

非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金的临界现象

沈保根 赵见高 詹文山 陈金昌

(中国科学院物理研究所) (北京师范学院物理系)

1985 年 1 月 28 日收到

提 要

本文报道非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金的磁化强度与温度和磁场关系的测量结果. 在居里温度附近样品的磁性符合二级相变规律, 得到临界指数 $\beta=0.39\pm0.02$, $\gamma=1.56\pm0.06$, $\delta=5.20\pm0.1$, 样品的居里温度 $T_c=(180.4\pm0.2)\text{K}$. 在实验误差范围内, 临界指数 β, γ, δ 满足 $\gamma=\beta(\delta-1)$ 关系. 在 168—192K 温度范围, 实验数据满足二级相变的磁状态方程. 当 $T>270\text{K}$ 时, 样品顺磁磁化率服从居里-外斯定律, 由居里-外斯常数 c 计算出有效顺磁磁矩 $\mu_{\text{eff}}=3.19\mu_B$.

一、引 言

对铁磁性合金, 在居里温度 T_c 附近, 磁化强度 M 与磁场 H 和温度 T 的关系可用临界指数 β, γ, δ 来描述

$$M(0, T) \propto (T_c - T)^\delta \quad T < T_c, \quad (1)$$

$$M(H, T_c) \propto H^{1/\delta} \quad T = T_c, \quad (2)$$

$$\chi_0(0, T) = (dM/dH)_{H \rightarrow 0} \propto (T - T_c)^{-\gamma} \quad T > T_c, \quad (3)$$

其中 χ_0 为顺磁磁化率. 非晶态合金铁磁性相变的研究工作已有不少报道^[1-8], 由于富 Ni 的 FeNi 基合金较易制备成非晶态, 样品的非晶度好, 并且具有低居里温度和高晶化温度的特点, 便于在较宽的温区测量和研究. 因此, 我们选择非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金(晶化温度高于居里温度 475K), 用提拉样品磁强计测量了样品的 $M(H, T)$ 关系, 求出的该非晶态合金的临界指数 β, γ, δ 与已报道的其它非晶态合金的结果相近.

二、实 验

非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金是采用单辊急冷技术制备的, 带宽 6mm, 厚约 $35\mu\text{m}$. 用 X 射线衍射鉴定样品为很好的非晶态. 样品的成分用化学分析法测定.

用提拉样品磁强计测量了样品的磁化强度与磁场和温度的关系. 测量温区为 1.5—300K, 磁场为 50—40000Oe. 整个测量过程用 Hp-85 微处理机自动控制, 磁矩的测量精度为 $3 \times 10^{-4}\text{emu}$, 温度的测量精度为 $\pm 0.2\text{K}$.

三、结果与讨论

图 1 表示非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金的磁化强度 M 与磁场 H 的关系, 在低温区, 样品的自发磁化强度 M_s 可从磁化曲线的高场部分线性外推到 $H=0$ 时得到. 在 1.5K 时, 推得样品的自发磁化强度 $M_s(1.5) = 45.2 \text{ emu/g}$. $M_s(1.5)$ 可近似作为 0K 时的自发磁化强度 $M_s(0)$, 我们假定 P, B 不具有磁性, 于是计算出样品中每个过渡金属原子的平均磁矩 $\bar{\mu} = 0.5 \mu_B$. 在非晶态合金中, 一般每个 Fe 原子的磁矩 $\bar{\mu}_{\text{Fe}} = 2.0 \mu_B$, 因而可得出样品中每个 Ni 原子的磁矩 $\bar{\mu}_{\text{Ni}} = 0.2 \mu_B$, 这个值与其它某些 FeNi 基非晶态合金中得到的结果是一致的.

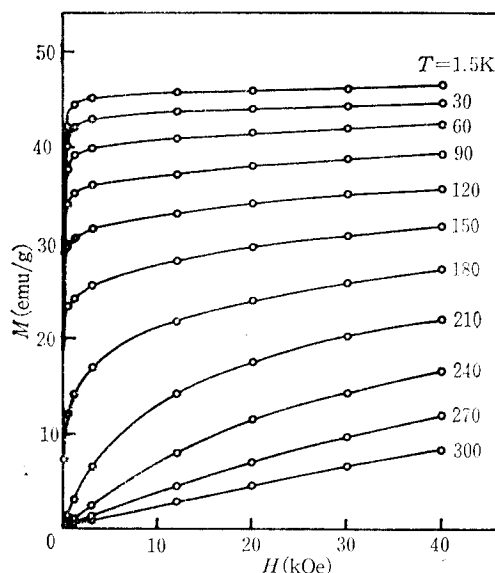


图 1

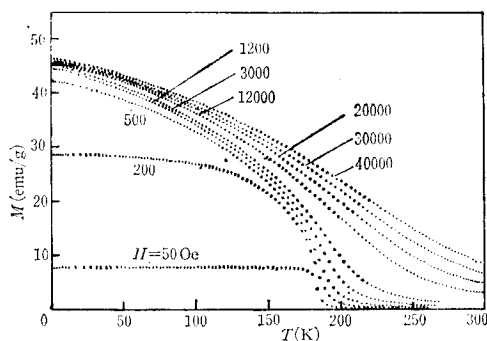


图 2

图 2 表示非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金的磁化强度 M 与温度 T 的关系. 按照 Landau-Ginsburg 理论, 在居里温度 T_c 附近, 磁化强度与磁场之间的关系可用下式描述^[9]:

$$A + BM^2 = H/M, \quad (4)$$

其中 A 和 B 为 Landau 系数. 对非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金, 作 M^2-H/M 图 (Arrott 图) 示于图 3. 由图 3 可见, M^2 与 H/M 之间不存在线性关系, 这是由于样品中 T_c 附近磁短程序的作用较为明显, 从图 2 也可以看出这一点. 因此, 用 Landau-Ginsburg 理论来分析非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金的实验结果是不合适的. Arrott 等人^[10]在研究 Ni 的临界现象时对方程 (4) 作了改进, 将 M^2 和 H/M 分别用 M^a 和 $(H/M)^b$ 来代替, 其中 a, b 为常数. 非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金, 在 $30 < T_c < 40 \text{ K}$ 的温区, 我们取 $a=2.6, b=0.6$, 对 $M^{2.6}$ 与 $(H/M)^{0.6}$ 作图, 结果为很好的线性关系, 如图 4 所示. 由图 4 直线外推到 $(H/M)^{0.6} = 0$ 和 $M^{2.6} = 0$ 时, 分别得到样品的自发磁化强度 M 和顺磁磁化率 χ_0 . 从图 4 可以看出, 样品的居里温度 $T_c = (180.3 \pm 0.2) \text{ K}$. 样品的自发磁化强度 M 与温度 T 的关系在图 5 给出.

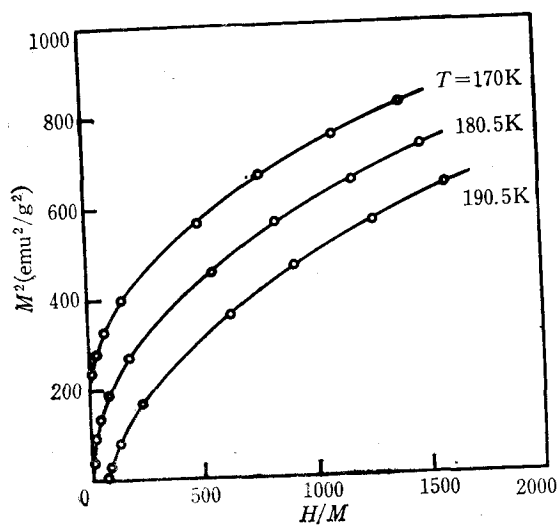


图 3

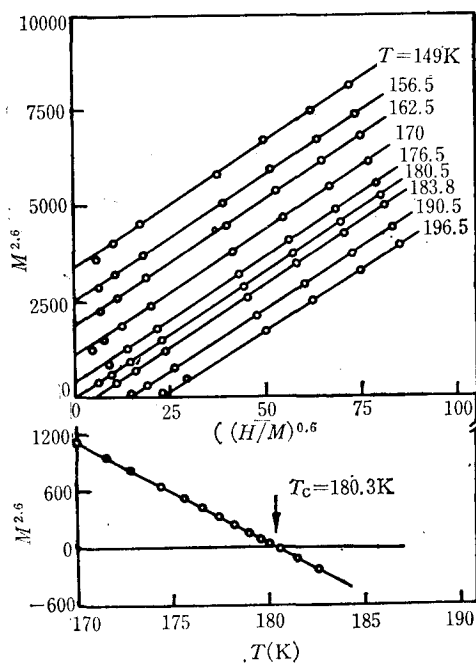


图 4

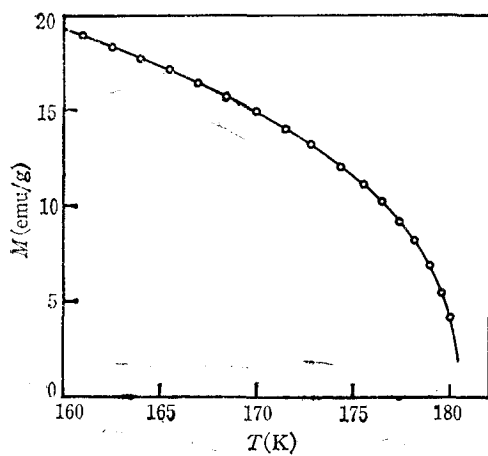


图 5

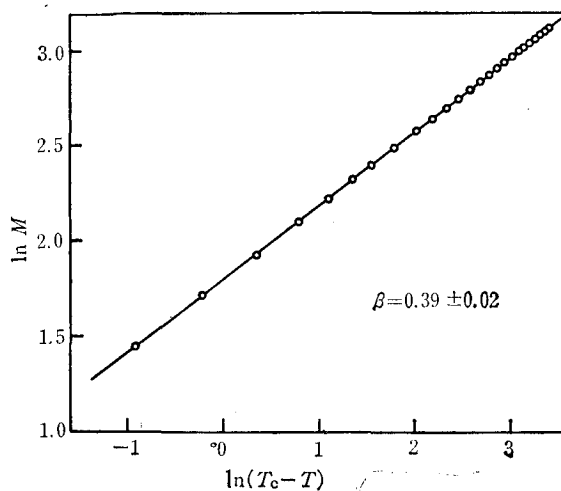


图 6

为了得到 T_c 附近的临界指数 β 和 r , 我们将方程(1)和(3)分别改写为

$$\ln M(0, T) = \beta \ln(T_c - T) + \text{常数}, \quad (5)$$

$$\ln \chi_0^{-1}(0, T) = r \ln(T - T_c) + \text{常数}. \quad (6)$$

由(5), (6)等式两边分别取对数示于图 6 和图 7. 由图 6 和图 7 直线的斜率分别计算出临界指数 $\beta = 0.39 \pm 0.02$, $r = 1.56 \pm 0.06$. 临界指数 δ 可由方程(2)得到, 在 $T = T_c$ 时, M 与 H 的关系可表示为

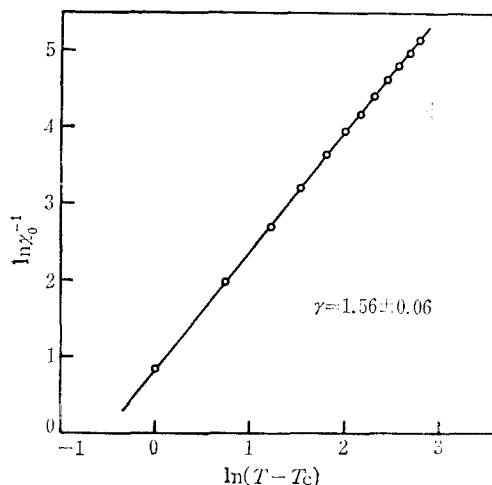


图 7

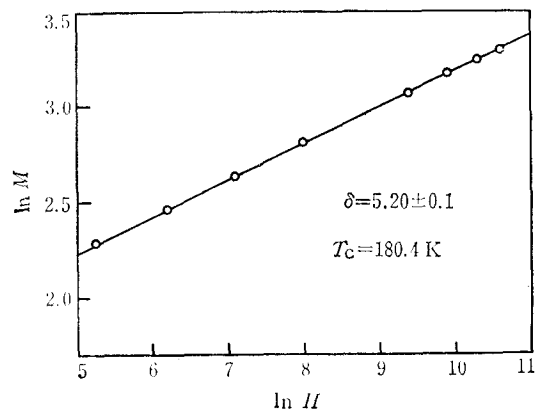


图 8

$$\ln M = \frac{1}{\delta} \ln H + \text{常数}. \quad (7)$$

非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金在 $T = 180.4\text{K}$ 时, $\ln M$ 与 $\ln H$ 为很好的线性关系, 如图 8 所示. 由图 8 直线的斜率得样品的临界指数 $\delta = 5.20 \pm 0.1$.

为作比较, 我们在表 1 中列出 $3d$ -Heisenberg model、晶态 Fe, Ni 以及某些非晶态 FeNi 基合金的临界指数. 由表 1 可见, 非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金的临界指数与其它非晶态合金的指数相近. 从表 1 可以看出, 非晶态铁磁材料的二级相变与晶态材料定性一致, 只是临界指数的数值有差别. 一般来说, 非晶态合金的临界指数 β, γ 值要比晶态的大, 而 δ 的值与晶态的相当或偏大.

实验结果表明, 非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金在居里温度附近的磁性可用临界指数 $\beta = 0.39 \pm 0.02$, $\gamma = 1.56 \pm 0.06$, $\delta = 5.20 \pm 0.1$ 来描述. β, γ, δ 的数值满足标度律

表 1 某些晶态和非晶态合金的临界指数和居里温度

成 分	β	γ	δ	$T_c(\text{K})$	文献
$3d$ -Heisenberg model	0.36	1.39	4.8		[11,12]
Ni	0.378 ± 0.004	1.34 ± 0.01	4.58 ± 0.02	627.4	[13]
Fe	0.37 ± 0.03	1.3 ± 0.06		1043	[14]
$\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$	0.39 ± 0.02	1.56 ± 0.06	5.20 ± 0.1	180.4	本工作
$\text{Fe}_{29}\text{Ni}_{49}\text{P}_{14}\text{B}_6\text{Si}_2$	0.4 ± 0.01	1.7 ± 0.1	5.25 ± 0.1	384.5	[3]
$\text{Fe}_{30}\text{Ni}_{45}\text{P}_{16}\text{B}_6\text{Al}_3$	0.39	1.58	5.05	330	[4]

$$\gamma = \beta(\delta - 1). \quad (8)$$

我们利用 $\alpha = (1 - \beta) - \gamma^{[15]}$ 的关系得到比热的临界指数 $\alpha = -0.95 \pm 0.08$.

样品对标度律的适合范围可用下面的磁状态方程来描述:

$$M(H, T)/\varepsilon^\beta = f_\pm(H/\varepsilon^{\beta\delta}), \quad (9)$$

其中 $\varepsilon = (T - T_c)/T_c$, 函数 f_+ 和 f_- 分别表示 $T > T_c$ 和 $T < T_c$ 的两个分支. 根据方程(9), 利用 $h = H/\varepsilon^{\beta\delta}$ 和 $m = M/\varepsilon^\beta$ 的实验数据, 对 $\ln h$ 和 $\ln m$ 作图示于图 9.

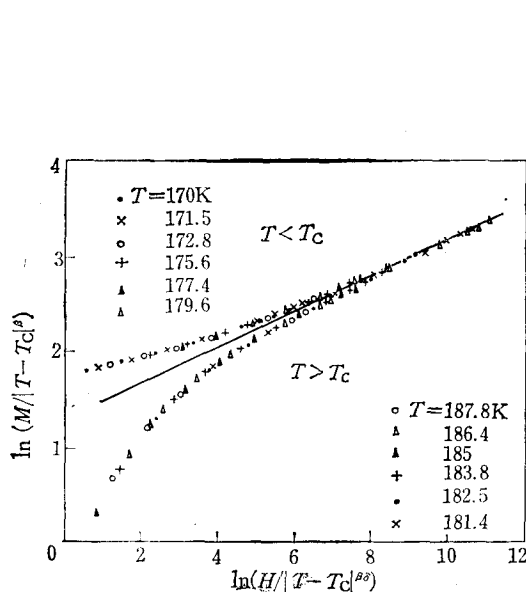


图 9

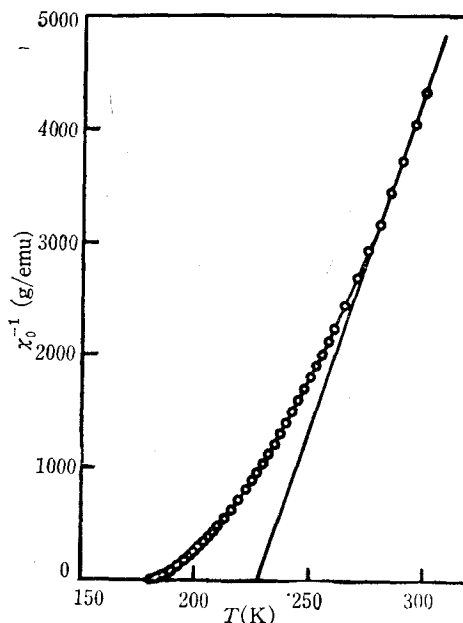


图 10

图 9 中二分支对称的直线的斜率, 即为 $T \rightarrow T_c$ 时的临界指数 $\delta = 5.20$. 由图 9 证实, 非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金也存在由 (9) 式所表示的磁状态方程, (9) 式适合的温度范围, 在 $T < T_c$ 时, $|\varepsilon| = 0.067$; 在 $T > T_c$ 时, $|\varepsilon| = 0.064$.

在 $T > T_c$ 时, 非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金的 χ_0^{-1} 与温度 T 的关系示于图 10. 由图 10 可见, 在 $T > 270\text{K}$ 时, 顺磁磁化率与温度的关系服从居里-外斯定律, 得到样品的顺磁居里温度 $\theta_p = 228\text{K}$. 实验结果表明, 在 $T > T_c$ 时, 从 $r = 1.56$ 转变到 $r = 1$ (居里-外斯定律) 的温度范围要比晶态材料宽得多. Kaul 等人^[5]认为, 这种宽临界区域的存在是由于非晶态合金中的化学不均匀性或磁性原子的极化而产生的大超顺磁性原子团造成的.

由图 9 中 $\chi_0^{-1}-T$ 曲线 ($T > 270\text{K}$) 的斜率得到样品的居里-外斯常数 $c = 1.56\text{K} \cdot \text{emu/g}$. 常数 c 与过渡金属原子的有效顺磁矩 p_{eff} 的关系可表示为

$$p_{\text{eff}} = \left(\frac{3k_B c}{N\mu_B} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

其中 N 为阿伏伽德罗数, k_B 为玻耳兹曼常数, μ_B 为玻尔磁子值. 由 (10) 式得到非晶态 $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ 合金的 $p_{\text{eff}} = 3.19\mu_B$. 样品中磁性原子在顺磁态时的磁矩高于铁磁态时的磁矩, 这与晶态 Fe , Ni 的情况是相似的.

参 考 文 献

- [1] T. Mizoguchi, K. Yamauchi and H. Miyajima, *J. Phys.*, **5**(1974), C4-287.
- [2] K. Yamada, Y. Ishikawa, Y. Endoh and T. Masumoto, *Solid State Commun.*, **16**(1975), 1335.
- [3] R. Malmhäll, G. Bäckström, K. V. Rao, S. M. Bhagat, M. Meichle and M. B. Salamon, *J. Appl. Phys.*, **49**(1978), 1727.
- [4] D. Beckman, K. Gramm, L. Lundgren, K. V. Rao, and H. S. Chen, *Solid State Commun.*, **39**(1981), 777.
- [5] S. N. Kaul and M. Rosenberg, *Phil. Mag.*, **B44**(1981), 357.
- [6] S. N. Kaul, *Phys. Rev.*, **B23**(1981), 1205.
- [7] S. N. Kaul, *Phys. Rev.*, **B24**(1981), 6550.
- [8] K. Moorjani and J. M. D. Coey, *Magnetic Glasses*, (Elsevier Science Publishers, 1984), p. 138.
- [9] A. Arrott, *Phys. Rev.*, **108**(1957), 1394.
- [10] A. Arrott and E. Noakes, *Phys. Rev. Lett.*, **19** (1967), 786.
- [11] M. E. Fisher, *Rev. Mod. Phys.*, **46**(1974), 597.
- [12] J. C. Le Guillon and J. Zinn-Justin, *Phys. Rev. Lett.*, **39**(1977), 95.
- [13] J. S. Kouvel and J. B. Comly, *Phys. Rev. Lett.*, **20**(1968), 1237.
- [14] M. F. Collins, V. J. Minkiewicz, R. Nathans, L. Passell and G. Shirane, *Phys. Rev.*, **179**(1969), 417.
- [15] F. E. Luborsky, *J. Magn. Magn. Mater.*, **7**(1978), 143.

CRITICAL PHENOMENA OF AMORPHOUS $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ ALLOYS

SHEN BAO-GEN ZHAO JIAN-GAO ZHAN WEN-SHAN CHEN JIN-CHANG
(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Results of the magnetization measurements performed on the amorphous $\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.5}\text{B}_{15.3}$ alloy in the temperature range 1.5 to 300 K in fields up to 40 kOe are reported. The behaviour near the Curie temperature is found to obey second-order phase transition laws with critical indices: $\beta=0.39\pm0.02$; $\gamma=1.56\pm0.06$; $\delta=5.20\pm0.1$, and the ferromagnetic Curie temperature $T_c=(180.4\pm0.2)\text{K}$. Within experimental error the critical indices satisfy the scaling law relationship $\gamma=\beta(\delta-1)$. The data satisfy the magnetic equation of state characteristic of a second-order phase transition in the temperature range 168 to 192 K. Above 270 K, the paramagnetic susceptibility obeys the Curie-Weiss law. From the Curie constant c , we obtain the effective magnetic moment $p_{\text{eff}}=3.19\mu_B$.