

# Mo 含量对 $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1(x=0, 2, 4)$ 合金的微观结构, 热性能和磁性能的影响

华中, 左斌, 王晓楠, 孙亚明, 董丽荣

(吉林师范大学 功能材料物理与化学教育部重点实验室, 吉林 四平 136000)

**摘要:** 采用单辊快淬法制备  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1(x=0, 2, 4)$  系非晶合金, 并对 3 种合金进行不同温度热处理。利用 X 射线衍射仪 (XRD)、透射电镜 (TEM)、差热分析仪 (DTA) 和振动样品磁强计 (VSM) 对合金的微观结构、热性能和磁性能进行测试分析。结果表明:  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1(x=0, 2, 4)$  3 种合金第 1 个晶化峰的激活能随 Mo 含量的增加而减小, Mo 的添加不利于合金的热稳定性。Mo 含量的增加抑制了  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  等化合物的析出, 细化了结晶相的晶粒尺寸。 $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1(x=0, 2, 4)$  3 种非晶合金的矫顽力  $H_c$  均随退火温度的升高而逐渐增大。Mo 的添加明显降低了合金的矫顽力。

**关键词:** 非晶合金; Mo 含量; 微观结构; 热性能; 矫顽力

**中图分类号:** TG132.2<sup>+</sup>7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2016)02-0358-05

Fe-M-B ( $M=\text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}$ ) 系列合金因具有高磁导率、高饱和磁通、低矫顽力、低铁损、频散特性好等优点, 被世界公认为是目前综合性能最好的软磁材料之一<sup>[1-5]</sup>。该软磁合金的制备工艺相对简单, 生产周期短, 具有优良的性价比, 从工业生产角度看, 该材料能够迅速发展服务于经济建设, 并在科学研究和实际应用方面受到广泛重视, 因而成为近年来的研究热点<sup>[6-11]</sup>。对于 Fe-M-B 系列中合金成分  $M$  的选择, 已扩展到 IVB、VB 和 VIB 族金属元素, 如 Zr、Hf、Nb、Ti、Ta、Mo 和 W 等<sup>[12]</sup>。而合理地选择合金系成分, 对 FeMB 软磁材料性能的改善起到至关重要的作用。

马瑞娜<sup>[13]</sup>研究发现在铁硼中加入 Mo 元素, 提高了铁硼试样的烧结密度和硬度, 也提高了材料的强韧性。姜超平<sup>[14]</sup>研究发现适量 Mo 合金粉末加入能提高 Fe 基非晶涂层抗腐蚀性能。贺自强等人<sup>[15]</sup>研究发现 Mo 的加入提高了  $(\text{Fe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5})_{80-x}\text{Mo}_x\text{B}_{20}(x=0, 2, 4, 6, 8)$  系非晶态合金的玻璃形成能力与热稳定性。本实验在  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{10}\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金基础上添加 Mo 元素, 研究 Mo 含量对  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1(x=0, 2, 4)$  合金的微观结构, 热性能和磁性能的影响。

## 1 实验

实验选用高纯度 (纯度均大于 99.9%) 的 Fe、Co、

Zr、B、Cu、Mo 为初始原料, 在 Ar 气氛下, 用高温电弧炉熔炼名义成分为  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1(x=0, 2, 4)$  的铸态母合金, 然后采用单辊快淬法制备合金条带, 快淬速率为 38 m/s。在氩气保护下, 对 3 种非晶合金条带分别在 773, 823, 848, 873, 898, 923, 948, 973 和 1023 K 下进行 60 min 等温退火处理。利用差热分析仪 (DTA, TG/DTA 6300) 测量样品的热性能, 升温速率  $\beta$  为 15, 20, 25, 30 和 35 K/min。采用 Kissinger 方法计算合金的晶化激活能。利用 X 射线衍射仪 (XRD, D/max 2500/PC, Cu 靶  $K\alpha$  辐射,  $\lambda=0.15406$  nm) 和透射电镜 (TEM, JEM-2100E) 测试分析样品的结构。利用振动样品磁强计 (VSM, Lake shore M-7407) 测量样品的磁性能。

## 2 结果与分析

图 1 为  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1(x=0, 2, 4)$  非晶合金快淬态及不同温度退火后的 XRD 图谱, 插入图为该合金在升温速率为 30 K/min 的 DTA 曲线。从图 1 中可以看出, 3 种合金淬态的 XRD 图谱均显示明显的漫散射包特征, 表明 3 种合金淬态时均处于非晶态。

从图 1a 可以看出,  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{10}\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金在 773 K 退火, 有晶化物从非晶基态中析出。798 K 退火可以确定晶化物为  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  相, 848 K 以上退火,  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$

收稿日期: 2015-01-10

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目 (201105083); 教育厅“十二五”科学技术研究项目 (2014-485); 吉林师范大学研究生创新科研计划项目 (201103)

作者简介: 华中, 男, 1961 年生, 博士, 教授, 吉林师范大学, 吉林 四平 136000, 电话: 0434-3293501, E-mail: huazhong196110@163.com

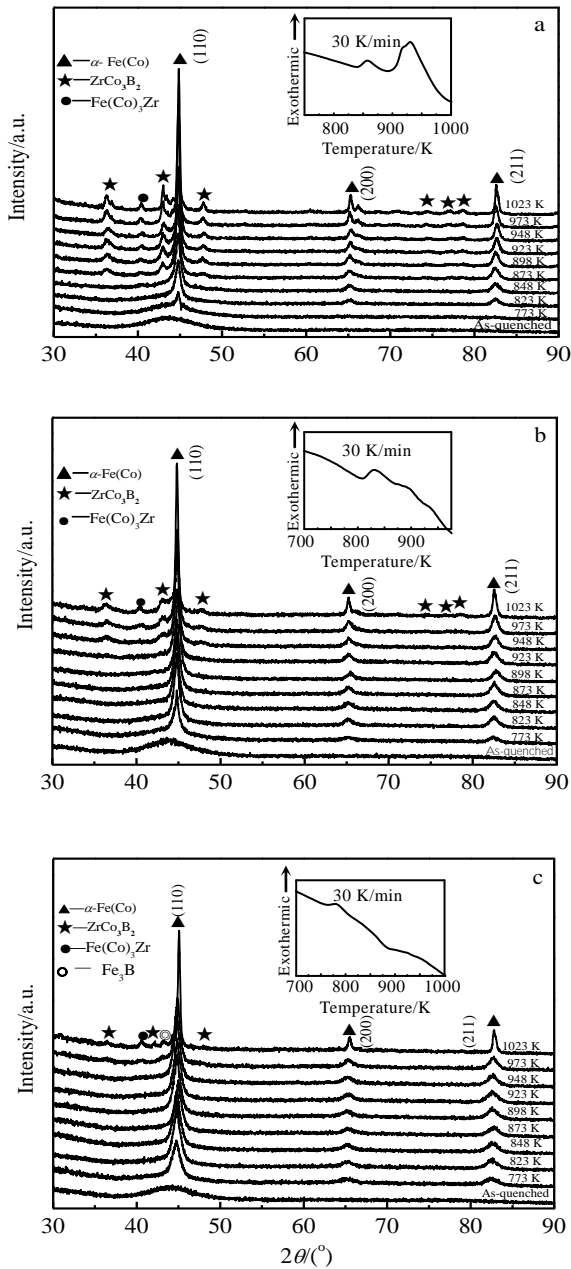


图 1  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$  ( $x=0, 2, 4$ ) 非晶合金快淬态及不同温度退火后的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$  ( $x=0, 2, 4$ ) amorphous alloys as-quenched and annealed at different annealing temperatures: (a)  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{10}\text{B}_9\text{Cu}_1$ , (b)  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_8\text{Mo}_2\text{B}_9\text{Cu}_1$ , and (c)  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_6\text{Mo}_4\text{B}_9\text{Cu}_1$

衍射峰峰形逐渐变锐, 同时伴有  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  和  $\text{Fe}(\text{Co})_3\text{Zr}$  化合物的析出。  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{10}\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金的晶化过程为: 非晶  $\rightarrow$  非晶 +  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co}) \rightarrow \alpha\text{-Fe}(\text{Co}) + \text{ZrCo}_3\text{B}_2 + \text{Fe}(\text{Co})_3\text{Zr}$ 。 DTA 曲线的第 1 个晶化放热峰对应着  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  相的析出, 第 2 个晶化放热峰对应着  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  和  $\text{Fe}(\text{Co})_3\text{Zr}$

化合物的析出。

由图 1b 可以看出,  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_8\text{Mo}_2\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金的晶化过程与  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{10}\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金的晶化过程相似。  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_8\text{Mo}_2\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金在 773 K 退火, 有  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  相析出, 随热处理温度的升高,  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  相衍射峰强度增强, 923 K 退火有  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  化合物析出, 1023 K 退火又析出  $\text{Fe}(\text{Co})_3\text{Zr}$  相, 与  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{10}\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金相比, 添加 2at% 的 Mo 延迟了  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  相和  $\text{Fe}(\text{Co})_3\text{Zr}$  相的析出。 DTA 曲线的第 1 个晶化放热峰对应着  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  相的析出, 第 2 个和第 3 个晶化放热峰分别对应着  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  和  $\text{Fe}(\text{Co})_3\text{Zr}$  化合物的析出。

由图 1c 可以看出,  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_6\text{Mo}_4\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金在 773 K 退火, 在非晶基体中有  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  晶体相析出。 随着退火温度的不断升高,  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  衍射峰的强度增强, 晶化程度越来越高。 973 K 以上退火,  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  衍射峰峰形逐渐变锐, 同时伴有  $\text{Fe}_3\text{B}$ 、  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  以及  $\text{Fe}(\text{Co})_3\text{Zr}$  化合物的析出。  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_6\text{Mo}_4\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金的晶化过程为: 非晶  $\rightarrow$  非晶 +  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co}) \rightarrow \alpha\text{-Fe}(\text{Co}) + \text{Fe}_3\text{B} + \text{ZrCo}_3\text{B}_2 + \text{Fe}(\text{Co})_3\text{Zr}$ 。 DTA 曲线的第 1 个晶化放热峰对应着  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  相的析出, 第 2 个晶化放热峰对应着  $\text{Fe}_3\text{B}$ 、  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  以及  $\text{Fe}(\text{Co})_3\text{Zr}$  化合物的析出。 可以更加确定 Mo 含量的增加抑制了  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  等化合物的析出。

图 2 为  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$  ( $x=0, 2, 4$ ) 非晶合金分别在 848 K 退火的 TEM 像及选区电子衍射照片。

从图 2a 电子衍射照片中可以观察到  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  和  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  相, 从 TEM 像中可看出  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{10}\text{B}_9\text{Cu}_1$  晶粒尺寸较大; 图 2b 和 2c 电子衍射照片中仅观察到有  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  相,  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_8\text{Mo}_2\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金的晶粒尺寸较小,  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_6\text{Mo}_4\text{B}_9\text{Cu}_1$  合金的晶粒尺寸最小。 可见, 随着 Mo 含量的增加, 结晶相的晶粒尺寸得到细化。

图 3 为  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$  ( $x=0, 2, 4$ ) 非晶合金在升温速率分别为 15, 20, 25, 30 和 35 K/min 的 DTA 曲线。 表 1 为  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$  ( $x=0, 2, 4$ ) 3 种非晶合金在不同升温速率下第一个晶化峰 ( $T_{p1}$ ) 的峰值温度。

从表 1 中可看出, 随着 Mo 含量的增加, 同一升温速率下  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$  ( $x=0, 2, 4$ ) 合金的  $T_{p1}$  值随着 Mo 含量的增加而降低。

根据表 1 数值采用 Kissinger 法<sup>[16]</sup> 计算晶化激活能。 Kissinger 公式:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = -\frac{E}{RT} + C \quad (1)$$

其中,  $\beta$  为升温速率,  $T$  为晶化峰的峰值温度,  $E$  为晶化激活能,  $R$  为普适气体常量,  $C$  为常数。 利用

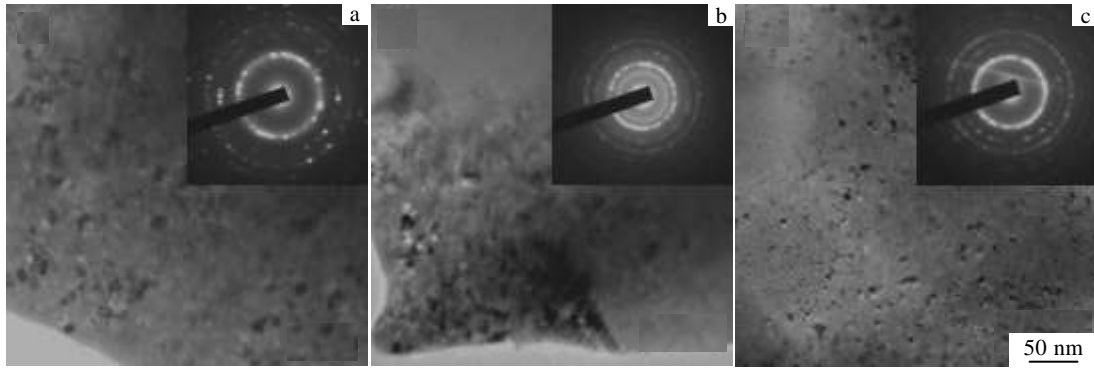


图 2 Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>(x=0, 2, 4)非晶合金分别在 848 K 退火的 TEM 像及选区电子衍射花样

Fig.2 TEM images and the corresponding selected area diffraction patterns of Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> (x=0, 2, 4) alloys annealed at 848 K: (a) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>10</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>, (b) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>8</sub>Mo<sub>2</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>, and (c) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>6</sub>Mo<sub>4</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>

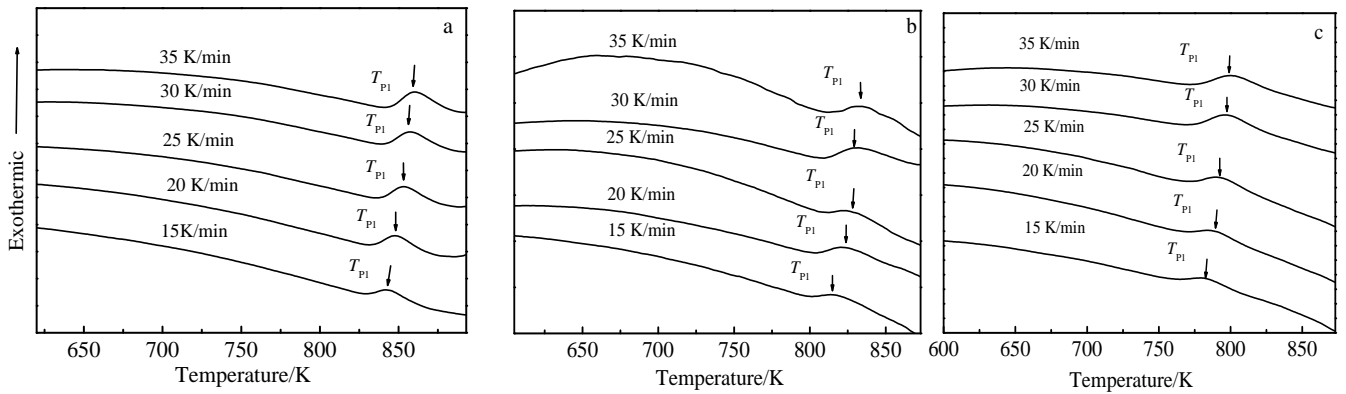


图 3 Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> (x=0, 2, 4)非晶合金在不同升温速率的 DTA 曲线

Fig.3 DTA curves of Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> (x=0, 2, 4) amorphous alloys at different heating rates: (a) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>10</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>, (b) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>8</sub>Mo<sub>2</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>, and (c) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>6</sub>Mo<sub>4</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>

表 1 Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> (x=0, 2, 4)合金在升温速率分别为 15, 20, 25, 30 和 35 K/min 时的第 1 个晶化峰 ( $T_{p1}$ ) 的峰值温度

Table 1  $T_{p1}$  of the Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> (x=0, 2, 4) amorphous alloys at heating rates of 15, 20, 25, 30 and 35 K/min (K)

$\beta/K \text{ min}^{-1}$	15	20	25	30	35
Fe <sub>40</sub> Co <sub>40</sub> Zr <sub>10</sub> B <sub>9</sub> Cu <sub>1</sub>	843.26	848.27	853.18	856.15	859.23
Fe <sub>40</sub> Co <sub>40</sub> Zr <sub>8</sub> Mo <sub>2</sub> B <sub>9</sub> Cu <sub>1</sub>	814.42	823.72	826.18	829.04	833.46
Fe <sub>40</sub> Co <sub>40</sub> Zr <sub>6</sub> Mo <sub>4</sub> B <sub>9</sub> Cu <sub>1</sub>	783.56	789.49	792.45	797.93	800.44

$\ln(\beta/T^2)$ 对  $1/T$  做图, 将得到一条斜率为  $E/R$  的直线, 进而可以得到晶化激活能  $E$ 。

图 4 所示分别为 Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>(x=0, 2, 4) 非晶合金第 1 个晶化峰  $T_{p1}$  的 Kissinger 曲线, 求得的 3 个晶化峰的激活能分别为 303.76, 247.27 和 244.05 kJ/mol, 合金的晶化激活能随着 Mo 含量的增加而减小, 说明 Mo 元素的添加降低了合金的热稳定性。

图 5 为 Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>(x=0, 2, 4)非晶合

金的矫顽力 ( $H_c$ ) 与退火温度 ( $T_a$ ) 的关系曲线。结合 XRD 图谱, 3 种合金低于 848 K 退火,  $H_c$  均未发生明显变化。Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>10</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> 合金在 848 K 退火, 有 ZrCo<sub>3</sub>B<sub>2</sub> 和 Fe(Co)<sub>3</sub>Zr 化合物析出, 898 K 退火  $H_c$  迅速增大, 磁性能恶化。与 Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>10</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> 合金相比, 添加 2at% 的 Mo 延迟了 ZrCo<sub>3</sub>B<sub>2</sub> 相和 Fe(Co)<sub>3</sub>Zr 相的析出, Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>8</sub>Mo<sub>2</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> 合金高于 923 K 退火有化合物析出,  $H_c$  迅速增大。添加 4at% 的 Mo 延迟

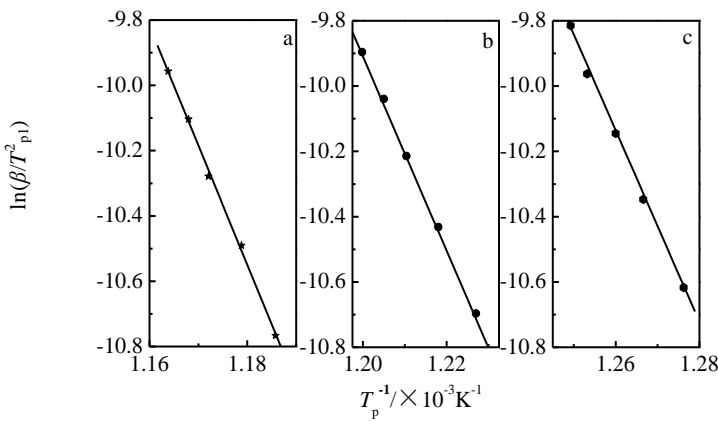


图4 Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>(x=0, 2, 4)非晶合金第1个晶化峰 T<sub>p1</sub> 的 Kissinger 曲线

Fig.4 Kissinger plots of T<sub>p1</sub> for Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> (x=0, 2, 4) amorphous alloys: (a) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>10</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>, (b) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>8</sub>Mo<sub>2</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>, and (c) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>6</sub>Mo<sub>4</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>

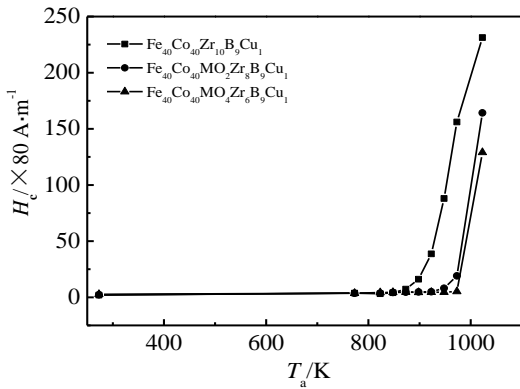


图5 Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>(x=0, 2, 4)非晶合金的矫顽力 (H<sub>c</sub>) 与退火温度 (T<sub>a</sub>) 的关系曲线

Fig.5 Variations of coercivity (H<sub>c</sub>) of Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> (x=0, 2, 4) amorphous alloys as a function of annealing temperature (T<sub>a</sub>)

ZrCo<sub>3</sub>B<sub>2</sub> 相和 Fe(Co)<sub>3</sub>Zr 相的现象更加明显, Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>6</sub>Mo<sub>4</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub> 合金在 973 K 退火, 才伴有 Fe<sub>3</sub>B、ZrCo<sub>3</sub>B<sub>2</sub> 以及 Fe(Co)<sub>3</sub>Zr 化合物的析出, 1023 K 退火化合物含量明显增加, H<sub>c</sub> 迅速增大。说明 Mo 含量的增加明显降低了合金的矫顽力, 改善了合金的软磁性。

### 3 结论

1) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>(x=0, 2, 4) 3 种非晶合金分别在 848, 923, 973 K 时有 ZrCo<sub>3</sub>B<sub>2</sub> 和 Fe(Co)<sub>3</sub>Zr

化合物的析出, 说明 Mo 含量的增加抑制了 ZrCo<sub>3</sub>B<sub>2</sub> 等化合物的析出。透射图像表明 Mo 含量的添加减小了结晶相的晶粒尺寸。

2) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>(x=0, 2, 4) 3 种非晶合金激活能分别为 303.76, 247.27 和 244.05 kJ/mol, 合金的晶化激活能随着 Mo 含量的增加而减小, Mo 元素的添加降低了合金的热稳定性。

3) Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>Zr<sub>(10-x)</sub>Mo<sub>x</sub>B<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>(x=0, 2, 4) 3 种非晶合金的矫顽力 H<sub>c</sub> 均随退火温度的升高而逐渐增大, 但程度有所不同, 这与合金的晶化过程有关。Mo 含量的增加抑制了 ZrCo<sub>3</sub>B<sub>2</sub> 等化合物的析出, 降低了合金的矫顽力。

### 参考文献 References

- [1] Mu Danning(穆丹宁), Yang Changlin(杨长林), Wei Xiaowei(魏晓伟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(6): 1316
- [2] Sun Y M, Zuo B, Wang D et al. *Acta Physica Polonica A*[J], 2013, 124(4): 685
- [3] Kernion S J, Miller K J, Shen S et al. *IEEE Transactions on Magnetics* [J], 2011, 47 (10): 3452
- [4] Folly W S D, Caffarena V R, Sommer R L et al. *J Magn Magn Mater* [J], 2008, 320(14): 358
- [5] Zhang K, Han B, Xiao L et al. *Journal of Physics D, Applied Physics* [J], 2007, 40(21): 6507
- [6] Garcia C, Zhukov A, Gonzalez J et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2006, 423(1): 116
- [7] Gona M N, Yanase S, Hashi S et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2003, 254(1): 466
- [8] Babu Arvindha D, Majumdar B, Sarkar R et al. *Journal of Materials Research*[J], 2011, 16(26): 2065
- [9] Shen Kun(申坤), Wang Mingpu(汪明朴), Cao Lingfei(曹玲飞) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2007, 17(10): 1661
- [10] Xiong X Y, Finlayson T R, Muddle B C. *Journal of Materials Science*[J], 2003, 38(6): 1161
- [11] Huang H, Shao G, Tsakirooulos P. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2008, 459(1-2): 185
- [12] Cao Lingfei(曹玲飞), Wang Mingpu(汪明朴), Xie Dan(谢丹) et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2005, 5(19): 20
- [13] Ma Ruina(马瑞娜), Cao Xiaoming(曹晓明), Wen Ming(温鸣). *Journal of Hebei University of Technology*(河北工业大学学报)[J], 2003, 32(5): 12
- [14] Jiang Chaoping(姜超平), Xing Yazhe(邢亚哲), Hao Jianmin(郝建民). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J],

2011, 40(8): 144

2007(9): 14

[15] He Ziqiang(贺自强), Wang Xinlin(王新林), Quan Baiyun(全白云) *et al. Journal of Materials Engineering* (材料工程)[J],

[16] Kissinger H E. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*[J], 1956, 57(4): 217

## Effect of Mo Content on Microstructures, Thermal Properties and Magnetic Properties of $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$ ( $x=0, 2, 4$ ) Alloys

Hua Zhong, Zuo Bin, Wang Xiaonan, Sun Yaming, Dong Lirong

(Key Laboratory of Functional Materials Physics and Chemistry of the Ministry of Education, Jilin Normal University, Siping 136000, China)

**Abstract:**  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$  ( $x=0, 2, 4$ ) amorphous alloys were prepared by single roller melt-spinning and then they were isothermally annealed at different temperatures. Microstructures, thermal properties and magnetic properties of the samples were investigated by X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), differential thermal analysis (DTA) and vibrating sample magnetometer (VSM). The results show that the apparent activation energies of  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$  ( $x=0, 2, 4$ ) alloys decrease with the increase of the Mo content. Mo addition reduces the thermal property of the alloys. The increase of Mo content inhibits the precipitation of  $\text{ZrCo}_3\text{B}_2$  compounds and refines the grain size of the crystallization phase. Coercivity ( $H_c$ ) of  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{Zr}_{(10-x)}\text{Mo}_x\text{B}_9\text{Cu}_1$  ( $x=0, 2, 4$ ) alloys increases with the increasing of annealing temperature gradually. Mo addition reduces the  $H_c$  obviously.

**Key words:** amorphous alloy; Mo content; microstructure; thermal property; coercivity

---

Corresponding author: Hua Zhong, Ph. D., Professor, Jilin Normal University, Siping 136000, P. R. China, Tel: 0086-434-3293501, E-mail: huazhong196110@163.com