

# 低压电流互感器的常用磁材分析

蒋大维, 陆小辉

江阴市星火电子科技有限公司

**摘要:** 传统的电流互感器主要的功能作用是配合电子仪表进行测量计费或者配合继电器对电力线路进行保护监控, 由于其与二次设备连接距离较长, 一般需要较高的负荷强度, 同时电流互感器输出的信号多为1A、5A等电流, 所以一般选用饱和磁密B值较高的磁材, 一般多选用硅钢材质, 如果需要准确度较高, 而一次电流较小的情况下, 为满足准确度的要求, 也为使用超微晶材质。

现在为了配合智能电网, 无论是测量还是保护监控, 很多项目采用了电子式电流互感器或者开合式电流互感器, 他们有个共同的特点是, 其二次输出的电流往往不是5A或者1A, 而是mA级小电流信号或者mV级小电压信号, 然后转变成数字信号进行发送至电表, 如此mA级或者mV级的信号属于小负荷信号, 那么磁材的选择就相对又宽泛了, 除了传统的硅钢、超微晶, 现在也可以使用制作电感或者开关变压器的铁氧体材料, (见图1) 因为铁氧体拥有不错的初始磁导率, 在一次电流较小的时候, 互感器有不错的准确度, 同时其材料性价比较高, 所以现在很多小信号输出的互感器采用铁氧体的磁材, 如PC40和高导10K、12K等铁氧体材质。



图1 江阴市星火电子科技有限公司生产制造的磁材为铁氧体的开合式电流互感器, 其信号输出为mA级小电流或者mV级小电压

如此一来, 我们有必要从互感器的性能角度上来分析这三种磁材使用的利弊, 特别是在现在智能电表等智能元器件要求极限工作温度-40℃至70℃的情况下, 三种磁材

是否都能胜任。所以这篇文章也是通过具体的试验分析来给互感器工作者对磁材选择的一篇参考。

## 1 磁材的外观的结构对比

硅钢、超微晶、铁氧体三种材质其存在的结构是有差别的, 我们来对比下三种材质的形式存在的区别。

三种材质结构形式	硅钢	超微晶	铁氧体
带材规格	0.03-0.5mm (中频 - 工频)	14-30μm	粉末
磁材磁路	卷绕切割、 叠片、卷绕闭合	卷绕切割、 卷绕闭合	磁路分开、闭合
互感器一般选用	卷绕、0.23- 0.35	卷绕	卷绕、切割

图2 三种磁材的形式规格

首先是硅钢, 一般在形式上有两种, 叠片和卷绕, 叠片更多应用于变压器上面, 互感器由于需要一定的准确度, 所以更多的使用磁路较为完整的卷绕方式, 这样其准确度有一定的保证, 同时互感器一般使用在工频电流上, 所以其规格采用0.23-0.35mm的带材, 然后再根据互感器是开合还是闭合的形式, 来决定磁材磁路是切割的还是闭合的。本文试验采用的是0.23带材规格的卷绕切割和卷绕闭合的硅钢材质。



图3 卷绕成CD型再切割的硅钢铁心, 一般用在变压器或者开合式电流互感器

超微晶是一种合金薄带, 特点是其磁导率较高, 但也由于其是薄带, 非常容易脆裂, 做到想硅钢一样的叠片式, 只能制造成卷绕的形式, 同时卷绕切割的工艺难度较高, 即使切割出来, 也有较大的性能损失, 本文后面会阐述到。



图4 卷绕成环型的超微晶铁心, 由于带材极薄, 所以一般形状比较单一, 一般为环型、CD型, 同时也可以进行切割, 如右图

铁氧体是通过模压粉末烧结而成, 所以一般可以制造成任意形状, 通常使用在开关变压器和电感上面, 由于锰锌高导铁氧体性价比比较高同时磁导率也不低, 所以近年来也常用于小信号输出的电流互感器上, 为了制作工艺简单, 一般在互感器上采用磁路分开的形式。

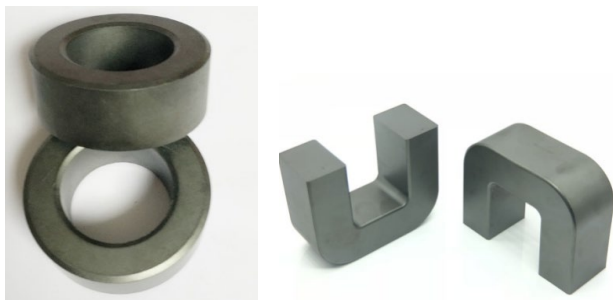


图5 铁氧体一般为粉末压铸烧结, 所以磁路分开的一般不会使用切割的, 二是直接半边压铸即可

## 2 磁材关于互感器的要求的性能对比

低压电流互感器一般要求: (1) 一次和二次电流; (2)

负荷; (3) 准确度。

一次电流要求越大, 过载越高, 那么就要求磁材的饱和磁密或者有效磁密越大, 同理二次电流要求越大, 那么也是要求饱和磁密越大, 当然电流互感器的国家标准对于互感器一次电流有两种要求, 一个是普通的, 如0.2、0.5级, 测试一次电流的范围是5%-120%, 另外一个特殊的, 即是S级, 那么其一次电流的范围是1%-120%, 即是要求更小的一次电流, 那对应磁材就是需要磁材有较高的初始磁导率, 另外无论是零序电流互感器还是剩余电流互感器同样也是要求在小电流时拥有较高的准确度, 那也是需求磁材有较高的初始磁导率。

负荷的大小也是取决于磁材的饱和磁密, 饱和磁密越高, 其负荷越大, 传统的电流互感器由于其负荷要求较高, 通常有几VA到几十VA所以通常采用磁密较高的硅钢材质, 而现在由于是小信号输出, 其负荷往往只有mVA级, 所以可以选用磁密较低的铁氧体材质。

准确度的一次电流要求是电流范围从5%-120%或者1%-120%时互感器的数值误差和角度误差, 这里其实涉及到的是个综合要求, 一次电流范围和饱和磁密有关, 而比差和角差的要求其实就是和互感器的磁导率有关。

综上所述, 决定互感器的性能主要取决磁材的饱和磁密、磁导率, 那么接下来的试验分析就是围绕这两方面进行。

## 3 三种材质的B-H曲线及 $\mu$ -B曲线分析

### 3.1 卷绕硅钢铁心的B-H曲线及 $\mu$ -B曲线分析

本次硅钢铁心采用宝钢的B23R085材质, 其热处理及切割是无锡伟邦变压器制造有限公司提供的产品。

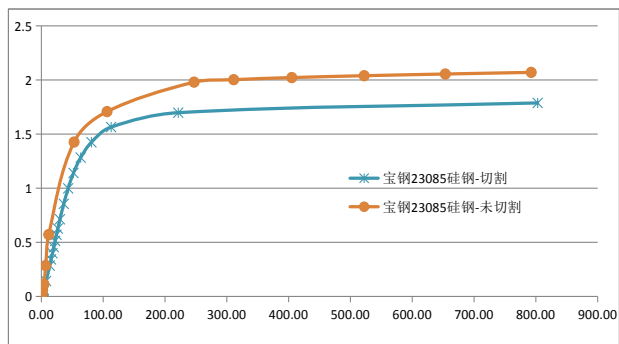


图6 宝钢23085硅钢卷绕铁心材质的切割与未切割试验数据制成的B-H曲线对比, 纵坐标是B(T), 横坐标是H(A/M), 通过此次试验数据来看, 铁心未切割时饱和磁密约2T, 切割后其饱和磁密降低至1.7T左右。(仅针对本次试验数据, 因为作者后期测试首钢的材料, 其切割后饱和磁密并未降低。)

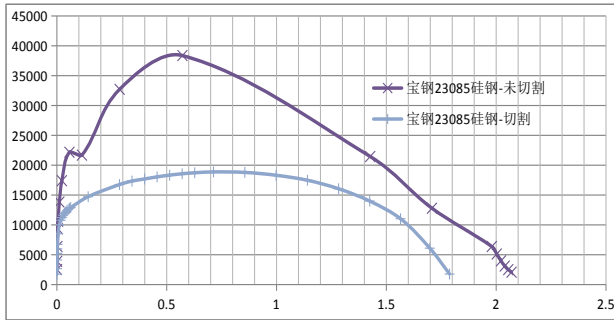


图7 宝钢 BR23085 硅钢卷绕铁心材质的切割与未切割试验数据制成的  $\mu$ -B 曲线对比, 纵坐标是相对磁导率 (Gs/Oe), 横坐标是 H(A/M), 通过此次试验数据来看, 无论是切割还是未切割, 铁心的初始磁导率只要 2k 左右, 还是相对较低的。同时在 0.5T 左右时磁导率最高, 也就是说, 互感器最大电流工作在 0-0.5T 时, 互感器性能最好, 切割后磁导率明显下降, 但是约在 0.8-0.9T 左右磁导率最高, 互感器可利用的线性范围变高。

在互感器用的磁材曲线上, B-H 和  $\mu$ -B 的曲线参考性最佳, 因为最为直观, 通过曲线的分析, 基本上符合我们认识的硅钢磁材特性, 其初导不高, 饱和磁密为 2T 是所有磁材中最高的材料, 也是要求电流过载和负荷较高互感器的最理想材料。

同时通过本试验, 也让我们看到了硅钢切割和未切割的最佳磁密区间, 为我们互感器的设计提供了理论的数据。接下来其它两款的磁材分析也是按照如此。

### 3.2 铁氧体 PC40 和 12K 材质的 B-H 曲线及 $\mu$ -B 曲线分析

PC40 相对于高导材质拥有较高的饱和磁密, 但磁导率略低, 反之 12K 材料拥有较高的磁导率, 但饱和磁密较低, 此次采用的是苏州冠达磁业有限公司提供的铁氧体磁芯。

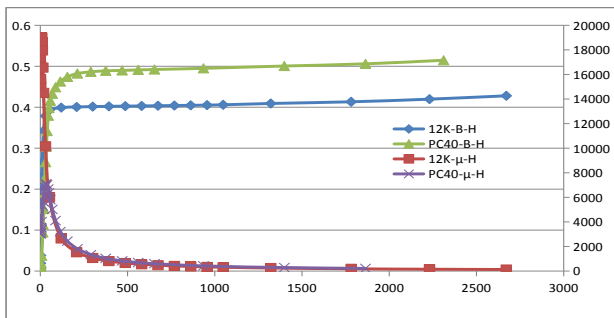


图8 纵坐标是 B(T), 横坐标是 H(A/M), 通过此次试验数据来看, PC40 饱和磁密约为 0.5T, 而 12K 材质的饱和磁密为 0.4T, 12K 的饱和磁密约为 PC40 的 80%。

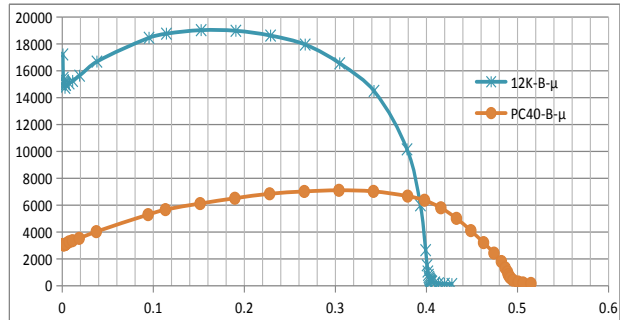


图9  $\mu$ -B 曲线对比, 纵坐标是相对磁导率 (Gs/Oe), 横坐标是 H(A/M), 通过此次试验数据来看, 12K 材料曲线测试约为 14K, 但这都属于合理的区间, PC40 的初导约为 3K, 12K 最高磁导率约在 0.18-0.2T 左右, 达到了 18K, 而 PC40 的最高磁导率约在 0.35T 左右, 7K 左右。

总曲线对比来看, PC40 和 12K 起到互补之势, PC40 其饱和磁密 0.5T 较高, 可以用在电流范围或者负荷较高的情况下, 12K 磁导率较高, 可以用在准确度较高的情况下, 同时和硅钢相比, 其 B 值是较低的, 但是铁氧体的初导 (特别是 12K) 是非常高的, 如果互感器对小电流要求较高, 那么此材料还是比较合适的。

### 3.3 超微晶闭合和切割后的 B-H 曲线及 $\mu$ -B 曲线分析

本次试验采用的超微晶铁心是 25 $\mu$ m, 1K107B 材质, 其尺寸为 55\*65\*10, 江阴市晶磁电子有限公司热处理生产及后期切割的。

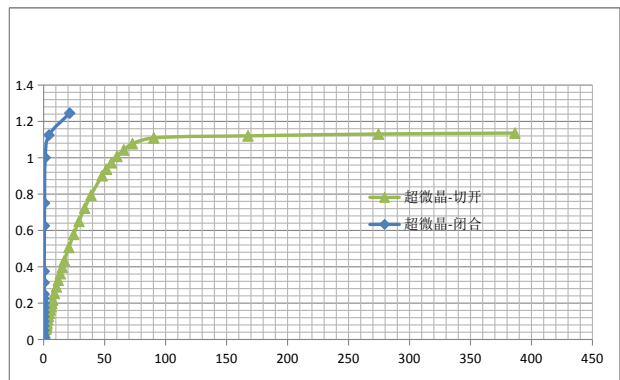


图10 江阴市晶磁电子有限公司的超微晶切割与未切割试验数据制成的 B-H 曲线对比, 纵坐标是 B(T), 横坐标是 H(A/M), 通过此次试验数据来看, 切割和未切割的饱和磁密几乎没有变化, 几乎都在 1.1T 左右饱和。

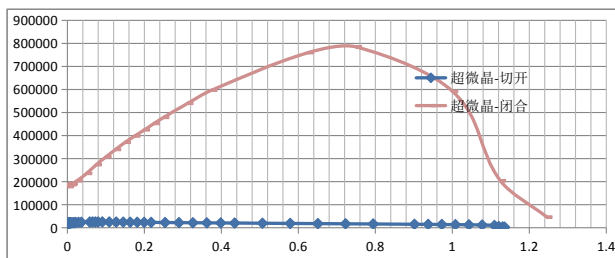


图 11  $\mu$ -B 曲线对比, 纵坐标是相对磁导率 (Gs/Oe), 横坐标是 H(A/M), 通过此次试验数据来看, 闭合的超微晶磁导率太高了, 初导都接近 200K, 最高磁导率都达到了 800K, 实在是太高了, 再加上其饱和磁密 1.1T, 有效磁密 0.7T 左右, 是做高精度互感器的不二材料, 但是由于闭合超微晶磁导率太高了, 压扁了开合切割的超微晶, 所以要把试验曲线稍微改正下 (如图 12)。

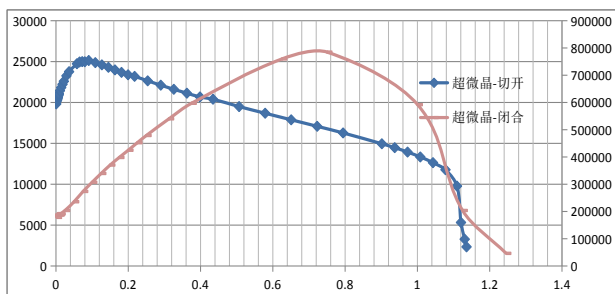


图 12 把闭合超微晶磁导率曲线纵坐标放到了右纵坐标轴, 切割后的放在了左纵坐标轴, 纵坐标是相对磁导率 (Gs/Oe), 横坐标是 H(A/M), 这样就能看到了切割后的超微晶曲线, 其初导达到了 20K 也是非常高的, 高于高导铁氧体, 但有效磁密只有 0.1T 左右, 限值了其互感器一次电流的大小。

### 3.4 三种材质的 $\mu$ -B 总体一览析

经过试验后, 可以把这些材质归来在同一张  $\mu$ -B 的曲线中 (图 13), 纵坐标是磁导率决定了互感器的准确度及线性度, 再加上横坐标决定了互感器有效的一次电流范围及负荷的大小, 对互感器工作人员对不同材质的性能分析起到了辅助的作用。

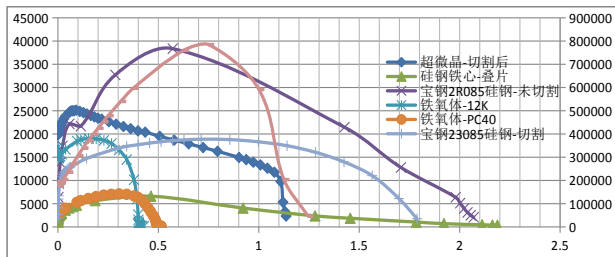


图 13 不同材质的  $\mu$ -B 曲线, 把闭合超微晶磁导率曲线纵坐标放到了右纵坐标轴, 其余材质放在了左纵坐标轴, 纵坐标是相对磁导率 (Gs/Oe), 横坐标是 H(A/M)。

如果封闭式电流互感器, 要求电流大、负荷高的, 需采用硅钢铁心, 需要准确度高或者初始电流精度高及有一定的电流要求、负荷要求的话则选用超微晶, 需要价格相对便宜, 对电流大小要求不高及负荷较小的情况下选用铁氧体材料。

## 4 三种材质的高低温度稳定性试验分析

现在电网中极限工作温度在  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $70^{\circ}\text{C}$ , 首先原材料要能够耐是肯定的, 同时要保证磁材在如此的高低温度下磁性能不要发生较大的变化, 否则直接会影响到互感器的输出准确性, 所以我们将三种材料做了高低温度试验并分析, 为了包含  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $70^{\circ}\text{C}$ , 此次试验从  $-50^{\circ}\text{C}$  做到  $80^{\circ}\text{C}$ 。

### 4.1 硅钢的高低温度特性分析

同样硅钢铁心采用宝钢的 B23R085 材质, 其热处理及切割是无锡伟邦变压器制造有限公司提供的产品。

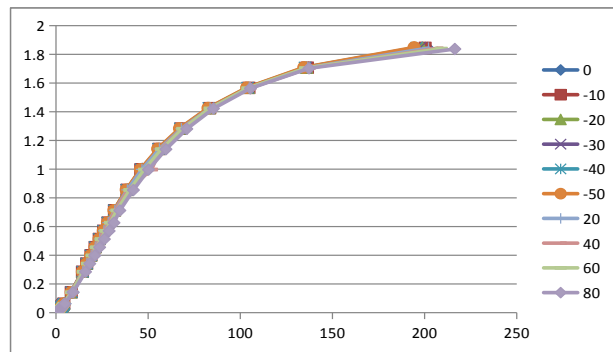


图 14 宝钢的 BR23085 材料, B-H 曲线对比, 纵坐标是 B(T), 横坐标是 H(A/M), 不同温度下其 B-H 曲线几乎是重合的。

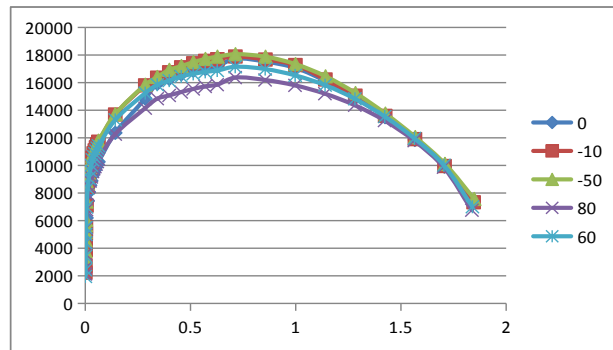


图 15  $\mu$ -B 曲线对比, 纵坐标是相对磁导率 (Gs/Oe), 横坐标是 H(A/M), 只有在高温  $60^{\circ}\text{C}$  时, 最高磁导率才发生略微变化, 而做互感器的都知道, 这点变化对互感器几乎没有任何影响。

所以说硅钢铁心对高低温的敏感程度非常低, 高低温特性非常好, 无论是高温环境还是低温环境, 其一次电流范围、负荷能力、准确度等级都不会发生变化。

#### 4.2 超微晶的高低温特性分析

本次试验采用的超微晶铁心是 25 $\mu\text{m}$ , 1K107B 材质, 其尺寸为 55\*65\*10, 江阴市晶磁电子有限公司热处理生产的闭合超微晶。

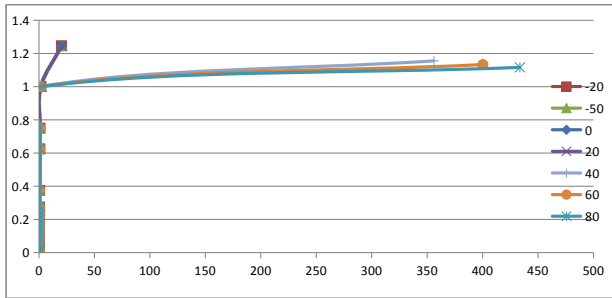


图 16 B-H 曲线对比, 纵坐标是 B(T), 横坐标是 H(A/M), 到了 40 $^{\circ}\text{C}$ , 其饱和磁密降到了 1T 左右, 温度再高时也不会再次下降, 总体下降程度不高, 只要设计互感器时留下余量即可。

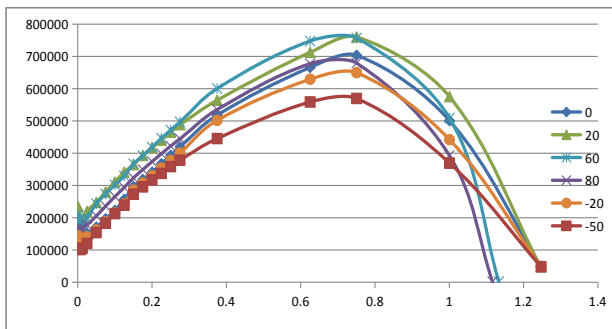


图 17  $\mu$ -B 曲线对比, 纵坐标是相对磁导率 (Gs/Oe), 横坐标是 H(A/M), 磁导率也略有变化, 600k 到 800k 之间, 总体变化也在可接受范围之内, 同时注意到最高磁导率的最高值并不在最高温度 80 $^{\circ}\text{C}$  时, 而是在 20-60 $^{\circ}\text{C}$  之间。

所以说, 超微晶最佳的工作温度 -20 $^{\circ}\text{C}$  -60 $^{\circ}\text{C}$ , 当然在设计留有余量时也未尝不可, 再加上本身具有较高的磁导率, 即使在 -50 $^{\circ}\text{C}$  -80 $^{\circ}\text{C}$  时, 依然能做出的准确度最高、同时性能稳定的互感器。

#### 4.3 铁氧体的高低温特性分析

铁氧体分别使用 PC40 材质和 12J 高导材质, 由苏州冠达磁业有限公司提供样品。

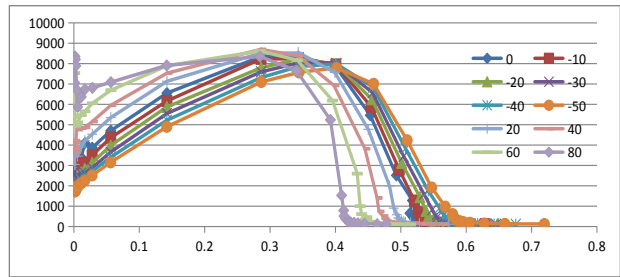
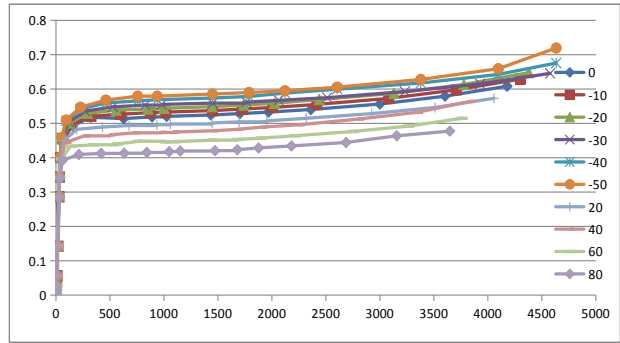


图 18 PC40 的 B-H 曲线及  $\mu$ -B 曲线

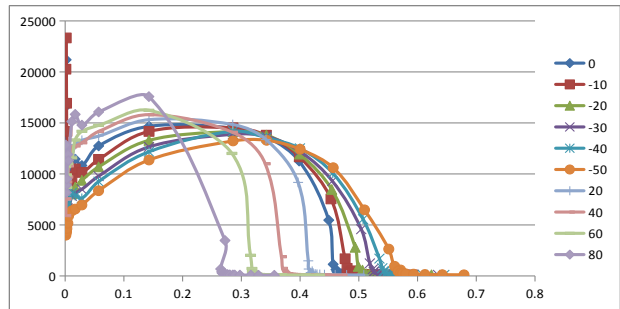
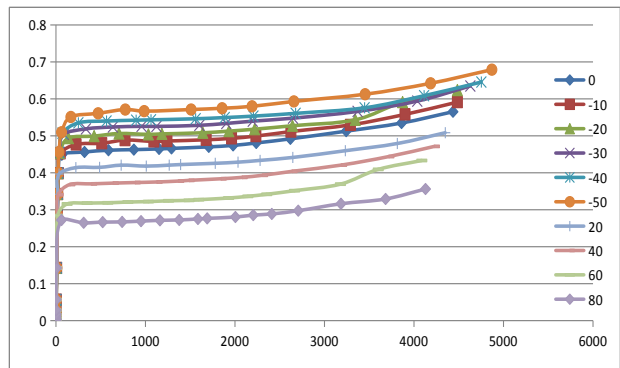


图 19 12K 的 B-H 曲线及  $\mu$ -B 曲线

这里要把 PC40 和 12K 一起分析:

1) 无论是 B-H 曲线还是  $\mu$ -B 曲线, 两种材质都会随着温度的变化发生变化, 而 12K 的变化更大, 更不稳定;