

取向纳米复合稀土磁体的研究

2006年于中国，北京、绵阳、杭州

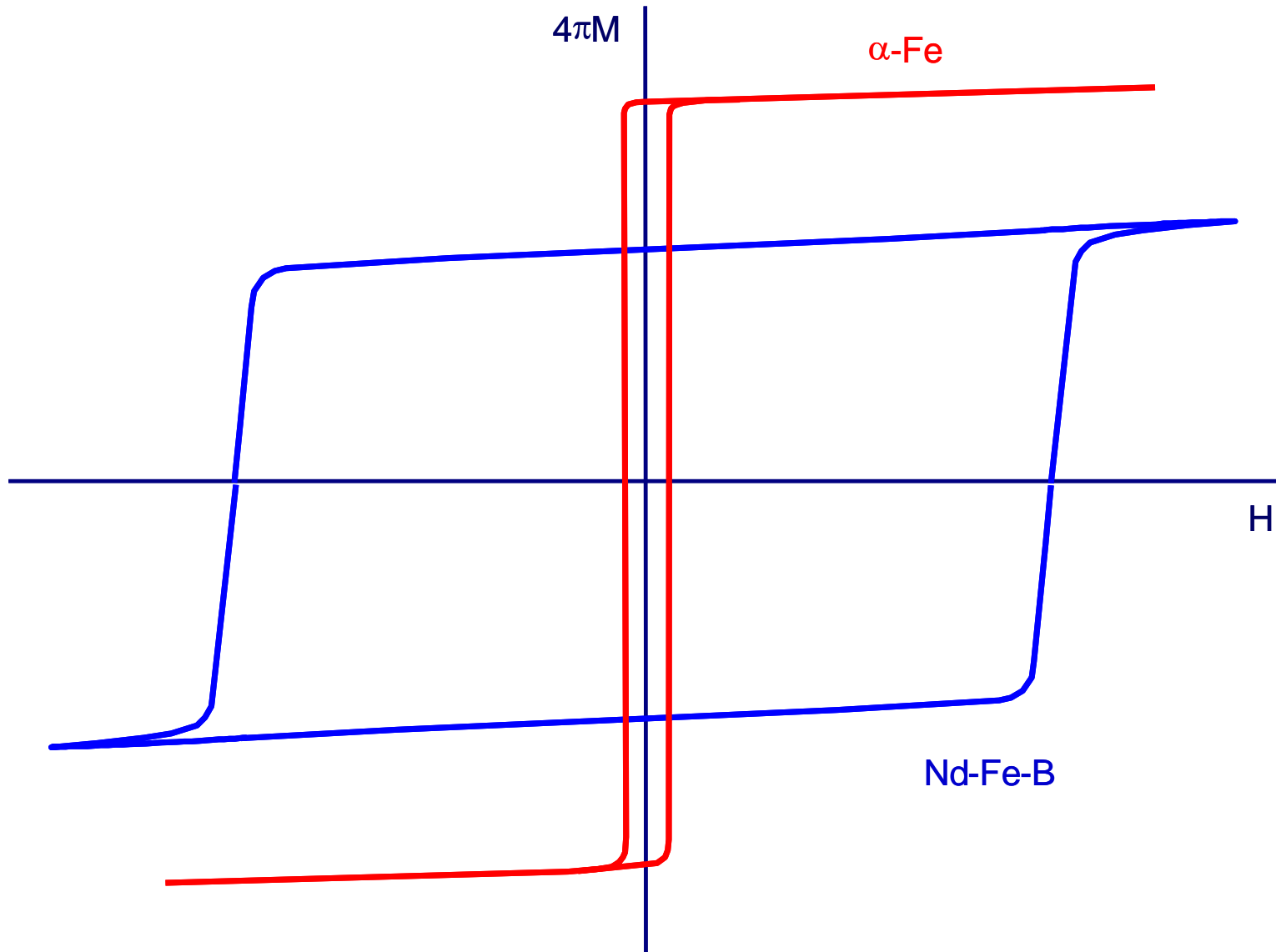
内 容 提 要

- 背景简介
- 在大块全密度的材料中保持纳米晶粒结构的技术
- 获得晶粒取向纳米复合磁体的技术
- 如何制备具有较理想结构的复合磁体. 在这种磁体中, 细小而弥散的软磁相均匀地分布在纳米硬磁基体相中

进一步提高永磁材料磁性能的途径

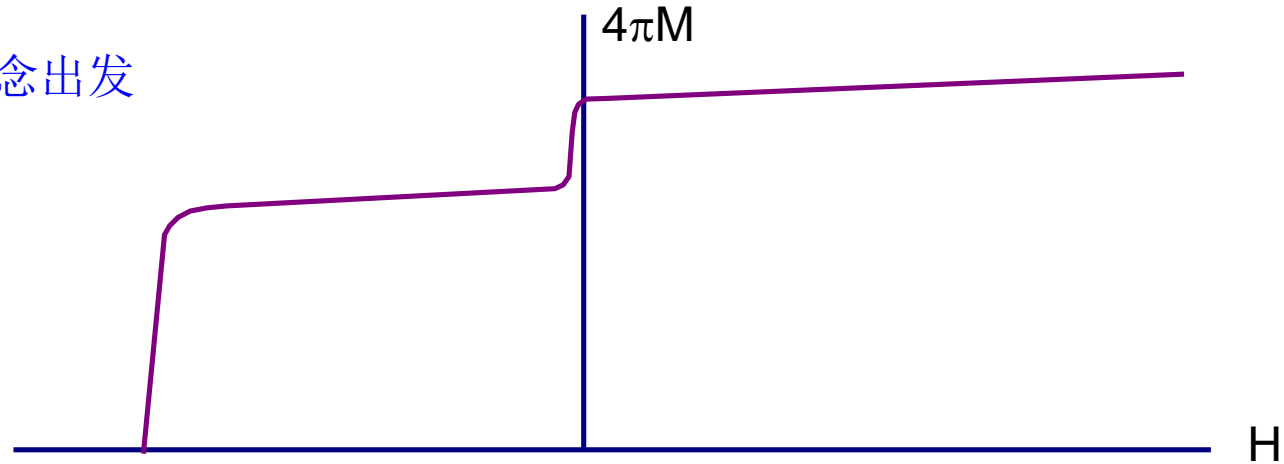
- $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 的 $4\pi M_s$ 为16.0 kG, 这把Nd-Fe-B磁体可达到的最高 $(BH)_{\max}$ 限制在60 MGOe左右
- 进一步提高永磁材料磁性能的途径之一是寻求具有更高 $4\pi M_s$ 的新材料
- 进一步提高永磁材料磁性能的途径之二是制备包含硬磁及软磁两相的复合材料
 - $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B} + \alpha\text{-Fe}$ ($\alpha\text{-Fe } 4\pi M_s = 21.5 \text{ kG}$)
 - $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B} + \text{Fe-Co}$ ($\text{Fe-Co } 4\pi M_s = 24.5 \text{ kG}$)

Nd-Fe-B/ α -Fe 复合材料



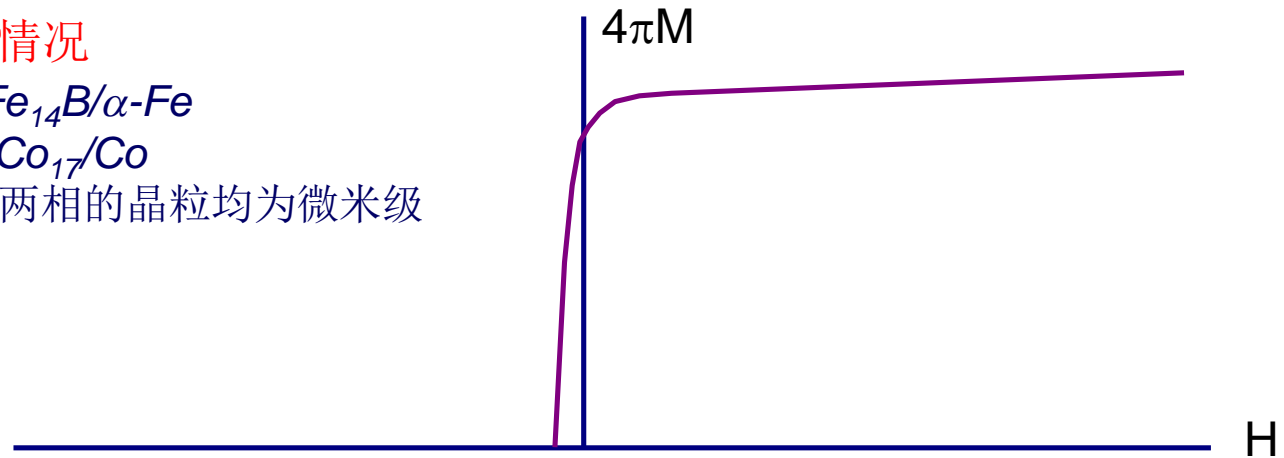
微米晶粒复合磁体的退磁曲线

A. 从概念出发



B. 实际情况

$Nd_2Fe_{14}B/\alpha-Fe$
 Sm_2Co_{17}/Co
软硬两相的晶粒均为微米级



早期的纳米复合永磁材料

- 1988年菲利普研究室在经历了晶化退火的纳米 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{Fe}_3\text{B}$ 合金粉末中获得了约3kOe的内禀矫顽力
- 二十世纪九十年代, 纳米永磁复合永磁材料的研制在欧洲, 美国, 日本, 以及中国都受到很大重视. 预期 $(\text{BH})_{\text{max}}$ 可达100 MG0e
- 制备高性能纳米永磁复合永磁体的技术困难
 - 如何把纳米复合永磁合金粉末制成**全密度**磁体, 同时保持所必需的纳米结构
 - 如何在纳米复合永磁体中获得所需要的**晶粒取向**
- 进入2000年以来, 纳米永磁复合永磁材料的研制逐渐衰落
 - 粉末及极小磁体的性能: 10 – 23 MG0e (VSM结果)
 - 粘结磁体: ~10 MG0e

制备全密度纳米复合永磁体的技术困难

■ 使用传统的高温烧结技术

- → 晶粒长大 → 失去纳米结构 → 失去矫顽力
- 因缺乏富Nd相 → 低密度 → 低性能

■ 使用传统的热压工艺

- → 因缺乏富Nd相 → 低密度 → 低性能
- → 晶粒长大 → 失去纳米结构 → 失去矫顽力

在纳米复合永磁体中获得晶粒取向的技术困难

■ 应用粉末**磁场取向**技术

- 每个微米级的粉末颗粒包含无数纳米晶粒
- 这些纳米晶粒呈随机分布
- 因此, 不可能在磁场中被取向

■ 应用**热变形**技术

- 应用热变形技术获得晶粒取向的前提是合金中存在**富Nd相**
- 在纳米复合 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 永磁合金中不存在富Nd相. 相反, 存在的是 $\alpha\text{-Fe}$ 相
- 因此, 不可能应用热变形技术获得取向磁体

取向纳米复合永磁体的初期工作

- 如何获得所需要的晶粒取向. 不考虑如何制备大块磁体
 - 制备非晶态合金
 - 磁场中晶化处理
- 如何从纳米复合永磁合金粉末制成全密度大块磁体同时保持所需要的纳米结构. 不考虑如何制备取向磁体
 - 快速热压
 - 采用较低的温度
 - 采用极快的速度

进行磁场中晶化的根据

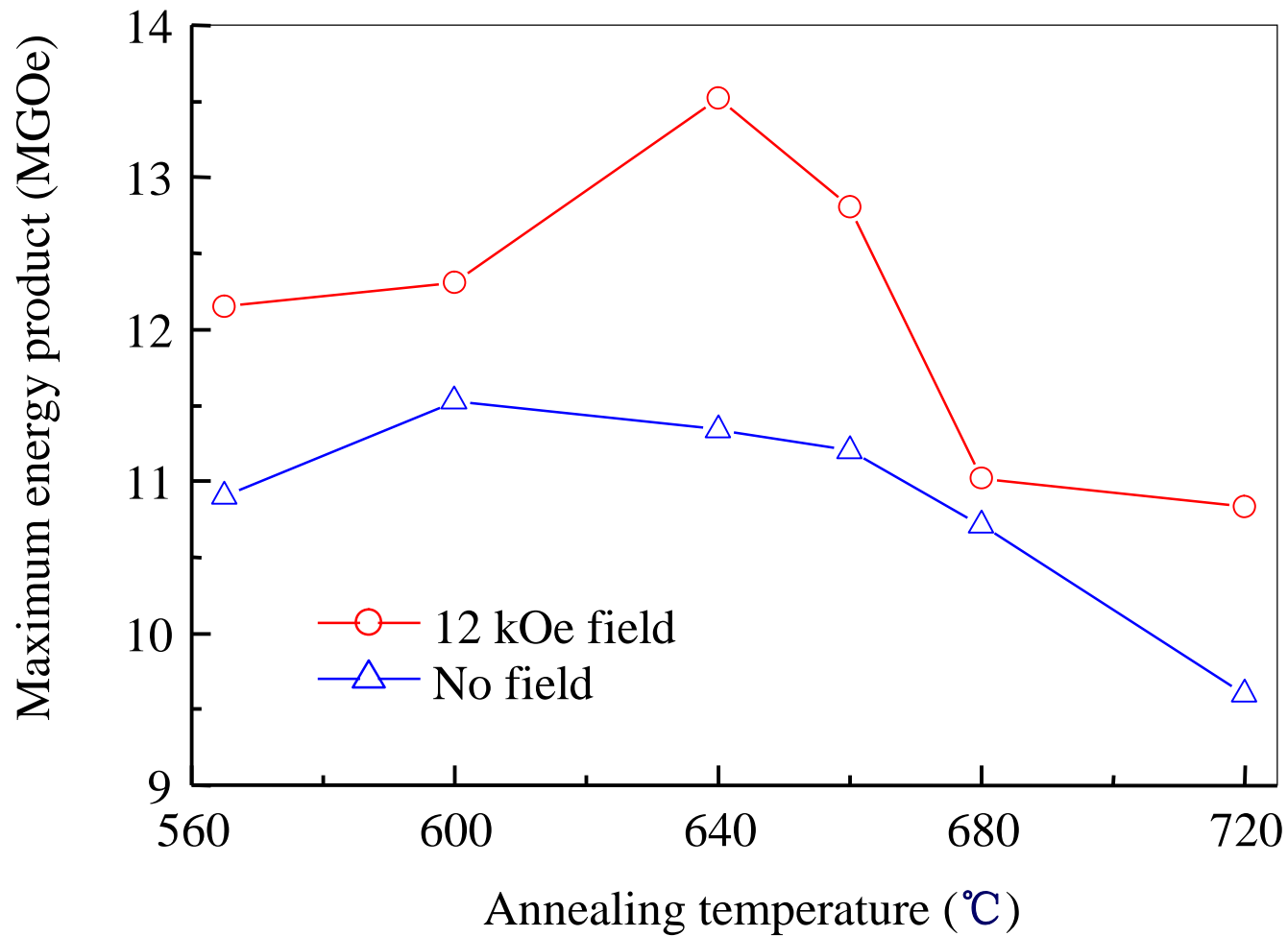
■ $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}/\text{Co}$

- $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 的居里温度: 920°C
- Co的居里温度: 1120°C
- 晶化温度: $700 - 750^\circ\text{C}$

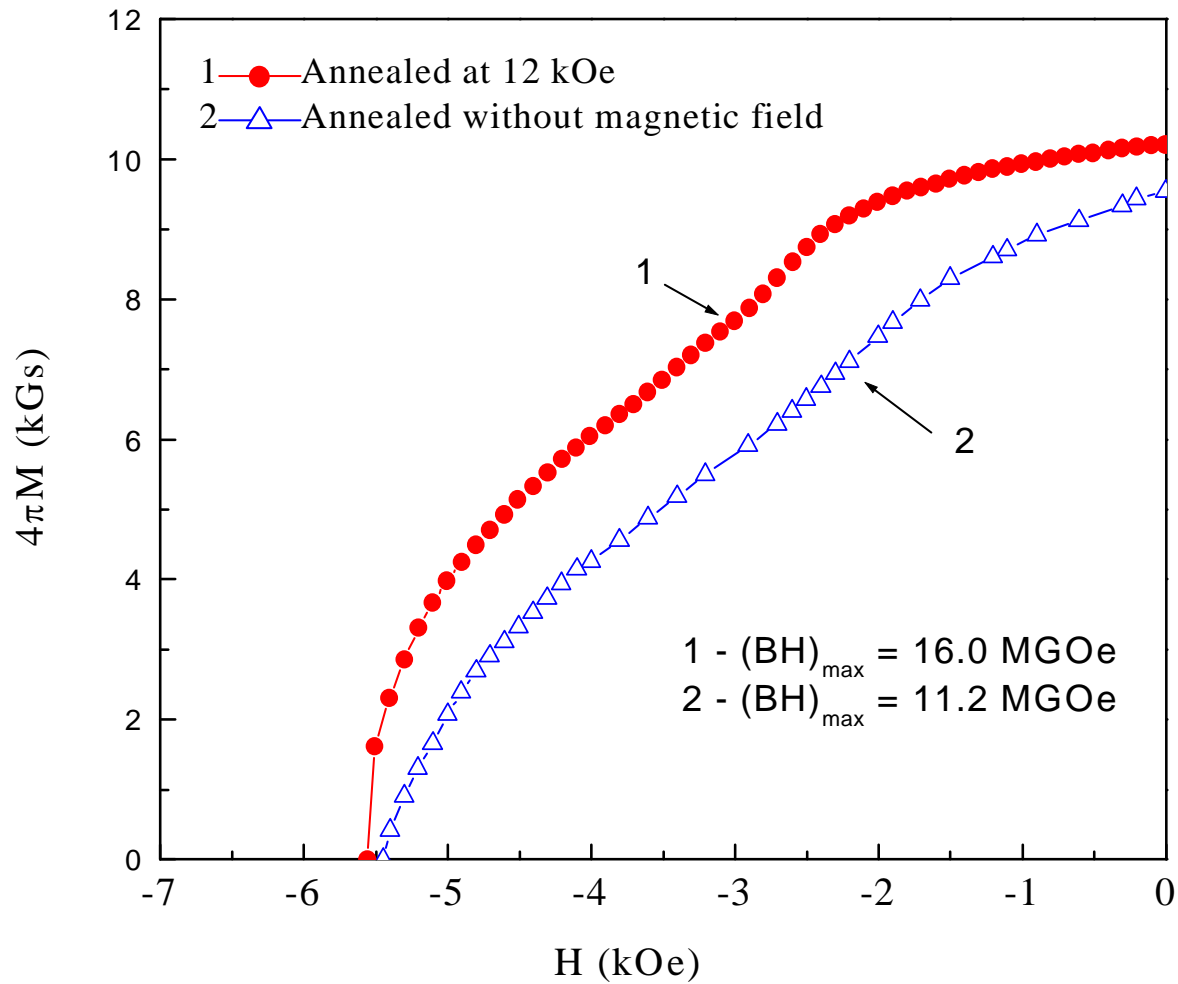
■ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$

- $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 的居里温度: 312°C
- $\alpha\text{-Fe}$ 的居里温度: 780°C
- 晶化温度: $500 - 650^\circ\text{C}$
- 非晶 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 在晶化时, $\alpha\text{-Fe}$ 先在较低的温度($500 - 550^\circ\text{C}$)析出. 而后, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 在较高的温度($650 - 700^\circ\text{C}$)析出.
- 采取适当的工艺, 有可能造成 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 在先行析出的 $\alpha\text{-Fe}$ 之上呈共格析出以减低系统之自由能

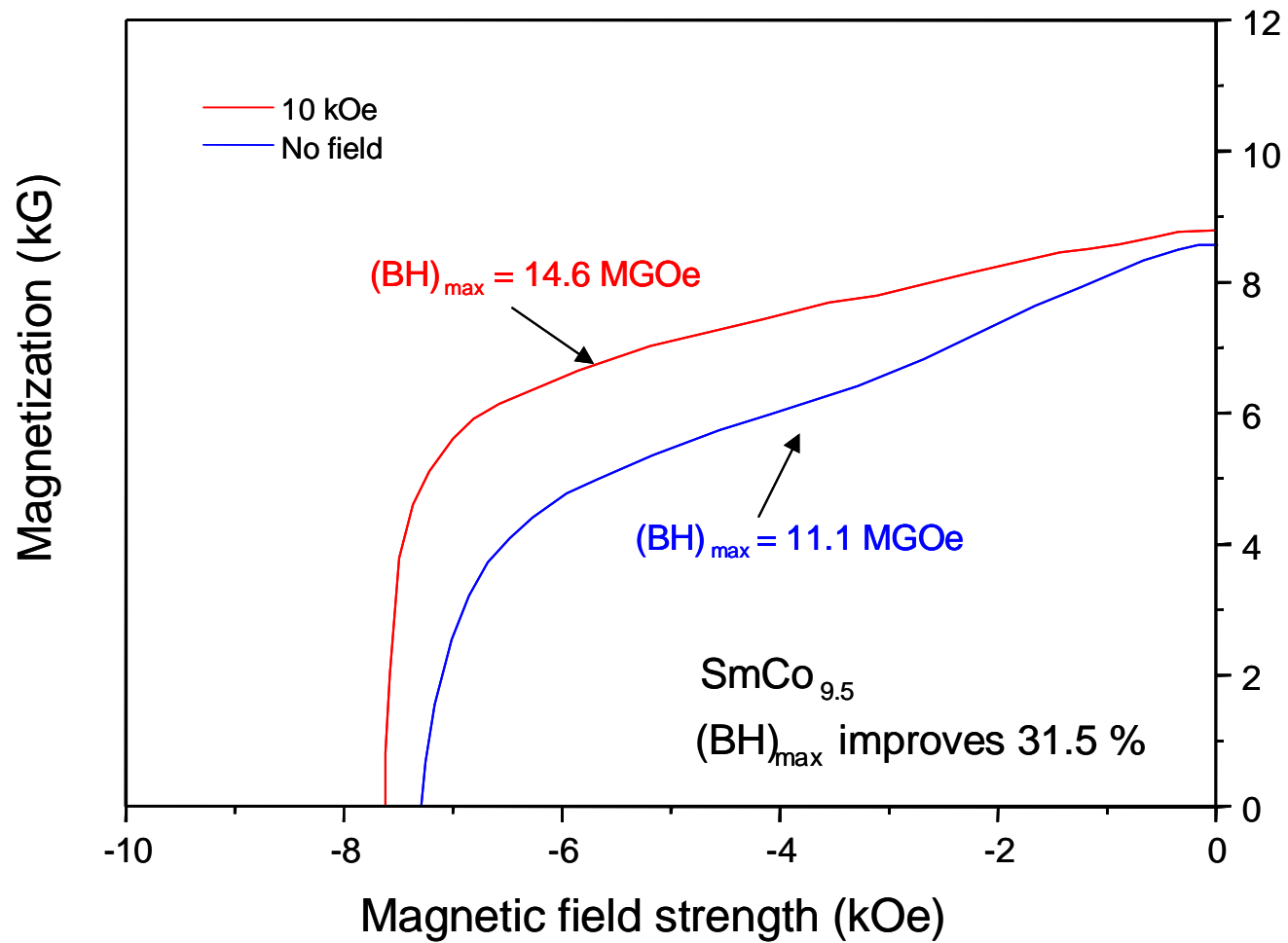
磁场中晶化对 $\text{Nd}_{2.4}\text{Pr}_{5.6}\text{Dy}_1\text{Fe}_{85}\text{B}_6$ 性能的影响



磁场中晶化对 $\text{Nd}_{2.4}\text{Pr}_{5.6}\text{Dy}_1\text{Fe}_{85}\text{B}_6$ 性能的影响

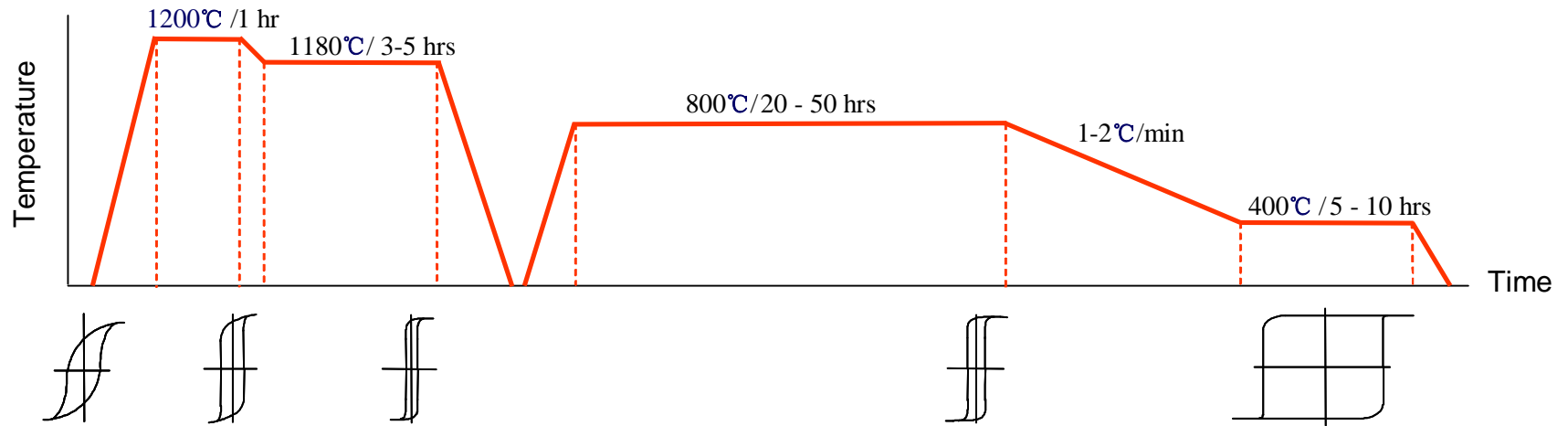


磁场中晶化对 $\text{SmCo}_{9.5}$ 性能的影响

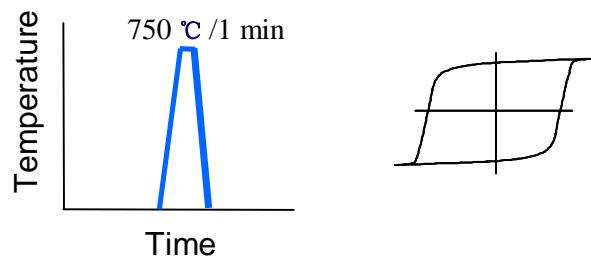


纳米结构对磁性的影响

传统的微米晶粒Sm(Co,Fe,Cu,Zr)_{~7.3}

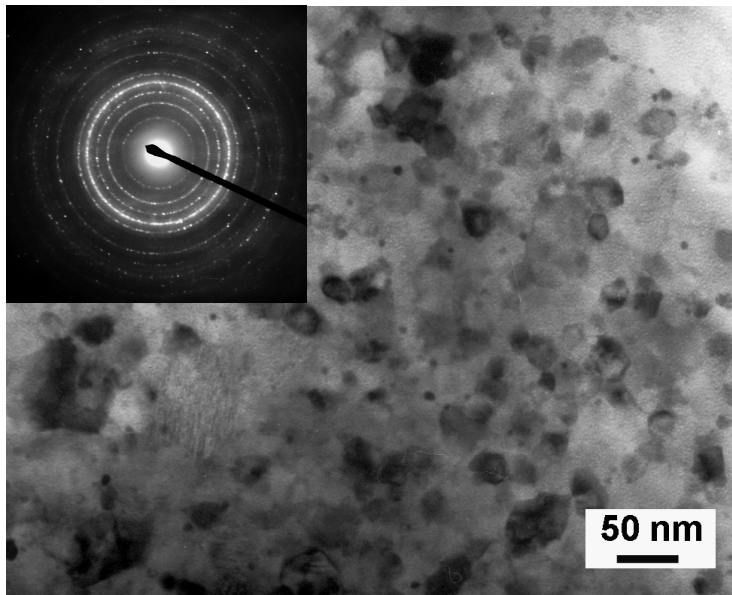


纳米结构 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

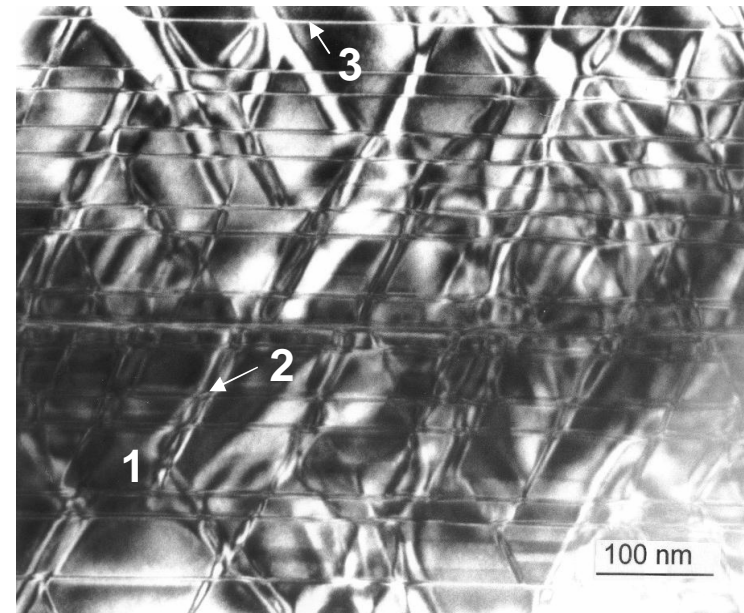


- 1991年, J. Wecker 等, 对经机械合金化的化学当量成分的 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 合金粉末在 700°C 进行了30 分钟的晶化处理获得了 6 kOe 的矫顽力.
- 1996年, S.K. Chen等,对经机械合金化的 SmCo_{10} 合金粉末在 750°C 进行了20 分钟的晶化处理 获得了4 kOe的矫顽力
- 代顿大学磁学研究室对经机械合金化的化学当量成分的 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 合金粉末在 750°C 进行了1 分钟的晶化处理获得了15.6 kOe 的高矫顽力

传统2:17及纳米2:17的显微组织



$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
750 °C - 1 分钟
 $M H_C = 15.6 \text{ kOe}$

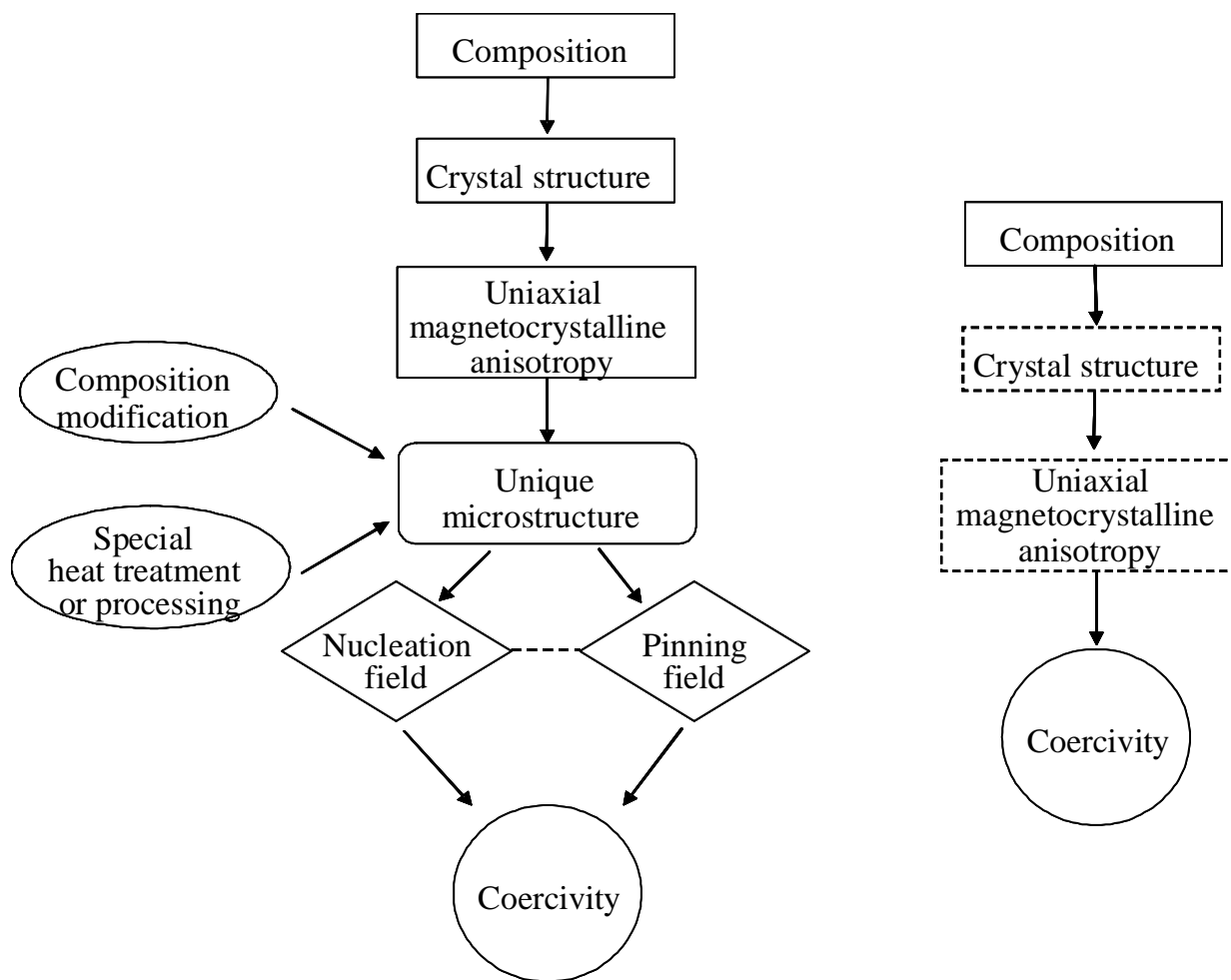


$\text{Sm}(\text{Co}_{0.794}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.09}\text{Zr}_{0.026})_{7.0}$
烧结: 1200 °C - 1 hr
固溶: 1180 °C - 5 hrs
时效: 800 °C - 50 hrs
缓冷: 800-400 °C, 1 °C /m
时效: 400° C - 10 hrs
 $M H_C = 15 \text{ kOe}$

新的矫顽力机理

- 矫顽力由磁矩的非一致转动过程控制
- 对传统的微米晶粒磁体而言， 高的单轴各向异性只是高矫顽力的必要条件， 而不是充分条件
- 对新的纳米晶粒磁体而言， 高的单轴各向异性不仅是高矫顽力的必要条件， 而且也是充分条件

纳米晶粒组织的作用



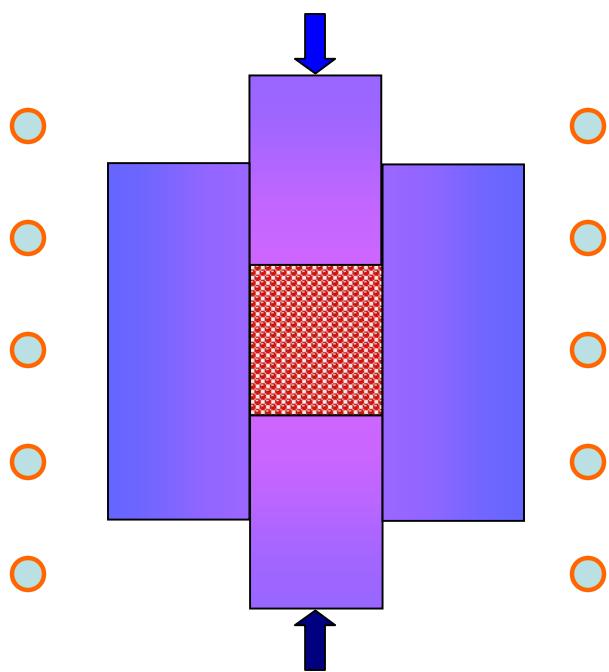
微米晶粒传统磁体

纳米晶粒磁体

有关磁体成型的新概念

- 纳米复合磁体成型不必在**高温**下进行
 - 不必用 $1080 - 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - 而用 $600 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (非晶合金的晶化温度)
- 纳米复合磁体成型不必经历很长的**时间**
 - 不必经历几十分钟以至数小时
 - 仅需数分钟
- (纳米复合磁体成型不必使用很大的**压力**)
 - 不必用 10^9 Pa
 - 仅需用 10^8 Pa
- 如能发展一种使用不太高的温度而十分快速的成型技术, 则起码能满足纳米复合永磁体的磁性要求

感应热压技术

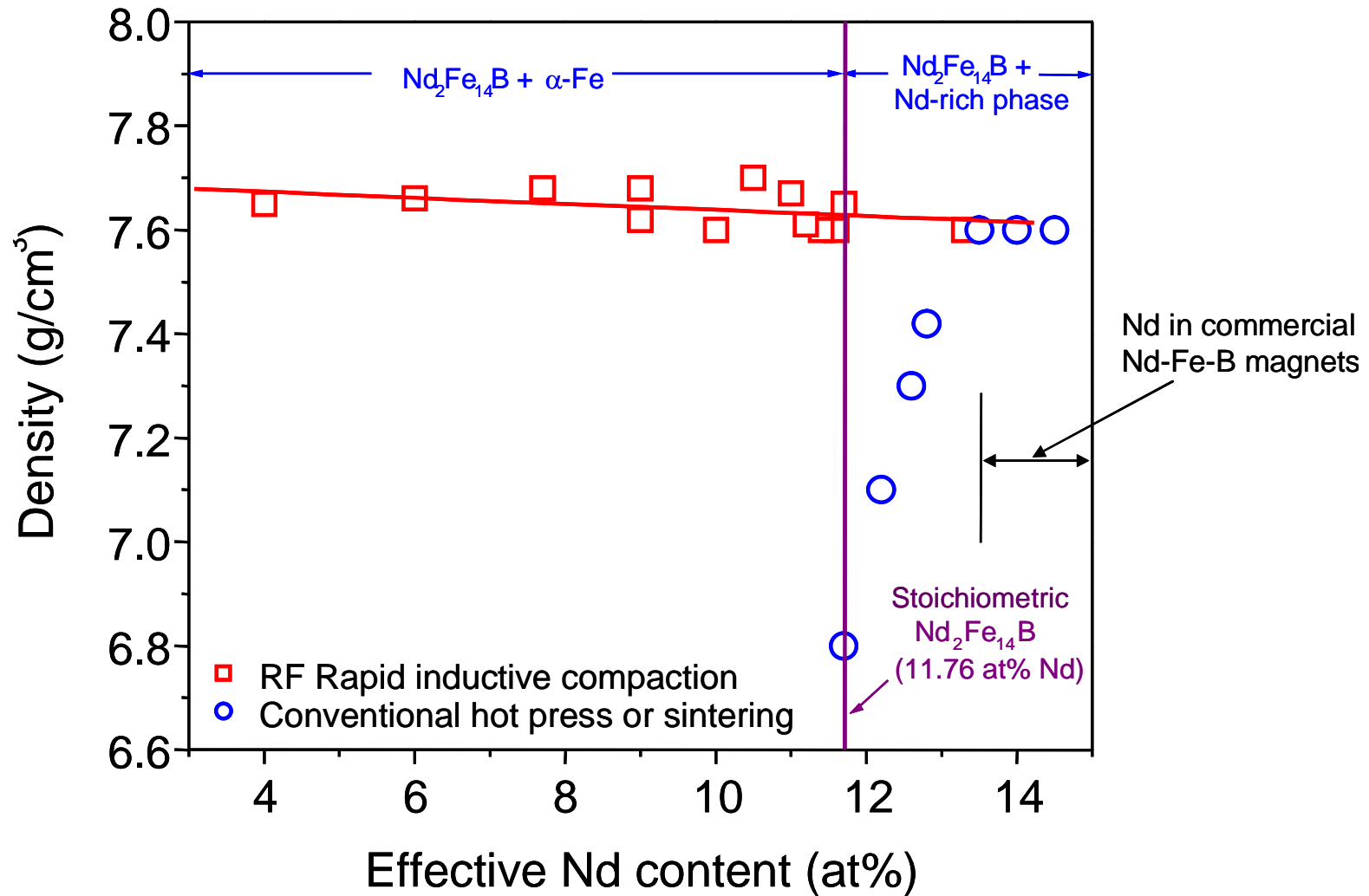


- 只需较低的温度: 600 – 750°C
- 只需较低的压力: 10^8 Pa
- 只需很短的时间: 约2分钟, 包括:
 - 由室温加热至热压温度(约 700°C)
 - 进行热压
 - 冷却至约200°C
- 热压后可获得全密度
- 有效地防止晶粒长大
- 价格低廉

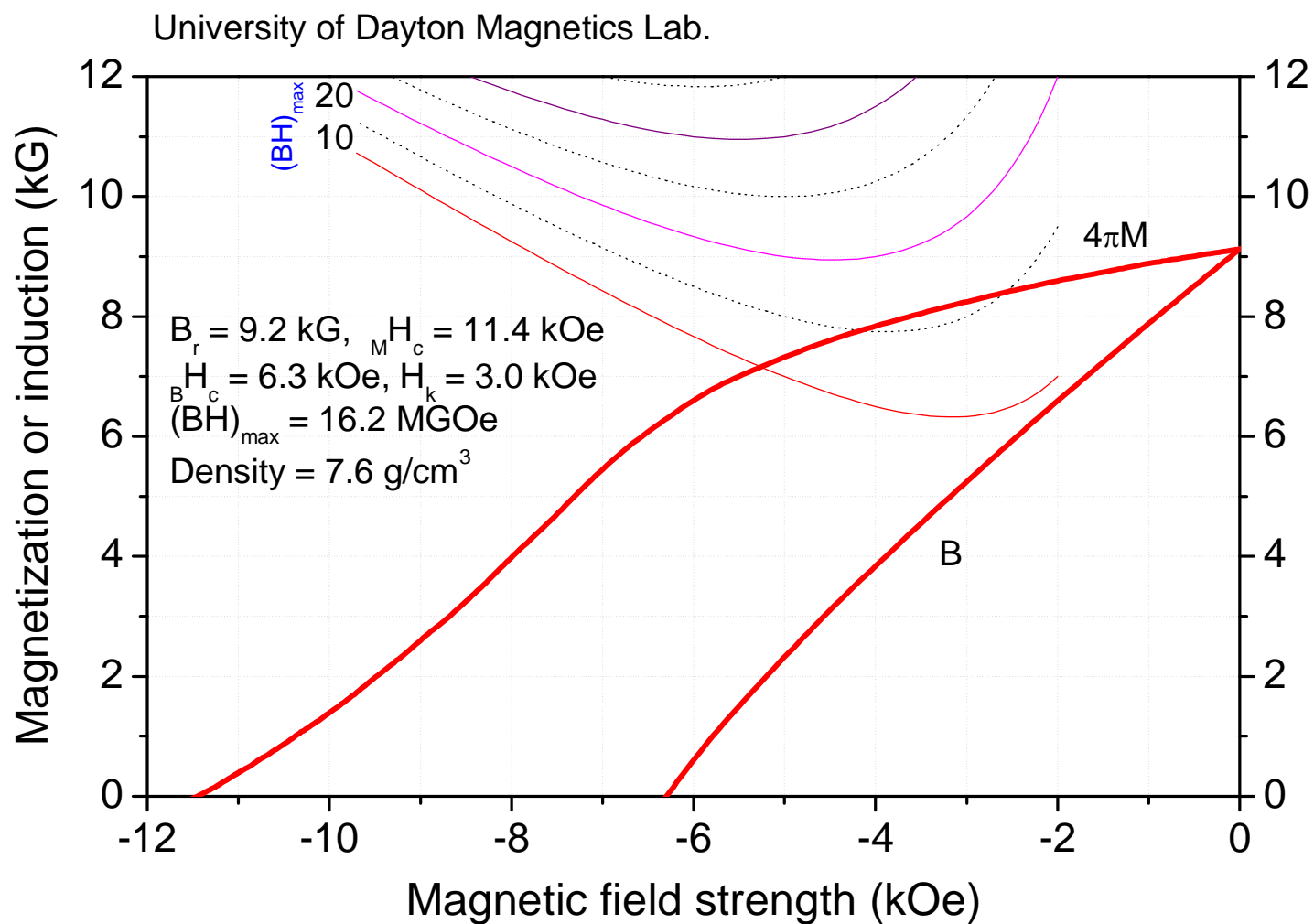
感应热压过程

- 这一热压过程是从粉末材料到全密度材料的**成型过程**
- 这一热压过程又是非晶合金的**晶化过程**以及**纳米结构**的形成过程
- 热压以后,便获得了无取向纳米复合磁体

感应热压技术与传统成型技术的对比

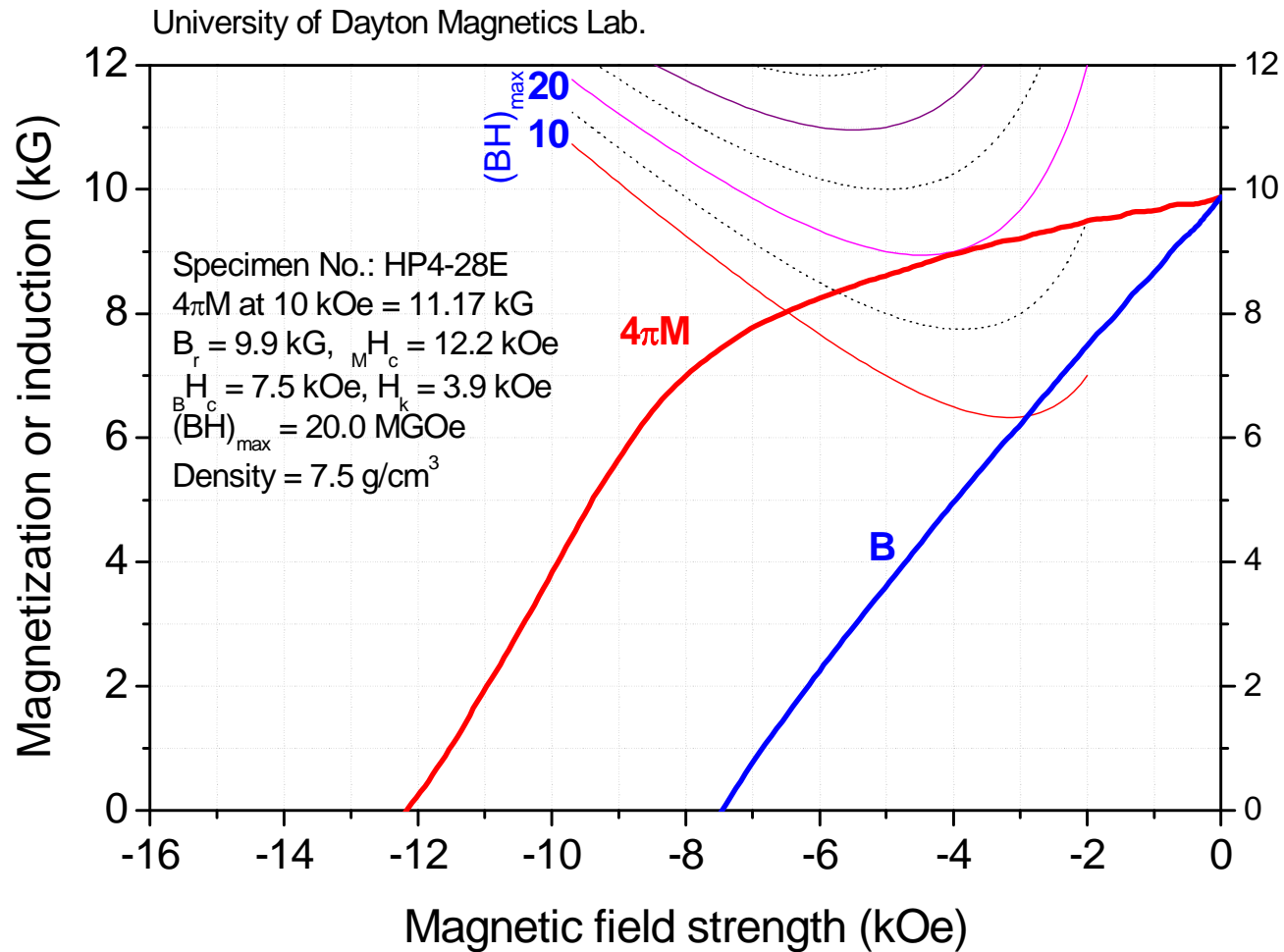


热压 $\text{Nd}_{9.3}\text{Pr}_{0.5}\text{Dy}_{0.2}\text{Fe}_{77.9}\text{Co}_{6.3}\text{Ga}_{0.2}\text{B}_{5.6}$ 磁体



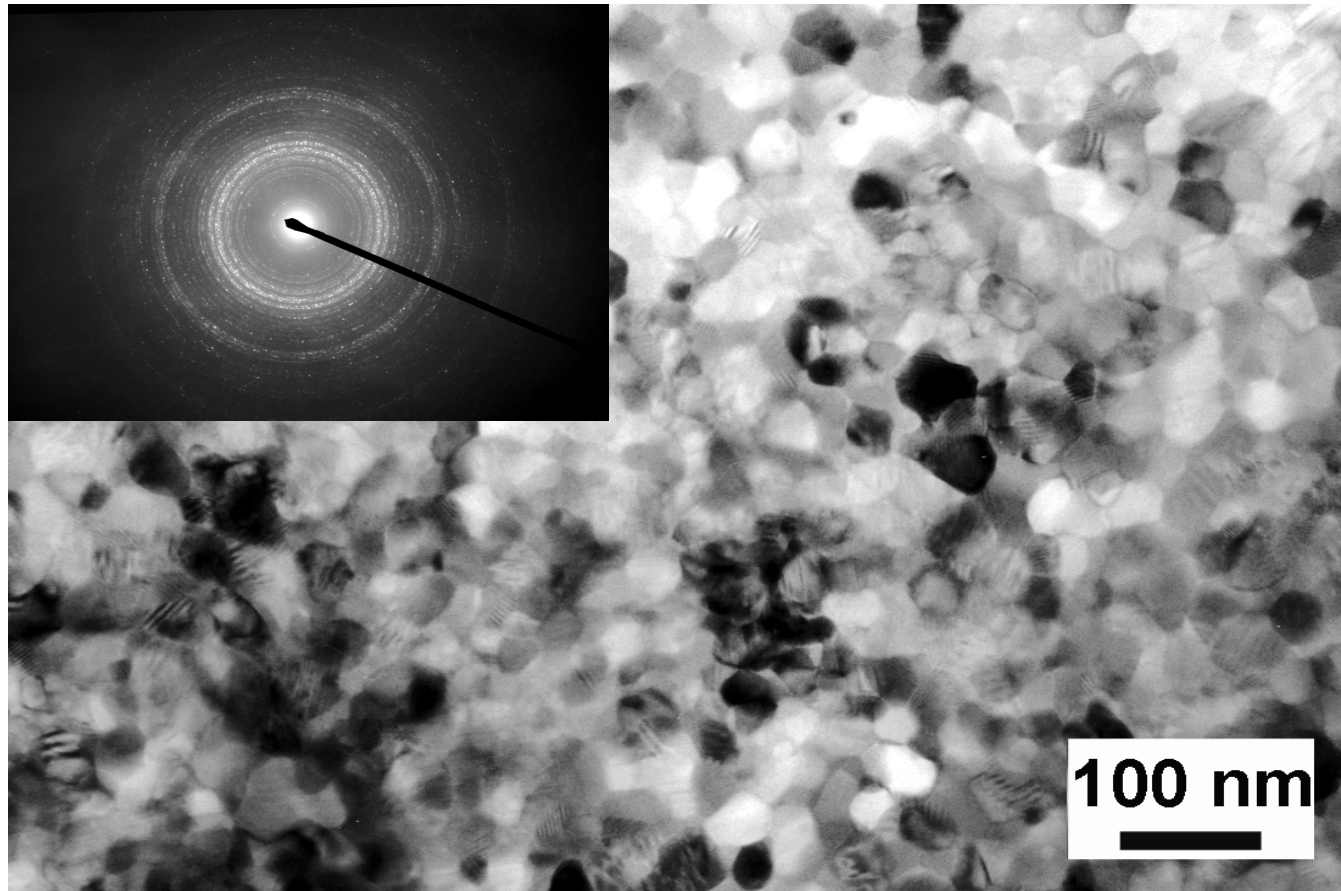
TRE = 10 at%

热压 $\text{Nd}_{6.7}\text{Pr}_{4.3}\text{Fe}_{77.7}\text{Co}_{5.5}\text{Ga}_{0.2}\text{Nb}_{0.1}\text{B}_{5.5}$ 磁体



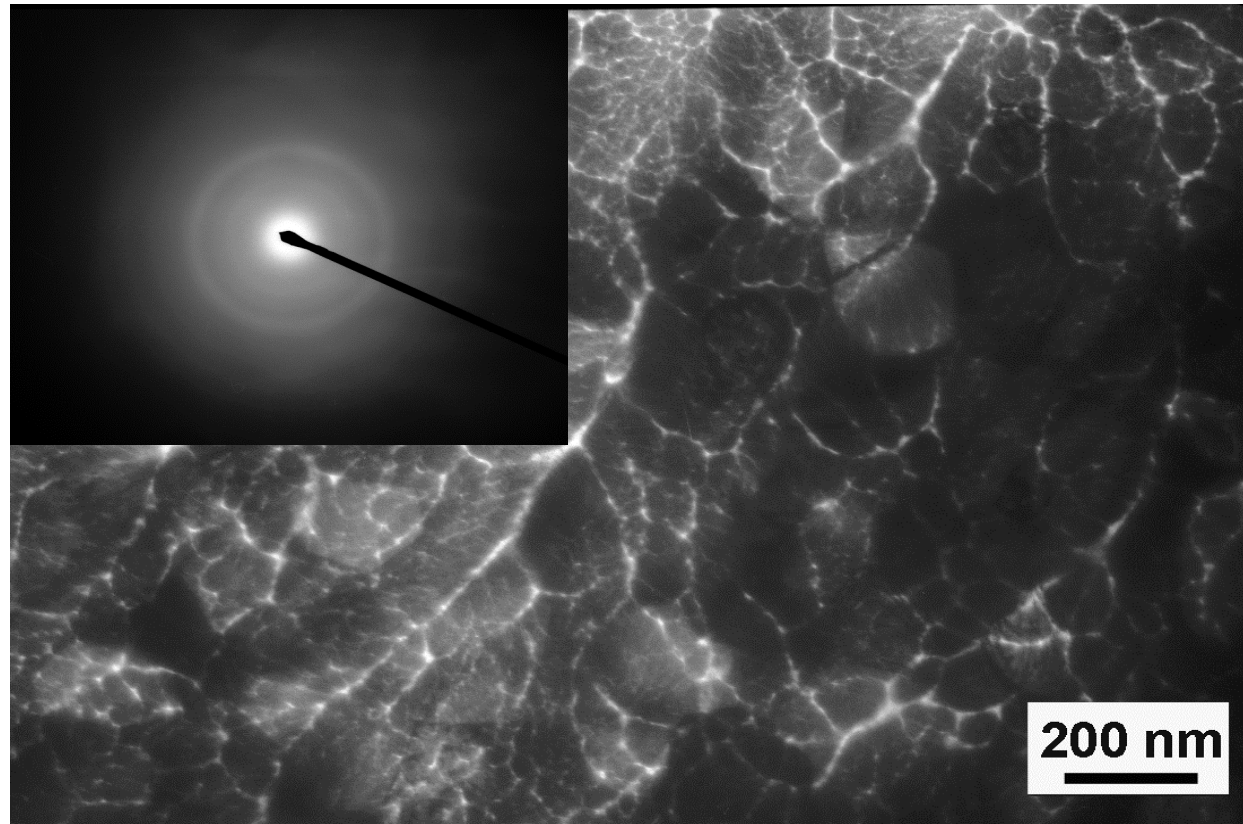
TRE = 11 at%

热压 $\text{Nd}_{2.4}\text{Pr}_{5.6}\text{Dy}_1\text{Fe}_{85}\text{B}_6$ 磁体的显微组织



650° C热压 2 分钟

热压 $\text{Nd}_{2.4}\text{Pr}_{5.6}\text{Dy}_1\text{Fe}_{85}\text{B}_6$ 磁体的 局部TEM显微组织

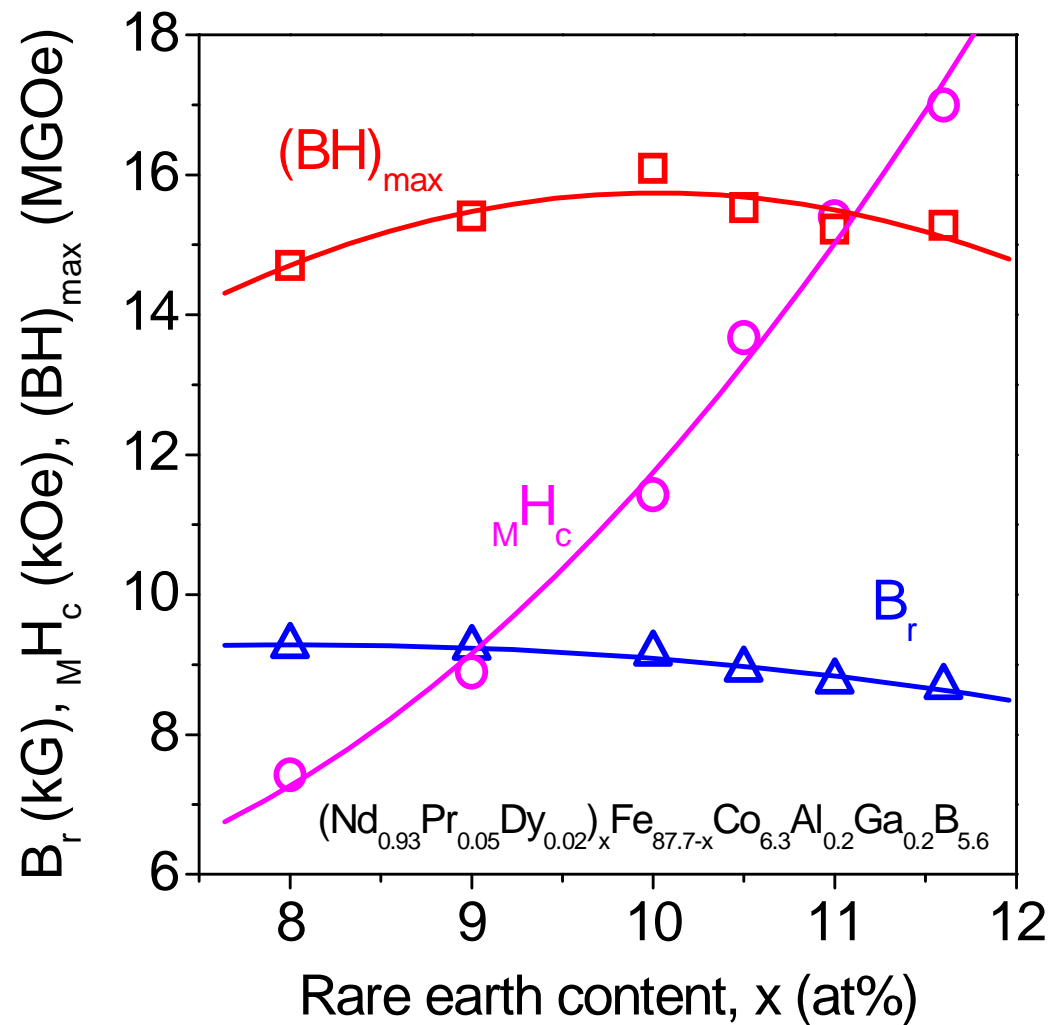


930°C热压 3 分钟

感应热压的本质

- 感应热压的物理本质尚不明了
- 不单纯是极快的速度
- 其本质很可能与等离子体的产生有关

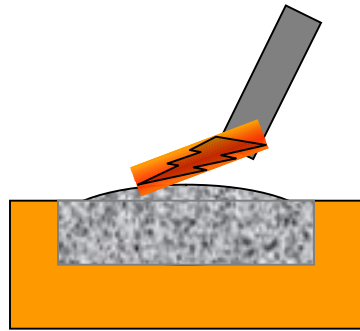
热压磁体的性能与稀土含量的关系



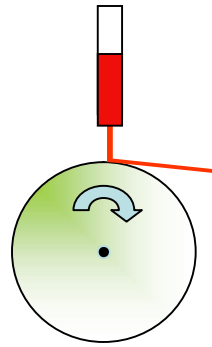
研制取向纳米复合Nd-Fe-B/ α -Fe磁体的技术

- 单一贫Nd的Nd-Fe-B粉末(有效Nd < 11.76 at%)的热压和热变形
- 把贫Nd的Nd-Fe-B粉末(有效Nd < 11.76 at%)同富Nd的Nd-Fe-B粉末(有效Nd > 11.76 at%)混合,再进行热压和热变形
- 把富Nd的Nd-Fe-B粉末(有效Nd > 11.76 at%)同 α -Fe 或 Fe-Co 粉末混合,再进行热压和热变形
- 在富Nd的Nd-Fe-B粉末(有效Nd > 11.76 at%)颗粒表面镀一层 α -Fe 或 Fe-Co,再进行热压和热变形

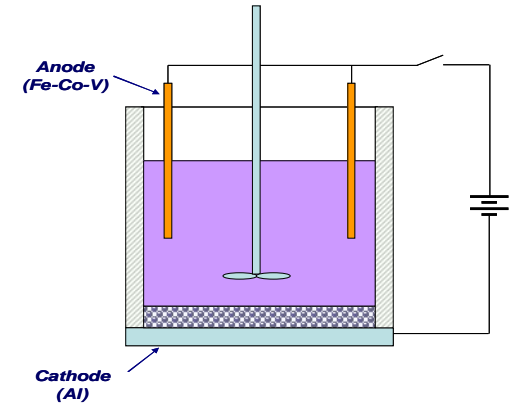
工艺过程



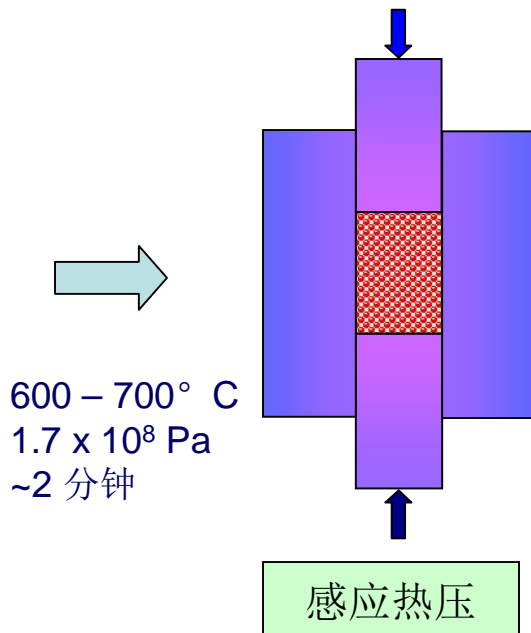
熔炼



快淬

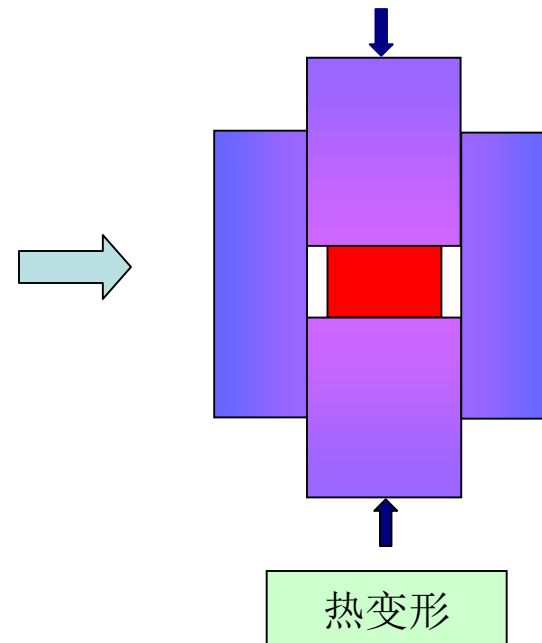


粉末混合或粉末镀层



600 - 700° C
1.7 x 10⁸ Pa
~2 分钟

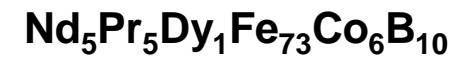
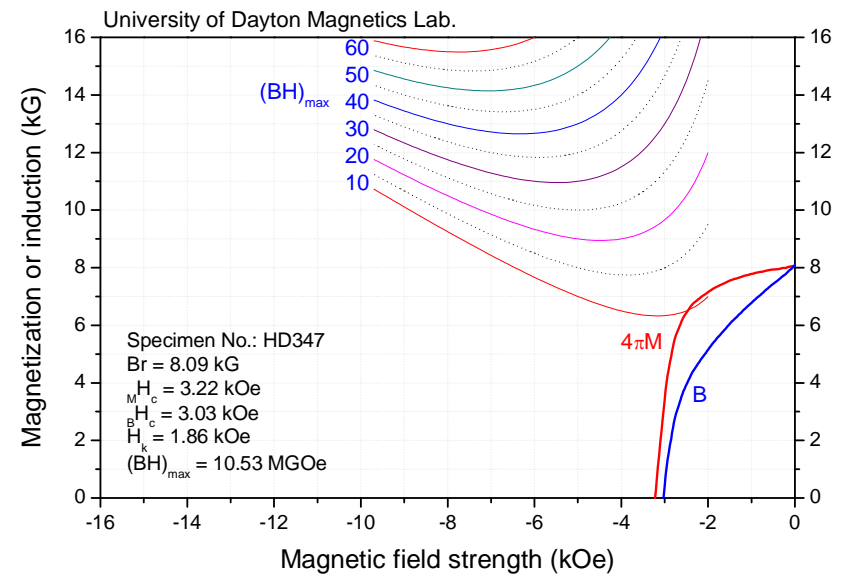
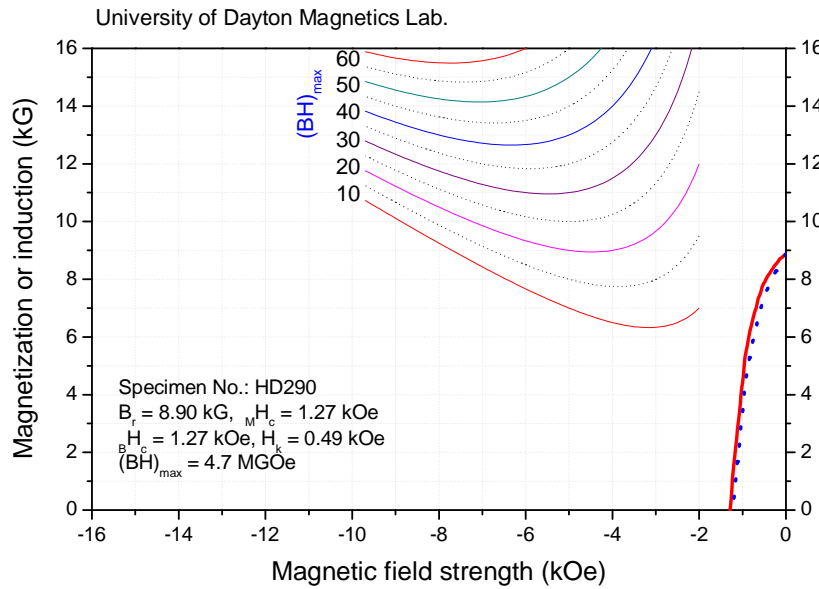
感应热压



800 - 950° C
6.9 x 10⁷ Pa
4 - 6 分钟
减高率: 71%

热变形

单一贫Nd的Nd-Fe-B粉末的实验结果

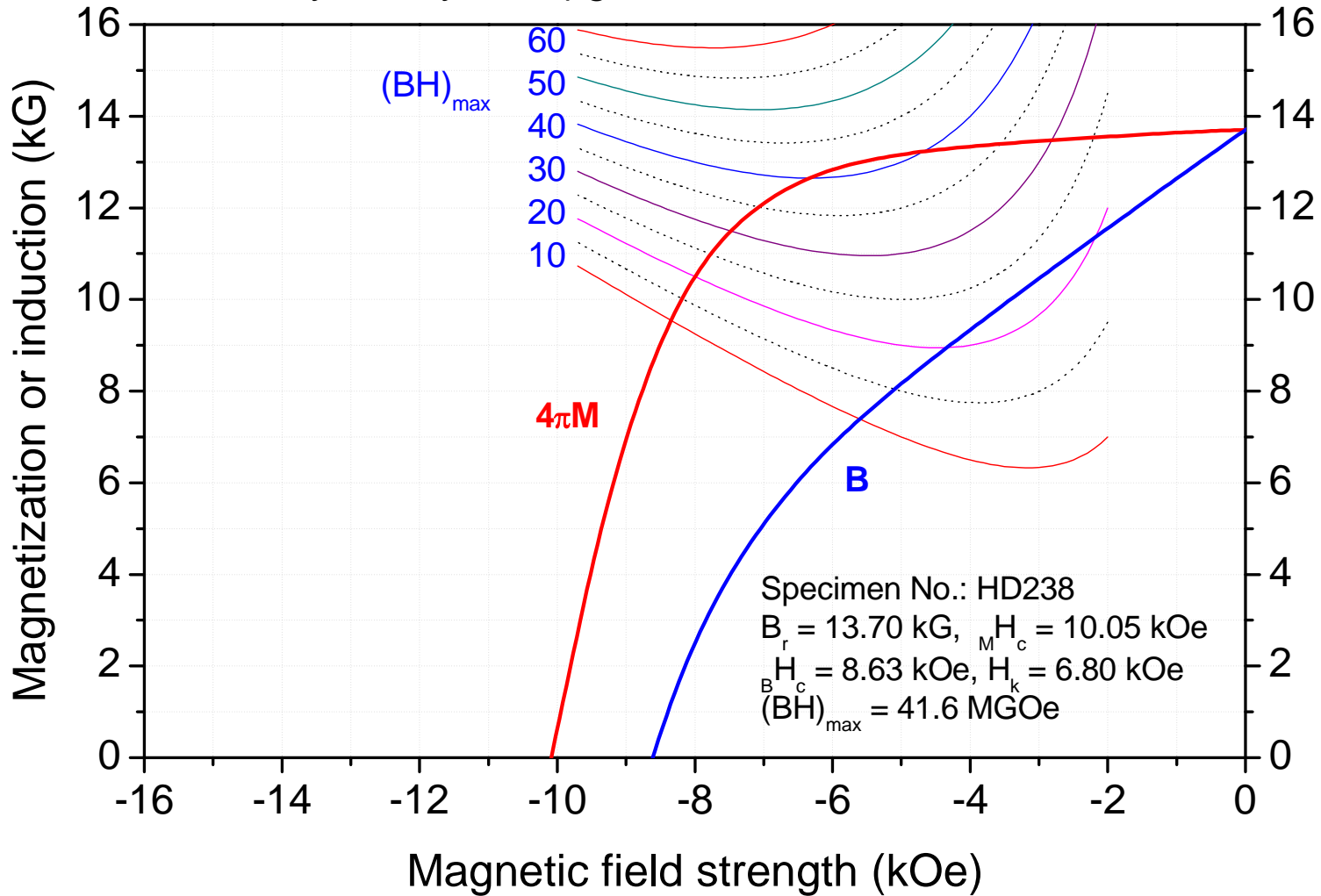


混合贫Nd的Nd-Fe-B粉末和富Nd的Nd-Fe-B粉末而制备的磁体

$\text{Nd}_{10.8}\text{Pr}_{0.6}\text{Dy}_{0.2}\text{Fe}_{76.1}\text{Co}_{6.3}\text{Ga}_{0.2}\text{Al}_{0.2}\text{B}_{5.6}$ RE: 11 at% + 13.5 at% \rightarrow 11.6 at%

热压: 650 °C - 2分钟, 25 kpsi

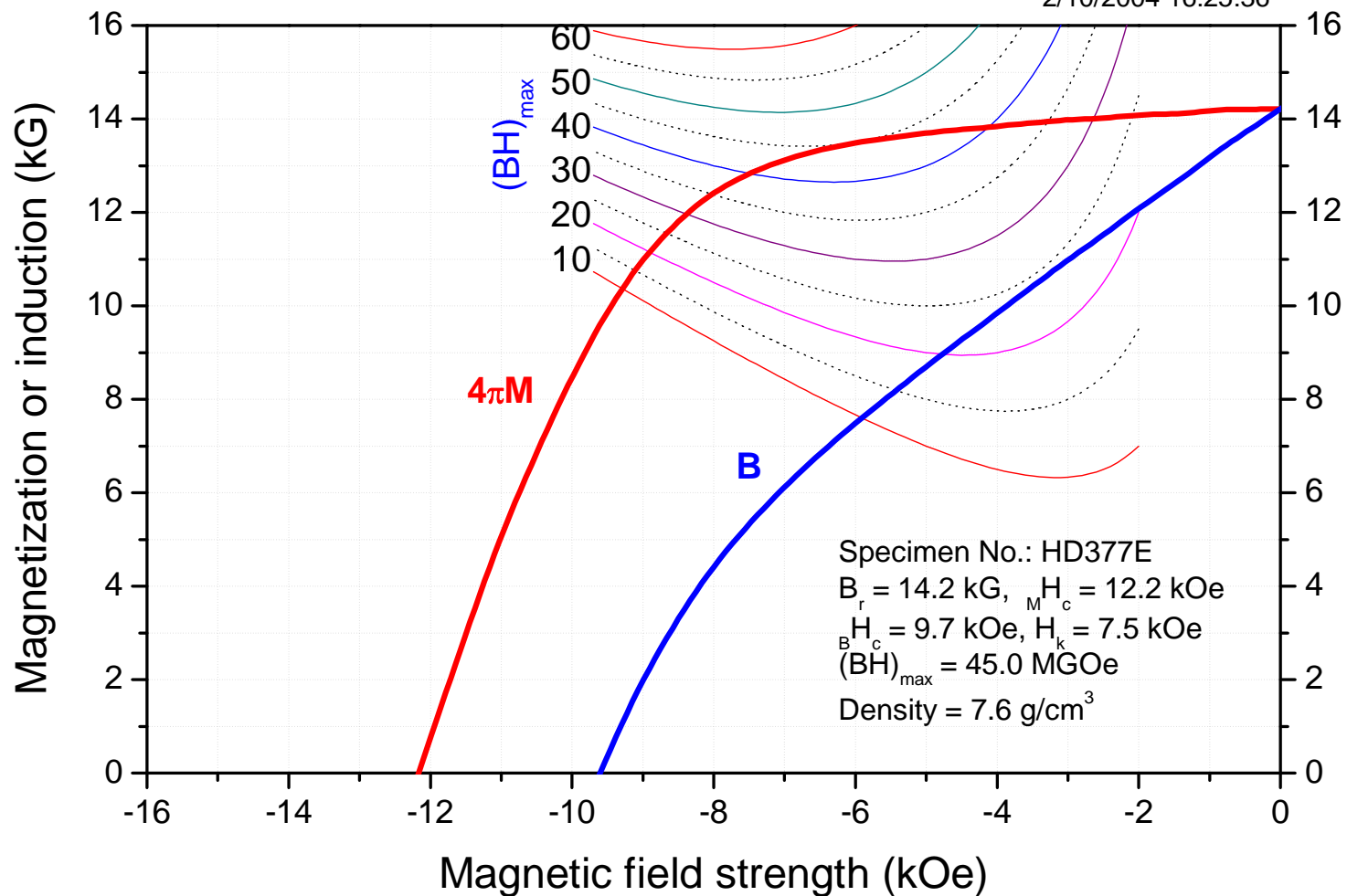
热变形: 880 °C - 6分钟, 10 kpsi, 变形量: 63%



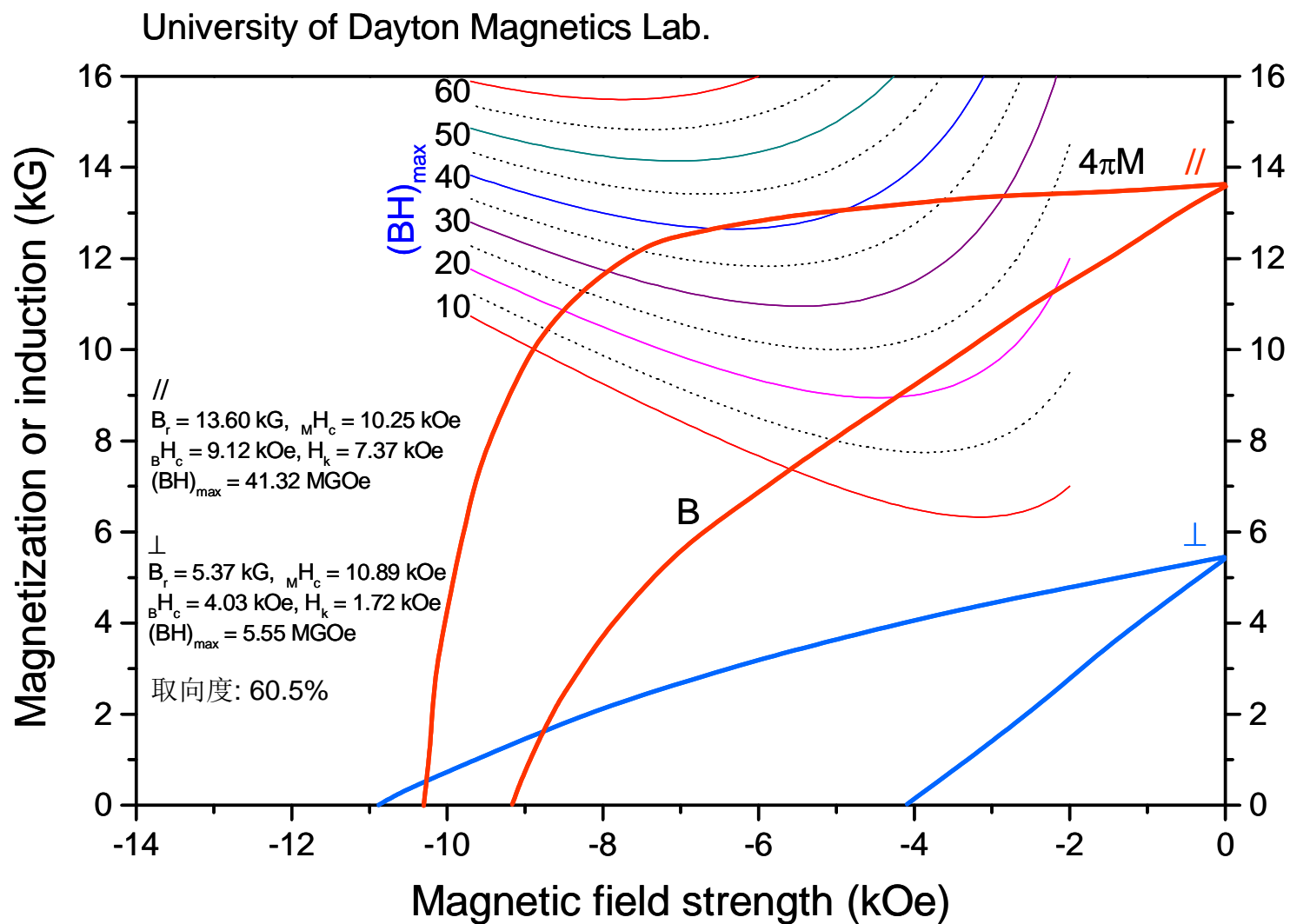
混合贫Nd的Nd-Fe-B粉末和富Nd的Nd-Fe-B粉末而制备的磁体

RE: 4 at% + 13.5 at% → 11.6 at%

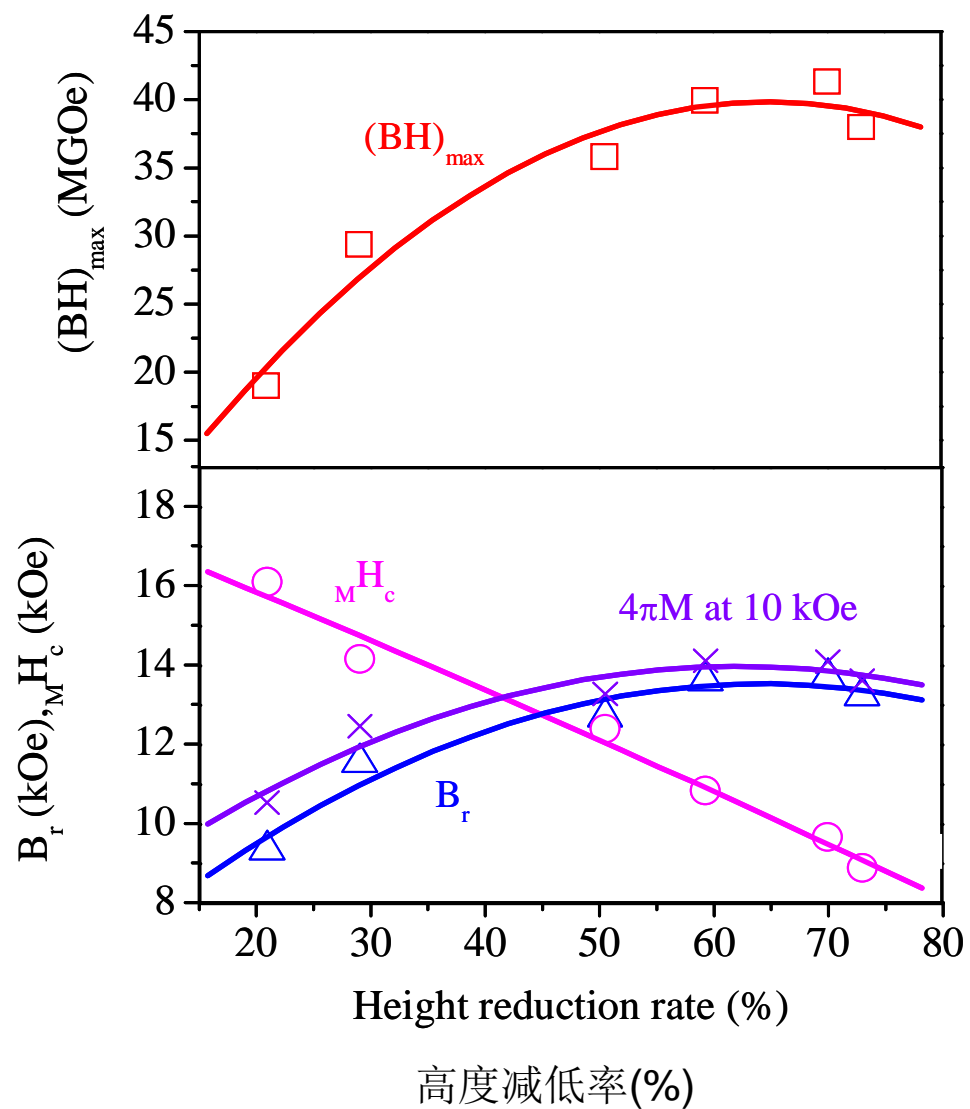
2/10/2004 16:25:36



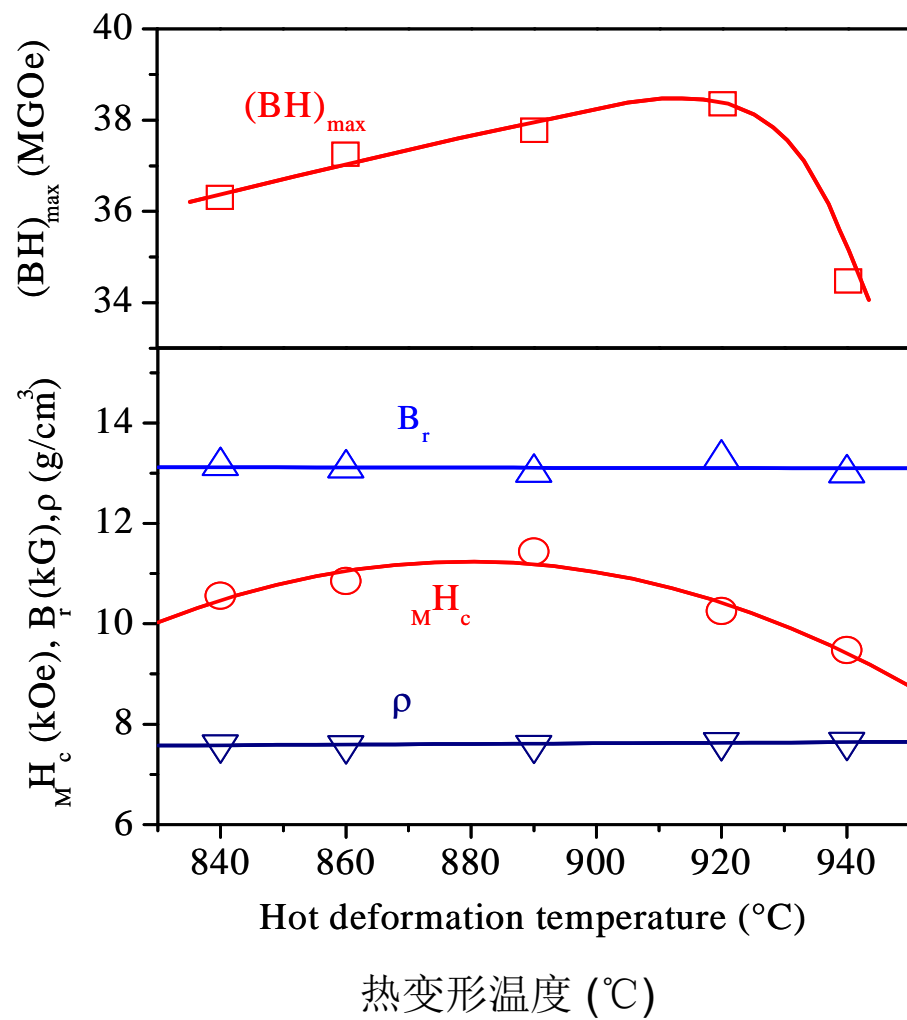
沿易轴和难轴测量得到的退磁曲线



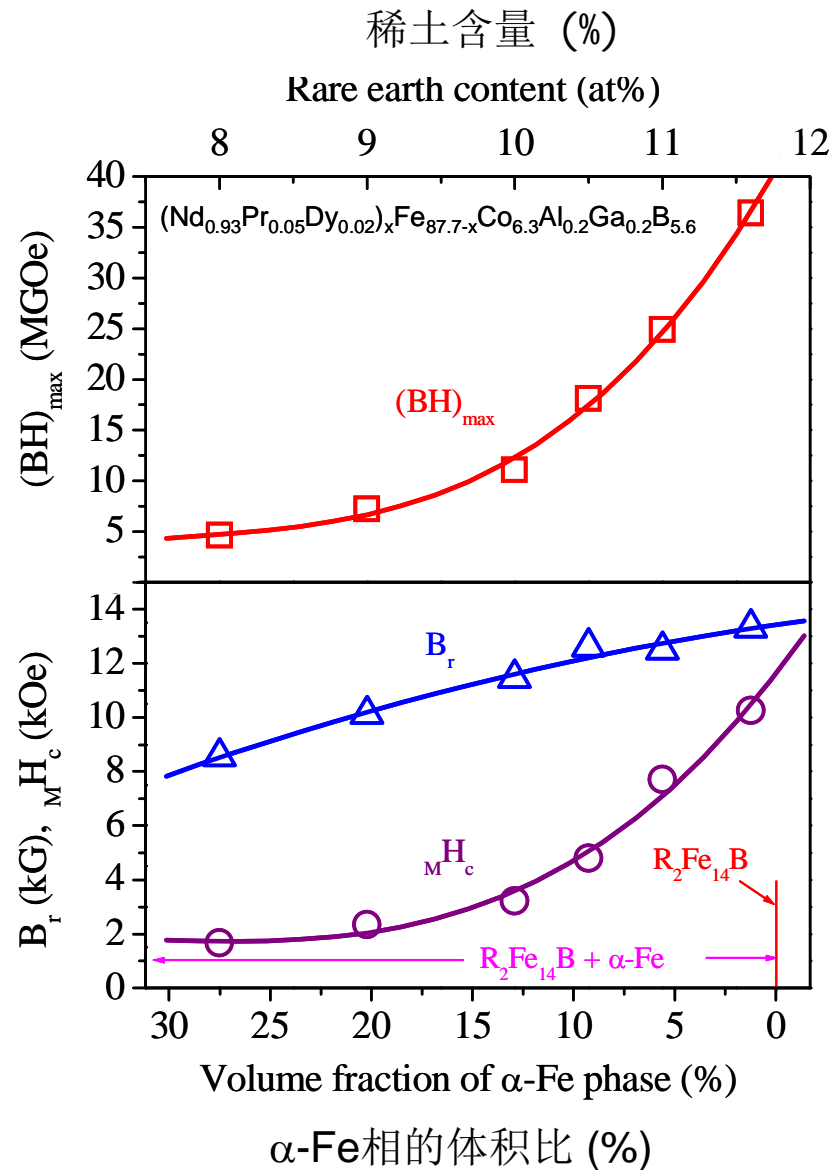
变形量对磁性的影响



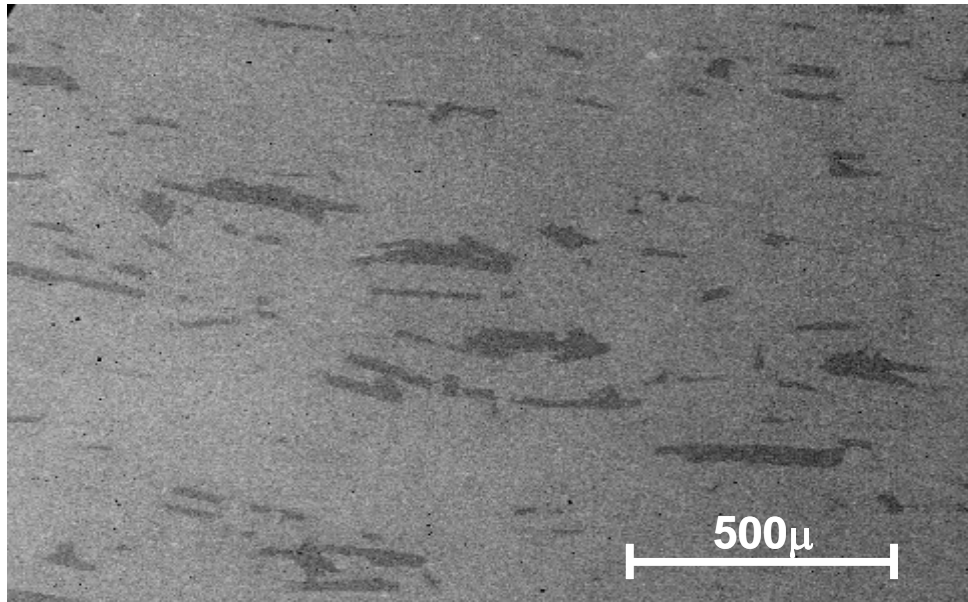
热变形温度对磁性的影响



α -Fe在复合磁体中的含量对磁性的影响



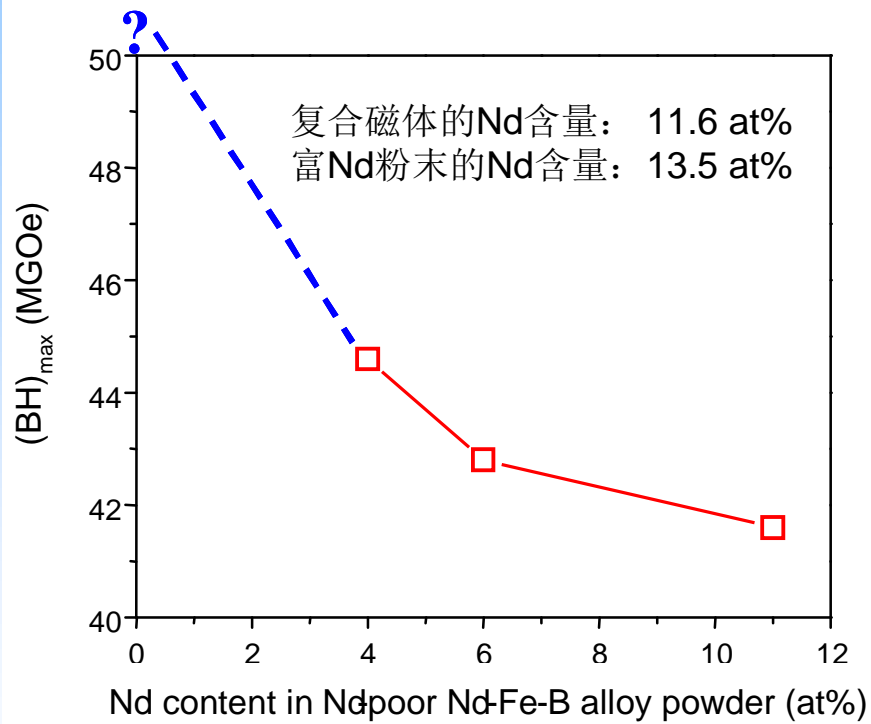
热变形磁体的SEM显微组织



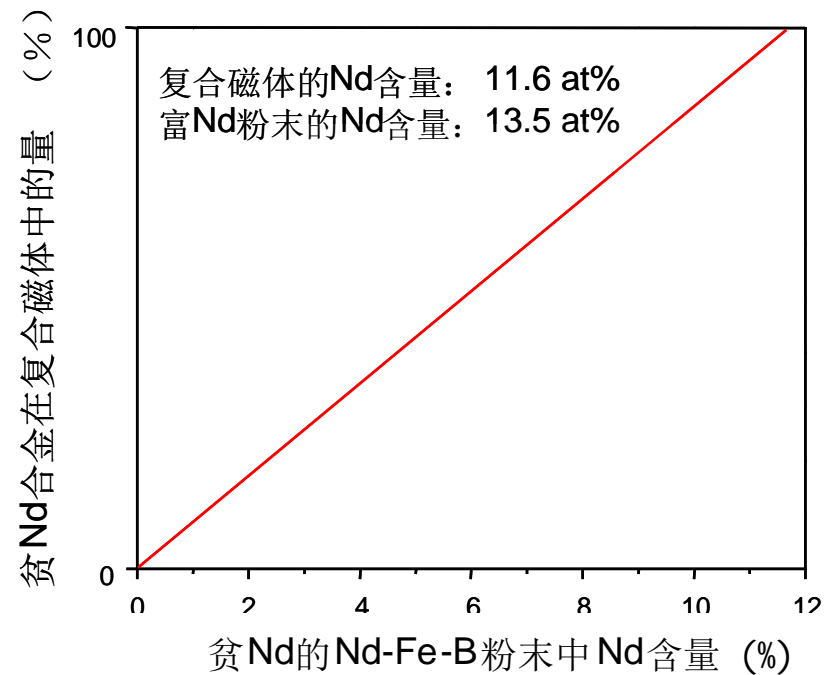
浅灰基体相: 由富Nd的 Nd-Fe-B形成别 - 各向异性

深灰相: 由贫Nd的 Nd-Fe-B形成别 - 各向同性

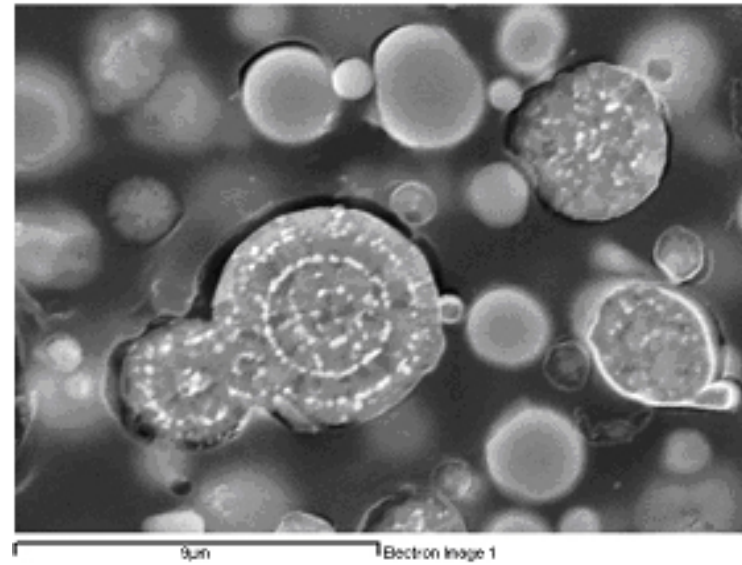
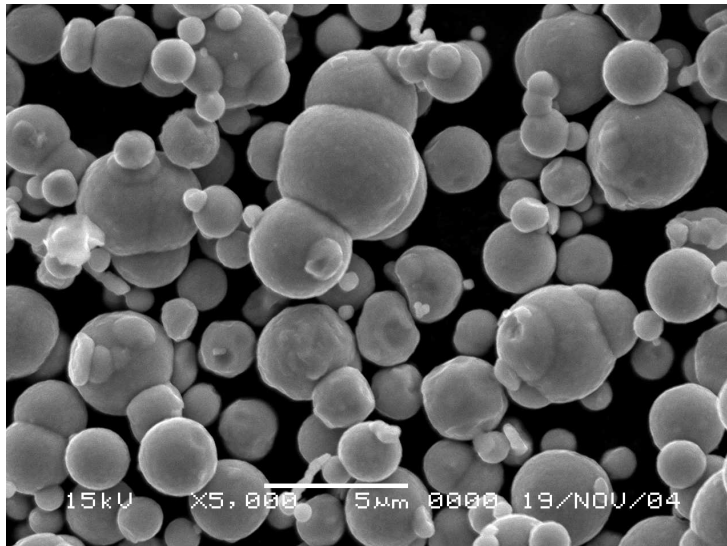
贫Nd的Nd-Fe-B粉末中Nd含量对磁性的影响



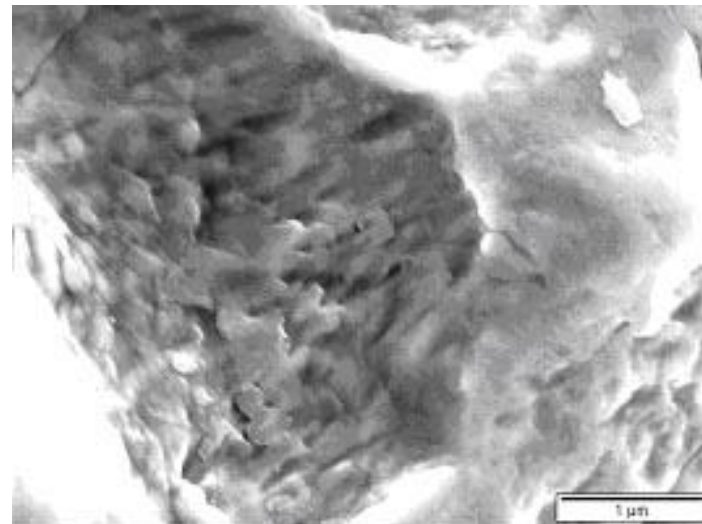
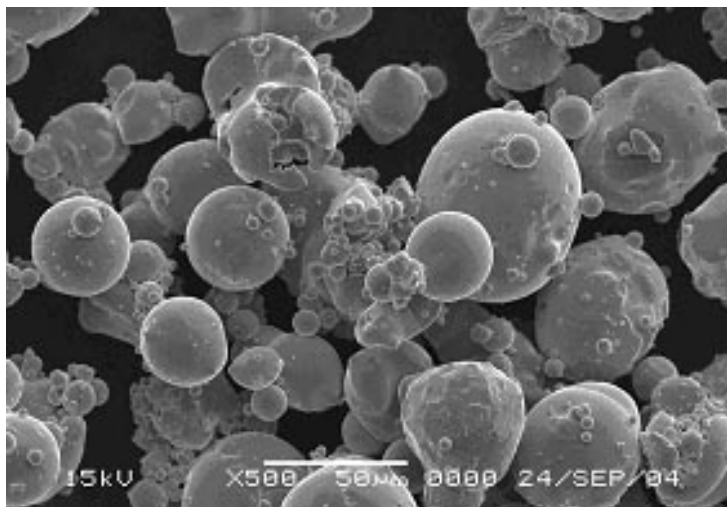
贫Nd的Nd-Fe-B粉末中Nd含量



所使用的 α -Fe和Fe-Co粉末

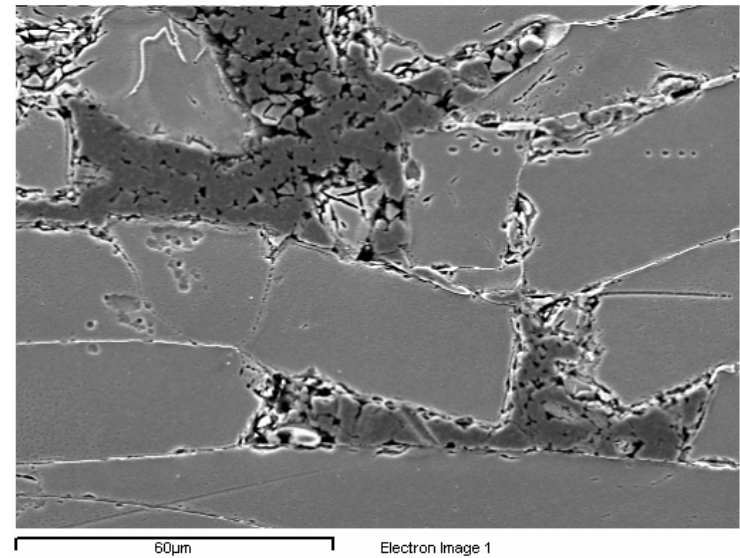
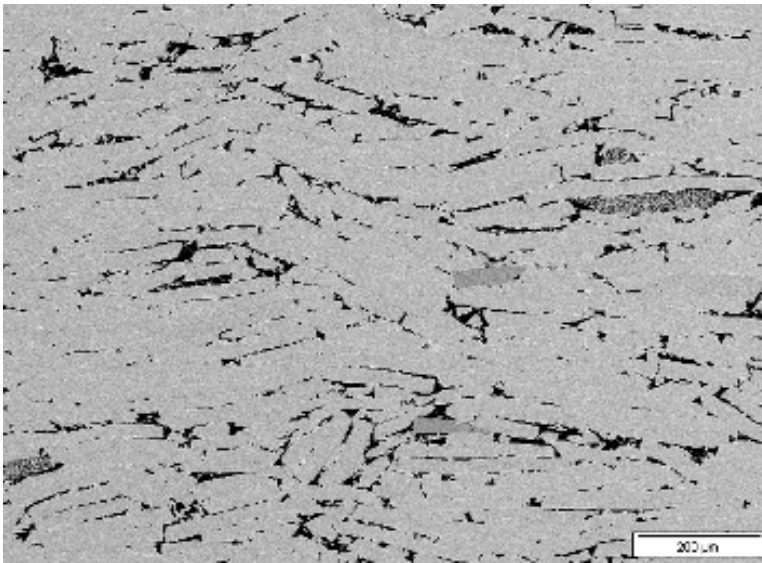


α -Fe



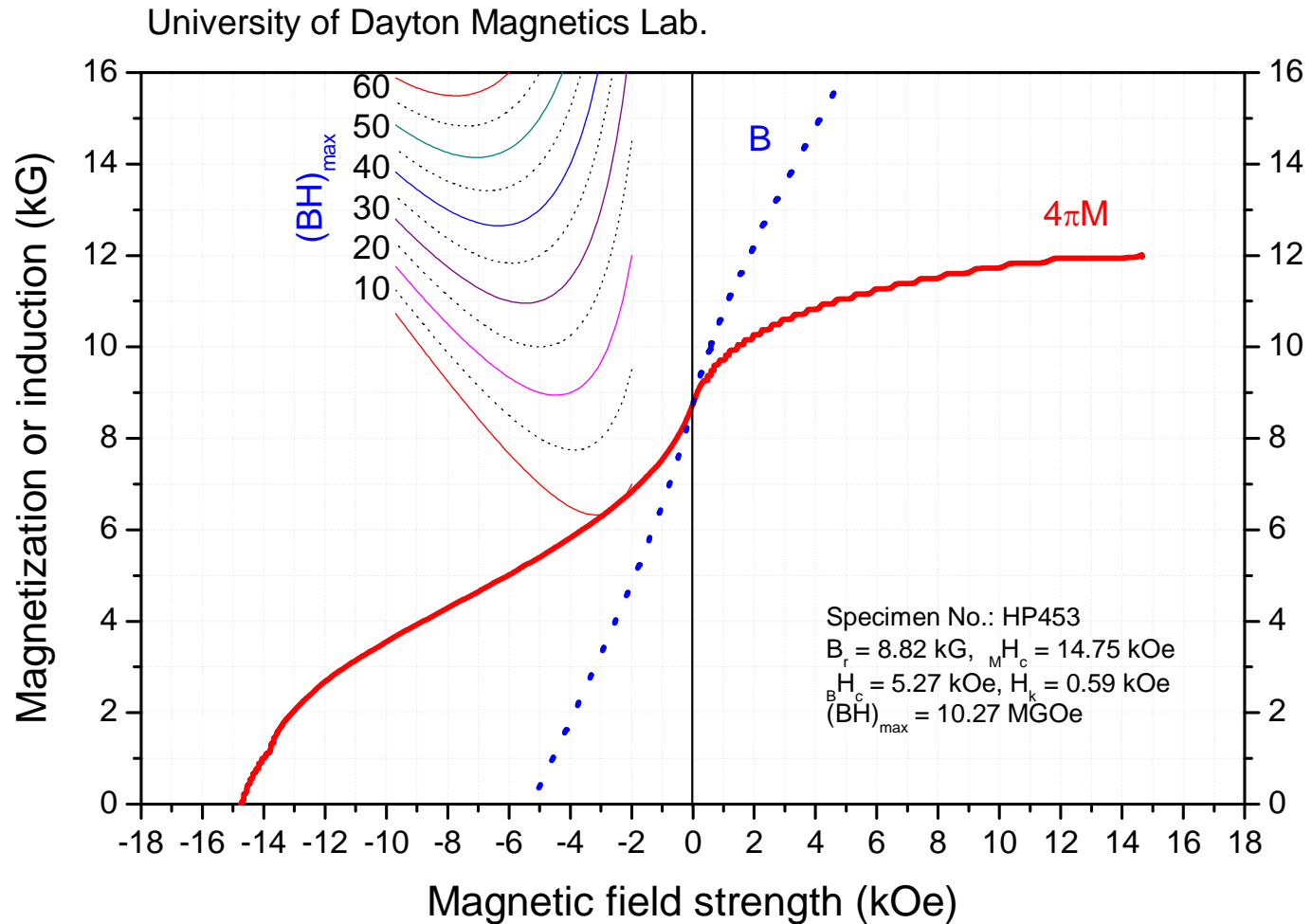
Fe-Co

热压后的SEM显微组织

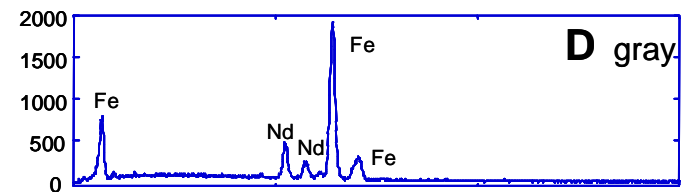
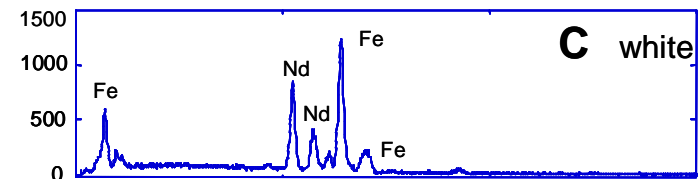
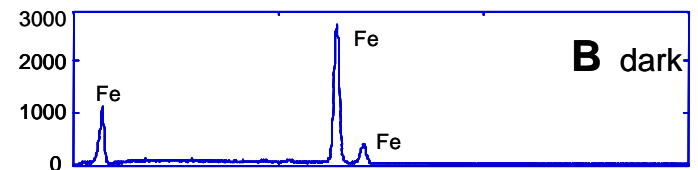
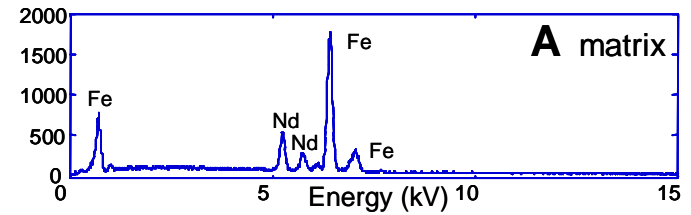
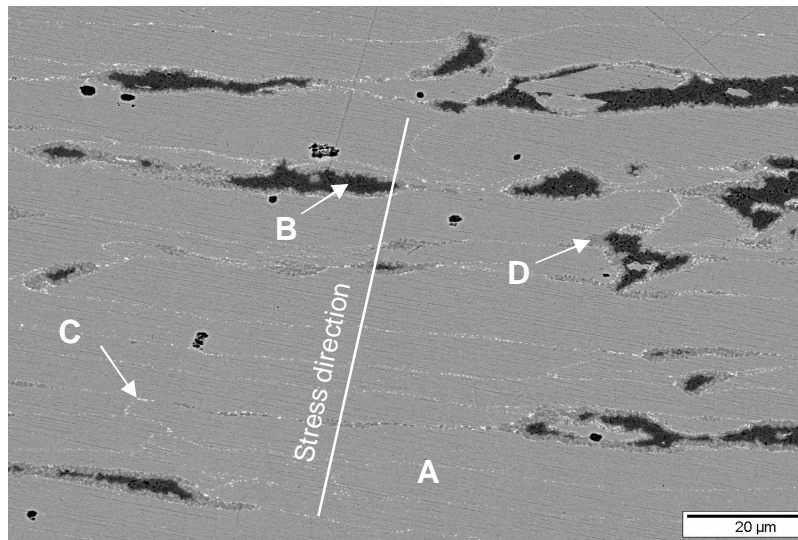


8 wt% α -Fe

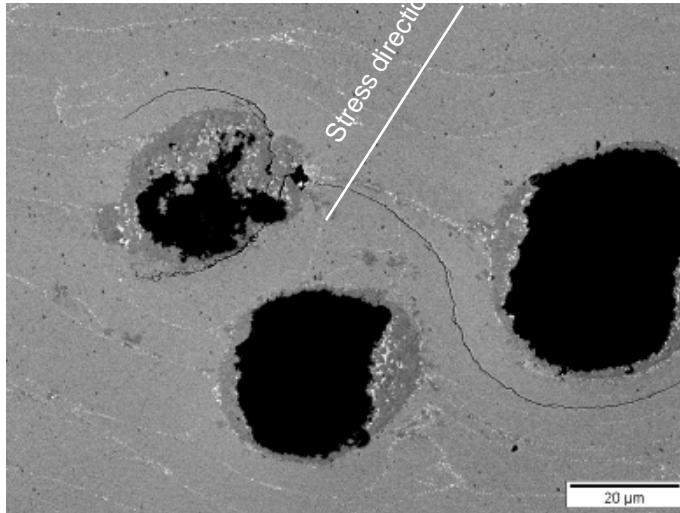
$\text{Nd}_{13.5}\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{0.5}\text{B}_6 / \alpha\text{-Fe}$ (91.7%/8.3%) 热压后的退磁曲线



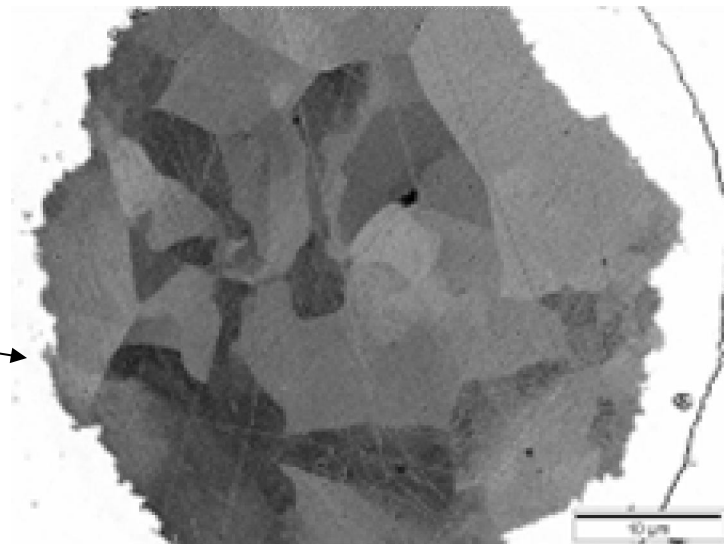
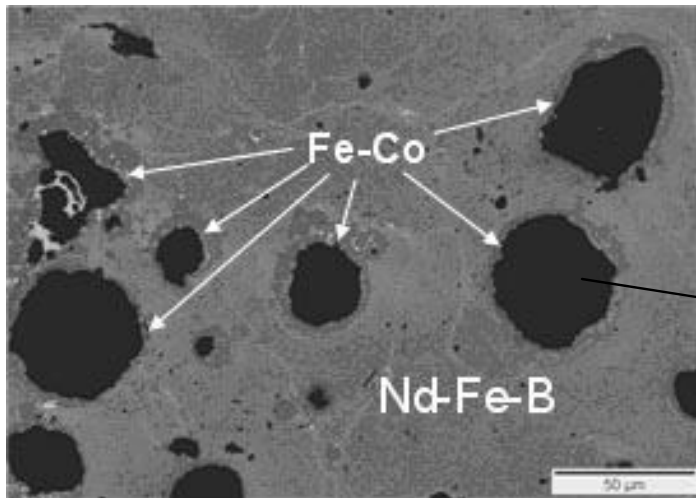
Nd-Fe-B/ α -Fe热变形后的SEM显微组织



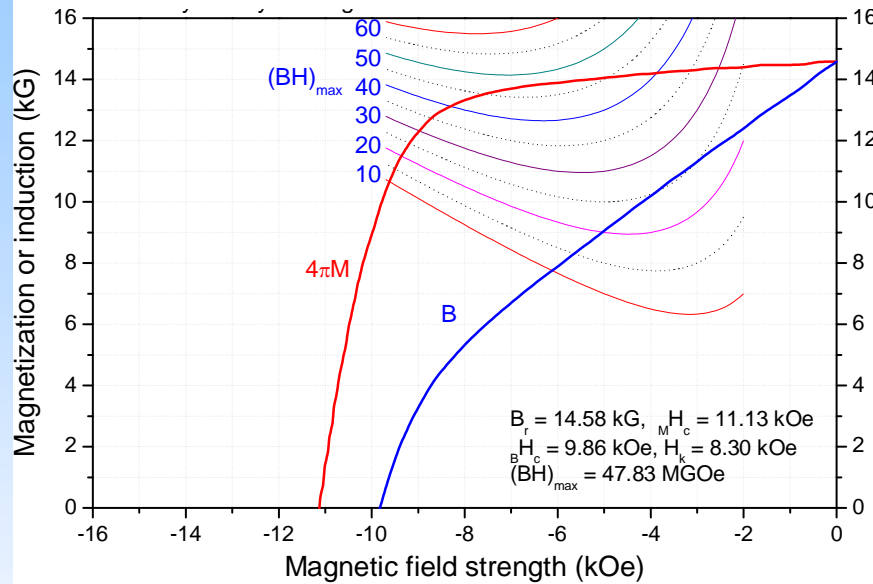
Nd-Fe-B/Fe-Co热变形后的SEM显微组织



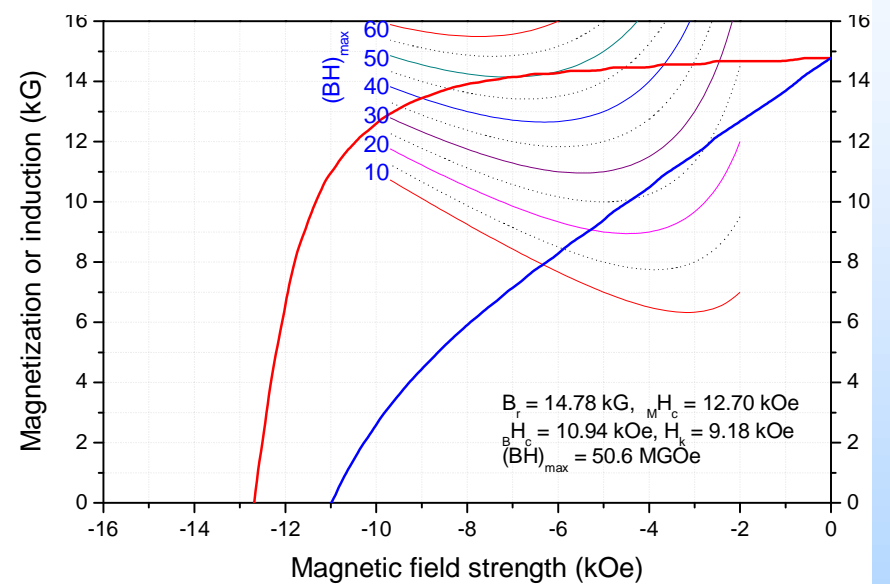
- α -Fe粉末颗粒倾向于结团
 - 形成相当大的软磁相
 - 软磁相长度: 10 – 30 微米
 - 软磁相厚度: 5 – 10 微米
- Fe-Co粉末颗粒不结团
 - 软磁相尺寸: 5 – 40 微米



Nd-Fe-B/ α -Fe和Nd-Fe-B/Fe-Co 复合磁体的退磁曲线

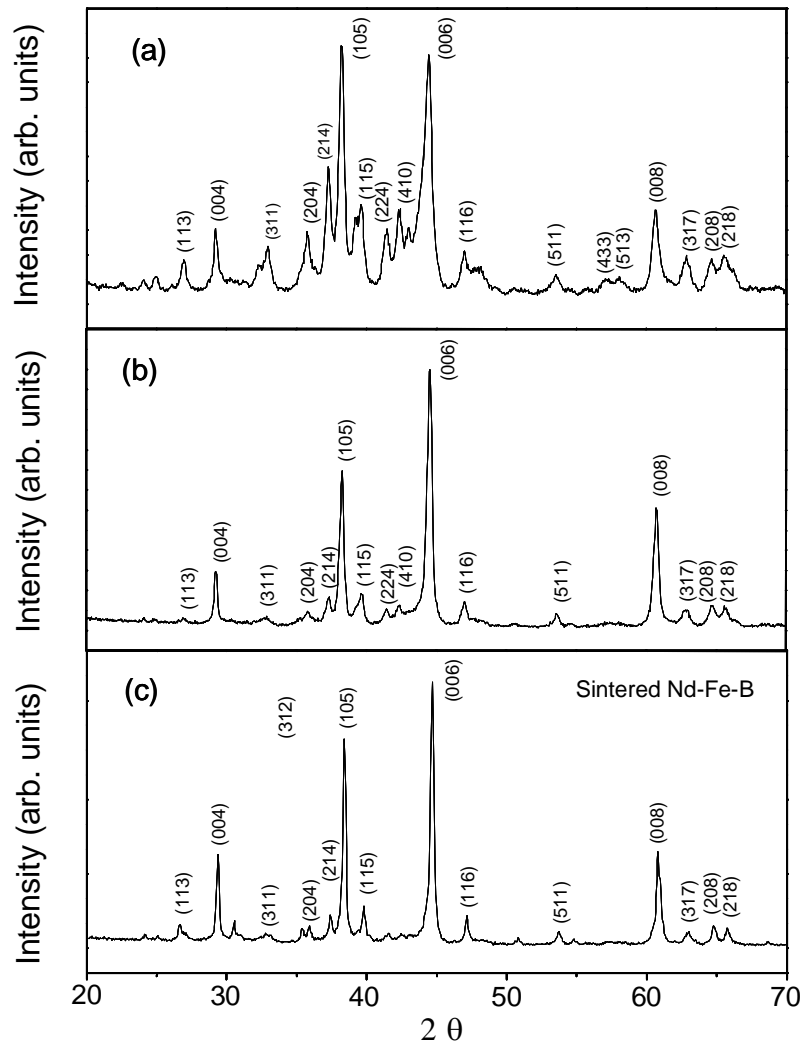


$\text{Nd}_{13.5}\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{0.5}\text{B}_6/\alpha\text{-Fe}$ (95 wt%/5 wt%)



$\text{Nd}_{13.5}\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{0.5}\text{B}_6/\text{Fe-Co}$ (95 wt%/5 wt%)

X-线衍射花样的比较



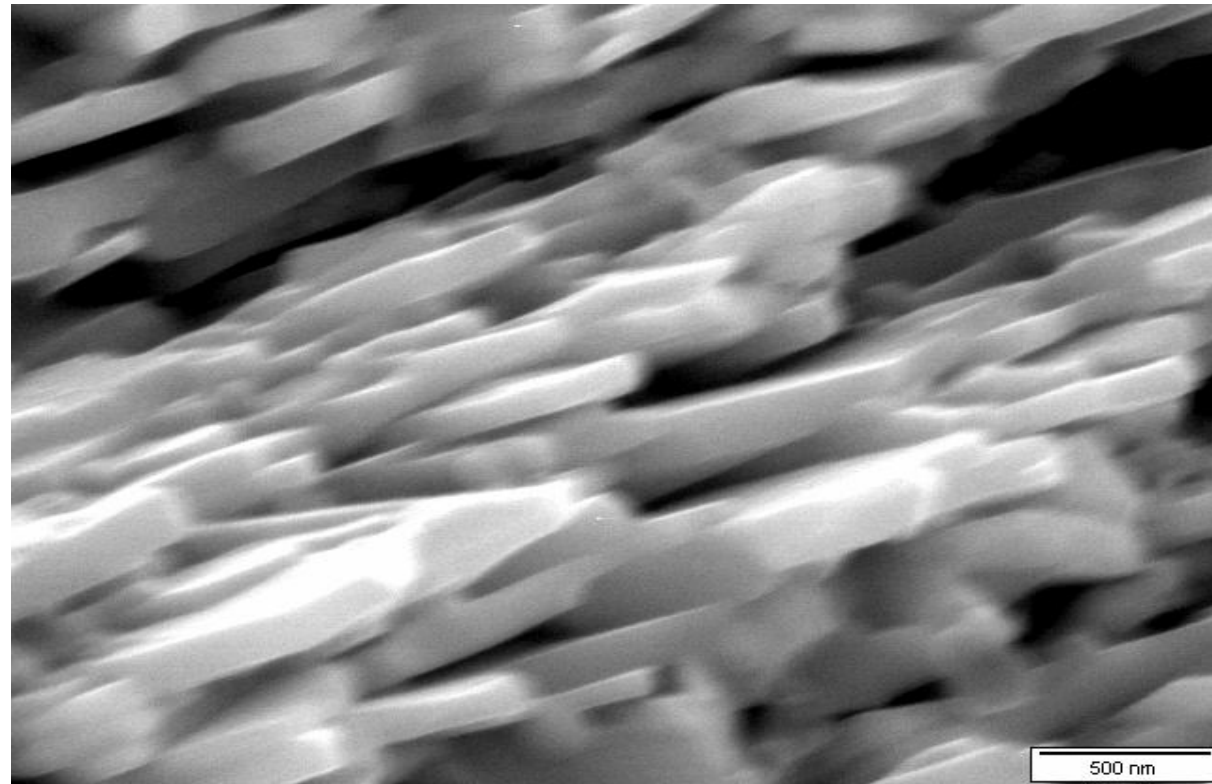
(a) 采用混合贫Nd的Nd-Fe-B粉末与富Nd的Nd-Fe-B粉末的技术制备的复合磁体。
 $(BH)_{\max} \approx 40$ MGOe

(b) 采用混合富Nd的Nd-Fe-B粉末与 α -Fe粉末的技术制备的复合磁体。
 $(BH)_{\max} \approx 50$ MGOe

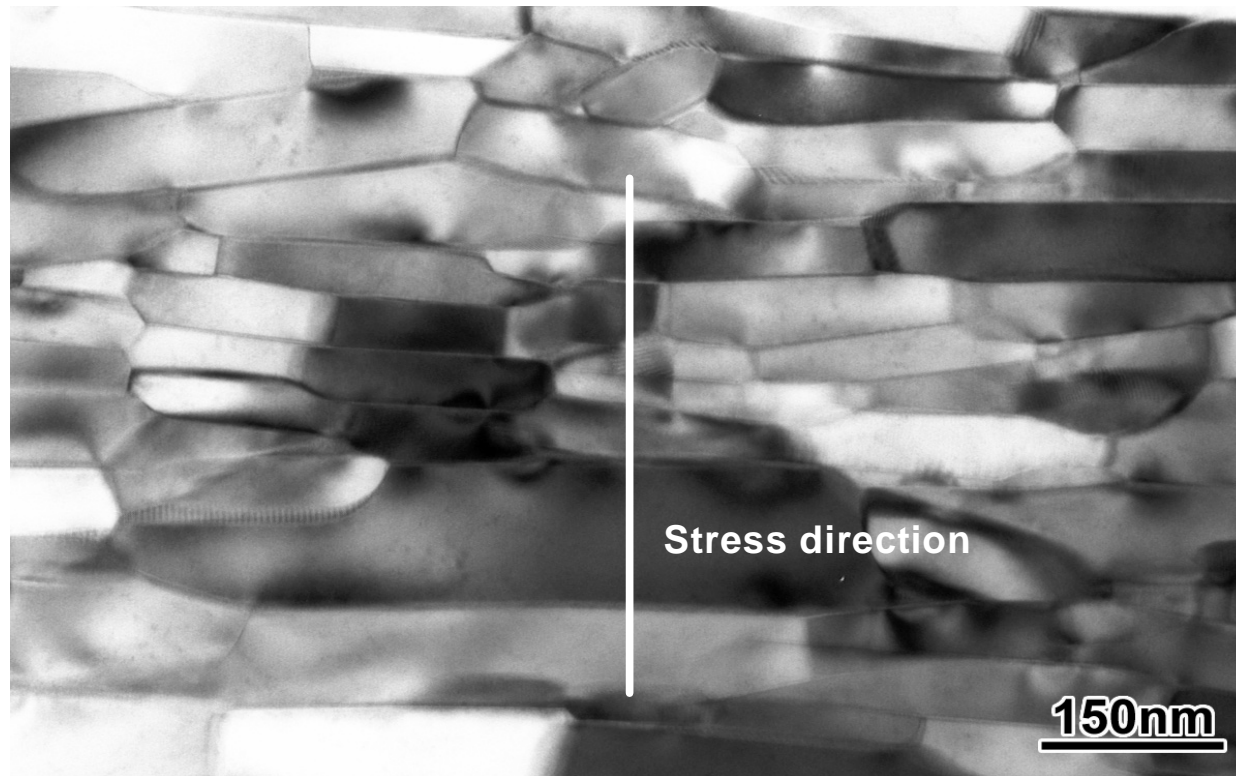
(c) 烧结Nd-Fe-B 磁体。
 $(BH)_{\max} \approx 40$ MGOe

- 取向好的标志
 - 加强了(004), (006), (008)
 - $(006)/(105) > 1$

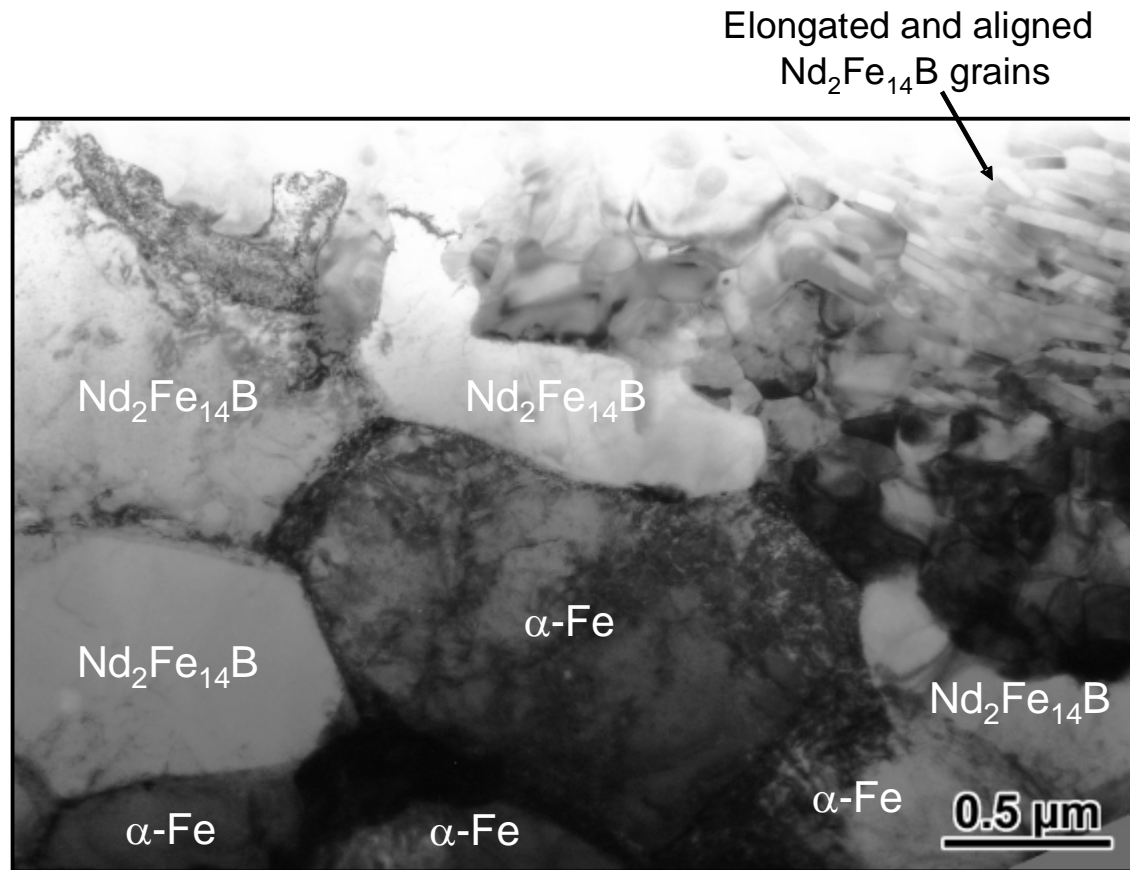
$\text{Nd}_{10.6}\text{Fe}_{82.9}\text{Ga}_{0.5}\text{B}_6$ (7.9% $\alpha\text{-Fe}$) 磁体断面的 SEM 显微组织照片



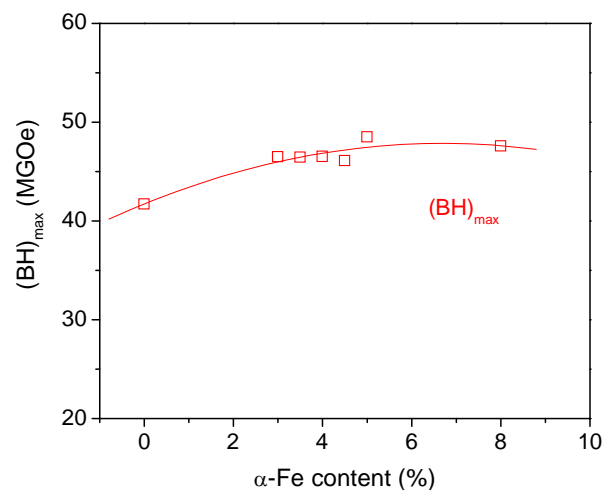
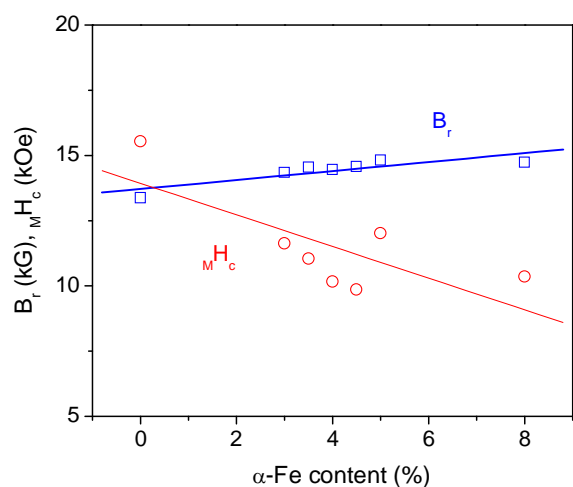
$\text{Nd}_{13.5}\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{0.5}\text{B}_6 / \alpha\text{-Fe}$ (95%/5%) 复合磁体的透射电镜照片



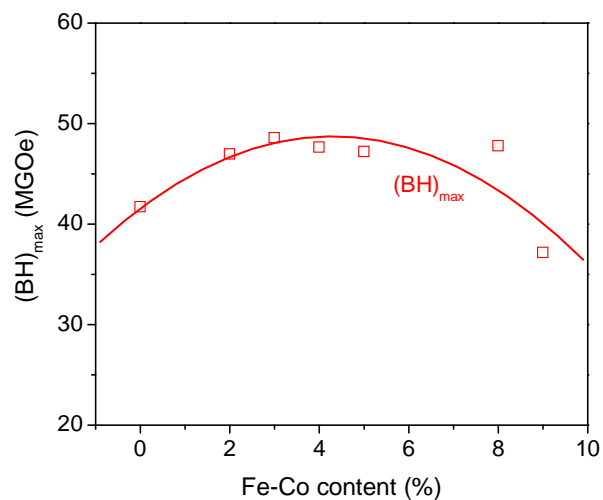
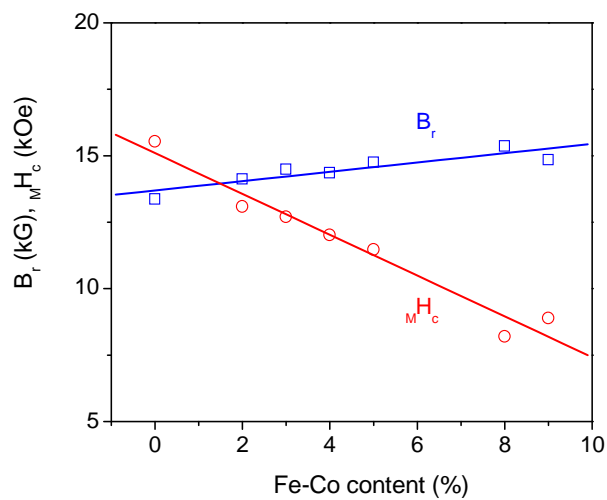
$\text{Nd}_{13.5}\text{Fe}_{80}\text{Ga}_{0.5}\text{B}_6 / \alpha\text{-Fe}$ (95%/5%) 复合磁体的软/硬相界面



复合磁体中软磁相的量对磁性的影响



Nd-Fe-B/ α -Fe



Nd-Fe-B/Fe-Co

富Nd的Nd-Fe-B与 α -Fe或Fe-Co 粉末混合工艺的意义

- 完全摆脱了复合磁体中的无取向部分
- α -Fe 或 Fe-Co的存在不影响硬磁相的取向
- 复合磁体的晶粒取向度显著改善
→ 取向复合磁体
- 工艺简单, 成本低廉
- 新型纳米晶粒复合磁体

三种不同类型磁体取向度的比较

■ 磁体 I:

单一的 *Nd-Fe-B* 合金

→ 各向同性
 $(BH)_{\max} = 15 - 20 \text{ MGOe}$

■ 磁体 II:

富 *Nd* 的 *Nd-Fe-B* 合金

+

贫 *Nd* 的 *Nd-Fe-B* 合金

各向异性

各向同性

$(BH)_{\max} = 35 - 45 \text{ MGOe}$

■ 磁体 III

富 *Nd* 的 *Nd-Fe-B* 合金

+

$\alpha\text{-Fe}$ or *Fe-Co*: 在一定条件下还可能改善硬磁相的取向

各向异性

$(BH)_{\max} = 45 - 55 \text{ MGOe}$

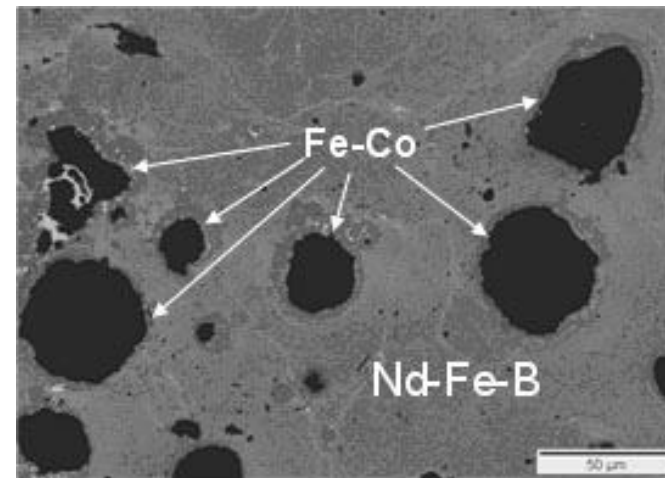
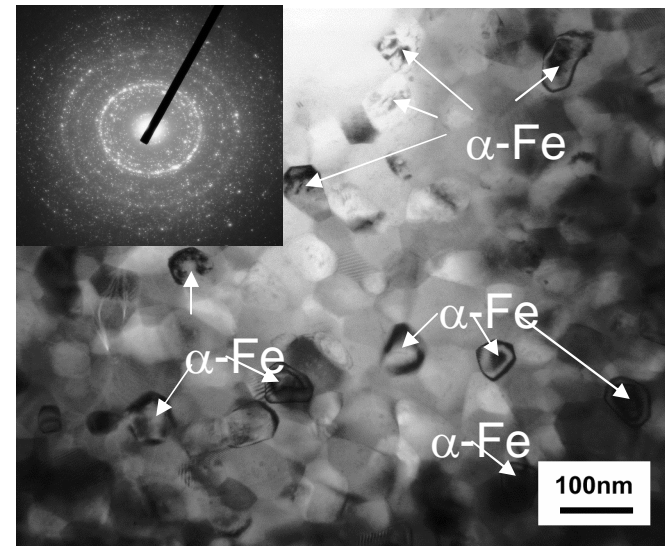
新型纳米晶粒复合磁体

■ 旧的纳米复合磁体

- ❑ 晶粒: 纳米级
- ❑ 软磁相: 纳米级
- ❑ 交换耦合: 在纳米软磁相与硬磁相之间

■ 新的纳米晶粒复合磁体

- ❑ 晶粒: 纳米级
- ❑ 相: 微米级
- ❑ 交换耦合: 在微米软磁相与微米硬磁相之间
- ❑ 软磁相的尺寸可达40微米. 是理论上限值的1000倍以上
- ❑ 富钕相和 α -Fe或Fe-Co相在同一磁体中共存



目前新的技术困难

- 软磁相的**尺寸**太大
 - 软磁材料的粉末粒度太大
 - 粉末颗粒结团
- 减小软磁材料的粉末粒度会导致**氧含量**的增加
- 减小软磁材料的粉末粒度会加强粉末颗粒结团的倾向

复合磁体的理想的显微组织

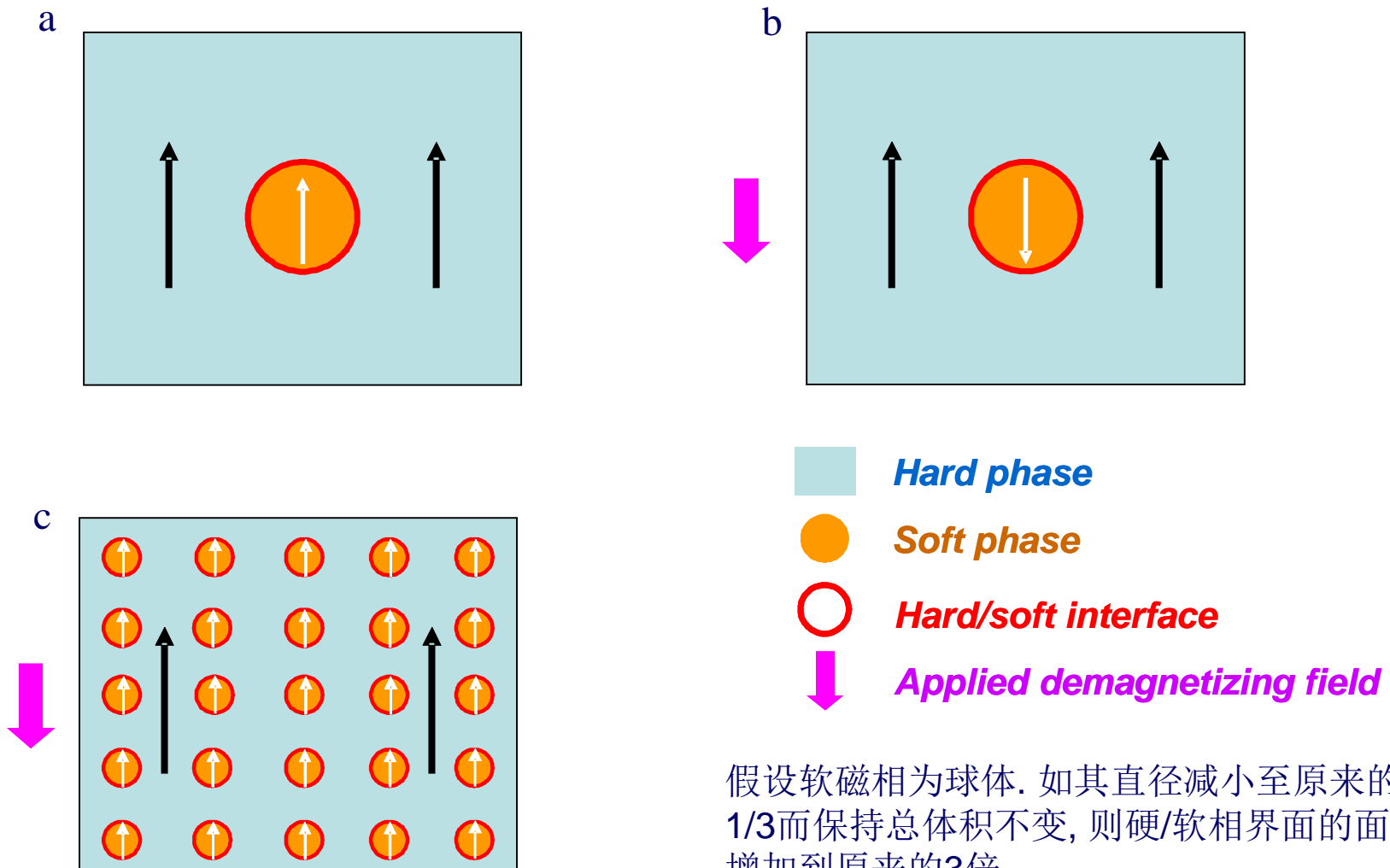
■ 软磁相

- 微小的尺寸 (最好为纳米级)
- 高度分散而均匀地分布在硬磁相之中

■ 硬磁相

- 微小的纳米晶粒
- 高度取向

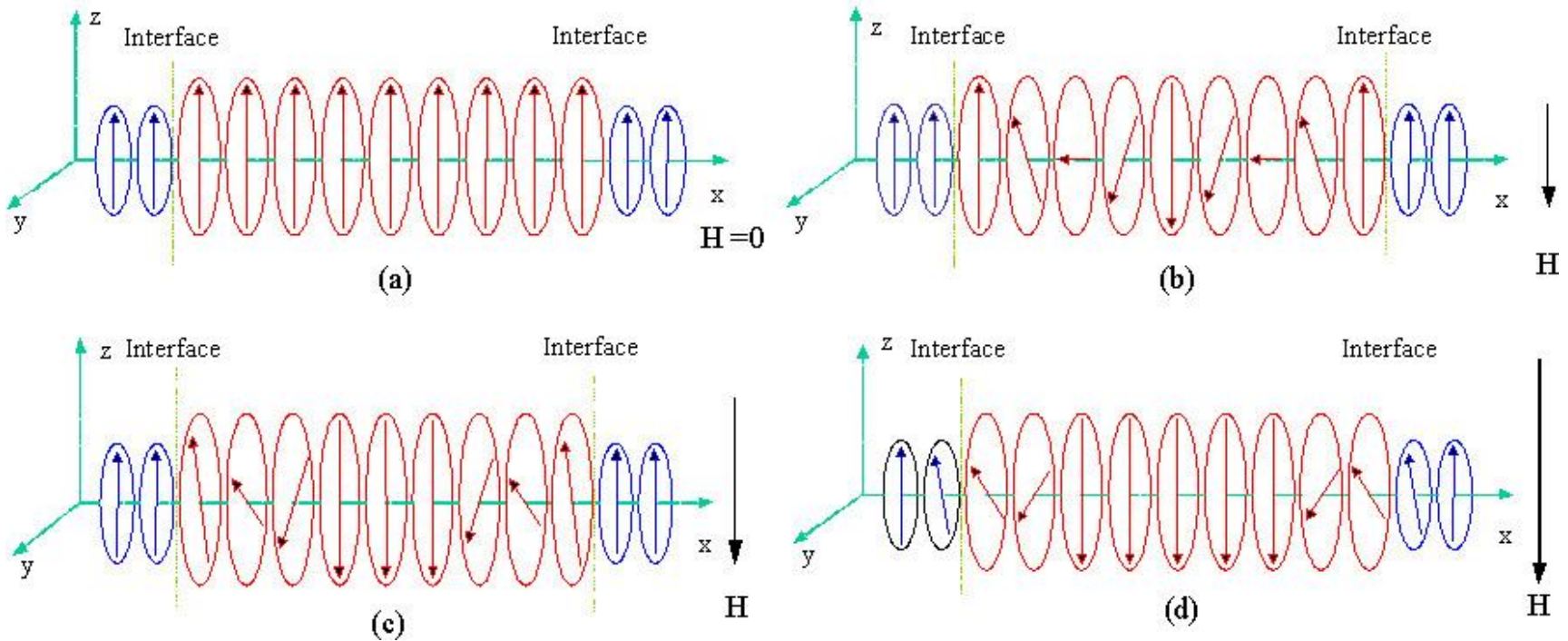
软磁相尺寸的效果



假设软磁相为球体. 如其直径减小至原来的1/3而保持总体积不变, 则硬/软相界面的面积增加到原来的3倍.

反磁化的非一致转动模型

→ Magnetization in soft phase
→ Magnetization in hard phase



复合磁体的磁化强度及矫顽力

- $(4 \pi M_s)_{comp} = (4 \pi M_s)_{hard} (1 - v_{soft}) + (4 \pi M_s)_{soft} v_{soft}$

- v_{soft} : 软磁相的体积百分数

- $(H_c)_{hard} = \alpha (H_A)_{hard} - N_{eff} (4\pi M_s)_{hard}$

- $\alpha < 1$, 与晶格, 晶粒及晶界缺陷有关的常数

- N_{eff} : 有效退磁因子

- $(H_A)_{hard}$ = 硬磁相的磁晶各向异性场

- $(H_c)_{comp} = k (1 - 1/\rho) (H_c)_{hard}$

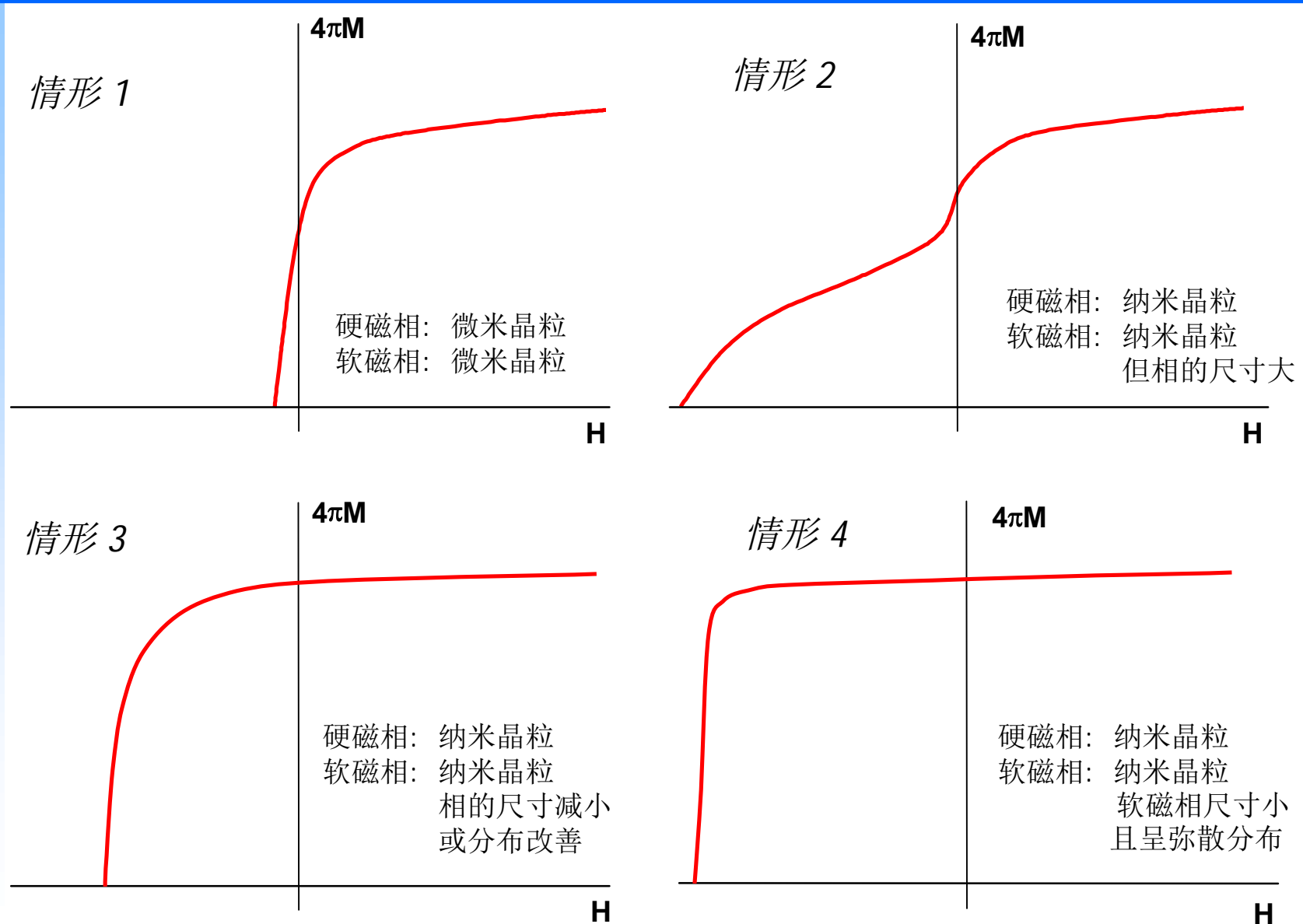
- k : 与 v_{soft} 有关的常数

- $\rho = (S/V)_{soft}$ - 分散常数

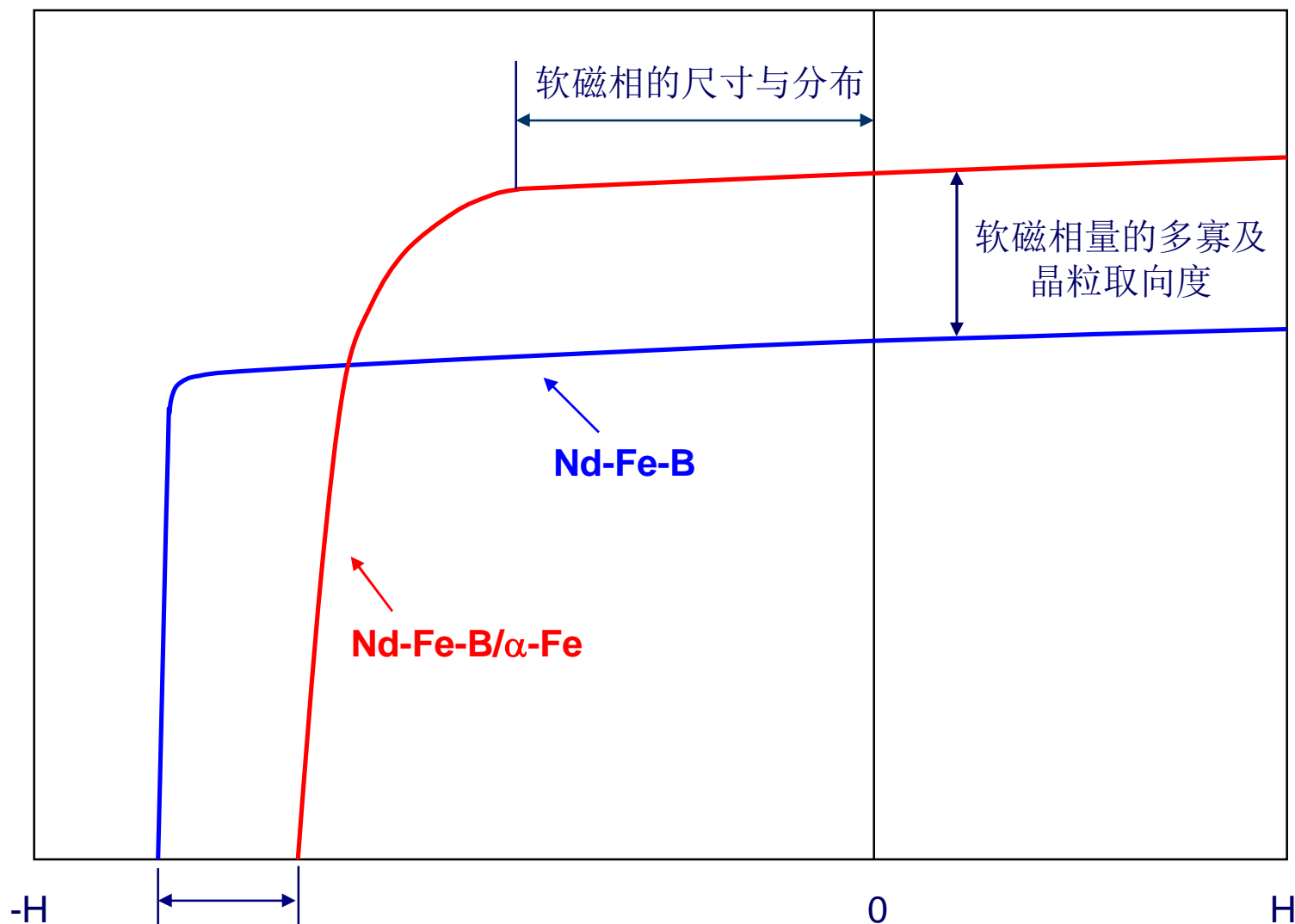
- S : 软磁相的总表面积

- V : 软磁相的总体积

复合磁体的退磁曲线与晶粒度及相的关系

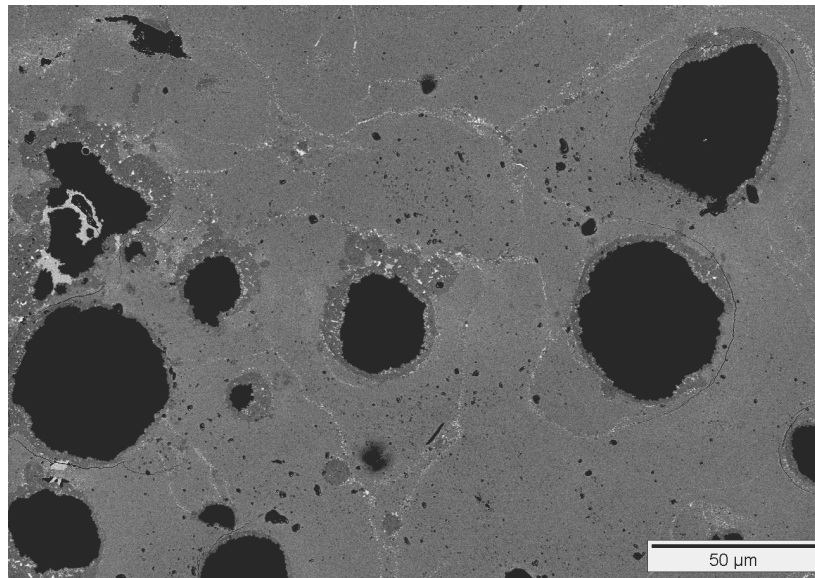


复合磁体与传统磁体退磁曲线之比较

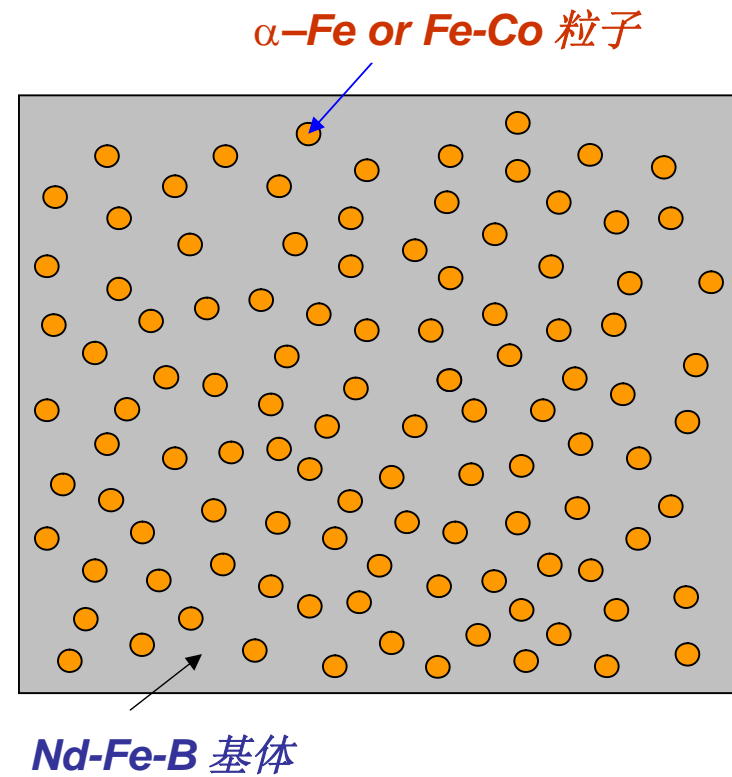


1. 软磁相的尺寸与分布
2. 软磁相量的多寡

目前的显微组织及理想的显微组织



目前的显微组织



理想的显微组织

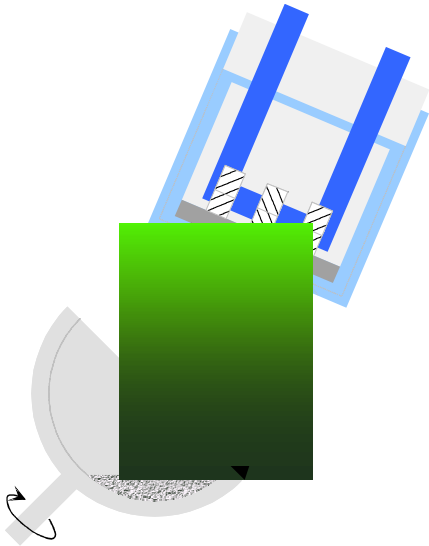
获得较好显微组织的途径

- 采用粉末混和法
 - 减小软磁粉末的尺寸
 - 降低软磁粉末的氧含量
 - 避免软磁粉末的结团
- 在硬磁粉末表面镀软磁薄膜

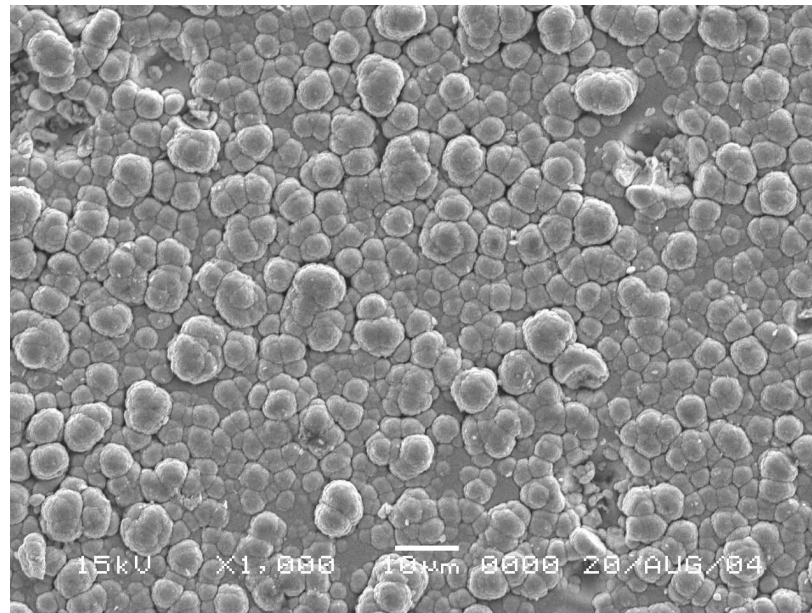
粉末镀膜技术

- 直流或交流溅射
- 脉冲激光喷镀 (PLD)
- 化学镀
- 电镀

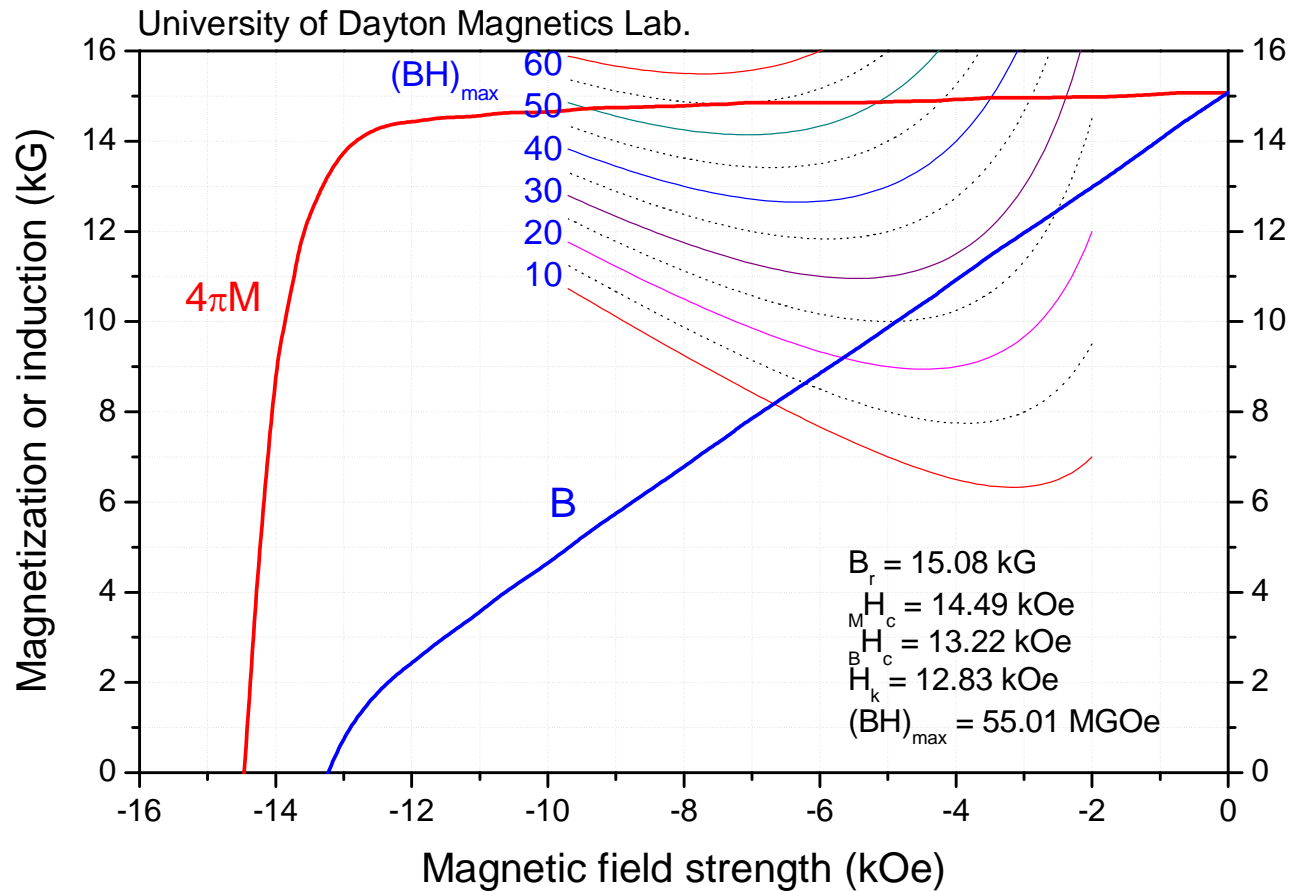
溅射



- 靶: α -Fe, Fe-Co-V
- 气氛: 氩气
- 溅射时间: 15分钟至21小时

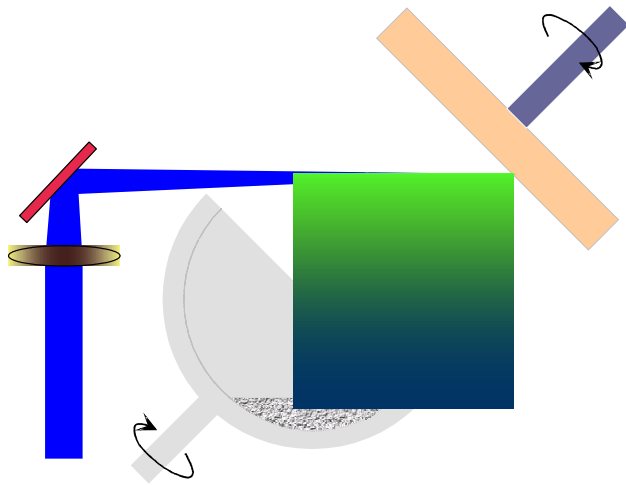


采用溅射法镀膜制备的复合磁体的退磁曲线



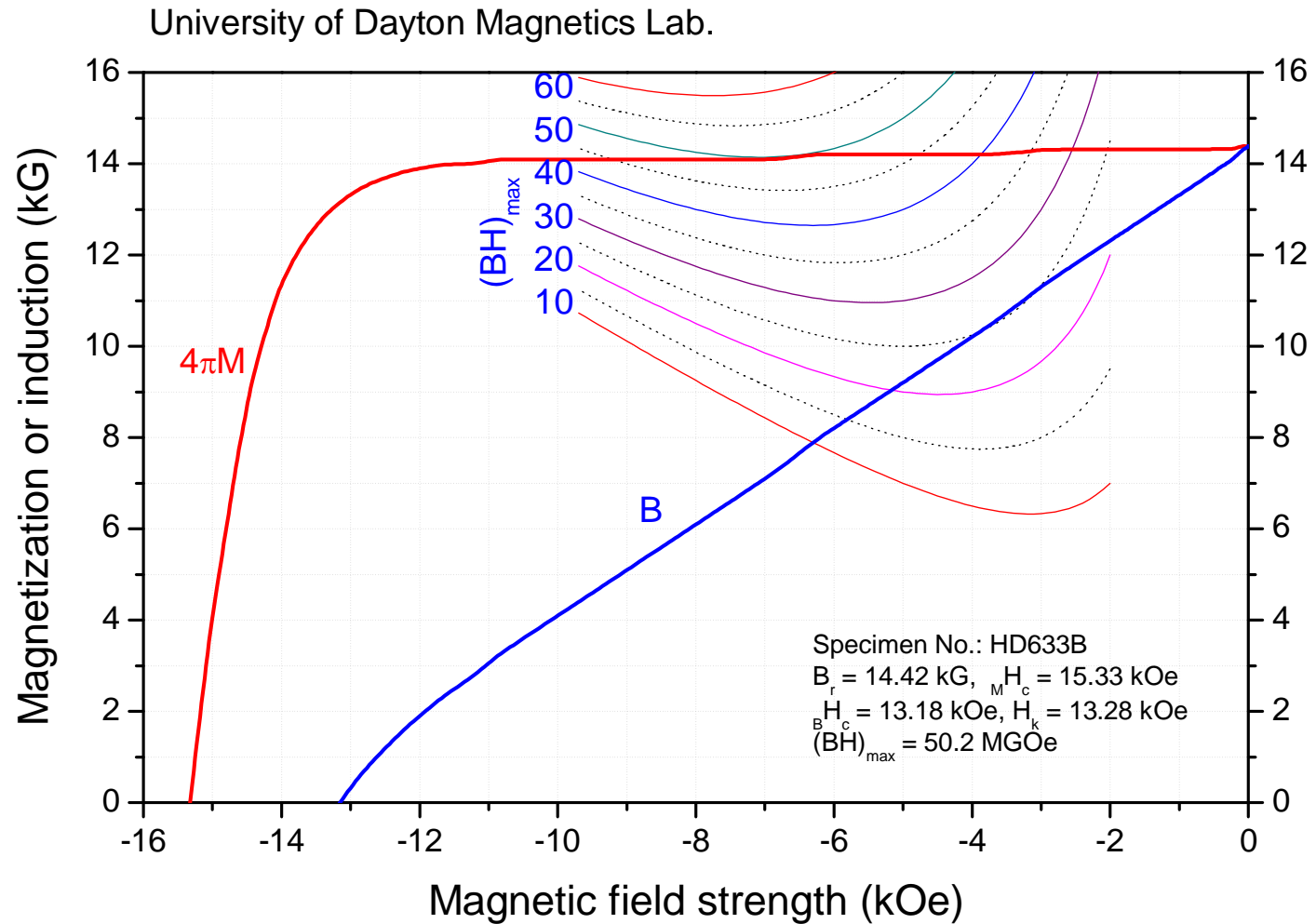
$\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{79.5}\text{Ga}_{0.5}\text{B}_6/\alpha\text{-Fe}$, DC sputtering for 20 hours,
hot compacting at 630°C for 2 minutes,
and die upsetting at 930°C for 4 minutes

脉冲激光喷镀 (PLD)



- 靶: α -Fe, Fe-Co-V
- 激光: $Nd:Y_3Al_5O_{12}$ ($\lambda = 1064$ nm), 340 mJ/pulse and 10 Hz
- 气氛: 高真空
- 时间: 15分钟至21 hours

采用PLD法镀膜制备的复合磁体的退磁曲线



化学镀

■ 化学镀条件

- 溶液: $FeCl_2$, $CoCl_2$, or $FeSO_4$, $CoSO_4$
- 还原剂: NaH_2PO_2
- 复合剂: $Na_3C_6H_5O_7$
- pH 值: 5 – 8
- 温度: 20 – 50° C
- 时间: 15 m – 3 hours

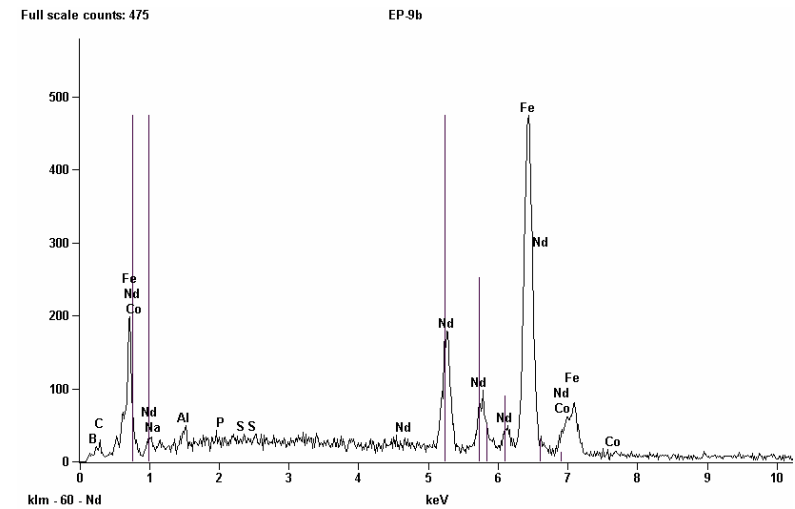
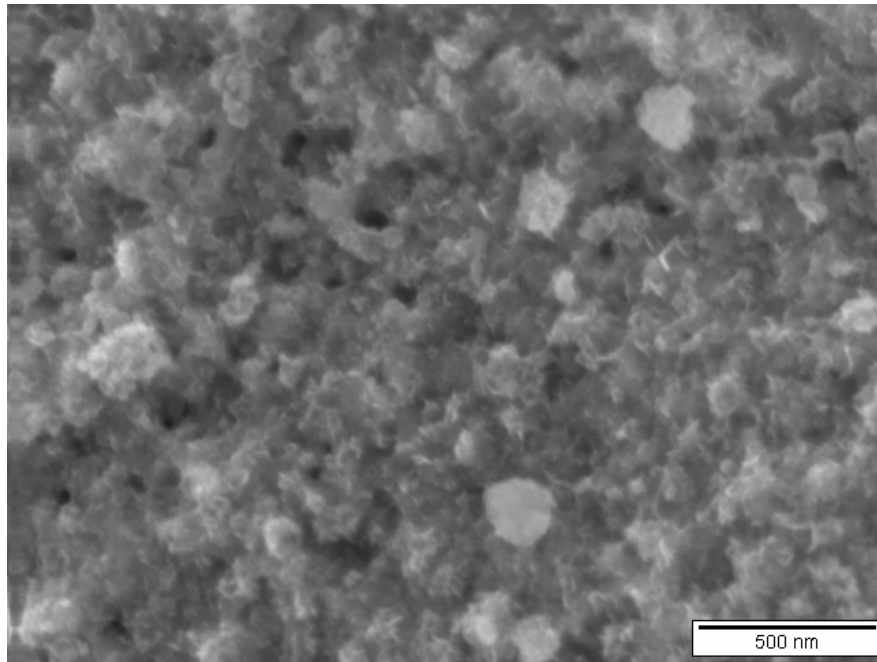
■ 化学镀的优点

- 可控参数多
- 花费时间短
- 氧含量低
- 价格低廉, 适于生产

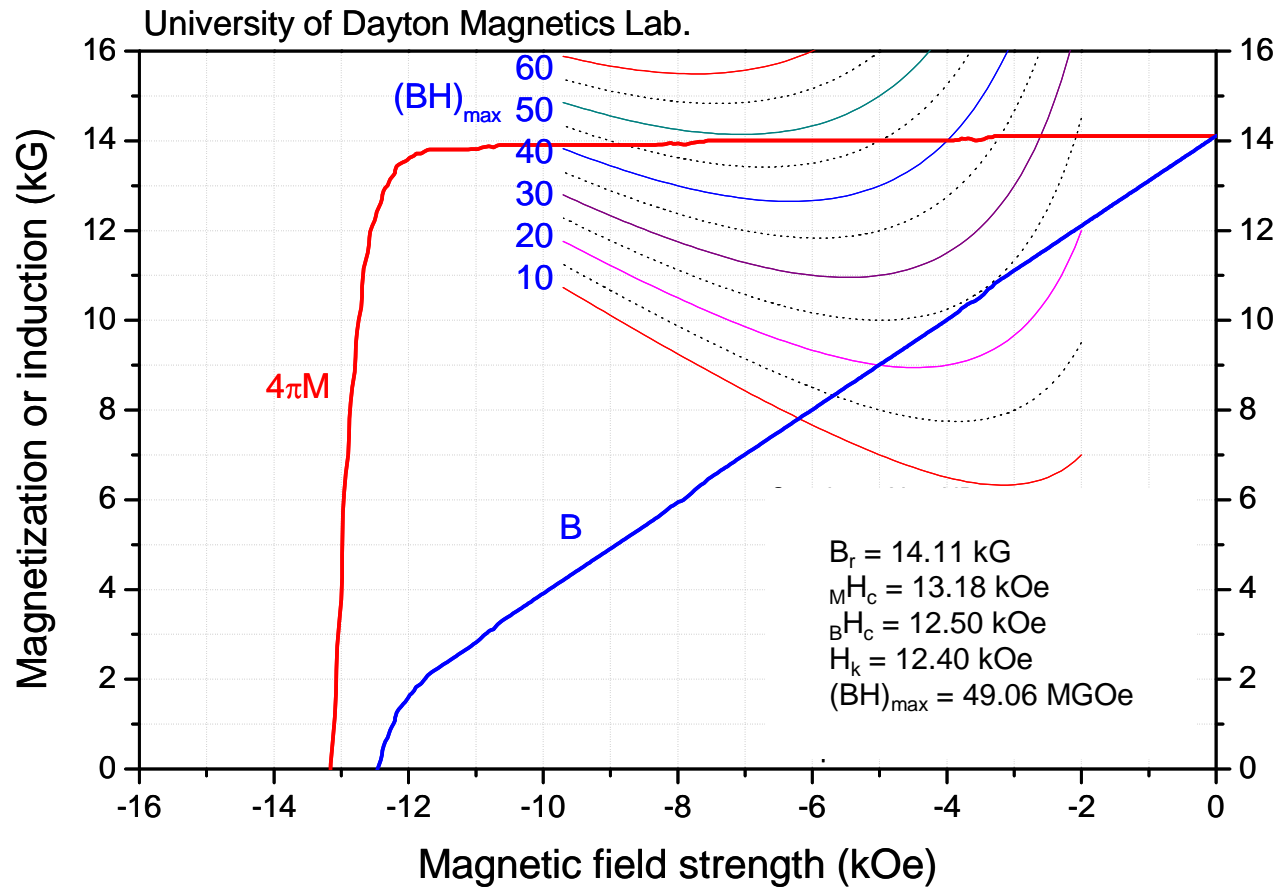
■ 化学镀的缺点

- 化学位差小
- 只有少数粉末颗粒(1/4 – 1/3)有镀层

化学镀膜的粉末颗粒表面

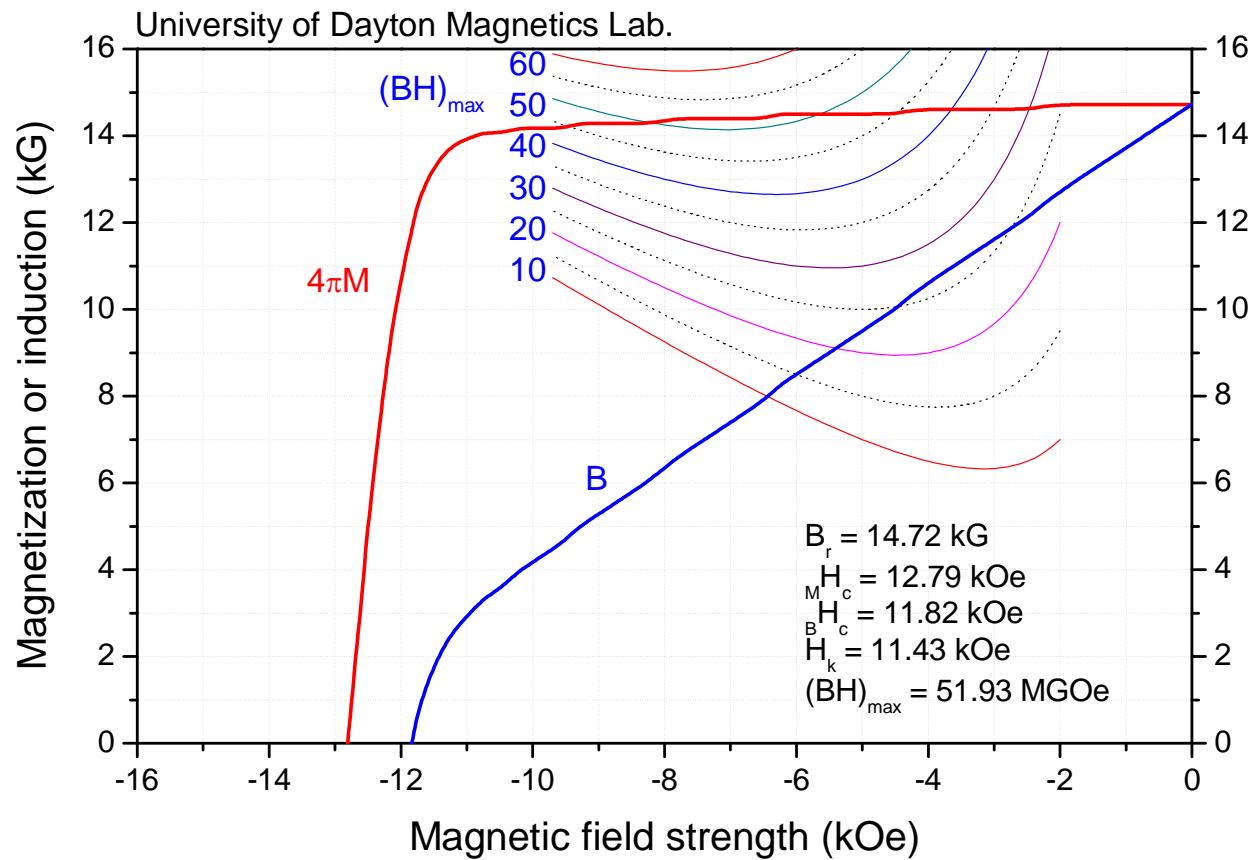


采用化学镀膜制备的复合磁体的退磁曲线



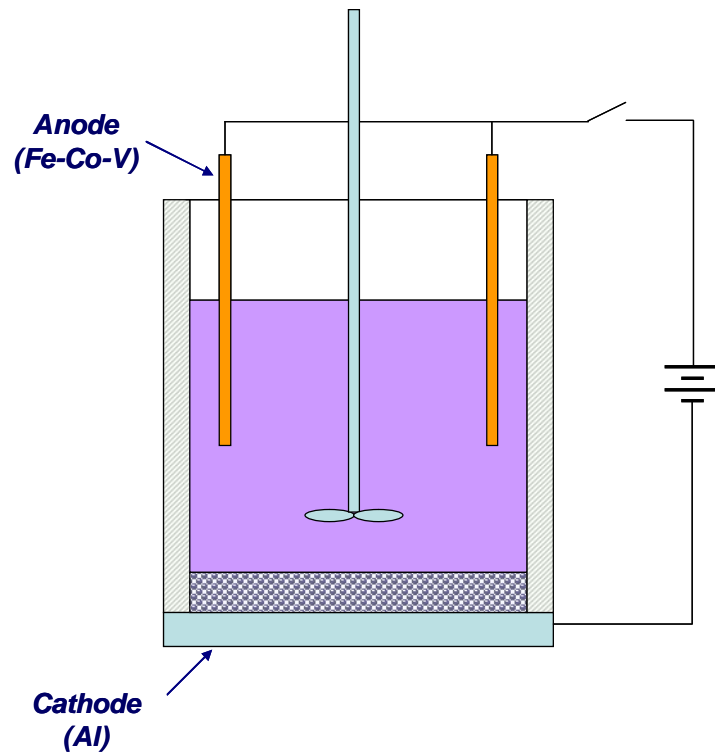
$\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{79.5}\text{Ga}_{0.5}\text{B}_6/\text{Fe-Co}$ magnet
prepared using chemical coating for 1 hour

采用化学镀膜制备的复合磁体的退磁曲线



$\text{Nd}_{14}\text{Fe}_{79.5}\text{Ga}_{0.5}\text{B}_6/\text{Fe-Co}$ magnet
prepared using chemical coating for 1 hour

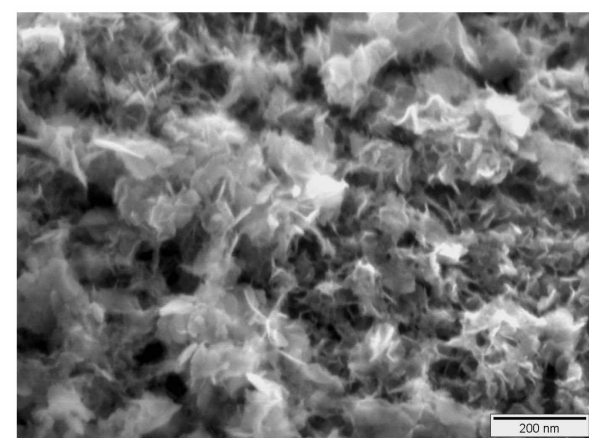
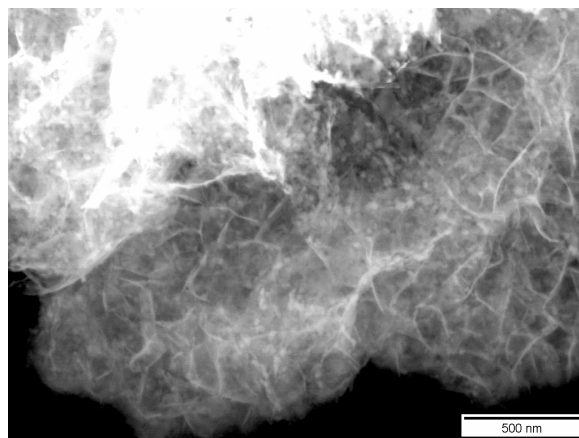
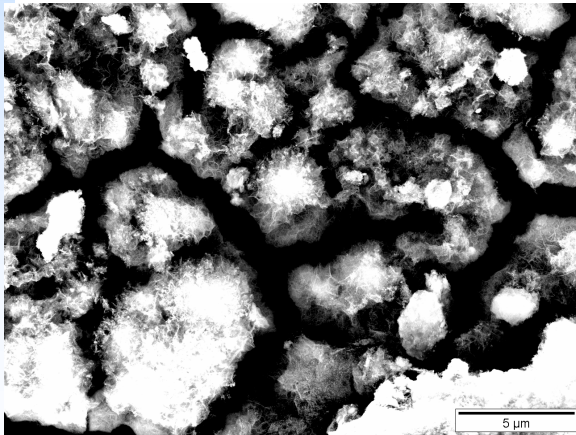
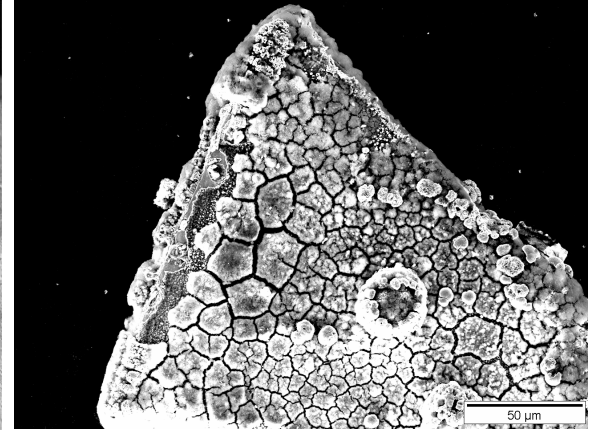
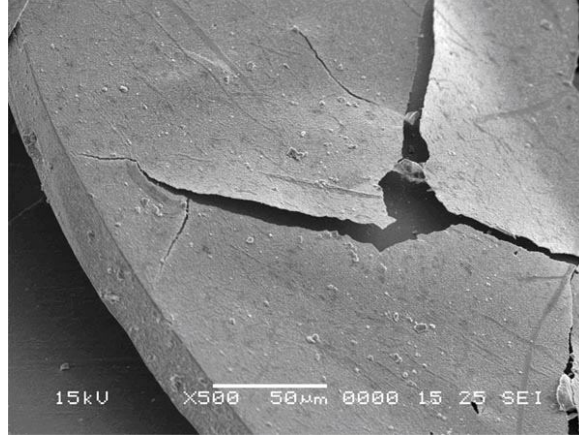
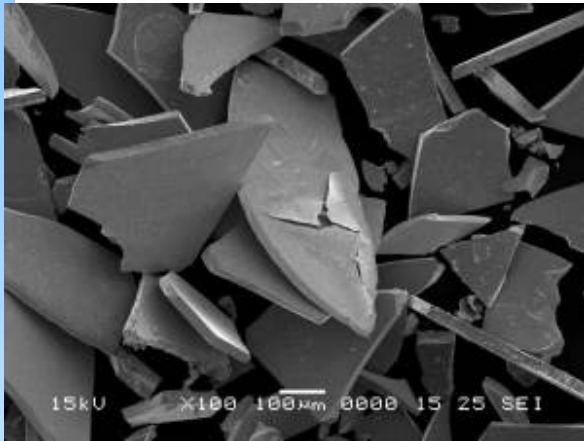
电 镀



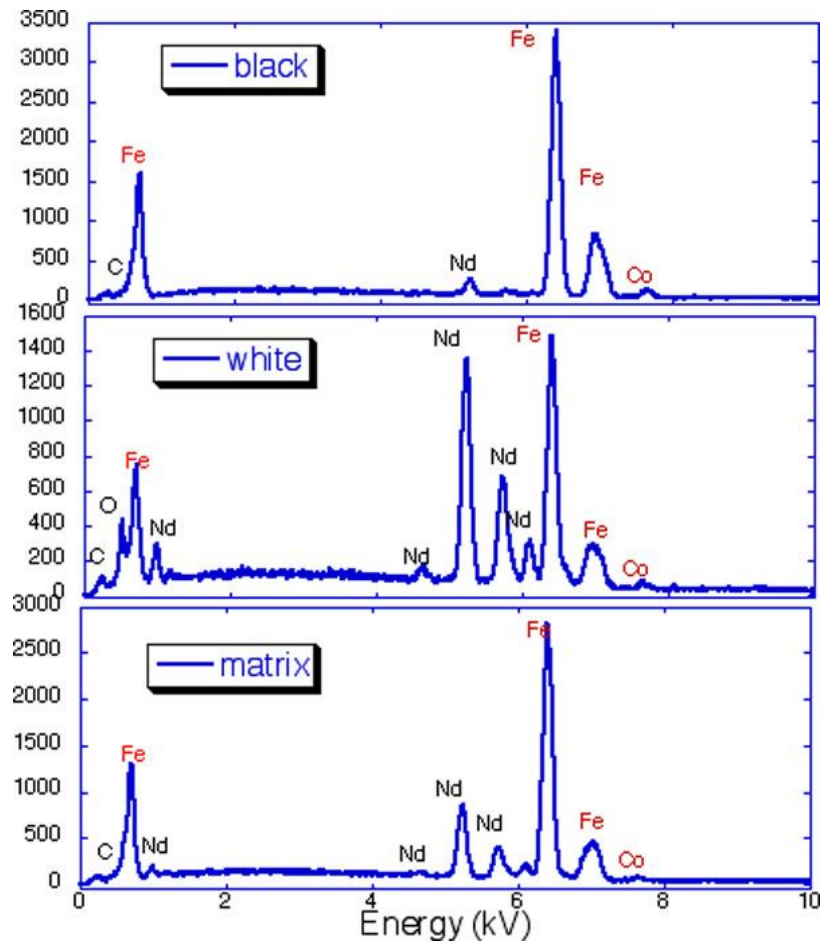
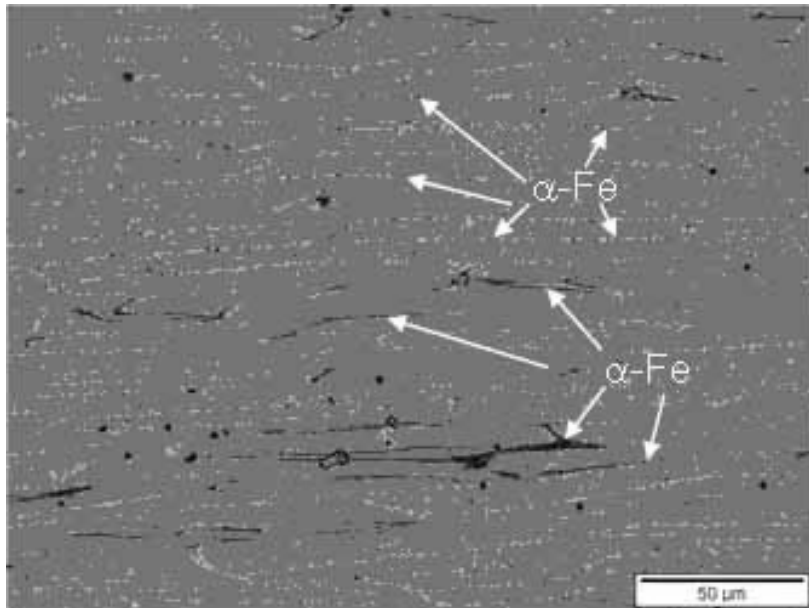
- 溶液: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.3 mol / l)
- 添加剂: $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0.3 mol / l)
- pH 值: 2 – 3
- 电镀时间: 15 分钟至2小时
- 阳极: $\alpha\text{-Fe}$ 或 Fe-Co
- 阴极: Al
- 阴极电流密度: 0.5 to 5 A/dm^2

- 三阶段电镀过程
 - 电镀
 - 搅拌
 - 沉淀

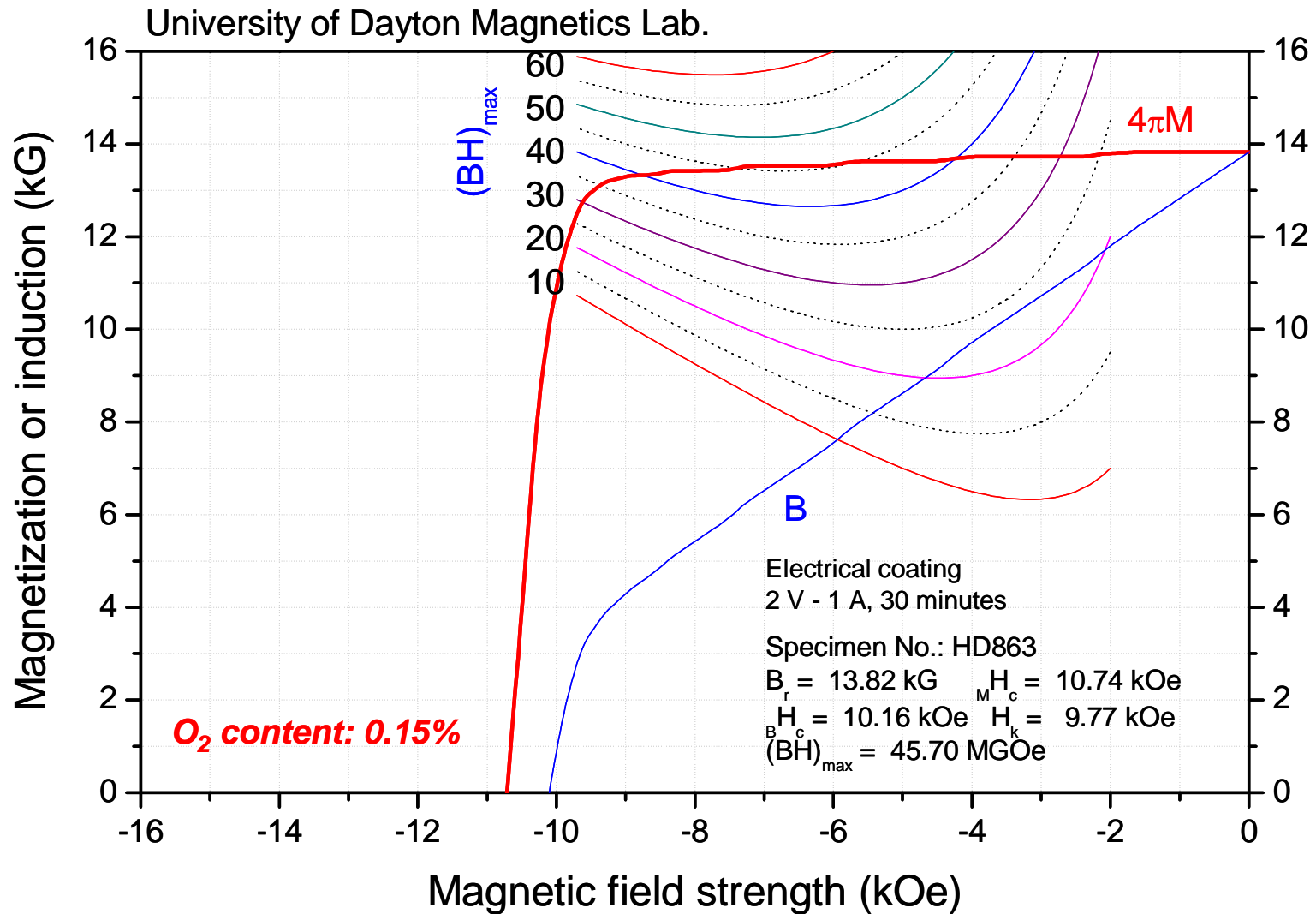
镀层表面状况



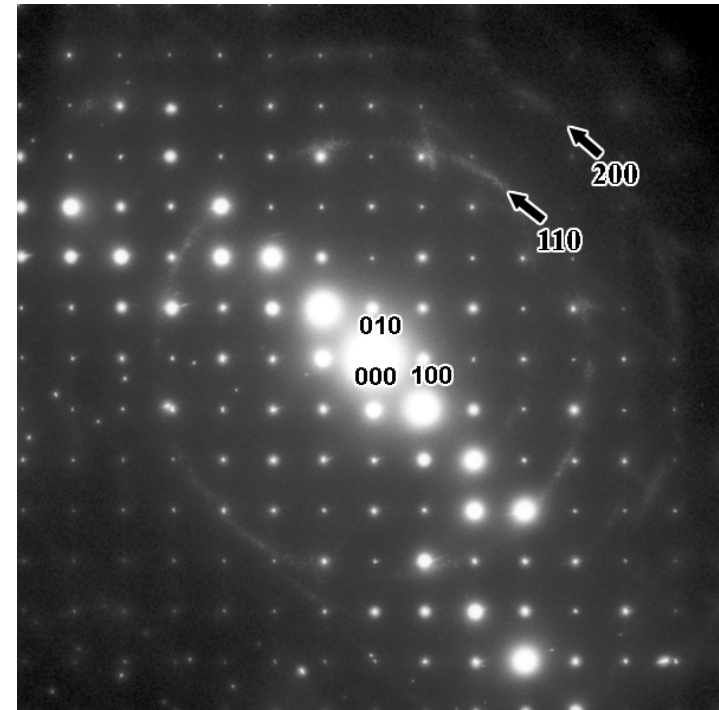
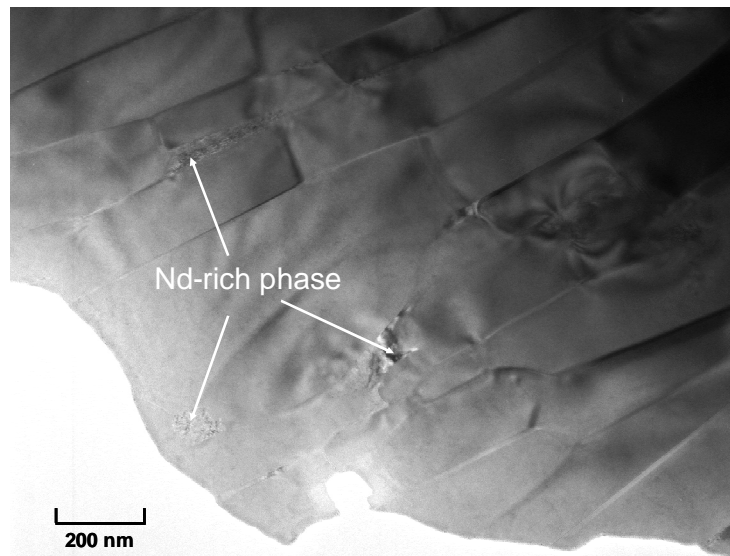
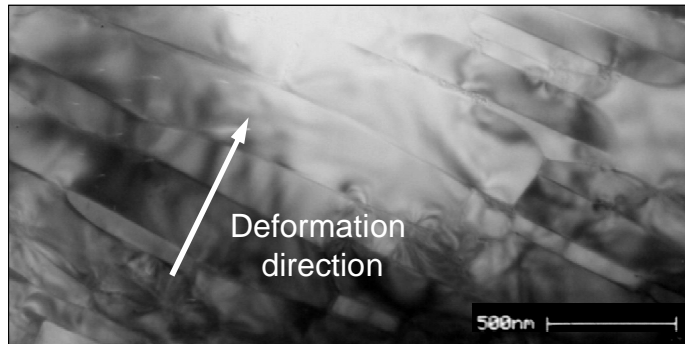
SEM显微组织及EDS分析结果



采用电镀镀膜制备的复合磁体的退磁曲线

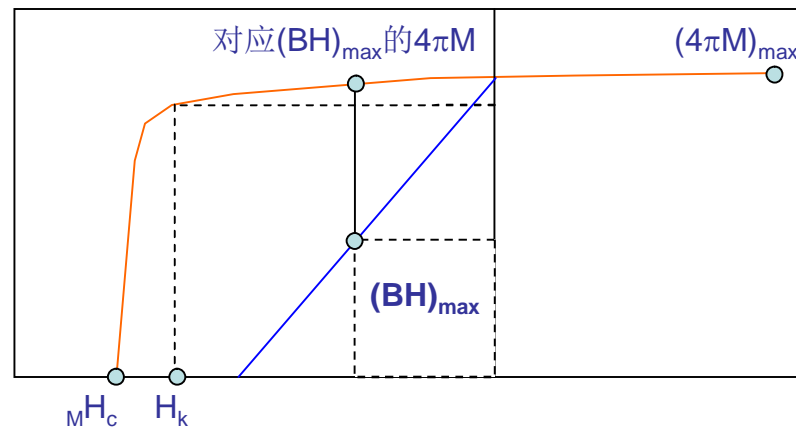


TEM 显微组织及结构



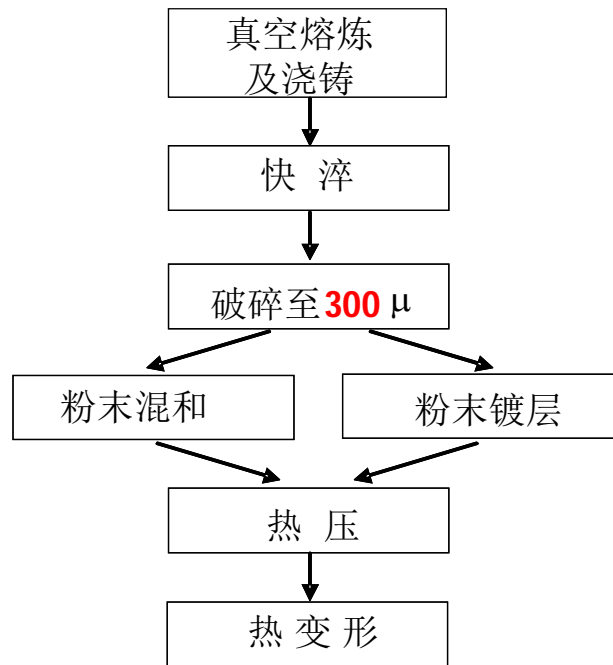
不同磁体退磁曲线方形度之比较

材 料	$H_k / M H_c$ (%)	$(BH)_{\max}$ 点的 $4\pi M$ $/(4\pi M)_{\max}$ (%)	注
商业成分热变形Nd-Fe-B (不含软磁相)	96.0	85.4	10个样品的 平均值
采用混和 α -Fe粉末法制备的纳米晶粒 Nd-Fe-B/ α -Fe磁体	93.7	78.8	10个样品的 平均值
采用溅射法制备的纳米晶粒 Nd-Fe-B/ α -Fe磁体	96.7	88.5	10个样品的 平均值
采用化学镀法制备的纳米晶粒 Nd-Fe-B/ α -Fe磁体	97.7	89.1	10个样品的 平均值

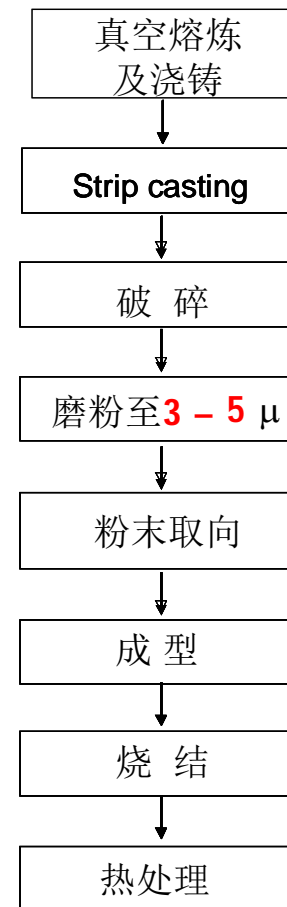


工艺过程的比较

纳米晶粒复合磁体



传统烧结Nd-Fe-B磁体



纳米复合磁体的优势

- 高性能的潜力
- 较低的价格
 - 低稀土含量
 - 较简易的工艺
- 较好的抗腐蚀性
 - 低稀土含量
 - 特别是采用镀层技术时
- 较高的断裂韧性
 - 软磁相的强度较低
 - 细小的晶粒组织

纳米复合磁体的可能缺点

- 热压热变形工艺的可能限制
- 热变形磁体机械性能的各向异性

未来研究方向

- 发展新的粉末混合方法
 - 使用更微细的纳米 α -Fe或Fe-Co粉末
 - 有效地避免细粉氧化
 - 避免细粉结团
 - 细粉在硬磁基体中弥散而均匀地分布
- 发展新的粉末镀层方法
 - 提高涂镀效率
 - 增加镀层厚度
 - 减低氧含量
 - 减小Nd-Fe-B粉末的颗粒度