

非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金在居里 温度附近的磁性

胡 凤 霞 沈 保 根

中国科学院物理研究所磁学开放研究实验室,北京,100080

陈 金 昌

北京师范大学物理系,北京,100037

郭 慧 群

中国科学院物理研究所,磁学开放研究实验室,北京,100080

1991 年 1 月 7 日收到

本文研究非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金在居里温度附近的磁性,样品的磁特性符合二级相变规律. 得到临界指数 $\beta = 0.45 \pm 0.02$, $\gamma = 1.9 \pm 0.1$, $\delta = 5.13 \pm 0.05$. $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金的居里温度为 $T_c = (186.7 \pm 0.2)\text{K}$. 临界指数 β, γ, δ 满足 $\gamma = \beta(\delta - 1)$ 关系,但临界指数值都偏离三维 Heisenberg 模型的理论值,这种行为可能起源于非晶态合金磁的不均匀性. 讨论了 Kouvel-Fisher (K-F) 参数 $\gamma(T)$ 对温度 T 的依赖关系.

PACC: 7540; 7550B; 7550K

一、引 言

Fe 基非晶态合金在居里温度附近的磁性研究已有不少报道^[1-3]. 表 1 列出某些 Fe 基非晶态合金的临界指数和居里温度. 对于 Co 基非晶态材料,居里温度附近磁性研究报道不多. 我们制备了非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金,它具有低居里温度和高晶化温度的特点,晶化温度高出居里温度大约 570K,便于在较宽的温区测量和研究.

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.

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

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

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

其中 χ_0 为顺磁磁化率. 三个临界指数满足

$$\gamma = \beta(\delta - 1) \quad (4)$$

的关系,其中仅有两个是独立的变量. 从 $T \approx T_c$ 到 $T \gg T_c$ 温度范围内, K-F 参数对温度 T 的依赖关系为^[6]

表 1 某些 Fe 基非晶态合金的临界指数和居里温度

成分	γ	β	δ	$T_c(\text{K})$	文献
3d-Heisenberg 模型	1.39	0.36	4.8		[3]
$\text{Fe}_{74}\text{W}_9\text{B}_{17}$	1.44 ± 0.02	0.38 ± 0.03	4.82 ± 0.1	353.55 ± 0.2	[1]
$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$	1.31 ± 0.02	0.38 ± 0.01	4.46 ± 0.04	519.9 ± 0.2	[2]
$\text{Fe}_{13}\text{Ni}_{67.2}\text{P}_{4.3}\text{B}_{13.3}$	1.56 ± 0.06	0.39 ± 0.02	5.20 ± 0.1	180.4 ± 0.1	[3]
$\text{Fe}_{29}\text{Ni}_{49}\text{P}_{14}\text{B}_6\text{Si}_2$	1.7 ± 0.1	0.40 ± 0.01	5.25 ± 0.1	384.5	[4]
$\text{Fe}_{89.5}\text{Zr}_{10.5}$	2.00 ± 0.09	0.47 ± 0.01	5.31 ± 0.09	224.0 ± 0.4	[5]
$\text{Fe}_{96}\text{Zr}_{10}$	1.79 ± 0.07	0.44 ± 0.01	5.10 ± 0.08	230.0 ± 0.3	[5]
$(\text{Fe}_{0.96}\text{Ni}_{0.04})_{90}\text{Zr}_{10}$	1.82 ± 0.09	0.44 ± 0.01	5.17 ± 0.06	281.0 ± 0.3	[5]

$$\gamma(T) = (T - T_c)\chi(T) \frac{d\chi^{-1}}{dT}. \quad (5)$$

我们测量了非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金的 $M(H, T)$ 关系。求出样品的临界指数 β, γ, δ 和 K-F 参数 $\gamma(T)$ 。

二、实 验

将纯度均为 99.9% 的 Co, Cr, Zr 原材料按原子百分比 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 配料, 在电弧炉中熔炼成均匀的合金, 采用单辊急冷技术制成非晶薄带, 带宽为 1—2mm, 厚约为 $30 \mu\text{m}$ 。用 X 射线衍射鉴定样品为非晶态。

用提拉样品磁强计测量样品的磁化强度与磁场和温度的关系, 共测定 9 条曲线。测量温区均为 1.5—300K, 磁场为 $53\text{Oe} \leq H \leq 40000\text{Oe}$, 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 0.2K。

三、实验结果与讨论

在均匀的铁磁体中, Landau^[7] 提出的吉布斯自由能可表示为如下级数:

$$\phi = \frac{1}{2} AM^2 + \frac{1}{4} BM^4 - HM. \quad (6)$$

取自由能极小值 $\delta_m \phi = 0$ 得状态方程

$$A + BM^2 = H/M. \quad (7)$$

作 M^2-H/M 曲线应为线性的。图 1 画出非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金的 M^2-H/M 曲线, 不存在线性关系。Arrott 等人^[8] 在研究 Ni 的临界现象时对方程 (7) 作了改进, 将 M^2 和 H/M 分别用 $M^{1/\beta}$ 和 $(H/M)^{1/\gamma}$ 来代替, 其中 β, γ 为常数。将 $M^{1/\beta}$ 对 $(H/M)^{1/\gamma}$ 作图, 并选择合适的 β, γ 数值, 以得到最佳的线性关系, 这样便可以唯一确定 β, γ 数值。对于非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金, 取 $1/\beta = 2.20, 1/\gamma = 0.53$, 作 $M^{1/\beta}-(H/M)^{1/\gamma}$ 曲线如图 2, 结果为很好的线性关系。得到 $\beta = 0.45 \pm 0.02, \gamma = 1.89 \pm 0.08$ 。由图 2 直线外推到 $(H/M)^{0.53} = 0$ 和 $M^{2.20} = 0$, 由截距分别计算得到样品的自发磁化强度 M_s 和顺磁磁化

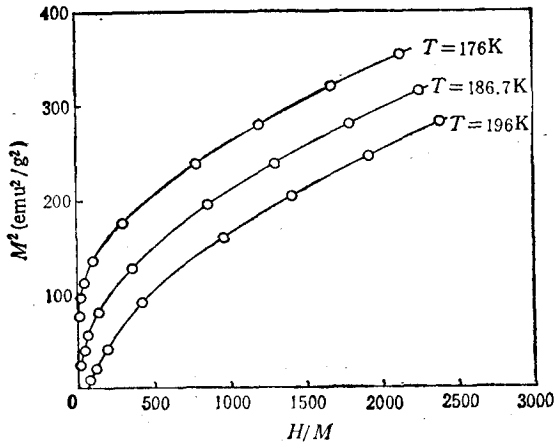


图 1 M^2-H/M 的关系

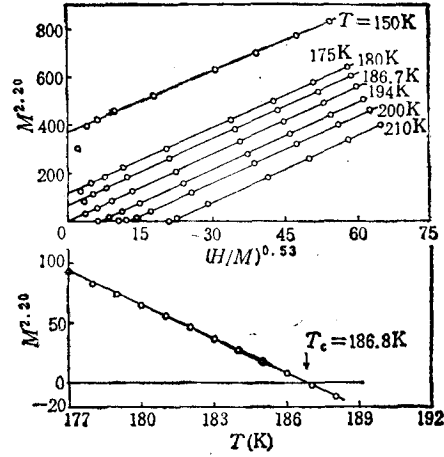


图 2 $M^{2.20}$ 与 $(H/M)^{0.53}$ 的关系

下半部分是 $M_s^{2.20}$ 与 T 的关系,
 M_s 为自发磁化强度

率 χ_0 , 同时将 $M_s^{2.20}$ 对温度 T 作图, 则得居里温度 $T_c = 186.8K$, 如图 2.

为进一步证实临界指数 β, γ 的准确性, 将方程(1),(3)等号两边取对数得

$$\ln M(0, T) = \beta \ln(T_c - T) + \text{常数}, \quad (8)$$

$$\ln \chi_0^{-1}(0, T) = \gamma \ln(T - T_c) + \text{常数}. \quad (9)$$

$M(0, T), \chi_0(0, T)$ 由图 2 得到, 作 $\ln M(0, T)$ 与 $\ln(T_c - T)$ 和 $\ln \chi_0^{-1}(0, T)$ 与 $\ln(T - T_c)$ 的关系曲线分别示于图 3 和图 4. 图 3 线性很好, 直线斜率即为临界指数 β 的值, $\beta = 0.43 \pm 0.02$; 由图 4 求得临界指数 γ 的值大约 $\gamma = 1.90 \pm 0.1$, 图 4 所示在高温区线性关系稍有偏离. 但在误差范围内, 临界指数 β 和 γ 的值与从图 2 得到的结果基本一致.

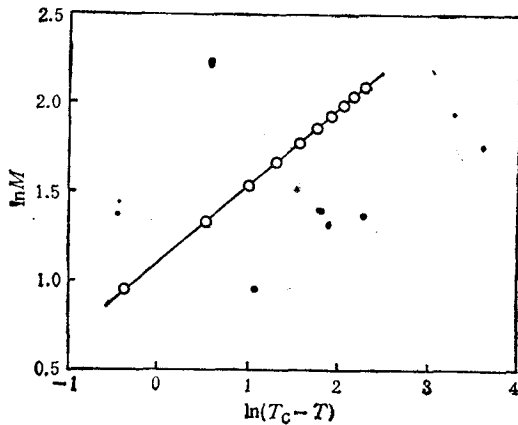


图 3 $T < T_c$ 时 $\ln M$ 与 $\ln(T_c - T)$ 的关系
斜率即为临界指数 β 值

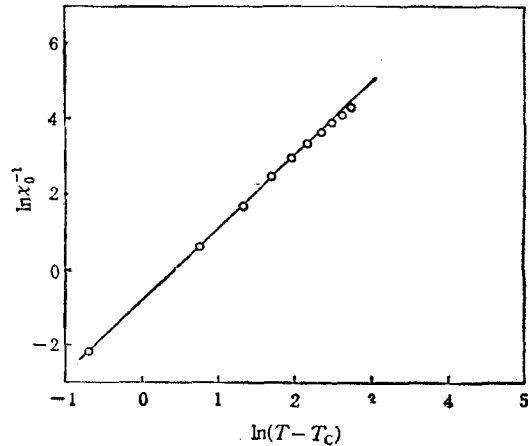


图 4 $T > T_c$ 时 $\ln \chi_0^{-1}$ 与 $\ln(T - T_c)$ 的关系
斜率即为临界指数 γ 值

在 $T = T_c$ 时, 由方程(2)等号两边取对数

$$\ln M = \frac{1}{\delta} \ln H + \text{常数}. \quad (10)$$

将不同温度下的 $\ln M$ 对 $\ln H$ 作图,如图 5. 高于居里温度的曲线具有负的曲率, 低于居里温度的曲线具有正的曲率, 在其间具有零曲率的曲线恰好对应于居里温度 T_c . 用计算机采用最小二乘法求得一条线性最好的直线, 对应的温度即居里温度 $T_c = 186.7\text{K}$, 从这条曲线斜率计算得到临界指数 $\delta = 5.13 \pm 0.05$. 这样得到的 T_c 值与图 2 得到的结果 ($T_c = 186.8\text{K}$) 一致.

实验结果表明, 非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金在居里温度附近的磁性可用临界指数 $\beta = 0.45 \pm 0.02$, $\gamma = 1.9 \pm 0.1$, $\delta = 5.13 \pm 0.05$ 来描述. β, γ, δ 的数值在实验误差范围内满足标度律(4)式. 利用 $\alpha = 2(1 - \beta) - \gamma$ 关系得到比热的临界指数 $\alpha = -0.80 \pm 0.12$.

对于三维 Heisenberg 模型, 临界指数的值见表 1. 显然这里得到的非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金的临界指数要高得多. 临界指数偏大的现象过去也有不少报道^[5,9], 表 1 中列出的非晶态富 Fe 的 FeZr 合金等临界指数皆偏大. 这种现象可能起源于合金中的磁不均匀性, 这是由于在非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金中存在铁磁耦合和反铁磁耦合两种微团, 与三维 Heisenberg 模型指数值相比, 磁的不均匀性导致临界指数增高.

下面用 K-F 方法讨论 $T > T_c$ 时的情况, 从图 2 得到零场磁化率 χ_0 , 将 χ_0^{-1} 对 T 作图, 如图 6. 显然 $\chi_0^{-1}-T$ 曲线存在很大的弯曲, 在高温区 χ_0^{-1} 与 T 的关系成线性, 符合简单的居里-外斯关系. 通过方程(5)可求得 γ , K-F 指数 γ 与 T 的关系如图 7, γ 随 T 的变化是非单调的, 首先随 T 的增加而上升, 经过一个极大值然后缓慢减少, 这是无序系统的一个普遍现象, 已经有不少报道^[6,11]. 无序系统不同于有序系统, 大部分有序系统的 $\gamma(T)$ 只随 T 单调下降. 对于无序系统 K-F 参数 $\gamma(T)$ 的非单调变化与平均分子场理论的预言一致^[10,11], 也与用 Monte-Carlo 方法所得的结果相符合^[1,11]. 在非晶态铁磁体系中, 必须同时考虑长程热关联长度和局域自旋涨落所导致的磁关联长度, 所以 $\gamma(T)$ 随

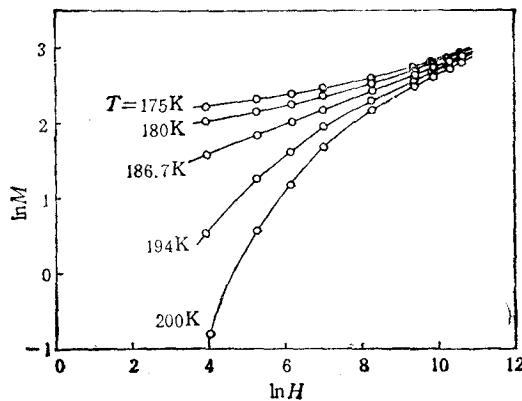


图 5 不同温度下的 $\ln M$ 与 $\ln H$ 关系曲线

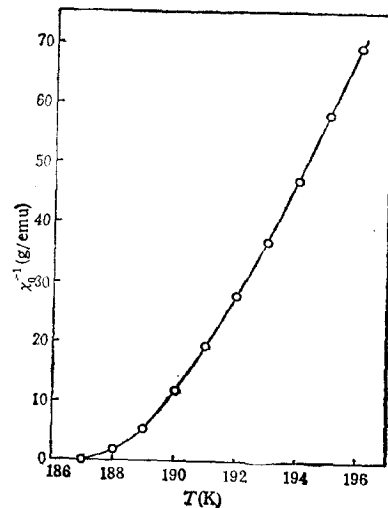
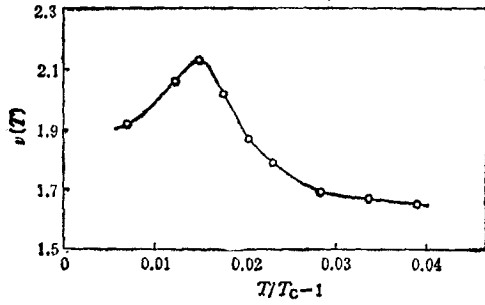
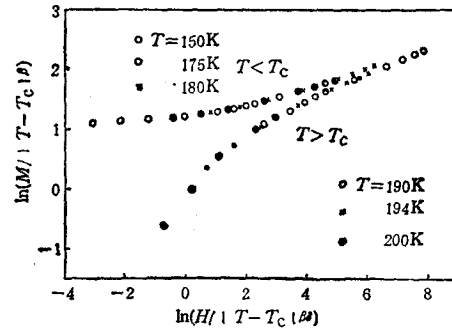


图 6 零场磁化率倒数 χ_0^{-1} 与温度 T 的关系

图7 K-F 参数 ν 与温度 T 的关系图8 $T > T_c$ 和 $T < T_c$ 时的 $\ln m$ 与 $\ln h$ 的关系

T 变化非单调规律取决于磁关联与热关联两者竞争结果。

以上所有理论的成立必须满足下面的磁状态方程^[3]:

$$M(H, T) / \varepsilon^\beta = f_\pm(H / \varepsilon^{\beta\delta}), \quad (11)$$

其中 $\varepsilon = |T - T_c|$, 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(11), 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8。由图8证实, 非晶态 $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ 合金也满足磁状态方程(11)。

本工作是北京市自然科学基金资助的课题。

- [1] W. U. Keilner, T. Albrecht, M. Fähnle and H. Kronmüller, *J. Magn. Magn. Mat.*, **62**(1986), 169.
- [2] S. N. Kaul, *Phys. Rev.*, **B24**(1981), 6550.
- [3] 沈保根、赵见高、詹文山、陈金昌, *物理学报*, **35**(1986), 124.
- [4] R. Malmhäll, G. Bäckström, K. V. Rao, S. M. Bhagat, M. Melchle and M. B. Salamon, *J. Appl. Phys.*, **49**(1978), 1727.
- [5] K. Wünschun and M. Rosenberg, *J. Appl. Phys.*, **61**(1987), 4401.
- [6] M. Seeger and H. Kronmüller, *J. Magn. Magn. Mat.*, **78**(1989), 393.
- [7] A. Arrott, *Phys. Rev.*, **108**(1957), 1394.
- [8] A. Arrott and E. Noakes, *Phys. Rev. Lett.*, **19**(1967), 786.
- [9] M. Olivier, J. O. Strom-Olsen, Z. Altounian and G. Williams, *J. Appl. Phys.*, **53**(1982), 7696.
- [10] M. Fähnle and G. Herzer, *J. Magn. Magn. Mat.*, **44**(1984), 274.
- [11] M. Fähnle, *J. Magn. Magn. Mat.*, **65**(1987), 1.

MAGNETIC PROPERTIES OF AMORPHOUS $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ ALLOYS NEAR THE CURIE TEMPERATURE

Hu Feng-xia Shen Bao-gen

Magnetism Laboratory, Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080

Chen Jin-chang

Department of Physics, Beijing Teacher's College, Beijing 100037

Guo Hui-qun

Magnetism Laboratory, Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing, 100080

(Received 7 January 1991)

ABSTRACT

Magnetic properties of the amorphous $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{20}\text{Zr}_{10}$ alloys near the Curie temperature are reported. The behavior is found to obey second-order phase transition laws with critical indices: $\beta = 0.45 \pm 0.02$, $\gamma = 1.9 \pm 0.1$, $\delta = 5.13 \pm 0.05$, and the ferromagnetic Curie temperature $T_c = (186.7 \pm 0.2)\text{K}$. The critical indices satisfy the scaling law relationship $\gamma = \beta(\delta - 1)$, but their values deviated with the 3D-Heisenberg model. This behavior may arise from the magnetically inhomogeneous behavior of the alloy. Finally, the temperature dependence of the Kouvel-Fisher exponent $\gamma(T)$ is discussed.

PACC: 7540; 7550B; 7550K