

# 制作实用纳米复合磁体的技术困难 和可能的应对措施

2014年9月，中国绵阳

# 制作实用纳米复合磁体的技术难点

- 制作全密度的块状磁体（而非微小颗粒或者薄膜、薄片）
- 制作各向异性的取向磁体
- 制作具有足够高矫顽力的磁体
  - B 退磁曲线为直线
  - 适于动态应用（发电机、电动机等）

# 现行的成型技术

- 冲击成型
- 爆炸成型
- 动态磁场成型
- 放电等离子烧结  
(spark plasma sintering)
- 温压

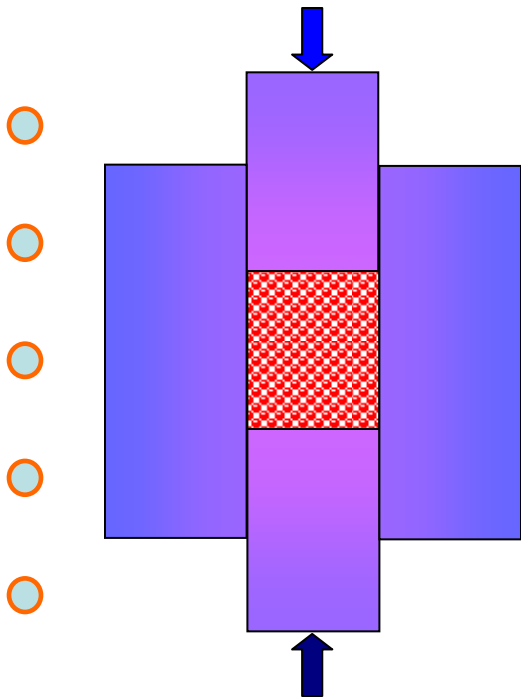
## 问题

- 价格昂贵
- 加热时间长
- 难于获得全密度
- 难于获得取向磁体

# 现行的取向工艺

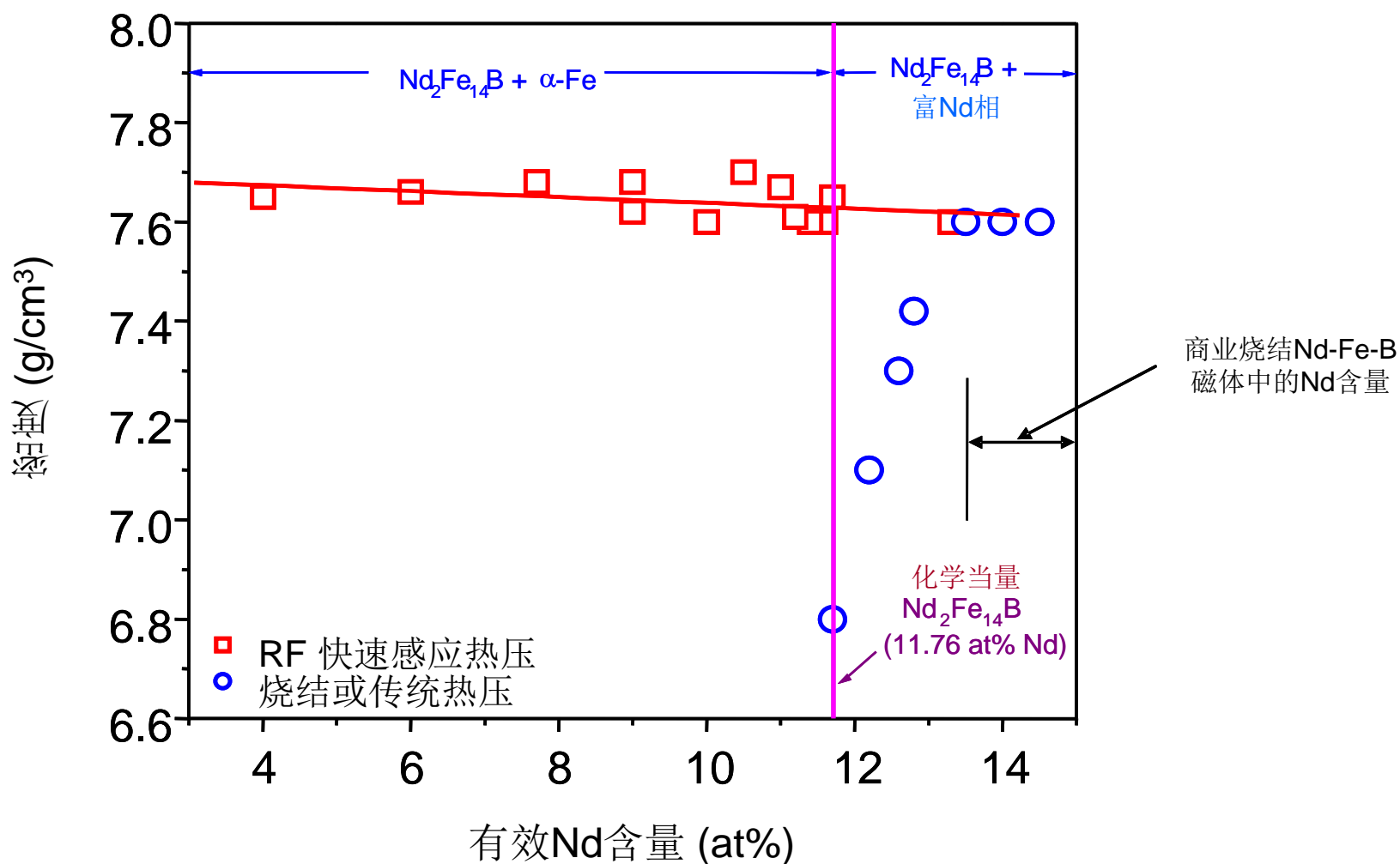
- 表面活性剂辅助球磨
- 热变形
- 温变形

# UD快速感应热压

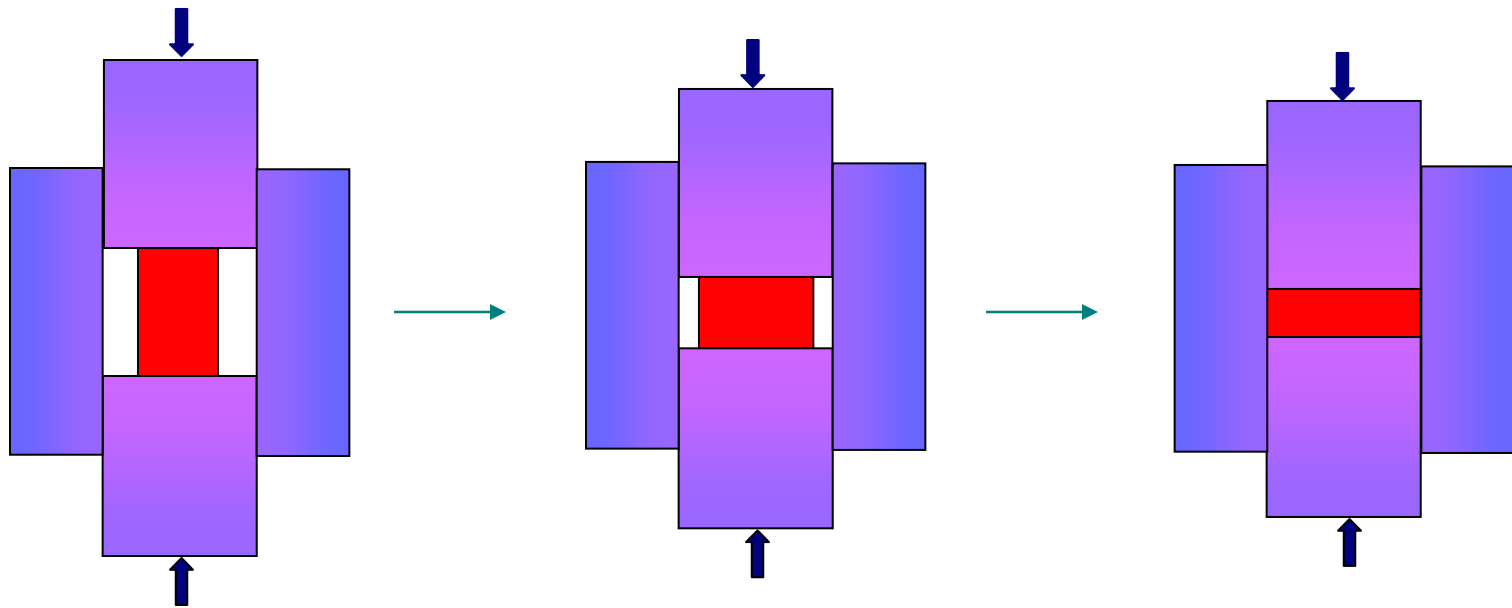


- 较低的热压温度：600 – 700℃
- 极短的热压时间：~2 分钟，包括：
  - 从 ~20℃ 加热到热压温度 (600–700℃)
  - 进行热压
  - 冷却到 ~300℃
- 较小的压力：~108 Pa
- 热压之后可以获得接近全密度
- 热压时间短，防止晶粒长大
- 价格低廉
- 物理过程
  - 从粉末状体到接近全密度
  - 非晶态材料的结晶过程，形成纳米晶粒

# 使用烧结及传统压制及快速感应热压 所获得密度的比较



# UD热变形



## 热变形工艺参数

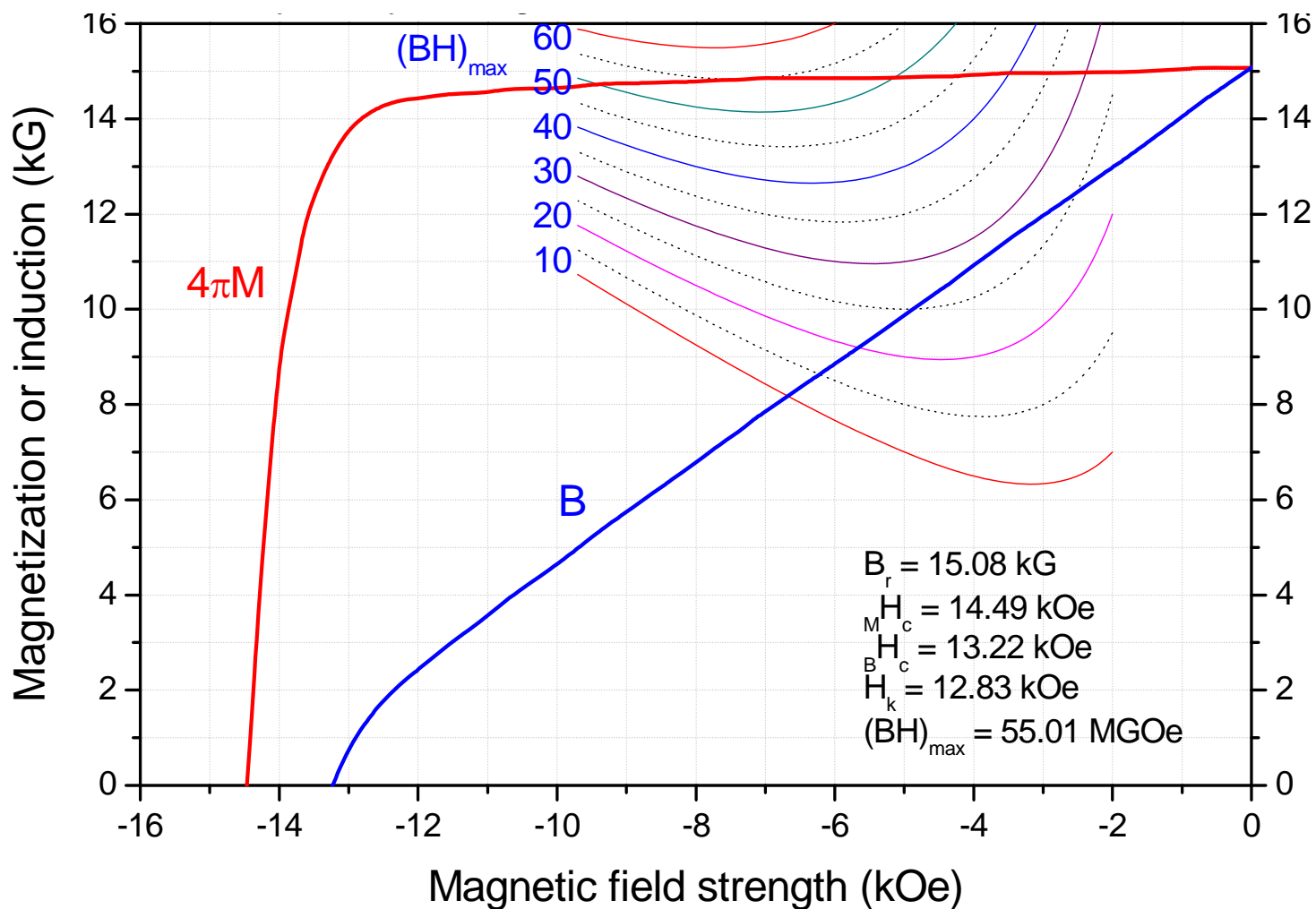
- 温度：800 – 950 °C
- 压力：6.9 x 10<sup>7</sup> Pa
- 持续时间：4 – 8 分钟
- 高度缩减率：70%

## 热变形复合磁体的透射电镜组织（硬磁相）





# 快速感应热压/热变形纳米复合磁体的性能

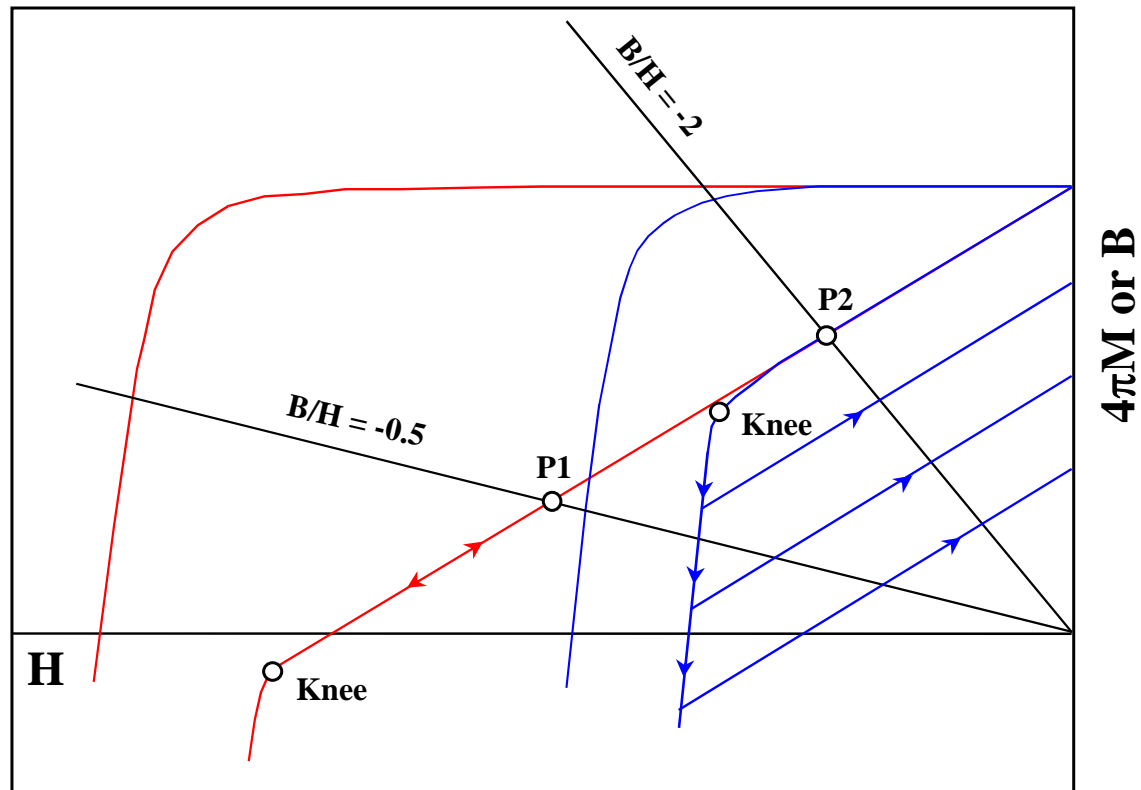


# 结 论

采用**RF**感应快速热压/热变形技术成功地解决了制作纳米复合磁体中的前两个技术难题

- 制作全密度的块状磁体（而非微小颗粒或者薄膜、薄片）
- 制作各向异性的取向磁体

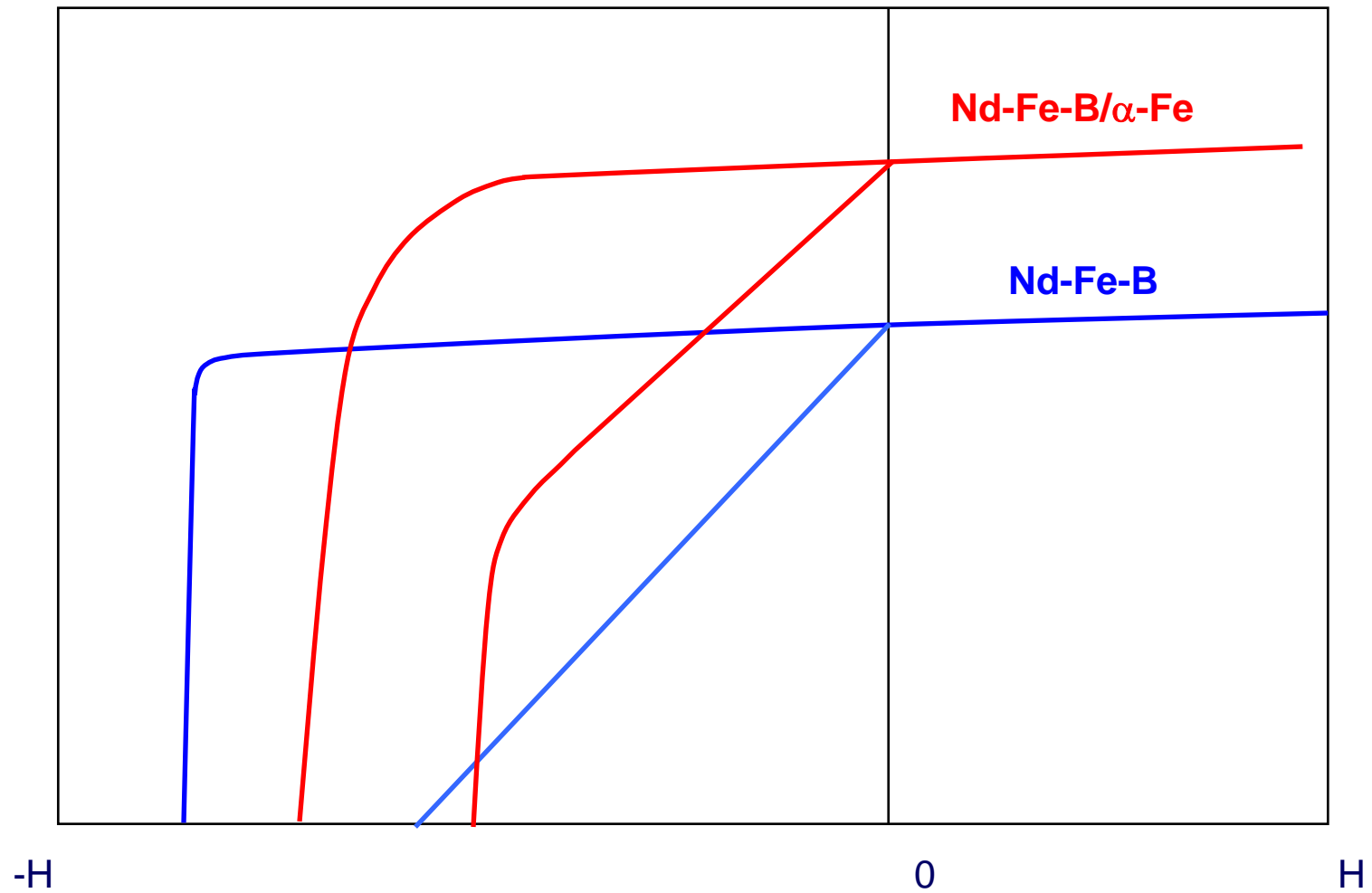
# 线性 B 曲线的重要性



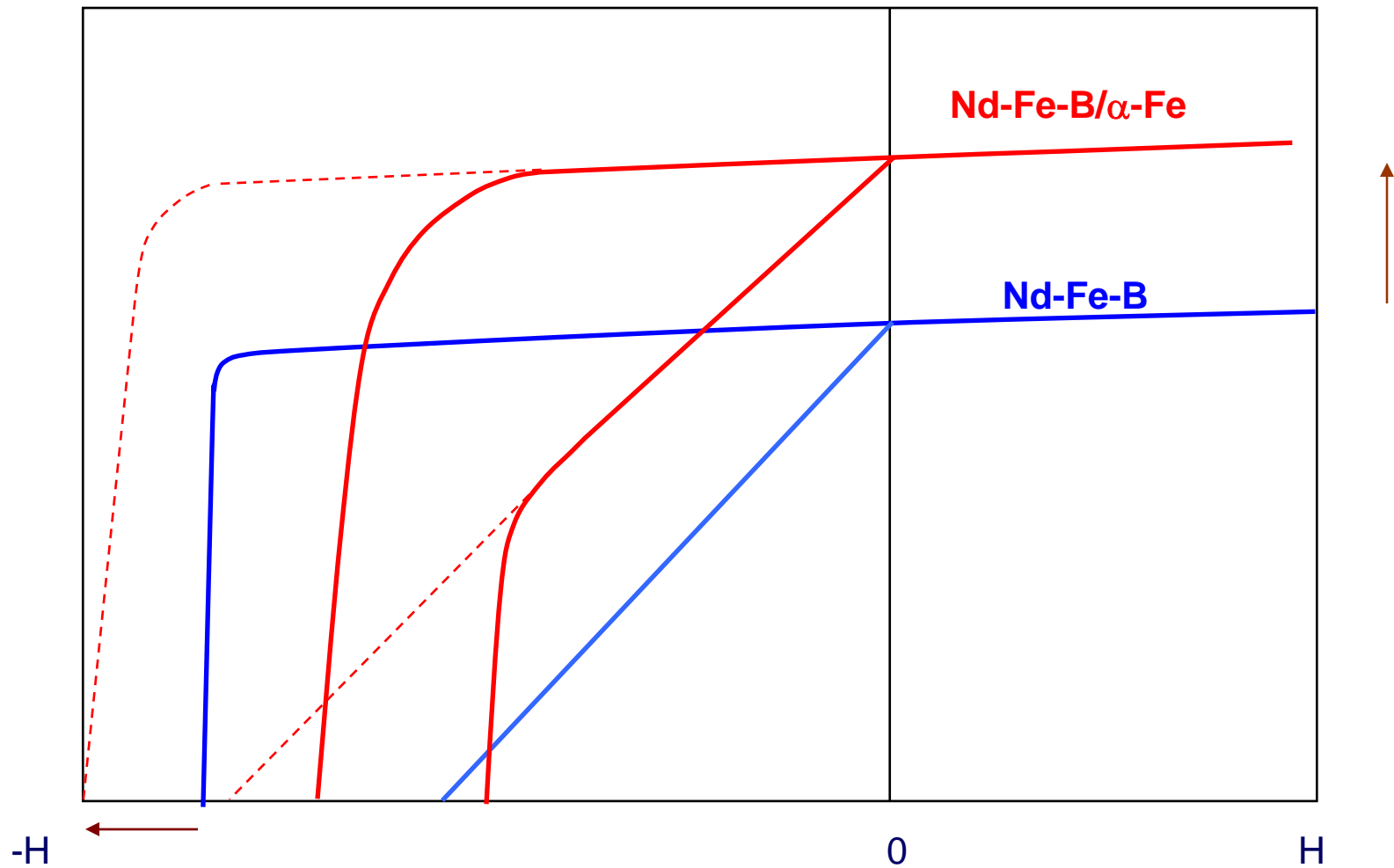
# 线性磁感退磁曲线(B曲线)的重要性

- 在动态应用中, 位于第二相限B曲线上的操作点不是固定不变的
- 如果B曲线不是直线, 而是具有一个“膝点”的话, 操作点越过“膝点”以后, 当退磁场减低到零, 磁性并不能恢复到原来的水平
- **B曲线不是直线的磁体在动态应用中, 其磁性能会有大幅度的降低**
- 为保持B曲线的线性, 要求磁体具有尽可能高的 $MH_C$ 和好的退磁曲线方形度

# 烧结微米晶粒Nd-Fe-B和纳米复合Nd-Fe-B/ $\alpha$ -Fe



## 和纳米复合Nd-Fe-B/ $\alpha$ -Fe的技术难点之三



# 复合磁体性能（矫顽力）的矛盾

- 事实：在复合Nd-Fe-B/a-Fe磁体中难于获得高于Nd-Fe-B的矫顽力
- 期待：复合Nd-Fe-B/a-Fe磁体的矫顽力需高于Nd-Fe-B的矫顽力，以确保其  $B$  退磁曲线的线性，才能适用于动态条件下的应用
- 难点：同时增加磁化强度和矫顽力
- 可能的结论：即使通过艰苦的努力，全密度、取向纳米复合磁体的磁性有了大幅度的提高，实现了 $(BH)_{\max} > 60 \text{ MGOe}$ ，这种磁体挑战现有商用Nd-Fe-B磁体的可能性也不大。而且，磁化强度增加得越高，困难也越大