

Fe_{40—45}Cr_{30—35}Co_{20—25}Mo_{0—4}Zr_{0—2}合金微观结构对力学性能的影响

李 腾[†] 李 卫 潘 伟 李岫梅

(钢铁研究总院功能材料研究所,北京 100081)

(2005 年 3 月 10 日收到,2005 年 5 月 11 日收到修改稿)

研究了高矫顽力型 FeCrCo 合金力学性能和微观结构间的关系.对抗弯强度和断裂韧性的测试结果表明,高矫顽力型 FeCrCo 合金的力学性能远低于普通 FeCrCo 合金.透射电镜照片显示高矫顽力合金的两相成分差较大,x 射线衍射结果反映高矫顽力合金衍射峰强度较弱而半高宽较大,说明高矫顽力合金中调幅分解进行彻底.合金中 α_1 , α_2 两相成分差的扩大使晶格错配度增加,强度提高,韧性降低.这就是高矫顽力合金力学性能变差的原因.

关键词:力学性能,调幅分解,抗弯强度,断裂韧性

PACC:7600,7550V

1. 引 言

FeCrCo 永磁合金相对于其他高性能永磁材料的最大优势是具有良好的力学性能,可以进行拉、拔、轧、锻、弯;在可加工永磁合金中,FeCrCo 合金具有较高的磁性能;与容易被氢气腐蚀的稀土永磁相比,FeCrCo 的耐氢性很好,因此它是一种具有特殊用途的永磁合金^[1,2].

FeCrCo 合金的磁硬化依靠调幅分解($\alpha \rightarrow \alpha_1 + \alpha_2$)获得,这种磁硬化获得的矫顽力一般较低,因此普通 FeCrCo 合金的矫顽力只有 40—52kA/m.合金的剩磁与高性能磁体相比差别不大,但是矫顽力比高性能磁体低一个数量级以上,可以说,矫顽力过低是制约合金大范围推广应用的主要瓶颈. FeCrCo 合金的成分范围一般为(wt%)Cr 20%—25%,Co 12%—20%,Fe 余以及少量的添加元素,经研究发现^[3,4],将合金中 Cr,Co 含量分别大幅提高至 30%和 20%以上,并且加入 Mo;为了抑制淬火过程中易出现的非磁性相,再加入少量 Zr,可获得 76kA/m 的矫顽力,比普通 FeCrCo 显著提高,剩磁和磁能积仍保持在较高水平^[5]. 本工作重点放在对高矫顽力型 FeCrCo 合金力学性能的研究上,发现该合金的力学

性能(抗弯强度和断裂韧性)明显低于普通 FeCrCo 合金,经分析与调幅分解的充分进行密切相关.

2. 实验方法

研究中设计了两种 FeCrCo 合金成分,一种为普通 FeCrCo,成分为(wt%):Cr 25.5%—27%,Co 14.5%—16%,Mo 3%—3.5%,Ti 0.5%—0.8%,Fe 余;另一种为高矫顽力型 FeCrCo,成分为(wt%):Cr 30%—35%,Co 20%—25%,Mo 0—4%,Zr 0—2%,Fe 余.采用真空感应法熔炼合金,固溶处理温度为 1100—1200℃,保温 20min 后淬火;在 640—650℃ 的温度下施加 400kA/m 的磁场进行磁场热处理,保温 1h;分级回火制度因成分的不同而稍有不同,从 620℃ 缓冷至 540℃^[1,3,5].

合金力学性能的测量包括抗弯强度和断裂韧性两项,均在 MTS New 810 型力学性能试验机上进行.抗弯强度试样的规格为 5.3 mm × 6.5 mm × 20 mm;断裂韧性试样的规格为 2 mm × 4 mm × 18 mm,裂纹长为 1.7 mm,采用上压下顶的方法,如图 1 所示.透射电镜薄膜样品平行于磁场方向截取,经机械减薄及电解双喷穿孔后用于 TEM 观察,用 x 射线衍射方法分析样品的相结构变化.

[†]E-mail: liteng7818@sohu.com

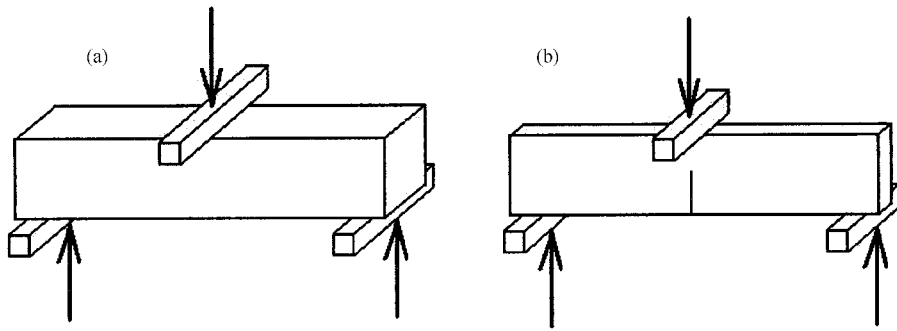


图 1 FeCrCo 合金力学性能试验示意图 (a) 抗弯强度试验 (b) 断裂韧性试验

3. 结果与讨论

3.1. 力学性能

两种合金在回火后的抗弯强度结果如表 1 所示. 单从数值来看, 高矫顽力型 FeCrCo 合金与稀土永磁 NdFeB 材料接近^[6], 明显低于普通 FeCrCo 合金. 此时两种合金都表现出明显的脆性, 样品几乎没有出现塑性变形, 断口处晶粒较大.

抗弯强度试验通常主要是用来研究脆性材料的, 如果将固溶处理后的两种合金也进行类似的试

验, 可得到表 2 的结果. 表 2 中的条件载荷大大高于表 1 中的值, 此时两种合金样品在载荷作用下都明显弯曲了. 虽然施加于高矫顽力合金的载荷低于普通 FeCrCo 合金, 但高矫顽力合金表面却出现了断裂纹, 普通 FeCrCo 合金只弯不断, 说明此种状态下后者的韧性优于前者. 优良的力学性能是 FeCrCo 合金的最大特点, 合金固溶处理后的状态是塑性最好的, 优良的力学性能主要体现在此状态, 通常机械加工也在此时进行. 随着后续热处理的进行, 合金的塑性逐渐变差, 脆性逐渐增强^[7]. 表 3 是两种合金在回火后断裂韧性的测试结果, 与抗弯强度的情况类似, 普通 FeCrCo 合金的断裂韧性也好于高矫顽力合金.

表 1 两种 FeCrCo 合金分级回火后抗弯强度测试结果

样品	尺寸/mm	试验温度/°C	最大载荷/N	结果/MPa
高矫顽力型 FeCrCo 合金	5.3 × 6.5 × 20	25	3168	360
普通 FeCrCo 合金	5.3 × 6.5 × 20	25	9874	1180

表 2 两种 FeCrCo 合金固溶处理后抗弯强度测试结果

样品	尺寸/mm	试验温度/°C	条件载荷/N	结果
高矫顽力型 FeCrCo 合金	5.3 × 6.5 × 20	25	8048	弯裂
普通 FeCrCo 合金	5.3 × 6.5 × 20	25	13530	弯, 不裂

表 3 两种 FeCrCo 合金分级回火后断裂韧性测试结果

样品	尺寸/mm	裂纹长度/mm	试验温度/°C	最大载荷/N	结果/MPa ^m ^{1/2}
高矫顽力型 FeCrCo 合金	2 × 4 × 18	1.7	25	96	6
普通 FeCrCo 合金	2 × 4 × 18	1.7	25	297	20

3.2. 微观结构

3.2.1. 扫描电镜分析

图 2 是高矫顽力型 FeCrCo 合金分别在固溶处

理后和最终热处理后的扫描电镜 (SEM) 照片. 从图中可以看出, 固溶使部分晶界消失, 晶粒尺寸变大; 磁场热处理后重新形成了一些晶粒, 分级回火使得晶粒尺寸又变大. 总的来说, FeCrCo 合金的 α, α_1 ,

α_2 等相的尺寸量级远小于 SEM 所能达到的分辨率, 大约小 2 个数量级, 因此凭借 SEM 只能观测到晶粒

尺寸和晶界的变化, 更细微的观测要借助透射电镜 (TEM)。

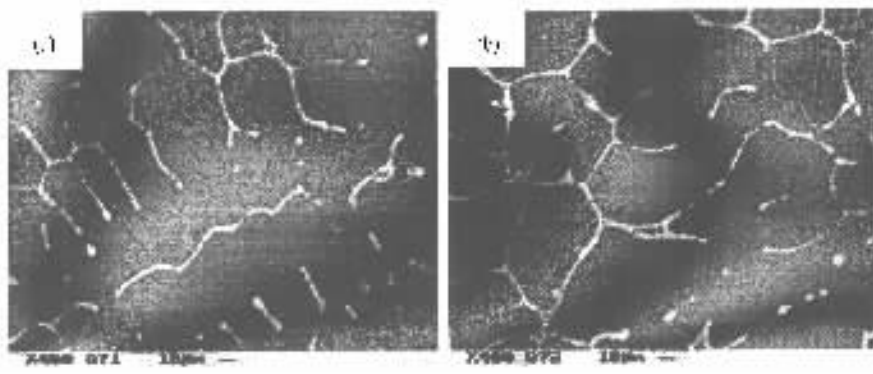


图 2 高矫顽力型 FeCrCo 合金在不同热处理阶段下的扫描电镜照片 (a) 固溶后状态 (b) 回火后状态

3.2.2. 透射电镜分析

图 3 是两种 FeCrCo 合金回火后的透射电镜 (TEM) 照片. 此时合金已发生调幅分解, 固溶后的 α 相转变为富 FeCo 的强磁性 α_1 相和富 Cr 的弱磁性 α_2 相, 图中白色析出物是 α_1 相, 黑色析出物是 α_2 相^[8].

从两相衬度反差来看, 普通 FeCrCo 合金不如高矫顽力合金明显, 说明普通 FeCrCo 合金中两相成分差较小, 也即调幅分解进行程度稍弱, 而高矫顽力合金中调幅分解进行彻底.

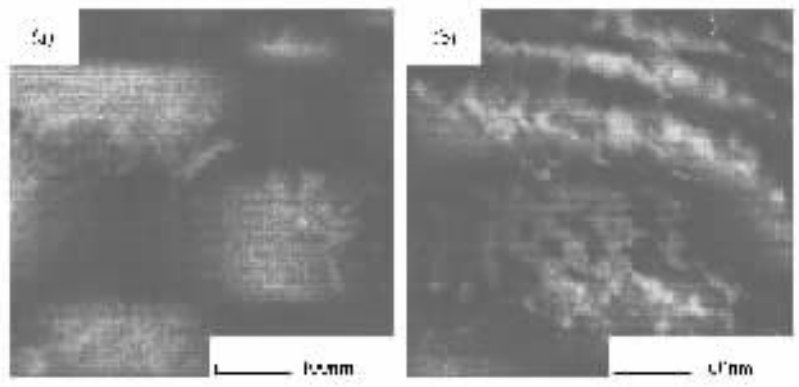


图 3 两种 FeCrCo 合金回火后的透射电镜照片 (a) 普通 FeCrCo 合金 (b) 高矫顽力型 FeCrCo 合金

3.2.3. x 射线衍射分析

将回火后的两种 FeCrCo 合金的 x 射线衍射图 (如图 4 所示) 作对比, 发现两种合金的衍射峰的位置是一样的, 都是 bcc 结构, 但是高矫顽力合金的衍射峰强度低、半高宽大. 因为调幅分解过程中体心立方结构不发生变化, 只是相成分和晶格常数不同. 晶格常数的差别越大, 衍射峰的重叠部分就越少, 衍射强度也越低, 半高宽越大. 因为此时两种合金的相组情况都是 α_1 和 α_2 两相的叠加^[9], 可以肯定, 高矫顽力合金中两相的晶格常数差别大, 也即成分差较大, 这与电镜观察结果一致. 在 FeCrCo 合金中, Co 对调幅分解起主要推动作用^[10], 高矫顽力合金中 Co 含量较高, 因此调幅分解更容易进行^[11, 12].

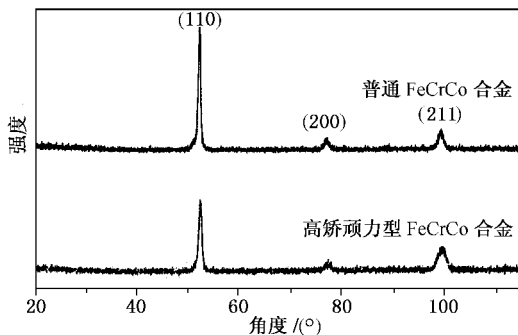


图 4 两种 FeCrCo 合金的 x 射线衍射峰的区别

3.2.4. 力学性能机理分析

FeCrCo 合金中发生调幅分解时要受到化学自由能、界面能和弹性能的控制, 其中自由能曲线如图

5 所示.界面能与波长有关,图 6 是 α_1 和 α_2 的相界面示意图.当波长很大时,界面能可以略去;当波长变短,尤其是接近 100 时,界面能就要起很大的作用,而 FeCrCo 合金中的波长恰在 100—300 之间,所以必须考虑界面能.

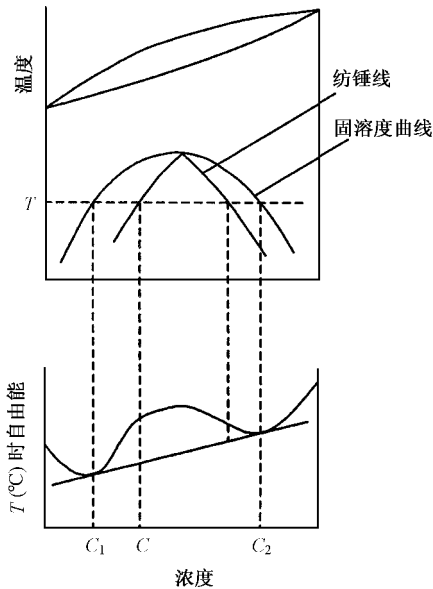


图 5 调幅分解的自由能曲线和相图

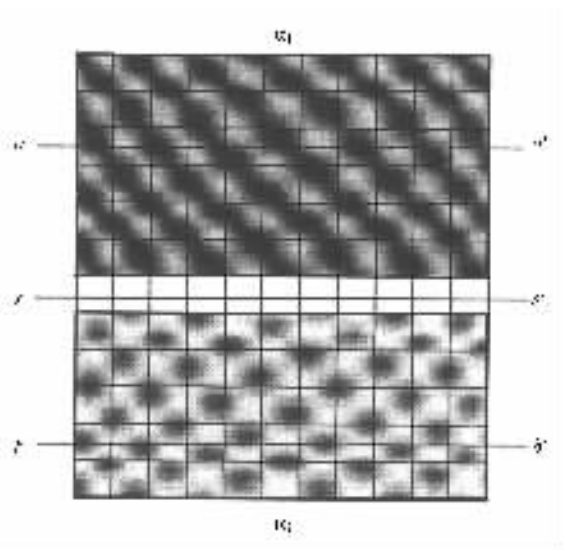


图 6 α_1 和 α_2 的相界面示意图

弹性能与波长大小无关,而与两相的点阵错配度,两相的体积 V, V' 和弹性常数 E, μ 有关.弹性能可表达为

$$F_{el} = \frac{E\delta^2}{1-\mu} \cdot \frac{V \cdot V'}{V+V'}, \quad (1)$$

在立方晶体中点阵错配度 δ 为

$$\delta = \frac{a' - a}{a}, \quad (2)$$

a 和 a' 为两相没有畸变时的点阵常数,如 a 对成分呈线性变化,那么任意成分变化引起的弹性能为

$$F_{el} = \frac{E\eta^2}{1-\mu} \int (c - \bar{c})^2 dV, \quad (3)$$

显然弹性能与弹性模量 E , 两相点阵错配度 δ (或单位成分变化引起的点阵常数的变化 η) 有关.

由以上的分析可以看出,调幅分解进行的过程也就是克服界面能和弹性能的过程.从磁场热处理开始到分级回火的过程中,两相点阵错配度 δ 不断增大,高矫顽力型 FeCrCo 的点阵错配度 δ 比普通 FeCrCo 大.最终热处理后,合金内部储存大量能量,内应力增大.根据金属学原理,合金内部晶格畸变越大,合金的强度就越高,韧性也越差;在固溶淬火态,合金是单相的结构,所以力学性能较好.这与力学试验的结果一致.

Zr 的添加对合金的机械性能有不良影响^[13],因为 Zr 元素在合金中只有少量进入固溶体中,其余的与 Fe 或 Cr 形成化合物,主要是 Fe_2Zr , 还有极少量的 Cr_2Zr . Zr 含量增加使化合物的总量增多、体积增大,在 Fe_2Zr 化合物中间还有单质 Zr 以颗粒形式存在.由于 Zr 的熔点较高,加入后并不是首先溶在钢液中,而是先分散成小颗粒,以这些小颗粒为核心,形成化合物,直接从钢液中析出,而不是凝固后通过相变形成的.金属 Zr 的硬度、塑性、膨胀系数等与合金基体相差很大,这些小的金属 Zr 颗粒分散在合金中,使合金的塑性降低,因此含有这种剩余金属 Zr 的合金加工相当困难.

4. 结 论

高矫顽力型 FeCrCo 合金成分的特殊性对微观结构产生了明显影响,调幅分解变得容易进行,最终热处理后两相的成分差变大.成分差的扩大使晶格畸变增加,影响了合金的力学性能,抗弯强度和断裂韧性值都大幅降低.总的来说,高矫顽力型 FeCrCo 合金的力学性能比普通 FeCrCo 合金差.

- [1] Kaneko H , Homma M and Nakamura K 1971 *AIP Conf. Proc.* **5** 1088
- [2] Jin S and Chin G 1987 *IEEE Tran. Magn.* **23** 3187
- [3] Kaneko H , Homma M , Fukunag T *et al* 1975 *IEEE Tran. Magn.* **11** 1440
- [4] Sugimoto S , Satoh H , Okada M *et al* 1991 *IEEE Tran. Magn.* **27** 3412
- [5] Li T , Chen M Q , Li W *et al* 2003 *Chinese Journal of Rare Earth* **27** 558 (in Chinese) [李 腾、陈敏勤、李 卫等 2003 稀有金属 **27** 558]
- [6] Li A H , Dong S Z and Li W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2320 (in Chinese) [李安华、董生智、李 卫 2002 物理学报 **51** 2320]
- [7] Vintainkin B , Vintainkin E and Mikke K 2002 *The Physics of Metals and Metallography* **94** 177
- [8] Gasanov B 1999 *Russian Metallurgy (Metally)* **2** 123
- [9] Eibschütz M , Chin G and Jin S 1978 *Appl. Phys. Lett.* **33** 362
- [10] Chen R J , Rong C B , Zhang H W *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4341 (in Chinese) [陈仁杰、荣传兵、张宏伟等 2004 物理学报 **53** 4341]
- [11] Zhang H W , Zhang S Y and Shen B G 2001 *Chin. Phys.* **10** 1169
- [12] Rong C B , Zhang J , Du X B *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1969
- [13] Li D S , Ju K C and Zhang Y Q 1983 *Instrument Material* **14** 1 (in Chinese) [李东升、鞠克昌、张玉权 1983 仪表材料 **14** 1]

Effect of microstructure on the mechanical properties of Fe₄₅₋₅₀Cr₃₀₋₃₅Co₂₀₋₂₅Mo₀₋₄Zr₀₋₂ alloy

Li Teng Li Wei Pan Wei , Li Xiu-Mei

(Division of Functional Materials , Central Iron & Steel Research Institute , Beijing 100081 , China)

(Received 10 March 2005 ; revised manuscript received 11 May 2005)

Abstract

In this paper , the relationship between the mechanical properties and the microstructure of a high-coercivity FeCrCo alloy was studied. Measurements on bending strength and fracture toughness showed that the mechanical properties of the high-coercivity FeCrCo alloy are much lower than the conventional FeCrCo alloy. TEM micrographs showed that the composition contrast between the two phases in the high-coercivity alloy is larger , XRD results indicated that the peak intensities of the high-coercivity alloy is lower and the half-peak-width is larger , which indicated that the spinodal decomposition processes are more successfully in the high-coercivity alloy. The enlargement of the composition contrast between α_1 and α_2 leads to the increase of crystal mismatch , the strength of the alloy improved , but the ductility deteriorated , that is the reason why the mechanical properties of the high-coercivity alloy is poor.

Keywords : mechanical property , spinodal decomposition , bending strength , fracture toughness

PACC : 7600 , 7550V