

Sm₂Co₁₇ 永磁材料力学各向异性机理分析

刘兴民¹, 郭永权², 李岫梅², 闫阿儒¹, 梁永新³, 荆计生³, 马跃华³, 李卫²

(1. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 浙江宁波 315201;

2. 钢铁研究总院 功能材料研究所, 北京 100081;

3. 山西京宇磁性材料有限公司, 山西阳泉 045201)

摘要: 烧结 Sm₂Co₁₇ 型永磁材料以其优良的磁性能、良好的耐腐蚀性和温度稳定性得到广泛应用。但其脆性较大, 不仅给机械加工带来困难, 也限制了材料在一些领域的应用。从 Sm₂Co₁₇ 永磁材料微观晶体结构入手, 分析了 Sm₂Co₁₇ 永磁材料力学特性各向异性的机理。研究表明, Fe、Cu 和 Zr 等掺杂元素、界面效应以及主相晶体结构导致了 Sm₂Co₁₇ 永磁材料力学性能的各向异性, 其中主相晶体结构的特性对力学性能各向异性起关键作用。研究结果为改善 2:17 型钐钴永磁材料的力学特性提供了理论指导。

关键词: Sm₂Co₁₇ 永磁材料; 力学各向异性; 晶体结构

中图分类号: TM274

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2009)06-0022-02

Mechanism Analysis of the Mechanical Anisotropy in Sm₂Co₁₇ Permanent Magnet Materials

LIU Xing-min¹, GUO Yong-quan², LI Xiu-mei², YAN A-ru¹, LIANG Yong-xin³,
JING Ji-sheng³, MAYue-hua³, LI Wei¹

1. Ningbo Institute of Material Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

2. Central Iron & Steel Research Institute Functional Materials Research Institute, Beijing 100081, China;

3. Shanxi Jingyu Magnetic Material Co., Ltd, Yangquan 045201, China

Abstract: Sm₂Co₁₇ type sintered permanent magnet material has been widely used for its excellent magnetic properties, good corrosion resistance and temperature stability. But its fragility, not only brings difficulty to its machining, but also limits the applications in some areas. The mechanism of mechanical anisotropy in Sm₂Co₁₇ permanent magnetic materials was analysed from its crystal structure. It shows that Fe, Cu and Zr doping elements, interface effect, and especially the crystal structure of main phase give rise to the anisotropy of mechanical properties. These research findings provide a theoretical guidance to the improvement of the mechanical properties of 2:17-type SmCo permanent magnet.

Key words: Sm₂Co₁₇ permanent magnets; mechanical anisotropy; crystal structure

1 引言

烧结 Sm₂Co₁₇ 型永磁材料因其优良的磁性能、良好的耐腐蚀性和温度稳定性在许多领域得到广泛应用^[1]。但同许多金属间化合物一样, Sm₂Co₁₇

型永磁的室温脆性很大, 这给其机械加工带来困难, 对永磁器件的稳定性造成不利影响, 因而限制了材料在精密仪表和抗冲击、抗振动要求严格的场合的应用^[2,3]。

长期以来, 人们对钐钴永磁的研究主要集中在如何提高其磁性能上, 对材料力学特性的研究很少, 少数研究者对 Sm₂Co₁₇ 磁体的力学特性进行了初步的研究, 如李安华等^[4]对 Sm₂Co₁₇ 抗弯强度的

收稿日期: 2009-05-08 修回日期: 2009-07-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB934601)

作者通信: E-mail: xingminliu@163.com

研究发现, 烧结 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁材料的抗弯强度和断裂行为为具有明显的各向异性。其中试样平行于取向方向的抗弯强度最高, 垂直于取向方向的抗弯强度较低, 烧结 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁材料断裂的微观机制为解理断裂。迄今为止, 对钐钴永磁材料力学特性各向异性机理的系统研究鲜见报道。本文从钐钴的微观组织结构入手对其抗弯强度的各向异性进行分析, 以期改善 2:17 型钐钴永磁材料的力学特性提供一些理论依据。

2 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 永磁材料力学特性各向异性与主相晶体结构的关系

$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 永磁材料主要由 2:17 主相、1:5 胞壁相以及富 Zr 相组成, 由于 2:17 主相占有重要比例, 所以, $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 永磁材料的力学特性主要由主相的晶体结构决定。图 1 为用 diamond 软件依据 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 晶体结构参数得到的 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 2:17 主相的晶体结构 (沿 b 轴的投影图), 由于部分稀土 Sm 原子被 Co-Co 哑铃对替代, 致使其周围的原子数增加, 原子间的距离变小, 结合力相对增强 (见图中所构成的数个菱形部分), 而另一侧由于没有 Co-Co 哑铃对的替代, 原子密集程度低, 原子间的距离相对较大, 在外力作用下, 金属键容易被打断, 表现为晶格沿原子的密集面产生相对滑动, 图 1 也体现了 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 断裂时的剪切面原子分布。

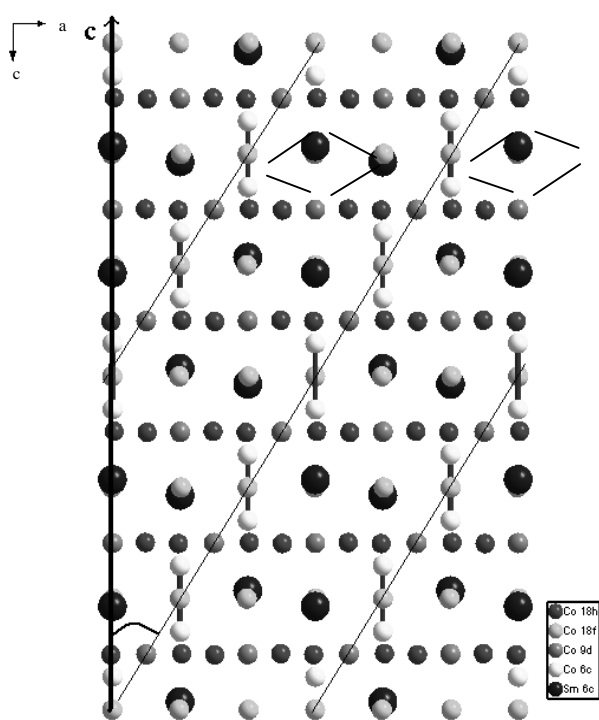


图 1 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 主相晶体结构示意图 (沿 b 轴投影)

由图 1 可知, 当沿着平行于 c 轴方向施加力 F , 由于剪切面的存在, 将 F 分解为平行于和垂直于剪切面方向的力, 分别为 $F\cos\alpha$ 和 $F\sin\alpha$, α 为剪切面与 c 轴间的夹角。当平行于 c 轴施加力 F 时, 对 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 磁体断裂起决定作用的是平行于剪切面方向的分力 $F\cos\alpha$ 。而当沿着垂直于 c 轴方向施加力 F 时, 则对磁体断裂起决定作用的是平行于剪切面方向的分力 $F\sin\alpha$, 对于同一材料断裂时其剪切力相等, 所以有, $F/\cos\alpha = F\sin\alpha$, 根据实验 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 磁体精修结果^[5]可以计算出 α 为 34.62° , 因此, $\frac{F_{\parallel}}{F_{\perp}} = \frac{\cos\alpha}{\sin\alpha} = 1.4485$, 当只有剪切力引起磁体断裂时, 平行 c 轴方向的力是垂直 c 轴方向力的 1.4485 倍, 实验结果^[4]给出的比值为 1.2 倍, 这说明 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 磁体力学性能各向异性主要由其主相晶体结构决定, 其差别说明其可能还与其它因素有关。

3 掺杂元素对 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 永磁材料力学性质各向异性的影响

实际应用的 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁材料除了 Sm 和 Co 主元素外, 通常还有其它掺杂元素, 如 Fe、Cu 和 Zr 等。相对纯 SmCo_2 :17 和 1:5 相而言, Fe、Cu、Zr 掺杂引发 2:17 主相点阵常数 a 增大、 c 减小; 对于 1:5 相, 则掺杂引发 c 轴点阵常数增大、 a 轴减小。图 2 展示了实际磁体中 2:17 主相

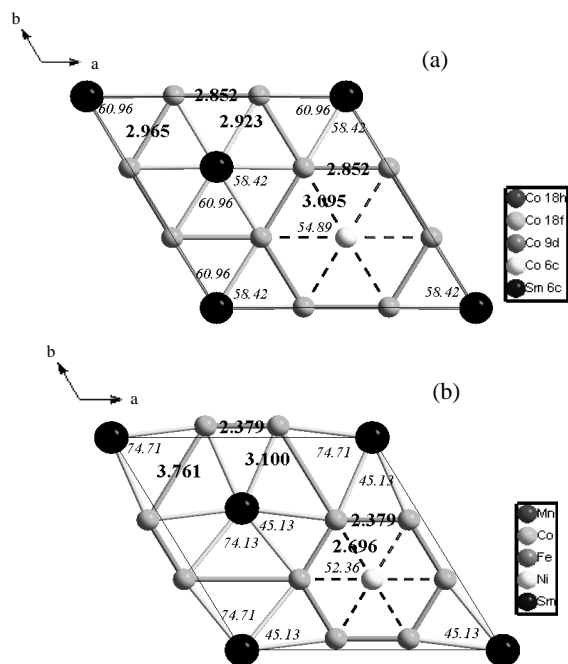


图 2 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 实验磁体中 2:17 相稀土层的点阵畸变

(下转 39 页)

器磁芯测量方法, 2002[S].

- [3] IEC 62044-2: Cores Made of Soft Magnetic Materials - Measuring Methods-Part 2: Magnetic Properties at Low Excitation Level (软磁材料制成的磁芯测试方法 第 2 部分: 低励磁电平下的磁特性) [S].

- [4] 刘九皋. 铁氧体磁芯磁路计算[J]. 磁性材料及器件, 1976-04-001.
- [5] 刘九皋. 并联磁路磁芯磁路常数及等效参数[J]. 磁性材料及器件, 1986, 17(03): 16-20.
- [6] GB2845: 闭路磁芯等效参数计算方法[S].

(上接 23 页)

和纯 2 : 17 相的稀土层的点阵变化。合金成分诱导的点阵畸变可以从其晶体结构的变化体现出来。图 2b 的结果揭示, 合金成分诱发的点阵畸变主要发生在稀土层。层中左侧 RE (稀土) -Co 原子团簇明显膨胀, 主要的变化由键角畸变所致, 键角由原来的 60°左右畸变至 74.71°和 45.13°(图 2a、2b)。而右侧 Co 哑铃对-Co 原子团簇被压缩。由于 Co-Co 哑铃对替代稀土 Sm, 在中心位无原子(空位), 点阵畸变的结果导致原子团簇向空位处集中。所以左侧 RE (稀土) -Co 原子团簇明显膨胀, 而右侧 Co 哑铃对-Co 原子团簇缩小, 这些变化都将影响其力学性能的各向异性。

4 界面效应对 Sm₂Co₁₇ 永磁材料力学性质各向异性的影响

Sm₂Co₁₇ 型磁体为胞状结构。从相结构的角度可以解释为由高温相 SmCo₁₇ 相分解获得。图 3 为 Sm₂Co₁₇ 相的胞状结构(沿 c 轴投影)图。当 Co-Co 哑铃对随温度变化移出 1 : 7 相晶胞后, 2c 晶位的 Co-Co 之间键合形成 2 : 17 晶胞的一边, 四个晶边构成 2 : 17 晶胞, 而外侧的 4 部分构成半个 1 : 5 晶胞, 可以视为 1 : 5 晶胞沿对角面与 2 : 17 晶胞共格形成胞状结构。即两相之间的点阵常数存在如下关系:

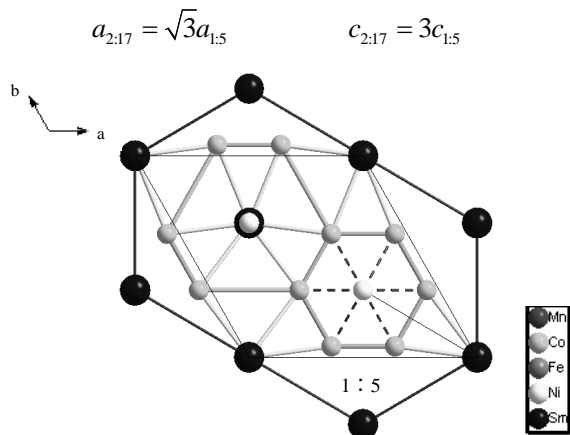


图 3 实际 Sm₂Co₁₇ 磁体胞状结构形成的晶体结构框图

由于合金元素的掺杂诱发磁体中共格关系的破坏, 根据实际磁体计算^[5]可知, 1 : 5 相的对角线长大于 2 : 17 相的点阵常数 a , 畸变达 0.007nm。而 c 轴的畸变量为 -0.005nm。实际磁体胞状结构框图如图 3 所示。该畸变结果必然影响其力学性能的各向异性。

5 结论

(1) Sm₂Co₁₇ 永磁材料的力学性能与其主相晶体结构有直接关系。由于 Co-Co 哑铃对替代稀土 Sm, 原子密集程度发生改变, 在外力作用下, 晶格原子沿密集面发生相对滑动, 滑移面即为剪切面。

(2) Fe、Cu 和 Zr 等掺杂元素对 Sm₂Co₁₇ 永磁材料力学性质各向异性具有重要的影响。掺杂元素使稀土层中某些原子团簇伸长, 而另外某些原子团缩短。

(3) 界面效应影响其力学性能各向异性。掺杂元素的引入使 2 : 17 相和 1 : 5 相之间的点阵关系被改变。

参考文献:

- [1] 周寿增, 董青飞. 稀土永磁材料及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 423.
- [2] 李安华, 董生智, 李卫. 烧结 SmCo 永磁材料的断裂[J]. 中国科学 A 辑, 2002, 32 (10) : 870.
- [3] 李安华, 董生智, 李卫. 烧结 Sm₂Co₁₇ 型永磁材料的力学性能及断裂行为的各向[J]. 物理学报, 2002, 51 (10) : 2320.
- [4] 李安华. 稀土永磁材料的力学特性及其断裂机理研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2004.
- [5] 刘兴民. 先进稀土永磁多极环制备技术的研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2007.

作者简介: 刘兴民, 博士, 副研究员, 主要从事稀土永磁材料相关技术的研究。