

“Ga 微合金化对 $\text{Fe}_{81.5}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}$ 纳米晶合金结构 和软磁性能的影响” 拓展补充材料

于金良¹ 张伟^{1,2} 李亚珍¹ 薛钧升¹ 李艳辉¹ 朱正旺² 蒋丽¹

栾军华³ 张海峰²

¹ 大连理工大学 材料科学与工程学院 大连 116024

² 东北大学 冶金学院 沈阳 110819

³ 香港城市大学 机械工程学院 香港 999077

Supplementary Material for

Effect of Ga Microalloying on Structure and Soft Magnetic Properties of a $\text{Fe}_{81.5}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}$ Nanocrystalline Alloy

YU Jinliang¹, ZHANG Wei^{1,2}, LI Yazhen¹, Xue Junsheng¹, LI Yanhui¹, ZHU Zhengwang²,
JIANG Li², LUAN Junhua³, ZHANG Haifeng²

*1 School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian
116024, China*

2 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China

*3 Department of Materials Science and Engineering, City University of Hong Kong, Hong
Kong 999077, China*

<https://www.ams.org.cn/CM/10.11600/0412.1961.2025.00035>

以图 S1a 所示方法对 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ ($x = 0 \sim 2.0$) 快淬合金的差示扫描量热(DSC)曲线第一放热峰进行高斯分峰拟合, 分别计算了预存 $\alpha\text{-Fe}$ 相和新生 $\alpha\text{-Fe}$ 相的结晶潜热(ΔH_{pre} 和 ΔH_{new})。如图 S1b 所示, 随着 x 的增加, ΔH_{pre} 逐渐增大, 而 ΔH_{new} 逐渐降低, 表明随着 Ga 含量的提高, 快淬合金中预存 $\alpha\text{-Fe}$ 相的体积分数逐渐增加。

收稿日期 2025-02-13 定稿日期 2025-**-**

作者简介 于金良, 男, 2000 年生, 研究生

通讯作者 张伟, wzhang@dlut.edu.cn, 主要从事非晶态合金、纳米材料和磁性材料的研究
李艳辉, yhli@dlut.edu.cn, 主要从事非晶/纳米晶软磁合金和纳米多孔合金的研究

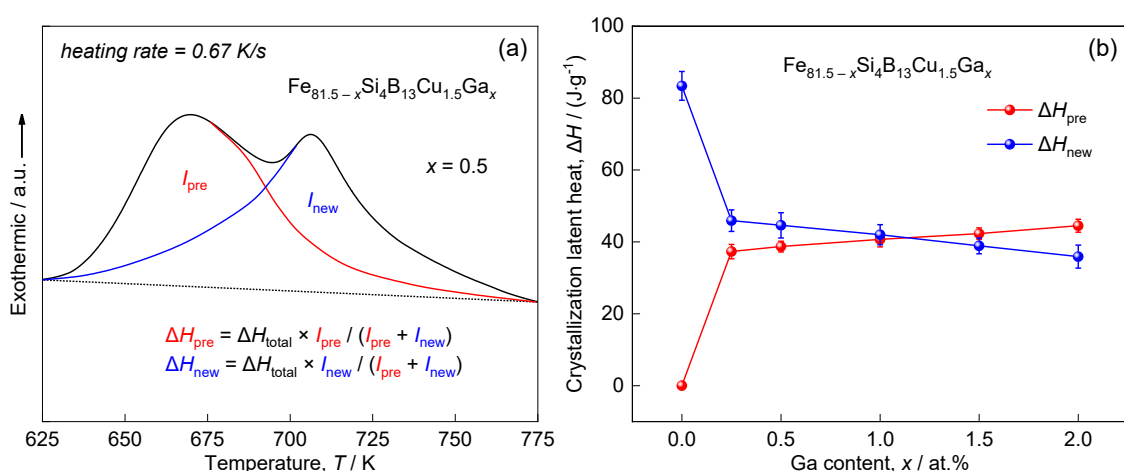


图 S1 $\text{Fe}_{81.5}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_{0.5}$ 快淬合金 DSC 曲线第一放热峰分峰拟合和结晶潜热与 Ga 含量的关系
Fig. S1 Peak splitting analysis to the first exothermic peak in the DSC curve of melt-spun $\text{Fe}_{81.5}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_{0.5}$ alloy ($x = 0.5$) (a) and changes in crystallization latent heats of melt-spun $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ ($x = 0-2.0$) alloys as a function of Ga content (b)

图 S2 为不同温度下 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ ($x = 0, 2.0$) 合金的总对关联函数(PCF)曲线。随着温度的降低, 2 个合金的 PCF 曲线的第一峰均逐渐变得更加高且尖锐, 表明短程有序结构的形成。在冷却到 300 K 时, 第一峰均劈裂形成 2 个亚峰, 对应位置分别约为 0.207 和 0.243 nm。在 300 K, 两合金的第二峰均呈现明显的肩峰状态, 表明它们均具有中程有序的非晶态结构。

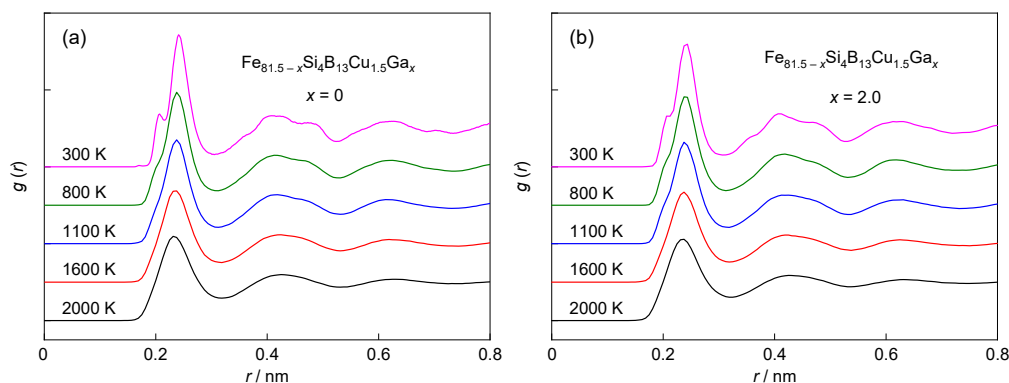


图 S2 不同温度下 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ 合金的总对关联函数(PCF)曲线
Fig.S2 Total pair correlation function (PCF) curves of $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ alloys at different temperatures
 (a) $x = 0$ (b) $x = 2.0$

图 S3 为 300 K 下 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ ($x = 0, 2.0$) 合金中类金属原子之间的偏 PCFs 曲线。B-B、Si-B 和 Si-Si 原子对的 PCF 曲线第一峰较弱甚至消失, 而第二峰峰值较高, 表明合金内类金属原子间直接成键的概率较低, 倾向于次近邻配位。

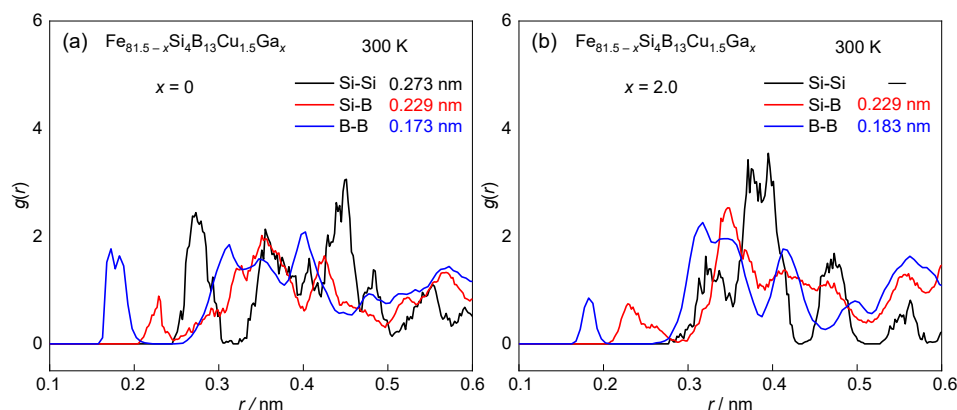


图 S3 300 K 下 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ 合金 Si-Si、Si-B 和 B-B 原子间偏 PCFs 曲线

Fig.S3 Partial PCFs of Si-Si、Si-B and B-B atom pairs for $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ alloys at 300 K

(a) $x = 0$ (b) $x = 2.0$

图 S4 为 300 K 下的 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ ($x = 0, 2.0$)合金中 Fe、Si、B 和 Cu 原子的总配位数构成。总配位数由偏配位数求和得到。

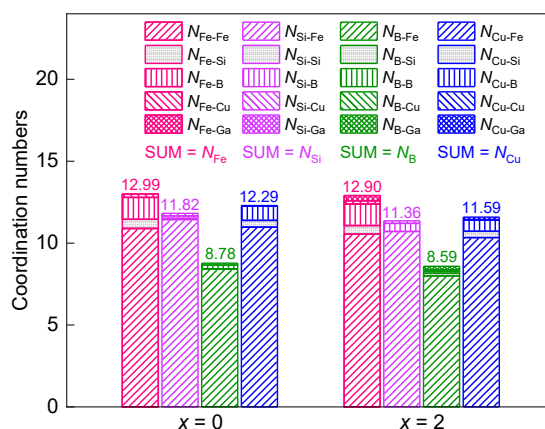


图 S4 300 K 下 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ 合金($x = 0, 2.0$)不同原子的总配位数和偏配位数

Fig.S4 Total and partial coordination numbers (CNs) of $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ alloys ($x = 0, 2.0$) at 300 K (N_i —coordination number of i atom)

图 S5 为 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ ($x = 0 \sim 2.0$)合金的饱和磁感应强度(B_s)和矫顽力(H_c)与退火温度(T_a)的关系。随着 T_a 的升高, 所有合金的 B_s 均呈现先增加, 随后在较大的温度范围内保持平稳, 而后降低的趋势(图 S5a)。在 668~753 K 温度范围内, $x = 0$ 时合金的 H_c 均保持在 200 A/m 以上; $x = 0.25 \sim 2.0$ 时合金的 H_c 在 638~713 K 的范围内保持在 9.0~16.7 A/m 之间, 后随 T_a 的升高而急剧增大(图 S5b)。由此分别确定 725 和 698 K 条件下, $x = 0, 0.25 \sim 2.0$ 时合金的最优热处理温度最佳热处理温度(T_{oa})。

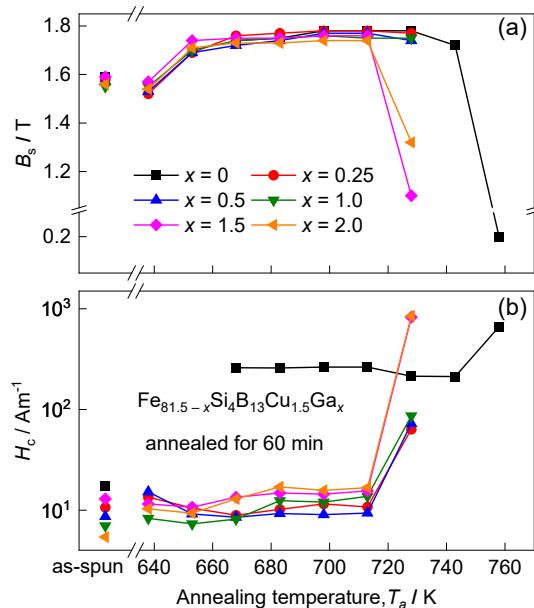


图 S5 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ 合金的饱和磁感应强度(B_s)和矫顽力(H_c)与退火温度(T_a)的关系

Fig.S5 Variations in B_s (a) and low coercivity (H_c) (b) of $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ alloys as a function of annealing temperature (T_a)

图 S6 为 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ 合金经 T_{oa} 退火 60 min 后的 XRD 谱, 其均在 $2\theta = 45^\circ$ 和 65° 附近出现衍射峰, 分别对应 α -Fe 相的(110)和(200)晶面, 表明该系合金退火后均仅有 α -Fe 相析出。依据 Scherrer 公式估算, $x = 0$ 合金中 α -Fe 晶粒的平均退火 α -Fe 晶粒尺寸($\bar{D}_{\alpha\text{-Fe}}$)为 47.6 nm, 当 x 增加到 0.5 时, $\bar{D}_{\alpha\text{-Fe}}$ 下降到 16.3 nm, 当 x 进一步增大到 2.0 时, $\bar{D}_{\alpha\text{-Fe}}$ 小幅增大到 19.2 nm。

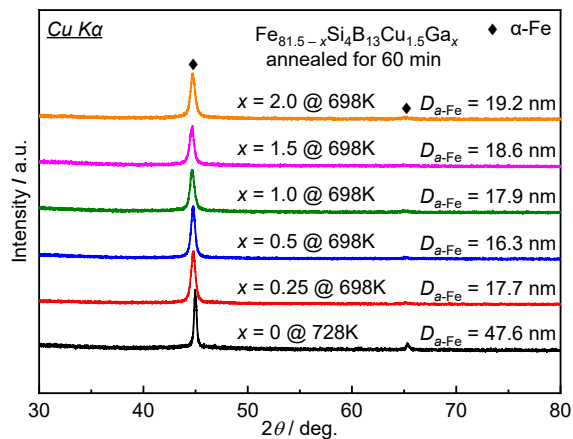


图 S6 经最佳热处理温度(T_{oa})退火 60min 后 $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ 合金的 XRD 谱

Fig.S6 XRD patterns of $\text{Fe}_{81.5-x}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{Cu}_{1.5}\text{Ga}_x$ alloys after annealing at optimum annealing temperature (T_{oa}) for 60 min