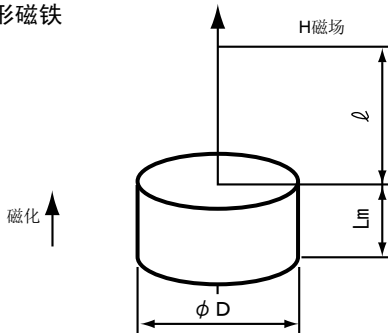
示例1: 圆柱形磁铁中心轴的磁场

在这种情况下, 将下图显示的尺寸以及 $2\pi I = \frac{Br}{2}$ 和 $\rho_e = \frac{D}{2}$ 代入等式(4)。将这些加到前部和后部圆周的磁极所产生的磁场总和上。

因此, 磁场将为以下等式:

$$H = \frac{Br}{2} \left(\frac{(\ell + L_m)}{\sqrt{(\ell + L_m)^2 + \frac{D^2}{4}}} - \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + \frac{D^2}{4}}} \right) \dots \dots (5)$$

■ 圆柱形磁铁



示例2: 若为复面圆柱形磁铁

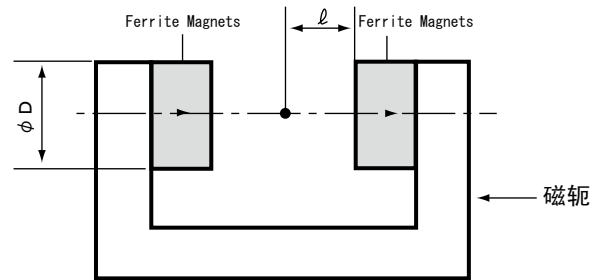
若为左下图所示的复面磁铁, 中心点上的磁场将为等式(5)的两倍。

示例3: 若为复面圆柱形磁铁并通过磁轭连接背面

在这种情况下, 下图背面上的磁场将消磁。因此可使用等式(4)的双倍。

$$H = Br \left(1 - \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + \frac{D^2}{4}}} \right)$$

■ 如果连接磁轭



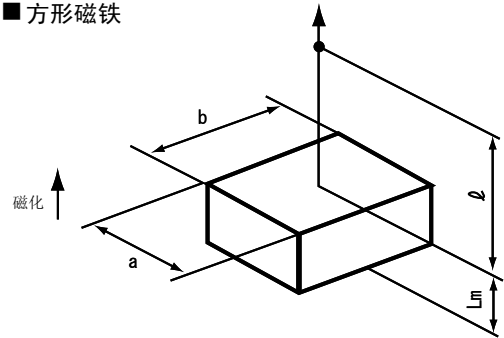
磁铁尺寸比率(D/L)越小, 误差率就越小。

示例4: 若为方形磁铁

通过应用下图所示尺寸(角度为弧度), 可建立以下等式:

$$H = \frac{Br}{\pi} \left[\tan^{-1} \frac{ab}{2\ell\sqrt{4\ell^2 + a^2 + b^2}} - \tan^{-1} \frac{ab}{2(\ell + L_m)\sqrt{4(\ell + L_m)^2 + a^2 + b^2}} \right] \dots \dots (6)$$

■ 方形磁铁



利用这些方法可求出有孔磁铁内外部磁场。与实际值相比, 任何情况下都会出现误差。原因在于磁极未均匀分配并存在于本部分所提及的其它面。

铁氧体磁铁

■ 求出单磁铁磁导系数的方法

使用等式(5)和(6)可求出所有单磁铁的磁导系数。首先，为这些等式代入 $l = -\frac{Lm}{2}$ 并求出H。

此为抗磁场Hd。其次，去磁曲线的倾斜度为45°。Bd=Br-Hd建立。

因此，利用以下等式可求出磁导系数：
$$\mu = \frac{Bd}{Hd} = \frac{Br-Hd}{Hd}$$

通过增加校正系数提高精确度，建立以下等式。

圆柱形磁铁的磁导系数

$$\mu = 1.3 \frac{Lm}{D} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{Lm}{D}\right)^2} + \frac{Lm}{D} \right)$$

方形磁铁的磁导系数（角度为弧度）

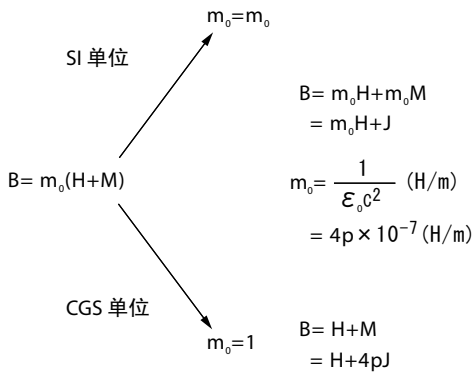
$$\mu = 1.2 \left[\frac{\mu}{2} \left\{ \tan^{-1} \frac{ab}{Lm \sqrt{a^2 + b^2 + Lm^2}} \right\}^{-1} - 1 \right]$$

（有关尺寸，请参考上一页的下方图）

此计算使用电荷方法。因此，当磁导系数低于去磁曲线的转向点时，如果局部磁滞回线形成该位置，则需要使用表观Bd局部磁滞回线。

■ 磁铁单位

以下等式代表了SI单位（国际单位）和CGS单位。



（基于电子材料协会标准EMAS-7003）

有关详情，请参考下一页。

铁氧体磁铁

■ SI 和 CGS 单位换算

项	符号	单位				SI 换算为 CGS 单位	CGS 换算为 SI 单位
		SI 单位		CGS 单位			
		名称 (等式)	符号	名称 (等式)	符号		
磁通量	ϕ	Weber ($\phi=BA$)	Wb	Maxwell ($\phi=BA$)	Maxwell	1Wb=10 ⁸ Maxwell	1Maxwell=10 ⁻⁸ Wb
磁通密度	B	Tesla	T	Gauss	G	1T=10 ⁴ G	1G=10 ⁻⁴ T
磁感应							
磁性常数 (真空磁导率)	μ_0	Henry per meter	H/m	Absolute number ($\mu_0=1$)	—	—	—
磁化强度	H	Ampere per meter	A/m	Oersted	Oe	1A/m= $\frac{4\pi}{10^3}$ Oe=1.25664X10 ⁻³ Oe	1Oe= $\frac{10^3}{4\pi}$ A/m=79.5775A/m
符合磁化强度的 磁通密度		Tesla (μ_0H)	T	Oersted	Oe	1T=10 ⁴ Oe	1Oe=10 ⁻⁴ T
磁化 ※	M	Ampere per meter ($M=\frac{J}{\mu_0}$)	A/m	Gauss ($M=4\pi J$)	G	1A/m=10 ³ G	1G=10 ⁻³ A/m
磁极化	J	Tesla ($J=\mu_0M$)	T	Gauss ($J=\frac{M}{4\pi}$)	G	1T= $\frac{10^4}{4\pi}$ G	1G=4 π X10 ⁻⁴ T
磁导率 (绝对磁导率)	μ	Henry per meter	H/m	Absolute number	—	1H/m= $\frac{10^7}{4\pi}$ =7.95775X10 ⁵	1= $\frac{4\pi}{10^7}$ H/m=1.25664X10 ⁻⁶ H/m
磁导率 (磁导系数)	μ_r	Absolute number ($\mu_r=\frac{\mu}{\mu_0}$)	—	Absolute number ($\mu_r=\mu$)	—	SI and CGS Unit are identical	
磁通势	Fm	Ampere ※※ ($F_m=HL$) ($U_m=H\Delta L$)	A	Gilbert ($F_m=HL$) ($U_m=H\Delta L$)	Gilbert	1A= $\frac{4\pi}{10}$ Gilbert	1Gilbert= $\frac{10}{4\pi}$ A
磁力差	Um					=1.25664 Gilbert	=0.795775A
磁导度	Λ	Henry ($\Lambda=\frac{\phi}{F_m}$)	H	Maxwell per Gilbert ($\Lambda=\frac{\phi}{F_m}$)	$\frac{\text{Maxwell}}{\text{Gilbert}}$	1H= $\frac{10^9 \text{ Maxwell}}{4\pi \text{ Gilbert}}$ =7.95775X10 ⁻⁷ $\frac{\text{Gilbert}}{\text{Maxwell}}$	1 Gilbert = $\frac{4\pi}{10^9}$ H 25664X10 ⁻⁸ H
磁阻	Rm	Henry ($R_m=\frac{F_m}{\phi}$)	H ⁻¹	Maxwell per Gilbert ($R_m=\frac{F_m}{\phi}$)	$\frac{\text{Gilbert}}{\text{Maxwell}}$	1H= $\frac{4\pi \text{ Gilbert}}{10^9 \text{ Maxwell}}$ =1.25664X10 ⁻⁸ $\frac{\text{Gilbert}}{\text{Maxwell}}$	1 Gilbert = $\frac{10^9}{4\pi}$ H ⁻¹ =7.95775X10 ⁷ H ⁻¹
磁能乘积		Joule per cubic meter (BH)	J/m ³	Gauss Oersted or Erg per cubic centimeter (BH)	G Oe erg/cm ³	1J/m ³ =4 π X10 ⁶ Oe =1.25664X10 ² G ² Oe =1.25664X10 ² erg/cm ³	1G ² Oe= $\frac{1}{4\pi}$ X10 ⁻¹ J/m ³ =7.95775X10 ⁻³ J/m ³
磁能	E	Joule ($\frac{BH\Delta L}{2}$)	J	Erg ($\frac{BH\Delta L}{8\pi}$)	erg	1J=10 ⁷ erg	=1erg/10 ⁷ =10 ⁻⁷ J
磁吸收	F	Newton ($\frac{B^2A}{2\mu_0}$)	N	Dyne ($\frac{B^2A}{8\pi}$)	dyn	1N=10 ⁵ dyn (1N=0.101972kgf)	1dyn=10 ⁻⁵ N (1kgf=9.80665N)

注: 1. A = 横截面
2. L = 磁路长度
3. ΔL = 部分磁路长度

※ 磁化表示充磁强度
※※ 按照惯例, 使用安匝。然而, 使用安培作为SI单位。

(基于电子材料协会标准EMAS-7003)

操作注意事项

1.安全注意事项

- ①大型磁铁对其它磁铁或金属碎片以及其它有磁力的物质具有极大的吸引力（有时为排斥力）。持握或安装磁铁时若手或其它部位陷入磁场，此种力量可导致您突然失去平衡或受到严重伤害。
- ②操作磁铁时应格外小心，务必使用适当的工具。操作磁铁时请小心。
- ③当使用空心线圈固定磁铁时，请注意磁铁可能会从线圈中弹出。出于安全考虑，应将磁铁置于线圈中心区域并加以固定。
- ④使儿童远离磁铁，以免意外吞食。若出现此类情况，应立即寻求医生帮助。
- ⑤对金属过敏的人员应避免操作磁铁，否则会造成不良反应（皮肤粗糙、发红）
- ⑥在带有心脏起搏器或其它电子医疗设备的人员附近操作磁铁异常危险。在医疗设备周围使用磁铁时应特别注意，否则会影响正常操作。
- ⑦通常磁铁非常容易断裂。操作磁铁时应小心，注意磁铁碎片极易进入眼睛或造成其它严重人身伤害。

2.设计注意事项

- ①根据材料，低温下有些各向异性铁氧体磁铁的磁力会降低。务必在待用温度下检查磁铁的性能。
- ②铁氧体磁铁通常用于传输；由于材料极易出现裂缝，因此应采取适当措施防止受到冲击。

3.操作注意事项

- ①如果磁化的磁铁相互叠放，将会很难分离。利用垫片（如纸板）将磁铁分离。
- ②若磁化的磁铁吸引金属板，或者两个磁化的磁铁相互吸引或排斥，将造成磁铁磁力下降，因此使用时应多加注意。
- ③如果磁化的磁铁进入AC或DC磁场，将造成磁铁磁力下降。
- ④磁化的磁铁会吸引碎片（如铁锉屑），因此请在无尘环境下打开包装。
- ⑤即使未被磁化，磁铁也会吸附在较小磁体上，因此操作时应注意。此外，在精密电动机上安装磁铁时，使用之前应对其进行清洁。
- ⑥根据材料，每个磁铁都有自身特有的居里温度。若加热至接近居里温度，磁铁将失去磁力。如果在安装过程中必须加热磁铁，请联系我们。
- ⑦如果磁铁被固定（例如通过吸力固定到磁轭上），应选择适当的吸附方法，以使吸附后不会保持机械变形。若在仍施加残余应力时使用磁铁，即使轻微的冲击，磁铁也可能断裂。
- ⑧磁铁不耐冲击且易于断裂，因此使用时应多加注意。断裂会造成磁铁特征裂化和刚性损耗。

4.其它

- ①请保持磁铁远离磁带、软盘、预付卡、CRT、磁式车票、电子表或类似物品。由于磁化，会导致记录数据丢失或出现故障。
- ②请保持磁铁远离电子设备，如测量板和控制板，否则会导致故障或事故。
- ③切割磁铁时，请注意产生的磁粉由于摩擦会蹦出火星。请保持磁铁远离火源或易燃材料。作为火灾预防措施，应备有干粉灭火器、沙子和其它必要设备。此外，不得使用电动吸尘器。

■ 注意事项

- 本目录中的产品名称和规格出于改进目的如有更改，恕不另行通知。同时制造商保留停止任何产品的权利。交货时应索取规格表，以在使用前检查包装内容。
- 本目录中与产品特征和质量相关的说明仅基于分立组件。使用在系统内配置的这些装置或将其安装至产品中时，确保在完全考虑特定应用的前提下评估并确认规格。
- 制造商的担保不涵盖由于对产品、本目录中所述特征、规格或使用条件的不当使用所造成的任何缺陷或损坏。
- 请注意，制造商产品用户对于第三方专利或工业版权的任何违反，制造商不承担任何责任。制造商仅对产品结构设计及制造工艺违反专利或版权时负有责任。
- 未经制造商书面许可，严禁复制本文的任何部分。
- 出口管制
 - 对于日本范围之外的客户
MARUWA产品不得用于或出售用于任何常规武器、大规模杀伤性武器（核武器、化学或生物武器、导弹）或任何其它武器的开发、生产、储存或利用。
 - 对于日本范围内的客户
对于属于日本“外汇交易与对外贸易法”管制项的产品，出口时需要法律指定的出口许可证。